



## ارزیابی مدل‌های احتراقی در احتراق محیط متخلخل با نسبت هوای اضافی مختلف

ایمان محمدی، حسین عجم\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۰۸  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۲۱  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۰

### کلمات کلیدی:

مشعل محیط متخلخل  
سینتیک شیمیایی  
تخلخل متغیر پیوسته  
احتراق متقارن محور  
نسبت هوای اضافی

**خلاصه:** در این مقاله به بررسی همزمان اثرات نسبت هوای اضافی و مکانیزم‌های احتراقی بر روی دما و انتشار گونه‌ها در مشعل‌های محیط متخلخل با تغییر تخلخل پیوسته پرداخته شده است. برای این هدف از سینتیک‌های چند مرحله‌ای استفاده شده است و اثرات آن‌ها بر روی پروفیل دما، کسر جرمی گونه‌های اصلی و انتشار آلاینده‌ها برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر مسأله شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم، معادلات انرژی فاز گاز و جامد و معادله بقای گونه‌های شیمیایی با استفاده از روش حجم محدود حل شده و از الگوریتم سیمپل برای ارتباط بین سرعت و فشار استفاده شده است. نتایج نشان داد که به ازای نسبت هوای اضافی ۱/۵، نتایج ناشی از مکانیزم‌های احتراقی دارای دقت یکسان در پیش بینی پروفیل دما و کسر جرمی گونه‌های اصلی هستند و بعد از آن برای مقادیر بیشتر نسبت هوای اضافی نتایج ناشی از مکانیزم‌های احتراقی اختلاف کمی را نشان می‌دهد. این در حالی است که بیشترین اختلاف در نتایج برای حالت استوکیومتری مشاهده می‌شود. همچنین در شرایط استوکیومتری میزان انتشار مونو اکسید نیتروژن با استفاده از مکانیزم احتراقی  $GRI-3.0$  مقدار صفر پیش بینی می‌شود و برای بقیه ضرایب نسبت هوای اضافی مقدار آن از مرتبه بزرگی خواهد بود.

### ۱- مقدمه

را به وجود می‌آورند، بسیار پیچیده می‌شود. بنابراین در این زمینه بسیاری از کارهای تحقیقاتی که انجام شده است، از واکنش‌های تک مرحله‌ای و یا مدل کردن فرآیند واکنشی احتراقی به عنوان یک منبع تولید حرارت، استفاده شده است. سینتیک تک مرحله‌ای قطعاً نتیجه دلخواه و دقت کافی را نخواهد داشت. همچنین این مکانیزم قادر نخواهد بود که پروفیل دمایی دقیقی ایجاد نماید و نیز به علت عدم وجود واکنش‌های غیر کاملی که منجر به تشکیل کربن مونو اکسید<sup>۱</sup> و مونو اکسید نیتروژن<sup>۲</sup> می‌شود، قادر به پیش بینی میزان این آلاینده‌ها نخواهد بود. به همین دلیل غیر ممکن خواهد بود تا از الگوی ساده سینتیک شیمیایی که بتواند واکنش‌های موجود را به

در شبیه سازی فرآیند احتراق باید تمامی واکنش‌های احتمالی که در حین فرآیند به وجود می‌آیند و اجزایی را تشکیل می‌دهند، در نظر گرفته شوند. یکی از اساسی‌ترین مشکلاتی که در مورد استفاده از جزییات مکانیزم واکنش وجود دارد محدود بودن تعداد محاسباتی است که به هنگام شبیه سازی یک نمونه واقعی بدلیل نبود نظم خاصی در قرارگیری حفره‌ها و حرکت چند بعدی سیال در داخل آن‌ها و تغییر غلظت و دمای آن و همچنین ضرایب نامشخص انتقال حرارت مؤثر جابجایی و تشعشع، به وجود می‌آید. علاوه بر این مدل کردن احتراق در داخل ماده متخلخل به دلیل وجود ترم تشعشع غیر خطی و انتقال حرارت جابجایی بین فاز گاز و جامد که معادلات پیچیده‌ای

1 - Monoxide Carbon (CO)  
2 - Monoxide Oxygen (NO)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.ajam@um.ac.ir



از ورودی برای مقادیر طول مشخصه (قطر حفره ریزتر) اتفاق می افتد و همچنین ماکزیمم دمای جامد برای مقادیر بزرگتر ضریب جذب، بیشتر می باشد. لاری<sup>۸</sup> [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. حسین پور و حدادی [۷]، اثرات پارامترهای کوره متخلخل را بر روی احتراق و تشکیل آلاینده ها با استفاده از یک مدل یک بعدی و سینتیک چند مرحله ای را بررسی نمودند. آودیک<sup>۹</sup> و همکاران [۸]، به مطالعه تجربی احتراق در یک محیط متخلخل برای مصارف خانگی پرداختند. آن ها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می تواند توان حرارتی را تا ۸ برابر مشعل های معمولی افزایش دهد و مقادیر CO و NO<sub>x</sub> را کاهش دهد. بیدی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۹]، به بررسی عددی پایداری شعله و بهینه سازی مشعل از نظر تولید آنتروپی پرداخته اند. آن ها مشاهده کردند که شعله بیشتر در نیمه بالادست محیط متخلخل پایدار می شود و تولید آلاینده در این حالت کمتر از وقتی است که شعله در نیمه پایین دست جریان پایدار می شود. پانتانگی<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۰]، و ماتکومار<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۱]، اقدام به ساخت یک مشعل دو لایه کردند که در کار پانتانگی ناحیه پیش گرمایش توسط توپ های آلومینیومی ۵ میلیمتری و ناحیه احتراق از سیلیکون کاربید با ۹۰ درصد تخلخل و در کار ماتکومار ناحیه پیش گرمایش از سرامیکی با ضخامت ۱۰ میلیمتر و تخلخل ۴۰ درصد و ناحیه احتراقی مشابه تشکیل شده بود. آن ها تأثیر قطر مشعل، ضخامت جدار قالب مشعل و طول قالب های متخلخل را مورد آنالیز قرار دادند و دریافتند که این تغییر در ناحیه پیش گرمایش سبب افزایش راندمان می گردد. محمدی و حسین پور [۱۲]، به بررسی اثرات مکانیزم های شیمیایی و دمای دیواره بر روی عملکرد مشعل های محیط متخلخل با تخلخل ثابت در دو ناحیه ی پیش گرمایش و احتراقی پرداختند. آن ها دریافتند که مکانیزم های شیمیایی تأثیر چندانی بر روی پروفیل دمایی نخواهد داشت و هر چه مکانیزم های شیمیایی کامل ترمی شود میزان انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک تر می گردد. آن ها همچنین دریافتند که با افزایش دمای دیواره مقدار ماکزیمم

صورت تعداد کمی از اجزا بیان کند، استفاده کنیم. توسعه و بهینه سازی مشعل های محیط متخلخل مستلزم شبیه سازی های تجربی و عددی است که شبیه سازی آزمایشگاهی (تجربی) نیازمند صرف وقت و هزینه خواهد بود. همچنین در اندازه گیری های آزمایشگاهی، دقت اندازه گیری و تنوع بسیار محدود می باشد. لذا این دلایل لزوم استفاده از بررسی های عددی را به خوبی نشان می دهد.

برینر<sup>۱</sup> [۱] و همکاران با لحاظ یک سیستم دو بعدی همراه با در نظر گرفتن پدیده احتراق با حل معادلات حاکم، مشخصه های حرارتی مشعل های متخلخل را تعیین نمودند. در این مطالعه از هیچ مدلی جهت تعیین شار تشعشی در داخل مشعل استفاده نگردید. نتایج تطابق خوبی را بین داده های تجربی و حل عددی نشان داد. مالیکو<sup>۲</sup> و پیرا [۲] تأثیر خواص تشعشی محیط های متخلخل را بر عملکرد مشعل های متخلخل استوانه ای شکل در حالت دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند اگر از تشعشع صرف نظر شود پروفیل دمای پیش بینی شده با مقدار آزمایش تطابق خوبی نمی یابد. چانگ جن<sup>۳</sup> [۳] از یک مدل عددی یک بعدی برای بررسی اثرات افزودن هیدروژن بر روی احتراق متان<sup>۴</sup> در یک کوره متخلخل استفاده نمود. وی دریافت که با افزایش هیدروژن در سوخت ضخامت شعله کاهش خواهد یافت. تالاکدر<sup>۵</sup> و همکاران [۴]، رفتار حرارتی مشعل های متخلخل را در دو حالت کارکرد دائم و گذرا با در نظر گرفتن یک سیستم دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثرات نشر انرژی تشعشی توسط محیط متخلخل نیز مد نظر قرار گرفت و از روش ابعاد فرو ریخته<sup>۶</sup> جهت تعیین توزیع شار تشعشی در داخل مشعل متخلخل کمک گرفته شد. آن ها دریافتند که بیشترین میزان تشعشع خروجی برای دیوارهای سیاه اتفاق می افتد و همچنین در مقایسه با تشعشع و هدایت جامد می توان از هدایت مخلوط گاز صرف نظر نمود. میشر<sup>۷</sup> و همکاران [۵]، برای آنالیز حرارتی مشعل های متخلخل تابشی چهار گوش یک سیستم دو بعدی با ۱۶۴ واکنش و ۲۰ گونه شیمیایی در نظر گرفتند و معادلات انرژی جداگانه ای برای فاز گاز و جامد حل شد. آن ها نشان دادند که تعادل حرارتی در فاصله کوتاهی

- 
- 1 - Brenner, G
  - 2 - Malico
  - 3 - Chung jen
  - 4 - Methane (CH<sub>4</sub>)
  - 5 - Talukdar, P
  - 6 - Collapsed dimension
  - 7 - Mishra S.C

- 
- 8 - Lari K
  - 9 - Avdic
  - 10 - Bidi
  - 11 - Pantangi
  - 12 - Muthukumar

تا اثرات نسبت هم ارزی و تغییر سینتیک شیمیایی را بر عملکرد مشعل‌های محیط متخلخل همراه با تخلخل متغیر مورد بررسی قرار دهیم که برای این کار برنامه‌ای به زبان فرترن برای حالت دو بعدی و متقارن محور ایجاد شده است. امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی در عرصه‌ی ساخت مواد متخلخل، امکان تولید موادی با تخلخل متغیر دور از دسترس نخواهد بود [۱۸]. استفاده از تخلخل متغیر امکان تنظیم دمای ماکزیمم شعله را فراهم می‌آورد که به تبع آن می‌توان تولید مواد آلاینده را نیز کاهش داد. همچنین در این کار نتایج محاسبات با هر یک از سه مکانیزم احتراقی  $GRI-2/11$ <sup>۲</sup> (۴۹ گونه و ۲۷۹ واکنش شیمیایی)،  $GRI-3/0$  (۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی) و مکانیزمی با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

## ۲- فرضیات بکار رفته در حل مسئله

- ۱- جریان سیال پایا، آرام و نیوتنی است.
- ۲- با توجه به تغییر تخلخل، برای محاسبه‌ی افت فشار و بقیه متغیرها در ماتریس متخلخل همچنان معادله‌ی داریسی<sup>۳</sup> و فورهایمر<sup>۴</sup> برقرار است.
- ۳- اثرات نیروی حجمی ناچیز است.
- ۴- از انتقال حرارت تشعشی فاز گاز در برابر ماتریس جامد صرف‌نظر شده است.
- ۵- اثرات سورت<sup>۵</sup> و دوفور<sup>۶</sup> صرف نظر شده است.
- ۶- از اثرات کاتالیزوری ماده‌ی متخلخل در دمای بالا صرف نظر شده است.
- ۷- شرط عدم تعادل بین فاز جامد و گاز در نظر گرفته شده است که به وسیله ضریب انتقال حرارت جابجایی که دلالت بر انتقال حرارت جابجایی بین دو فاز دارد، به هم مرتبط می‌شوند.

## ۳- معادلات حاکم

با توجه به فرضیات مسئله معادلات حاکم به صورت زیر می‌باشند

$$[3 \text{ و } 5 \text{ و } 21-19]$$

دما و به تبع آن انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن در خروجی مشعل افزایش می‌یابد. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان [۱۳]، 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 به جای تخلخل ثابت در دو ناحیه پیش گرمایش و احتراقی، مقدار ماکزیمم دما و به تبع آن میزان انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن در خروجی مشعل کاهش می‌یابد. وو<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴]، یک مشعل محیط متخلخل با شعله مسطح گاز مایع را ساختند. انتخاب این حالت امکان رسیدن به دماهای بالاتر شعله را می‌دهد که منجر به انتقال حرارت بالاتری می‌شود. محیط متخلخل از جنس ساچمه‌های برنزی انتخاب شده بود. آن‌ها به طور آزمایشگاهی ثابت کردند که مشعل متخلخل دارای دامنه تنظیم توان بیشتری در مقایسه با مشعل شعله آزاد می‌باشد. هاشمی و همکاران [۱۵]، به بررسی پدیده برگشت شعله در مشعل‌های متخلخل پرداختند، آن‌ها با تغییر عواملی نظیر نسبت هم ارزی، نرخ آتش و ویژگی‌های محیط متخلخل پرش و نفوذ شعله در داخل محیط متخلخل را مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. در ادامه بررسی‌ها در مورد مشعل متخلخل به استفاده از محیط متخلخل برای پایدار سازی شعله غیر پیش آمیخته پرداختند، آن‌ها در نسبت هم ارزی ۰.۶۳ شعله پایدار به دست آوردند که تقریباً با نسبت هم ارزی تشکیل شعله پیش آمیخته در مشعل متخلخل برابر است [۱۶]. گنجعلیخان نسب و همکاران [۱۷]، به مطالعه‌ی اثرات پارامترهای مختلف مانند ضخامت اپتیکی، ضریب تخلخل، نسبت هوای اضافی و نسبت پخش بر روی بازده تشعشع در مشعل‌های محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش ضخامت اپتیکی چون جذب انرژی به وسیله‌ی فاز جامد افزایش می‌یابد، بازده تشعشع نیز افزایش می‌یابد 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 می‌شود، همچنین با افزایش نسبت هوای اضافی و نسبت پخش، بازده تشعشع کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت هوای اضافی، دمای بیشینه و همچنین مقدار آلاینده‌های کربن مونو اکسید و مونو اکسید نیتروژن در محصولات احتراق کاهش می‌یابد. در کار حاضر سعی بر این است

2 - Gas Research Institute

3 - Darcy

4 - Forchheimer

5 - Soret

6 - Dufour

1 - Wu

۳-۱- معادله‌ی پیوستگی<sup>۱</sup>

با در نظر گرفتن فرض عدم تعادل موضعی بین فاز جامد و گاز، معادلات جداگانه‌ای را برای فاز گاز و جامد خواهیم داشت.

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

۳-۴- معادله‌ی انرژی فاز گاز

$$\nabla \cdot (\rho V_s C_p T_f) = \nabla \cdot (\varepsilon \lambda_f \nabla T_f) + H(T_s - T_f) + \varepsilon \sum_{K=1}^{N_s} \dot{w}_k h_k \quad (8)$$

که  $\rho$  چگالی مخلوط گاز،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز،  $T_f$  دمای مخلوط گاز،  $\varepsilon$  تخلخل ماده متخلخل،  $\lambda_f$  ضریب هدایت گرمایی،  $H$  ضریب انتقال گرمای حجمی، دمای ماده متخلخل،  $\dot{w}_k$  مربوط به نرخ تولید یا از بین رفتن اجزاء شیمیایی به علت واکنش‌های شیمیایی و  $h_k$  آنتالپی تشکیل گونه‌ی  $K$  ام می‌باشد. برای تعیین ضریب انتقال حرارت حجمی  $H$  از رابطه آن با ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به سطح مقطع به ازای واحد حجم ماده متخلخل ( $a_v$ ) استفاده می‌شود [۲۷-۲۴].

$$H = a_v h$$

تعیین  $a_v$  با توجه به اطلاعات سازندگان سرامیک و یا اندازه گیری میسر خواهد شد [۲۸]، که در رابطه زیر به یک نمونه اشاره خواهد شد.  $PPC$  تعداد حفره‌ها به ازای یک سانتیمتر طول محیط متخلخل)

$$a_v = 169.4 \text{ PPC}$$

۳-۵- معادله‌ی انرژی فاز جامد

$$\nabla \cdot ((1-\varepsilon)\lambda_{eff_i} \nabla T_s) + H(T_f - T_s) - Q_R = 0 \quad (9)$$

انتقال حرارت تشعشع در داخل ماتریس متخلخل به وسیله  $\lambda_{eff}$  و بین فاز جامد و محیط اطراف به وسیله  $Q_R$  مدل می‌شود. ضریب انتقال گرمای هدایت مؤثر ( $\lambda_{eff_i}$ ) شامل همه‌ی مکانیزم‌های اصلی انتقال انرژی در محیط متخلخل می‌شود و به هدایت حرارتی فازهای جامد و گاز، خواص تشعشعی فاز جامد، فشار، دما، تخلخل و هندسه ماتریس متخلخل (شامل قطر مشخصه، شکل حفره و غیره) بستگی دارد [۲۱]. ضریب انتقال گرمای هدایت مؤثر ( $\lambda_{eff_i}$ ) بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۰ و ۲۱ و ۲۹-۳۱].

$$\lambda_{eff_i} = \lambda_{eff}^{\circ} + \frac{\dot{m}}{A} \cdot \frac{C_p \cdot d_m}{K_i} \quad (10)$$

۳-۲- معادله‌ی مومنتم<sup>۲</sup> در جهت  $x$

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

۳-۳- معادله‌ی مومنتم در جهت  $r$

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

که  $\mu$  لزجت دینامیکی مخلوط گازها،  $\rho$  چگالی مخلوط گازها و  $\frac{\partial P}{\partial r}$  و  $\frac{\partial P}{\partial x}$  به ترتیب افت فشار به علت لزجت در جهت‌های  $x$  و  $r$  می‌باشند. در این معادلات ترم مربوط به افت فشار در داخل ماتریس متخلخل از  $\frac{\Delta P}{\Delta L}$  معادله‌ی فورهایمر که با توجه به شرایط مربوطه از معادله‌ی دارسی دقیق‌تر است به دست می‌آید و به صورت زیر نشان داده می‌شود [۵ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۲ و ۲۳].

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

که در آن  $K_1$  و  $K_2$  به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$K_1 = \frac{(d_m)^2 \varepsilon^3}{180 \mu (1-\varepsilon)^2} \quad (5)$$

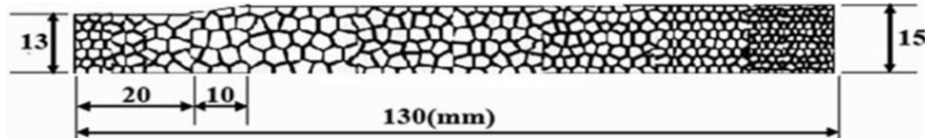
$$K_2 = \frac{(d_m) \varepsilon^3}{1.8 \rho_f (1-\varepsilon)} \quad (6)$$

قطر مشخصه  $d_m$  و بیانگر سرعت ظاهری<sup>۳</sup> است که در محیط متخلخل بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_s = \varepsilon V \quad (7)$$

که  $\varepsilon$  بیانگر تخلخل ماده‌ی متخلخل می‌باشد.

1 - Continuum equation  
2 - Momentum equation  
3 - Superficial



شکل ۱: شماتیکی از هندسه مورد بررسی  
Fig. 1. A schematic of the under study burner

$$\dot{\omega}_k = M_k \sum_{l=1}^{NR} (v_{kl}'' - v_{kl}') K_l \cdot \left( \prod_{reactant} C^{v_{kl}'} - \frac{1}{K_C} \prod_{product} C^{v_{kl}''} \right) \quad (13)$$

که تعداد واکنش‌های شیمیایی،  $M_k$  وزن مولکولی،  $v_{kl}'$  و  $v_{kl}''$  ضرایب استوکیومتریک گونه‌های شیمیایی و  $K_C$  ثابت تعادل شیمیایی است. برای هر واکنش شیمیایی  $l$ ، تعادل شیمیایی گونه  $A_k$  به صورت زیر برقرار است.

$$\sum_{K=1}^{N_S} v_{kl}' A_k \leftrightarrow \sum_{K=1}^{N_S} v_{kl}'' A_k \quad (14)$$

ثابت ویژه سرعت واکنش  $K_1$  از رابطه‌ی آرنیوس<sup>۱</sup> به صورت زیر بدست می‌آید

$$K_1 = K_1^0 T^{\beta_1} \text{Exp} \left( -\frac{E_1}{RT} \right) \quad (15)$$

$K_1^0$  فاکتور فرکانس برخورد اتم‌ها،  $\beta_1$  توان دما و  $E_1$  انرژی فعال سازی<sup>۲</sup> برای هر واکنش تعیین شده است.

### ۳-۷- معادله‌ی تغییر تخلخل

در شکل ۱ مشعل محیط متخلخل مورد بررسی را همراه با تخلخل متغیر خطی مشاهده می‌کنید.

$$\begin{aligned} 0.05X + 0.6 & \quad 0 \leq X \leq 2 \\ 0.15X + 0.4 & \quad 2 < X \leq 3 \\ 3 < X \leq 13 & \quad -0.015X + 0.895 \end{aligned} \quad (16)$$

خواص ترمو فیزیکی مربوط به ماتریس جامد مورد استفاده در

1 - Arrhenius  
2 - Collision frequency factor  
3 - Activation Energy

که در آن  $\lambda_{eff}^0$  به اکثر پارامترهای ذکر شده در بالا و به خصوص اثرات تشعشعی بستگی داشته و در آزمایشگاه به صورت تابعی از دما تعیین می‌شود. در معادله (۹) ترم اول ناشی از انتقال گرمای هدایت و تشعشعی ماتریس متخلخل بدون وجود جریان و قسمت دوم مربوط به اثرات نفوذ همرفت می‌باشد که در آن شار جرمی بر واحد سطح  $\frac{\dot{m}}{A}$ ، ظرفیت گرمایی ویژه،  $d$  قطر مشخصه و  $K_i$  ( $K_1$  و  $K_2$ )، ضرایب پخش گرمایی مدل می‌باشند. انتقال حرارت تشعشع بین فاز جامد و محیط اطراف به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۱]:

$$Q_R = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{a C_B \cdot (T_s^4 - T_o^4)}{\Delta l} e^{-\psi x} \quad (11)$$

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

که  $\Delta l$  معرف طول است که می‌تواند به عنوان ثابت مدل تعریف شود.  $\psi$  ضریب میرایی یا خاموشی برای ماتریس متخلخل،  $a$  ضریب جذب و  $C_B$  ضریب استفان-بولتزمن می‌باشد

$$C_B = 5 / 67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

### ۳-۶- معادله‌ی بقاء گونه‌های شیمیایی

$$\nabla \cdot (\rho V_s Y_k) = \nabla \cdot (\rho \varepsilon D_{km} \nabla Y_k) + \varepsilon \dot{\omega}_k \quad (12)$$

$$k \in [1, N_S]$$

که  $D$  ضریب نفوذ جرم مخلوط گازی متشکل از  $N_S$  جزء می‌باشد.  $\dot{\omega}_k$  نرخ تولید یا از بین رفتن گونه‌ی شیمیایی  $k$  ام به علت واکنش‌های شیمیایی است که به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد که  $N_S$  تعداد گونه‌های شیمیایی است.

جدول ۱: خصوصیات ترموفیزیکی ماده متخلخل مورد استفاده [۵ و ۳۰]  
**Table 1. Thermophysical properties of porous material used in this work**

ناحیه احتراقی	ناحیه پیش گرمایش	خواص، یکا
۰٫۵	۰٫۱	هدایت حرارتی، $W/mK$
$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$	ضریب جابه جایی، $W/m^2K$
۰٫۶	۰٫۵۵	قطر حفره، cm

جدول ۱ آورده شده است. ناحیه احتراقی ثابت و برابر ۱۴۱۰ کلوین، و در ناحیه‌ی پیش گرمایش به صورت عایق فرض می‌شود.

#### ۴- شرایط مرزی

##### ۴-۱- شرایط مرزی ورودی

سرعت، دما و غلظت گونه‌ها، در ورود به مشعل داده شده فرض می‌شود و بقیه متغیرها در ورودی مشعل به صورت معادلات (۱۷) هستند.

$$(1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_0^4) \quad (17)$$

$$u = u_{in}, V = 0, T_g = T_{in}, Y_i = Y_{i,in},$$

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن<sup>۱</sup> که برابر  $5.67 \times 10^{-8}$  است،  $\varepsilon_r$  ضریب انتشار سطح و  $T$  دمای محیط است که برابر ۳۰۰ کلوین در نظر می‌گیریم.

##### ۴-۲- 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 (۱۸) در برنامه اعمال می‌شوند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial Y_i}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$(1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_0^4)$$

##### ۴-۳- شرط مرزی دیوار

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

##### ۴-۴- شرط مرزی محور تقارن

معادله (۱۹) روابط مربوط به شرط مرزی محور تقارن را نشان می‌دهد که در آن تغییرات کلیه پارامترها در جهت شعاعی صفر می‌باشد و سرعت شعاعی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial T_g}{\partial r} = \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0, \quad v = 0 \quad (19)$$

در معادلات انرژی شرط مرزی دما ثابت برای دیوار بالایی در نظر گرفته شده است. در واقع فرض شده که یک سیستم خنک کاری دمای دیوار بالایی را همواره در یک مقدار ثابت نگه می‌دارد.

#### مکانیزم‌های احتراقی

گروه‌های تحقیقاتی متعددی با همکاری یکدیگر در زمینه ایجاد یک مکانیزم بهینه سینتیک شیمیایی فعالیت می‌کنند. مهم‌ترین این گروه‌ها موسسه تحقیقاتی گاز<sup>۲</sup> می‌باشد. موسسه تحقیقات گاز در امریکا است که با همکاری دانشگاه برکلی<sup>۳</sup> در کالیفرنیا، دانشگاه استنفورد<sup>۴</sup>، دانشگاه آستون<sup>۵</sup> در تگزاس و موسسه تحقیقاتی استنفورد<sup>۶</sup>، تشکیل شده است. این سازمان بر روی احتراق و واکنش‌های آن تحقیق و آزمایش می‌کند. GRI-Mech در اصل شامل یک لیست از واکنش‌های ابتدایی شیمیایی و نرخ ثابت عبارات مربوط به آن‌ها است. بیشتر واکنش‌های لیست شده در آن از طریق راه‌های مختلف در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. لذا پارامترهای ثابتی که در

2 - Gas Research Institute. (GRI)

3 - Berkeley

4 - Stanford

5 - Austin

6 - Stanford Research Institute

1 - Stefan-Boltzmann

بدون ترم چشمه واکنش‌های شیمیایی به صورت گذرا حل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T_f) + \nabla \cdot (\rho V_s C_p T_f) = \nabla \cdot (\epsilon \lambda_f \nabla T_f) + H(T_s - T_f) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho Y_k) + \nabla \cdot (\rho V_s Y_k) = \nabla \cdot (\rho \epsilon D_{km} \nabla Y_k) \quad (21)$$

و سپس معادلات (۲۲) و (۲۳) با در نظر گرفتن ترم چشمه واکنش‌های شیمیایی حل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho Y_k) = \epsilon \omega_k W_k \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho C_p T_f) = -\epsilon \sum_{K=1}^{N_S} \dot{\omega}_k h_k W_k \quad (23)$$

البته این معادلات نیز سخت رفتار بوده و برای حل آن‌ها از کد VODE که برای حل معادلات دیفرانسیل سخت رفتار به کار می‌روند، استفاده می‌شود [۳۳]. زیربرنامه DVOODE معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی اول را بر اساس الگوریتم هیندمارش-گیر<sup>۵</sup>، حل می‌کند [۲۰]. که این الگوریتم به صورت معادلات (۲۴) و (۲۵) تعریف می‌شود.

$$[Y_i]^{new} = [Y_i]^{old} + [\Delta Y_i]^{transport} + [\Delta Y_i]^{source} \quad (24)$$

$$[T_g]^{new} = [T_g]^{old} + [\Delta T_g]^{transport} + [\Delta T_g]^{source} \quad (25)$$

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 (۲۰) و (۲۱) با صرفنظر نمودن از ترم‌های مربوطه و  $[\Delta Y_i]^{source}$  و  $[\Delta T_g]^{source}$  تفاضل جزء جرمی و دما قبل و بعد از حل معادلات (۲۲) و (۲۳) می‌باشد. در این کار برای اعمال سینتیک شیمیایی و ویژگی‌های ترمو فیزیکی و ترمو شیمیایی و نرخ پیشرفت واکنش از زیر برنامه‌ی ترنفت<sup>۶</sup> و کمکین<sup>۷</sup> استفاده شده است [۳۴]، و برای شبیه‌سازی فرایند احتراق از سه مکانیزم GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزمی با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی [۳۲] استفاده شده است. شکل ۲، فلوچارت حل مسأله را از

آن وجود دارد، از طریق نتایج آزمایشگاهی که به طور دقیق انجام گرفته‌اند، به دست آمده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها ضرایب ثابت رابطه‌ی آرنیوس می‌باشد.

۳۰ GRI: این مکانیزم شامل ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی می‌باشد و کاملترین نسخه‌ی است که تاکنون توسط موسسه تحقیقات گاز در امریکا ارائه شده است [۳۲].

۲/۱۱-GRI: این مکانیزم شامل ۴۹ گونه و ۲۷۹ واکنش شیمیایی است. در این مکانیزم گونه‌های  $C_2H_4$ ،  $C_2H_2$ ،  $CH_2CHO$  و  $CH_3CHO$  در لیست گونه‌هایی که در واکنش احتراق گاز متان شرکت دارند، به حساب نیامده‌اند.

مکانیزم ۱۷ گونه‌ای: مکانیزم ۱۷ گونه‌ای که از مکانیزم کامل به دست می‌آید دارای ۵۸ واکنش شیمیایی است. این مکانیزم، هیچ واکنشی را جهت انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن در نظر نمی‌گیرد.

#### نسبت هوای اضافی

برای دستیابی به یک احتراق کامل در یک فرایند از مقدار هوایی بیشتر از هوای تئوری استفاده می‌شود تا بتوان از احتراق کامل سوخت مطمئن شد. نقش دیگر این هوای اضافه جلوگیری از تشکیل گاز خطرناک مونو اکسید کربن است.

#### ۵- مدل سازی عددی

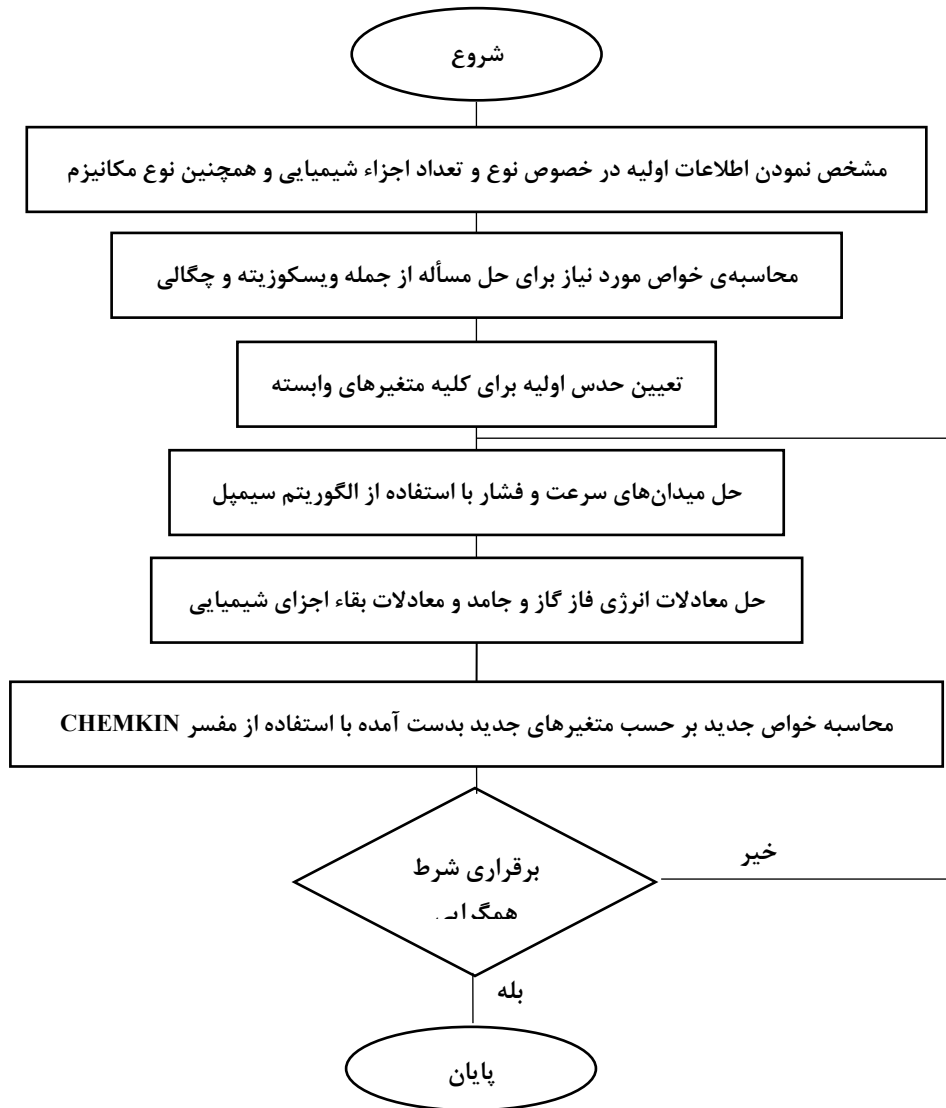
در این مقاله معادلات حاکم شامل معادله‌ی پیوستگی، مومنتم، معادله‌ی انرژی فاز جامد(ماتریس متخلخل)، معادله‌ی انرژی فاز گاز و معادلات بقاء گونه‌های شیمیایی براساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده‌اند و فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> به هم ارتباط داده شده‌اند و در صورتی که از مکانیزم واکنش چند مرحله‌ای استفاده شود، دستگاه جبری حاصل از تجزیه معادلات بقای اجزا و انرژی فاز گاز اصطلاحاً سخت رفتار<sup>۲</sup> هستند و استفاده از روشهای تکراری نظیر الگوریتم ماتریس سه قطری<sup>۳</sup> موجب واگرایی می‌شود. برای رفع این مشکل از روش انشعاب عملگر<sup>۴</sup> استفاده می‌شود [۲۰].

به این ترتیب که معادله‌های انرژی فاز گاز و بقای اجزاء یکبار

5 -Hindmarsh-Gear  
6 - Tranfit  
7 - Chemkin

1 - SIMPLE  
2 - Stiffness  
3 - Triangle Diameter Matrix Algorithm  
4 - Operator Splitting





شکل ۲: فلوچارت الگوریتم حل شبیه سازی عددی  
 Fig. 2. Flowchart numerical simulation algorithm

نشان می‌دهد.

نمای کلی نشان می‌دهد.

#### ۷- صحت سنجی نتایج

در این قسمت به مقایسه و بررسی پروفیل‌های دما و کسر جرمی گونه مونو اکسید نیتروژن با نتایج آزمایشگاهی دورست و تریمیس پرداخته می‌شود [۳۵]. شکل ۳ چگونگی توزیع دمای گاز و ماتریس جامد را روی خط مرکزی مشعل برای سینتیک  $GRI-3/0$  در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از دورست و تریمیس را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، دمای ماتریس جامد در قسمت بالا دست واکنش بالاتر از دمای گاز می‌باشد و همچنین دمای

#### ۶- بررسی استقلال از مش بندی

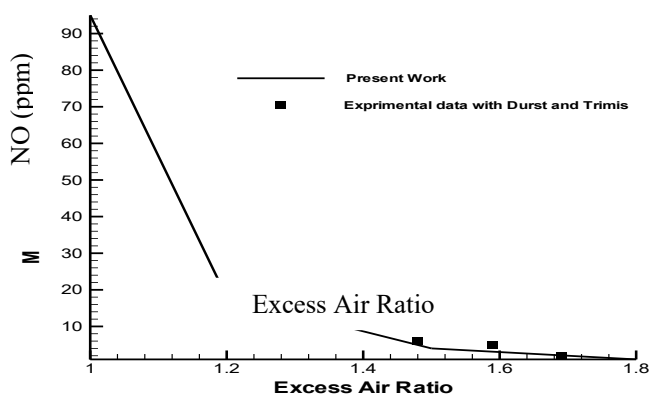
در این مقاله برای بررسی استقلال از مش، شبکه بندی‌های مختلفی مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که تغییرات متغیرها با ریزتر شدن شبکه از  $26 \times 26$  بسیار ناچیز و در حدود ۳٪ خواهد بود که در کارهای مهندسی قابل نظر کردن می‌باشد، بنابراین کلیه نتایج بر اساس مش ذکر شده گزارش شده است. جدول ۲ مقادیر عددی مربوط به دمای گاز را برای حالات مختلف مش بندی



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

Table 2. Gas temperature values for the different test points according to the mentioned mesh

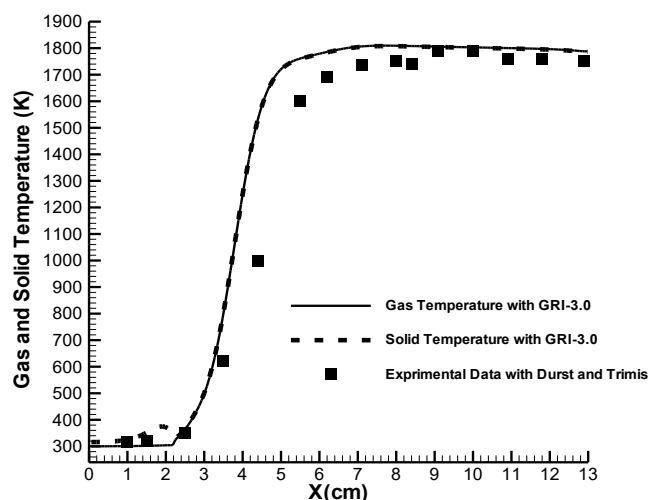
نقاط آزمون				
$X=11.5\text{cm}$	$X=8.5\text{cm}$	$X=6.5\text{cm}$	$X=4.5\text{cm}$	مش بندی
۱۶۵۵ K	۱۶۵۰ K	۱۳۵۰ K	۵۲۲ K	۱۶۰×۱۳
۱۳۷۰ K	۱۷۵۰ K	۱۷۴۰ K	۱۴۱۰ K	۱۶۰×۲۶
۱۷۶۵ K	۱۷۶۰ K	۱۷۵۲ K	۱۴۲۲ K	۲۶۰×۱۳
۱۹۵۲ K	۱۹۵۲ K	۱۹۵۰ K	۱۵۷۳ K	۲۶۰×۲۶
۱۹۹۰ K	۱۹۹۱ K	۱۹۷۹ K	۱۵۸۸ K	۳۹۰×۲۶



شکل ۴: مقایسه کسر جرمی گونه NO با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل و سینتیک شیمیایی GRI-۲/۱۱ برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی [۳۵]

Fig. 4. 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

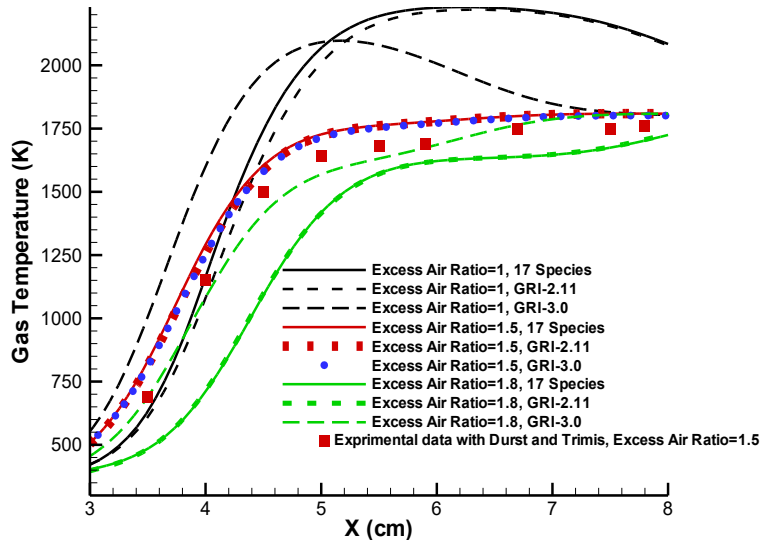
آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی وجود دارد. در شکل ۴ کسر جرمی گونه‌ی مونو اکسید نیتروژن برای نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی در مشعل محیط متخلخل با توان ۵kW و در خروجی مشعل به عنوان تابعی از نسبت هوای اضافی نشان داده شده است. بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی حدود ۸ درصد می‌باشد که با توجه به استفاده از سینتیک شیمیایی GRI-۲/۱۱ در نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، ضروری است که به منظور دستیابی به پیش بینی بهتر جهت انتشار مونواکسید نیتروژن از مکانیزم شیمیایی و میدان دمایی دقیق‌تری استفاده شود. با توجه به شکل ۴ بین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی اختلاف اندکی وجود دارد که می‌توان از آن صرف نظر نمود.



شکل ۳: مقایسه توزیع دمای بدست آمده از سینتیک GRI-۳/۰ با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل با نسبت هوای اضافی ۱٫۵ [۳۵]

Fig. 3. Comparison of temperature distribution obtained from kinetics GRI-3.0 with experimental results in a porous media burner with an excess air ratio of 1.5

گاز و جامد در ناحیه احتراقی تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. یکی از مهمترین مزایای مشعل‌های محیط متخلخل برتری آن‌ها در پیش گرمایش سوخت و هوا قبل از احتراق می‌باشد. این پیش گرمایش عمدتاً توسط انتقال حرارت تشعشعی در ماتریس متخلخل و انتقال 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 می‌باشد. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و شبیه سازی آزمایشگاهی حدود ۶ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۳ بین نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و نتایج



شکل ۵: نمودار دمای گاز با استفاده از مکانیزم احتراقی GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی [۳۵]  
 Fig. 5. Gas temperature diagram using the GRI-3.0, GRI-2.11 and 17-species mechanisms for different values of the excess air ratio

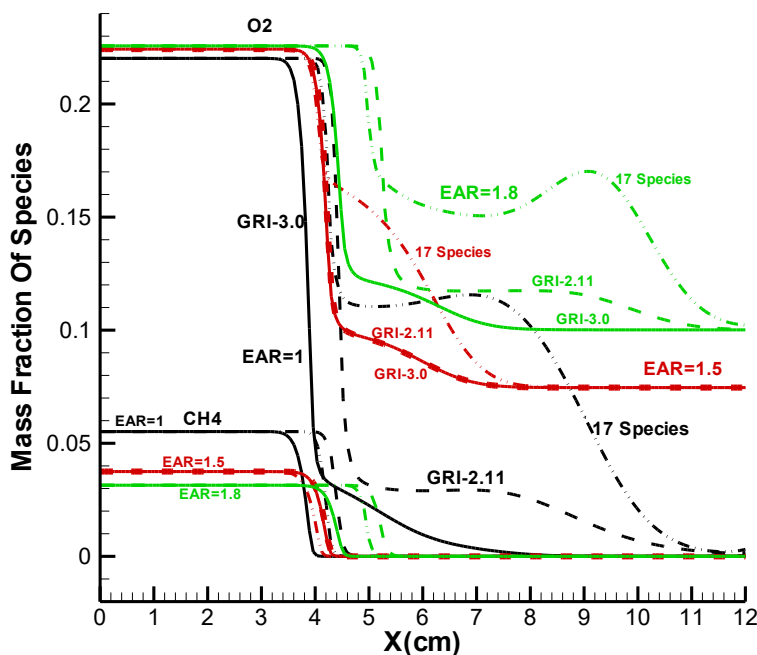
جدول ۳: مدت زمان انجام محاسبات برای مکانیزم های احتراقی و پروفیل های تخلخل مختلف  
 Table 3. Time of calculation for several combustion mechanisms and porosity profiles

مشخصات کامپیوتر مورد استفاده: Pentium ۴-Intel (R), Celeron(R),d CPU ۳/۲۰GHz, ۲ GB of RAM			
تخلخل متغیر مرتبه اول	تخلخل ثابت ۰٫۷ ناحیه پیش گرمایش و ۰٫۸۵ برای ناحیه احتراقی		مکانیزم ها
۷۵۰	۸۰۲	← مدت زمان محاسبات انجام	GRI-۳/۰
۶۸۰	۷۰۸		GRI-۲/۱۱
۴۰۵	۴۵۰		۱۷ گونه

### ۸- نتایج

GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان دمای تولید شده با استفاده از هر سه مکانیزم احتراقی برای شرایط استوکیومتری است و بعد از آن با افزایش نسبت هوای اضافی متوسط سطح درجه حرارت میدان و ماکزیمم دما کاهش چشمگیری می‌یابد. با توجه به شکل هنگامی که نسبت هوای اضافی ۱٫۵ است، نتایج ناشی از هر سه مکانیزم تقریباً بر یکدیگر منطبق بوده و می‌توان از مکانیزم‌های کوچک‌تر استفاده کرد و بدین طریق در وقت و هزینه صرفه جویی نمود. جدول ۳ مدت زمان انجام محاسبات را برای مکانیزم‌های احتراقی مختلف، نشان می‌دهد با توجه به جدول ۳

در کار حاضر احتراق پیش آمیخته‌ی متان- هوا در داخل یک مشعل محیط متخلخل دو ناحیه‌ای (شکل ۱) مورد مطالعه قرار گرفته است و برای شبیه سازی سینتیک‌های شیمیایی از سه مکانیزم مختلف شامل GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزمی با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی استفاده شده است و اثرات این مکانیزم ها بر روی پروفیل دما، کسر جرمی گونه‌ها و انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است همچنین در این کار، اثرات نسبت هوای اضافی بر روی نتایج حاصل از مکانیزم‌های احتراقی مختلف نشان داده شده است. شکل ۵ نمودار دمای گاز با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی



شکل ۶: نمودار کسر جرمی گونه‌ها با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی  $GRI-2/11$ ،  $GRI-3/0$  و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی

Fig. 6. Diagram of the mass fraction of species using the combustion mechanisms GRI-2.11, GRI-3.0 and the 17-species mechanism for different values of the excess air ratio

پیدا می‌کند مقدار انتشار آن در خروجی مشعل افزایش می‌یابد. با توجه به شکل در نسبت هوای اضافی ۱٫۵ نتایج به دست آمده با استفاده از مکانیزم‌های  $GRI-2/11$  و  $GRI-3/0$  تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و تنها اختلاف اندکی در ناحیه احتراقی برای مکانیزم ۱۷ گونه‌ای مشاهده می‌شود ولی در سایر نسبت‌های هوای اضافی این اختلاف بیشتر مشهود است.

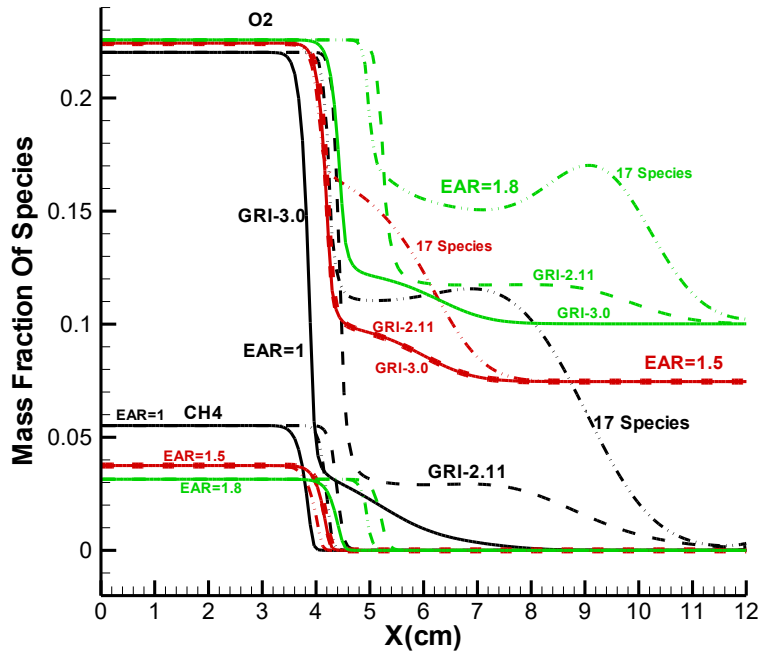
شکل ۷ کسر جرمی گونه کربن دی اکسید را به عنوان یکی از محصولات احتراق نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین مقدار تولید این آلاینده برای شرایط استوکیومتری است و هر چه مکانیزم احتراقی کامل‌تر گردد مقدار تولید آن در ناحیه احتراقی بالاتر می‌باشد اما با توجه به این که در بررسی آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای آنچه دارای اهمیت اصلی است و باعث آلودگی زیست محیطی می‌شود مقدار انتشار آن در خروجی مشعل است که برای تمامی مکانیزم‌های احتراقی در یک نسبت هوای اضافی ثابت مقدار یکسانی را پیش بینی می‌کند.

شکل ۸ نمودار کسر جرمی گونه  $H_2O$  را با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی  $GRI-2/11$ ،  $GRI-3/0$  و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی نشان می‌دهد. به

هنگامی که از مکانیزم ۱۷ گونه‌ای استفاده می‌شود برنامه حدود ۳۰۰ دقیقه سریعتر همگرا می‌گردد. همچنین استفاده از مکانیزم ۱۷ جزئی پایداری و نرخ همگرایی محاسبات را در مقایسه با مکانیزم‌های بزرگ‌تر افزایش می‌دهد. بنابراین با توجه به نیازی که از انجام محاسبات دارید می‌توان بهترین مکانیزم را انتخاب نمود. با تغییر نسبت هوای اضافی نتایج ناشی از مکانیزم‌های مختلف از یکدیگر فاصله گرفته و برای دستیابی به میدان دمایی و پروفیل‌های کسر جرمی گونه‌های هرچه دقیق‌تر بایستی از مکانیزم کامل‌تر  $GRI-3/0$  استفاده نمود.

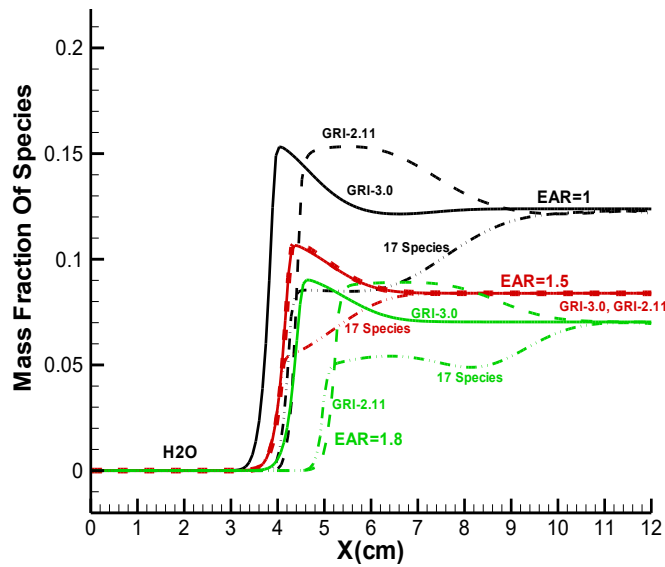
شکل ۶ نمودار مربوط به کسر جرمی گونه‌های متان و اکسیژن<sup>۱</sup> را برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر آن‌ها در ابتدا و قبل از فرایند احتراق ثابت بوده و سپس در ناحیه احتراق از مقدار آن‌ها کاسته شده و در نهایت مجدداً ثابت می‌شوند. با توجه به شکل مقدار کسر جرمی متان در خروجی مشعل برای تمام مقادیر نسبت هوای اضافی برابر صفر بوده و این نشان دهنده احتراق کامل گاز متان است. بر خلاف گاز متان، مقدار گاز اکسیژن در خروجی مشعل تنها برای شرایط استوکیومتری برابر صفر می‌باشد و هر چه نسبت هوای اضافی افزایش

1 -Oxygen-(O<sub>2</sub>)



شکل ۷: نمودار کسر جرمی گونه کربن دی اکسید با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی  $GRI-3/0$ ،  $GRI-2/11$  و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی

Fig. 7. Diagram of the mass fraction of  $CO_2$  species using the combustion mechanisms GRI-2.11, GRI-3.0 and the 17-species mechanism for different values of the excess air ratio

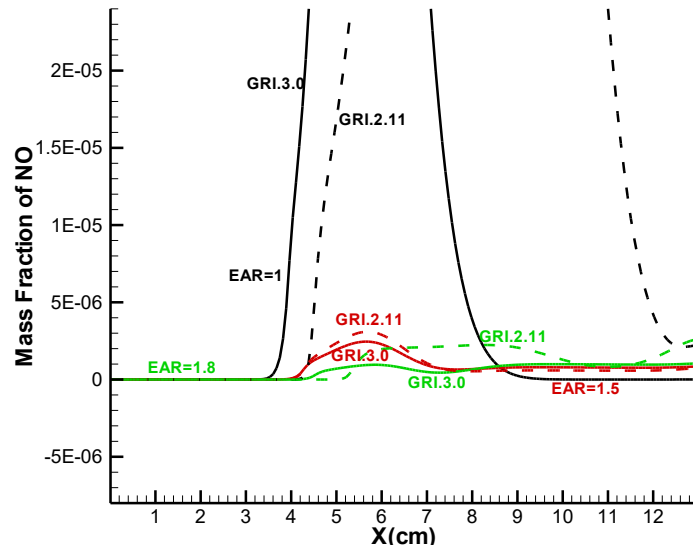


شکل ۸: نمودار کسر جرمی گونه  $H_2O$  با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی  $GRI-3/0$ ،  $GRI-2/11$  و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی

Fig. 8. Diagram of the mass fraction of  $H_2O$  species using the combustion mechanisms GRI-2.11, GRI-3.0 and the 17-species mechanism for different values of the excess air ratio

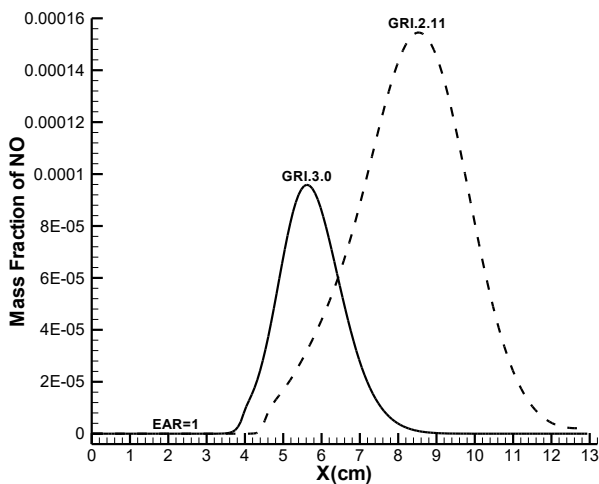
به شکل مکانیزم های  $GRI-3/0$  و  $GRI-2/11$  واکنش‌های برگشت را برای مصرف  $H_2O$  در نظر می‌گیرند اما مکانیزم ۱۷

دلیل پدیده احتراق،  $H_2O$  به عنوان محصول واکنش تولید می‌شود و کسر جرمی آن در طول واکنش شیمیایی افزایش می‌یابد. با توجه



شکل ۹: نمودار کسر جرمی گونه مونو اکسید نیتروژن با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی GRI-۲/۱۱ و GRI-۳/۰ و برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی

Fig. 9. Diagram of the mass fraction of NO species using the combustion mechanisms GRI-2.11 and GRI-3.0 for different values of the excess air ratio



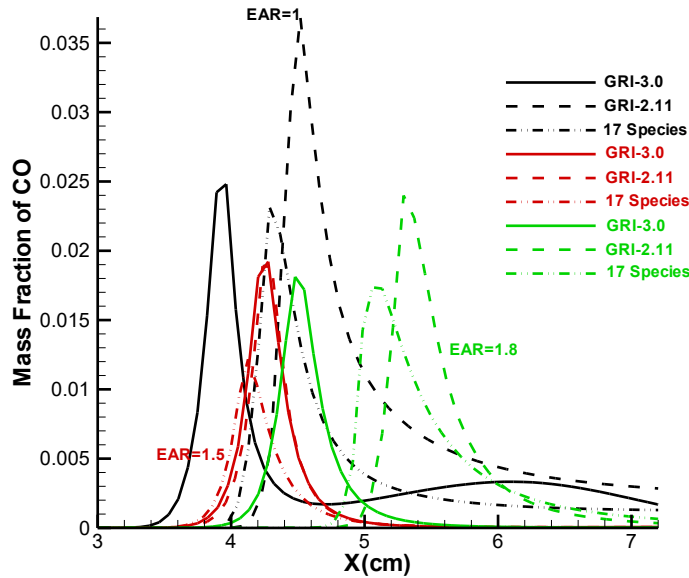
شکل ۱۰: نمودار کسر جرمی گونه مونو اکسید نیتروژن با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی GRI-۲/۱۱ و GRI-۳/۰ برای شرایط استوکیومتری

Fig. 10. Diagram of the mass fraction of NO species using the combustion mechanisms GRI-2.11, GRI-3.0 for Stoichiometric conditions

شکل ۱۱ نمودار کسر جرمی گونه کربن مونو اکسید با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین میزان تولید کربن مونو اکسید برای شرایط

گونه‌ای این گونه نیست [۳۶].

شکل ۹ نمودار کسر جرمی گونه مونو اکسید نیتروژن روی خط مرکزی مشعل با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی GRI-۲/۱۱ و GRI-۳/۰ برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار مونو اکسید نیتروژن در ابتدای واکنش ناچیز بوده ولی با افزایش دما و فعال شدن واکنش‌های تولید این آلاینده، مقدار آن افزایش یافته که با توجه به شکل بیشترین مقدار تولید مونو اکسید نیتروژن در انتهای جبهه شعله اتفاق می‌افتد. میزان تولید آلاینده مونو اکسید نیتروژن به شدت به نسبت هوای اضافی وابسته است و هر چه نسبت هوای اضافی افزایش می‌یابد مقدار تولید آلاینده مونو اکسید نیتروژن کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۵ با افزایش نسبت هوای اضافی، ماکزیمم دما و متوسط سطح درجه حرارت میدان کاهش یافته و چون تولید مونو اکسید نیتروژن به شدت به دما وابسته است، مقدار این آلاینده کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۱۰ در شرایط استوکیومتری مقدار انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن با استفاده از مکانیزم GRI-۳/۰ در خروجی مشعل تقریباً صفر پیش بینی می‌شود این در حالی است که برای سایر مکانیزم‌ها و نسبت‌های هوای اضافی دیگر میزان انتشار آن از مرتبه بزرگی  $10^{-6}$  خواهد بود.



شکل ۱۱: نمودار کسر جرمی گونه مونو اکسید کربن با استفاده از مکانیزم‌های احتراقی GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی

Fig. 11. Diagram of the mass fraction of CO species using the combustion mechanisms GRI-2.11, GRI-3.0 and the 17-species mechanism for different values of the excess air ratio

عددی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهند:

- ۱- با افزایش نسبت هوای اضافی، متوسط سطح درجه حرارت میدان و ماکزیمم دما کاهش می‌یابد.
- ۲- بیشترین میزان تولید آلاینده‌های کربن دی اکسید، مونو اکسید نیتروژن و کربن مونو اکسید برای شرایط استوکیومتری اتفاق می‌افتد.
- ۳- با افزایش نسبت هوای اضافی مقدار تولید آلاینده‌های کربن مونو اکسید و مونو اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد.
- ۴- در نسبت هوای اضافی ۱/۵ نتایج ناشی از هر سه مکانیزم احتراقی GRI-۲/۱۱، GRI-۳/۰ و مکانیزم ۱۷ گونه‌ای تقریباً یکسان است و می‌توان با استفاده از مکانیزم ۱۷ جزئی به جای GRI-۳/۰ زمان محاسبات را به مقدار قابل توجهی کاهش داد چرا که تعداد گونه‌ها از ۵۳ گونه به ۱۷ گونه کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از مکانیزم ۱۷ جزئی پایداری و نرخ همگرایی محاسبات را در مقایسه با مکانیزم‌های بزرگ‌تر افزایش می‌دهد.

۵- اگرچه مکانیزم ۱۷ جزئی میزان انتشار آلاینده مونو اکسید نیتروژن را به دست نمی‌دهد اما می‌توان از آن در جایی که نیازی به محاسبه مونو اکسید نیتروژن نیست، استفاده کرد و به این طریق در وقت و هزینه صرفه جویی نمود بنابراین با توجه به نیازی که از انجام

استوکیومتری است و بعد از آن با افزایش نسبت هوای اضافی از مقدار آن کاسته می‌شود. علت این امر را می‌توان این گونه توضیح داد که با افزایش نسبت هوای اضافی مخلوط سوخت و هوا رقیق‌تر شده و احتراق کامل‌تر می‌گردد و چون ماکزیمم دما کاهش می‌یابد، در نتیجه مقدار کربن دی اکسید کمتری به کربن مونو اکسید و اکسیژن تجزیه می‌شود و از میزان تولید آن کاسته می‌شود. همان طور که در شکل مشهود است در نسبت هوای اضافی ۱/۵، نتایج ناشی از هر سه مکانیزم احتراقی مقادیر تقریباً یکسانی را پیش بینی می‌کنند که این امر سبب می‌شود تا بتوان در این شرایط از مکانیزم‌های احتراقی کوچکتر استفاده نمود. با توجه به اهمیت میزان انتشار آلاینده‌ها در خروجی مشعل، لازم به ذکر است که بیشترین میزان انتشار کربن مونو اکسید مربوط به شرایط استوکیومتری است.

## ۹- نتیجه‌گیری

احتراق پیش مخلوط متان-هوا در داخل یک مشعل محیط متخلخل برای حالت دو بعدی و به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است و به صورت همزمان تأثیرات نسبت هوای اضافی و سینتیک شیمیایی بر روی پروفیل‌های دما و کسر جرمی آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مطابقت نسبتاً خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و حل

- Evaluation of Combustion in Porous Media by EGM (Entropy Generation Minimization), *Energy*, (2010) 35 3500-3483.
- [10] V.K. Pantangi, S.C. Mishra, P. Muthukumar, R. Reddy, Studies on Porous Radiant Burners for LPG (liquefied petroleum gas) Cooking Applications, *Energy*, (2011) 36 6080-6074.
- [11] P. Muthukumar, P. Anand, P. Sachdeva, Performance Analysis of Porous Radiant Burners Used in LPG Cooking Stove, *International Journal of Energy and Environment*, 74-67 (2011) 2.
- [12] I. Mohammadi, S. Hossainpour, The Effects of Chemical Kinetics and Wall Temperature on the Performance of Porous Media Burners, *Heat and Mass Transfer*, (2013) 49 877-869.
- [13] 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*, 17-3 (2014) 40.
- [14] C.Y. Wu, K.H. Chen, S.Y. Yang, Experimental Study of Porous Metal Burners for Domestic Stove Applications, *Energy Conversion and Management*, 388-380 (2014) 77.
- [15] S.A. Hashemi, M. Dastmalchi, M. Nikfar, Experimental Study Flashback Phenomenon in Porous Ceramic, *Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)*, 35-25 (2014) 46.
- [16] S.A. Hashemi, E. Noori, A. Aghaei, Experimental Study of Non-Premixed Turbulent Flame Stabilization with Porous Medium, *Modares Mechanical Engineering*, 15 349-341 (2015).
- [17] H. Shabani Nejad, A. Gandjalikhan Nassab, E. Jahanshahi Javaran, Numerical Study on Radiant Efficiency of a Porous Burner under Different Conditions, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 8-1 (2017) 32.
- [18] N. Donald A, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Third ed., Springer-Verlag, NewYork, 2006.
- [19] M. Farzaneh, R. Ebrahimi, M. Shams, M. Shafiey, Two-Dimensional Numerical Simulation of Combustion and Heat Transfer in Porous Burners, *Engineering Letters*, 375-370 (2007) (2)15.
- محاسبات دارید می‌توان بهترین مکانیزم را انتخاب نمود.  
۶- در شرایط استوکیومتری میزان انتشار مونو اکسید نیتروژن با استفاده از مکانیزم احتراقی  $GRI-3/0$  مقدار صفر پیش‌بینی می‌شود و برای بقیه ضرایب نسبت هوای اضافی مقدار آن از مرتبه بزرگی  $10^{-6}$  خواهد بود.

## منابع

- [1] G. Brenner, K. pickenacker, O. Pickenacker, D. Trimis, K. Wawrzinek, T. Weber, Numerical and Experimental Investigation of Matrix Stabilized Methane-Air Combustion in Porous Inert Media, *Combustion and Flame*, 213-201 (2000) 123.
- [2] I. Malico, J. Pereira, Numerical Study on the Influence of Radiative Properties in Porous Media Combustion, *Journal of Heat Transfer* 957-951 (2001) 123.
- [3] C.-J. Tseng, Effect of Hydrogen Addition on Methane Combustion in a Porous Medium Burner, *International Journal of Hydrogen Energy*, 707-699 (2002) 27.
- [4] P. Talukdar, S. Mishra, D. Trimis, F. Durst, Heat Transfer Characteristics of a Porous Radiant Burner under the Influence of a 2D Radiation Field, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 537-527 (2003) (4)84.
- [5] 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*, (2006) 33 474-467.
- [6] K. Lari, S.A. Ganjalikhan nassab, Transient Thermal Characteristics of Porous Radiant Burners, *Iranian Journal of Science and Technology, transaction b-engineering*, 31 420-407 (2007).
- [7] S. Hossainpour, B. Haddadi, Numerical Study of the Effects of Porous Burner Parameters on Combustion and Pollutants Formation in: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2008, pp. 1510-1505.
- [8] F. Avdic, M. Adzic, F. Durst, Small Scale Porous Medium Combustion System for Heat Production in Households Application, *Energy*, 2155-2148 (2010) 87.
- [9] M. Bidi, M.R.H. Nobari, M. Saffar Aval, A Numerical



- Combined Cycle and Cogenerative Plants, Engineering Optimization, 820-801 (2006) 38.
- [29] H.L. Pan, O. Pickenacker, K. Pickenacker, D. Trimis, T. Weber, in: 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 2000, pp. 14-11.
- [30] E.U. Schlünder, E. Tsotsas, Wärmeübertragung in Festbetten, druchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten, Georg Thieme Verlag, Stuttgart- New York, 1988.
- [31] K. Vafai, Handbook of Porous Media, Second ed., Taylor & Francis Group, LLC USA, 2005.
- [32] C.T. Bowman, R.K. Hanson, D.F. Davidson, W.C. Gardiner, J. Lissianski, V., G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, M. Goldenberg, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- [33] P.N. Brown, G.D. Byrne, A.C. Hindmarsh, VODE: A Variable Coefficient ODE Solver, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1051-1038 (1989) 10.
- [34] R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller, A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-Component Transport Properties, Sandia National Laboratories Report SAND-86 (1986) ,8246).
- [35] F. Durst, D. Trimis, Compact Porous Medium Burner and Heat Exchanger for Household Applications, EC project report (contract no. JOE-3CT1996) ,(0019-95).
- [36] GRI-Mech Home page,<http://www.me.berkeley.edu/gri-mech>.
- [20] I. Malico, X.Y. Zhou, J.C.F. Pereira, Two-Dimensional Numerical Study of Combustion and Pollutants Formation in Porous Burners, Combustion Science and Technology, 79-57 (2000) 152.
- [21] S. Nemoda, D. Trimis, G. Zivkovich, Numerical Simulation of Porous Burners and Hole Plate surface Burners, Journal of Thermal Science, 17-3 (2004) 8.
- [22] S. Ergun, Fluid Flow through Packed Columns, Chemical Engineering Progress, 94-89 (1952) 48.
- [23] I.F. MacDonald, M.S. El-Sayed, K. Mow, F.A.L. Dullien, Flow through Porous Media Ergun Equation Revisited, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, (1979) 18 208-199.
- [24] X. Fu, R. Viskanta, J.P. Gore, Measurement and Correlation of Volumetric Heat Transfer Coefficients of Cellular Ceramics, Experimental Thermal, and Fluid Science, 293-285 (1998) 17.
- [25] M. Kaviany, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Second ed., Springer-Verlag, New York, 1999.
- [26] R. Viskanta, Interaction of combustion and heat transfer in porous inert media, in: Proceeding of 8th International Symposium on Transport Phenomena in Combustion, 1996, pp. 87-64.
- [27] L.B. Younis, R. Viskanta, Experimental Determination of the Volumetric Heat Transfer Coefficient between Steam of Air and Ceramic Foam, International journal of Heat Mass Transfer, 1434-1425 (1993) 36.
- [28] L.A. Catalano, A. Dadone, D. Manodoro, A. Saponaro, Efficient Design Optimization of Duct-Burners for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Mohammadi, H. Ajam, Evaluation of combustion models in porous medium with different excess air ratios, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 65-80.

DOI: 10.22060/mej.2019.15713.6187

