اولین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه ۱۳۸۴ - تهران- دانشگاه تربیت مدرس

تاثیر ضریب انتقال حرارت حجمی بر سرعت شعله و محصــولات احــتراق مشعل متخلخل

مصطفی خسروی الحسینی[۱]، مهدی معرفت[۲]، کیومرث مظاهری[۳]×

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

× تهران صندق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵
kiumars@modares.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به بررسی عددی اثر ضریب انتقال حرارت حجمی بر عملکرد مشعل متخلخل پرداخته شده است. ترم انتقال حرارت حجمی در معادلات بقای انرژی ارتباط دهنده معادله بقای انرژی فاز جامد و فاز گاز محیط متخلخل می باشد، ازاینرو بررسی آن در واقع بررسی صحت استفاده از حالت تعادل گرمایی[۱] یا عدم تعادل گرمایی[۲] بین دو فاز فوق الذکر است. در مدلسازی مشعل متخلخل از کد PREMIX که برای مدلسازی شعله آزاد پیش مخلوط آرام به کار می‌رود، استفاده شده است.

با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی دمای فاز جامد به سمت فاز گاز میل می کند و پروفیل دمایی به سمت یک مقدار حدی همگرا می گردد. بنابراین درمواد متخلخلی که ضریب انتقال حرارت حجمی بالاست می توان فرض تعادل گرمایی را معتبر دانست. در بررسی مدلهای عمومی پیشنهاد شده برای ضریب انتقال حرارت حجمی دقت پایین آنها در تعیین عملکرد مشعل مشخص گردید، از اینرو استفاده از مدلهای تجربی بدست آمده برای هر ماده متخلخل قابل تعمیم به مواد دیگر نمی باشد. همچنین عامل تعیین کننده در مدلسازی ضریب انتقال حرارت حجمی قطر متوسط حفره های فوم متخلخل بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: مشعل متخلخل- انتقال حرارت- تشعشع، جابجایی- هدایت حرارتی.

۱- مقدمه

تقریبا در تمامی تکنیکهای احتراق از ساختار شعله آزاد[۳] که ضخامت خصوصا در حالت شعله پیش اختلاط بسیار کم است، استفاده می گردد. به عنوان نمونه در مشعل بانسن[۴] حداکثر ضخامت جبهه شعله یک میلیمتر است. دلیل این ضخامت کم را می توان در ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین مخلوط گاز جستجو نمود. گرادیان دمای بالا در این منطقه باریک احتراق باعث انتقال حرارت در خلاف جهت حرکت جریان و در نتیجه رساندن مخلوط احتراق به دمای شعله‌وری می گردد. به جهت افزایش توان حرارتی در شعله آزاد از ایجاد اغتشاش در بالا دست جریان گاز کمک گرفته می شود. این موضوع باعث ضخیمتر شدن

1 Thermal Equilibrium
2 Non-local Thermal Equilibrium
3 Free Flame
4 Bunsen Burner

جبهه شعله و افزایش انتقال حرارت می گردد. اما در کنار این بهبود افزایش اغتشاش باعث خاموشی[۵]، افزایش ناپایداری[۶]، تولید سر و صدا[۷] و افزایش افت فشار می گردد.

در نظر گرفتن خصوصیات ضعیف انتقال حرارت تشعشعی و هدایت در مخلوط گاز باعث پیشنهاد این ایده گردید که با استفاده از خصوصیات حرارتی مناسب مواد جامد می توان راندمان انتقال حرارت را افزایش داد. در این حالت فرآیند احتراق در یک ناحیه مشخص درون ماده متخلخل پایدار می گردد. در سال ۱۹۷۱ واینبرگ[۸] ایده قرض کردن انرژی از شعله پیش اختلاط (ایجاد تبادل حرارت درونی برای پیش گرمایش هوا و سوخت) را مطرح نمود. این مکانیزم از لحاظ تئوریک باعث درجه حرارت شعله‌ای فراتر از میزان آدیاباتیک آن می‌گردد که به همین دلیل نام آنرا آنتالپی اضافه[۹] یا فوق آدیاباتیک[۱۰] گذارده‌اند. در این حالت حدود شعله‌وری گسترده‌تر از شعله های متداول است. در مواد متخلخل انتقال حرارت فوق الذکر توسط هدایت و تشعشع صورت می‌پذیرد. بالادست ناحیه احتراق توسط تشعشع صادر شده از احتراق و ناحیه پایین دست احتراق و همچنین انتقال حرارت هدایتی داخل شبکه ماتریسی ماده متخلخل پیش گرمایش می‌شود. حرارت تشعشعی ابتدا باعث گرم شدن ماتریس جامد و سپس بواسطه انتقال حرارت جابجایی باعث گرم شدن مخلوط گاز می گردد. همچنین بخش ناچیزی از این تشعشع (به دلیل ضریب جذب پایین گاز) مستقیما گرمایش مخلوط گاز را سبب می شود. نشان داده شده است که در چنین شرایطی سرعت شعله تا ۱۸ برابر بیشتر از سرعت شعله آزاد جریان آرام میتواند افزایش یابد [۱]. در سال ۱۹۷۹ و ۱۹۸۱ تاکنو[۱۱] و ساتو[۱۲] نشان دادند که این ایده را می توان توسط انتقال حرارت هدایت در یک مشعل متخلخل برآورده نمود. در سال ۱۹۸۸ یاشیزاوا و همکارانش مدل یک بعدی از احتراق درون ماده متخلخل ارائه دادند که در آن مطالعه تشعشع هدف اصلی بود.

عوامل تاثیرگذار بر عملکرد مشعل متخلخل را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شامل خصوصیات ترموفیزیکی ماتریس متخلخل است که از آن جمله می‌توان به درصد تخلخل، جنس ماده متخلخل و ضریب هدایت اشاره نمود. دسته دوم خصوصیات هندسی مانند ابعاد مشعل متخلخل و شرایط مرزی حاکم مانند دبی مخلوط احتراق و میزان افت حرارت توسط دیواره‌های مشعل را شامل می‌شود. حال چنانچه از دیدگاه محاسباتی به آن نگاه شود در یک مشعل متخلخل مشخص تمامی پارامترهای فوق‌الذکر ثابت است ولی مدلهای مختلفی برای تعیین خصوصیات ترموفیزیکی یا شرایط مرزی پیشنهاد شده است.

بررسی نحوه تاثیر اندازه حفره های جسم متخلخل بر عملکرد مشعل متخلخل توسط تونگ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از دو ماده سرامیکی سلیکا و آلومینیا در مدلسازی عددی استفاده گردیده است. خواص تشعشعی برای دو دمای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد با استفاده از تئوریهای الکترومغناطیسی بدست آمده و انتقال حرارت تشعشعی تحلیل شده است. با کاهش قطر حفره های الیاف تا یک میکرومتر بازده انتقال حرارت تشعشع افزایش قابل ملاحظه ای یافته است. در مقاله مذکور احتراق به صورت منبع تولید گرما در معادله انرژی در نظر گرفته شده است [۲-۳]. بررسی مشعل متخلخلی که از دو نوع ماده متخلخل تشکیل شده است توسط زو و پریرا انجام شده است [۴]. در این بررسی عددی اثر هوای اضافی، توان حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و انتقال حرارت تشعشعی برروی تولید NO و CO مورد ارزیابی قرار گرفته است. هسو و همکارانش به صورت عددی اثر تغییرات ضرایب انتقال حرارت را بر روی عملکرد یک مدل مشخص مشعل متخلخل بررسی کرده‌اند [۵]. در این تحقیق بحثی بر روی انواع مدلهای مختلف پیشنهاد شده برای تعیین ضرایب انتقال حرارت نشده است و تنها حساسیت عملکرد مشعل متخلخل نسبت به هریک از این ضرایب نشان داده شده است. تاثیر خصوصیات مواد در

5 Quenching
6 Stabilization
7 Noise
8 Weinberg
9 Excess Enthalpy
10 Super-adiabatic Combustion
11 Takeno
12 Sato

پایداری مشعل متخلخل توسط بارا و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است[۶]. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که خصوصیات ماتریس متخلخل به صورت محسوسی بر روی پایداری تاثیر گذارست. در این تحقیق نیز تنها به اثر افزایش یا کاهش ضریب انتقال حرارت هدایت و انتقال حرارت حجمی بر حدود پایداری به صورت عددی اکتفا شده است. همچنین به دلیل دردسترس نبودن اطلاعات برازش انتقال حرارت جابجایی زیرکونیا از نتایج بدست آمده برای فوم آلومینا استفاده شده است.

از مرور تحقیقات گذشته ضرورت بررسی صحت استفاده از مدلهای مختلف ضرایب انتقال حرارت در مشعل متخلخل مشهود است. مدلهای مختلفی برای تعیین ضریب انتقال حرارت در فومها متخلخل مورد استفاده در مشعل‌های متخلخل پیشنهاد شده است. فو و همکارانش سعی بر ارائه برازشهای عمومی برای تعیین ضریب انتقال حرارت حجمی نموده‌اند[۷]. یونیس و ویسکانتا از نتایج آزمایشگاهی برازشی برای ضریب انتقال حرارت حجمی در آلومینا و کوردیرایت بدست آوردند[۸]. ضریب انتقال حرارت هدایت یکی از موضوعات جذاب برای محققین بوده است. فو و همکارانش با استفاده از روش مدارهای حرارتی[۱۳] برای دو شکل هندسی سلولهای متخلخل مدلی برای تعیین ضریب انتقال حرارت مواد متخلخل رشته‌ای پیشنهاد داده‌اند [۹]. در خصوص انتقال حرارت تشعشعی ضرایب تفرق و خاموشی از عوامل تاثیرگذار بر شار حرارت تشعشعی داخل ماده متخلخل می‌باشند و ضریب صدور عامل تاثیرگذار بر شار تشعشعی خروجی از مشعل متخلخل به محیط اطراف است. از اینرو تحقیقات متعددی برای تعیین این ضرایب به صورت تجربی انجام پذیرفته است که در این تحقیق به بررسی صحت مدلهای پیشنهادی ضریب انتقال حرارت حجمی پرداخته شده است. همچنین دامنه کاربرد حالت تعادل گرمایی بین دو فاز جامد و گاز محیط متخلخل بدست آمده است. به دلیل ناچیز بودن انتقال حرارت فاز گاز در مقابل فاز جامد در اینجا از انتقال حرارت فاز گاز چشم‌پوشی شده است.

۲- معادلات حاکم

برای مدلسازی محیط متخلخل از روش متوسط گیری حجمی استفاده شده است [۱۰]. در این روش معادلات روی حجم موثر متوسط که المانی از محیط متخلخل است متوسط گیری شده و پارامترهای معادلات بیانگر مقادیر متوسط در مرکز این حجم معیار می‌باشند. اندازه این حجم معیار (rev[۱۴]) بسیار بزرگتر از مقیاس حفره‌های جسم متخلخل و به اندازه کافی کوچکتر از طول معیار ماکروسکوپیک است. تفاوت معادلات حاکم احتراق در محیط متخلخل با احتراق در فضای آزاد در اضافه شدن معادلات بقای انرژی فاز جامد است. در این مدلسازی به دلیل طول نسبتا کوتاه مشعل متخلخل از افت فشار در جهت حرکت جریان صرفه‌نظر شده است همچنین از انتقال حرارت جانبی صرفه‌نظر شده است. به عبارت دیگر از مدل یک‌بعدی استفاده شده است. جریان سیال نیز آرام در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم متوسط‌گیری شده در مشعل متخلخل عبارتند از:

معادله پیوستگی یا بقای جرم:

$$\frac{\partial\left(\rho_g \phi\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_g \phi U\right)}{\partial x}=0 \qquad (۱)$$

معادله بقای گونه‌های شیمیایی:

$$\rho_g \phi \frac{\partial Y_k}{\partial t}+\rho_g \phi U \frac{\partial Y_k}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_g \phi Y_k V_k\right)-\phi \dot{\omega}_k W_k=0 \qquad (۲)$$

معادله بقای انرژی فاز گاز:

13 Thermal-circuit
14 Representative Elementary Volume

$$\rho_g \phi C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g \phi U C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\phi \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}\right) + \phi \sum_{k=1}^{N} \rho Y_k V_k C_{p,k} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \phi \sum_{k=1}^{N} h_k \dot{\omega}_k + H_v \left(T_g - T_s\right) = 0 \quad (۳)$$

معادله بقای انرژی فاز جامد:

$$\rho_s \phi C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left((1-\phi)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}\right) + H_v \left(T_g - T_s\right) - \frac{dq_r}{dx} = 0 \quad (۴)$$

در این روابط ϕنسبت تخلخل، U سرعت جریان، H_v ضریب انتقال حرارت حجمی و λ_s ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. همچنین Y_k، V_k، $\dot{\omega}_k$، W_k و h_k به ترتیب کسر جرمی، سرعت دیفیوژن، نرخ تولید مولی، جرم مولکولی و آنتالپی مولی گونه‌های شیمیایی می‌باشند. از اندیس g برای نشان دادن فاز گاز و از اندیس s برای نشان دادن فاز جامد استفاده شده است.

ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل به جنس ماده متخلخل و دمای آن وابسته است. در بین فومهای سرامیکی زیرکونیا دارای ضریب هدایت حرارتی بین W/m-k ۲ تا W/m-k ۵ می‌باشد و تغییرات کمی نسبت به افزایش درجه حرارت نشان می‌دهد[۱۱]. یکی از عوامل تاثیرگذار بر تعیین ضریب هدایت حرارتی آرایش ماتریس متخلخل یا چگونگی قرارگرفتن حفره‌های خالی درون محیط متخلخل می‌باشد. در اینجا این عامل توسط قطر متوسط حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیقات متنوعی برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی انجام پذیرفته است. در مرجع [۱۲] مروری برآنها گردآوری شده است. یکی از معتبرترین و پرکاربردترین برازشهای ارائه شده برای عدد نوسلت در بسترهای آکنده[۱۵]، توسط واکائو و کاگویی ارائه شده است [۱۳]. در آزمایشات انجام شده توسط یونیس و ویسکانتا مشخص گردید که عدد نوسلت حجمی فومهای سرامیکی بیشتر از مقدار بدست آمده توسط برازشهای بستر آکنده است. آنها ضریب انتقال حرارت جابجایی برای آلومینا و کوردیرایت[۱۶] با درصد تخلخل بالا ($0.83 < \phi < 0.87$) را برای فومی که دارای ضخامت بین ۱۲/۵ تا ۲۵ میلیمتر بود، بدست آوردند [۸]. فو، ویسکانتا و گور با بررسی نمونه‌های مختلف سرامیک‌ها از لحاظ جنس، درصد تخلخل و ضخامت رابطه‌ای عمومی برای عدد نوسلت ارائه دادند. از آنجا که تعیین این پارامتر به نحوه ساخت سرامیک‌ها وابستگی زیادی دارد لذا مقایسه نتایج با دیگر تحقیقات تفاوت‌های محسوسی را نشان می‌دهد [۷]. رابطه ارئه شده در این مرجع [۷] عبارتست از:

$$Nu_v = \left[0.0426 + 1.236/\left(L/d_p\right)\right] \mathrm{Re}_{d_p} \qquad 2 \le \mathrm{Re}_{d_p} \le 836 \quad (۵)$$

در رابطه (۵) Lضخامت نمونه سرامیکی، d_p قطر متوسط حفره‌های ماده متخلخل و عدد رینولدز $\mathrm{Re}_{d_p} = \frac{U d_p}{\upsilon}$ می‌باشند.

از روی مقدار بدست آمده برای عدد نوسلت حجمی می‌توان ضریب انتقال حرارت حجمی را بدست آورد.

$$Nu_v = H_v d_p^2 / k \quad (۶)$$

همچنین می‌توان رابطه‌ای برای ضریب انتقال حرارت حجمی با ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به سطح مقطع به ازای واحد حجم ماده متخلخل (a_v) بدست آورد:

$$H_v = a_v h \quad (۷)$$

تعیین a_v با توجه به اطلاعات سازندگان سرامیک و یا اندازه‌گیری میسر خواهد بود. در روابط زیر به دو نمونه اشاره شده است [۱۳]:

15 Packed beds
16 Cordierite

$$a_v = 169.4PPC \quad (m^2/m^3) \tag{۸}$$

$$a_v = \frac{4\phi}{d_p(1-\phi)} \tag{۹}$$

در رابطه (۹)، PPC تعداد حفره‌ها به ازای یک سانتیمتر طول محیط متخلخل می‌باشد. محاسبه d_p نیز دارای همان مشکل a_v می‌باشد. یکی از روابط ارائه شده برای محاسبه آن عبارتست از:

$$d_p = \sqrt{4\phi/\pi} \Big/ PPC \tag{۱۰}$$

اکنون با داشتن روابط (۵) تا (۱۰) می‌توان ترم انتقال حرارت جابجایی که باعث زوج شدن دو معادله انرژی می شود را مورد محاسبه قرار داد.

انتقال حرارت تشعشعی در شعله آزاد آرام باعث اندکی کاهش درجه حرارت شعله می‌گردد که به دلیل ناچیز بودن ضریب جذب گازها، معمولا صرفه‌نظر می‌گردد. در شعله مشعل متخلخل انتقال حرارت تشعشعی ترم موثری در معادله بقای انرژی فاز جامد است.

برای مدلسازی انتقال حرارت تشعشع و تعیین ترم $\frac{dq_r}{dx}$ ابتدا باید شدت تشعشع[۱۷] به کمک رابطه انتقال تشعشع (RTE) محاسبه گردد. این رابطه عبارت است از:

$$\frac{dI(\vec{r},\hat{s})}{dx} = -\beta(\vec{r})I(\vec{r},\hat{s}) + \kappa(\vec{r})I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s(\vec{r})}{4\pi}\int_{4\pi} I(\vec{r},\hat{s}')\varphi(\hat{s}',\hat{s})d\Omega' \tag{۱۱}$$

که در آن $I(\vec{r},\hat{s})$ شدت تشعشع در راستای $\vec{r}$ و زاویه فضایی $\hat{s}$ و φ تابع فاز تفرق شار تشعشعی می‌باشد. βضریب خاموشی، κ ضریب جذب و σ_s ضریب تفرق می‌باشد. در رابطه (۱۱) اولین ترم در سمت راست بیانگر تلفات شدت تشعشع بواسطه جذب ویا تفرق رو به خارج می‌باشد. عبارت دوم و سوم از سمت راست معادله، افزایش شدت تشعشع بواسطه صدور یا تفرق رو به داخل را نشان می‌دهند.

استفاده از رابطه RTE به دلیل اینکه محیط متخلخل از لحاظ تشعشعی فعال می‌باشد اجتناب ناپذیر است. اگر شدت تشعشع مشخص باشد می‌توان شار تشعشعی را با استفاده از رابطه (۱۲) و گرادیان آن را از رابطه (۱۴) بدست آورد.

$$q_x(\vec{r}) = \int_{2\pi} I(\vec{r},\hat{s})(\hat{s}\cdot\hat{e}_x)d\Omega \tag{۱۲}$$

$$G(\vec{r}) = \int_{4\pi} I(\vec{r},\hat{s})d\Omega \tag{۱۳}$$

$$\nabla.q = \kappa\left[4\pi I_b(\vec{r}) - G(\vec{r})\right] \tag{۱۴}$$

برای حل معادله (۱۱) از روش جهت‌های تفکیک شده[۱۸] یا DOM استفاده شده است. این روش تقریب نسبتا دقیقی از حل کامل RTE را بدست می‌دهد که به دلیل دقت و سرعت محاسبات در مسائل احتراق کاربرد گسترده‌ای یافته است.

17 Radiation intensity
18 Discrete Ordinate Method

۳- شرایط مرزی

معادله پیوستگی با توجه به ثابت فرض شدن دمای یک نقطه در راستای حرکت جریان و تعیین دبی مخلوط احتراق بر پایه آن مورد استفاده قرار گرفته است. در این محاسبات دمای نقطه‌ای از ناحیه پیش‌گرمایش ثابت و برابر ۱۰۷۵ K فرض شده است.
معمولا غلظت ترکیبات ورودی به مشعل مشخص است که می‌توان آنها را به صورت جزء مولی یا جرمی مشخص نمود. در خروجی غلظت گونه‌های شیمیایی توسط انفصال معادله بقای گونه‌های شیمیایی بدست می‌آید.
دمای گاز در ورودی و خروجی از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌گردند [۱۴].

$$\dot{m}c_{p,g}\left(T_{g,i}-T_g\right)=-k_g\frac{\partial T_g}{\partial x} \qquad at \quad x=0 \tag{۱۵}$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x}=0 \qquad at \quad x=L \tag{۱۶}$$

شرایط مرزی معادله انرژی ماتریس متخلخل در ورودی و خروجی مشعل با توجه به بقای انرژی در حجم کنترل سلولهای مرزی جامد عبارتند از:

$$\left[h_i\left(T_{g,i}-T_s\right)+\sigma\varepsilon_i\left(T_{i,surround}^4-T_s^4\right)\right]\left(1-\phi\right)=-k_{eff,s}\frac{\partial T_s}{\partial x} \qquad at \quad x=0 \tag{۱۷}$$

$$\left[h_o\left(T_{g,o}-T_s\right)+\sigma\varepsilon_o\left(T_{o,surround}^4-T_s^4\right)\right]\left(1-\phi\right)=-k_{eff,s}\frac{\partial T_s}{\partial x} \qquad at \quad x=L \tag{۱۸}$$

در معادلات (۱۷) و (۱۸) ، h_i و h_o ضرایب انتقال حرارت جابجایی در ناحیه ورودی و خروجی مشعل می‌باشند که رابطه آنها با ضریب انتقال حرارت حجمی قبلا مورد استناد قرار گرفت.
در خصوص معادله RTE فرض شده است که محیط اطراف مشعل متخلخل به مانند جسم سیاه عمل می‌نمایند. دمای محیط خروجی مشعل نزدیک به دمای گازهای خروجی از مشعل فرض می‌شود و دمای محیط ورودی نیز معادل دمای مخلوط احتراق در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که در حل معادله RTE از تقریب DOM استفاده شده است لذا داریم:

$$I\left(x=0,\mu_i\right)=\varepsilon_i I_b+\frac{1-\varepsilon_i}{\pi}\sum_{\hat{s}_j\cdot\hat{e}_x}w_j\Phi\left(\mu_i,\mu_j\right)I\left(x,\mu_i,\mu_j\right)\mu_j \quad , \quad \hat{s}_j\cdot\hat{e}_x<0 \tag{۱۹}$$

$$I\left(x=L,\mu_i\right)=\varepsilon_i I_b+\frac{1-\varepsilon_i}{\pi}\sum_{\hat{s}_j\cdot\hat{e}_x}w_j\Phi\left(\mu_i,\mu_j\right)I\left(x,\mu_i,\mu_j\right)\mu_j \quad , \quad \hat{s}_j\cdot\hat{e}_x>0 \tag{۲۰}$$

۴- روش حل

برای حل معادلات حاکم از کد *PREMIX* که یکی از ماژولهای کد معروف *CHEMKIN* است استفاده شده است [۱۵].
این کد برای مدلسازی شعله آزاد پیش مخلوط یک بعدی به‌کار می‌رود. برای استفاده در مشعل متخلخل تغییرات زیر در این کد اعمال شده است:

۱- اضافه نمودن خواص محیط متخلخل (فاز جامد) و همچنین محاسبه ضریب انتقال حرارت تشعشعی
۲- اضافه نمودن معادلات انتقال حرارت تشعشع (هشت معادله)
۳- اصلاح معادلات بقای ذرات و پیوستگی (در نظر گرفتن تخلخل در آنها)
۴- اصلاح معادله بقای انرژی فاز گاز (اضافه نمودن ترم انتقال حرارت جابجایی و در نظر گرفتن تخلخل)
۵- اضافه نمودن معادله بقای انرژی فاز جامد

۶- اضافه نمودن و یا اصلاح شرایط مرزی
۷- حل معادلات اضافه شده با استفاده از زیر روال $TWOPNT$ به صورت ضمنی

با تغییراتی که در کد $PREMIX$ اعمال شده است ابتدا معادلات بقای گونه‌های شیمیایی با در نظر گرفتن پروفیل اولیه دمایی که به عنوان حدس اولیه داده شده است، حل می‌گردد. در این حالت فرض شده است دمای گاز و جامد در هر نقطه یکسانند. در مرحله دوم معادله انرژی با استفاده از تقریب اولیه بدست آمده از مرحله قبل در خصوص گونه‌های شیمیایی مورد حل قرار خواهد گرفت. در این مرحله معادلات بقای گونه‌های شیمیایی، بقای انرژی فاز گاز و بقای انرژی فاز جامد بدون در نظر گرفتن ترم انتقال حرارت تشعشعی مورد حل قرار خواهد گرفت. پس از همگرایی این مرحله، مرحله سوم با محاسبه گرادیان تشعشع از تقریب DOM که دارای هشت معادله دیفرانسیل مرتبه اول است و قرار دادن در معادله بقای انرژی فاز جامد شروع خواهد گرفت. با همگرایی این مرحله جواب نهایی کد بدست خواهد آمد.
در روش حل معادله انتقال تشعشع می‌توان آن را به صورت صریح یا ضمنی در نظر گرفت. به بیان دیگر در روش صریح ابتدا ترم تشعشع بدست می‌آید و سپس آن را در معادله انرژی فاز جامد قرار می‌دهیم. بدیهی است در این روش فرض می‌شود میدان دمای ماتریس جامد مشخص است و با استفاده از آن ترم تشعشع بدست آمده است. بر طبق تجربه انجام گرفته همگرایی این روش حل بسیار کند بوده و از لحاظ زمان انجام محاسبات بسیار وقت‌گیر است. بنابراین در کد از روش ضمنی استفاده شده است به این معنی که تمامی ترمهای مجهول به صورت همزمان مورد محاسبه قرار می‌گیرند.
برای رسیدن به جواب از شبکه تطبیق‌یابنده استفاده شده است. این شبکه محاسبه از تعداد ۱۰ نقطه شروع شده و تا رسیدن به دقت مطلق 10^{-5} بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ نقطه به شبکه محاسباتی در نقاطی که تغییرات گرادیان پارامترها شدید است، اضافه می‌گردد.

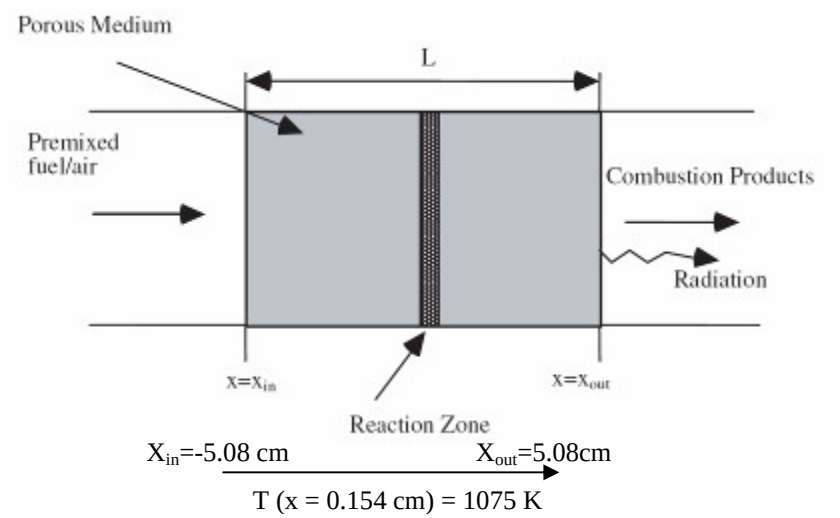
۵- نتایج

یک نمونه مشعل متخلخل تک لایه‌ای که برای آن نتایج تجربی جهت مقایسه صحت نتایج عددی موجود بود، انتخاب گردیده است. این مشعل از جنس زیرکونیا و به ضخامت ۱۰/۱۶ سانتیمتر ساخته شده است. خواص ماتریس متخلخل در جدول (۱) آورده شده است. از آنجا که در تحقیقات انجام شده بر پایه این مشعل ضریب انتقال حرارت حجمی و ضریب هدایت به صورت ثابت در نظر گرفته شده است در اینجا نیز مبنای اولیه همان مقادیر ثابت می‌باشد [۱۶ و ۱۷] .

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی ماتریس متخلخل مورد استفاده در مدل

$\beta = 270\ \ m^{-1}$	$\sigma_s = 216\ m^{-1}$
$H_v = 10^7\ \ W/m^3 - K$	$\lambda_s = 1.2\ W/m - K$
$\rho_s = 5.56\times10^3\ \ kg/m^3$	$\phi = 0.87\ for\ \ 3.9PPC\ \ PSZ$
$c_{p,s} = 824\ \ J/kg - K$	

شماتیک منطقه احتراق درون ماده متخلخل در شکل (۱) نشان داده شده است.

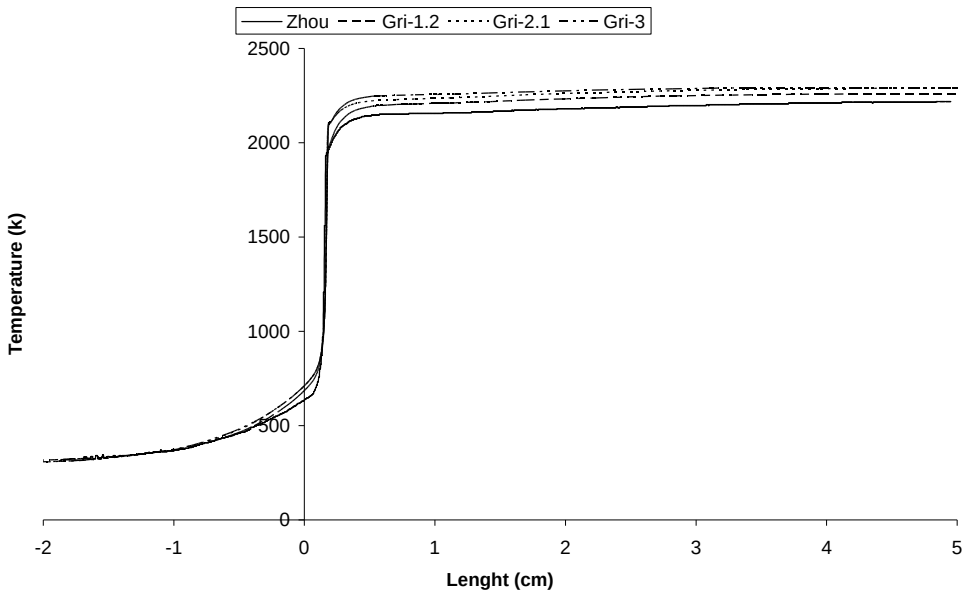


شکل ۱ شماتیک مشعل متخلخل مورد نظر در محاسبات

۵-۱- صحت نتایج مدلسازی در مقایسه با نتایج تجربی

۵-۱-۱- پروفیل دما

سه مکانیزم احتراقی که توسط موسسه تحقیقات گاز[۱۹] طی دهه گذشته ارائه شده است، به عنوان مکانیزم استاندارد در تحقیقات احتراق متان مورد استناد قرار گرفته است. در شکل (۲) پروفیل دمای بدست آمده از مکانیزمهای پیشنهادی GRI با نتایج عددی زو و پریرا که از مکانیزم میلر استفاده نموده‌اند، آورده شده است [۴]. همانگونه که مشاهده می‌گردد تطابق خوبی بین نتایج عددی بدست آمده وجود دارد.



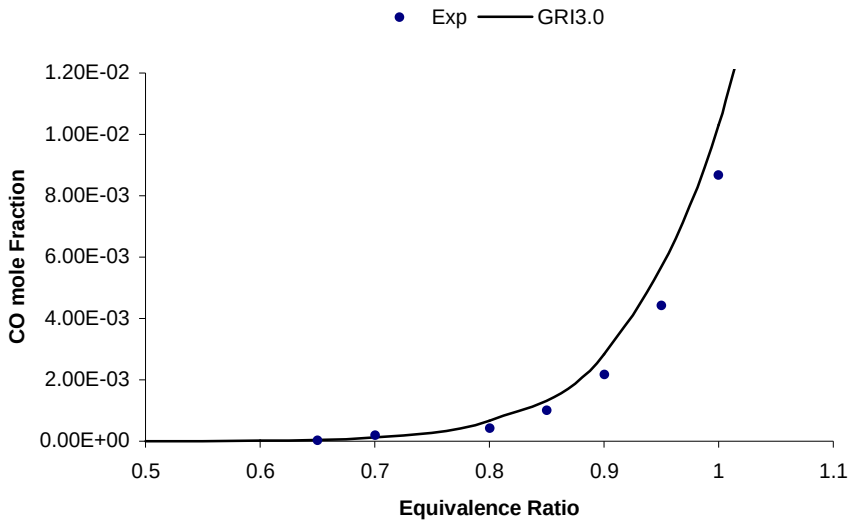
شکل ۲ تغییرات دما در طول مشعل متخلخل در احتراق استوکیومتریک

19 Gas Research Institute (GRI) www.me.berkeley.edu/gri_mech/

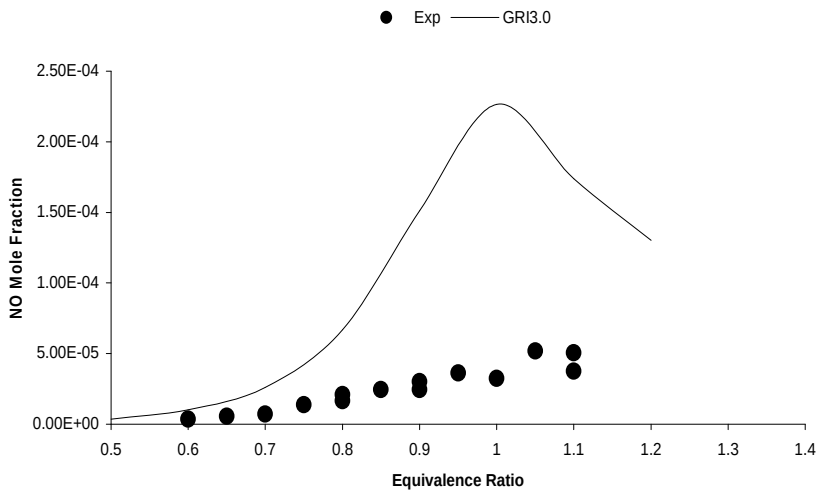
۵-۱-۲- پروفیل ذرات

بررسی تغییرات غلظت ذرات در طول مشعل نمایانگر ناحیه شعله و چگونگی شکل‌گیری محصولات نهایی احتراق است. یکی از مهمترین مباحث در خصوص عملکرد مشعل متخلخل بررسی آلاینده‌های خروجی از آن است که تحقیقات آزمایشگاهی متعددی در این رابطه انجام شده است.

از آنجا که مقایسه نتایج بدست آمده در آزمایشات تجربی در خصوص جزء مولی محصولات احتراق تنها در بخش خروجی مشعل قابل انجام است لذا در اشکال (۳) و (۴) نقاط مشخص شده بیانگر کسر مولی آلاینده‌های CO و NO می‌باشند.



شکل ۳ مقایسه میزان انتشار مونوکسید کربن با نتایج تجربی[۱۸]



شکل ۴ مقایسه میزان انتشار مونوکسید نیتروژن با نتایج تجربی[۱۸]

مقدار مونوکسید کربن حاصل از محاسبات عددی با مقدار اندازه‌گیری شده آن تطابق قابل قبولی دارد در حالی که مقدار مونوکسید نیتروژن تفاوتی را نشان می‌دهد. از آنجا که تولید اکسیدهای نیتروژن به دما وابستگی زیادی دارد و عوامل مختلف زیادی در شکل دادن پروفیل دما درون ماده متخلخل موثراند، لذا با توجه به نقصان اطلاعات در خصوص خواص تشعشعی ماده متخلخل، ضریب انتقال حرارت جابجایی و هدایتی و همچنین نحوه حرکت سیال داخل ماده متخلخل، اینچنین انحرافی قابل پیش‌بینی می‌باشد. با بهبود خواص ماده متخلخل می‌توان به نتایج دقیقتری دست یافت.

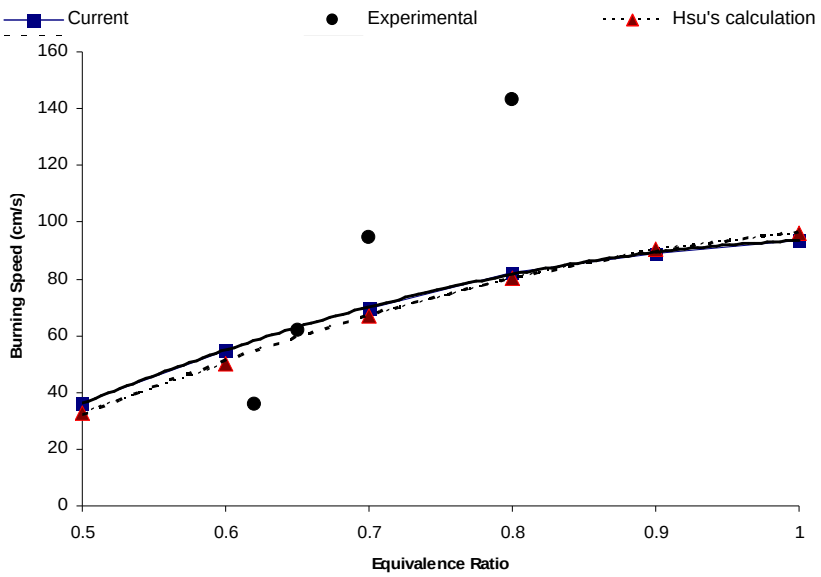
۵-۱-۳- سرعت اشتعال

این پارامتر یکی از مهمترین پارامترهای بیان‌کننده عملکرد مشعل می‌باشد. در جدول (۲) نتایج بدست آمده از حل عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۲ مقایسه سرعت اشتعال حل عددی با نتایج تجربی [۱۸]

Experimental Data	GRI-1.2	GRI-2.11	GRI-3.0
185 cm/sec	99.2 cm/sec	104.4 cm/sec	105.8 cm/sec

همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، افزایش دقت واکنش‌های احتراق دقت محاسبات را نیز بالا برده است. مقایسه این سرعت با سرعت شعله آزاد بیانگر افزایش محسوس سرعت شعله درون محیط متخلخل می‌باشد. در شکل (۵) اثر هوای اضافی بر سرعت اشتعال نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد با افزایش نسبت هوای اضافی سرعت اشتعال کاهش یافته و در حالتی که مخلوط گازهای ورودی دارای مقدار زیادی هوای اضافی است (Equivalence Ratio > 0.7) نتایج بدست آمده از حل عددی با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) مقایسه‌ای با نتایج عددی بدست آمده از تحقیق هسو و همکارانش آورده شده است. در بررسی علت اختلاف نتایج تجربی با شبیه‌سازی عددی در نسبت اختلاط‌های بزرگتر از 0.7 محققین دلایل متعددی را ذکر نموده‌اند که از آن میان می‌توان به عدم در نظر گرفتن پدیده اغتشاش در حرکت جریان، وجود افت حرارت جانبی و عدم مدلسازی آن در مدلهای یک بعدی و ضعف اطلاعات خواص مواد متخلخل اشاره نمود. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر این پارامتر استفاده از مدل تشعشعی مناسب می‌باشد. از آنجا که در این تحقیق از تقریب DOM برای حل معادله انتقال تشعشع استفاده شده است، لذا سعی شده است با افزایش جهتهای تفکیک شده یا استفاده از تقریب S_8 تا حدی میزان خطای ترم تشعشع کاهش یابد.



شکل ۵ تغییر سرعت اشتعال مخلوط احتراقی با کاهش هوای اضافی و مقایسه با نتایج تجربی و محاسبات انجام گرفته در مرجع [۱۷]

۵-۲- تاثیر ضریب انتقال حرارت حجمی بر سرعت شعله و محصولات احتراق

در مدل پایه مشعل متخلخل ضریب انتقال حرارت حجمی ثابت و برابر $10^7 W/m^3-K$ در نظر گرفته شده است. روابط تجربی متعددی با توجه به نوع ماده متخلخل برای سرامیکهای رشته‌ای مورد استفاده در مشعل‌ها پیشنهاد شده است. در اینجا برخی از این پیشنهادات مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدیهی است در عمل ضریب انتقال حرارت حجمی نمی‌تواند ثابت باشد و به سرعت عبور جریان و درجه حرارت آن وابسته است. با افزایش H_v درجه حرارت محلی گاز کاهش و درجه حرارت محلی

جامد در ناحیه احتراق افزایش می‌یابد. دلیل تغییرات درجه حرارت را می‌توان بهبود انتقال حرارت جابجایی از فاز گاز به فاز جامد دانست. افزایش درجه حرارت جامد در ناحیه احتراق باعث افزایش درجه حرارت فاز جامد در ناحیه پیش‌گرمایش به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت هدایتی و تشعشعی می‌گردد. به بیان دیگر در ناحیه پیش‌گرمایش به دلیل وجود انتقال حرارت هدایتی و تشعشعی درجه حرارت جامد بیش از گاز است و افزایش انتقال حرارت جابجایی در ناحیه احتراق این اختلاف را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر با افزایش H_v درجه حرارت جامد و گاز به یکدیگر نزدیکتر خواهند شد و در حد $H_v \geq 10^9\ W/m^3-K$ این دو دما یکی خواهند بود. نتایج تجربی نیز این پیش‌بینی را تایید می‌نماید [۲]. اکثر تحقیقاتی که در خصوص یافتن رابطه تجربی انتقال حرارت حجمی انجام شده است برمبنای بسترهای آکنده[۲۰] می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل سختی تعیین نسبت مساحت بستر جامد به ازای واحد حجم از ضریب انتقال حرارت حجمی به جای ضریب انتقال حرارت سطحی (جابجایی) استفاده می‌شود. این دو ضریب را می‌توان توسط رابطه $H_v = a_v h$ که در آن a_v نسبت مساحت جانبی ماتریس متخلخل است، به یکدیگر ارتباط داد. از آنجا که ضخامت یا قطر ماتریس متخلخل در مشعلهای سرامیکی بسیار کمتر از بسترهای آکنده است لذا به روابط تجربی جدیدی در این زمینه نیاز است. یونیس و ویسکانتا به صورت تجربی رابطه‌ای را برای فومهای سرامیکی آلومینا و کوردیرایت ارائه داده‌اند [۸]. فو و همکارنش سعی کرده‌اند رابطه‌ای عمومی براساس عدد رینولدز به صورت $Nu_v = C\,\mathrm{Re}^m$ ارائه نمایند. این رابطه برای سرامیکهای مولایت، YZA، SiC و کوردیرایت مورد آزمایش قرار گرفته است [۷]. یکی از اساسی‌ترین مشکلات در استفاده از اینگونه روابط تعیین دقیق قطر متوسط حفره‌های ماده متخلخل است. معمولا سازندگان مواد متخلخل هریک اعدادی را برای این پارامتر بیان می‌دارند و رابطه‌ای کلی برای آن موجود نیست. در این تحقیق از رابطه $d_p = \sqrt{4\phi/\pi}\,/PPC$ با فرض معادل قرار دادن حفره‌ها با استوانه‌هایی به قطر یکنواخت d_p که در جهت جریان قرار دارند، استفاده شده است. عدد نوسلت نیز برمبنای همین قطر محاسبه می‌شود. در جدول (۳) نتایج سه برازش تجربی پیشنهاد شده با مدل پایه برطبق استفاده از مکانیزم احتراقی GRI 3.0 و احتراق استوکیومتریک آورده شده است. لازم به ذکر است از آنجا که بیشترین انحراف از مقادیر تجربی در احتراق استوکیومتریک نسبت به احتراق رقیق مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳ تا ۵)، بنابراین در تمامی محاسبات از احتراق استوکیومتریک استفاده شده است تا بهبود حاصله در جوابها محسوس‌تر باشد.

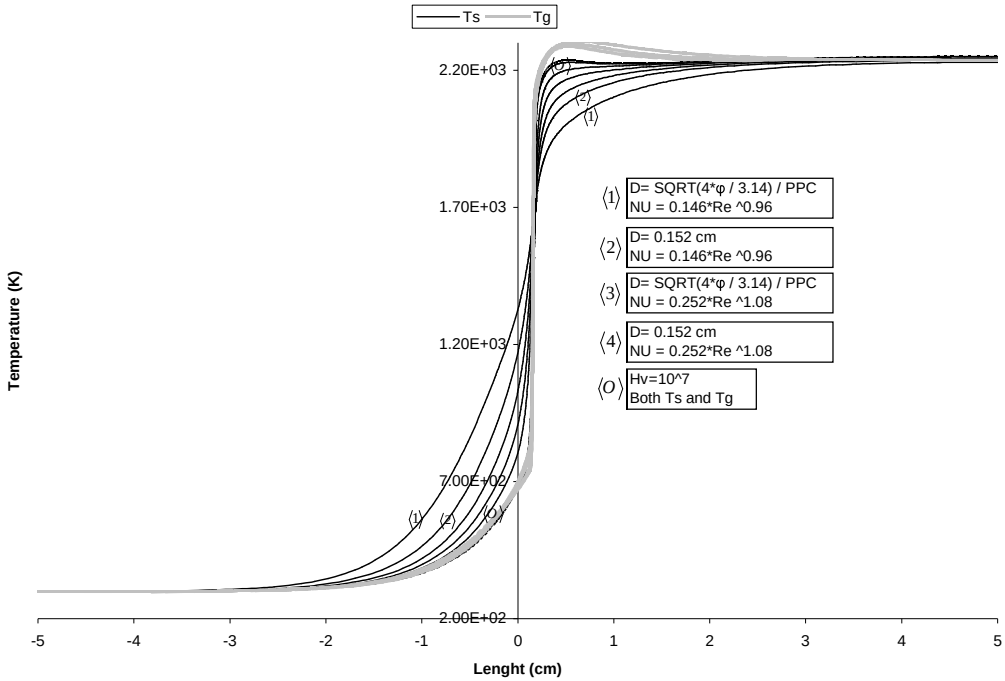
جدول ۳ تاثیر استفاده از ضریب انتقال حرارت حجمی متفاوت بر سرعت اشتعال و غلظت CO و NO در خروجی مشعل

	مرجع ۱۶	مرجع ۷
$H_v\ \left(W/m^3-K\right)$	10^7	$Nu_v = \left[0.0426 + 1.236/\left(L/d_p\right)\right]\mathrm{Re}_{d_p}$
سرعت اشتعال *(cm/s)*	105.79	67.43
کسر مولی CO	0.01031	0.009506
کسر مولی NO	2.26E-04	3.18E-04

	مرجع ۷	مرجع ۶	مقادیر تجربی مرجع ۱۸
$H_v\ \left(W/m^3-K\right)$	$Nu_v = 0.252\,\mathrm{Re}_{dp}^{1.08}$	$Nu_v = 0.146\,\mathrm{Re}_{dp}^{0.96}$	——
سرعت اشتعال *(cm/s)*	85.56	73.77	185
کسر مولی CO	0.009839	0.009718	0.00866
کسر مولی NO	2.79E-04	3.05E-04	3.24E-5

20 Packed Bed

همانگونه که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد تغییر ضریب انتقال حرارت حجمی تاثیر زیادی بر سرعت شعله داشته است. از جدول (۳) مشخص می‌گردد رابطه (۵) توانایی لازم در مدلسازی مشعل متخلخل مورد تحقیق را دارا نمی‌باشد. همچنین نزدیکترین جواب بدست آمده در مقایسه با نتایج تجربی همان مقدار ثابت ارائه شده در مرجع [۱۶] می‌باشد. نتیجه به دست آمده قدری دور از انتظار است زیرا می‌دانیم ضریب انتقال حرارت جابجایی حداقل با سرعت جریان متناسب است. برای یافتن علت انحراف قطر متوسط حفره‌ها در چند حالت مختلف بررسی شده است. در شکل (۶) پروفیل دمای ماتریس متخلخل و فاز گاز در قطرهای متوسط مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد تغییرات ناچیزی در دمای فاز گاز ایجاد شده است در حالی که تغییرات بیشتری در دمای فاز جامد وجود دارد. این نمودار تاثیرپذیری زیاد فاز جامد را از ضریب انتقال حرارت حجمی نشان می‌دهد. نتایج مربوط به سرعت اشتعال و کسرهای مولی اکسید نیتروژن و اکسید کربن در جدول (۴) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل ۶ پروفیل دمای فاز جامد و گاز در حالتهای مختلف عدد نوسلت

جدول ۴ تاثیر تغییر قطر متوسط حفره‌های ماتریس متخلخل در رابطه ضریب انتقال حرارت حجمی بر سرعت اشتعال و کسر مولی CO و NO در خروجی مشعل

حالت دوم	حالت اول	$Nu_v = 0.146\,\mathrm{Re}_{dp}^{0.96}$
0.152	$\sqrt{4\phi/\pi}\,/PPC = 0.269$	d_p (cm)
80.81	73.77	**سرعت** اشتعال *(cm/s)*
9.77E-3	9.72E-3	کسر مولی CO
2.89E-04	3.05E-04	کسر مولی NO

$Nu_v = 0.252\,\mathrm{Re}_{dp}^{1.08}$	حالت سوم	حالت چهارم
d_p (cm)	$\sqrt{4\phi/\pi}\,/PPC = 0.269$	0.152
سرعت اشتعال *(cm/s)*	85.56	90.65
کسر مولی CO	9.84E-3	9.78E-3
کسر مولی NO	2.79E-04	2.65E-04

$Nu_v = 0.252\,\mathrm{Re}_{dp}^{1.08}$	حالت پنجم	حالت ششم
d_p (cm)	0.076	0.0304
سرعت اشتعال *(cm/s)*	96.05	101.18
کسر مولی CO	9.92E-3	1.003E-2
کسر مولی NO	2.53E-04	2.39E-04

همانگونه که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد انتخاب قطر متوسط موثر حفره‌های ماتریس متخلخل به طور موثری بر دقت عدد نوسلت محاسبه شده تاثیرگذار است. متاسفانه همچنانکه قبلا نیز اشاره گردید تعیین قطر متوسط حفره‌ها بسیار پیچیده و با توجه به نوع ساخت فومهای متخلخل و تکنولوژی ساخت آنها متغیر است. ازاینرو تعیین رابطه‌ای عمومی برای عدد نوسلت با توجه به عدم قطعیت قطر متوسط حفره‌ها، غیر معتبر خواهد بود. این نتیجه‌گیری را می‌توان از مقایسه دقت معادله عمومی (۵) با دیگر نتایج در جدول (۳) مشاهده نمود.

چنانچه از ضریب انتقال حرارت ثابت در مدلسازی استفاده گردد، با افزایش میزان آن، سرعت اشتعال نیز افزایش خواهد یافت. چنانچه مقدار H_v به اندازه کافی بزرگتر از مقدار 10^7 انتخاب گردد (مثلا یکصد برابر)، سرعت اشتعال به مقدار حدی در حدود ۱۰۷ سانتیمتر بر ثانیه خواهد رسید (جدول۵). بنابراین در حالت می توان دمای فاز گاز و جامد را یکسان درنظر گرفت یا به عبارت دیگر از فرض تعادل گرمایی استفاده نمود. در نتیجه این فرض تنها یک معادله انرژی برای هر دو فاز حل می گردد و محاسبات ساده تر می گردد.

جدول ۵ افزایش ضریب انتقال حرارت حجمی به صورت ضرایبی از مقدار پایه $۱۰^۷$ و تاثیر آن بر سرعت اشتعال، کسر مولی CO و NO

$H_v\ (W/m^3\text{-}K)$	10^7	1.2×10^7	10×10^7	100×10^7
سرعت اشتعال *(cm/s)*	105.8	107	107	107
کسر مولی CO	1.03E-02	1.02E-02	1.02E-02	1.02E-02
کسر مولی NO	2.26E-04	2.18E-04	2.18E-04	2.18E-04

۶- جمع‌بندی

نتایج نشان می دهند که با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی دمای فاز جامد به سمت فاز گاز میل می‌کند و پروفیل دمایی به سمت یک مقدار حدی همگرا می‌گردد. این مقدار حدی در مدل مورد استفاده در این تحقیق $۱۰^۷$ بدست آمده است. مدلهای عمومی پیشنهاد شده برای ضریب انتقال حرارت حجمی دارای دقت کمی در تعیین عملکرد مشعل مورد بررسی بوده اند. از اینرو استفاده از مدلهای تجربی بدست آمده برای هر ماده متخلخل قابل تعمیم به دیگر مواد نمی‌باشد. عامل تعیین

کننده در این مدلسازی قطر متوسط حفره‌های فوم متخلخل می باشد. به بیان دیگر از آنجا که مدلهای پیشنهادی برای تعیین ضریب انتقال حرارت حجمی به صورت تابعی از عدد رینولدز بیان می شوند، تعیین دقیق عدد رینولدز که برحسب قطر حفره های محیط متخلخل بیان می شود، تاثیر زیادی بر صحت نتایج خواهد داشت. از آنجا که تعیین متوسط قطر حفره های محیط متخلخل به فرآیند ساخت آنها و بسیاری پارامترهای دیگر مرتبط است لذا مدلهای عمومی دارای دقت قابل قبولی نیستند.

مراجع

1. Howell, J., Hall, M. and Ellzey, J. L., "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 22, PP. 121-145, 1996
2. Tong, T. W. and Sathe, S. B., "Heat Transfer Characteristics of Porous Radiant Burners", J. Heat Transfer, Vol. 113, PP. 423-428, 1991
3. Tong, T. W., Sathe S. and Peck, P., "Improving the Performance of Porous Radiant Burners through use of Sub-micron Size Fibers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 6, PP. 1339-1346, 1990
4. Zhou, X. Y. and Pereira, J. C., "Numerical Study of Combustion and pollutants Formation in Inert Non-homogeneous Porous Media", Comb. Sci. and Tech., Vol. 130, PP. 335-364, 1997
5. Hsu, P. F., Howell, J. R. and Matthews, R. D., "A Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media", J. Heat Transfer, Vol. 115, PP. 744-750, 1993
6. Barra, A. J., Diepvens, G., Ellzey, J. L. and Henneke, M. R., "Numerical study of the Effect of Material Properties on Flame Stabilization in a Porous Burner", Comb. and Flame, Vol. 134, PP. 369-379, 2003
7. Fu, X., Viskanta, R. and Gore, J. P., "Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics", Experimental Thermal and Fluid Sci., 17, 285-293, 1998
8. Younis, L. B. and Viskanta, R., "Experimental Determination of the Volumetric Heat Transfer Coefficient between Steam of Air and Ceramic Foam", Int. J. Heat Mass Transfer, 36, 1425-1434, 1993
9. Fu, X., Viskanta, R. and Gore, J. P., "Prediction of Effective Thermal Conductivity of Cellular Ceramics", Int. Comm. Heat Mass Transfer, 25, 151-160, 1998
10. Sathe, S. B., Peck, R. E. and Tong, T. W., " A numerical analysis of heat transfer and combustion in porous radiant burners" Int. J. Heat and Mass Transfer, 33, 1331-1338, 1990
11. Pickencker, O. Pickencker, K., Wawrzin, K., et al, "Innovative Ceramic materials for Porous Radiant Burners", Interceram, 48, 326-329, 1999
12. Viskanta, R., "Interaction of combustion and heat transfer in porous inert media", Proceeding of 8th International Symposium on Transport Phenomena in Combustion, 1, 64-87, 1996
13. Kaviany, M., "Principles of Heat Transfer in Porous Media", Second Edition, (Second Printing), Springer-Verlag, New York, 1999
14. Leonardi, S. A., Viskanta, R. and Gore, J. P., "Analytical and Experimental Study of Combustion and Heat Transfer in Submerged Flame Metal Fiber Burner / Heater", J. Heat Transfer, 125, 118-125, 2003
15. Kee, R., Grcar, J., Smooke, M. and Miller, J., "A FORTRAN program for modeling steady laminar one dimensional premixed flames" Technical Report SAND85-8240, Sandia National Laboratories, 1985
16. Zhou, X. Y. and Pereira, J. C., "Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media", Fire and Materials, 22, 187-197, 1998
17. Hsu, P. F. and Matthews, R. D., "The Necessity of using Detailed Kinetics in Models for Premixed Combustion within Porous Media", Combustion and Flame, 93, 457-466, 1993
18. Chaffin, C., Koening, M., Koeroghlian, M., Matthews, R., Hall, M., Nichols, S. and Lim, I., Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, 4, 219-224, 1991