



## توسعه حل عددی گرمکن کاتالیستی تابشی و مقایسه با نمونه آزمایشگاهی

محمد سعید آقامحمدی نظری<sup>۱</sup>، حسین افشار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجو، کارشناسی ارشد مدیریت سیستم انرژی، دانشگاه دیکن استرالیا- جی لانگ، ملبورن

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

پست الکترونیک: [hossein.afshar@iau.ac.ir](mailto:hossein.afshar@iau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۱۲-۲ تاریخ دریافت: ۱۴۰۱-۰۶-۱۸

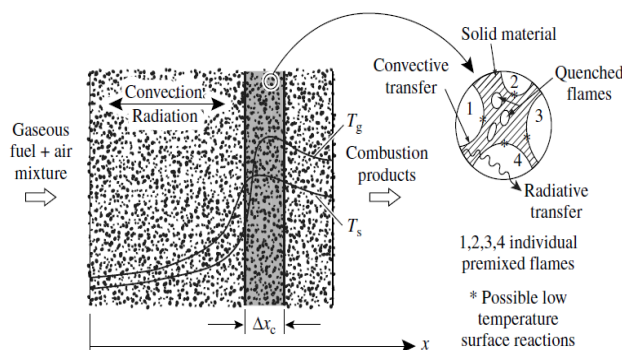
**چکیده:** مدلسازی عددی یک گرمکن کاتالیستی تابشی و مقایسه ی آن با نمونه آزمایشگاهی در این تحقیق انجام گرفت. انتقال حرارت غالب در این مدل گرمکن ها به صورت تشعشع صورت می گیرد. نمونه مدل شده به ابعاد  $۳۵ \times ۷۳$  با عمق ۳.۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. معادلات حالت، پیوستگی، ممنوم، انرژی و نیز معادلات انتقال گونه های شیمیایی در محیط متخلخل کاتالیستی، با استفاده از روش حجم محدود حل شدند. فشار و سرعت به واسطه الگوریتم SIMPLE به هم مرتبط شده و مخلوط گازهای واکنش دهنده به صورت گاز ایده آل تراکم پذیر در نظر گرفته شد. تغییرات ویسکوزیته با دما بر اساس معادله سادرلند سه ضریبی محاسبه شده و برای حل معادلات واکنشی از مدل آرنیوس جریان آرام استفاده شد. معادلات واکنشی به صورت بازگشت ناپذیر فرض شده است. مدل عددی ایجاد شده در این تحقیق با خطای ۰.۱۴٪ تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. از نمونه آزمایشگاهی کاتالیست، تحت آزمایش BET قطر متوسط منافذ که مورد نیاز برای حل عددی است حاصل شد. مدلسازی عددی این نوع واکنش گرمزای کاتالیستی، در جهت کاهش هزینه های آزمایشگاهی و صرفه جویی در زمان، کمک قابل توجهی در تحقیقات خواهد کرد.

واژه های کلیدی: گرمکن کاتالیستی، اکسیداسیون، کاتالیست، حل عددی، احتراق کاتالیستی

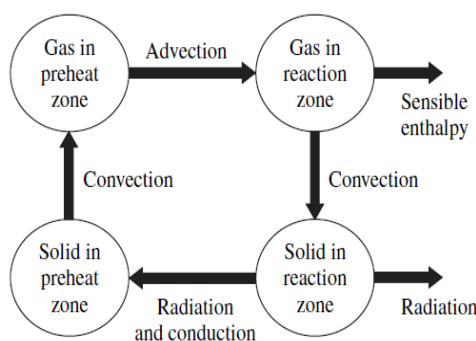
### مقدمه

در دهه های اخیر، کمبود منابع سوخت های فسیلی و آلاینده گی آنها، در کنار افزایش مصارف خانگی (گرمایش، سرمایش و آشپزی) محققان را واداشته تا برای بهبود بهره وری احتراق فعالیت کنند. احتراق در محیط متخلخل کاتالیستی، از بر همکنش جریان سیال (سوخت و هوا) با کاتالیست درون ناحیه متخلخل شکل میگیرد و با توجه به کاهش سرعت واکنش، دمای حاصل از اکسیداسیون پایین تر از دمای شعله احتراق معمولی است و این منجر به کاهش آلاینده های محیطی مانند اکسید نیتروژن و مونواکسید کربن خواهد شد. تحقیقات زیادی بر روی ساختار و مواد تشکیل دهنده محیط متخلخل کاتالیستی صورت گرفته است.

S.V. Kostin و همکاران یک روش تجربی ساده ی بصری، برای مطالعه دینامیک غیرخطی انتشار جبهه احتراق (اکسیداسیون) در محیط متخلخل پیشنهاد و اجرا کردند. آنها نتیجه گرفتند استفاده از شکاف، راه مناسبی برای کنترل جریان احتراق محیط متخلخلی و اکسید کننده های گاز در ماده متخلخل است [1]. ایمان محمدی و همکاران تاثیر تغییر ماده متخلخل بر روی بازده و میزان آلاینده های مشعل های متخلخل را به صورت عددی بررسی کردند. آنها یک نمونه ی متقارن دوبعدی برای احتراق محیط متخلخلی پیش آمیخته ارائه دادند. نتایج بیانگر آن بود که با تغییر در تخلخل مشعل، دمای بیشینه می تواند حدود ۴.۵ درصد کاهش یابد، و نتیجتاً، مقدار خروجی آلاینده ها نظیر  $NO_x$  کاهش یابد، در حالی که تغییرات افت فشار در طول مشعل قابل چشم پوشی بود. بعلاوه، تاثیر تغییر در نسبت هوای ورودی، ضریب انتقال حرارت حجمی، سرعت ورود مخلوط سوخت و هوا، سینتیک شیمیایی، ضریب رسانایی، و دمای دیواره ناحیه متخلخل مشعل، با تغییر تخلخل بررسی شد [2]. مطالعات I. Malico و همکاران نشان دهنده پتانسیل بالای مشعل های متخلخل، برای مصارف خانگی است [3]. روش راه اندازی سریع سرد در محیط متخلخل کمکی توسط Lai M-P و همکارانش طراحی شد. آزمایش آنها تایید کرد که این روش می تواند زمان راه اندازی گرمکن را کوتاه کند، میزان مصرف انرژی اولیه را کاهش دهد و پایداری حرارتی بهتری در سیستم ایجاد نماید [4]. بنا به طبیعت فیزیکی و شیمیایی مواد متخلخل، احتراق در محیط متخلخل به سه دسته قابل تقسیم است: ۱- بی اثر ۲- کاتالستی ۳- قابل اشتعال [5]. محیط متخلخل فضای مناسبی است برای پیش گرمایش ترکیب سوخت و هوا به گونه ای که می توان از آن به عنوان یک مبدل حرارتی نام برد. چنین مبدل هایی طوری طراحی می شوند که درجه بالایی از گردش حرارت در سیستم را ایجاد نمایند (انتقال حرارت از محصولات اکسید شده به سیال ورودی به ناحیه متخلخل) شکل ۱ و شکل ۲ به صورت شماتیک گردش حرارت در ناحیه متخلخل را نشان می دهند [6].



شکل ۱ ساختار جامد متخلخل



شکل ۲ انتقال حرارت در محیط متخلخل

B. Stelzner و همکاران با استفاده از تحریک رادیکال هیدروکسیل (OH)، به وسیله القای لیزری، پایداری شعله در ناحیه متخلخل را بررسی کردند. هدف اصلی این کار، بررسی تاثیر بار حرارتی و نسبت هم ارزی بر ساختار شعله بود. تثبیت شعله در یک ناحیه که اکثرا مستقل از نرخ جریان ورودی سیال است، در پروژه ی آنها مشاهده شد [7]. X. B. Feng و همکاران، با بررسی مشعل های کاتالیستی زیر کونیا، مشاهده کردند که افزایش نسبت هم ارزی باعث ناپایداری فرآیند اکسیداسیون خواهد شد. دمای خروجی گاز در مشعل کاتالیستی پایین تر از مشعل بی اثر بود. از طرف دیگر ناحیه ی اکسیداسیون پایدار، در مشعل کاتالیستی وسیع تر از مشعل بی اثر مشاهده شد. افت فشار مشعل کاتالیستی تقریبا برابر با افت فشار مشعل بی اثر در جریان سرد بود، اما در هنگام واکنش، به صورت قابل ملاحظه ای افت بیشتری داشت. هنگامی که سرعت جریان ورودی مخلوط سوخت و هوا کمتر از ۴۰ سانتیمتر بر ثانیه بود، مونواکسید منتشر شده از مشعل کاتالیستی به مراتب کمتر از مشعل بی اثر ثبت شد. آنها دریافتند که مونواکسید منتشره از مشعل کاتالیستی به نسبت هم ارزی، حساس نیست، اما در مشعل بی اثر بسیار تغییرات چشمگیری ایجاد می کرد. انتشار  $NO_x$  در مشعل کاتالیستی به طور قابل ملاحظه ای کمتر از مشعل بی اثر بود (۵ ppm). بازده تابش حرارتی در مشعل کاتالیستی بین ۰.۲۴ تا ۰.۳۹ بود که به صورت معناداری از مشعل بی اثر بالاتر بود (۰.۱۱ تا ۰.۲۰) [8]. در سال ۲۰۱۶ احتراق متان در مشعل فومی دو قسمتی کاتالیستی توسط X.B. Feng و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که محدوده ی پایداری شعله در قسمت اول، به واسطه ی واکنش های کاتالیستی ناهمگن افزایش یافت، در حالی که محدوده ی پایداری شعله در قسمت پایینی بی تغییر ماند. در مجموع پروپیل دمایی یکنواخت تری در احتراق کاتالیستی ناهمگن ایجاد شد. آنها دریافتند که انتشار مونواکسید کربن و HC متاثر از بیشینه دمای مرکزی، احتراق کاتالیستی و طول زمان اکسیداسیون است [9]. B. Fumey و همکاران تکنولوژی اکسیداسیون کاتالیستی هیدروژنی، بر روی پلاتینی پوشیده شده با فوم سرامیکی سیلیکون کاربیدی بسیار متخلخل را مورد بررسی قرار دادند. آنها با به کارگیری یک مبدل حرارتی در خروجی، هوای ورودی را پیش گرم می کردند [10].

علت بهینه تر شدن اکسیداسیون درون محیط متخلخل، در مقایسه با سیستم های سنتی احتراق به شرح زیر است :

۱. نزدیک شدن به احتراق کامل با عبور مخلوط جریان سوخت/هوا از درون منافذ ماده متخلخل.
۲. کاهش بیشینه دما با خروج بخشی از انرژی احتراق و انتقال آن از محصولات احتراق به محیط متخلخل.
۳. افزایش بهره وری فرآیند احتراق از طریق پیش گرم کردن مخلوط سوخت/ هوای ورودی، پیش از رسیدن به ناحیه ی اکسیداسیون [2].

توسط A. C. Terracciano و همکاران مشعلی ناهمگن که امکان استفاده از مواد متخلخل گوناگون سرامیکی، برای تنظیم میزان اکسیداسیون را محیا می کرد، ابداع کردند. بر خلاف دیگر مشعل های ارائه شده، تنها راه نگهداشتن ناحیه اکسیداسیون درون محیط متخلخل، نرخ جریان سیال عنوان شد. به منظور جمع آوری داده های مورد نیاز برای انجام تجزیه و تحلیل نحوه عملکرد محفظه احتراق، چندین روش ابزار دقیق در تنظیمات آزمایشی گنجانده شد نظیر (۱) اندازه گیری دما توسط ترموکوپل (۲) اندازه گیری انتشار آکوستیک توسط میکروفون (۳) تصویر برداری نوری توسط دوربین CCD (۴) تجزیه و تحلیل ترکیب گازهای خروجی با استفاده از کروماتوگرافی گازی با آشکارساز هدایت حرارتی. اندازه گیری انتشار آکوستیک از محفظه احتراق توسط میکروفون برای اولین بار به کار گرفته شد [11]. Hui Mei و همکاران روی یک ماده متخلخل فیبری سیلیکونی بسیار نفوذ پذیر (FPM)<sup>۱</sup> که کارایی

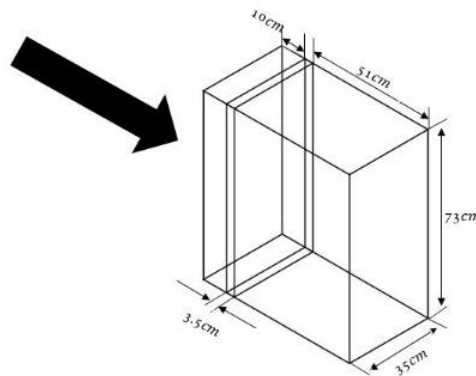
<sup>1</sup> Fiber Porous Media

احتراق آن به وسیله کنترل چگالی بهینه شد کار کردند. نفوذ پذیری، خواص فیزیکی دمایی و کارایی احتراق FPM در چگالی های مختلف مطالعه شد. FPM پنج لایه نتایج خیلی خوبی ارائه داد. ضریب کارایی گرمکن بالا رفت و انتشار  $NO_x$  کاهش چشمگیر داشت. دمای اکسیداسیون حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد [12]. در پژوهش پیش رو یک نمونه آزمایشگاهی از گرمکن کاتالیستی تابشی ساخته شد و همچنین مدلسازی عددی آن در نرم افزار تجاری انجام گرفت.

### فیزیک مساله و معادلات حاکم

در این تحقیق کانالی با سطح مقطع ۳۵ در ۷۳ سانتیمتر مربع و طول ۶۴.۵ سانت در نرم افزار تجاری مورد مطالعه عددی قرار گرفت (شکل ۳). مقطعی از کانال با استفاده از پد متخلخل کاتالیستی به ضخامت ۳.۵ سانتی متر پر شد.

در این مدل مخلوط سوخت/هوا و محصولات احتراق به عنوان گاز ایده آل تراکم پذیر (مدل سادرلند) در نظر گرفته شدند. خواص ترموفیزیکی گاز نظیر چگالی، حرارت ویژه و ضریب همرفت به صورت متغیرهای وابسته به دما و به صورت لحظه ای بر آورد می شود. گاز و جامد متخلخل در تعادل حرارتی با هم فرض شد. واکنش اکسیداسیون متان/هوا در محیط متخلخل در مجاورت کاتالیست با سرعت پایین صورت میگیرد. بر همکنش ها بر اساس مدل یک مرحله ای آرنیوس بازگشت ناپذیر مدلسازی شد. معادلات حاکم بر مساله:



شکل ۳ هندسه مساله

معادله انرژی به صورت معادله ۱ نشان داده شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{D}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_i \quad (1)$$

با اعمال شرط همدمايي فاز جامد و گاز داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f E_f + (1 - \varepsilon) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) \\ = S_f^h + \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$E_f$  انرژی کل سیال

$E_s$  انرژی کل ماده جامد

$\rho_f$	چگالی سیال
$\rho_s$	چگالی ماده متخلخل
$\varepsilon$	تخلخل ماده متخلخل
$k_{eff}$	انتقال حرارت موثر
$S_f^h$	چشمه آنتالپی سیال

ضریب انتقال حرارت موثر  $k_{eff}$ ، با استفاده از روش حجم محدود به صورت معادله ۳ محاسبه می شود:

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon)k_s \quad (3)$$

$k_f$	ضریب انتقال حرارت فاز سیال
$k_s$	ضریب انتقال حرارت فاز جامد
$\sum_i h_i J_i$	انتقال آنتالپی ناشی از پخش جرم

برای جریان آرام سیال، انتشار کامل چند جزئی لازم است، بنابر این نیاز به حل معادلات استفان-ماکسول شد.

مدل جریان آرام نرخ محدود<sup>۲</sup>، منبع شیمیایی برای گونه  $i$  را با استفاده از بیان آرنیوس و بدون در نظر گرفتن تاثیر نوسانات آشفستگی محاسبه میکند. جهت یافتن مجموع منابع شیمیایی وابسته به واکنش گونه شیمیایی  $i$ ، جمع منابع واکنش آرنیوس بر  $N_R$  واکنش از معادله ۴ محاسبه کردیم:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (4)$$

$M_{w,i}$  وزن مولی گونه  $i$

$\hat{R}_{i,r}$  نرخ مولار آرنیوسی تولید/تلاف گونه  $i$  در واکنش  $r$

معادله بازگشت ناپذیر  $\mathcal{R}$  به صورت معادله ۵ نمایش داده شد:

$$\sum_{i=1}^N n'_{i,r} A_i \xrightarrow{k_{f,r}} \sum_{i=1}^N n''_{i,r} A_i \quad (5)$$

$N$  تعداد گونه های شیمیایی در سیستم

$n'_{i,r}$  ضریب استوکیومتری برای واکنش دهنده  $i$  در واکنش  $r$

$n''_{i,r}$  ضریب استوکیومتری محصولات  $i$  در واکنش  $r$

$A_i$  نماد نشان دهنده گونه  $i$

$k_{f,r}$  نرخ ثابت پیشرفت واکنش  $r$

ناحیه متخلخل با افزودن یک ترم چشمه به معادله مومنتوم حالت استاندارد جریان سیال مدل شد. ترم چشمه متشکل از دو بخش است: افت ویسکوزی (دارسی) و افت اینرسیایی:

<sup>2</sup> The laminar finite-rate model

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (6)$$

$S_i$  منبع مومنتوم جزء  $i$  (x, y, or z)  
 $v$  بزرگی سرعت

برای ناحیه متخلخل همگن خواهیم داشت:

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (7)$$

که داریم:

$\alpha$  تراوایی  
 $C_2$  فاکتور مقاومت اینرسیایی

تغییرات ویسکوزیته با دما طبق رابطه سادرلند در نظر گرفته شده است.

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (8)$$

که در آن:

$\mu$  ویسکوزیته [kg/m.s]  
 $T$  دمای استاتیک [K]  
 $\mu_0$  مقدار مرجع kg/m - s  
 $T_0$  مقدار مرجع دما [K]  
 $S$  (ثابت سادرلند) K دمای موثر

شرایط اولیه و شرایط مرزی

در ورودی داریم:

$$\dot{m}_{in} = 0.000281 \text{ [kg/s]}$$

کسر مولی متان ۰٫۳۳۳۳۳  
 کسر مولی اکسیژن ۰٫۶۶۶۶۶  
 دمای جریان ورودی ۳۰۰ کلوین

در خروجی داریم:

$$P_{out} = 0 \text{ [pa]}$$

در طول کانال داریم:

$$T_{wall} = 300 \text{ [k]}$$

نرخ انتقال حرارت دیواره ناحیه متخلخل

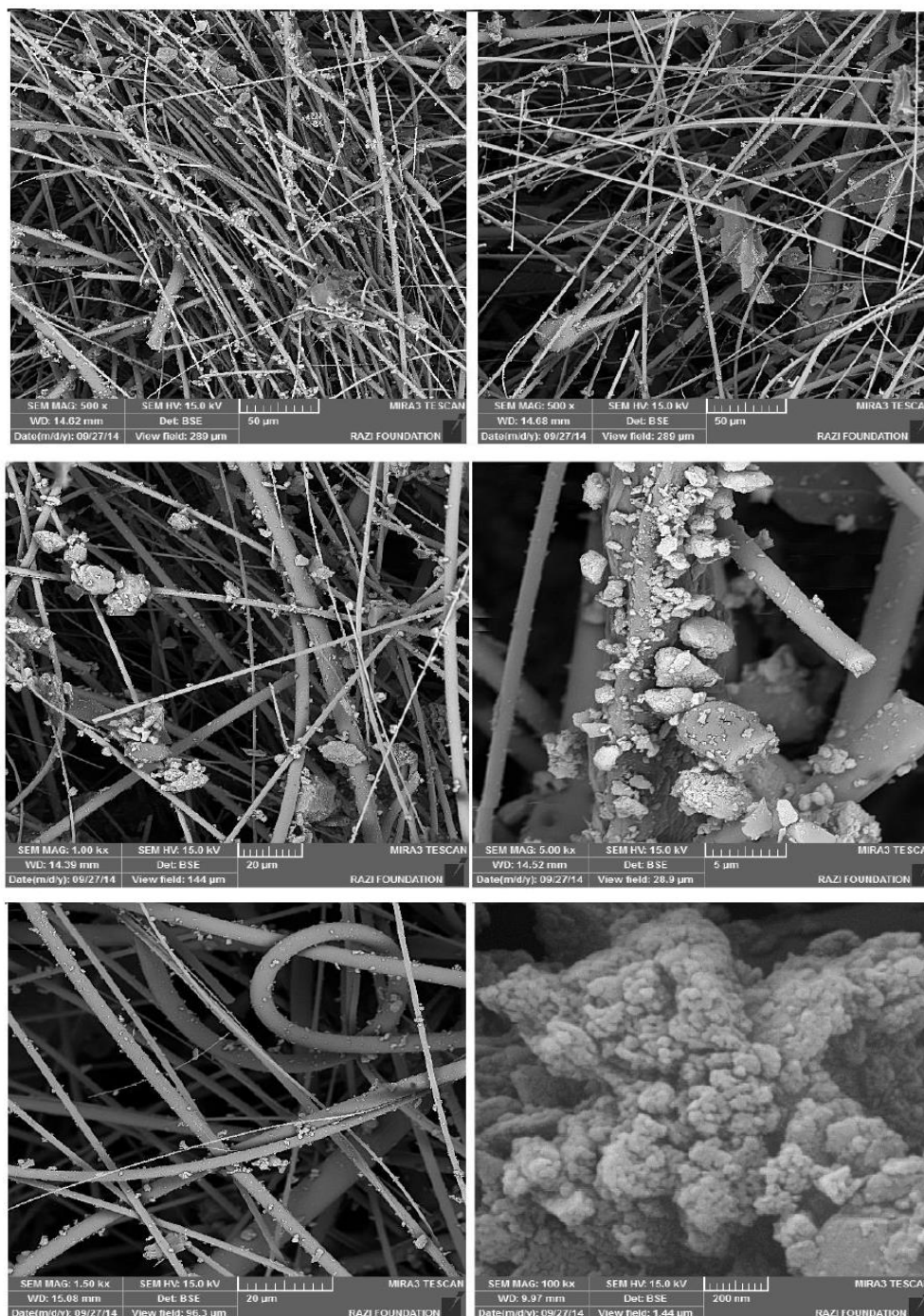
$$S = 300$$

$$\mu_0 = 114 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right]$$

$$T_0 = 300 [k]$$

$$\varepsilon = 0.85$$

ضریب سطح به حجم ۱۱.۵۳



شکل 4 ساختار نانومتری سطح پنل نمونه آزمایشگاهی

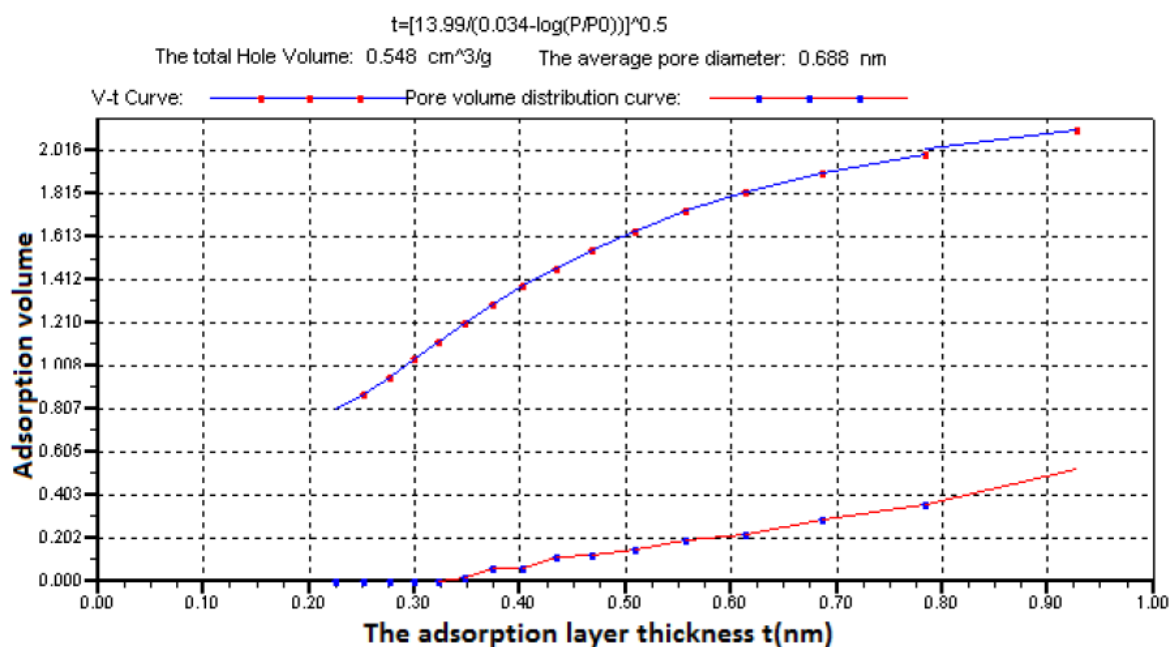
شکل 4 ساختار نانومتری سطح پنل نمونه آزمایشگاهی را نشان می دهد که زیر میکروسکوپ الکترونی است.

برای شروع واکنش، دمای ۳۲۰۰ کلون در ناحیه متخلخل مدل عددی لحاظ شد. باقیمانده معادلات<sup>۳</sup>، در ابعاد کوچکتر از  $1 e^{-5}$  پایش شد. بر اساس تست BET نمونه آزمایشگاهی (شکل ۵ و شکل ۶):

$$D_p = 0.688 [nm] \text{ قطر متوسط منافذ}$$



شکل ۵ دستگاه آنالیز BET



شکل ۶ نمودار توزیع اندازه حفره هایی با قطر کمتر از یک نانومتر در نمونه آزمایشگاهی

<sup>3</sup> Residuals



برای معادلات افت فشار داریم:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (9)$$

$$\nabla P = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left( \frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (10)$$

$$\frac{|\Delta P|}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v_\infty + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} v_\infty^2 \quad (11)$$

در نتیجه

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (13)$$

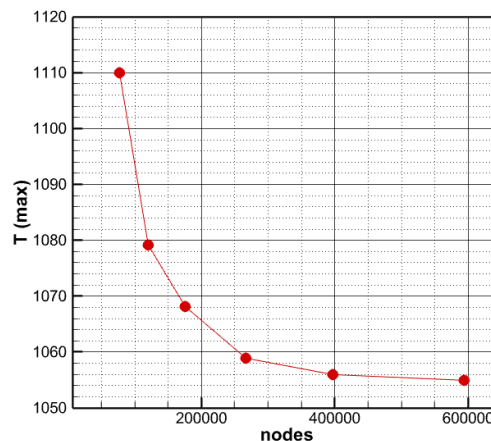
و سپس خواهیم داشت:

$$\frac{1}{\alpha} (\text{viscous resistance coefficient}) = 11.6101946797$$

$$C_2 (\text{inertial resistance coefficient}) = 1.2425061$$

### استقلال حل مساله از شبکه

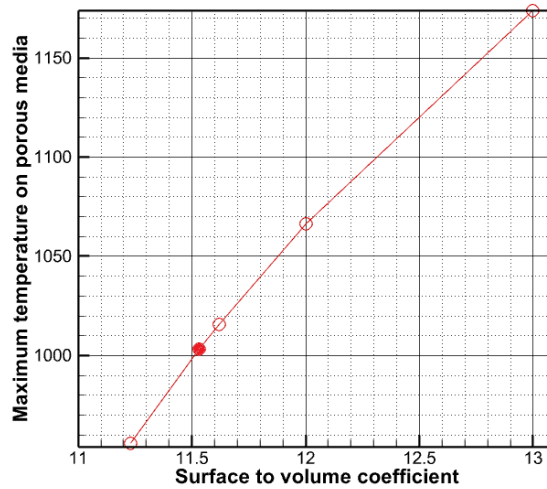
استقلال شبکه بندی مدل چک شد، همان طور که در شکل 7 نشان داده شده است. نتایج عددی دما با تغییر تعداد گره های شبکه در جریان ثابت ورودی بررسی شد. سپس تعداد ۲۶۶۴۰۰ گره انتخاب شد.



شکل 7 نمودار مطالعه استقلال حل عددی از شبکه بندی

### اعتبار سنجی مدل

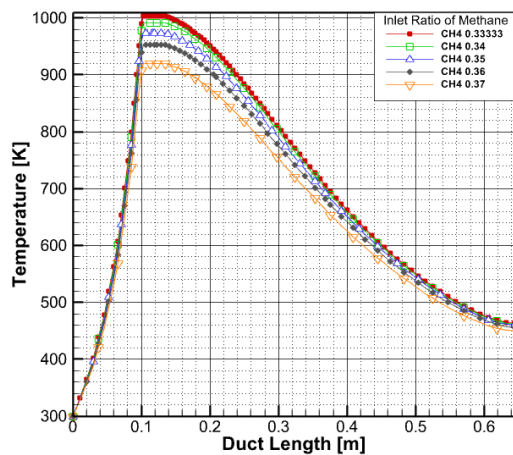
معادلات مساله با روش حجم محدود حل شد. مقدار جریان سیال معادل ۰.۰۰۰۱۲۳۱۸۷۵ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته. با تغییر در ضریب سطح به حجم به کار رفته در مدلسازی عددی و مقایسه دمای بیشینه حاصل در صفحه مرکزی مقدار ۱۱.۵۳ برای ضریب سطح به حجم انتخاب شد. خطای حاصله از حل عددی نسبت به نمونه آزمایشگاهی ۰.۱۴٪ بدست آمد. شکل 8 نشان دهنده تغییرات دما نسبت به تغییرات ضریب سطح به حجم است.



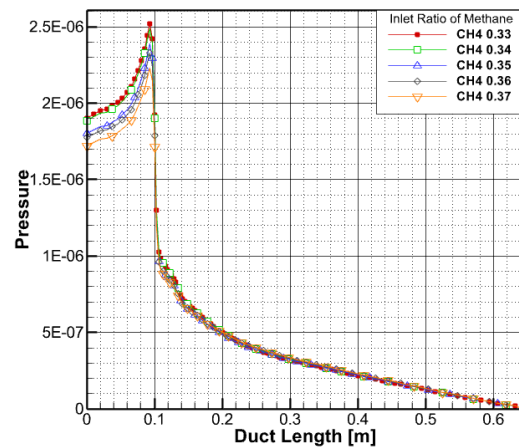
شکل ۸ تغییرات دمای بیشینه با تغییر در ضریب سطح به حجم

## بحث و نتایج

شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان دهنده تغییرات دما و فشار با ایجاد تغییر در نسبت متان/اکسیژن جریان ورودی مخلوط سوخت و هوا است.



شکل ۹ نمودار تغییرات دما در نسبت متان/هوای مختلف در طول کانال

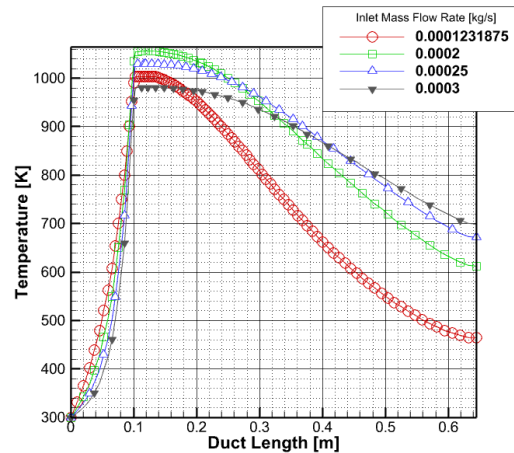


شکل ۱۰ نمودار افت فشار در نسبت متان/هوای مختلف در طول کانال

با افزایش نسبت متان در مخلوط سیال ورودی، کاتالیست موجود، از سوخت اشباع شده و مقداری سیال اکسید نشده از پد کاتالیستی خارج خواهد شد. این امر باعث کاهش دما و فشار در مرکز کانال می شود.

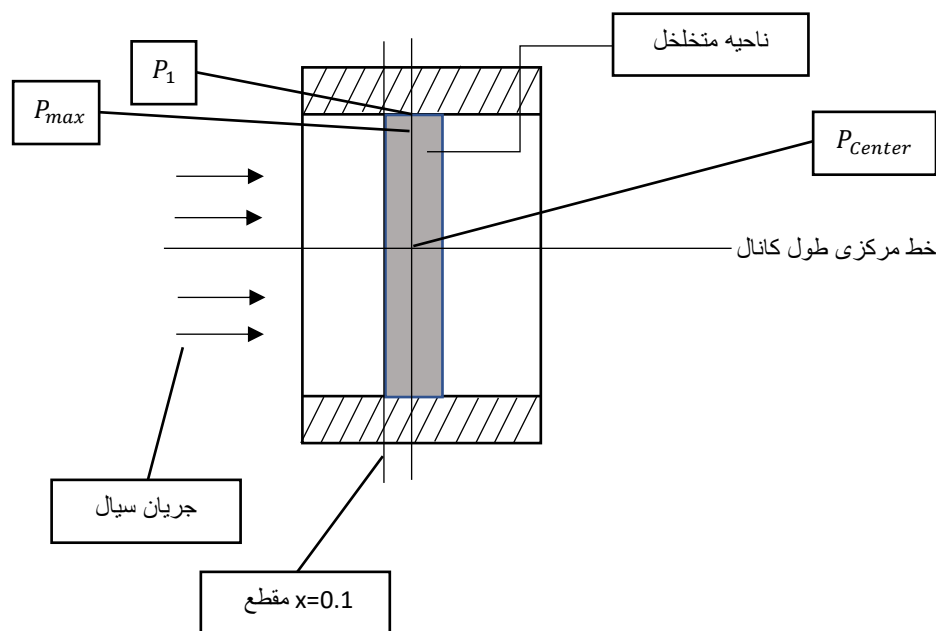
با تغییر در نرخ ورودی مخلوط سوخت و هوا، بیشینه دمای حاصله، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است با افزایش نرخ ورودی مخلوط سوخت و هوا تا  $0.0002$  کیلوگرم بر ثانیه، افزایش دما رخ می دهد و از آن به بعد بیشینه دما کاهش می یابد (کاتالیست موجود فوق اشباع می شود) و نهایتاً در دبی  $0.00035$  کیلوگرم بر ثانیه دستگاه خاموش

می‌شود. این امر نشان می‌دهد که توانایی جذب کاتالیست در ناحیه متخلخل در دبی  $0.0002$  کیلوگرم بر ثانیه به بیشترین حالت رسیده و پس از آن مخلوط سوخت و هوای اکسید نشده، باعث خنک کاری نسبی سیستم می‌گردد.

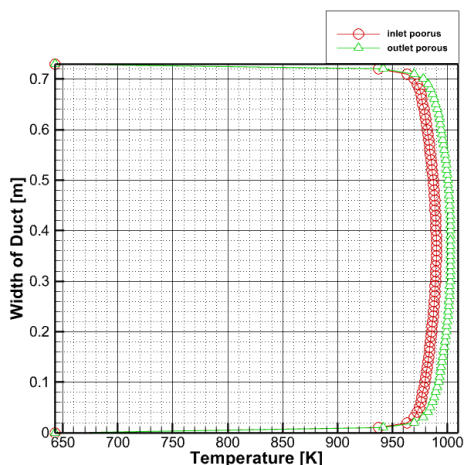


شکل 11 نمودار تغییرات دما در طول کانال با جریان ورودی های مختلف

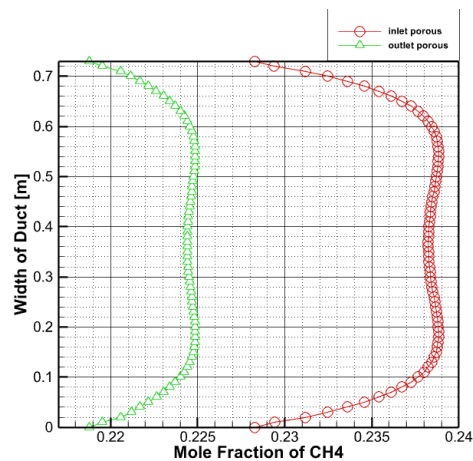
جریان ورودی به کانال پیش از ناحیه متخلخل، به واسطه تخلخل موجود در مسیر عبوری دچار افزایش فشار می‌شود. در مقطع  $x=0.1m$ ، کنار دیواره که سرعت جریان سیال صفر است، کمینه فشار را شاهدیم (هیچ جریان ورودی وجود ندارد که ایجاد فشار کند و نیز خنک کاری جریان به واسطه غلبه رسانش در این ناحیه به چشم می‌خورد (شکل ۱۴ و شکل ۱۵)). با فاصله گرفتن از دیواره به واسطه افزایش سرعت سیال ورودی، افزایش فشار را شاهدیم به گونه‌ای که ماکزیمم فشار در  $P_1$  نمایان می‌شود (شکل 12). هر چه از قسمت بیشینه فشار به سمت مرکز برویم، میزان انتقال حرارت تابشی از پایین دست افزایش یافته و باعث پیش گرم شدن و افزایش برهمکنش سوخت و هوای موجود در ناحیه شده و باعث ایجاد بیشینه دما می‌شود (شکل ۱۴). کاهش نسبت مولی متان در مرکز کانال نیز گواهِ افزایش اکسیداسیون در این ناحیه است (شکل ۱۳).



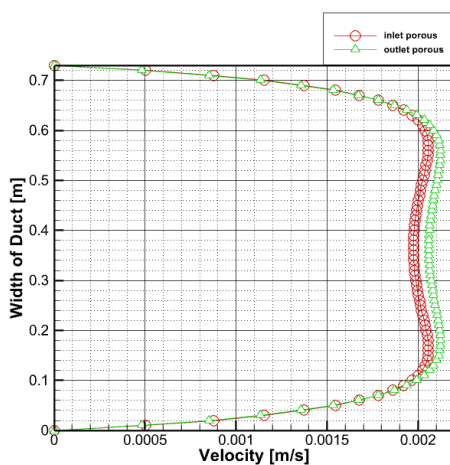
شکل 12 شماتیک جریان سیال در طول کانال



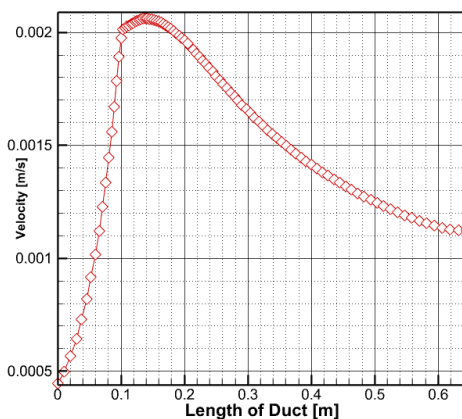
شکل ۱۴ تغییرات پروفیل دما در عرض کانال (قبل و بعد از ناحیه متخلخل)



شکل ۱۳ پروفیل کسر مولی متان موجود در عرض کانال (قبل و بعد از ناحیه متخلخل)



شکل ۱۵ تغییرات پروفیل سرعت در عرض کانال (قبل و بعد از ناحیه متخلخل)



شکل ۱۶ پروفیل سرعت جریان سیال در طول کانال

بیشینه سرعت جریان سیال در طول کانال، مربوط به ناحیه پس از محیط متخلخل است که هیچ مانعی در مسیر جریان وجود ندارد

(شکل ۱۶)

## نتیجه گیری

با توجه به هزینه های مالی و زمانی جهت مدلسازی آزمایشگاهی، یکی از روش ها برای بررسی سیستم ها، استفاده از مدل های عددی در جهت کاهش هزینه و کاهش زمان برای انجام آزمایش است. در این مقاله به مدلسازی عددی احتراق کاتالیستی در محیط متخلخل، پرداخته شده است. مدلسازی با دقت خوبی (۰.۱۴٪ خطا) با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشت. پروفیل های دما، سرعت، فشار در عرض و طول کانال مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با افزایش دبی ورودی مخلوط سوخت/هوا، بیشینه دمای حاصله از کاتالیست بدست آمد (شکل 11) که این امر نشان دهنده اشباع شدن کاتالیست موجود در ماده متخلخل بود. در مرکز جریان کانال شاهد بیشترین میزان انتقال حرارت تابشی بودیم که باعث افزایش دما و کاهش کسر مولی سوخت در این ناحیه شد.

## Bibliography

- [1] S. V. Kostin, P. M. Krishenik, N. I. Ozerkovskaya, A. N. Firsov and K. G. Shkadinski, "Cellular Filtration Combustion of Porous Layers," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 48, pp. 1-9, 2012.
- [2] I. mohammadi and S. Hossainpour, "The effects of chemical kinetics and wall temperature on performance of porous media burners," *Heat Mass Transfer*, 10 March 2013.
- [3] I. Malico and M. Abdul Mujeebu, "Potential of Porous Media Combustion Technology for Household Applications," *International Journal of Advanced Thermofluid Research*, vol. 1, no. 1, pp. 50 - 69, 2015.
- [4] Lai M-P; et al;, "Investigation of rapid-starting strategy of cold start processing on porous medium-catalyst hybrid reformer," *International Journal of hydrogen energy*, pp. 1 - 7, 2015.
- [5] R. Viskanta, "Interaction of combustion and transfer in porous inert media," *Transport Phenomena in combustion*, vol. 1, pp. 64 - 87, 1996.
- [6] K. Vafai, *Handbook of porous media*, Taylor & Francis Group, 2005.
- [7] Stelzner, B; et al, "Analysis of the flame structure for lean methane-air combustion in porous inert media by resolving the hydroxyl radical," *Proceedings of the Combustion Institute*, 2014.
- [8] X. B. Feng and Z. Qu, "Lean methane premixed combustion over a catalytically stabilized zirconia foam burner," *INTERNATIONAL JOURNAL OF GREEN ENERGY*, vol. 13, no. 14, pp. 1451 - 1459, 2016.

- [9] X. B. Feng, Z. Qu and H. Gao, "Premixed leanmethane/air combustion in a catalytic porous foamburner supported with perovskite  $\text{LaMn}_{0.4}\text{Co}_{0.6}\text{O}_3$  catalyst with different support materials and pore densities," *Fuel Processing Technology*, vol. 150, pp. 117 - 125, 2016.
- [10] Fumey, B; et al., "Development of a novel cooking stove based on catalytic hydrogen combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1 - 6, 2016.
- [11] A. Terracciano, S. D. Oliveira, M. Robayo, S. S. Vasu and N. Orlovskaya, "Flow stabilized porous heterogeneous combustor. Part I: Design and development," *Fuel Processing Technology*, vol. 159, pp. 353 - 362, 2017.
- [12] H. Mei and e. al., "Optimizing combustion performance by controlling density of the highly permeable SiC fiber porous media," *Ceramics International*, 2020.
- [13] A. C. Terracciano, S. T. De Oliveira, S. S. Vasu and N. Orlovskaya, "LaCoO<sub>3</sub> catalytically enhanced MgO partially stabilized ZrO<sub>2</sub> in heterogeneous methane combustion," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 90, pp. 330 - 335, 2018.