



## مطالعه عددی پارامترهای اثر گذار در مشعل محیط متخلخل با ایجاد یک شیار در محور ماتریس تخلخل

علی شریعتی<sup>۱\*</sup> و ناصر ثقه الاسلامی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

### چکیده

در این پژوهش به شبیه سازی عددی یک مشعل با محیط متخلخل و با کاربرد خانگی و بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد این مشعل‌ها پرداخته شده است. یک شیار با هندسه پیشنهادی جدید در ماتریس تخلخل ایجاد گردیده و ماتریس تخلخل به صورت سه مرحله تخلخل متفاوت بررسی گردیده است. راهکارها و پیشنهادهایی در زمینه کاهش آلاینده‌های محصولات احتراق و افزایش بازدهی مشعل ارائه گردیده است. هدف از انجام این پژوهش، کاهش آلاینده  $\text{NO}_x$  است. نتایج حاصل از این پژوهش که بصورت دو بعدی در نظر گرفته شده، با مدلسازی سایر محققان و با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. احتراق بصورت احتراق پیش آمیخته متان-هوا است. با اعمال تغییرات در ماتریس تخلخل در طول مشعل نیمه متخلخل نیمه آزاد نمودن مشعل و تغییر قطر ناحیه آزاد و تغییر شکل در راستای طول مرز بین ناحیه آزاد و ناحیه متخلخل، می‌توان به نتیجه مطلوب یعنی افزایش بازده و کاهش آلاینده‌ها دست یافت. نتایج حاصل نشان دهنده کاهش آلاینده  $\text{NO}_x$  در ماتریس تخلخل جدید نسبت به تخلخل یکنواخت است.

**کلمات کلیدی:** مشعل متخلخل؛ کاهش آلاینده‌ها؛ ماتریس تخلخل؛ تخلخل متغیر؛ بهینه سازی انرژی.

## A Numerical Study of the Effects of Effective Parameters on Porous Medium Burner by Creating a Groove in the Porosity Matrix with the Aim of Reducing $\text{NO}_x$ Emissions

A. Shariati<sup>1,\*</sup>, N. Saghatoleslami<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc, Mech. Eng., Eqbal Lahouri institute of higher education, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Chem. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

In this paper, an attempt has been made in order to investigate the key parameters that have an effect on the porous media burners. The aim of this work was to reduce the pollutants emitted from the burner and to enhance the efficiency of the combustion chamber. Improvement of different combustion chamber components in burners includes the enhancement of combustion chamber efficiency and the reduction of shape factor which cutbacks the production of pollutants and enhances fuel consumption and is an important criteria both in economical and environmental aspects. To obtain these objectives, a comparison has been made between the numerical work of the present study and experimental work conducted by other workers. The burner under this study consists of two parts, a preheater and combustion chamber where methane and air are premixed in the chamber. From the findings of these studies it was revealed that by employing semi-porous burner, the burner's performance could be improved. The results Show reduction of  $\text{NO}_x$  Pollutant in the new geometry of porosity matrix compared with uniform Porosity matrix.

**Keywords:** Porous Media Burner; Reduce Pollutants; Porosity Matrix; Variable Porosity; Energy Efficiency.

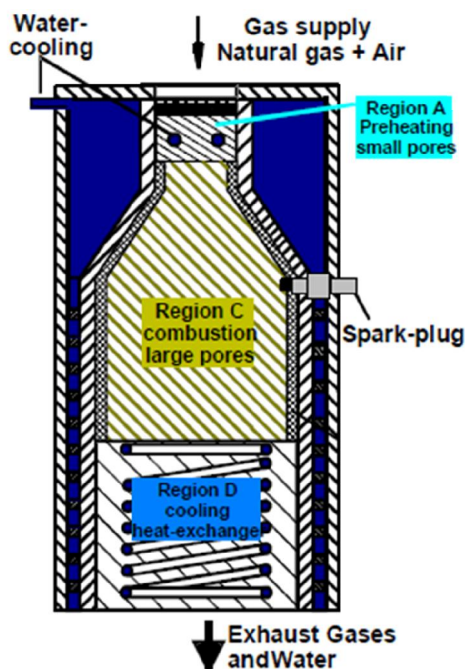
\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۷۶۳۵۹۹۳؛ فکس: ۰۵۱۳۳۸۲۱۰۰۷۳

آدرس پست الکترونیک: [a.shariati@eqbal.ac.ir](mailto:a.shariati@eqbal.ac.ir)

## ۱- مقدمه

تانگ و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۱، یک مطالعه تئوری و تجربی روی عملکرد مشعل متخلخل تابشی انجام دادند. مطالعات آنها روی ثبات و پارامترهای انتقال حرارت در حالت پیش آمیختگی اندک، مخلوط متان و هوا در یک لایه متخلخل بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که احتراق پایدار در سرعت‌های بالای شعله در دو حوزه مختلف، یکی نیمه بالادست ناحیه تخلخل و دیگری ناحیه نزدیک صفحه خروجی می‌تواند برقرار باشد. با انتقال شعله به سمت وسط ناحیه متخلخل، انتشار گرما و تشعشع خروجی افزایش می‌یابد.

در سال ۱۹۹۶ دورست و همکاران [۳]، تحقیقاتی تجربی روی مشعل‌های متخلخل برای کاربرد خانگی انجام دادند. سیستم مشعل و مبدل حرارتی ۱۰ کیلووات از سه ناحیه تشکیل شده است. این نواحی شامل، ناحیه A پیش گرمایش، ناحیه C احتراق و ناحیه D مبدل حرارتی می‌باشند. در شکل ۱ نمای شماتیکی از این مجموعه نمایان شده است.



شکل ۱- هندسه شماتیک مشعل متخلخل ۱۰ کیلووات دورست و تریمیس [۳]

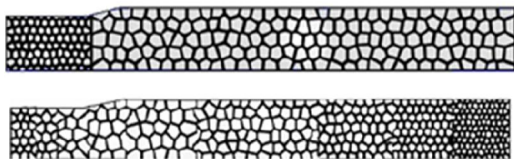
در مشعل‌ها که فعالیتشان در دمای بالا صورت می‌پذیرد، استفاده حداکثری از انرژی حرارتی گاز و کاهش آلاینده‌ها دو امر مهم در فرآیند سوخت و محصولات احتراق است [۳]. ماده متخلخل به ماده‌ای گفته می‌شود که شامل، یک شبکه بهم پیوسته از خلل و فرج باشد که توسط آب یا سیال دیگر پر شده باشد.

محصولات احتراق گازها و آلاینده‌های خطرناکی نظیر دی‌اکسیدکربن، منواکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و گوگرد می‌باشند. این گازهای آلاینده سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای و ایجاد باران‌های اسیدی می‌شود. طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی در ماه مارس ۲۰۱۶ [۱]، سالانه حدود ۱۲/۶ میلیون نفر در جهان بر اثر زندگی یا کار در محیط‌های ناسالم جان خود را از دست می‌دهند. این تعداد نزدیک به یک چهارم از کل مرگ و میر در جهان است. به علت افزایش تقاضا با توجه به رشد جمعیت در جوامع بشری و رو به اتمام بودن منابع سوخت‌های فسیلی، بهینه‌سازی آنها به منظور افزایش بازده و کاهش آلاینده‌های هوا، امری ضروری است. در همین زمینه موضوع استفاده از محیط‌های متخلخل در مشعل‌ها در سه دهه اخیر، مورد توجه قرار گرفت و تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است.

مشعل‌های متخلخل دارای مزایای زیادی نسبت به مشعل‌های معمول می‌باشند. این مزایا شامل، نزدیک شدن به احتراق کامل و کاهش منواکسیدکربن و مخلوط سوخته نشده در محصولات احتراق، بازده حرارتی بالاتر، کاهش دمای بیشینه در محفظه احتراق و کاهش ایجاد اکسیدهای نیتروژن است؛ همچنین کوچک تر بودن ابعاد مشعل و طراحی آزاد و راحت سبب استفاده از این نوع مشعل‌ها در کاربردهای متنوع‌تری نظیر، استفاده در سیستم گرمایش خانه‌ها، استفاده در گل خانه‌ها و سوله‌های نگهداری دام و طیور، دستگاه‌های مولد بخار، استفاده در توربین گازی و ... نیز گردیده است. مشعل مورد بررسی در این تحقیق، از نوع مشعل با کاربرد خانگی است.

محمدی و حسین پور [۵] در سال ۲۰۱۲، به مدل سازی دو بعدی و متقارن احتراق پیش آمیخته متان و هوا با سینتیک چند مرحله ای در محیط متخلخل پرداختند. مشعل مورد بررسی آن‌ها دارای دو ناحیه پیش گرمایش و محفظه احتراق بود؛ همچنین معادلات را با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل حل نمودند. مطالعات آن‌ها روی تغییر تخلخل طبق دو پروفیل متغیر در طول مشعل بود. تصویری از ماتریس تخلخل مورد استفاده آن‌ها، در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دو مدل مشعل با تخلخل ثابت دو ناحیه ای با تخلخل ۰/۷ در ناحیه پیش گرمایش و ۰/۸۵ در ناحیه احتراق و مدل دیگر مشعل با تخلخل متغیر در طول مشعل، مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها پس از مدل سازی موفق شدند، دمای ماکزیمم شعله را حدود ۴/۵ درصد کاهش دهند که به تبع آن آلاینده‌ها نیز کاهش یافت. در حالی که افت فشار در طول مشعل به میزان ناچیزی افزایش یافت. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت هوای اضافی، جبهه شعله به سمت پایین دست جریان منتقل می‌شود که این امر سبب کاهش دمای ماکزیمم می‌شود؛ اما با وجود کاهش دمای ماکزیمم به علت عدم تعادل حرارتی بر میزان تولید آلاینده‌ها افزوده می‌شود، اما میزان انتشار آن کاهش می‌یابد.



شکل ۲- ماتریس تغییر تخلخل در طول مشعل محمدی و حسین پور [۵]

هاشمی و هاشمی [۶] در سال ۲۰۱۷ با انجام یک شبیه سازی عددی، پایداری شعله را در یک مشعل متخلخل دو لایه و با ترکیب پیش آمیخته متان و هوا بررسی کردند. آن‌ها از یک مدل دو بعدی و با در نظر گرفتن معادله انتقال تابشی و معادلات انرژی بصورت جداگانه برای فاز جامد و فاز گاز استفاده کرده و مساله را با

گاز پیش آمیخته در ناحیه تخلخل (ناحیه A) با قطر ورودی که کمتر از قطر ناحیه خروجی است، جریان پیدا می‌کند. در جایی که جبهه شعله قرار می‌گیرد، قطر حفره‌های محیط متخلخل باید نسبت به قسمتی که شعله هنوز روشن نشده بیشتر باشد. به عبارت دیگر، قطر ناحیه تخلخل C بزرگتر از قطر ناحیه A است. شعله فقط در ناحیه C می‌تواند گسترش یابد، جایی که  $Pe > 65$  و در ناحیه A که شعله خاموش است  $Pe < 65$  می‌باشد. با ایجاد یک تغییر در مشعل می‌توان طول و هندسه شعله را تغییر داد و آن را بهینه نمود. با خنک نمودن ناحیه تخلخل توسط آب یا سایر خنک کننده‌های مشابه، در دیواره‌ها و ماتریس تخلخل، مجموعه بصورت همزمان به عنوان مشعل و مبدل حرارتی عمل می‌نماید. در مبدل حرارتی، آب حین تبخیر شدن، حرارت را از محصولات احتراق گرفته و سبب کاهش دمای آگزوز و در نهایت کاهش ازت می‌گردد.

اچیگو و همکاران [۴] در سال ۱۹۸۶ مطالعاتی در مورد افزایش انتقال حرارت تابشی در یک لوله آب توسط گازهای احتراق در محیط متخلخل انجام دادند و با انجام آزمایش و تحلیل‌های عددی در محیط‌های متخلخل توانستند انتقال حرارت در لوله آب را به اندازه ۳ تا ۵ برابر نسبت به لوله صاف افزایش دهند؛ همچنین نشان دادند که در محیط متخلخل، فرآیند احتراق در یک فضای بسیار نازک صورت می‌پذیرد. تحقیقات آن‌ها به این نتیجه امیدوار کننده رسید که با استفاده از احتراق در محیط‌های متخلخل می‌توان ابعاد تجهیزات احتراقی را با استفاده از محیط متخلخل کاهش داد. آن‌ها ایده استفاده از محیط متخلخل را در جایی بررسی کرده که یک میله فلزی حرارت را به چرخش در می‌آورد و با ساده سازی و حذف معادلات تشعشع به نتایج دست یافتند که با نتایج تجربی بسیار هم خوانی داشت. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که سوخت‌هایی با محتوای انرژی کم می‌توانند در این نوع از مشعل‌ها استفاده شوند. آن‌ها همچنین به این موضوع اشاره کردند که محیط متخلخل به مراتب اثر بیشتری در انتقال آنتالپی استاندارد سوخت در مقایسه با شعله باز دارد که این نکته سبب بهبود مدل سازی های تابشی در مشعل شد.

### ۳-۱-۱- بازده محفظه احتراق

مولفه‌ای برای سنجش بازده و کارایی محفظه احتراق که با  $\eta$  نشان داده می‌شود. افزایش بازده محفظه احتراق سبب کاهش اختلاف دمای بیشینه و میانگین است. هرچه اختلاف دمای بیشینه و میانگین کم شود، دمای مشعل متوازن و همگن می‌شود. بازده محفظه احتراق به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود [۷].

$$\eta = 1 - \frac{T_{max} - T_{av}}{T_{max}} \quad (1)$$

### ۳-۱-۲- ضریب شکل

ضریب شکل میزان تاثیر هندسه محفظه روی همگن شدن دمای محصول خروجی توسط اختلاف دمای بیشینه و دمای میانگین و میزان افزایش دمای میانگین نسبت به دمای ورودی را نشان می‌دهد. کاهش اختلاف دمای بیشینه و دمای میانگین و افزایش اختلاف دمای میانگین و دمای ورودی مطلوب است که این مهم مقدار عددی این مولفه را به سمت صفر سوق می‌دهد و به صورت معادله ۲ تعریف می‌شود.

$$P.F = \frac{T_{max} - T_{av}}{T_{max} - T_{in}} \quad (2)$$

در معادله ۲ دمای بیشینه در مقطع خروجی به صورت نقطه ای و دمای متوسط و ورودی به ترتیب به صورت میانگین وزنی دمای محصولات خروجی و میانگین وزنی دمای ورودی‌ها محاسبه و جایگذاری می‌شود.

### ۴- معادلات حاکم

مساله به صورت دو بعدی متقارن محوری حل گردیده و تمامی معادلات در حالت دو بعدی حل گردیده‌اند. پس از حل معادلات با روش‌های مختلف نظیر  $k-\epsilon$ ,  $k-\Omega$  در حالت‌های Standard, Realizable و ... دقت مدل  $k-\epsilon$  در حالت استاندارد از بقیه روش‌ها بالاتر بوده؛ بنابراین در شبیه سازی احتراق در محفظه احتراق، از مدل  $k-\epsilon$  استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان در مساله مورد نظر انواع متفاوتی دارند. معادله انرژی، معادلات مدل  $k-\epsilon$  استاندارد، معادلات انتقال گونه‌ها با روش ادی دیسیپیشن (Eddy Dissipation) و در نهایت معادلات تشعشع مدل

روش حجم محدود حل کردند. به منظور اعتبار سنجی مدل دمای گاز و جامد را برای پروفیل‌ها با توزیع دمای تجربی مقایسه کردند که نتایج تا حد قابل قبولی مشابه بود. نتایج آن‌ها نشان داد که محدوده پایداری و دمای شعله در یک محیط متخلخل با نرخ هم ارزی ورودی مخلوط قابل کنترل است. مطالعات آن‌ها در مورد قطر خروجی مشعل روی پایداری شعله نشان داد که قطر خروجی مطلوب برای اینکه به بالاترین پایداری شعله برسد وقتی رخ می‌دهد که مقدار قطر خروجی حدود دو برابر قطر ورودی باشد. مطالعه اثر طول اولین لایه تخلخل روی وضعیت شعله نشان داد که بهینه ترین طول ناحیه پیش گرمایش در بستر احتراق وقتی است که نسبت ناحیه پیش گرمایش به طول مشعل برابر با ۰/۳۳ باشد.

### ۲- شعله‌های پیش آمیخته

در شعله‌های پیش آمیخته آرام سرعت شعله که مولفه‌ای برای این دسته از شعله‌هاست، توسط سینتیک واکنش کنترل می‌شود. اگر سرعت جریان کمتر از سرعت شعله باشد، شعله به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند. اگر سرعت‌ها برابر باشد، آنگاه یک جبهه شعله تخت و ساکن تشکیل شده و در صورتی که سرعت جریان بیشتر از سرعت شعله باشد، جبهه شعله به شکل مخروطی خواهد بود.

### ۳- محفظه ی احتراق

محلی که در آن واکنش احتراق صورت می‌گیرد را محفظه احتراق می‌نامند. در صنعت انواع گوناگونی از محفظه‌های احتراق وجود دارد که با وجود ظاهر متفاوت آن‌ها از یکدیگر، دارای عملکرد مشابه و واحدی هستند. سوخت و هوا باید ترکیب شوند تا فرآیند احتراق صورت پذیرد.

### ۳-۱- مولفه‌های مهم در محفظه احتراق

دو مولفه مهم در محفظه احتراق، بازده محفظه احتراق و ضریب شکل می‌باشند. در ادامه به بررسی هر یک از این مولفه‌ها پرداخته شده است.

در معادله ۶،  $k_{eff}$  هدایت موثر بوده که برابر است با  $k+k_i$  که  $k_i$  هدایت حرارتی توربولانس است؛ همچنین  $J$  شار انتشار گونه  $Z$  است. سه جمله اول سمت راست معادله ۸ به ترتیب عبارت‌های انتقال انرژی طبق هدایت، انتشار گونه‌ها و اضمحلال ویسکوز هستند. عبارت  $S_h$  شامل حرارت واکنش شیمیایی و تمامی چشمه‌های حرارتی حجمی موجود در مسائل است.

در معادله ۶ عبارت  $E$  انرژی بصورت معادله ۷ بیان می‌شود.

$$E = h + \frac{v^2}{2} \quad (۷)$$

همچنین  $h$  یا همان آنتالپی برای گاز ایده آل طبق رابطه ۸ بدست می‌آید.

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (۸)$$

آنتالپی برای سیال تراکم ناپذیر طبق رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (۹)$$

عبارت  $h_j$  در این روابط طبق رابطه ۱۰ بدست می‌آید.

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (۱۰)$$

دمای مرجع ۲۹۸/۱۵ کلوین است.

#### ۳-۴- معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی

معادله بقای جرم یا همان معادله پیوستگی طبق معادله ۱۱ تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (۱۱)$$

برای یک هندسه متقارن محوری معادله پیوستگی به صورت معادله ۱۲ ارائه شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) = 0 \quad (۱۲)$$

#### ۴-۴- معادله بقای مومنتوم

معادله بقای مومنتوم طبق معادله ۱۳ تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (۱۳)$$

DO. معادلات بکار برده شده در تحلیل و شبیه سازی عددی در این تحقیق است.

#### ۵-۱- معادلات انتقال برای مدل k-ε

انرژی جنبشی توربولانس با نماد  $k$  و نرخ اضمحلال آن با  $\epsilon$  نشان داده شده و از معادلات انتقال ۳ و ۴ حاصل می‌شود [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (۴)$$

در این معادلات،  $G_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانسی طبق گرادیان سرعت متوسط است.  $G_b$  تولید انرژی جنبشی توربولانسی طبق خاصیت شناوری است.  $Y_M$  نشان دهنده عبارت نسبت انبساط نوسانی به نرخ اضمحلال کلی در توربولانس تراکم پذیر است.  $C_{1\epsilon}$ ،  $C_{2\epsilon}$  و  $C_{3\epsilon}$  ضرایب ثابت هستند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\epsilon$  به ترتیب اعداد پراکتل برای  $k$  و  $\epsilon$  می‌باشند.  $S_k$  و  $S_\epsilon$  عبارت‌های چشمه تعریف شده توسط کاربر می‌باشند. در این روابط ثابت  $\sigma_k$  برابر با ۱/۰، ثابت  $C_{2\epsilon}$  برابر با ۱/۹۲، ثابت  $C_{1\epsilon}$  برابر با ۱/۴۴ و ثابت  $\sigma_\epsilon$  برابر با ۱/۳ است.

#### ۴-۱- معادله ویسکوزیته توربولانسی

ویسکوزیته توربولانسی یا ویسکوزیته ادی با ترکیب  $k$  و  $\epsilon$  طبق رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۵)$$

در این رابطه ضریب  $C_\mu$  ثابت و برابر با ۰/۰۹ است.

#### ۴-۲- معادله انرژی

معادله انرژی به صورت معادله ۶ تعریف می‌شود [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (۶)$$

$R_{i,r}$  با دو عبارت کوچک شده ذیل در معادلات ۱۸ و ۱۹ ارائه شده است [۸].

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (18)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (19)$$

در این روابط،  $Y_P$ ، کسر جرمی هر یک از گونه‌های تولید شده P بوده،  $Y_R$ ، کسر جرمی واکنش دهنده‌های ذره ای، A، یک ثابت جرمی برابر با مقدار ۴ و B، یک ثابت جرمی برابر با مقدار ۰/۵ است.

### ۵- شبکه محاسباتی

در این بخش هندسه مساله و ابعاد آن، نوع مش بندی، شرایط مرزی حاکم بر مساله و پارامترهای حل عددی آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۵-۱- مدل هندسی

در این تحقیق مشعل بدون تخلخل، مشعل متخلخل با تخلخل ثابت و مشعل متخلخل با تخلخل دو مرحله‌ای و یک مدل تخلخل جدید پیشنهادی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. هندسه مساله توسط نرم افزار انسیس فلونت رسم شده است. طرحواره محفظه احتراق بصورت دو بعدی و متقارن محوری و با هندسه پیشنهادی جدید با ایجاد یک شیار در محور مشعل، در شکل ۵ نشان داده شده است.

قطر حفره‌های ناحیه متخلخل در ورودی یا همان ناحیه پیش گرمایش شماره ۱ و در خروجی مشعل ناحیه شماره ۴، ریزتر و به مقدار ۰/۰۰۲۹ متر بوده و در ناحیه ۲ یعنی در محفظه احتراق درشت تر و برابر با ۰/۰۱۵۲ متر است. این ابعاد با توجه به نتایج مطالعات محمدی و حسین پور [۵] بررسی و مورد بازنگری قرار داده شده است. ناحیه ۳ نیز بصورت آزاد و بدون تخلخل در نظر گرفته شده است. با ایجاد شیار در محور مشعل، سرعت شعله در نواحی محور مشعل کند شده و گازهای آلاینده در فراورده‌های واکنش فرصت اکسید شدن بیشتری پیدا می‌کنند. در شکل ۶، چهار مدل از بالا به پایین به ترتیب به صورت

تانسور تنش در معادله ۱۵ با نماد  $\tau$  نمایش داده شده و طبق معادله ۱۴ تعریف می‌شود.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (14)$$

در این رابطه  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی است.

### ۴-۵- مدل تشعشی DO

مدل DO معادله انتقال تشعشی را در جهت s به عنوان یک معادله کلی در نظر می‌گیرد که در معادله ۱۵ مشاهده می‌شود.

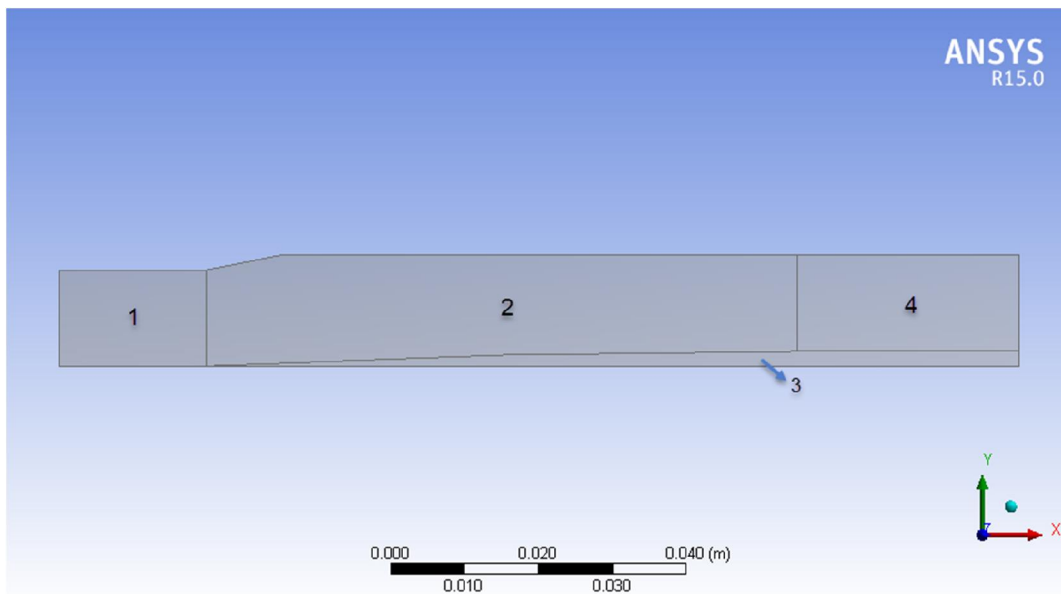
$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \mu \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (15)$$

### ۴-۶- معادلات حاکم بر شبیه سازی احتراق

برای شبیه‌سازی احتراق از مدل ادی دیسیپیشن استفاده گردیده است. این مدل برای شبیه سازی احتراق در جریان‌های آشفته بسیار مناسب بوده و نتایج دقیقی را بدست می‌دهد.

### ۴-۶-۱- مدل ادی دیسیپیشن

بیشتر سوخت‌ها بصورت سریع می‌سوزند و نرخ کلی واکنش با توربولانس کنترل می‌شود. در شعله‌های پیش آمیخته، توربولانس به آهستگی بین واکنش گرهای سرد و فرآورده‌های گرم در محفظه احتراق رد و بدل می‌شود؛ در حالی که واکنش و عمل احتراق به سرعت انجام می‌شود. در چنین مواردی شبیه سازی احتراق پیچیده و اغلب ناشناخته است. نرم افزار ANSYS FLUENT بیان می‌کند که در این موارد از نرخ‌های سینتیک شیمیایی با خیال راحت می‌توان نظر نمود [۸]. این نرم افزار یک مدل با تعامل بین واکنش شیمیایی و توربولانس را بر پایه کارهای مگنوسن و یرتاژر، [۹] را ارائه می‌دهد که به مدل ادی دیسیپیشن معروف است. نرخ خالص گونه‌های تولیدی i بر اساس واکنش گرهای r و



شکل ۵- مشعل با ماتریس تخلخل چهار مرحله ای پیشنهادی

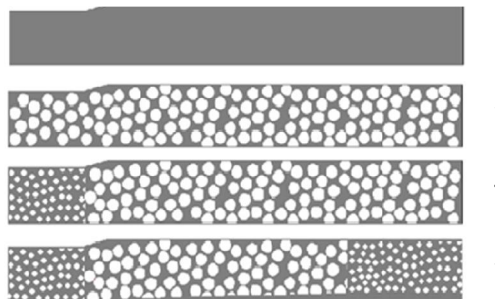
عدد، در حالت دوم ۲۱۰۰۰ عدد، در حالت سوم ۴۷۰۰۰ عدد و در حالت چهارم ۱۰۰۰۰ است. نوع مشها از نوع مربعی و یکنواخت است.

### ۳-۵- شرایط مرزی

در شکل ۷ شرایط مرزی در مشعل مشاهده می‌شود. در محاسبات عددی برای حل معادلات دیفرانسیل مختلف با توجه به مرتبه معادلات شرایط مرزی مختلفی تعریف می‌شود. شرط مرزی ورودی سرعت، خروجی فشار، دیواره‌ها ساکن بدون لغزش و محور تقارن، بصورت شرط مرزی محور تعیین گردیده است. شرط مرزی ورودی برای مخلوط هوا و متان بصورت سرعت ورودی در نظر گرفته شده است.

دمای مخلوط ورودی ۳۰۰ کلوین است؛ همچنین کسر مولی اکسیژن ۰/۲۱ و کسر مولی متان ۰/۱ و سرعت ورودی ۴۵ cm/s است. برای تعیین مشخصات آشفته‌گی جریان سوخت و هوا در مرزهای ورودی از روش میزان شدت آشفته‌گی و قطر هیدرولیکی استفاده شده است. شدت آشفته‌گی یک مقیاس مشخص کننده آشفته‌گی است که با درصد بیان می‌شود. یک سیال ایده آل بدون هیچگونه نوسانی در سرعت و جهت حرکت سیال دارای شدت

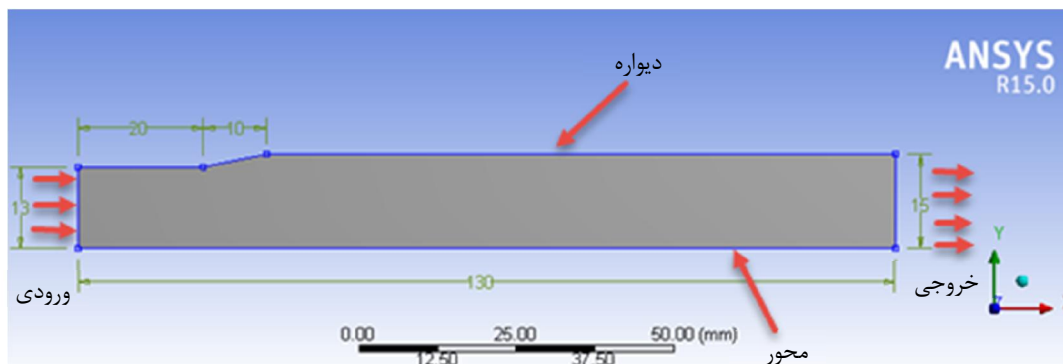
مشعل بدون تخلخل، مشعل با تخلخل یکنواخت یک مرحله ای، مشعل با تخلخل دو مرحله ای و مشعل با تخلخل دو مرحله‌ای با شیار در مرکز مشعل نمایان شده‌اند؛ همچنین جنس ماده متخلخل از جنس آمونیا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) است.



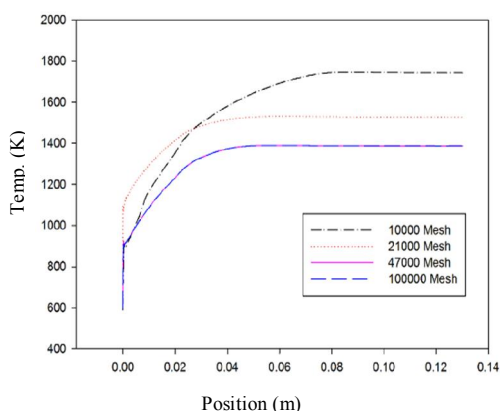
شکل ۶- چهار هندسه ماتریس تخلخل، ۱- مشعل بدون تخلخل، ۲- مشعل با تخلخل یکنواخت، ۳- مشعل با تخلخل دو مرحله ای، ۴- مشعل با شیار در محور

### ۲-۵- شبکه بندی

هندسه مساله به دلیل متقارن بودن نسبت به محور مرکزی محفظه احتراق به شکل دو بعدی و محور متقارن در نظر گرفته شده است. تعداد مش در حالت اول حدود ۱۰۰۰۰



شکل ۷- شرایط مرزی مساله



شکل ۸- نمودار استقلال از شبکه

در شکل ۹ نتایج مشعل‌های مورد بررسی در این پژوهش، نتایج تجربی مشعل دورست و تریمیس و نتایج عددی محمدی و حسین پور در یک نمودار مشاهده می‌گردد. طبق شکل ۹ به ترتیب نتایج دمای مشعل‌های متخلخل چهار مرحله‌ای، تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای به نتایج تجربی دورست و تریمیس در خروجی مشعل نزدیکتر بوده و هم خوانی بیشتری دارند. نتایج محمدی و حسین پور در ابتدای مشعل، همخوانی با نتایج دورست و تریمیس دارد، ولی هر چه به انتهای مشعل نزدیک می‌شویم، همخوانی کمتر می‌شود. مشعل مورد استفاده دورست و تریمیس، [۳] بصورت تخلخل دو مرحله‌ای و با مبدل حرارتی است که با چرخش آب کار می‌کند.

توربولانس صفر درصد است. میزان شدت آشفتگی در تمام موارد حل روی مقدار ۱۰ درصد تنظیم گردیده است. از شرط مرزی فشار خروجی برای شرط مرزی خروجی محفظه احتراق استفاده شده و فشار خروجی برابر فشار اتمسفر است. در دیواره‌ها از شرط مرزی دیواره ساکن به همراه شرط عدم لغزش در دیواره‌ها استفاده شده است. به علت تقارن محوری محفظه احتراق، از شرط مرزی محور برای محور مرکزی محفظه استوانه‌ای شکل استفاده شده است.

#### ۶- استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه تعداد مش حدوداً ۱۰۰۰۰، ۲۱۰۰۰، ۴۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ مش بررسی شده است. در شکل ۸ نمودار دمای جامد در شبکه‌های متفاوت مشاهده می‌شود. دو نمودار با تعداد مش ۴۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ تقریباً هم خوانی دارند؛ بنابراین تعداد مش ۴۷۰۰۰ کافی و قابل قبول است.

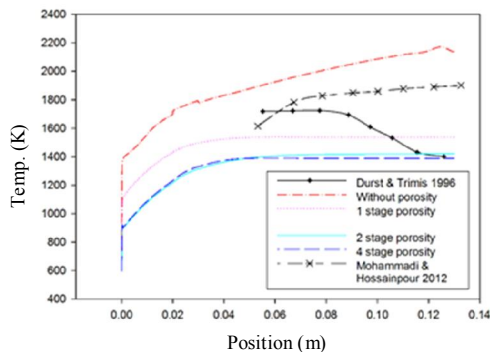
#### ۷- صحت سنجی نتایج

برای صحت سنجی نتایج دمای انواع مشعل‌های مورد بررسی با نتایج تجربی دورست و تریمیس [۶] و نتایج عددی محمدی و حسین پور [۵] مقایسه گردیده است. ابعاد و هندسه مشعل در مساله مورد بررسی با هندسه و ابعاد مشعل‌های دورست و تریمیس و محمدی و حسین پور کاملاً یکسان بوده و تفاوت تنها در ماتریس تخلخل است.



آلاینده‌های مشعل افزایش می‌یابد؛ بنابراین رسیدن به نقطه بهینه امری حائز اهمیت است. در تحقیق انجام شده، کاهش آلاینده‌ها بیشتر مد نظر بوده و در طرح پیشنهادی جدید، کاهش محسوس آلاینده‌ها در مقابل کاهش ۲ درصدی بازده محفظه احتراق حاصل گردید. با ایجاد یک شیار به شکل یک مخروط باریک، دمای بیشینه مشعل تا ۱۴۰۰ کلوین کاهش یافته و نتایج شبیه سازی به نتایج تجربی در خروجی مشعل بسیار نزدیک می‌گردد. برای این ابعاد مشعل، تعداد مش ۴۷۰۰۰ مناسب بوده و نتایج خوبی حاصل می‌گردد. ضریب شکل در مشعل پیشنهادی بسیار بهینه شده و مقدار آن تقریباً صفر است. هر چه ضریب شکل به عدد صفر نزدیکتر باشد، شعله از پایداری بیشتری برخوردار است.

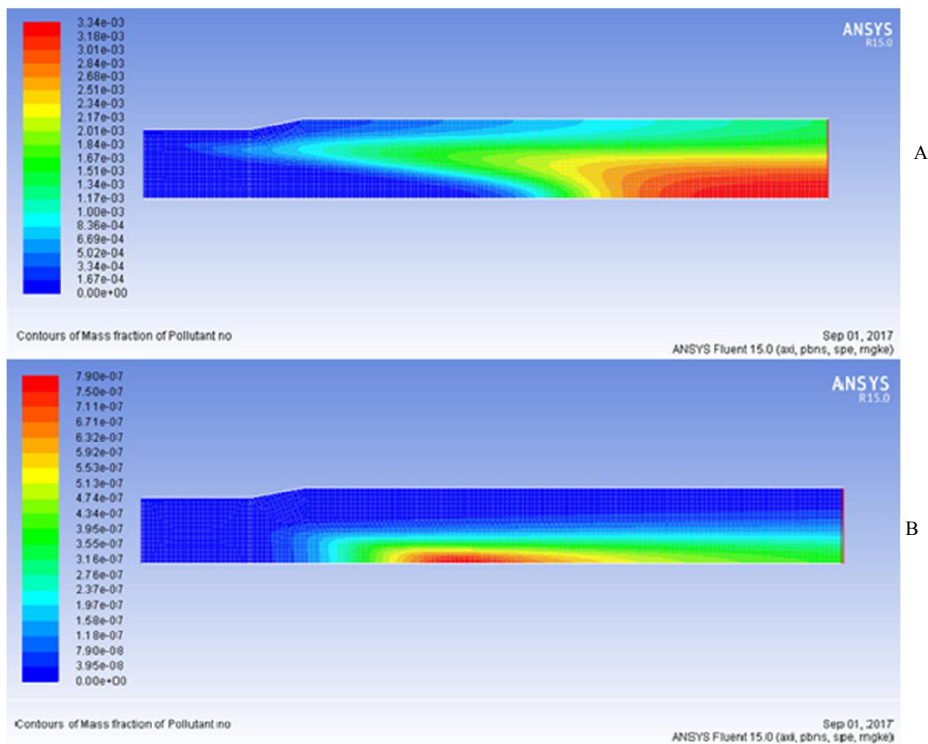
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای کسر جرمی  $NO_x$  در چهار حالت مورد بررسی کنار هم مشاهده می‌شود.



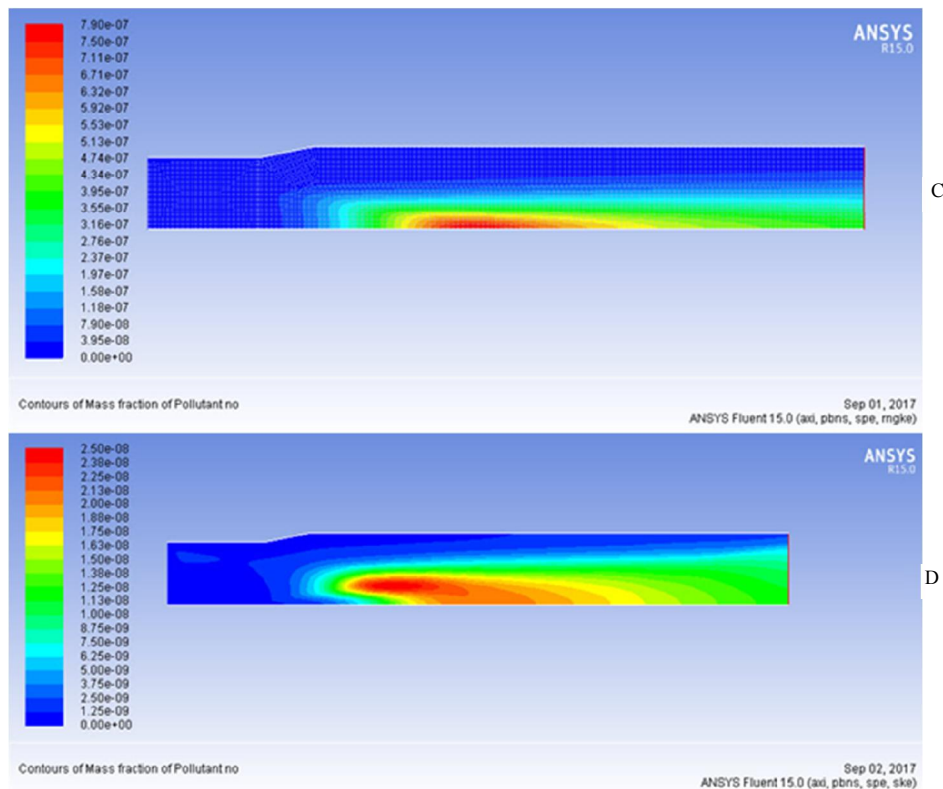
شکل ۹- نمودار صحت سنجی

### ۸- نتایج

در طراحی مشعل‌ها دو موضوع بازدهی محفظه احتراق و آلاینده‌ها پارامترهای مهمی می‌باشند. هر چه شعله پایدارتر باشد، بازدهی محفظه احتراق بالاتر، دمای شعله بالاتر و



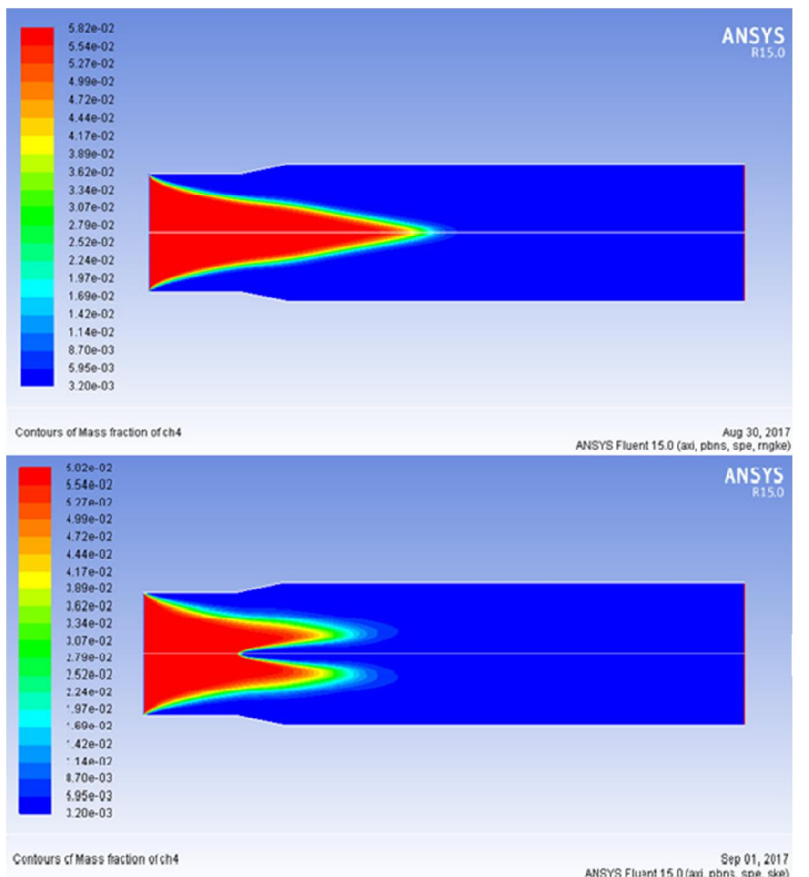
شکل ۱۰- کانتور  $NO_x$  در دو حالت مشعل بدون تخلخل و تخلخل یک مرحله‌ای



شکل ۱۱- کانتور NOx در دو حالت مشعل با تخلخل دو مرحله‌ای و چهار مرحله‌ای

در شکل ۱۲ کانتور کسر جرمی متان در دو حالت مشعل بدون شیار با تخلخل یکنواخت و شیار دار مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، در مشعل پیشنهادی جدید، شعله پخش شده و حجم وسیع تری از مشعل را تحت پوشش قرار داده است. ایجاد شیار در مشعل سبب شده تا دمای مشعل بصورت یکنواخت در طول و همینطور در شعاع سیلندر توزیع گردد. از طرفی گازهای حاصل از احتراق فرصت بیشتری برای تجزیه شدن در اختیار دارند. از این رو تولید ازت مشعل به مراتب کاهش یافته است. ایجاد شیار در محور مشعل سبب ایجاد یک گردابه در ناحیه مخروطی شکل شده و یک جریان برگشتی ایجاد کرده و سبب به تاخیر انداختن خروج گازها از آگزوز می‌شود؛ همچنین دمای ماتریس تخلخل را بصورت متعادل کنترل می‌کند.

در قسمت (A) مشعل بدون تخلخل، در قسمت (B) مشعل با تخلخل یکنواخت، در قسمت (C)، مشعل با تخلخل دو مرحله‌ای و در قسمت (D) مشعل با تخلخل چهار مرحله‌ای بصورت نیمه متخلخل - نیمه آزاد مشاهده می‌شود. در قسمت (A) ماکزیمم کسر جرمی ازت در خروجی بوده، در حالی که در قسمت‌های (B)، (C) و (D) در وسط مشعل است. در قسمت (C) یعنی در حالت تخلخل دو مرحله‌ای، نسبت به قسمت (B)، یعنی تخلخل یکنواخت قسمت قرمز رنگ که نمایانگر کسر جرمی بیشینه است، به بالادست جریان نزدیک شده و فرصت بیشتری در اختیار گاز NO قرار داده تا تجزیه شود. در قسمت (D) یعنی در حالت مشعل با تخلخل چهار مرحله‌ای بصورت نیمه متخلخل - نیمه آزاد، نسبت به بقیه حالت‌ها بیشینه کسر جرمی از خروجی دورتر شده و به ورودی نزدیکتر است.



شکل ۱۲- کانتور کسر جرمی متان در دو حالت، ۱- مشعل با تخلخل یکنواخت یک مرحله‌ای، ۲- چهار مرحله‌ای در حالت شیاردار

۸-۱- محاسبه محفظه احتراق

همانطور که در بخش ۳-۱-۲ ذکر گردید، طبق معادله ۱ بازدهی محفظه احتراق محاسبه گردیده است. در جدول ۲ بازده محفظه احتراق در حالت‌های مختلف مشاهده می‌گردند.

جدول ۲- بازده محفظه احتراق

مدل	دمای بیشینه	دمای میانگین	بازده
بدون تخلخل	۲۳۹۴	۱۸۱۲	۰/۷۵۷
تخلخل یکنواخت	۱۵۶۲	۱۴۹۴	۰/۹۵۶
تخلخل دو مرحله ای	۱۴۲۷	۱۳۴۲	۰/۹۵۲
تخلخل چهار مرحله ای	۱۴۲۸	۱۳۳۰	۰/۹۳۱

۸-۲- ضریب شکل

طبق معادله ۲ ضریب شکل برای مشعل محاسبه گردیده است. در جدول ۳ ضریب شکل مشعل در حالت‌های مختلف مشاهده می‌گردند.

با توجه به نتایج بدست آمده، در مشعل‌های متخلخل، هر چه سرعت حرکت گاز درون مشعل بالا رود، گاز به سرعت خارج شده و انتقال حرارت به سمت ورودی مشعل کاهش می‌یابد؛ در نتیجه دمای میانگین مشعل کاهش یافته و بازده محفظه احتراق کم می‌شود.

در شکل ۱۲ نمودار میانگین وزنی دمای خروجی بر حسب بازده مشعل مشاهده می‌گردد. میانگین وزنی دمای خروجی از نتایج خروجی‌های نرم افزار انسیس فلونت می‌باشد. میانگین وزنی یک مقدار از رابطه ۲۰ توسط نرم افزار فلونت محاسبه می‌شود [۸].

جدول ۳- ضریب شکل مشعل

مدل	میانگین وزنی دمای ورودی (K)	میانگین وزنی دمای خروجی (K)	دمای بیشینه خروجی (K)	ضریب شکل
بدون تخلخل	۳۰۰	۱۷۳۷/۰۰	۲۰۲۰/۰۰	۰/۱۶۴
تخلخل یکنواخت	۳۰۰	۱۵۳۶/۲۸	۱۵۶۲/۵۷	۰/۰۲۱
تخلخل ۲ مرحله ای	۳۰۰	۱۵۲۸/۷۲	۱۵۶۰/۷۷	۰/۰۲۵
تخلخل ۴ مرحله ای	۳۰۰	۱۵۱۶/۸۲	۱۵۱۶/۸۳	۲/۵×۱۰ <sup>-۶</sup>

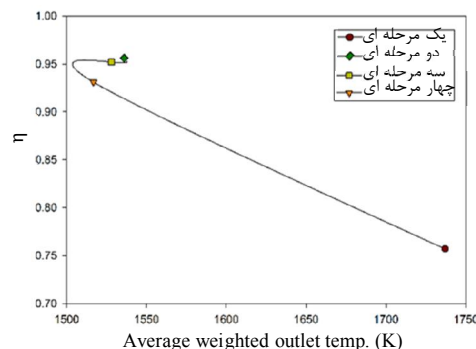
کاهش داده و فرصت اکسید شدن را به گازهای آلاینده حاصل از احتراق می‌دهد.

$$\frac{\int \phi \rho |\vec{v} \cdot d\vec{A}|}{\int \rho |\vec{v} \cdot d\vec{A}|} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i |\vec{v}_i \cdot \vec{A}_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i |\vec{v}_i \cdot \vec{A}_i|} \quad (20)$$

کمترین دمای میانگین خروجی که دارای کمترین آلاینده NOx است، مربوط به مدل جدید پیشنهادی که دارای شیار در مرکز است؛ همچنین بالاترین بازده مربوط به حالت تخلخل دو مرحله‌ای است. با توجه به نمودار شکل ۱۲ می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر قطر و هندسه شیار می‌تواند به حالت بهینه رسید.

#### ۱۰- علایم، نشانه‌ها و ارقام

سرعت سیال، m/s	$V$
مدول الاستیسیته، N/m <sup>2</sup>	$E$
چگالی، kg/m <sup>3</sup>	$\rho$
بازده محفظه احتراق	$\eta$
دمای بیشینه، K	$T_{max}$
دمای میانگین، K	$T_{av}$
ضریب شکل	$P.F$
تخلخل	$\varepsilon$
حجم قسمت خالی، m <sup>3</sup>	$V_v$
حجم کل، m <sup>3</sup>	$V_o$
حجم قسمت جامد، m <sup>3</sup>	$V_s$
ترم منبع معادله مومنوم	$S_i$
مقدار سرعت، m/s	$ v $
چگالی، kg/m <sup>3</sup>	$\rho$
آنتالپی، kJ/kg	$h$
حرارت واکنش شیمیایی و تمامی چشمه‌های حرارتی حجمی موجود، W/m <sup>2</sup>	$S_h$



#### ۹- نتیجه گیری

در نهایت نتیجه این پژوهش این است که با ایجاد یک شیار با هندسه پیشنهادی در مرکز مشعل و ساختن مشعل متخلخل با پارامترهای تخلخل پیشنهادی، می‌توان مبدل حرارتی را در مشعل حذف نمود. با حذف مبدل حرارتی، مشعل از لحاظ اقتصادی بهینه شده و آلاینده‌های مشعل کاهش می‌یابد. شیار ایجاد شده در مشعل سبب ایجاد یک گردابه در شعله شده و سرعت خروج فراورده‌های واکنش را

$m^{-1}$ ضریب پراکندگی،	$\sigma_s$	هدایت حرارتی، $W/m^2$	$\lambda_s$
$W/m^2.K^4$ ثابت استفان بولتزمن،	$\sigma$	قطر حفره، m	$d_p$
$W/sr.m$ شدت تشعشع،	$I$	تولید انرژی جنبشی توربولانسی	$G_b$
K دمای موضعی،	$T$	طبق خاصیت شناوری	$Y_M$
تابع فاز	$\emptyset$	عبارت انبساط نوسانی در توربولانس	
زاویه جامد، Rad	$\Omega'$	تراکم پذیر به نرخ اضمحلال کلی	
گونه	$I$	عدد پراتل $\varepsilon$	$\sigma_\varepsilon$
واکنش گر	$R$	عدد پراتل k	$\sigma_k$
کسر جرمی هر یک از گونه های تولید شده P	$Y_p$	ویسکوزیته توربولانسی یا ویسکوزیته ادی، $m^2/s$	$\mu_t$
کسر جرمی واکنش دهنده های ذره ای	$Y_R$	هدایت موثر، $W/m.K$	$k_{eff}$
مقاومت سرعت نسبی، $m^2$	$A$	هدایت حرارتی توربولانس، $W/m.K$	$K_t$
انرژی جنبشی توربولانس، $j/kg$	$k$	شار انتشار گونه زه، $kg/m^2.s$	$J_j$
نرخ اضمحلال، $m^2/s^3$	$\varepsilon$	انرژی، kJ	$E$
		فشار، Pa	$P$
		سرعت، m/s	$v$
		بردار نیرو، N	$\vec{F}$
		جاذبه گرانش، $m/s^2$	$\vec{g}$
		تانسور تنش	$\bar{\tau}$
		زمان، s	$T$
		ویسکوزیته، $m^2/s$	$\mu$
		تانسور تنش واحد،	$I$
		بردار موقعیت	$\vec{r}$
		بردار جهت	$\vec{s}$
		بردار جهت پراکندگی	$\vec{s}'$
		طول مسیر	$s$
		ضریب جذب	$a$
		ضریب شکست	$n$

### ۱۱- مراجع

- [1] Lindmeier C (2016) An Estimated 12.6 Million Meaths Each Year are Attributable to Unhealthy Environment. database on the World Wide Web, <http://who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/en>.
- [2] Tong T, Sathe SB (1991) Heat transfer characteristics of porous radiant burners. J Heat Trans-T ASME 113: 423-428.
- [3] Durst F, Trimis D (1996) Compact porous medium burner and heat exchanger for household applications. Ec Project Report, contract no. JOE3-CT95-0019.
- [4] Echigo R, Yoshizawa Y, Hanamura K, Tominura T (1986) Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation. Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference 2: 827-832.
- [5] محمدی ا، حسین پور س (۱۳۹۰) بررسی عددی اثرات پارامترهای مختلف در مشعل های محیط متخلخل همراه با تخلخل متغیر، بر روی احتراق و ایجاد آلاینده ها در حالت

- The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling, The Eddy-Dissipation Model: 204- 205 & Reporting Alphanumeric Data, Volume Integrationl, Mass-Weighted Average: 743.
- [9] Magnussen BF, Hjertager BH (1976) On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute.
- دوبعدی و متقارن محور. چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۳-۵. کاشان.
- [6] Hashemi SM, Hashemi SA (2017) Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation. Fuel 202: 56-65.
- [7] Nabhani N (2006) Fuel and combustion. 1st edn. Sanaat Naft, Tehran.
- [8] ANSYS FLUENT 14 Theory Guide (2011) Turbulence, Standard k-ε Model: 49-51 & Species Transport and Finite-Rate Chemistry,