



## مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد مبدل های کاتالیزوری با طراحی فرآیند احتراق گازی سوزی برای موتور خودروی پژو پارس

سalar.ershadi<sup>\*</sup>, فریده عتابی<sup>†</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی انرژی، مرکز پایش آلودگی هوای استان تهران، تهران، ایران.  
۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>\*</sup>salar.ershadi67@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

### خلاصه

آثار زیان آور آلاینده‌ها بر سلامت انسان، دلیل اصلی تلاش‌های گسترشده دهه‌های اخیر برای کاهش و کنترل آلودگی هوای می‌باشد. گرایش به سمت هوای پاک و واپستگی کمتر به منابع نفتی، علاقه به مصرف سوخت‌های جایگزین در صنعت حمل و نقل و فناوری‌های کاهش آلودگی هوای در سال‌های اخیر رو به افزایش بوده است. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی مبدل کاتالیزوری بکار رفته در سیستم اگزوز خودرو و تحلیل آلاینده‌های خروجی از آن انجام گرفته است. محفظه احتراق و قسمت کاتالیزور ابتداء در محیط سالیدور کک مدل شده و سپس در نرم افزار قدرتمند ANSYS CFX مورد تحلیل قرار می‌گیرد. جهت دستیابی به نیل، ابتداء فرآیند احتراق با نسبت استویومتریک ۱۷.۱:۱ با لحاظ سوخت گازی سوز (CNG) برای موتور خودروی پژو پارس به مشخصات قطر سیلندر و پیستون (۸۴.۱×۸۴.۱) میلیمتر شبیه‌سازی شده و مقادیر خروجی حاصل از این شبیه‌سازی را به عنوان ورودی برای قسمت متخلخل کاتالیزور در نظر گرفتیم. دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق برابر با  $0.018 \text{ kg/s}$  و دمای هوای ورودی به سیلندر کمی بالاتر از دمای محیط و سرعت گازهای ورودی به مبدل کاتالیزوری ۲۷ متر بر ثانیه لحاظ گردید. مبدل کاتالیزوری مورد طراحی به مشخصات طول و قطر ( $275 \times 100$ ) میلیمتر و با آرایه کاملی از فلزات نجیب رودیوم، پلاتین و پالادیوم می‌باشد. طراحی هندسه داخلی مبدل کاتالیزوری از سه جنس فلزات یاد شده صورت پذیرفت و جهت بررسی مدل جریان از رابطه اصلاح شده ناویه-استوکس و روابط حرکتی تیدین ( $T_{dyn}$ ) و مدل اغتشاش  $E - k$ -بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که طرح بهینه بکار رفته از سطح داخلی کاتالیزور، میزان آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودرو را بطور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: آلاینده‌های خودرو، موتورهای احتراقی، مبدل کاتالیزور، سوخت CNG، نرم افزار CFX

### ۱. مقدمه

آلودگی زیست محیطی کلان شهرها یکی از معضلات جهان کنونی است. پیشرفت فناوری و استفاده روزافزون انسان از منابع طبیعی این مشکل را دوچندان کرده است. رشد بی رویه جمعیت در کلان شهرها و به تبع آن افزایش تعداد خودروها و توسعه اقتصادی همراه با توسعه صنایع، اغلب این شهرها را با نابهنجاری‌های زیست محیطی رویرو ساخته است [۱]. از سال ۱۹۶۰ به بعد نرخ رشد تولید خودرو از نرخ رشد جمعیت در جهان بیشتر بوده است. در سال ۱۹۵۰ حدود ۵۰ میلیون خودرو برای ۳.۵

میلیارد جمعیت جهان وجود داشته است و اکنون ۶۰۰ میلیون خودرو برای ۶ میلیارد نفر که با تولید ۴۵ میلیون وسیله در سال روبه افزایش است. بدین ترتیب تا سال ۲۰۲۰ جهان دارای یک میلیارد خودرو خواهد شد [۲]. طبق برآورد انجام شده گفته می شود که جمعیت جهان در فاصله بین ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ بین ۹ تا ۱۰ میلیارد نفر تثبیت گردد. اما ناوگان حمل و نقل به رشد خود ادامه می دهد. از این‌رو وسایط نقلیه به عنوان مؤثرترین عامل تخریب محیط زیست و مخاطرات بهداشتی ساکنان شهری شناخته شده اند [۳]. براساس آمارها ۸۰٪ آلودگی در کلانشهرها ناشی از دود خودروهast و ۲۰٪ باقیمانده نیز مربوط به فعالیت کارخانه‌ها و بخش‌های صنعتی است [۴]. از یکی از اقداماتی که می‌تواند تأثیر عمده‌ای در کاهش انتشار آلاینده‌ها داشته باشد، تبدیل سوخت بنزین به سوخت گاز طبیعی است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای با چنین جایگزین کردنی، میزان انتشار CO و HC به ترتیب ۵۶ و ۳۷٪ کاهش یافته است [۵]. براساس آخرین اطلاعات منتشره از سوی انجمن بین‌المللی خودروهای گاز طبیعی (IANGV)<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۶ حدود ۵ میلیون خودروی گازسوز در سراسر جهان در حال تردد هستند. انجمن بین‌المللی خودروهای گازسوز فعالیت‌های خود را بر مبنای دستیابی به هدف ۵۰ میلیون خودروی گازسوز تا سال ۲۰۲۰ برنامه‌ریزی و اعلام کرده و در این زمینه همه ساله اقدام به برگزاری همایش هایی در کشورهای عضو می‌نماید [۶]. در مطالعه‌ای [۷] که تحت بررسی منافع اجتماعی جایگزینی CNG به جای بنزین در تاکسی‌های شهر تهران انجام گردید، نشان داده شد که جایگزینی CNG به جای بنزین در تاکسی‌های شهر تهران با کاهش هزینه‌های اجتماعی انتشار آلاینده‌ها به میزان ۶۳۸ میلیون دلار، در واقع افزایش منافع اجتماعی به همین میزان را تحقق می‌بخشد. لذا مزایای جایگزینی گاز طبیعی (CNG) به جای بنزین تنها و محدود به تفاوت هزینه‌های بنزین و گاز طبیعی نیست. از سوی دیگر، دانشمندان محیط زیست، مکانیک، شیمی و خودروسازی جهان در مورد کاهش آلاینده‌های خروجی از آگزoz خودروها معتقدند که با تغییر در موتور خودرو نمی‌توان به استانداردهای کنونی و کاهش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ دست یافت، بلکه باید موتور خودرو را بدون توجه به آلاینده‌های تولیدی طراحی کرد و سپس با کمک کاتالیست‌ها، گازهای خروجی را به استانداردهای آلودگی رساند. از همین رو یکی از روش‌های مناسب و مؤثر برای پوشش دهی به این استانarde‌ها و قوانین، استفاده از مبدل‌های کاتالیستی بر پایه فلزات پلاتین، رو دیوم و پالادیوم می‌باشد. مبدل کاتالیستی بر پایه این فلزات نجیب قادر است ۹۹-۹۵٪ گازهای خروجی از آگزoz خودرو را به گازهای بی خطر برای محیط زیست تبدیل کند [۸]. در بیشتر واکنش‌ها در مبدل کاتالیستی خودرو، اکسیدهای نیتروژن به نیتروژن که گازی بی اثر است و همچنین هیدروکربن‌های نسخته و منواکسید کربن به آب و دی اکسید کربن که اثر چندانی بر محیط زیست ندارند و برای آن بی خطر است تبدیل کند [۹]. در مطالعه طرح خود با حذف فلزات گرانبهای پلاتین و رو دیوم و تنها با استفاده از ۱.۲ گرم پالادیوم، مبدل کاتالیستی با فرآیند ساخت دستیابی به ساختار پروسکایت، برای خودروی دوگانه سوز روآ با موتور XU7 تهیه گردید. با مقایسه نتایج آزمایش آلاینده‌گی مشخص گردید این نوع ساختار مبدل در حالت احتراق سوخت گاز نسبت به حالت بنزین سوزی بهینه است. در مطالعه‌ای [۱۰] ویژگی‌های جریان در مبدل‌های کاتالیستی و اثرات جریان برگشتی بر عملکرد موتور مورد بررسی و نشان داده شد که فشار برگشتی بیشتر در مبدل منجر به افزایش ۱۵٪ مصرف ویژه سوخت می‌شود.

## ۲. روابط ریاضی حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر میدان جریان، به ترتیب معادله پیوستگی، و معادلات ناویه استوکس متوسط گیری شده و معادلات مربوط به آشفتگی موجود در میدان جریان می‌باشند که در یک جریان تراکم پذیر، معادله انرژی و معادله حالت نیز به این معادلات افزوده می‌گردند:

<sup>۱</sup> International Association of Natural Gas Vehicles

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

ترم تنش رینولز  $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ - موجود در سمت راست معادله (۲) با استفاده از تقریب بوزینسک به گردایان های سرعت موجود در میدان جریان متوسط مرتبط می شود [۱۱]. در معادله (۳)،  $k$  بیانگر ضریب هدایت حرارتی،  $E$  بیانگر انرژی کل و  $(\tau_{ij})_{eff}$  بیانگر تانسور تنش Deviatoric بوده و بصورت رابطه (۴) تعریف می گردد:

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

در این مطالعه از مدل توربولانسی  $\epsilon - k$  که رایج ترین مدل بررسی اغتشاش در شبیه سازی برنامه های کاربردی می باشد استفاده شده است. این مدل انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلافات آن را بوسیله معادلات انتقال تعریف می کند. لакс می و همکاران [۱۲] در مطالعات خود نشان دادند که با در نظر گرفتن رابطه ناویه- استوکس اصلاح شده در تمام دامنه شامل دو عبارت منبع همراه با مقاومت ناشی از محیط متخلخل (عبارت افت داخلی و دارسی خطی) و بالحاظ محیط متخلخل همگن و در جریان های آرام عبوری از محیط متخلخل می توان روابط حرکتی ناویه- استوکس را بدین صورت بازنویسی کرد:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \nabla^2 u + \nabla p = -\mu Du \quad in \quad \Omega x(0, t) \quad (5)$$

این روابط حرکتی توسط تدین (Tdyn) در حالت جامد حل شده که در آن، عبارت  $\nabla \cdot u$  در سرعت های کم حذف می شود. اگر  $\nabla \cdot u = 0$  باشد، در مدل سازی نمی تواند حذف شود (یعنی در سرعت های بالا)، پس تدین باستی روابط حرکتی زیر را در یک سیال بجاوی یک جامد حل کند:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) - \mu \nabla^2 u + \nabla p = -\mu Du \quad in \quad \Omega x(0, t) \quad (6)$$

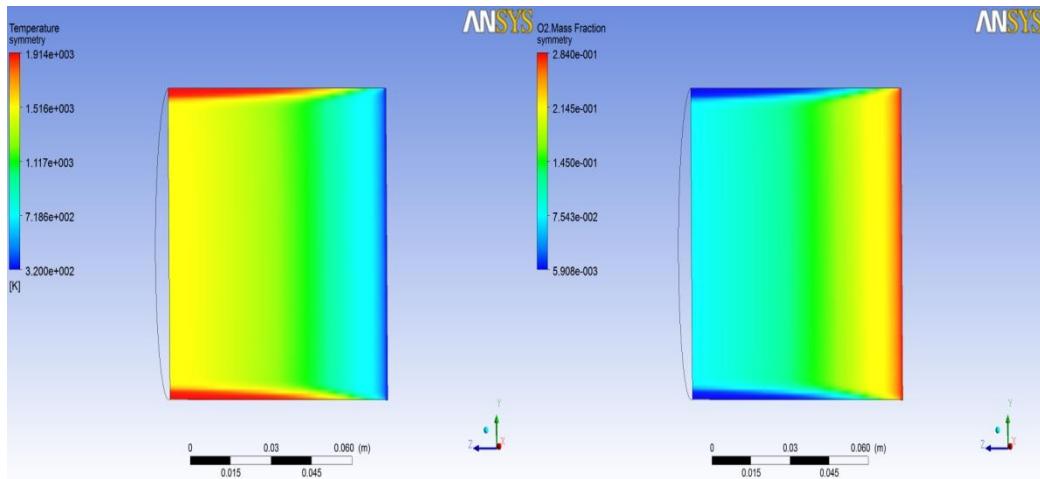
به منظور افزودن ماتریس مقاومتی دارسی  $D^*$ ، یکتابع مناسب بجاوی تدین جایگزین می شود.

### ۳. مدل سازی و شبیه سازی

اعتبار مدل عددی با استفاده از اندازه گیری های تجربی در شرایط ماندگار و گذرا به اثبات رسیده است. جریان سیال درون محفظه احتراق شامل پیچیدگی های فرآیندهای احتراق، آشفتگی، انتقال حرارت، تغییر فاز و انتقال جرم می باشد. به همین دلیل شناخت دقیق و صحیح میدان جریان نیاز به مدل سازی دقیق جریان درون محفظه احتراق دارد. از اینرو ساختار هندسی سیلندر و محفظه احتراق موتور در نرم افزار سالیدورک مدل سازی شده و روابط جریان در ANSYS CFX تحلیل می شود. فشار مرجع روی اتمسفر تنظیم شده و تمامی ورودی ها و خروجی های فشار به صورت مقادیر معیار نسبت به این مقدار، بدست خواهند آمد. موتور انتخاب شده در این مطالعه، مطابق مشخصات فنی خودروی پژو پارس به قطر سیلندر و پیستون (۸۴.۱×۸۳) میلیمتر می باشد.

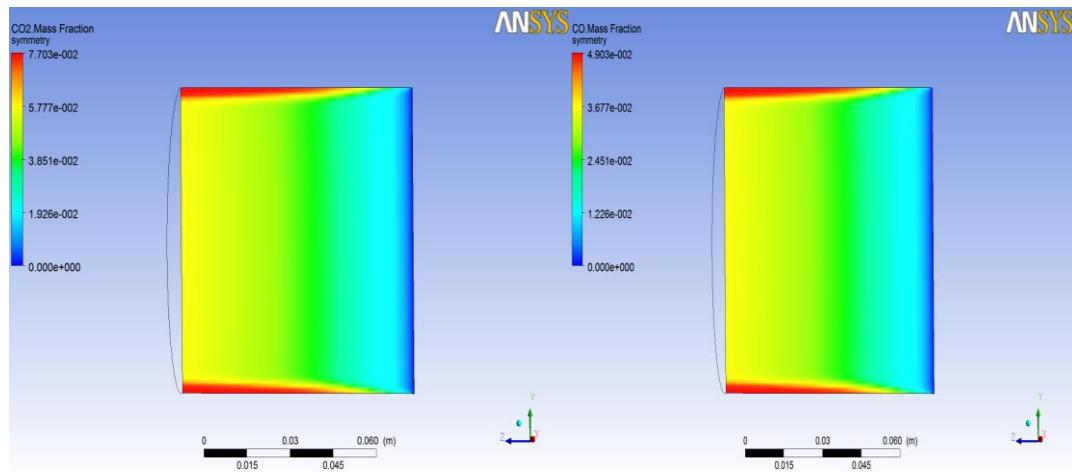
### ۱.۳ شبیه سازی فرآیند ایده آل احتراق در موتور پژو پارس

در شبیه سازی انجام شده نسبت سوخت به هوا ۱۷/۱ که نسبت ایده آل برای موتور گازی سوز می باشد، در نظر گرفته شده است. حفظ نسبت استوکیومتری در خودروهایی که مبدل کاتالیزوری دارند مهم است. این سیستم وقتی کار کرد بهینه دارد که موتور با نسبت ایده آل هوا-سوخت کار کند. مقدار دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق برابر  $\frac{kg}{s} ۰.۱۸$  و دمای ورودی به سیلندر کمی بالاتر از دمای محیط در نظر گرفته شده است. در فرآیند احتراق میزان هوای اضافه رابطه مستقیمی با میزان اکسیژن موجود دارد. در کل اگر میزان اکسیژن موجود در خروجی احتراق در حدود ۲٪ باشد نسبت هم ارزی هوا به سوخت در حدود ۱.۱ و اگر میزان اکسیژن در حدود ۵٪ باشد نسبت هوا به سوخت در حدود ۱.۳ خواهد بود. در شکل (۱) مقادیر کاتنور مربوط به شبیه سازی گازی سوزی (CNG) برای فرآیند احتراق در حالت استوکیومتری برای دمای احتراق و  $O_2$  قابل مشاهده است.

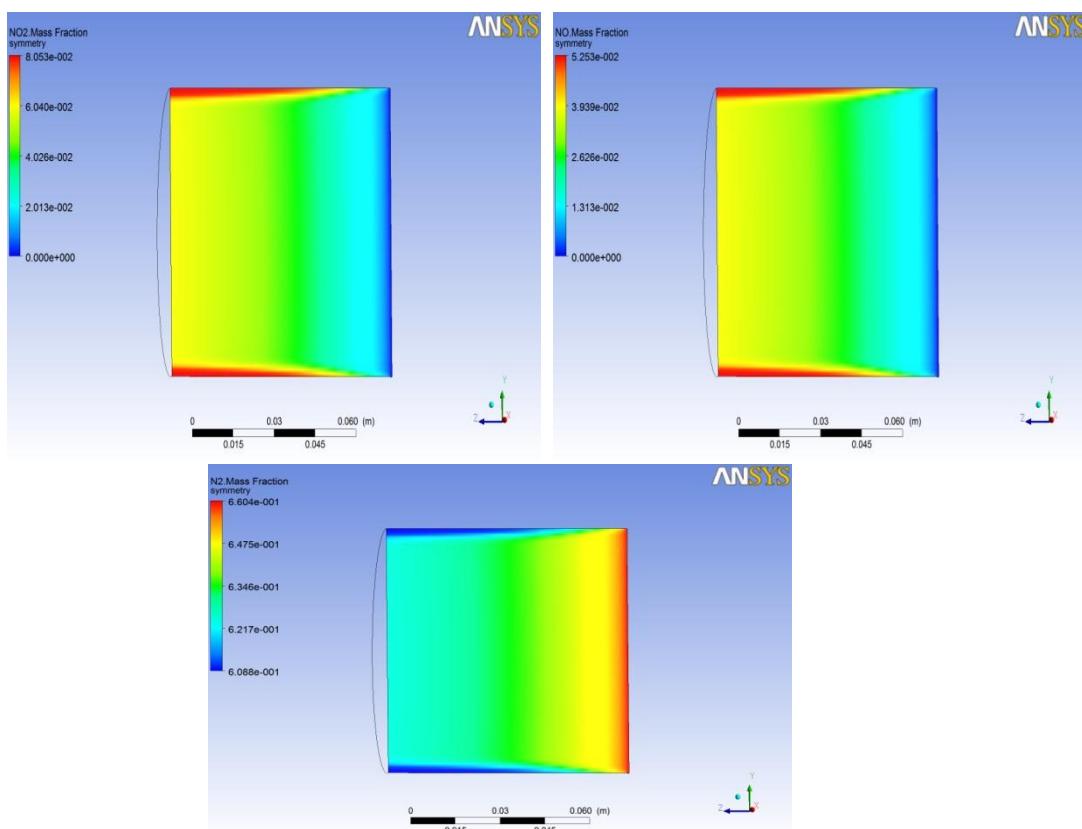


شکل ۱- کاتنور مربوط به احتراق سوخت گاز در محفظه احتراق سیلندر موتور پژو پارس

بطور کلی در رقیق سازی سوخت به هوا، اکسیژن بیشتری در اختیار سوخت قرار می گیرد و دی اکسید کربن بیشتر و منوکسید کربن کمتری در مقایسه با نسبت سوخت به هوای غلیظ تشکیل می شود. تشکیل منوکسید کربن، گرمای کمتری در مقایسه با تشکیل دی اکسید کربن آزاد می کند؛ از اینرو در حالت رقیق، گرمای تولید شده به وسیله احتراق، بیشتر از حالت غلیظ می شود. حرارت بالای محفظه احتراق، ذوب شدن پیستون، رخ دادن ناک و تولید اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد. یکی از عوامل بسیار مهمی که بر میزان آلاینده منوکسید کربن تأثیرگذار می باشد، نسبت هوا به سوخت است [۱۳]. احتراق کامل تر به معنای افزایش غلظت دی اکسید کربن و کاهش منوکسید کربن می باشد [۱۴]. شکل (۲) کاتنور مربوط به کسر جرمی  $CO$  و  $CO_2$  از مقدار مینیمم در ورودی تا مقدار ماکزیمم آن در خروجی را نشان می دهد. مقادیر ماکزیمم  $۰.۰۷۰۳$  و  $۰.۰۴۹۰۳$  به ترتیب برای دی اکسید کربن و منوکسید کربن در حد قابل قبولی می باشند. زمانی که موتور با هم ارزی سوخت غنی کار کند، هنگامیکه اکسیژن کافی برای تبدیل تمام کربن به  $CO_2$  وجود نداشته باشد، مقداری از سوخت نمی سوزد و مقداری کربن بصورت  $CO$  باقی می ماند.  $CO$  نه تنها بعنوان آلاینده ای نامطلوب در نظر گرفته می شود، بلکه باعث اتلاف انرژی شیمیایی، که نمی تواند بصورت کامل در موتور بکار گرفته شود، نیز می گردد.

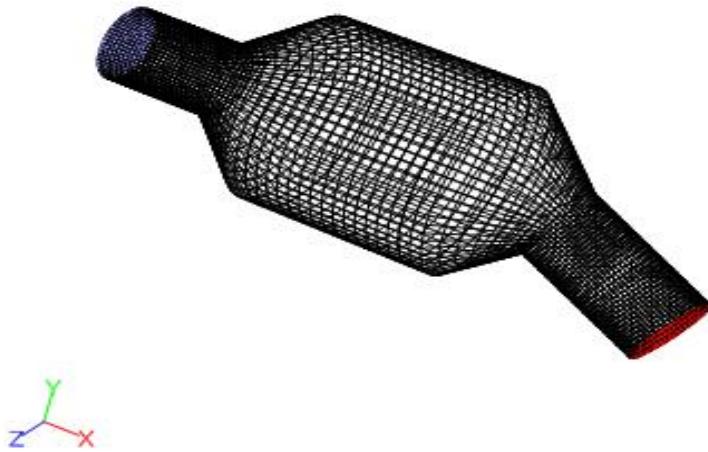
شکل ۲- کسر جرمی  $\text{CO}_2$  و  $\text{CO}$  مربوط به احتراق سوخت گاز در سیلندر موتور پژو پارس

از سوی دیگر دمای بالا و در دسترس بودن اکسیژن دو علت اصلی برای تشکیل  $\text{NO}_x$  هستند. هنگامی که مقدار مناسبی اکسیژن در دسترس باشد و هر چه اوج دمای اشتعال بیشتر باشد  $\text{NO}$  بیشتری تشکیل می‌شود. نسبت هوا به سوخت و آوانس جرقه دو عامل مهمی هستند که به طور عمده بر  $\text{NO}_x$  تأثیر می‌گذارند. در فرآیند صورت گرفته، کسر جرمی  $\text{N}_2$  در خلال فرآیند احتراق کاهش می‌یابد و از مقدار ماکریم خود در ورودی به مقدار مینیمم خود در خروجی تنزل می‌یابد. شکل (۳) کانتور مربوط به کسری جرمی  $\text{N}_2$ ،  $\text{NO}_2$  و  $\text{NO}$  را نشان می‌دهد.

شکل ۳- کسر جرمی  $\text{N}_2$ ،  $\text{NO}_2$  و  $\text{NO}$  مربوط به احتراق سوخت گاز در سیلندر موتور پژو پارس

### ۲.۳ طراحی هندسی و تحلیل مربوط به قسمت کاتالیزور

در گام نخست برای شبیه سازی مسئله نیاز به تولید شکل و شبکه بندی آن در نرم افزار مربوطه می باشد. در نتیجه هندسه سه بعدی از مبدل کاتالیزور در نرم افزار سالیدورک مطابق شکل (۴) تولید شده است. در مرحله بعد فایل آماده شده در نرم افزار ANSYS CFX خوانده شده، ساختار شبکه چک شده و شبکه بندی آن یکنواخت می شود. برای حل مسئله در فضای سه بعدی، حل کننده مجزا انتخاب شده است. به منظور تعیین اثرات حرارتی و دمایی شبکه، محاسبات انرژی نیز فعال می گردد. سپس برای تعیین مدل آشفتگی در قسمت مدل لزج، مدل  $U - k$  انتخاب می شود. در مرحله بعد مواد و واکنش های فعال در مبدل وارد مدل می شود سپس شرایط عملیاتی در فشار اتمسفریک و شتاب نقل وارد می شود و صرفنظر از اتلاف حرارتی، می توان مسئله را حل نمود.

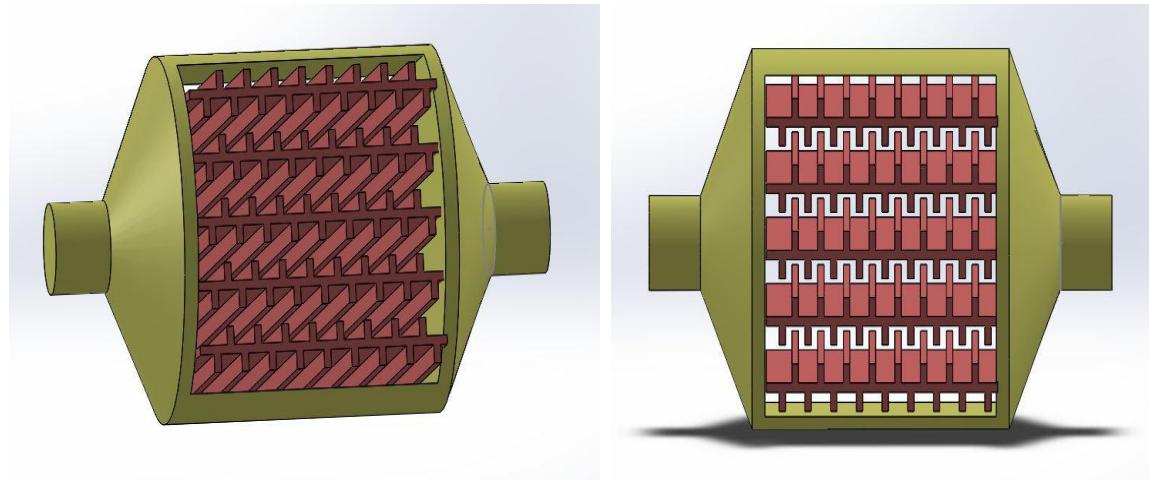


شکل ۴- ساختار هندسی و شبکه بندی مبدل کاتالیزور

در ادامه این مرحله برای شبیه سازی کاتالیزورها دو راه متفاوت وجود دارد:

۱) شبیه سازی کاتالیزور با در نظر گرفتن هندسه داخلی کاتالیزور؛ که در این روش ابتدا هندسه ی داخلی کاتالیزور به طور کامل رسم شده و سپس در نرم افزار مورد تحلیل قرار می گیرد.

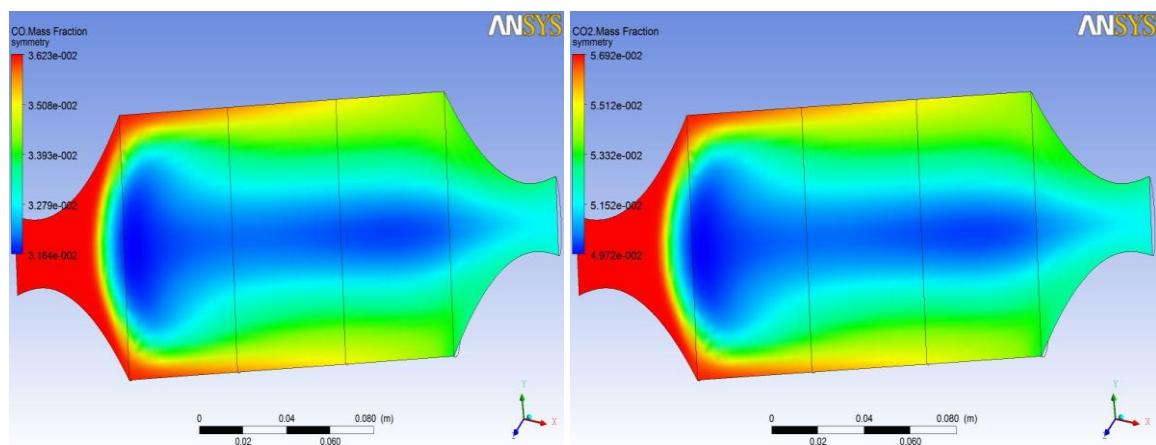
۲) استفاده از توابع از پیش تعریف شده در نرم افزار CFX برای مدلسازی جسم های متخلخل نظری کاتالیزورها. در این پژوهش از روش دوم مدلسازی جهت بالا بردن دقت تحلیل از شبیه سازی خود استفاده نمودیم. در پژوهش حاضر کاتالیزور به مشخصات هندسی طول و قطر  $275 \text{ mm}$  و  $100 \text{ mm}$  می باشد. آرایش صحیح قرارگیری فلزات پلاتین، پالادیوم و روデیوم در طراحی داخلی مبدل های کاتالیزوری از اصل مهم می باشد که در بهبود فرایند پالایش و تخلیه کمک شایانی را دارد. شکل (۴) طراحی هندسی و طرح آرایه بندی فلزات در داخل مبدل کاتالیزور می باشد.



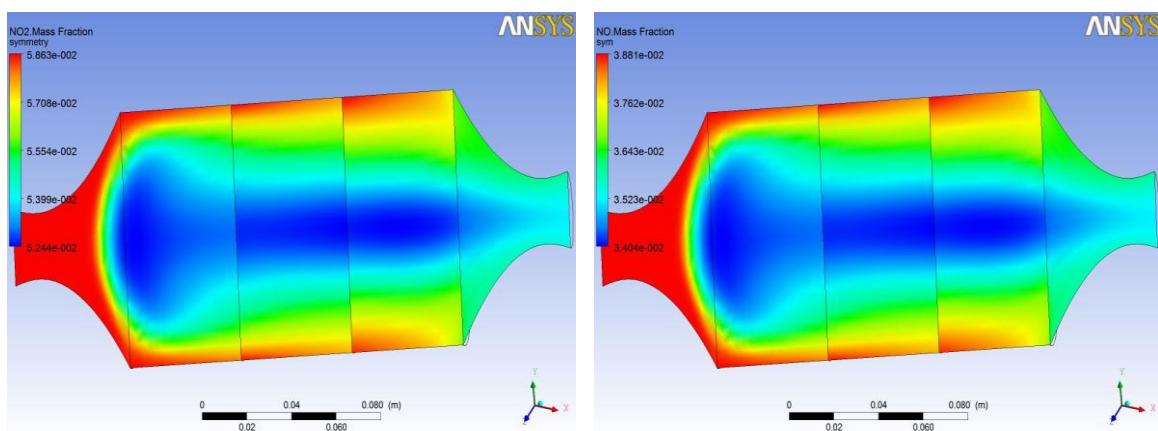
شکل ۴- شماتی از ساختار هندسی مشبک و طرح آرایه قرارگیری فلزات نجیب در داخل مبدل کاتالیزور

### ۳.۰۳ شبیه سازی جریان گازهای خروجی

کانتورهای زیر برای خروجی گاز و مبدل کاتالیزوری با آرایه ای از فلزات نجیب پلاتین، پالادیوم و رو دیوم می باشند. کاهش مقادیر مربوط به آلاینده ها در اشکال (۵ و ۶) قابل مشاهده است. سرعت گازهای ورودی به مبدل کاتالیزوری برابر ۲۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- کسر جرمی CO و CO<sub>2</sub> در مبدل کاتالیزوری

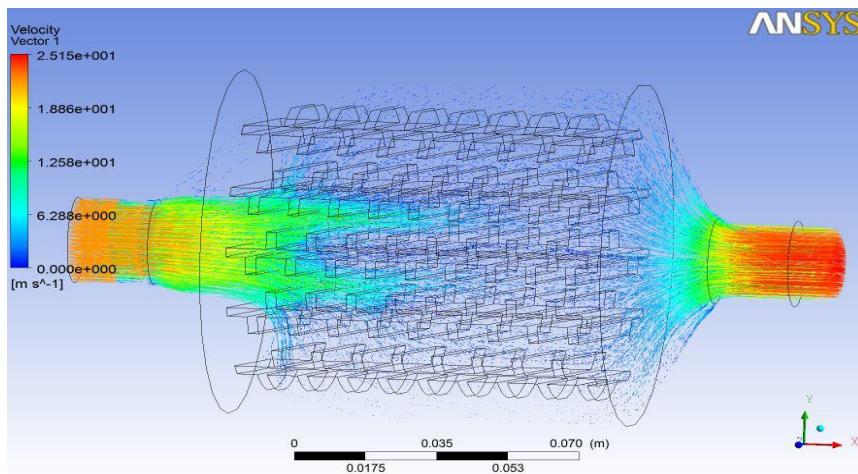


شکل ۶- کسر جرمی NO<sub>2</sub> در مبدل کاتالیزوری

جدول ۱- نتایج خروجی حاصل از شبیه سازی مبدل کاتالیزوری در پالایش آلاینده های اگزوز خودرو

متغیرها (آلاینده ها)	ورودی (کسر جرمی) %	خروجی (کسر جرمی) %
CO	۰/۰۳۶۲۱۹۶	۰/۰۳۳۱۱۳۲
CO <sub>2</sub>	۰/۰۵۹۹۰۹۶	۰/۰۵۲۰۲۸۸
NO	۰/۰۳۸۸۰۵۹	۰/۰۳۵۴۷۷۷
NO <sub>2</sub>	۰/۰۵۹۴۹۵۸	۰/۰۵۴۳۹۳۲

هدف اصلی دیگر از تجزیه و تحلیل، پیدا کردن شکل مناسب طراحی از مبدل کاتالیستی برای منیفولد اگزوز است که کمترین فشار برگشتی را داشته باشد. شکل (۷) مسیر گازهای خروجی حاصل از احتراق پس از واکنش در مبدل با تخلیه بهینه و کمترین ورتیسیته جریان را نشان می دهد.



شکل ۷- مسیر گازهای خروجی از مبدل کاتالیزور

#### ۴. نتیجه‌گیری

در ابتدای مسیر خودروسازی هدف از ساخت موتور تنها گرفتن قدرت و گشاور بیشتر بود، اما با توجه به بحث های زیست محیطی و مشکلات بوجود آمده در دنیای صنعتی، می توان گفت بحث آلودگی موتور هم یکی از پارامترهای تعیین کننده در ساخت موتورهای امروزی است. یکی از روش های کاهش آلودگی موتورها، استفاده از سیستم های پالایشی است که از آن جمله می توان به مبدل کاتالیزوری اشاره کرد. در این مطالعه جهت بررسی از عملکرد بهینه مبدل کاتالیزوری فرآیند احتراق گازی سوزی (CNG) در حالت استوکیومتری برای موتور خودروی پژو پارس با دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق kg/s و دمای هوای ورودی سیلندر کمی بالاتر از دمای محیط شبیه سازی گردید. خروجی های حاصل از احتراق و کاتورهای بدست آمده حاصل از شبیه سازی برای موتور در نظر گرفته شده به حالت های واقعی بسیار نزدیک تر بود. همین مقادیر خروجی حاصل از احتراق را به عنوان ورودی برای قسمت متخلخل کاتالیزور با سرعت ۲۷ متر بر ثانیه در نظر گرفتیم. نهایتاً میزان خروجی آلاینده های CO, CO<sub>2</sub>, NO و NO<sub>2</sub> پس از واکنش و پالایش در مبدل بترتیب برابر با ۰/۳۱٪، ۰/۳۰٪، ۰/۵۲٪ و ۰/۵۴٪ بدست آمد. با توجه به اینکه میزان آلاینده NOx خودروهای CNG سوز نزدیک ۲/۵ برابر آلاینده متناظر در خودروهای بنزینی می باشد و طبق ابلاغیه سازمان محیط زیست اروپا که میزان مجاز آلاینده NOx برای موتور بنزین سوز را برابر ۰/۳٪ اعلام نموده اند نتایج حاصل از این پژوهش در حد قابل قبولی می باشد.

## ۵. مراجع

1. Mohammad Reza. Behtash, Zahra. Nasrzad, Mohammad Taghi Aghababaei, studying reduction of air pollution in Tehran by replacing CNG fuel in public transport fleet, planning and research center in Tehran, Knowledge City, No. 9, April 2010. [persian]
2. Tanjima Pervin, Ulf-G Gerdtham and Carl Hampus Lyttkens, "Societal cost of air pollution-related health hazards: A review of methods and results", 2008.
3. Maria Sarraf, Christiaan J. Poortman, Joseph P. Saba Inger Anderson, Vijay Jagannathan, "Islamic Republic of Iran Cost Assessment of Environmental Degradation" Sector Note (The World Bank), 2005.
4. Shah Bakhti, M. Practical solutions to reduce vehicle emissions in Cold Start and Warm up conditions, Eleventh Annual Conference of Mechanical Engineering, May 2013. [persian]
5. Shafi Pur Majid, "Developing a model for providing basic information items in order to study air pollution of cities", Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences, 2000. [persian]
6. Department of Energy, Department of Energy affairs, 2006, balance sheet of country's energy in 2004.
7. Zahra. Abedi, Farideh Atabi, Muhammad Sufi, studying social benefits of replacing CNG instead of gasoline in taxis of Tehran, Environmental Science and Technology, Volume XIII, No. 2, Summer 2011. [persian]
8. Wright, Matthew W. what exactly is a catalytic converter? The science behind catalytic converters, About.com. [http://autorepair.about.com/od/glossary/ss/how-it\\_catalyti\\_3.htm](http://autorepair.about.com/od/glossary/ss/how-it_catalyti_3.htm). Retrieved, 2009.
9. Khan Fekr A. Emruni Hosseini, M. Nemati Ziyarat, A. Arzani, k. Azadmand, M. Catalytic converters production for ROA hybrid cars compared to catalytic converters of Iran Khodro imports, scientific journal of Environmental Science and Technology, Volume XI, No. 2, Summer 2009. [persian]
10. Shahrin Hisham Amirmordin, Suzairin Md Seri, Wan Saiful-Islam, Wan Salim, Hamimah Abd Rahman, and Khalid Hasnan "Pressure Drop Analysis of Square and Hexagonal Cells and its Effects on the Performance of Catalytic Converters" International Journal of Environmental Science and Development, Vol, 2, No.3, June.
11. Saniei, Nejad, M (2010). Fundamentals of Turbulent Flows and Turbulence Modeling. Chapters 1&2, Tehran, Danesh Negar Press.
12. Mohan Laxmi K, Ranjith Kumar V, Hanumantha Rao Y.V. Modeling and simulation of gas flow velocity in catalytic converter with porous. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 3(3): 518-522, 2013. [persian]
13. Ouellette, P., Douville, B., Hill, P. G. and Ursu, B. NOx reduction in a directly injected natural gas engine, Proceedings of the 1998 Fall Technical Conference of the ASME, IC Engines Division, ICE Vol. 31, No.3, September, 1998.
14. Hsieh, W.D., Chen, R.H., Wu, T.L., and Lin, T.H. Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels, Atmospheric Environment, 36(3): 403-410, 2004.