



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

سالار ارشادی^{۱*}، فریده عتابی^۲

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.

* salar.ershadi67@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

خلاصه

آثار زیان آور آلاینده ها بر سلامت انسان، دلیل اصلی تلاش های گسترده دهه های اخیر برای کاهش و کنترل آلودگی هوا می باشد. گرایش به سمت هوای پاک و وابستگی کمتر به منابع نفتی، علاقه به مصرف سوخت های جایگزین در صنعت حمل و نقل و فناوری های کاهش آلودگی هوا در سال های اخیر رو به افزایش بوده است. در پژوهش حاضر، شبیه سازی مبدل کاتالیزوری بکار رفته در سیستم اگزوز خودرو و تحلیل آلاینده های خروجی از آن انجام گرفته است. محفظه احتراق و قسمت کاتالیزور ابتدا در محیط سالیدورک مدل شده و سپس در نرم افزار قدرتمند ANSYS CFX مورد تحلیل قرار می گیرد. جهت دستیابی به نیل، ابتدا فرآیند احتراق با نسبت استوکیومتری یک ۱:۱۷.۱ با لحاظ سوخت گازی سوز (CNG) برای موتور خودروی پژو پارس به مشخصات قطر سیلندر و پیستون (۸۳×۸۴.۱) میلیمتر شبیه سازی شده و مقادیر خروجی حاصل از این شبیه سازی را به عنوان ورودی برای قسمت متخلخل کاتالیزور در نظر گرفتیم. دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق برابر با ۰.۰۱۸ 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 (۲۷۵×۱۰۰) میلیمتر و با آرایه کاملی از فلزات نجیب رودیوم، پلاتین و پالادیوم می باشد. 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 تدین (*Tdyn*) و مدل اغتشاش $k - \epsilon$ بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که طرح بهینه بکار رفته از سطح داخلی کاتالیزور، میزان آلاینده های خروجی از اگزوز خودرو را بطور قابل توجهی کاهش می دهد.

کلمات کلیدی: آلاینده های 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 نابهنجاری های زیست محیطی روبرو 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 خودروهاست و ۲۰٪ باقیمانده نیز مربوط به فعالیت کارخانه ها و بخش های صنعتی است [۴]. از یکی از اقداماتی که می تواند تأثیر عمده ای در کاهش انتشار آلاینده ها داشته باشد، تبدیل سوخت بنزین به سوخت گاز طبیعی است. به عنوان مثال در مطالعه ای 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 بین المللی خودروهای گاز طبیعی (IANGV)^۱ در سال ۲۰۰۶ حدود ۵ میلیون خودروی گازسوز در سراسر جهان در حال تردد هستند. انجمن بین المللی خودروهای گازسوز فعالیت های خود را بر مبنای دستیابی به هدف ۵۰ میلیون خودروی گازسوز تا سال ۲۰۲۰ برنامه ریزی و اعلام کرده و در این زمینه همه ساله اقدام به برگزاری همایش هایی در کشورهای عضو می نماید [۶]. در مطالعه ای [۷] که تحت بررسی منافع اجتماعی جایگزینی CNG به جای بنزین در تاکسی های شهر تهران انجام گردید، نشان داده شد که جایگزینی CNG به جای بنزین در تاکسی های شهر تهران با کاهش هزینه های اجتماعی انتشار آلاینده ها به میزان ۶۳۸ میلیون دلار، در واقع افزایش منافع اجتماعی به همین میزان را تحقق می بخشد. لذا مزایای جایگزینی گاز طبیعی (CNG) به جای بنزین تنها ناشی و محدود به تفاوت هزینه های بنزین و گاز طبیعی نیست. از سوی دیگر، دانشمندان محیط زیست، مکانیک، شیمی و خودروسازی جهان در مورد کاهش آلاینده های خروجی از آگروز خودروها معتقدند که با تغییر در موتور خودرو نمی توان به استانداردهای کنونی و کاهش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ دست یافت، بلکه باید موتور خودرو را بدون توجه به آلاینده های تولیدی طراحی کرد و سپس با کمک کاتالیست ها، گازهای خروجی را به استانداردهای آلودگی رساند. از همین رو یکی از روش های مناسب و مؤثر برای پوشش دهی به این استاندارد ها و قوانین، استفاده از مبدل های کاتالیستی بر پایه فلزات پلاتین، رودیوم و پالادیوم می باشد. مبدل کاتالیستی بر پایه این فلزات نجیب قادر است ۹۹-۹۵٪ گازهای خروجی از آگروز خودرو را به گازهای بی خطر برای محیط زیست تبدیل کند [۸]. در بیشتر واکنش ها در مبدل کاتالیستی خودرو، اکسیدهای نیتروژن به نیتروژن که گازی بی اثر است و همچنین هیدروکربن های نسوخته و منواکسید کربن به آب و دی اکسید کربن که اثر چندانی بر محیط زیست ندارند و برای آن بی خطر است تبدیل می شوند. خان فکر زاده و همکاران [۹] در مطالعه طرح خود با حذف فلزات گرانبهای پلاتین و رودیوم 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 آلاینده های مشخص گردید این نوع ساختار مبدل در حالت احتراق سوخت گاز نسبت به حالت بنزین سوزی بهینه است. در مطالعه ای [۱۰] ویژگی های جریان در مبدل های 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 می شود.

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 می باشند که در یک جریان تراکم پذیر، معادله انرژی و معادله حالت نیز به این معادلات افزوده می گردند:

¹ International Association of Natural Gas Vehicles

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

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

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

ترم تنش رینولدز $-\rho \overline{u_i u_j}$ موجود در سمت راست معادله (۲) با استفاده از تقریب بوزینسک به گرادیان 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:

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

در این مطالعه از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ 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. لاکس می و همکاران [۱۲] در مطالعات خود نشان دادند که با در نظر گرفتن رابطه ی ناویه- استوکس اصلاح شده در تمام دامنه شامل دو عبارت منبع همراه با مقاومت ناشی از محیط متخلخل (عبارت اُفت داخلی و داری خطی) و با لحاظ محیط متخلخل همگن و در جریان های آرام عبوری از محیط متخلخل می توان روابط حرکتی ناویه- استوکس را بدین صورت بازنویسی کرد:

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

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

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

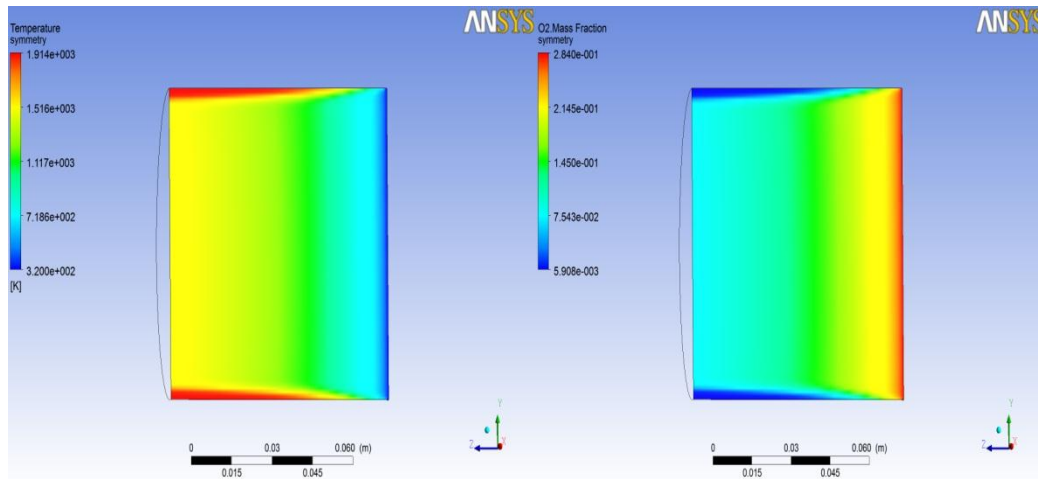
به منظور افزودن ماتریس مقاومتی داری D^* ، یک تابع مناسب بجای تَدين جایگزین می شود.

۳. مدلسازی 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، آشفستگی، انتقال حرارت، تغییر فاز و انتقال جرم می باشد. به همین دلیل شناخت دقیق و صحیح میدان جریان نیاز به مدلسازی دقیق جریان درون محفظه احتراق دارد. از اینرو ساختار هندسی سیلندر و محفظه احتراق موتور در نرم افزار سالدورک مدلسازی 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 (۸۳×۸۴.۱) میلیمتر می باشد.

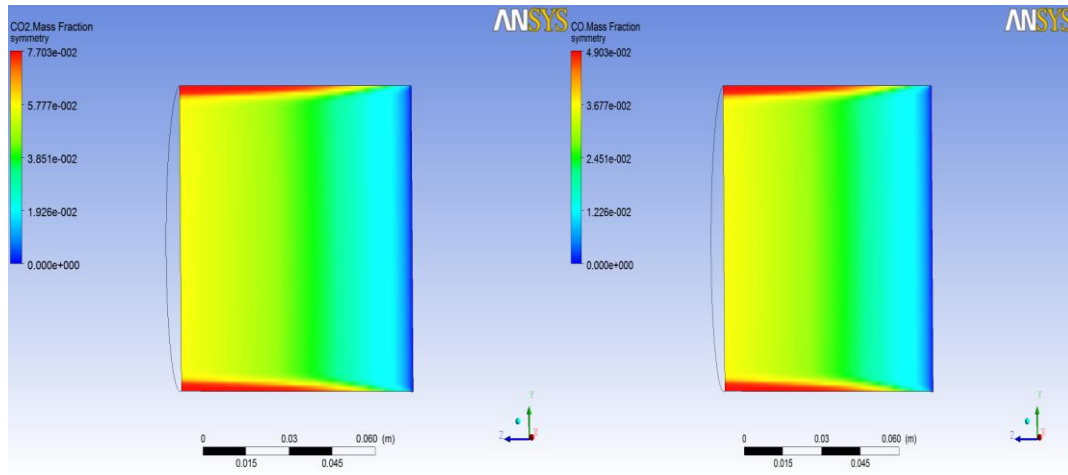
۱.۳. شبیه سازی فرآیند ایده آل احتراق در موتور پژو پارس

در شبیه سازی انجام شده نسبت سوخت به هوا ۱۷/۱:۱ 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 کارکرد بهینه دارد که موتور با نسبت ایده آل هوا- سوخت کار کند. مقدار دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق برابر $0.018 \frac{kg}{s}$ 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 کانتور مربوط به شبیه سازی گازی سوزی (CNG) برای فرآیند احتراق در حالت استوکیومتری برای دمای احتراق و O_2 قابل مشاهده است.



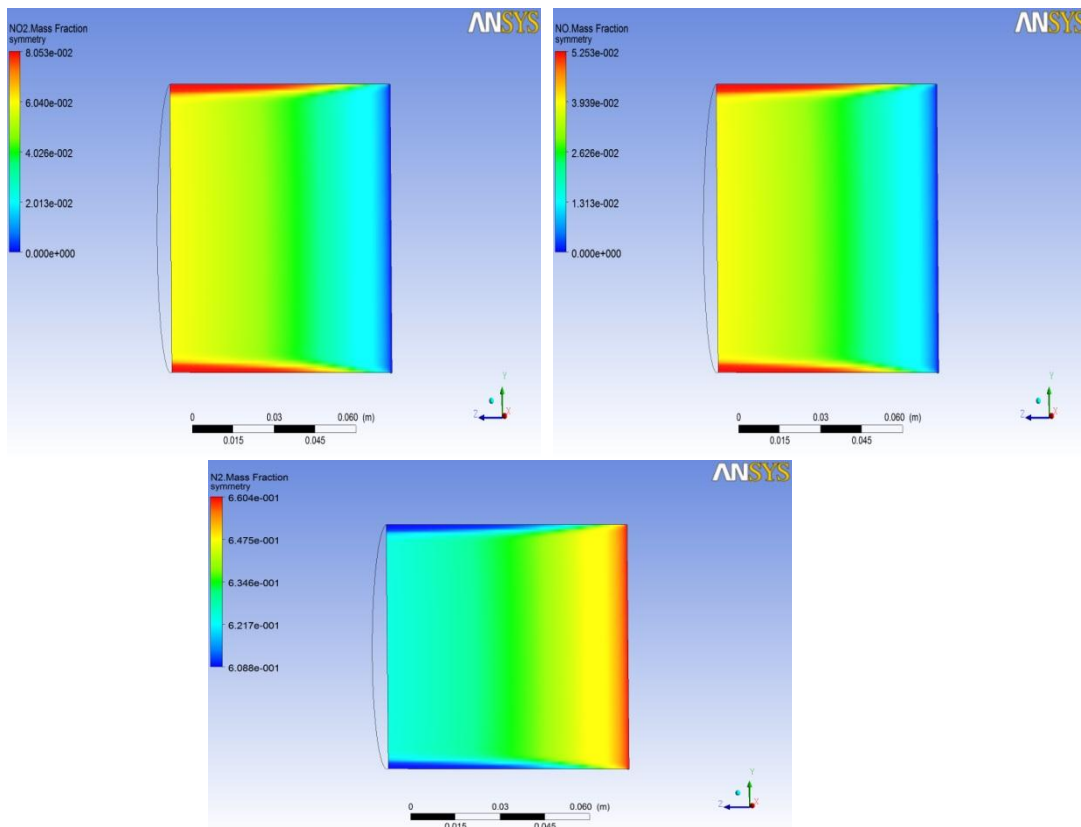
شکل ۱- کانتور مربوط به احتراق سوخت گاز در محفظه احتراق سیلندر موتور پژو پارس

بطور کلی در رقیق سازی سوخت به هوا، اکسیژن بیشتری در اختیار سوخت قرار می گیرد و دی اکسیدکربن بیشتر و منوکسیدکربن کمتری در مقایسه با نسبت سوخت به هوای غلیظ تشکیل می شود. تشکیل منوکسید کربن، گرمای کمتری در مقایسه با تشکیل دی اکسیدکربن 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 منواکسیدکربن تأثیرگذار می باشد، نسبت هوا به سوخت است [۱۳]. احتراق کامل تر به معنای افزایش غلظت دی اکسیدکربن و کاهش منواکسیدکربن می باشد [۱۴]. شکل (۲) کانتور مربوط به کسر جرمی CO_2 و CO از مقدار مینیمم در ورودی تا مقدار ماکزیمم آن در خروجی را نشان می دهد. مقادیر ماکزیمم 0.07703 و 0.04903 به ترتیب برای دی اکسیدکربن و منواکسیدکربن 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 CO_2 و CO مربوط به احتراق سوخت گاز در سیلندر موتور پژو پارس

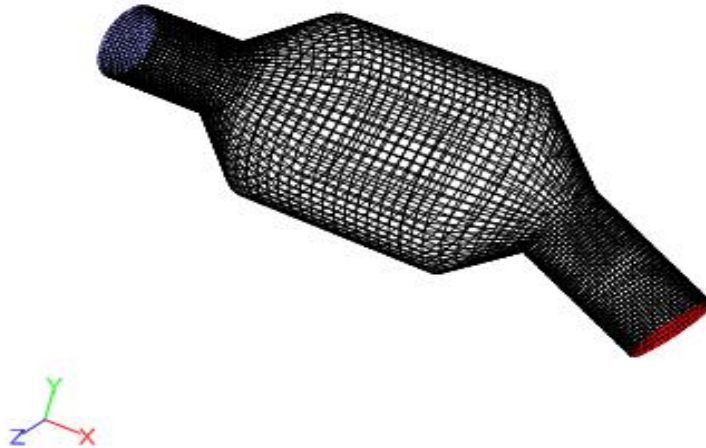
از سوی دیگر دمای بالا و در دسترس بودن اکسیژن دو علت اصلی برای تشکیل NO_x هستند. هنگامی که مقدار مناسبی اکسیژن در دسترس باشد و هر چه اوج دمای اشتعال بیشتر باشد NO بیشتری تشکیل می شود. نسبت هوا به سوخت و آوانس جرقه دو عامل مهمی هستند که به طور عمده بر NO_x تأثیر می گذارند. در فرآیند صورت گرفته، کسر جرمی N_2 در خلال فرآیند احتراق کاهش می یابد و از مقدار ماکزیمم خود در ورودی به مقدار مینیمم خود در خروجی تنزل می یابد. شکل (۳) کانتور مربوط به کسری جرمی N_2 ، NO و NO_2 را نشان می دهد.



شکل ۳- کسر جرمی N_2 ، NO و NO_2 مربوط به احتراق سوخت گاز در سیلندر موتور پژو پارس

۲.۳. طراحی هندسی و تحلیل مربوط به قسمت کاتالیزور

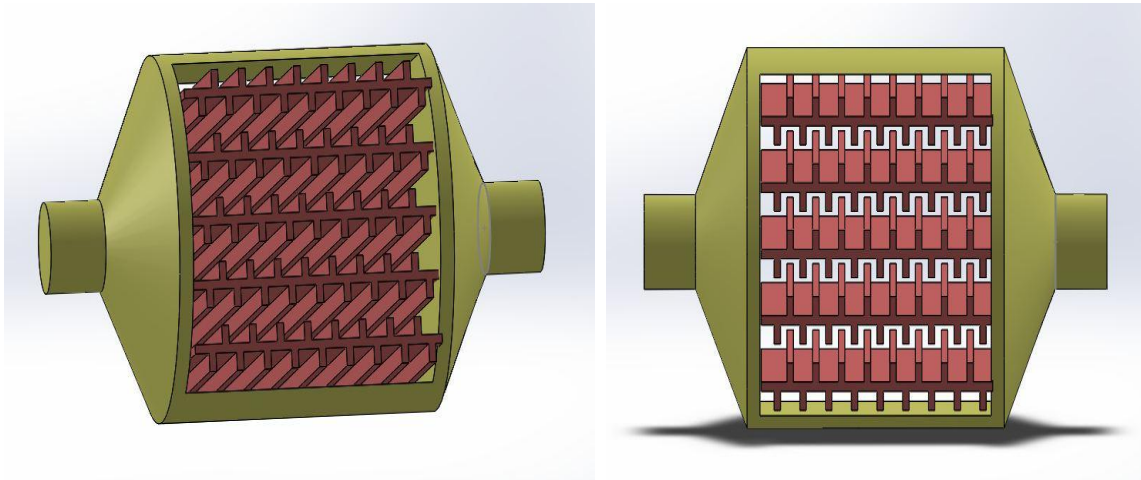
در گام نخست برای شبیه سازی مسئله نیاز به تولید شکل و شبکه بندی آن در نرم افزار مربوطه می باشد. در نتیجه هندسه سه بعدی از مبدل کاتالیزور در نرم افزار سالیدورک مطابق شکل (۴) تولید شده است. در مرحله بعد فایل آماده شده در نرم افزار ANSYS CFX خوانده شده، ساختار شبکه چک شده و شبکه بندی آن یکنواخت می شود. برای 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 آشفستگی در قسمت مدل لزوج، مدل $k - \varepsilon$ انتخاب می شود. در مرحله بعد مواد و واکنش های فعال در مبدل وارد مدل می شود شرایط عملیاتی در فشار اتمسفریک و شتاب ثقل وارد می شود و صرف نظر از اتلاف حرارتی، می توان مسأله 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:

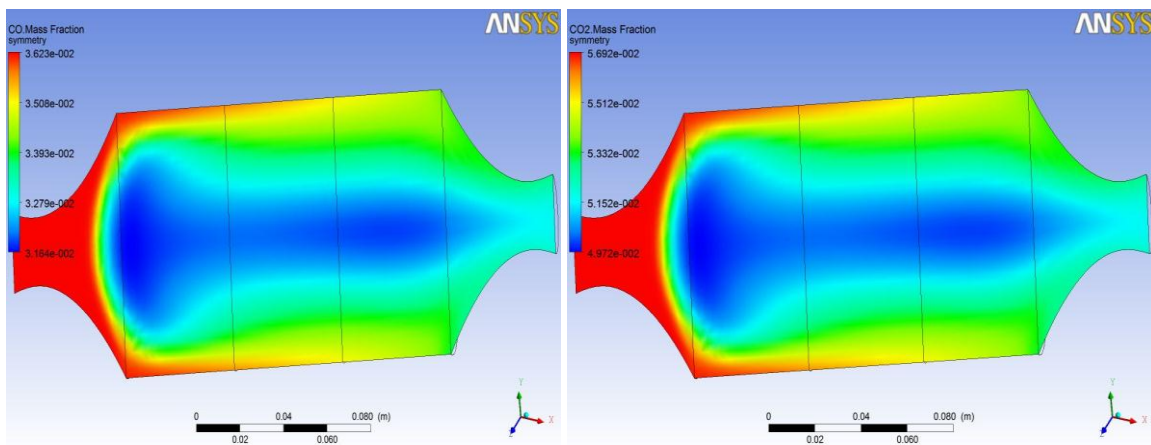
- ۱) شبیه سازی کاتالیزور با در نظر گرفتن هندسه داخلی کاتالیزور؛ که در این روش ابتدا هندسه ی داخلی کاتالیزور به طور کامل رسم شده و سپس در نرم افزار مورد تحلیل قرار می گیرد.
- ۲) استفاده از توابع از پیش تعریف شده در نرم افزار CFX برای مدل سازی جسم های متخلخل نظیر کاتالیزورها. در این پژوهش از روش دوم مدل سازی جهت بالا بردن دقت تحلیل از شبیه سازی خود استفاده نمودیم. در پژوهش حاضر کاتالیزور به مشخصات هندسی طول و قطر ۲۷۵ و ۱۰۰ میلی متر می باشد. آرایش صحیح قرارگیری فلزات پلاتین، پالادیوم و رودیوم 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.



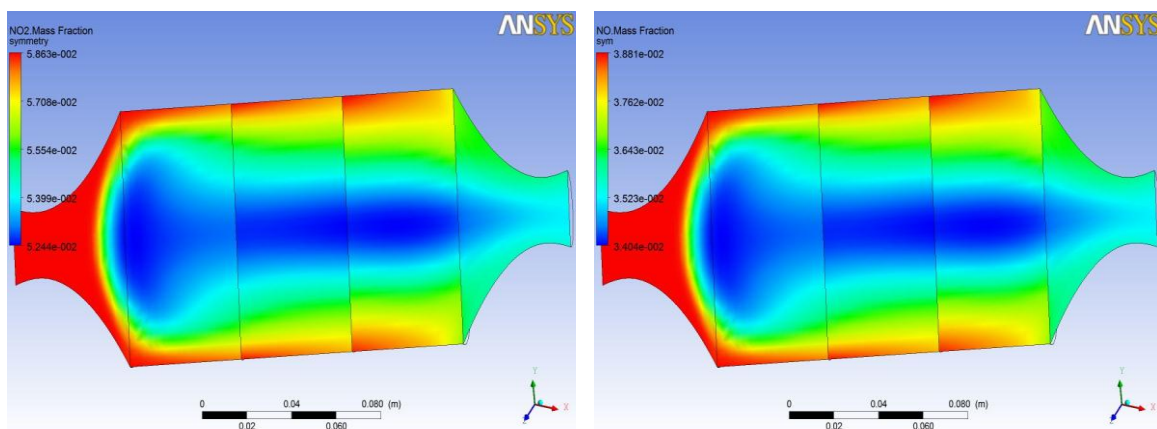
شکل ۴- شمایی از ساختار هندسی مشبک و طرح آرایه فرارگیری فلزات نجیب در داخل مبدل کاتالیزور

۳.۳. شبیه سازی جریان حرکت گازهای خروجی

کانتورهای زیر برای خروجی گاز و مبدل کاتالیزوری با آرایه ای از فلزات نجیب پلاتین، پالادیوم و رودیوم 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 CO₂ و CO در مبدل کاتالیزوری

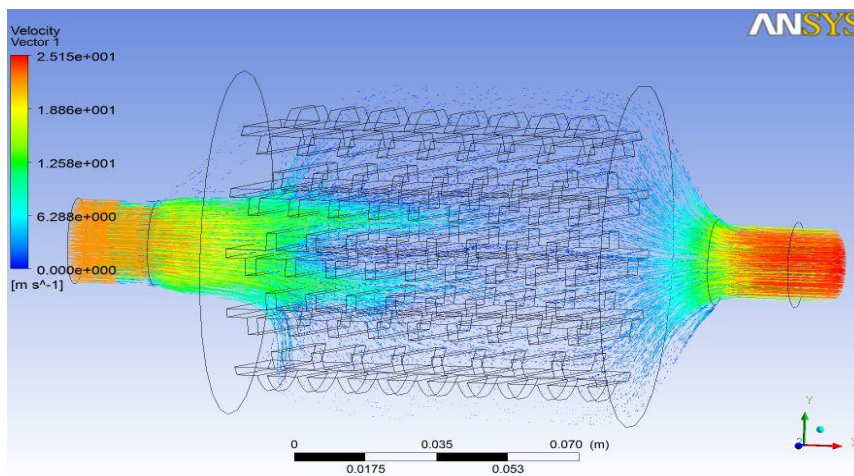


شکل ۶- کسر جرمی NO₂ در مبدل کاتالیزوری

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

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

هدف اصلی دیگر از تجزیه و تحلیل، پیدا کردن شکل مناسب طراحی از مبدل کاتالیستی برای مینیفولد آگروز 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 ورتیسسته جریان را نشان می دهد.



شکل ۷- مسیر گازهای خروجی از مبدل کاتالیزور

۴. نتیجه گیری

در ابتدای مسیر خودروسازی هدف از ساخت موتور تنها گرفتن قدرت و گشتاور 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 0.018 و دمای هوای ورودی سیلندر کمی بالاتر از دمای محیط شبیه سازی گردید. خروجی های حاصل از احتراق و کانتورهای 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 27 متر بر ثانیه در نظر گرفتیم. نهایتاً میزان خروجی آلاینده های CO ، CO_2 ، NO و NO_2 پس از واکنش و پالایش در مبدل بترتیب برابر با 3.31% ، 5.20% ، 3.54% و 5.43% بدست آمد. با توجه به اینکه میزان آلاینده NO_x خودروهای CNG سوز نزدیک 2.5 برابر آلاینده متناظر در خودروهای بنزینی می باشد و طبق ابلاغیه سازمان محیط زیست اروپا که میزان مجاز آلاینده NO_x برای موتور بنزین سوز را برابر 3% اعلام نموده اند نتایج حاصل از این پژوهش در حد قابل قبولی می باشد.

۵. مراجع

1. Mohammad Reza. Behtash, Zahra. Nasrzadh, 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. 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 Amirnordin, 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.