



شبیه‌سازی عددی تأثیر گرمایش واکنشگر بر انتشار آلاینده مونوکسیدکربن در راه‌اندازی سرد موتورسیکلت

فاطمه میان زراسوند^۱، علیرضا شیرنشان^{۲*}، مسعود افرند^۳

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران fatemeh_zarasvand@yahoo.com

^۲ گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران arshirneshan@yahoo.com

^۳ مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۴ گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران masoud_afrand@yahoo.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۷ خرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۳ دی ۱۳۹۵
کلیدواژه‌ها:
واکنشگر
گرمایش
راه‌اندازی سرد
انتشار مونوکسیدکربن

امروزه انتشار آلاینده‌های مختلف ناشی از راه‌اندازی سرد موتورسیکلت‌ها در جوامع شهری هر روز بیشتر می‌شود. یکی از راه‌های کاهش این آلاینده‌ها استفاده از واکنشگر با گرمایش برقی است. در پژوهش حاضر اثر استفاده از گرم‌کن در واکنشگر سه راهه در شرایط راه‌اندازی سرد موتورسیکلت به صورت عددی بررسی شد. در این راستا دماهای مختلف گرمایش (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین) برای گرم‌کن، بر مقدار انتشار مونوکسیدکربن به هوا در طول زمان راه‌اندازی سرد بررسی گردید. در این تحقیق ابتدا هندسه مسئله در نرم افزار گمبیت رسم شد و سپس با انتخاب شبکه بندی مناسب و انتقال این هندسه به نرم افزار فلوئنت و اعمال شرایط مسئله، شبیه‌سازی گرمایش واکنشگر صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که گرم‌کن در صورتی که نتواند مساحت قابل ملاحظه‌ای از مبدل را به حداقل دمای فعال‌سازی مبدل برساند اثری نخواهد داشت و بر اساس نتایج به دست آمده بهترین دمای گرمایش، ۱۰۰۰ کلوین برای سوخت پروپیلن است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

مقدار زیادی از آلودگی‌های محیط زیست توسط خودروها و موتور سیکلت‌ها تولید می‌شود. بنابراین برای حفظ سلامتی انسان و محیط زیست، امروزه با ایجاد تغییراتی در طراحی موتورها و بهینه‌سازی سوخت و مصرف آن تا حدی انتشار گازهای آلاینده کاهش داده شده است. خودروها و موتور سیکلت‌ها از منابع عمده آلودگی محیط زیست محسوب می‌شوند. آلودگی خودروها سبب تولید یک دوم تا یک چهارم مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات هیدروکربن کل جو می‌شود. این مقدار در مناطق شهری بیشتر است. در طول بیست سال گذشته صنایع خودروسازی متعهد به کاهش آلودگی آب و هوا و کاهش مصرف انرژی از طریق روش‌های مختلف شده‌اند. امروزه یکی از راه‌های کاهش گازهای آلاینده منتشر شده از خودروها و موتور سیکلت‌ها استفاده از مبدل‌های واکنشگر در لوله دود وسایل نقلیه است.

هدف استفاده از مبدل‌ها، تبدیل گازهای مضر خودرو به مواد بی‌ضرر است. برخی از گازهای مضر عبارتند از: هیدروکربن‌های نسوخته حاصل از احتراق ناقص در موتور، مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات گوگرددار نظیر دی‌اکسیدگوگرد، نمک‌های سرب، فسفر و سایر فلزات. برای کاهش این گازهای آلاینده به محیط زیست از موتور در مبدل‌های واکنشگر یک ترکیب شیمیایی به عنوان کاتالیزور عمل می‌کند. مبدل واکنشگر شامل قسمت بیرونی فلزی و قسمت داخلی است که از پوشش دادن فلزات گرانبهایی نظیر پلاتین، پالادیوم بر روی پایه‌های سرامیکی یا فلزی به نام مونولیت ساخته شده است.

از دیدگاه متخصصان محیط زیست زیان‌آورترین حالت عملیاتی موتورها، راه‌اندازی سرد و رانندگی در ۸ تا ۱۰ مایل اولیه است که ۶۰ تا ۸۰٪ کل آلودگی‌های خروجی از خروجی دود را منجر می‌شود [۱]. برای کاهش زمان گرم شدن موتور، کارخانه‌های خودروسازی، کاهش زمان درجا کارکردن موتور درست پس از راه‌اندازی سرد را توصیه می‌کنند که این امر منجر به افزایش مصرف سوخت بیشتر می‌شوند [۱]. طبق مقررات ایالتی آمریکا راه‌اندازی سرد به معنای روشن شدن موتور پس از ۱۲ تا ۳۶ ساعت متوالی خاموش بودن آن در دمای محیط ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌گراد است. بیشترین مقدار آلاینده‌ها در ۲ تا ۵ دقیقه حین راه‌اندازی سرد، انتشار می‌یابند [۹-۲].

۲- مروری بر ادبیات گذشته

کرشنر^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۶ توسعه شبیه‌سازی ریاضیاتی واکنشگر پیشگرم‌کننده برقی را برای بهبود رفتار راه‌اندازی سرد بررسی کردند [۹].

لادایکار^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۹ مبدل واکنشگری سه راهه را در دماهای مختلف مطالعه کردند. مطالعات آنها نشان داد که سهم قابل توجهی از آلاینده‌ها در شرایط راه‌اندازی سرد رخ می‌دهند و همانگونه که انتظار می‌رفت گازهای آلاینده خروجی از خروجی دود در دماهای خنک بیشتر بودند همچنین ترکیبات آروماتیکی سرطان‌زا مانند بنزوپیرن در دماهای خنک بیشتر افزایش می‌یابند [۱۰].

جیمارد^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ انتشار آلاینده‌های حاصل از موتورهای بنزینی و گازوئیلی را حین راه‌اندازی سرد به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها دریافتند که در بیشتر موارد حتی پس از ۳٫۵ کیلومتر با مقدار سرعت ۲۲ کیلومتر بر ساعت موتور همچنان سرد بود و آلودگی‌ها تثبیت نمی‌شوند [۱۲].

هورنگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۱ تحقیقاتی تجربی در مورد متغیرهای مؤثر بر انتشار آلاینده‌ها و روش‌های بهبود تولید گازهای آلاینده موتورهای دو زمانه و چهار زمانه^۵ قرار دادند که این تحقیقات حین راه‌اندازی سرد صورت گرفته بود.

تحقیقات هورنگ و همکاران در سالهای بعد بیشتر بر موتورهای چهار زمانه مجهز به واکنشگر گرم‌کننده برقی توسعه یافت. آنها با تنظیم مقدار سطح CO بر روی مقادیر بزرگتر و پیش‌گرمایش واکنشگر قبل از راه‌اندازی سرد سبب گرم شدن دمای عملکرد واکنشگر شدند که این امر منجر به کاهش مقدار آلاینده‌ها شد. بر طبق آزمایشات انجام شده در این تحقیق، در صورت کم بودن مقدار سطح CO، طی چندین بار پیش‌گرمایش، واکنشگر به دمای عملکرد مطلوب نمی‌رسید [۷ و ۱۳-۱۹].

گوچیانگ^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۳ شبیه‌سازی عددی مبدل واکنشگری سه راهه^۷ را برای بررسی آلاینده‌های حاصل از شروع سرد^۸ انجام دادند. آنها شبیه‌سازی دو بعدی متقارن گذرا در شرایط شروع سرد را بررسی کردند. نتایج در این تحقیق نشان داد که توزیع جریان بهتر، زمان عملکرد کوتاهتری را سبب می‌شود و بازده تبدیل واکنشگر افزایش می‌یابد [۸].

ابراهیمی و همکاران در سال ۱۳۸۲ شبیه‌سازی دو بعدی عملکرد واکنشگر سه‌راهه را بررسی کردند. شبیه‌سازی در هر مسیر و به صورت یک بعدی صورت گرفت. نتایج برای سه حالت رقیق، درست^۹ و غنی بررسی شد. مشاهده شد که بهترین حالت واکنشگر حالت درست است [۹].

شایسته و همکاران در سال ۱۳۸۵ شبیه‌سازی واکنشگر سه منظوره را برای بررسی انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی انجام دادند. دمای

⁶ Guojiang

⁷ Three Way Catalyst Converter

⁸ Cold Start

⁹ Stoichiometric

¹ Kirchner

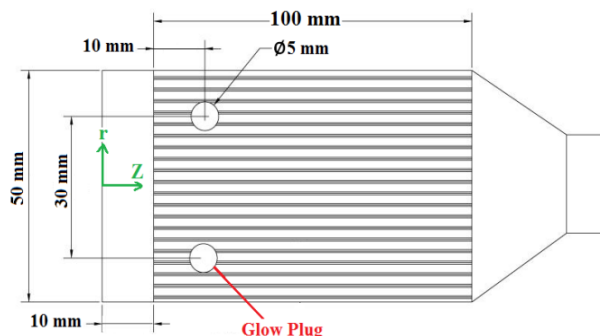
² Ludykar

³ Joumard

⁴ Horng

⁵ Four-Stroke

- مقدار CO خروجی از موتور که به مبدل واکنشگری وارد می شود ۲٪ حجمی گاز خروجی دود در نظر گرفته شد.



شکل ۱: هندسه واکنشگر مجهز به گرم کننده برقی و موقعیت گرم کننده ها روی واکنشگر

- درجه حرارت گرمایش ۶۰۰ و ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.

- به منظور شبیه سازی مبدل واکنشگری یک شبکه دو بعدی در نظر گرفته شد.

- همانطور که اشاره شد شبیه سازی واکنش های مبدل در پژوهش حاضر مبتنی بر شبیه سازی لی پینگ ما و همکاران [۲۱] بود که پایه آن $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ بوده و سطح آن با پالادیوم و رودیوم به نسبت ۵ به ۱ پوشش داده شده است. ویژگی های مبدل مذکور در جدول (۱) ارائه شده است [۲۱].

جدول ۱: ویژگی های مبدل واکنشگری سه راهه [۲۱]

۵	قطر (cm)
۲۵۰۰	چگالی (kg/m^3)
۱۰۰	گرمای ویژه (J/kg-K)
۲۷	دمای اولیه مبدل ($^{\circ}\text{C}$)
۱۰	طول (cm)
۱,۶۷۵	ضریب رسانش حرارتی (W/m-K)
۲	اندازه شبکه (mm)

برای شبیه سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- سیال نیوتنی: گاز خروجی از موتور، محصول احتراق مخلوط سوخت و هوا است. بنابر این سیال خروجی از خروجی دود دارای لزجتی بسیار نزدیک به هوا و ترکیبی از گازهای CO_2 ، HC ، NO و CO است. غلظت ذرات معلق نیز در حدی نیست که خصوصیات

عملکرد به عنوان یک شاخص مهم برای مقایسه بود، مقایسه نتایج بیانگر این بود که دمای عملکرد تحت تأثیر دمای ورودی است [۲۰].

لی-پینگ ما^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با بکارگیری ریز واکنش های اساسی و متغیرهای سرعت که از نتایج تجربی به دست آمده بود، حالت کلی شبیه سازی واکنش های سطح یک واکنشگر را استخراج کردند. نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با نتایج تجربی نشان داد که سازوکار واکنش های مطرح شده در این تحقیق توانایی توصیف رفتار گازهای خروجی از موتور را دارند [۲۱].

بهارات^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰ عملکرد واکنشگر را به کمک نرم افزار فلونتت بررسی کردند. نتایج به دست آمده تأثیرات دما و ترکیبات ورودی بر واکنشگر را نشان می داد که با افزایش دما مقدار بازده تبدیل مواد آلاینده در نتیجه بازده واکنشگر، افزایش یافته است [۲۲].

چئونگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ مبدل واکنشگری را برای کنترل مقدار CO و NO شبیه سازی کردند. در تحقیق آنها بهترین مکان واکنشگر برای نصب برای کاهش آلاینده ها و همچنین شبیه سازی واکنش های سطح واکنشگر برای CO و NO بررسی شده است. نتایج این شبیه سازی نشان داد که بهترین مکان قرارگرفتن واکنشگر در فاصله ۵۵ سانتی متر از خروجی موتور است [۲۳].

لاکسمی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر مقدار تخلخل^۵ را بر فشار و سرعت جریان در محیط مونولیت بررسی کردند. آنها به کمک نرم افزار فلونتت در سرعت های ورودی متفاوت و قطر مونولیت یکسان به این نتیجه رسیدند که مقدار تخلخل بیشتر، سبب افت فشار کمتر در محیط مونولیت شده و افزایش کارایی واکنشگر را منجر می شود [۲۴].

در تحقیق حاضر برای نخستین بار، با شبیه سازی گرمایش واکنشگر در لوله دود یک موتور سیکلت، تأثیر تغییر مقدار دمای گرمایش مبدل بر انتشار آلاینده مونوکسیدکربن بررسی شد. قسمت اصلی روش پژوهش حاضر مبتنی بر روش لی-پینگ ما است و نتایج با نتایج آزمایشات تجربی مقایسه شده است.

۳- روش کار

در این تحقیق هندسه واکنشگر و شرایط گازهای خروجی دود وارد شده به مبدل بر اساس کار تجربی هورنگ و همکاران [۶] و به منظور شبیه سازی عددی واکنشگر در خروجی دود موتور سیکلت کار لی پینگ ما و همکاران [۲۱] استفاده شد. آنها با استفاده از ریز واکنش های اساسی حالت کلی الگوی واکنش های سطح یک واکنشگر را استخراج کردند و سپس با آزمایش روی واکنشگر ضرایب الگو را به صورت بهینه شده تعیین کرده اند.

- مطابق با شکل (۱) مکان گرم کن ها در حالت ورودی مبدل واکنشگری در نظر گرفته شد.

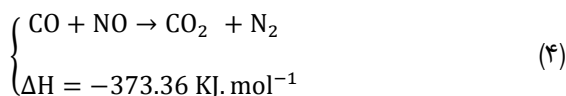
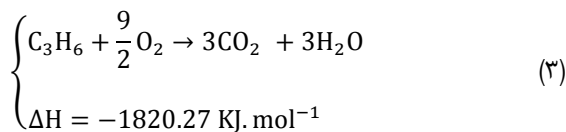
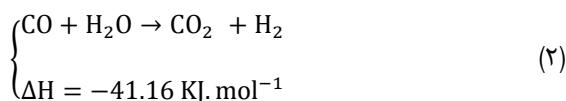
⁴ Laxmi

⁵ Porosity

¹ Li-Ping Ma

² Bharath

³ Cheong



جزئیات سرعت واکنش‌ها از نوع Langmuir-Hinshelwood است که توسط Voltz بیان می‌شود و بر اساس ثابت‌های شیمیایی و انرژی-های فعالسازی اصلاح شده است. طرح جنبشی^۱ مورد استفاده در این پژوهش از مقالات مختلف برداشت شده است، اساس کار بر مبنای استفاده از ریز واکنش‌ها است. این واکنش‌ها بر روی واکنشگرهای مختلف بررسی شده اند مانند پالادیوم و رودیوم.

معادلات سرعت واکنش‌های CO ، O_2 ، C_3H_6 ، NO به صورت زیر بیان می‌شود:

$$r_1 = 7.573 \times 10^9 e^{(-12759/T_s)} \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{G^2} + 5.037 \times 10^{14} e^{(-18259/T_s)} \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{NO}}}{G^2} + 4.092 \times 10^{14} e^{(-18259/T_s)} \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{NO}}}{G^2} \quad (5)$$

$$r_2 = 7.573 \times 10^9 e^{(-12759/T_s)} \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{G^2} + 1.392 \times 10^{12} e^{(-14571/T_s)} \frac{C_{\text{O}_2}^{\frac{3}{2}} C_{\text{P}}^{\frac{1}{3}}}{G^4} \quad (6)$$

$$r_3 = 1.392 \times 10^{12} e^{(-14571/T_s)} \frac{C_{\text{O}_2}^{\frac{3}{2}} C_{\text{P}}^{\frac{1}{3}}}{G^4} \quad (7)$$

$$r_4 = 4.092 \times 10^{14} e^{(-18259/T_s)} \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{NO}}}{G^2} \quad (8)$$

جدول ۳: ضرایب سرعت واکنش‌های شیمیایی [۲۱]

واکنش	انرژی فعالسازی (E_j) (J. mol^{-1})	ضریب بسامد (k_{a0j})
\bar{k}_1	1.061×10^5	7.573×10^9
\bar{k}_2	1.289×10^5	5.037×10^{11}
\bar{k}_3	1.211×10^5	1.392×10^{12}
\bar{k}_4	1.517×10^5	4.092×10^{14}

سیال را تغییر دهد. با توجه به نکات مذکور سیال خروجی سیالی نیوتنی است.

- با توجه به اینکه در موتور سیکلت در حالت راه‌اندازی سرد است، می‌توان انتشار گازهای HC و NOx را نادیده گرفت [۷].
- از انتقال حرارت تابش و هدایتی در حالت گاز صرفه نظر شده است چون این مقادیر در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی در حالت گازی بسیار کوچک است.
- با توجه به اینکه تغییرات فشار در سامانه دود خروجی بسیار ناچیز است فرض می‌شود که جریان هوا تراکم‌ناپذیر است [۹ و ۲۳].
- جریان آرام: با توجه به اینکه وظیفه یک واکنشگر انجام واکنش‌های لازم برای کاهش گازهای آلاینده است، لازم است دستگاه طوری طراحی گردد تا زمان لازم برای انجام واکنش‌ها تأمین شود. این نکته با عبور جریان آرام سیال از داخل مسیره‌های واکنشگر قابل دستیابی است. از طرفی با توجه به ابعاد کانال و سرعت جریان عبوری، عدد رینولدز کوچکتر از ۵۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

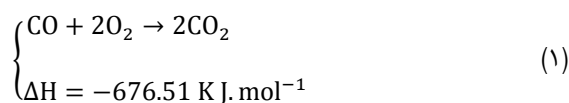
جدول ۲: خواص گاز ورودی [۲۱]

غلظت گاز CO (%)	۲
غلظت گاز O_2 (%)	۱,۴۲
غلظت گاز C_3H_6 (%)	۰,۰۰۱۵
غلظت گاز H_2O (%)	۱
غلظت گاز NO (%)	۰,۰۰۱
دبی جرمی گاز ورودی (Kg/s)	۰,۰۰۲
سرعت گاز ورودی (m/s)	۱,۱
دمای گاز ورودی ($^{\circ}\text{C}$)	۳۰۰
چگالی (kg/m^3)	۰,۹۰۳
ضریب رسانش حرارتی (W/m-K)	۰,۰۴۵۴

۳-۱- روابط شبیه‌سازی واکنش‌های سطحی

در شبیه‌سازی ارائه شده واکنش‌هایی با سازوکارهای زیر در نظر گرفته شده است [۲۱]:

- ۱- واکنش اکسیداسیون CO
- ۲- واکنش بخار آب با CO
- ۳- واکنش C_3H_6
- ۴- واکنش کاهش NO



¹ Kinetic scheme

$$\frac{\partial T_s}{\partial z}(L, t) = \frac{\partial T_s}{\partial z}(0, t) = 0 \quad (13)$$

$$\begin{cases} T_g(0, t) = T_g^{in} \\ T_s(0, t) = T_a \end{cases} \quad (14)$$

۳-۲-۲- معادله انتقال جرم

- معادله بقای جرم در حالت گازی

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{gj}}{\partial t} + v_z \frac{\partial C_{gj}}{\partial z} = \\ D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_{gj}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C_{gj}}{\partial z^2} \right] \\ + K_j \cdot G_A \cdot (C_{sj} - C_{gj}) \end{aligned} \quad (15)$$

که D ضریب نفوذ جرم و C کسر مولی و زیرنویسهای z، s، g به ترتیب نشان دهنده جزءهای موجود در گاز، حالت جامد و گاز، ضریب انتقال جرم در حالت گازی است.

معادله انتقال جرم برای اجزا شیمیایی در سطح واکنشگر با فرض اینکه نرخهای واکنش و انتقال جرم به سطح واکنشگر همواره در حال تعادل هستند، به عبارتی هیچ جزئی بر سطح واکنشگر انباشته نمی‌شود، به صورت زیر نوشته می‌شود [۸].

$$\begin{aligned} \rho_g K_j \cdot G_A \cdot (C_{sj} - C_{gj}) \\ = \rho_c G_A \cdot M_j \sum_{k=1}^n R_K \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_{gj}(0, t) = C_j^{in} \quad (17)$$

که M_j وزن مولی هر جزء است [۹، ۲۱ و ۲۳].

۴- نتایج و بحث روی نتایج

۴-۱- استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی حل عددی

به منظور بررسی و انتخاب اندازه مناسب شبکه، گرم‌کن در قسمت ابتدای واکنشگر با دمای ۶۰۰ کلوین و دمای گاز خروجی دود ورودی به مبدل ۳۰۰ کلوین با ۲٪ مونوکسیدکربن و ۲٪ اکسیژن شبیه‌سازی شد و دمای سطح مبدل در طول خط گذرنده از گرم‌کن بررسی شد. همچنین در این تحقیق استقلال شبکه برای چهار اندازه شبکه ۰،۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌متری مقایسه شد (شکل ۲).

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که نمودار دو شبکه ۱ و ۰،۵ میلی‌متر کاملاً برهم منطبق اند. در این نمودار قسمت پرش مربوط به قطر گرم‌کن است که خارج از دامنه حل مسأله است. با توجه به اینکه شبکه با اندازه بزرگتر ۱ میلی‌متر نیاز به محاسبات کمتری دارد این اندازه شبکه برای شبیه‌سازی مسأله این پژوهش انتخاب شده است.

۳-۲- معادلات حاکم

در شبیه‌سازی مبدل واکنشگری شبیه‌سازی ریزواکنش‌ها همزمان باید با شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی انجام گیرد. بدین ترتیب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی به دست آمده تطابق خواهد داشت. در نتیجه فرآیندهای فیزیکی شامل انتقال حرارت و انتقال جرم در ادامه بررسی می‌شود.

۳-۲-۱- معادله انرژی

از تلفات Φ صرفه نظر می‌گردد، همچنین با توجه به تقارن محوری در واکنشگر حذف خواهد شد. که با در نظر گرفتن $v_r = 0$ با توجه به تحقیقات گذشته [۹ و ۸]، معادله انرژی در حالت گازی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \rho_g c_{pg} \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + v_z \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \\ \lambda_{gr} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \lambda_{gz} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \\ + h \cdot G_A \cdot (T_s - T_g) + \frac{\dot{q}}{V} \end{aligned} \quad (9)$$

که G_A نسبت سطح به حجم واکنشگر و h ضریب انتقال حرارت جابجایی و λ_{gr} و λ_{gz} به ترتیب ضریب انتقال حرارت در امتداد شعاعی و ضریب انتقال حرارت در امتداد طولی در حالت گازی اند.

- معادله انرژی در حالت جامد

در حالت جامد (مونولیت) با در فرض $v_z = v_r = 0$ [۸-۷]:

$$\begin{aligned} \rho_s c_{ps} \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = \\ \lambda_{sr} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \lambda_{sz} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \\ + h \cdot G_A \cdot (T_s - T_g) + S + \frac{\dot{q}}{V} \end{aligned} \quad (10)$$

که λ_{sr} و λ_{sz} به ترتیب ضریب انتقال حرارت در امتداد شعاعی و ضریب انتقال حرارت در امتداد طولی در حالت جامد است. \dot{q} نیز توان گرمایی حاصل از گرم‌کن‌ها^۱ و V حجم مونولیت واکنشگر است. همچنین در معادله (۱۰)، S به عنوان چشمه حرارتی ناشی از گرمای واکنش‌ها است که ΔH_k آنتالپی واکنش برای هر جزء شیمیایی و R_k سرعت واکنش هر جزء شیمیایی است.

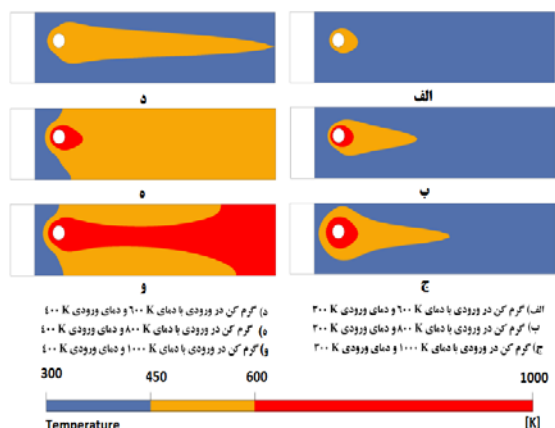
$$S = G_A \sum_{k=1}^n (-\Delta H_k) \cdot R_k \quad (11)$$

در $r = 0$ تقارن توزیع دما به صورت زیر وجود دارد بنابراین [۸]:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

در $z = L$ و $z = 0$ به دلیل نادیده گرفتن انتقال حرارت بین ابتدا و انتهای بخش جامد (مونولیت) و گاز خروجی دود شرایط زیر برقرار است [۸].

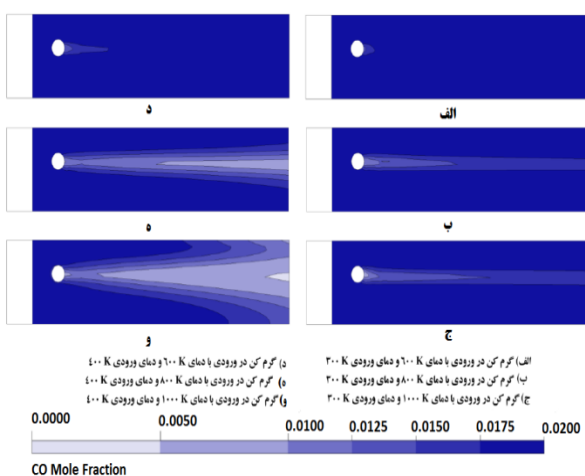
^۱ glow plug heaters



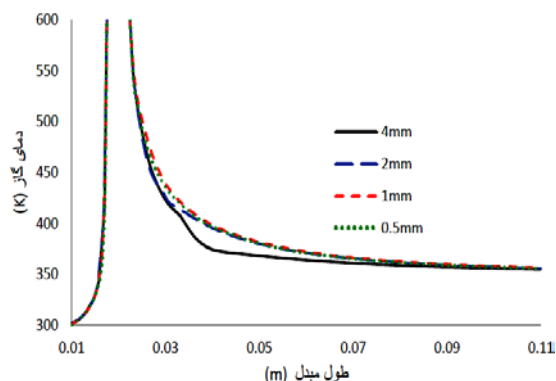
شکل ۴: توزیع دما در مبدل برای دماهای مختلف گرم کن در موقعیت ورودی

در شکل (۴) و شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای گرمایش گرم کن و دمای گاز خروجی دود ورودی به مبدل دمای سطح مبدل بیشتر و توزیع یکنواخت تری خواهد داشت. هدف اصلی استفاده از گرم کن سریع‌تر کردن فعال‌سازی مبدل و افزایش نرخ واکنش در سطح آن به منظور کاهش آلاینده‌های خروجی است به این منظور در شکل ۵ اثر حالت‌های مختلف گرم کن بر مقدار کسر مولی مونوکسید کربن به صورت توزیع کسر مولی در سطح مبدل ارائه شده است.

در این اشکال نیز کاملاً مشخص است که با افزایش دمای گرمایش گرم کن و دمای گاز خروجی دود ورودی، گرم کن موثرتر عمل کرده و کاهش مونوکسید کربن به صورت گسترده‌تر و به مقدار بیشتری صورت گرفته است که دلیل آن توزیع دمای بهتر و وسیع‌تر است. این گونه توزیع دما به دلیل انتقال حرارت جابجایی شدید در مبدل است به این ترتیب مبدل فرصت بیشتری برای گسترش توزیع دما در راستای شعاعی از طریق رسانش خواهد داشت.

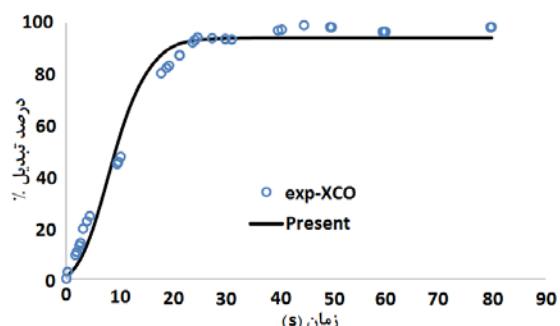


شکل ۵: توزیع نسبت مولی مونوکسید کربن در مبدل برای دماهای مختلف گرم کن در موقعیت ورودی



شکل ۲: دمای سطح مبدل در طول خط گذرنده از گرم کن برای شبکه‌های مختلف

برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی لی-پینگ ما و همکاران [۲۱] در خصوص درصد تبدیل مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن برحسب زمان ورود گاز داغ به مبدل ارائه گردید (شکل ۳) که با توجه به شکل مطابقت خوبی مشاهده می‌شود و این نشان می‌دهد که شبیه‌سازی از اعتبار لازم برخوردار است.



شکل ۳: مقایسه درصد تبدیل CO در کار حاضر با کار لی-پینگ ما و همکاران [۲۱]

۴-۲- توزیع دما و نسبت مولی مونوکسید کربن در مبدل

با توجه به اینکه در این تحقیق دماهای ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین، به عنوان دماهای گرمایش سطح گرم کن در نظر گرفته شده، توزیع دمای مبدل و نسبت مولی مونوکسید کربن در مبدل برای دماهای مختلف گرم کن و موقعیت قرارگیری گرم کن در ورودی مبدل در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

شکل (۶) توزیع ابتدایی برای حالت با دمای گاز ورودی ۳۰۰ کلوین و شش توزیع بعدی برای حالت با دمای گاز ورودی ۴۰۰ کلوین است. در شکل ۵ توزیع دما به سه محدودهٔ خنک‌تر از ۴۵۰ کلوین، از ۴۵۰ تا ۶۰۰ کلوین و گرم‌تر از ۶۰۰ کلوین را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های مورد نظر مشاهده می‌شود که در دسته اول نرخ واکنش محسوسی رخ نخواهد داد، در دسته دوم واکنش‌ها دارای نرخ مناسبی هستند و در دسته سوم نرخ واکنش در بیشترین حد خود است.

۴-۳- بررسی اثر مدت زمان گرمایش مبدل در زمان راه-

اندازی سرد

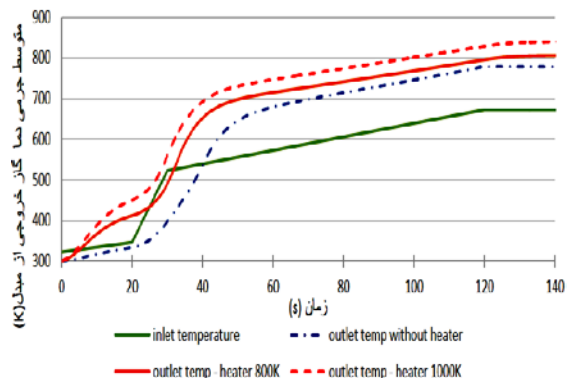
در این تحقیق، برای اینکه کلیت اثر گرم کن بر مبدل در طول راه اندازی سرد موتورسیکلت مشخص شود سه حالت مختلف مبدل بدون گرم کن، گرم کن ۸۰۰ کلوین در ورودی مبدل و گرم کن ۱۰۰۰ کلوین در ورودی مبدل به این صورت که گرم کن به صورت دائم روشن باشد شبیه سازی شدند.

در شکل (۶) دمای گاز خروجی نشان داده شده است. این دما دمای متوسط گیری شده بر اساس دبی جرمی^۱ است. در شکل (۷) نمودارها برای حالت با گرم کن و بدون گرم کن بررسی شده است، به عنوان نمونه خط ممتد نشانگر اختلاف دمای گاز خروجی برای حالت گرم کن ۸۰۰ کلوین و حالت بدون گرم کن را نشان می دهد.

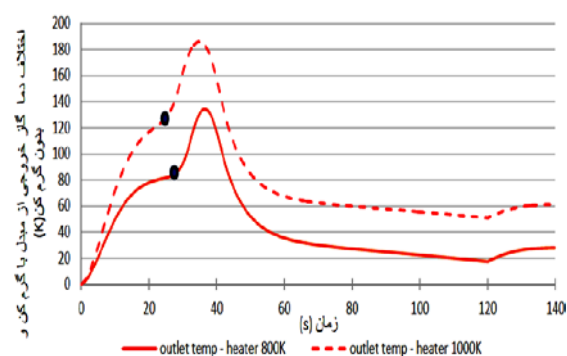
رفتار دمای گاز خروجی دود ورودی به مبدل مبتنی بر خطی سازی گوجیانگ [۲۱] در نظر گرفته شده است و ابتدا به خاطر جذب حرارت، شیب افزایش دما بسیار کم است. بعد از حدود ۲۰ ثانیه دمای بدنه مبدل به اندازه کافی افزایش یافته است و بعد از آن شیب دما منطبق بر شیب افزایش دما در محفظه موتور شده است که این امر شیب بسیار زیادی را سبب می شود. همانگونه که در شکل مشاهده می شود بعد از گذشت حدود ۳۰ ثانیه شیب ملایم تر شده و بعد ۱۲۰ ثانیه به دمای ثابت ۶۷۳ کلوین رسیده است.

دمای گاز خروجی از مبدل در حالت بدون گرم کن در ۴۰ ثانیه اول کمتر از دمای ورودی است، به دلیل اینکه بدنه مبدل در حال گرفتن انرژی گرمایی از گاز ورودی بوده است و باعث شده دمای آن کاهش یابد. در حدود زمان ۳۰ ثانیه به دلیل فعال شدن سطح مبدل و انجام واکنش روی سطح آن انرژی حاصل از واکنش منجر شده تا سطح واکنشگر بجای گرفتن انرژی از جریان گاز به آن انرژی بدهند و این امر باعث می شود که دمای گاز خروجی افزایش یابد. در نتیجه دمای گاز خروجی در زمان ۴۰ ثانیه از دمای گاز ورودی بیشتر می شود.

روند افزایش دما ناشی از واکنش، تا حدود زمان ۵۰ ثانیه ادامه دارد اما بعد از آن شیب افزایش دما ثابت و موازی با دمای گاز ورودی می گردد که به این دلیل است که بعد از این زمان نرخ واکنش در مبدل تقریباً ثابت و در نتیجه انرژی گرمایی حاصل از واکنش نیز ثابت شده است. دمای گاز خروجی برای حالات دارای گرم کن نیز رفتاری با کلیت یکسان با حالت بدون گرم کن دارند. تفاوتی که بین حالت ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین وجود دارد این است که در حالت گرمایش ۱۰۰۰ کلوین بعد از حدود ۵ ثانیه دمای گاز خروجی دود ورودی از دمای گاز ورودی کمتر نمی شود ولی در مورد حالت دمای گرمایش ۸۰۰ کلوین این اتفاق بعد از حدود ۲۵ ثانیه می افتد.

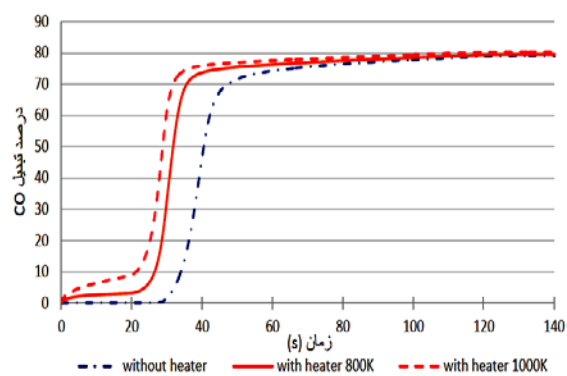


شکل ۶: نمودار متوسط دمای گاز خروجی از مبدل در حالت گذرا



شکل ۷: اختلاف دمای گاز خروجی برای مبدل با گرم کن و بدون گرم کن

هر دو نمودار شکل (۸) از ابتدا تا نقطه مشخص شده بیشتر تحت اثر گرم کن قرار دارند ولی بعد از آن اثر انرژی ناشی از واکنشها است که قوت گرفته و باعث افزایش شیب نمودار می شود، نقاط بیشینه نمودارها جایی است که نرخ واکنش در مبدلها پرش خود را انجام داده و تقریباً ثابت شده است.



شکل ۸: درصد تبدیل مونوکسید کربن برای سه حالت، از زمان روشن شدن موتورسیکلت

بعد از آن به دلیل فعال شدن حالت بدون گرم کن، اختلاف شروع به کاهش می کند تا اینکه نرخ واکنش در حالت بدون گرم کن هم تقریباً ثابت می شود.

برای بررسی بهتر درصد تبدیل برای هر سه حالت در شکل ۸ آورده شده است. نمودارها نشان می دهند که دمای گرم کن باعث شده تا مبدل

¹ Mass weighted average

فهرست علائم

غلظت هر جزء (i)	C_j
گرمای ویژه (J/kgK)	C_p
ضریب نفوذ جرم	D
انرژی فعالساز (J/mol)	E_j
نسبت سطح به حجم واکنشگر (m^2/m^3)	G_A
ضریب انتقال جرم در حالت گازی	K_j
ضریب بسامد	k_{a0j}
ثابت نرخ واکنش	k_j
آنتالپی واکنش برای هر جزء شیمیایی (J/mol)	ΔH
ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2 k$)	h
جرم مولی جزء i	M_i
فشار سیال (Pa)	P
توان گرمایی حاصل از گرم کننده ها (W)	\dot{q}
مختصه عمودی (m)	r
نرخ کنترل واکنش برای هر مسیر واکنش ($mol / L \cdot s$)	r_i
نرخ واکنش کل ($mol / L \cdot s$)	R_K
ثابت گازها (J / K · mol)	R
عدد رینولدز	Re
چشمه حرارتی ناشی از گرمای واکنش ها	S
دما (K)	T
زمان (s)	t
دمای گاز ورودی به واکنشگر (K)	T_g
دمای سطح واکنشگر (K)	T_s
مختصه افقی (m)	z

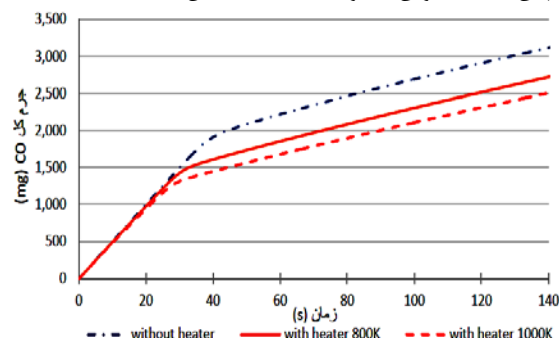
فهرست علائم یونانی

لزجت ($kg/m \cdot s$)	μ
ضریب انتقال حرارت در امتداد شعاعی ($W / m \cdot k$)	λ_{gr}
ضریب انتقال حرارت در امتداد طولی ($W / m \cdot k$)	λ_{gz}
ضریب دما	θ
کسری از سطح واکنشگر پوشیده شده بوسیله اجزاء i	θ_i
سرعت عمودی (m / s)	u_r
لزجت سینماتیکی (m^2 / s)	u_z
لزجت سینماتیکی (m^2 / s)	v_g
دانسیته (kgm^{-3})	ρ
اجزاء جذب شده بر روی واکنشگر	σ
تلفات انرژی	Φ

زیرنویس ها

اجزاء شیمیایی	i, j
فاز جامد (سطح واکنشگر)	s
فاز گازی	g

در ۲۰ ثانیه اول راه اندازی حالتی نیمه فعال داشته باشد و در این زمان مقداری از مونوکسید کربن موجود در گاز را تبدیل کند. همچنین حالت ۸۰۰ کلوین در حدود ۸ ثانیه و حالت ۱۰۰۰ کلوین در حدود ۱۱ ثانیه زودتر از مبدل بدون گرم کن به حالت فعال وارد شوند. شکل ۹ نشان می دهد که استفاده از گرم کن مقدار قابل توجهی از آلایندگی ناشی از روشن شدن سرد را کاهش می دهد به این صورت که بعد از گذشت ۱۰۰ ثانیه بر اثر استفاده از گرم کن ۸۰۰ کلوین، مقدار مونوکسید کربن وارد شده به هوا حدود ۳۸۷ mg و بر اثر استفاده از گرم کن ۱۰۰۰ کلوین، حدود ۵۸۴ mg کاهش یابد.



شکل ۹: کل جرم مونوکسید کربن وارد شده به هوا از زمان روشن شدن موتور سیکلت

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر استفاده از گرم کن در مبدل واکنشگر سه راهی در زمان راه اندازی سرد موتور سیکلت به صورت عددی بررسی گردید و در این راستا موقعیت قرارگیری گرم کن در ورودی مبدل و همچنین دماهای گرمایش مختلف برای گرم کن با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی و مقایسه گردید.

برای این منظور از حل ناپایایی مبدل با دماهای خروجی دود ورودی پایین مبتنی بر دمای اولیه گاز خروجی از خروجی دود موتور سیکلت استفاده شد.

نتایج عددی این تحقیق نشان دادند که استفاده از گرم کن در قسمت ورودی مبدل و با دمای گرمایش گرمتر سبب توزیع دمای بهتر و عملکرد موثرتر مبدل در کاهش آلایندگی مونوکسید کربن شود. همچنین نتایج به دست آمده در این خصوص نشان داد که اگر دمای گرم کن نتواند مساحت قابل ملاحظه ای از مبدل را به حداقل دمای فعال سازی مبدل برساند اثری نخواهد داشت.

سپس اثر مدت زمان روشن بودن گرم کن بر عملکرد مبدل و مقدار مونوکسید کربن وارد شده به هوا در راه اندازی سرد یک موتور سیکلت به صورت گذرا بررسی شد.

نتایج این بخش نشان داد که استفاده از گرم کن در مدت زمان بیشتر مقدار قابل توجهی از آلایندگی مونوکسید کربن ناشی از روشن شدن سرد را کاهش می دهد و بر اساس نتایج به دست آمده دمای گرمایش ۱۰۰۰ کلوین بهترین حالت را در بین همه حالت ها دارد.

مراجع

- [15] RF. Horng, HM. Chou, CW. Chen and JJ. Huang et al, Electrically heated catalytic converter on the temperatures and exhaust emissions of a 4-stroke motorcycle engine at cold start idle conditions, CIROC CSCA AASRC Joint Conference, Kao Hsiung, Taiwan, 2002
- [16] RF. Horng, HM. Chou, CW. Chen and JJ. Huang et al, Preheated catalytic converter on the emissions of a four-stroke engine under cold start conditions, The 19th National Conference on Mechanical Engineering the Chinese Society of Mechanical Engineers, Yun Lin, Taiwan, 2002
- [17] RF. Horng and HM. Chou, Transient behavior of an electrically heated catalytic converter on a motorcycle engine in cold-start conditions, Proc. Instn. Mech. Engrs., Part D: J Automobile Eng, 217:183-91, 2003
- [18] RF. Horng, HM. Chou and TC. Hsu, Reaction of the electrically heated catalyst of a four-stroke motorcycle engine under cold-start condition with additional enrichment of the intake mixture, Proc. Instn. Mech. Engrs., Part D: J Automobile Eng, 217: 1117-24, 2003
- [19] RF. Horng, HM. Chou, and TC. Hsu, Effects of heating energy and heating position on the conversion characteristics of the catalyst of a four-stroke motorcycle engine in cold start conditions, Energy Conv Mgmt, 45: 2113-26, 2004
- [۲۰] ک. شایسته، ا. حیدری، د. خجسته، م. عبدالرحمنی و ن. برهمنی، شبیه‌سازی مبدل‌های واکنشگری سه منظوره: بررسی انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی. یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ۱۳۸۵
- [21] L. Ma, H. Bart, P. Ning and A. Zhang, Kinetic Study of Three-Way Catalyst Of Automotive Exhaust Gas: Modeling and Application, Chemical engineering Journal, 155: 241-247, 2009
- [22] M.S. Bharath, S. Baljit and P.A. Narayana, Performance Studies of Catalytic Converter Used in Automobile Exhaust System, The 37 National & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, India, December.16-18, IIT Madras, Chennai, 2010
- [23] YK. Cheong, L. Chuah, NM. Adam and A. Basharia, Numerical Simulation of Nitrous Oxide and Carbon Monoxide Abatement in the Catalytic Converter, Advances in Mechanical Engineering and its Applications (AMEA), 3(1):284-293, ISSN2167-6380, 2012.
- [24] K. Laxmi, V. Kumar and Y.V Rao, Modeling and Simulation of Different Gas Flows Velocity and Pressure in Catalytic Converter with Porous, International Journal of Computational Engineering Research, 3(4): 28-41, 2013
- [۲۵] م. چالکش امیری، مفاهیم انتقال جرم، ویرایش دوم، اصفهان: انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۲
- [1] A.Popescu, G. Dumitrascu Thermal energy storage for auto vehicles: source of energy and clean environment, 1999
- [2] J.Baugh, W. Ray and W. Black, Motor vehicle emissions under reduced ambient, Temperature idle operating conditions. Atmospheric Environment, 10: 2077 - 2082. 1987
- [3] S. D. Burch, T. F Potter, M. A. Keyser, M. J. Brady and K. F. Michaels, Reducing cold start emissions by catalytic converter thermal management, SAE Technical Paper No.950409, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1995
- [4] M. J. Heimrich, S. Albu and M. Ajuha, electrically heated catalyst for cold start emission control on gasoline- and methanol-fueled vehicle, Trans. of ASME, 114: 496 - 501, 1992.
- [5] SAAB Information Releases, Development with a sense of responsibility. Saab Automobile AB, Information Releases, 1992
- [6] O. Schatz, F. R. Nader and S. Rossi, Latent heat storage, Automotive Engineering, 100(2): 58 - 61, 1992
- [7] R. Horng, HM. Chou and TC. Hsu, Effects of heating energy and heating position on the conversion characteristics of the catalyst of a four-stroke motorcycle engine in cold start conditions, Energy Conversion Management, 45:2113-26. 2004
- [8] WU. Guojiang, Z. HUANG and X. CHEN, Numerical simulation of cold start emission for the three-way catalyst converter: mathematical model and result analysis. Chinese Journal Chemical Engineering, 12(3):363-371, 2004
- [۹] ر. ابراهیمی، م. ضیابشرحق و م. مهدی نژاد، شبیه‌سازی دو بعدی عملکرد واکنشگر کاتورتر سه راهه، مجموعه مقالات سومین همایش موتورهای درونسوز، ۱۶۸-۱۷۸، ۱۳۸۲
- [10] Kirchner, T and Eigenberger,G.(1996). Optimization of the cold-start behavior of automotive catalysts using an electrically heated pre-catalyst. Chem Eng Sci,51:2409-18.
- [11] D. Ludykar, R.Westerholm and J. Almen, Cold start emissions at +20, -7 and -20°C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, Sci Total Environ ,235:65-9.1999
- [12] R. Joumard, M. Andre and R.Vidon, Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars, Atmos Environ, 34:4621-8.2000
- [13] RF. Horng, HM. Chou, CW. Chen and JJ. Huang et al, Exhaust emissions of motorcycle engines at transient conditions, The 16th Technical and Occupational Education Conference, Hua Lien, Taiwan, 2001
- [14] RF. Horng, HM. Chou, CW. Chen, JJ. Huang, et al. The catalytic converter on the exhaust emissions of a motorcycle engine at cold start idle conditions. The 6th Conference on Vehicles, Tao Yuan, Taiwan, 2001



Numerical Simulation Effect of EHC on CO Emission in Cold-Start Conditions of a Motorcycle Engine

F. Mianzarasvand¹, A. Shirneshan^{2,3*}, M. Afrand^{3,4}

¹Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, fatemeh_zarasvand@yahoo.com

²Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, arshirneshan@yahoo.com

³Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

⁴Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, masoud_afrand@yahoo.com

Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 May 2016

Accepted: 2 January 2017

Keywords:

Catalyst Converter

Heating

Cold Start

CO Emission Iranian national

ABSTRACT

Nowadays, Emissions of pollutants into atmosphere from motorcycle in the cold-start condition are becoming more in urban societies. One of the applicable methods to reduce emissions is using the electrically heated catalyst (EHC). In this study simulation the effects of using EHC on CO emission for various heating temperatures (600, 800 and 1000 °K) was investigated in the inlet of catalytic converter in the cold-start condition of a motorcycle engine. Firstly, the geometry of the model was drawn in Gambit and then CFD code FLUENT was used for prediction of catalytic converter light-off temperature and CO conversion. The results showed that by heating the catalyst, the conversion efficiency could be improved. The result show that if glow plug's temperature doesn't able to reach the considerable area to the minimum activation temperature, it will not affect so the best temperature us 1000 °K for propylene fuel.

