Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Investigating the Performance of a Car Catalyst Cooling Converter Equipped with an Electromechanical Temperature Control System

Mohammad Javad Rustamof [a], Seyyed Mohammad Arab[b,*], Asgar Minaei[c], Hassanali Rasouli[b]

[a] *Department Of Mechanical Engineering,Technical and Vocational University (TVU),Tehran, Iran*
[b] *Department of Materials and Manufacturing Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[c] *Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-12-03
Revised: 2025-07-22
Accepted: 2025-11-15

Keywords:

Car catalyst;
Temperature control;
Reducing emissions;
Control unit;
Temperature reducing converter;
Numerical simulation.

ABSTRACT

Controlling the temperature of the car catalyst is one of the effective factors in improving the efficiency of this part. The internal structure of the catalyst must be placed under certain thermal condition for optimally converting of exhaust gases. The theoretical and experimental results show that the internal structure of the catalyst in the temperature range of 300 °C to 600 °C has the greatest effect on greenhouse gases conversion. In this research, a theoretical solution has been proposed to prevent the deviation of the catalyst temperature from the defined limits. In order to prevent the raisin up the temperature of the catalyst, a double-walled converter with an asymmetric flow has been used. This part is installed before the car catalyst. The exhaust gases pass through it and then enter the catalyst. The cooler designed with four different lengths of 0.5m, 1m, 1.5m and 2m. the performance of the design is investigated numerically using a commercial finite volume code. The state of heat transfer and its effect on the gaeses temperature reduction has been evaluated. According to the results,the 0.5m in length cooler reduced the temperature to 291.6°C. By selecting the temperature reducing converter and automatically activating the fluid circulation operation at the critical temperature, the performance of the electromechanical system derived from sensors and actuators have been investigated.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36143.2767

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: m.arab@uma.ac.ir

How to cite this article:
Rustamof, M. J., Arab, S. M., Rasouli, H. & Minaei, A., "Investigating the performance of a car catalyst cooling converter equipped with an electromechanical temperature control system." Journal of Modeling in Engineering, 24 86 (2026): 31–43, doi: 10.22075/jme.2025.36143.2767

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد مبدل کاهنده دمای کاتالیزور خودرو مجهز به سیستم الکترومکانیکی کنترل دما

محمدجواد رستم اف[۱]، سیدمحمد عرب[۲،*]، عسگرمینائی[۳]، حسنعلی رسولی[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

واژگان کلیدی:
کاتالیزور خودرو،
کنترل دما،
کاهش آلایندگی،
واحد کنترل،
مبدل کاهنده‌ی دما،
شبیه سازی عددی.

چکیده

کنترل دمای کاتالیزور خودرو یکی از عوامل مؤثر در بهبود کارایی این قطعه است. ساختار درونی کاتالیزور برای تبدیل بهینه گازهای خروجی از موتور باید در شرایط دمایی خاصی قرار بگیرد. نتایج نظری و تجربی نشان می‌دهد که ساختار درونی کاتالیزور در محدوده دمایی ۳۰۰ ℃ تا ۶۰۰ ℃ بیشترین میزان تأثیرگذاری را روی گازهای گلخانه‌ای دارد. در این پژوهش برای جلوگیری از انحراف دمای کاتالیزور از حدود تعریف‌شده راهکاری به‌صورت نظری بررسی شده است. برای جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد دمای کاتالیزور از مبدل کاهنده دما نوع دو لوله با جریان ناهمسو استفاده شده است. این قطعه قبل از کاتالیزور خودرو نصب شده و گازهای خروجی از موتور ابتدا از مبدل کاهنده دما عبور کرده و سپس وارد کاتالیزور می‌شود. در پژوهش پیش رو مبدل کاهنده دما با ۴ طول ۰/۵m، ۱m، ۱/۵m و ۲m طراحی و به‌صورت حل عددی، معادلات حاکم با استفاده از گسسته‌سازی به‌روش حجم محدود در نرم افزار فلوئنت بررسی شد و وضعیت انتقال حرارت و تاثیر آنها درکاهش دمای گاز ورودی به کاتالیزور خودرو مورد ارزیابی قرار گرفته است. مبدل کاهنده دما با طول ۰/۵m کاهش دمای مطلوب و مورد نیاز را ایجاد می‌کند و دمای گاز خروجی از موتور که در مواقع بحرانی ۵۰۰℃ است را به دمای ۲۹۱/۶℃ می‌رساند. با انتخاب مبدل کاهنده دما و فعال شدن خودکار عملیات گردش سیال در دمای بحرانی، سیستم الکترومکانیکی برگرفته از حسگرها و عملگرها طراحی و عملکرد آن بررسی شده است.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36143.2767

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

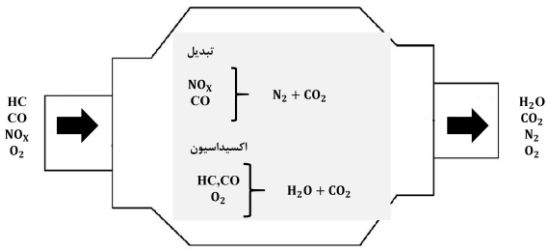
امروزه خودروهای شخصی و دستگاه‌های حمل و نقل عمومی و باربری یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی هستند. اغلب خودروهای موجود در این مجموعه، از موتورهای درون‌سوز در سیستم پیشرانه خود استفاده می‌کنند. اساس مکانیزم موتورهای درون‌سوز، تبدیل انرژی شیمیایی نهفته در سوخت فسیلی به انرژی مکانیکی است. دود خروجی از اگزوز موتورهای مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی یکی از مهم‌ترین علل آلودگی هوا و گرمایش جهانی است.

میزان آلایندگی یک خودرو به عوامل متعددی مانند نوع سوخت مصرفی، نوع موتور مورداستفاده و سازوکارهای بازدارنده انتشار آلایندگی بستگی دارد. یکی از قطعات مهم و کاربردی که تأثیر زیادی بر کاهش آلایندگی خودرو دارد،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.arab@uma.ac.ir
۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
۲. گروه مهندسی مواد و ساخت و تولید، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

استناد به این مقاله:
رستم اف، محمدجواد، عرب، سیدمحمد، رسولی، حسنعلی و مینایی، عسگر، "بررسی عملکرد مبدل کاهنده‌ی دمای کاتالیزور خودرو مجهز به سیستم الکترومکانیکی کنترل دما." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ ۸۶ (۱۴۰۵): ۳۱-۴۳, doi: 10.22075/jme.2025.36143.2767

مبدل کاتالیزوری است که می‌تواند تا حدود ٪۹۰ آلایندگی موتور را کاهش دهد. مبدل کاتالیزوری قطعه‌ای است که در مسیر خروج گازهای تولیدی موتور و بین منیفولد دود و انباره اگزوز قرار می‌گیرد. پوسته محافظ این قطعه از جنس فولاد زنگ نزن فریتی بوده که مقاومت مناسبی در برابر حرارت، خوردگی و اکسیداسیون دارد. ساختار درونی مبدل کاتالیزوری معمولاً از جنس سرامیک کوردیریت است که سطح آن با ترکیباتی از فلزاتی نظیر مس (Cu)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، پلاتین (Pt)، پالادیم (Pd) و رودیوم (Rh) نانولوله‌های کربنی و تیتانیوم (Ti) که با توجه به شرایط دمایی وظیفه تبدیل گازها را بر عهده دارند، پوشش‌دهی شده‌است[۱و ۲]. محصول احتراق سوخت در درون موتور شامل پارافین‌ها، الفین‌ها، ترکیبات آروماتیک (که هر سه به‌عنوان هیدروکربن‌های نسوخته شناخته می‌شوند)، بخارآب، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، اکسیدهای گوگرد (SO_X)، نیتروژن (N_2)، اکسیژن (O_2) و دی‌اکسید کربن (CO_2) است که در میان این‌ها اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسید کربن از خطرناک‌ترین گازهای خروجی هستند[۳]. به‌طورکلی هدف اصلی استفاده از مبدل کاتالیزوری تبدیل گازهای HC، NO_x و CO به CO_2، N_2، O_2 و آب است (شکل (۱)) [۳].



شکل ۱- فرایند اکسیداسیون و تبدیل در مبدل کاتالیزور خودرو [۴]

افت فعالیت کاتالیزور به‌مرور زمان یکی از موضوعات مهم در کاتالیزورها است زیرا کاتالیزورها در معرض دماهای بالا و نوسانی قرار دارند. منظور از غیرفعال‌شدن، پدیده یا پدیده‌هایی‌است که باعث کاهش مکان‌های فعال کاتالیزوری شده و عملکرد کاتالیزور را کاهش می‌دهند. غیرفعال‌شدن کاتالیزور نتیجه تعدادی‌تغییرات‌فیزیکی‌وشیمیایی ناخواسته است. عوامل غیرفعال‌شدن به سه دسته شیمیایی، حرارتی و مکانیکی تقسیم می‌شود. در اکثر مبدل‌های امروزی در حالت عملکرد معمول عوامل حرارتی و شیمیایی نسبت به مکانیکی غالب هستند. غیرفعال‌شدن کاتالیزور پدیده‌ای است اجتناب‌ناپذیر و به مرور زمان صورت می‌گیرد البته می‌توان فعالیت‌هایی‌انجام داد تا این پدیده با سرعت کمتری اتفاق بیفتد [۵]. به‌طورکلی هدف تولیدکنندگان کاتالیزور این است که دسترسی مواد واکنش‌دهنده را به مکان‌های فعال کاتالیزوری بیشتر کنند. در حالت ایده‌آل (پراکندگی ٪۱۰۰) تمام اتم‌ها و مولکول‌های فعال در دسترس مواد واکنش‌دهنده هستند. اثرات حرارتی باعث می‌شود که بلورها رشد کنند و مساحت سطح کاتالیزور کم شود.

جدول ۱- واکنش‌ها در مبدل کاتالیزور خودرو [۴]

$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	$(2x)CO + 2NOx \rightarrow N_2 + (2x)CO_2$	$\frac{5}{2}H_2 + NO \rightarrow NH_3 + H_2O$
$2HC + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$	$2HC + 5NO \rightarrow \frac{5}{2}N_2 + H_2O + 2CO_2$	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	$2H_2 + 2NO \rightarrow N_2 + 2H_2O$	$HC + 2H_2O \rightarrow CO_2 + \frac{5}{2}H_2$

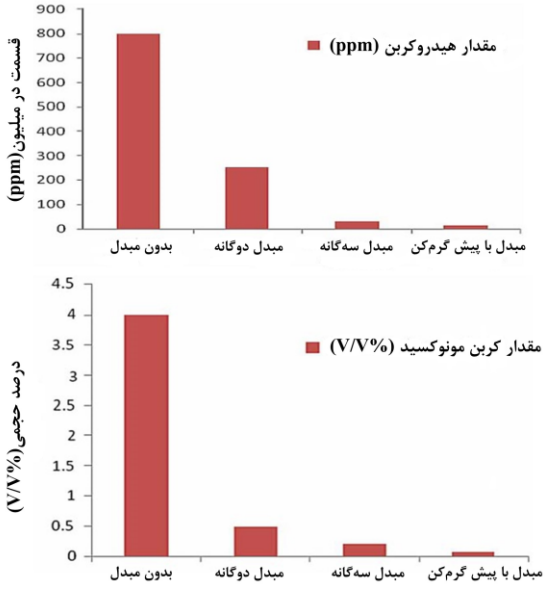
همچنین حامل که دارای شبکه بزرگ داخلی از منافذ است (مونولیت) دچارافزایش حرارت شده و مساحت سطح داخلی آن کم می‌شود. در برخی از موارد نیز مواد کاتالیزوری با حامل‌ها واکنش می‌دهند و موادی که کمتر فعال هستند را تولید می‌کنند. سه موردی که مطرح شد با توجه به نوع کاتالیست، حامل و نوع محیط‌گازتغییرمی‌کند ولی بیشترین اثر را از دمای بالا می‌گیرد[۵].

عوامل اصلی کاهش عمر و بازده کاتالیزورها عبارت‌اند از: گرفتگی منافذ عبوری پس از گذشت زمان، گازهای خروجی از موتور ترکیب‌شده با آب و روغن، احتراق ناقص سوخت و افزایش بیش از حد دما. یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر عملکرد بهینه کاتالیزور و طول عمر آن، دما است که خود متأثر از پارامترهایی مانند محل نصب، بار وارده به موتور و نسبت سوخت و هوا می‌باشد. در صورت افزایش دمای سطح کاتالیزور به بیش از ۹۰۰℃، فلزات گران‌بهای موجود در سطح مبدل به‌تدریج از بین خواهند رفت [۶].

۲- تاثیر دما در عملکرد کاتالیزور و تعریف مسئله

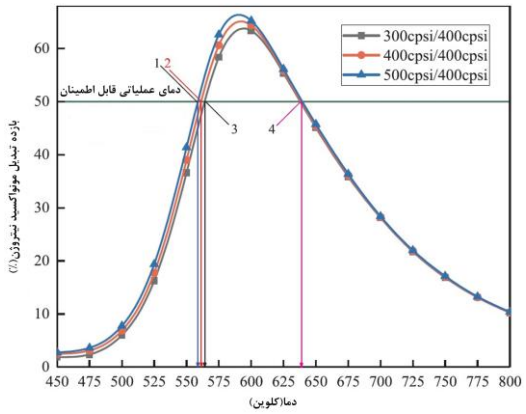
شکل (۲) نشان می‌دهد که با گرم کردن کاتالیزور در ابتدای شروع به‌کار آن در مدت‌زمان کمتر، میزان هیدروکربن (HC) موجود در گازهای خروجی از ۸۰۰ppm به ۱۱۵ ppm و همچنین CO نیز از ۴ v/v% به ۰/۰۷ v/v% کاهش‌یافته

است. در دماهای پایین شروع به کار موتور، عمل تبدیل گازهای خروجی به‌خوبی صورت نمی‌گیرد، ولی به‌محض افزایش دمای کاتالیزور به ۳۹۸ ℃ تبدیل NOx به N_2 و O_2 و CO به CO_2 به‌خوبی انجام می‌شود. در این پژوهش ، گزارش‌شده که در دماهای بیش از ۵۹۳ ℃ بستر کاتالیزور دچار سوختگی شده و کارایی کاتالیزور کاهش می‌یابد. برای افزایش دمای کاتالیزور در ابتدای عملکرد موتور از یک گرم‌کن الکتریکی مناسب استفاده شده‌است که در ۳۰ s دمای کاتالیزور را به دمای عملکرد بهینه افزایش دهد [۷].



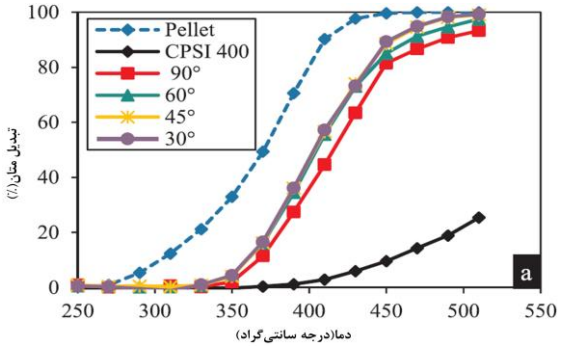
شکل۲- کاهش آلایندگی خروجی از اگزوز با کاتالیزور مجهز به گرمکن [۸]

در یک کار پژوهشی دیگر اثر دمای اگزوز بر میزان بازده تبدیلNO بررسی شده است. در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش دمای اگزوز بازده تبدیل NO در نسبت تراکم کانال‌ها تا یک دمای مشخص ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هنگامی‌که دمای گاز خروجی از موتور زیر ℃ ۳۵۲ باشد، بازده تبدیل NO در مبدل کاتالیزوری دوگانه با نسبت تراکم ساختار بالا نسبتاً مناسب است؛ به‌عبارت‌دیگر اگر بازه دمای گازهای ورودی به کاتالیزور یا دمای اگزوز بین ℃ ۲۶۷ تا ℃ ۳۷۶ باشد،کارایی تبدیل NO به‌مراتب نسبت به دماهای دیگر افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این کارایی در بازه دمایی ذکرشده نه‌تنها به دمای عملکرد وابسته بوده بلکه تراکم منافذ تشکیل‌دهنده ساختار در داخل کاتالیزور موجب‌بهبود این عملکرد می‌شود؛ زیرا سطح تماس گاز به‌موجب افزایش تراکم منافذ بیشتر می‌شود [۸].



شکل۳- تأثیر دما و تراکم منافذ در بازده تبدیل اکسید نیتروژن [۸]

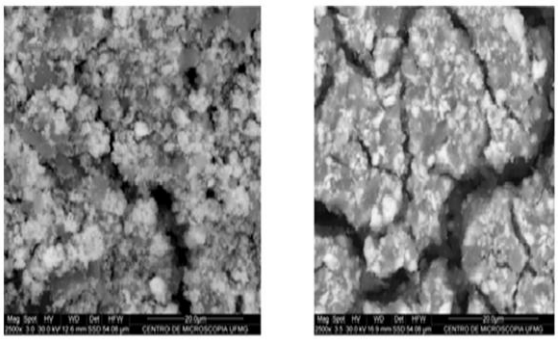
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ساختار کروی در اثر افزایش دمای مجموعه، بیشترین درصد تبدیل گاز متان را نسبت به دیگر نمونه‌ها به خود اختصاص داده است و ساختار متراکم ۴۰۰CPSI[4] (تعداد منافذ در هر اینچ مربع) که به‌عنوان نمونه پرمصرف در این زمینه نیز شناخته می‌شود، کمترین بازده را در میزان تبدیل گاز متان دارد. علت را می‌توان به عبور گازهای خروجی موتور با تلاطم کمتر و برخورد محدودتر با دیواره‌های ساختار نسبت داد. همچنین با افزایش طول ساعات کارکرد، عملکرد این نوع کاتالیزورها برای تبدیل گاز متان دچار افت شده است. در نمونه‌های زاویه‌دار، تلاطم گاز خروجی موتور درون مونولیت کاتالیزور بیشتر بوده و با سطح گسترده‌تری از دیواره‌ها برخورد می‌کند به همین دلیل این نوع ساختارها تأثیر بیشتری در تبدیل گاز متان دارند؛ همچنین دمای تقریبی ۵۲۰℃ دمای بهینه‌ی تبدیل گاز متان گزارش‌شده است [۹].



شکل ۴- اثر دما و زاویه منافذ مونولیت در بازده تبدیل گاز متان [۹]

[4] Cell Per Square Inch

در شکل (۵) مشخص بوده که مستهلک شدن کاتالیزور چه تأثیری بر روی سطح داخلی منافذ مونولیت دارد. در شکل (۵-ب) پراکندگی ذره‌ای فلزات تبدیل‌کننده در حد مطلوبی است، اما در شکل (۴-الف) که سطح یک کاتالیزور مستهلک‌شده را نمایش می‌دهد، پراکندگی ذرات نسبت به شکل قبل کمتر شده و ترک‌هایی نیز در سطح زمینه کاتالیزور ایجادشده است [۱۰].



الف ب

شکل ۵- تصاویر SEM از سطح کاتالیزور در دو شرایط فرسوده (الف) و نو (ب) [۱۰]

جدول۲- بازده تبدیل گازهای ورودی به کاتالیزور طبق شرایط دما [۴،۸،۹]

نوع سوخت مصرفی	نوع گاز	دمای ℃	بازده تبدیل %
بنزین	Nox	267-376	50-70
	CH4	300-500	10-95
	CO	310	85-95
	HC	420	85-95
گاز طبیعی(CNG)	CO	150-600	10-95
	HC	200-600	10-95
	Nox	220-600	75-95

مطابق جدول ۲ کاتالیزور خودرو در بازه دمایی ۳۰۰℃ تا ۶۰۰℃ تمامی گاز های مضر ورودی به خود را از ۱۰٪ تا ۹۵٪ به گازهای کم اثر یا بی اثر تبدیل می‌کند. این قطعه در دمای ۳۰۰℃ شروع به تبدیل گازهای خروجی موتور کرده و در دمای۵۰۰ ℃ به اوج عملکرد بهینه‌ی خود می‌رسد و با عبور دمای کاتالیزور از مقدار۶۰۰℃ بازده تبدیل و اکسیداسیون کاهش می‌یابد [۶]. با توجه به بازده تبدیل گازهای آلاینده در شرایط دمایی ذکر شده می توان به این نتیجه رسید که کنترل دمای کاتالیزور در محدوده ۳۰۰℃تا ۶۰۰℃ موجب عملکرد بهینه کاتالیزور می‌شود.

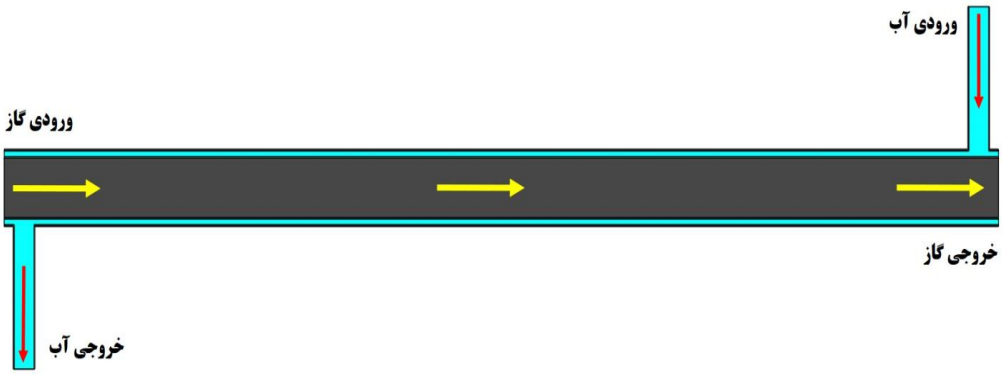
۲-۱- تعیین فاز عملکرد سیستم خنک کننده گاز ورودی به کاتالیزور خودرو

مطابق با آن‌چه که در تصاویر و جداول بخش دوم مورد بررسی قرار گرفت، مشخص شد که کاتالیزور خودرو در بازه دمایی ۳۰۰℃ تا ۵۰۰℃ بیشترین میزان تاثیر گذاری را در تبدیل گاز های آلاینده دارد که به‌عنوان بازه دمایی بهینه شناخته می‌شود. کاتالیزور خودرو دارای دو فاز برای عملکرد است، در فاز اول(استارت سرد) باید تلاش شود دمای کاتالیزور در حداقل زمان به دمایی کارکرد ۳۰۰℃ برسد تا عملیات تبدیل گاز های آلاینده با بازده مناسب شروع شود. در فاز دوم، کاتالیزور از دمایی ابتدایی عملکرد خود عبور کرده و طی فعالیت مستمر موتور خودرو به دمای بحرانی ۶۰۰℃ می‌رسد که عبور از این دما موجب افت کارایی کاتالیزور می‌شود. در پژوهش پیش رو معیار سیستم خنک کننده پیشنهادی بهبود کارایی کاتالیزور در فاز دوم عملکرد آن است تا با کنترل و کاهش دمای مطلوب، بازده کاتالیزور برای تبدیل گازهای آلاینده موثرتر شود.

۲-۲- طراحی مبدل کاهنده دما گاز ورودی به کاتالیزور خودرو

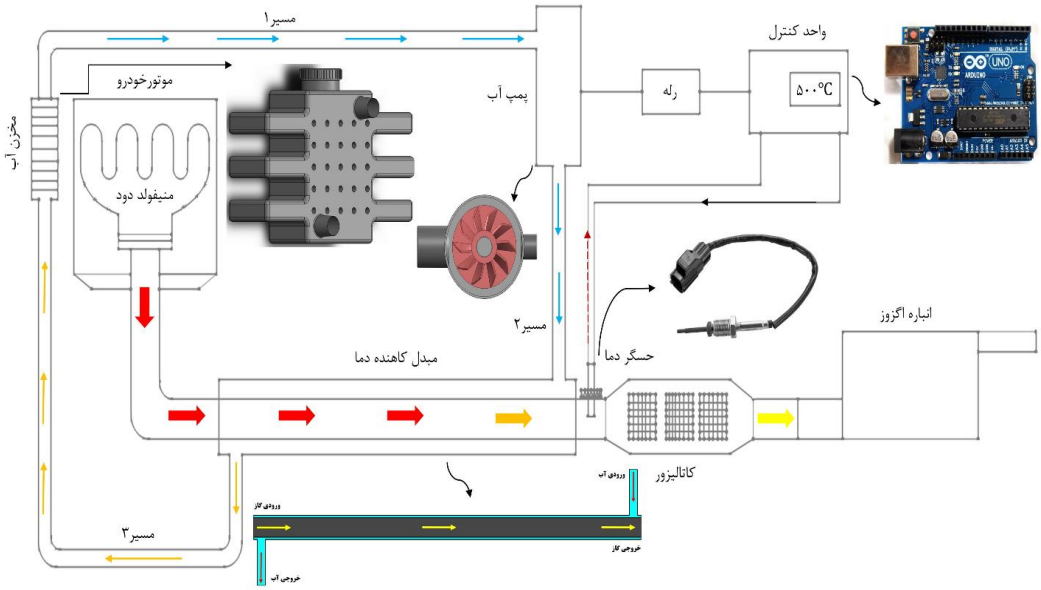
مطابق شکل (۶) مبدل کاهنده دما از نوع دولوله بوده که دارای دو مسیر مجزا برای هدایت سیال است. مجرای داخلی محل عبور گازهای آلاینده و مجرای خارجی محل عبور سیال خنک کننده است. دلیل استفاده از مبدل کاهنده دما دولوله سادگی فرایند طراحی و ساخت با هزینه تعمیر و نگهداری پایین آن می‌باشد. برای افزایش میزان تاثیرگذاری سیال خنک‌کننده در جهت کاهش دمای گازهای آلاینده جریان دو سیال در حال عبور از مجاری به‌صورت ناهمسو برقرار است. مبدل‌های طراحی‌شده برای کاهش دما برحسب طولی از مبدل که در تماس با سیال عبوری است، تأثیرات متفاوتی بر دمای گازهای عبوری دارد [۱۱]،

بدین‌صورت که هرچقدر طول مبدل کمتر باشد مقدار تأثیرگذاری پایین‌تر و هرچقدر طول مبدل بیشتر باشد مقدار تأثیرگذاری نیز بیشتر است. در این پژوهش، مبدل‌های کاهنده دما با طول‌های ۰/۵m، ۱m، ۱/۵m و ۲m تحلیل شد که در این میان برای قرارگیری در محدوده دمایی۳۰۰℃ تا ۶۰۰℃ مبدل کاهنده دما ۰/۵m کاهش دمای مورد نیاز را فراهم می‌کند. کلیه مبدل‌ها در نرم‌افزار سالیدورک طراحی‌شده‌اند که نمونه‌ای از آن در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- مبدل کاهنده دما گاز ورودی به کاتالیزور

مطابق شکل (۷) زمانی که دمای گازهای ورودی به کاتالیزور خودرو به مقدار ۵۰۰℃ برسد حسگر دما این مقدار را حس کرده و با ارسال سیگنال به واحد کنترل مجموعه این واحد را از افزایش دما به وجود آمده مطلع می‌کند. واحد کنترل پس از دریافت اطلاعات به‌واسطه رله، پمپ گرداننده سیال را فعال می‌کند. پمپ سیال خنک‌کننده را از مخزن مکش کرده (مسیر ۱) و از طریق مسیر (۲) به سمت ورودی آب به مبدل هدایت می‌کند. آب پس از گردش در دور مبدل و ایجاد کاهش دما در گازهای عبوری از مجرای خروجی و مسیر (۳) به سمت مخزن هدایت می‌شود. چرخه گردش سیال تا زمانی که دمای گازهای خروجی از مبدل به ۳۰۰℃ برسد ادامه دارد.



شکل ۷- شماتیک مجموعه خنک‌کننده گاز ورودی به کاتالیزور خودرو

۳- بررسی معادلات حاکم

معادلات حاکم با استفاده از گسسته‌سازی به‌روش حجم محدود در نرم افزار انسیس فلوئنت حل شد.

برای انجام تحلیل انتقال حرارت فرضیه‌های زیر برقرار است:

۱) جریان سیال به صورت تراکم ناپذیر و حالت پایا در نظر گرفته شده است.

۲) تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است.
۳) محصولات احتراق گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم [۱۲و۱۳].

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot \mathrm{V} = 0 \qquad (۱)$$

که در آن V سرعت سیال است.

معادله حرکت:

$$\nabla \cdot (\rho VV) = -\nabla P + \nabla \cdot \left((\mu + \mu_t)\nabla V\right) \nabla \cdot \left(-\rho\overline{V'V'}\right) \qquad (۲)$$

که در آن ρ چگالی سیال،P فشار،μ ویسکوزیته دینامیکی سیال،μ_t ویسکوزیته متلاطم سیال وV تغییرات‌سرعت است.

معادلات بقای مدل $k-\varepsilon$:

$$\nabla \cdot (\rho Vk) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) + \nabla k\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \qquad (۳)$$

$$\nabla \cdot (\rho V\varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) + \nabla\varepsilon\right) + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{K}C_{3\varepsilon}G_b \qquad (۴)$$

$$C_1 = max\left[0/43\frac{\eta}{\eta+5}\right].\eta = S\frac{K}{\varepsilon}.S = \sqrt{2S_{ij}}\,S_{ij}.S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \qquad (۵)$$

که در آن K انرژی جنبشی آشفته، ε نرخ اتلاف، G_k به دلیل گرادیان سرعت میانگین از نسل انرژی جنبشی آشفته است. G_b به دلیل گرانش از نسل انرژی جنبشی آشفته است. Y_M نسبت انبساط نوسانی در آشفتگی تراکم ناپذیر به اتلاف کل است. C_1،C_2،$C_{1\varepsilon}$و$C_{3\varepsilon}$ ضرایب ثابت هستند. σ_k و σ_ε اعداد پرانتل‌آشفته برای ε و K هستند. υ و S_{ij} میانگین نرخ کرنش و ویسکوزیته سینماتیکی سیال است.

معادله انرژی:

$$\rho C_p V \cdot \nabla T = \nabla \cdot \left(k_{eff}\nabla T\right) \qquad (۶)$$

که در آن T دما، C_p ظرفیت گرمای ویژه و k_{eff} رسانایی گرمای موثر است.

۳-۱- شرایط مرزی

مطابق با آنچه که در جدول ۳ مشخص شده است. دبی جرمی‌گاز خروجی از یک موتور تک سیلندر چهار زمانه بنزین‌سوزg/s ۴/۴۷۶ است [۱۴]. با توجه به اینکه بازه دمایی بهینه عملکرد کاتالیزور ۳۰۰℃ تا ۶۰۰℃ تشخیص داده شده است، دمای مبنا گاز ورودی به مبدل کاهنده دما ۵۰۰℃ تعریف شده است؛ براین اساس مبدل کاهنده دما در دمای مبنا فعال شده و طبق ظرفیتی که دارد فرایند کاهش دما را انجام می‌دهد. دبی جرمی آب ورودی به مبدل کاهنده دما ۰/۱kg/s در نظرگرفته شده است [۱۵]. دمای آب ورودی به مبدل کاهنده دما به عنوان سیال خنک کننده نیز با توجه به شرایط محیطی ۲۵ ℃ تعریف شده است. باتوجه به اینکه از اصطکاک ایجاد شده ناشی از حرکت و برخورد دوسیال با دیواره‌های داخلی مبدل کاهنده دما صرف‌نظر شده شرط عدم لغزش برای سطوح داخلی دو لوله که با سیال‌ها در ارتباط هستند برقرار است. به‌دلیل این‌که کاهش دما و انتقال حرارت در مبدل کاهنده دما فقط از طریق گردش آب صورت بگیرد دیواره خارجی مبدل که با محیط در ارتباط است عایق تعریف شده تا شرایط محیط در روند کاهش دما تاثیرگذار نباشد.

جدول ۳- مقادیر شرایط مرزی

شرایط مرزی	دبی جرمی	دما	دیواره داخلی	دیواره خارجی
گاز ورودی	۰/۰۰۴۷۶ kg/s	K ۷۷۳/۱۵	-	-
آب ورودی	۰/۱ kg/s	K ۲۹۸/۱۵	-	-
وضعیت دیواره	-	-	عدم لغزش سیال	عایق

از آنجایی که محصولات حاصل از احتراق به عنوان یک گاز ایده آل (هوا) در نظر گرفته شده خواص آن مطابق جدول ۴ است.

جدول ۴- خواص فیزیکی مخلوط گازها

پارامتر	مقدار	واحد
وزن ملکولی	28/966	kg/kmol
ویسکوزیته	$1/7894e^{-5}$	kg/ms
رسانایی حرارتی	0/0242	W/mK
گرمای ویژه	1006/43	$J/_{(kg\cdot k)}$

جنس تمامی قسمت‌های تشکیل‌دهنده بدنه مبدل کاهنده دما فولاد زنگ نزن فریتی با گرید ۴۰۹ درنظر گرفته شده که از مقاومت به خوردگی و پایداری حرارتی مناسبی برخوردار است(جدول۵). ورق فولادی رایج برای ساخت

بدنه مبدل دارای ضخامت ۲mm است و مبدل از آن با عملیات خم‌کاری و جوش‌کاری ساخته می‌شود.

جدول۵- خواص مکانیکی مبدل کاهنده دما

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیک	$1/9e^{11}$	N/m^2
نسبت پوآسون	0/29	-
مدول برشی	$7/5e^{10}$	N/m^2
چگالی	8000	kg/m^3
استحکام کششی	517000000	N/m^2
استحکام تسلیم	206807000	N/m^2
ضریب انبساط حرارتی	$1/8e^{-5}$	/K
رسانایی حرارتی	16	W/mK
گرمای ویژه	500	$J/(kg \cdot k)$

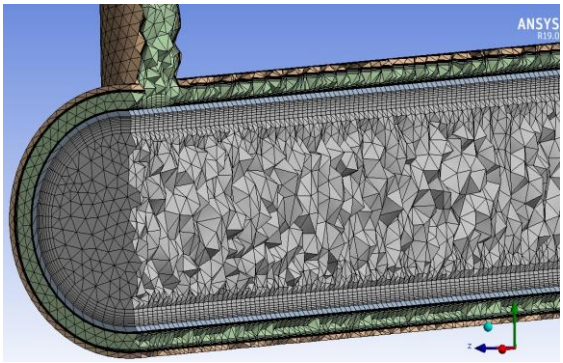
نوع مش‌بندی مبدل کاهنده دما در شکل (۸) مشخص شده که موارد زیر برای آن برقرار است.

۱) سایز مش ۲/۵mm

۲) نوع مش تتراهدرال(چهار وجهی)

۳) گره ۴۰۲۱۷۵

۴) المان۸۶۹۱۴۶



شکل ۸- نمای برش خورده مبدل کاهنده دما مش‌بندی شده

۳-۲- استقلال از شبکه

در مقاله حاضر بررسی استقلال از شبکه انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می شود که شبکه حل با تعدادگره از ۱۶۰ هزار تا ۶۳۰ هزار ساخته شده است. با توجه به جدول ۶ مشاهده می شود با افزایش تعداد گره از ۴۰۲ هزار تا ۶۳۰ هزار، دمای آب خروجی درحد ۰/۰۱K و دمای گازهای خروجی درحد ۰/۲K تغییر کرده است. این جدول نشان می دهد شبکه با تعداد ۴۰۲ هزار گره مناسب بوده ریزتر کردن المان ها تغییرات بسیار ناچیزی در مقادیر خروجی می دهد و به همین دلیل شبکه با تعداد گره ۴۰۲ هزار برای مدل سازی انتخاب شده است.

جدول۶- استقلال ار شبکه

دمای آب خروجی K	دمای گاز خروجی K	گره Nodes	حداکثر مش ظاهری Max face mesh
۳۰۰	۷۲۵	۱۶۰۵۷۵	۰/۰۰۴
۳۰۱/۸۹	۷۲۵/۲۹	۲۰۸۱۲۲	۰/۰۰۳۵
۳۰۱/۸۹	۷۲۶/۲۴	۲۷۴۸۸۲	۰/۰۰۳
۳۰۱/۹	۷۲۶/۵۷	۴۰۲۱۷۵	۰/۰۰۲۵
۳۰۱/۸۹	۷۲۶/۷۵	۶۳۰۳۳۸	۰/۰۰۲

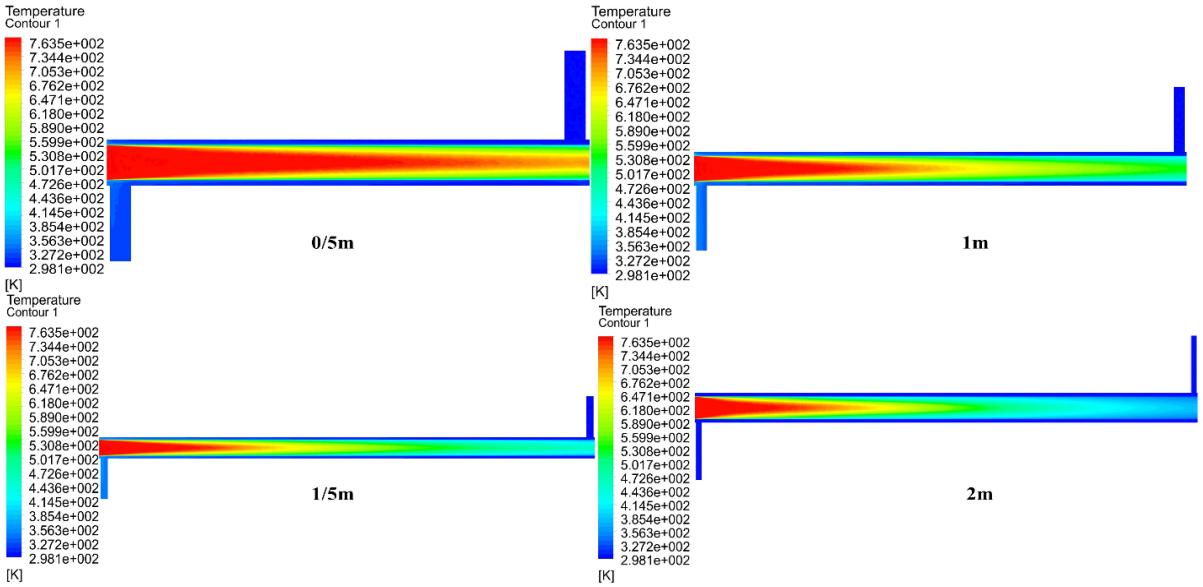
۴- نتایج

مبدل کاهنده دمای طراحی‌شده قبل از کاتالیزور خودرو نصب می‌شود و وظیفه کاهش دمای گاز ورودی به کاتالیزور را در مواقع بحرانی بر عهده دارد. برای انتخاب یک مبدل مناسب با ظرفیت کاهش دمای مطلوب، مبدل کاهنده دما در ۴ طول ۰/۵m، ۱m، ۱/۵m، ۲m طراحی و تحلیل‌های انتقال حرارت موردنیاز برروی‌آن‌ها انجام گرفته‌است. شرایط تحلیل در هر چهار نوع مبدل به‌صورت یکسان در نظر گرفته‌شده و فقط ازنظر طولی با یکدیگر تفاوت دارند. طی نتایج به‌دست‌آمده مشخص‌شده است که افزایش طول مبدل کاهنده دما چه تأثیری در کاهش دمای گازهای خروجی از مبدل دارد. دمای گاز ورودی به مبدل (۵۰۰°C) ۷۷۳ K، جرم آب ورودی به مبدل ۰/۱ kg/s، جرم گاز ورودی به مبدل ۰/۰۰۴۷۶ kg/s و دمای سیال خنک‌کننده (۲۵°C) ۲۹۸/۱۵K تعیین‌شده است.

۴-۱- بررسی روند کاهش دما گاز خروجی از مبدل و افزایش دمای سیال خنک‌کننده

همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود، در نمونه مبدل ۰/۵m ، سیال خنک‌کننده تأثیر قابل نیاز در کاهش دمای گازهای خروجی از مبدل را ایجاد می‌کند. زمانی‌که دمای

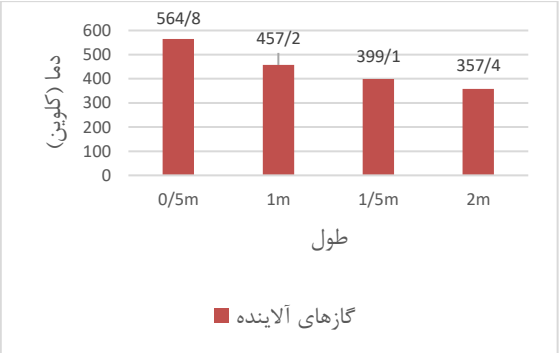
گاز ورودی به مبدل ۵۰۰℃ شود سیستم خنک‌کننده فعال شده و سیال خنک‌کننده در مدت‌زمانی که از مجرای ورودی به مجرای خروجی می‌رسد دمای گازهای آلاینده را از (۵۰۰℃) ۷۷۳K به (۲۹۱/۶℃) ۵۶۴/۸ K می‌رساند این در حالی است که دمای خود سیال از (۲۵℃) ۲۹۸/۱۵ K به (۲۷/۳۸℃) ۳۰۰/۵۳ K افزایش می‌یابد. مطابق با جدول (۲) در هر دونوع سوخت مصرفی خودرو کاتالیزور به طور میانگین در بازه دمایی ۳۰۰ ℃ تا ۶۰۰ ℃ دارای بازده مناسبی برای تبدیل گازهای آلاینده است. مبدل کاهنده دما ۰/۵m طبق ظرفیت کاهش دمایی که دارد می‌تواند کاتالیزور را در شرایط دمایی ایده آل قرار دهد. روند کاهش دمای گاز خروجی از مبدل با افزایش طول آن به ۱/۵m دارای مقدار بیشتری نسبت به دو مبدل کوتاه‌تر است. با بررسی شکل (۹) تغییرات دما در دو مبدل ۰/۵m و ۱m این روند کاهش دما مشخص است. زمانی‌که طول مبدل افزایش می‌یابد، عملاً گازهای خروجی از موتور خودرو در داخل مبدل مدت‌زمان بیشتری با سیال خنک‌کننده در ارتباط هستند و کاهش دمای آن‌ها بیشتر خواهد بود. در این نوع مبدل پس از فعالیت سیستم خنک‌کننده در مدت‌زمان مشخص و تکمیل عملیات گردش سیال دمای گاز خروجی به مقدار (۱۲۶/۰۳℃) ۳۹۹/۱۸K می‌رسد.



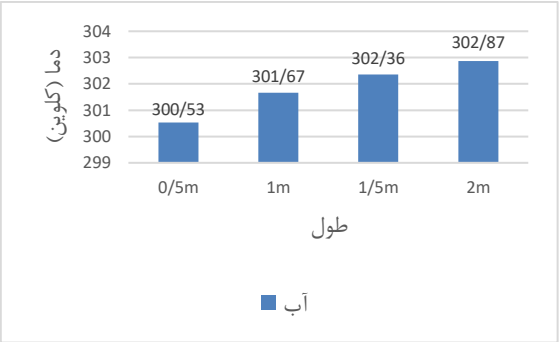
شکل ۹- تأثیر سیال خنک‌کننده در کاهش دما گازهای خروجی از مبدل کاهنده دما

کاهش دمای بیشتر گاز خروجی این نوع مبدل نسبت به دو نمونه قبلی موجب می‌شود دمای سیال خنک‌کننده نسبت به دو مبدل ۰/۵m و ۱m دارای مقدار بیشتری باشد و به دمای (۲۹/۲۱℃) ۳۰۲/۳۶ K برسد. با افزایش طول مبدل کاهنده‌ی دما به ۲m روند کاهش دما گازهای خروجی نیز سِیر نزولی خود را تا دمای (۸۴/۳۱℃)K ۳۵۷/۴۶ طی می‌کند. در مبدل کاهنده دما ۱/۵m و ۲m به ترتیب حدفاصل دمای گازهای خروجی از دمای شروع تبدیل گازهای آلاینده ۱۷۳/۹۷ ℃ و ۲۱۵/۶۹ ℃ است. این مقدار فاصله دمایی سبب می شود کاتالیزور دیرتر به دمای کاری (۳۰۰℃) برسد و در مدت زمانی که طول می‌کشد تا به دمای شروع تبدیل برسد عملاً تاثیری در تبدیل گازهای آلاینده ندارد. در میان مبدل های کاهنده‌ی دما بررسی شده نمونه ۰/۵m با حدفاصل دمایی ۸/۴ ℃ از دمای کاری به عنوان نمونه اصلی شناخته می شود. سایر مبدل‌ها به دلیل این‌که ظرفیت کاهش دمای آن‌ها بیش از مقدار مورد نیاز برای سیستم کنترل دما کاتالیزور هست و موجب تاخیر حداکثری در شروع تبدیل گازهای آلاینده می‌شود عدم استفاده از آن ها منطقی‌تر است.

در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) روند تغییرات دمای دو سیال خروجی از مبدل بر اساس طول مبدل کاهنده دما مشخص‌شده است. با افزایش طول مبدل تأثیر سیال خنک‌کننده در کاهش دما گاز آلاینده بیشتر می‌شود. این موضوع سبب افزایش دمای خود سیال خنک‌کننده نیز خواهد شد.



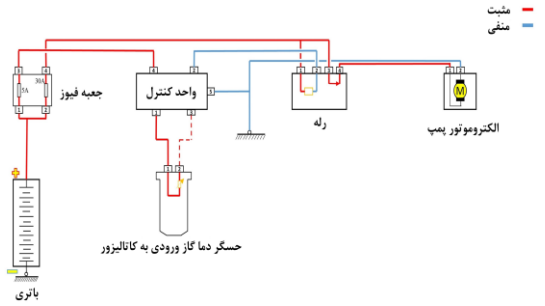
شکل ۱۰- نمودار تأثیر طول مبدل کاهنده‌ی دما در کاهش دما گاز خروجی از مبدل



شکل ۱۱- نمودار تأثیر طول مبدل کاهنده‌ی دما در افزایش دما آب خروجی از مبدل

۴-۲- مدار برق‌رسانی سیستم خنک‌کننده مبدل کاهنده دما گاز ورودی به کاتالیزور

شکل (۱۲) مدار برق‌رسانی مجموعه خنک‌کننده مبدل کاهنده دما را در حالت فعال نشان می‌دهد. طبق شکل در زمان فعال شدن عملگرها برق مثبت از باتری به جعبه‌فیوز منتقل‌شده و به دوشاخه تقسیم می‌شود. شاخه اول از پایه شماره ۳ جعبه‌فیوز به پایه ۴ واحد کنترل منتقل‌شده و برق ثابت این واحد را تأمین می‌کند. شاخه دوم از پایه‌ی ۴ جعبه‌فیوز به پایه ۳ رله منتقل می‌شود که در صورت تحریک سیم‌پیچ رله و اتصال کنتاکت داخلی، برق از پایه ۴ رله به پایه ۱ موتورپمپ گردش سیال منتقل می‌شود. واحد کنترل مورداستفاده در این مجموعه یک برد آردوینو بوده که قابلیت پردازش داده‌ها و صدور دستورات لازم برای فعال شدن عملگرها را برعهده دارد. واحد کنترل از طریق پایه‌های ۱ و ۳ با حسگر دمای گاز خروجی موتور در ارتباط است. براین‌اساس واحد کنترل برق ۵V را از پایه‌ی ۱ به پایه‌ی ۱ حسگر دما منتقل می‌کند و با گذر از مقاومت حساس به دما این برق از پایه ۲ حسگر به سمت پایه ۳ واحد کنترل هدایت می‌شود. با توجه به این‌که حسگر در مسیر اگزوز بعد از مبدل کاهنده دما نصب می‌شود، با افزایش دمای گاز ورودی به کاتالیزور مقاومت درون حسگر بیشتر شده و ولتاژ برگشتی به حداقل خواهد رسید. بر اساس تغییر ولتاژی که توسط حسگر به‌وجود می‌آید، واحد کنترل متوجه افزایش دما می‌شود. پس از دریافت تغییرات ولتاژ توسط واحد کنترل و پردازش آن، این کنترل‌کننده دستوراتی را در قالب ارسال بدنه (صفر ولت) برای تحریک رله مربوطه به سیم‌پیچ آن ارسال می‌کند. بدین‌صورت که بدنه از پایه ۲ واحد کنترل به پایه ۲ سیم‌پیچ رله منتقل می‌شود. با توجه به این‌که پایه‌های ۱ سیم‌پیچ رله دارای برق ۱۲V هست، با دریافت بدنه از واحد کنترل تحریک‌شده و با اتصال کنتاکت داخلی رله برق مثبت به سمت الکتروموتور پمپ هدایت می‌شود. موتورپمپ چون دارای بدنه ثابت است با دریافت برق مثبت از رله تحریک و سبب گردش سیال می‌شود.



شکل ۱۲- مدار برق‌رسانی سیستم خنک‌کننده کاتالیزور مجهز به حسگر دما

۴-۳- برنامه‌نویسی‌واحدکنترل(برد آردوینو)سیستم خنک‌کننده مبدل کاهنده دما گاز ورودی به کاتالیزور

زبان برنامه‌نویسی که در این طرح مورداستفاده قرارگرفته از نوع C^{++} است. به‌طور کل شرایط برنامه‌نویسی در کامپایلر آردوینو به دو بخش تقسیم می‌شود. در قسمت void setap (حلقه اول) اطلاعاتی نظیر تعریف متغیر و وضعیت پایه‌ها مشخص می‌شود. در قسمت void loop (حلقه اصلی) برنامه‌ای که باید مرتباً تکرار شود قرار می‌گیرد. بر اساس برنامه‌ای که برای واحد کنترل سیستم خنک‌کننده نوشته شد، در حلقه اول پایه‌های ۱، ۲ به‌عنوان خروجی و پایه ۳ دیجیتال به‌عنوان ورودی واحد کنترل در نظر گرفته‌شده است. در حلقه اصلی واحد کنترل از طریق پایه ۱ برق ۵V(HIGH) را به حسگر دما ارسال می‌کند. سپس مقاومت این حسگر متناسب با افزایش دمایی که در ورودی کاتالیزور

ایجاد می‌شود، افزایش پیدا کرده و برق ورودی را از پایه خروجی خود با حداقل ولتاژ به سمت پایه‌ی ۳ واحد کنترل هدایت می‌کند. واحد کنترل با شناسایی کردن این ولتاژ در پایه ۳ پایه ۲ خود را بدنه (LOW) می‌کند. پس از فعال شدن سیستم خنک‌کننده واحد کنترل به‌صورت لحظه‌ای پایه ۳ را چک می‌کند تا درصورتی‌که اگر ولتاژ برگشتی از حسگر ۵V باشد با ارسال برق ۵V از طریق پایه۲ خود عملگر سیستم خنک‌کننده را غیرفعال نماید (شکل ۱۳).

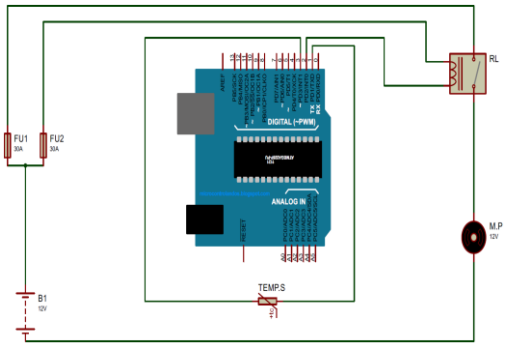
```
int var;
void setup()
{
pinMode(1,OUTPUT);
 pinMode(2,OUTPUT);
 pinMode(3,INPUT);}

void loop()
{
 digitalWrite(1,HIGH);
 var = digitalRead(3);
 var = HIGH;
 digitalWrite(2,HIGH);
 var = digitalRead(3);
 var = LOW;
 digitalWrite(2,LOW);}
```

شکل ۱۳- برنامه‌نویسی واحد کنترل سیستم خنک‌کننده.

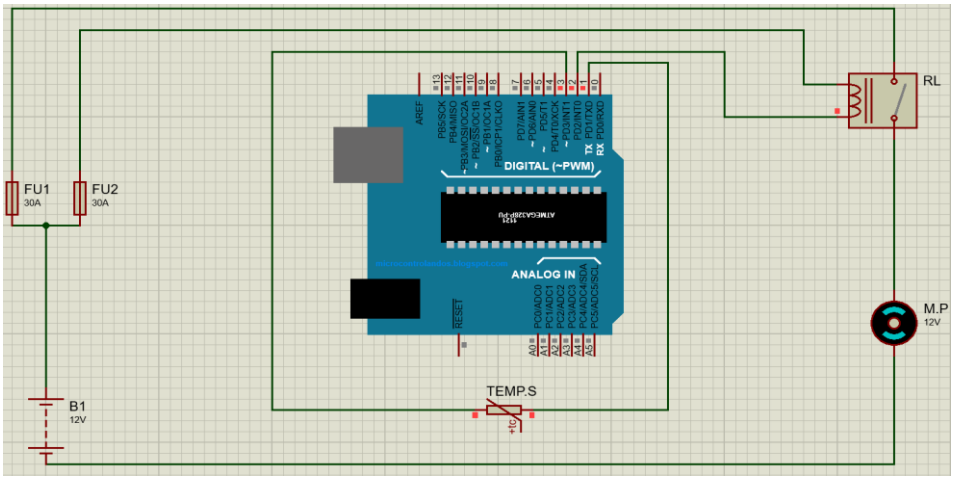
۴-۴- شبیه‌سازی مدارات الکترونیکی و عملگرهای سیستم خنک‌کننده مبدل‌کاهنده دما در نرم‌افزار پروتئوس

برای بررسی صحت ارتباط مدارات الکترونیکی و کد نویسی انجام‌شده مجموعه قطعات الکترونیکی سیستم خنک‌کننده در نرم‌افزار پروتئوس شبیه‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۱۴). بر اساس دستورات برنامه‌نویسی که برای مجموعه خنک‌کننده تعریف‌شده است. زمانی که خودرو روشن‌شده و شروع به حرکت می‌کند، مدت‌زمانی باید طی شود تا دمای کاتالیزور به ۵۰۰℃ تعریف‌شده برای سیستم خنک‌کننده برسد.

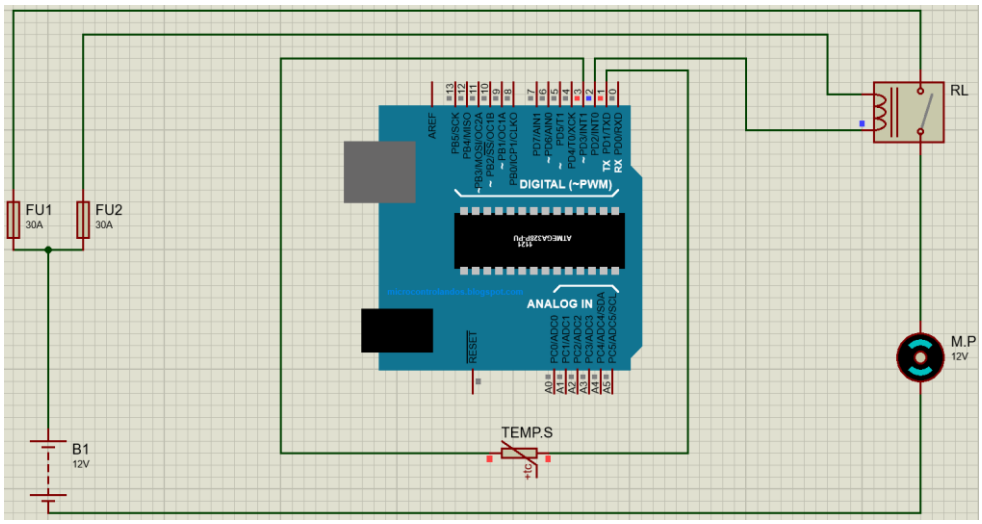


شکل ۱۴- شماتیک مدار سیستم خنک‌کننده مجهز به حسگر دما در نرم‌افزار پروتئوس

در این مدت‌زمان حسگر دمای گاز ورودی به کاتالیزور به‌صورت لحظه‌ای دما را اندازه‌گیری کرده و به واحد کنترل ارسال می‌کند. در لحظه‌های ابتدایی کارکرد خودرو چون هنوز دما به حد فعال شدن سیستم خنک‌کننده نرسیده است، حسگر دما برق ۵V ورودی خود را با حداقل تغییر به واحد کنترل ارسال می‌کند. در این لحظه واحد کنترل پس از پردازش اطلاعات ارسالی از حسگر پایه متصل به رله را با ارسال برق ۵V در حالت غیرفعال نگه می‌دارد (شکل ۱۵). در ادامه پس از این‌که دما از آستانه تعریف‌شده عبور کرد، حسگر حداکثر مقاومت را در برابر برق عبوری از خود ایجاد کرده و برق را با حداقل ولتاژ به سمت واحد کنترل هدایت می‌کند. در این لحظه، واحد کنترل متوجه افزایش دمای گاز ورودی به کاتالیزور شده و با منفی نمودن پایه سیم‌پیچ رله، دستور فعال شدن سیستم خنک‌کننده را صادر می‌نماید (شکل ۱۶).



شکل ۱۵- شماتیک مدار برق‌رسانی سیستم خنک‌کننده مبدل کاهنده دما در حالت غیرفعال (دما زیر ۵۰۰℃)



شکل ۱۶- شماتیک مدار برق‌رسانی سیستم خنک‌کننده مبدل کاهنده دما در حالت فعال (دما بالای ۵۰۰℃)

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعاتی که در این پژوهش به انجام رسید کنترل دمای کاتالیزور در بازه دمایی ۳۰۰°C تا ۶۰۰°C در بهبود عملکرد این قطعه تأثیرگذار است. برای کنترل دما در این بازه دمایی مبدل کاهنده دما با طول ۰/۵m، ۱m، ۱/۵m، ۲m طراحی شد سپس با شبیه‌سازی عددی صورت گرفته ظرفیت کاهش دما هر یک از مبدل‌ها مشخص شدند. برای عملیات گردش سیال خنک‌کننده سیستم الکترومکانیکی طراحی و شبیه‌سازی آن برای بررسی قابلیت اجرا انجام شد. عمده نتایج تحقیق عبارتند از:

۱) طبق تحلیل‌هایی که انجام گرفت مشخص شد که افزایش‌طول‌مبدل‌کاهنده دما تأثیرات مثبتی در کاهش دمای گاز ورودی به کاتالیزور دارد.

۲) با دست‌یابی به نتایج ۴ نوع مبدل، مبدل کاهنده دمای۰/۵mمطابق با ظرفیتی کاهش دمایی که دارد می تواند شرایط دمایی ایده آل را برای کاتالیزور فراهم کند.

۳) سیستم خنک‌کننده طی فعالیتی که در مبدل ۰/۵m دارد، دمای گاز ورودی به کاتالیزور را ۲۰۸/۴°C کاهش می‌دهد تا دمای گازهای آلاینده را از ۵۰۰°C ورودی مبدل به ۲۹۱/۶°C خروجی مبدل کاهنده دما برساند.

۴) سیستم الکترومکانیکی کنترل کننده دمای کاتالیزور کاملاً انعطاف‌پذیر بوده و قابلیت تعریف‌سازی محدوده دمای فعال‌سازی را بر اساس نوع کاتالیزور دارا است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت نویسندگان

محمدجواد رستم اف: ایده پردازی، طراحی نمونه، نرم افزار، آماده سازی نتایج اولیه، تحلیل نتایج، نگارش متن اولیه و نهایی

سیدمحمد عرب: راهنمایی پژوهشی، اعتبارسنجی، ویرایش متن اولیه و نهایی، تصحیح متن

عسگر مینائی: مشاور پژوهشی، نرم افزار، تحلیل نتایج، تصحیح متن اولیه و نهایی، اعتبارسنجی

حسنعلی رسولی: اعتبارسنجی، تحلیل نتایج، تصحیح متن نهایی، راهنمای پژوهشی

منابع مالی

منابع مالی ندارد.

References

[1] Jena, S., and M. Padhy. “The Environment and Catalytic Converter—A Review.” Materials International 7, no. 1 (2025): 1–21.

[2] Dadgar, Arsalan, Afsaneh Maleki, Leila Mahdavian, and Fereydoon Khazali. "Computational Investigation of the Catalytic Converter Performance of single-wall Carbon Nanotubes Doped with Titanium." Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials 35, no. 6 (2025): 4511-4524.

[3] Soham, P., B. Sapanakharat, and K. Ajinkya. “Modification of Catalytic Converters Thereby Bettering Their Performance and Reducing the Cost.” National Conference on Emerging Trends in Science and Technology (2018): 45–50.

[4] Kalam, M. A., H. H. Masjuki, Mohd Redzuan, T. M. I. Mahlia, M. A. Fuad, M. Mohibah, K. H. Halim et al. "Development and test of a new catalytic converter for natural gas fuelled engine." Sadhana 34, no. 3 (2009): 467-481.

[5] Hashemi Darian, J. Selection of the Optimal Catalytic Converter for Spark Ignition Engines Based on Engine Performance and Emission Conditions. Master’s thesis, Department of Mechanical Engineering, Automotive Powertrain, K. N. Toosi University of Technology, 2018. Supervisor: Amir Hossein Shamkhi. (in Persian).

[6] Lee, Seokhwan, Choongsik Bae, Yongpyo Lee, and Taesik Han. "Effects of engine operating conditions on catalytic converter temperature in an SI engine." In International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition. 2002.

[7] Tyagi, R., and R. Ranjan. “Effect of Heating the Catalytic Converter on Emission Characteristic of Gasoline Automotive Vehicles.” International Journal of Ambient Energy (2002): 1–7.

[8] Zuo, Q., Y. Xie, and Q. Guan. “Effect of Critical Dual-Carrier Structure Parameters on Performance Enhancement of a Dual-Carrier Catalytic Converter and the Gasoline Engine System.” Energy Conversion and Management (2019): 1–18.

[9] Hajimirzaee, S., and A. Doyle. “3D-Printed Catalytic Converters with Enhanced Activity for Low-Temperature Methane Oxidation in Dual-Fuel Engines.” Fuel 274 (2020): 1–11

[10] Mohallem, Nelcy Della Santina, Marcelo Machado Viana, and Ronald A. Silva. "Automotive catalysts: performance, characterization and development." New trends and developments in automotive industry (2011): 347-364.

[11] Thakur, Arpit, Ashish Sharma, Rajeev Kumar, Shubham Sharma, Nagaraj Patil, Sumit Kanchan, VK Bupesh Raja, Abinash Mahapatro, Deepak Gupta, and Ehab El Sayed Massoud. "Numerical study of catalytic converter geometries and their impact on exhaust back pressure and energy conversion in engine exhaust systems using parametric simulation: insights into non-equilibrium thermodynamics." International Journal of Chemical Reactor Engineering 23, no. 1 (2025): 61-76.

[12] Huu-Quan, Do, Ali Mohammad Rostami, Mozafar Shokri Rad, Mohsen Izadi, Ahmad Hajjar, and Qingang Xiong. "3D numerical investigation of turbulent forced convection in a double-pipe heat exchanger with flat inner pipe." Applied Thermal Engineering 182 (2021): 116106.

[13] Mokhtari, A., and M. Saadat. "Light-Off Temperatures and Conversion Efficiency Analysis in Catalytic Converters: A Numerical Modeling Approach." Iranica Journal of Energy and Environment 16, no. 4 (2025): 706-719.

[14] Buruiana, Daniela Laura, Adrian Sachelarie, Claudiu Butnaru, and Viorica Ghisman. “Important Contributions to Reducing Nitrogen Oxide Emissions from Internal Combustion Engines.” International Journal of Environmental Research (2021).

[15] Ghazikhani, M., and M. Hatami. “Exergy Recovery from the Exhaust Cooling in a DI Diesel Engine for BSFC Reduction Purposes.” Energy (2013): 1–8