



Optimization of the Cooling System of a Gasoline Internal Combustion Engine to Reduce Fuel Consumption and Exhaust Emissions

Hadi Ghasemi Zavaragh^{1*}

¹Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 06.29.2021
Revised: 08.30.2021
Accepted: 10.10.2021

Keyword:
Internal Combustion Engines
Cooling System
Water Pump
Thermostat
Fuel

***Corresponding Author:**
Hadi Ghasemi Zavaragh
Email: haghasemi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Due to the low efficiency of internal combustion engines, a large part of the chemical energy of the fuel they consume is dissipated to the environment as heat through a cooling system. Unfortunately, most engines still use the classic cooling system, which is practically unable to cool the engine optimally under different operating conditions, and this category increases fuel consumption and increases emissions from engines. Therefore, in this paper, first, a classic cooling system was tested and its performance recorded. Then, in the cooling system of the same engine, a mechanical water pump and mechanical thermostat were respectively replaced with electric water pump and an electronic thermostat. After this upgrade, the engine was tested under the same conditions as the classic mode, and its results were compared with the results obtained from the classic system. The results illustrated that if a good and complete program is used to control the electric water pump and electronic thermostat, fuel consumption was reduced by at least 1.19% and at most 4.33% compared to the classic system in addition to increasing the lifespan of engine parts. In addition, the engine warm-up time was reduced by a minimum of 6.25% and a maximum of 18.84%. Moreover, HC and NO pollution in most tests showed a minimum of 15.32% and a maximum of 70% and a minimum of 9.28% and a maximum of 46.58%, respectively.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

By performing optimal heat transfer in internal combustion engines, benefits such as increasing component life and engine efficiency, reducing exhaust emissions and fuel consumption, eliminating the possibility of knock and rapid heating of the car cabin in the cold months can be achieved. This research was undertaken in order to optimize a water-cooling system.

By examining available research articles, it was possible to observe that the cooling system used in today's cars has not changed to a great extent from the old types. In these systems, the water pump draws its power from the motor by means of a belt or chain, and by rotating of the water pump, the cooling fluid in the motor rotates. In this type of cooling system, by changing the engine speed, the water pump speed and the rotation speed of the cooling fluid in the engine water channels also change in proportion to the engine speed. Therefore, the specifications of the water pump in internal combustion engines were designed based on the full load mode of the engine and its low speed, and for maximum ambient temperature.

However, these operating conditions (full load mode - low engine speed) represent only 5% of engine running time. Therefore, in the remaining 95% of the engine operation time, the water pump pumps more coolant than the engine needs. This unnecessary pumping of the coolant causes some of the engine's output power to be lost at the water pump. On the other hand, this excess pumping of the coolant increases the heating time of the engine, as a result of which the fuel consumption of the engine, the amount of pollution from the exhaust and the amount of wear of the engine parts increase.

Moreover, starting the radiator fan as needed with the water pump consumes a considerable amount of engine power. On the other hand, the mechanical thermostat used in conventional cooling systems responds to changes in the running conditions of the motor with a delay. This delay causes the operating temperature of the engine to move away from optimal temperature, increasing fuel consumption and engine emissions.

Methodology

A Ford MVH418 engine was used for this research. This engine was a four-stroke, four-cylinder engine with water cooling system and gasoline fuel injection system mounted on a brake dynamometer for testing. To collect engine performance data (torque, engine speed, fuel consumption, inlet air flow to the engine, temperature change, pressure and flow of engine cooling fluid, engine emissions), as well as control of electric water pump, electronic thermostat, fan and to stabilize the engine speed at a certain speed (by controlling the engine throttle), a program was provided using Lab View software.

To test the performance of the engine cooling system under different operating conditions, a test board consisting of eight tests at different engine speeds and loads (shown in Table 1) was designed and both classic and controlled cooling systems in accordance with these tables (15 minutes for each test) were tested.

First, the engine was tested with the classic cooling system in the eight modes of Table 1, and the results related to the classic cooling system were fully measured and stored.

Following the test, the water pump and alternator belt were disassembled and a shorter belt was replaced to drive the alternator, and an electric water pump was mounted

to the engine cooling system (before the mechanical water pump, which no longer rotated). By opening the thermostat housing, the mechanical thermostat was removed from the engine and a three-way valve controlled by an electric piston was added to the engine cooling system.

Table 1. Speed and loads used to test the engine.

Test Nu.	Engine Speed (RPM)	Engine Load (%)
1	1500	15
2	2000	15
3	2500	15
4	3000	15
5	1500	30
6	2000	30
7	2500	30
8	3000	30

Results and discussion

Figure 1 shows the fuel economy of the engine during eight tests when the engine cooling system was replaced by a controlled cooling system.

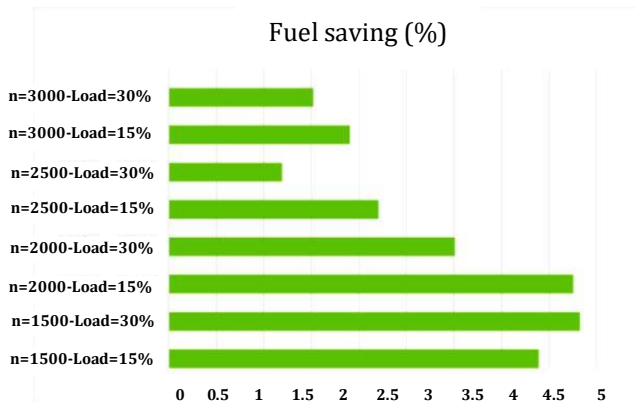


Figure 1. Percentage of fuel saved by the controlled cooling system.

This reduction in fuel consumption was due to the fact that the mechanical water pump was designed for the critical state of the engine, and since the engine operated in the critical state for only 30% of its duty cycle, the remaining 70% of the water pump consumed more than the engine needs. It sent cooling fluid which increased the fuel consumption of the engine. Since the electric water pump was operated by the controller only to the extent required by the motor, the motor fuel consumption in this mode was lower than in the classic mode.

Conclusion

- In all tests, the amount of engine fuel consumption in cooling mode with controlled system was reduced compared to the classic mode, and this reduction in consumption was at least 1.19 percent and at most 4.33 percent.
- Engine heating time in the controlled mode was reduced by at least 6.25% and by a maximum of 18.84% compared to traditional mode.
- Because the electronic thermostat was used in the controlled cooling system, the hysteresis residue of the mechanical thermostat was removed and the electronic thermostat reacted immediately to the slightest change in engine temperature conditions and reduced engine temperature fluctuations.
- By using the controlled cooling system, the power consumption of the water pump and fan was significantly reduced.
- The amount of HC pollution from the engine in the first seven tests was reduced by at least 15.32% and at most 70% compared to the classical system and only slightly increased (4.5%) in test number eight.
- The amount of NO pollution from the engine in the first six tests was reduced by a minimum of 9.28% and a maximum of 46.58% compared to the classic system.

بهینه‌سازی سیستم خنک‌کاری یک موتور احتراق داخلی بنزینی به منظور کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی از اگزوز

هادی قاسمی زوارق^{*۱}

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

کلید واژگان:

موتورهای احتراق داخلی
سیستم خنک‌کاری
پمپ آب
ترموستات
مصرف سوخت

با توجه به راندمان پایین موتورهای احتراق داخلی، قسمت بسیار زیادی از انرژی شیمیایی سوخت مصرفی آن‌ها به صورت گرما از طریق سیستم خنک‌کاری به محیط دفع می‌شود. متأسفانه در بیشتر موتورها، هنوز از سیستم خنک‌کاری کلاسیک استفاده می‌شود که این نوع سیستم عملاً قادر به خنک‌کاری بهینه موتور در شرایط مختلف کاری آن نیست و این مقوله باعث افزایش مصرف سوخت و زیاد شدن آلاینده‌های خروجی از موتور می‌شود. از این‌رو در این مقاله ابتدا یک سیستم خنک‌کاری کلاسیک مورد آزمون قرار گرفت و عملکرد آن ثبت شد، سپس در سیستم خنک‌کاری همان موتور، پمپ آب مکانیکی با یک پمپ آب برقی و ترموستات مکانیکی با یک ترموستات الکترونیکی جایگزین شد و پس از این ارتقا، موتور در همان شرایط حالت کلاسیک آزمون شد و نتایج آن با نتایج به دست آمده از سیستم کلاسیک مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اگر از یک برنامه خوب و کامل برای کنترل پمپ آب برقی و ترموستات الکترونیکی استفاده شود در مقایسه با سیستم کلاسیک علاوه بر بالا رفتن عمر قطعات موتور، میزان مصرف سوخت حداقل ۱.۱۹ درصد و حداکثر ۴.۳۳ درصد کاهش می‌یابد، همچنین مدت زمان گرم شدن موتور حداقل ۶.۲۵ درصد و حداکثر ۱۸.۸۴ درصد کم می‌شود. علاوه بر این‌ها آلاینده‌های HC و NO در بیشتر آزمون‌ها به ترتیب حداقل ۱۵.۳۲ درصد، حداکثر ۷۰ درصد و حداقل ۹.۲۸ درصد، حداکثر ۴۶.۵۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

*نویسنده مسئول: هادی قاسمی زوارق

پست الکترونیکی:

haghasemi@tvu.ac.ir

مقدمه

موتورهای احتراق داخلی به دلیل استفاده بسیاری که دارند در بین پژوهشگران دانشگاهی و صنعتی جایگاه ویژه‌ای دارند. با انجام انتقال حرارت بهینه در این موتورها می‌توان به مزایایی همچون افزایش طول عمر قطعات، بالا رفتن راندمان موتور، کاهش میزان گازهای خروجی از اگزوز، کم شدن مصرف سوخت، از بین رفتن احتمال کوبندگی و گرم شدن سریع کابین خودرو در ماه‌های سرد سال اشاره کرد. موارد بیان‌شده، تحقیق برای بهینه کردن سیستم خنک‌کاری موتور را ضروری می‌سازد. این مقاله به‌منظور بهینه‌سازی یک سیستم خنک‌کاری از نوع آب‌خنک انجام شده است که این نوع از سیستم خنک‌کاری از اجزا: رادیاتور، پمپ آب، ترموستات، لوله‌های رابط و فن تشکیل شده است.

با بررسی مقالات موجود می‌توان دید که سیستم خنک‌کاری به‌کاررفته در خودروهای امروزی نسبت به انواع قدیمی آن تغییرات زیادی نداشته‌اند. در این سیستم‌ها پمپ آب، نیروی خود را از موتور به‌وسیله تسمه یا زنجیر می‌گیرد و با چرخش آن، سیال خنک‌کاری در موتور به دوران درمی‌آید. در این نوع از سیستم خنک‌کاری با تغییر دور موتور، دور پمپ آب و سرعت چرخش سیال خنک‌کننده در کانال‌های آب موتور نیز متناسب با دور موتور تغییر پیدا می‌کند؛ از این‌رو مشخصات پمپ آب در موتورهای احتراق داخلی براساس حالت تمام‌بار موتور و دور کم آن، و برای حداکثر دمای محیط طراحی می‌شود. اما این شرایط کاری (حالت تمام‌بار - دور موتور کم) فقط ۵ درصد از زمان کاری موتور را دربرمی‌گیرد [۱]. از این‌رو در ۹۵ درصد باقیمانده از مدت‌زمان کاری موتور، پمپ آب مقدار بیشتر از حد موردنیاز موتور، سیال خنک‌کاری را پمپ می‌کند. این پمپاژ بی‌هوده سیال خنک‌کاری موجب می‌شود که مقداری از توان تولیدی موتور به‌وسیله پمپ آب به‌هدر رود. از طرفی این پمپاژ بیش‌ازحد موردنیاز سیال خنک‌کاری باعث افزایش مدت‌زمان گرم شدن موتور می‌شود که در نتیجه آن مصرف سوخت موتور، میزان آلایندگی خروجی از اگزوز و میزان سایش قطعات موتور، افزایش می‌یابد. علاوه‌بر پمپ آب، شروع به کار کردن فن رادیاتور در مواقع موردنیاز نیز به همراه پمپ آب، مقدار قابل‌توجهی از توان موتور را مصرف می‌کند و از طرفی ترموستات مکانیکی به‌کاررفته در سیستم‌های خنک‌کاری رایج، نسبت به تغییرات وضعیت کاری موتور با تأخیر زمانی، واکنش نشان می‌دهد که بنابراین دمای کارکردی موتور در چنین شرایطی از دمای بهینه آن دورتر می‌شود که این موضوع باعث افزایش مصرف سوخت و آلایندگی‌های خروجی از موتور می‌شود.

موارد پیش‌گفته نشان‌دهنده این موضوع است که سیستم خنک‌کاری رایج در موتورهای احتراق داخلی دارای ایرادات بسیاری می‌باشند؛ از این‌رو امروزه به دلیل توسعه یافتن تجهیزات الکترونیکی، پژوهشگران و صاحبان صنایع خودروسازی درصدد استفاده از این تجهیزات برای بهینه کردن سیستم خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی برآمده‌اند.

در این خصوص در یک پژوهش از یک شیر برقی به‌جای ترموستات مکانیکی و از یک پمپ آب الکتریکی به‌جای پمپ آب مکانیکی استفاده‌شده است و در آن، تأثیرات تغییر دبی آب مبادله شده بین رادیاتور و بلوک سیلندر بر دمای موتور بررسی شده است. در این تحقیق، موتور در حالت خاموش می‌باشد و به‌جای موتور، گرما از یک مبدل گرمایی که در آن بخار مافوق گرم جریان دارد به آب خنک‌کاری موتور منتقل می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق، کاهش ۳ الی ۴ درصدی مصرف سوخت را گزارش می‌کند [۲]. در یک مطالعه دیگر از یک فن دور پایین که با یک کلاچ روغنی کار می‌کند برای کاستن از توانی که سیستم خنک‌کاری از موتور مصرف می‌کند استفاده شده است که در آن فن با دورهای متفاوت آزمون شده و در بهینه‌ترین حالت، مصرف سوخت موتور ۳ درصد کاهش یافته است [۳]. برای دستیابی به کنترل دمای موتور به شکل دقیق‌تر، با تغییر دادن دبی سیال خنک‌کننده عبوری از موتور به‌وسیله یک ترموستات الکترومگنتیک، یک مطالعه انجام شده است که در آن، یک موتور دیزل کوچک در دو حالت کلاسیک و در حالتی که از ترموستات الکترومگنتیک و پمپ آب برقی استفاده شده آزمون شد. نتایج نشان داد که با تغییر ترموستات و پمپ آب کلاسیک، مدت‌زمان گرم شدن موتور کاهش می‌یابد [۴]. استفاده از مزیت ایجاد جوشش استخری باعث شده است که در یک مطالعه دیگر از یک پمپ آب الکتریکی استفاده شود که در آن فقط زمانی که در سیال خنک‌کننده جوشش

استخری ایجاد می‌شود پمپ آب شروع به کار می‌کند. این روش باعث کاهش ۶۰ درصدی دبی آبی که در موتور دوران می‌کند می‌شود و در حالت استاندارد، زمان گرم شدن موتور ۳۰ دقیقه کاهش می‌یابد [۵]. در تحقیقی دیگر استفاده از پمپ آب برقی و ترموستات با کنترل الکتریکی تحلیل شده است. در شبیه‌سازی انجام‌شده سیستم خنک‌کاری با استراتژی‌های کنترلی متفاوت بررسی شده است و هدف اصلی از این تحقیق کاهش مدت‌زمان گرم شدن موتور است که برای دستیابی به این امر یک مدل تک‌بعدی GT-Suite با یک مدل سه‌بعدی CFD موتور کوپل شده است [۶]. بر روی یک خودروی نظامی به‌منظور دستیابی به کمترین توان مصرفی توسط اجزای سیستم خنک‌کاری از موتور، یک مطالعه صورت گرفته است که در آن، دمای توصیه‌شده موتور، فن، پمپ آب و ترموستات بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داده است که با به‌کاربردن یک استراتژی درست می‌توان در شرایط دمای موتور یکسان، میزان مصرف توان اجزای سیستم خنک‌کاری را ۱۳ درصد کاهش داد [۷]. در یک پژوهش دیگر با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی متفاوت یک متدولوژی جدید برای مطالعه سیستم خنک‌کاری موتور ایجاد شده است با استفاده از این متدولوژی در یک موتور بنزینی توربوشارژدار مدل سیستم‌های خنک‌کاری، روغن‌کاری، مولد قدرت، تهویه و تنفس و تخلیه طراحی شده‌اند و با این مدل کلی، مدت‌زمان گرم شدن حالت گذرای موتور در چرخه رانندگی (NEDC) بررسی شده که در نتیجه آن پارامترهای کلیدی مؤثر بر مصرف سوخت مشخص شده است [۸]. مدل خودرو، سیستم خنک‌کاری، روغن‌کاری و قطعات مرتبط با توان اصطکاکی موتور به شکل یک‌بعدی مدل‌سازی و به هم متصل شده‌اند و سپس این مدل با آزمون‌های آزمایشگاهی کالیبره شده‌اند. پمپ الکتریکی، سیستم خنک‌کاری مجزا برای بلوک سیلندر و سرسیلندر، پمپ روغن و ترموستات کنترل‌دار به این مدل اضافه شده است و تأثیرات آن‌ها بر مصرف سوخت در یک چرخه رانندگی (NEDC) بررسی شده است. ترموستات کنترل‌دار در مقایسه با ترموستات معمولی به‌طور متوسط ۳ درصد، پمپ روغن کنترل‌دار نسبت به پمپ روغن معمولی حدود ۱/۴ درصد و پمپ آب برقی نیز در قیاس با پمپ آب مکانیکی تقریباً ۰/۸ درصد موجب کاهش مصرف سوخت شده است سیستم خنک‌کاری مجزای بلوک سیلندر و سرسیلندر نسبت به حالت کلاسیک آن در حدود ۰/۷۵ درصد مصرف سوخت را کاهش می‌دهد [۹]. در یک مطالعه دیگر برای به حرکت درآوردن سیال خنک‌کاری در موتور یک خودروی تجاری از یک سیستم مرکب استفاده شده است؛ بدین‌صورت که توسط یک کلاچ الکتریکی، پمپ آب می‌تواند هم نیروی محرک خود را از میل‌لنگ موتور توسط یک تسمه بگیرد و هم از یک موتور الکتریکی DC توان موردنیاز خود را دریافت کند؛ در حالتی که موتور تحت بار است پمپ آب توسط تسمه نیروی محرک خود را از میل‌لنگ می‌گیرد و در بقیه حالت‌ها با عملکرد کلاچ الکتریکی پمپ آب از میل‌لنگ جدا و به موتور الکتریکی DC وصل می‌شود. در این آزمون از یک فن با دور متغیر و یک شیر الکتریکی به‌جای ترموستات استفاده شده است. همچنین از یک مبدل حرارتی در خط آگزوز (بعد از کاتالیست) برای گرم کردن آب خنک‌کاری موتور استفاده شده است. مجموعه این تجهیزات باعث گرم شدن سریع موتور و افزایش راندمان حرارتی و کاهش دودهای خروجی از آن شده است [۱۰]. در یک پژوهش دیگر به‌جای پمپ آب مکانیکی و فن، از سرو موتورهای کنترل‌دار و به‌جای ترموستات و اکس‌دار معمولی از یک شیر سه‌طرفه کنترل‌دار استفاده شده است. برای کنترل تجهیزات جایگزین‌شده، از کنترل‌کننده‌های مختلف استفاده شده و عملکرد این کنترل‌کننده‌ها از نظر توان مصرفی تجهیزات و دمای موتور زیر نظر گرفته شده است که در نهایت مشخص شده است که کنترل‌کننده PI و Bang-Bang نتایج بهتری می‌دهند [۱۲]. به دلیل اینکه دبی آبی که در موتور گردش می‌کند برای بحرانی‌ترین دمای موتور طراحی شده است؛ میزان دبی آب چرخشی در موتور بیشتر از حد موردنیاز است؛ از این‌رو در یک مطالعه جدید یک سیستم خنک‌کاری مجزا برای بلوک سیلندر و سرسیلندر طراحی کرده‌اند که هرکدام با دبی متفاوتی عمل می‌کنند و روی این موضوع آنالیز مدیریت حرارتی موتور انجام داده‌اند. برای بهینه کردن هرچه بهتر سیستم، یک سوپاپ سروی موتوردار و یک پمپ آب با دور متغیر نیز به سیستم خنک‌کاری اضافه شد. نتایج نشان داده است که ۳۰ درصد دبی اولیه برای خنک‌کاری موتور کفایت می‌کند و در نتیجه این تغییرات، افت اصطکاکی موتور ۱۰ درصد و تلفات حرارتی آن ۸ درصد کاهش می‌یابد که در نتیجه آن‌ها راندمان حرارتی ۳ درصد

کاهش می‌یابد [۱۱]. در مطالعه‌ای دیگر از یک سیستم خنک‌کاری دوفازی (ترکیب حباب‌های هوا و آب) برای بهینه کردن سیستم خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی استفاده شده است [۱۲]. در پژوهشی دیگر رحمتی‌نژاد و همکاران بهینه‌سازی ابعاد رادیاتور سیستم خنک‌کاری یک موتور احتراق داخلی با الگوریتم ژنتیک را بررسی کرده‌اند [۱۳]. در مطالعه حقیقت و همکارانش یک مدل کنترلی برای سیستم خنک‌کاری موتور توسعه داده شده است تا کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌های موتور با استفاده از اجزای سیستم خنک‌کاری قابل کنترل همانند واترپمپ برقی، فن برقی و ترموستات حرارتی صورت پذیرد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از این مدل نشان داد که می‌توان در این حالت، مصرف سوخت را ۱.۱ درصد و هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسیدکربن را به ترتیب ۵.۳ درصد و ۶.۱ درصد کاهش داد [۱۴]. روش‌های کنترلی رایج، دمای سیال خنک‌کاری موتور را برای رسیدن به یک مقدار مشخص تنظیم می‌کند اما فنگ و همکارانش یک کنترلر برای مینی‌م کردن مصرف سوخت با استفاده از حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی طراحی کرده‌اند که تابع هزینه کل مصرف سوخت است [۱۵]. قاسمی زوارق و همکارانش مزایا و معایب نصب ترموستات معمولی بر روی یک موتور بنزینی را به‌دقت بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده است که ترموستات‌های معمولی موجب سریع‌تر گرم شدن موتور می‌شوند و در عین حال باعث نوسان شدید دمای سیال خنک‌کاری می‌شوند که این امر می‌تواند موجب افزایش آلایندگی‌های خروجی از موتور و ایجاد صدمات خستگی در قطعات موتور شود [۱۶]. علیرضا کاللی یک سیستم خنک‌کاری خودکار را طراحی و بر روی یک موتور بنزینی با استفاده از تکنیک کنترل پیش‌گویانه (MPC) اجرا کرده است. این سیستم طراحی شده، عملکرد برتری را از نظر مدیریت حرارتی موتور در مقایسه با سیستم‌های خنک‌کاری معمولی دارد. این ساختار کنترلی بدین جهت انتخاب شده است که به راحتی با سیستم کنترل چندمتغیره سازگاری پیدا می‌کند و تنظیم آن آسان است [۱۷].

در بیشتر مقالات بالا کنترل دبی ارسالی پمپ آب برقی فقط با استفاده از دمای آب خروجی موتور صورت می‌گیرد که به دلیل نوسان بیش از اندازه این پارامتر، کنترل پمپ آب با این پارامتر، چندان دقیق صورت نمی‌گیرد؛ از این رو در این مطالعه، به جای استفاده از یک پارامتر (دمای آب خروجی از موتور) از چندین پارامتر (دمای آب ورودی و خروجی به موتور و رادیاتور/ دور موتور/ دبی آب ورودی به موتور و خارج شده از خروجی و خط بای‌پس و ...) برای کنترل بهینه دبی آب ارسالی توسط پمپ آب به بدنه موتور استفاده شده است. همچنین برخلاف پژوهش‌های پیشین که در آن‌ها بررسی عملکرد سیستم خنک‌کاری موتور بیشتر در حالت موتور خاموش (درحالی که گرمای منتقل شده از موتور به سیستم خنک‌کاری توسط یک مبدل حرارتی و از یک منبع گرمایی بیرونی انجام شده) بررسی شده است، در این تحقیق با وجود مشکل بودن این موضوع برای دقیق و واقعی بودن آنالیزهای سیستم خنک‌کاری موتور، کلیه آزمون‌ها و بررسی‌ها در حالت موتور روشن و واقعی انجام شده است.

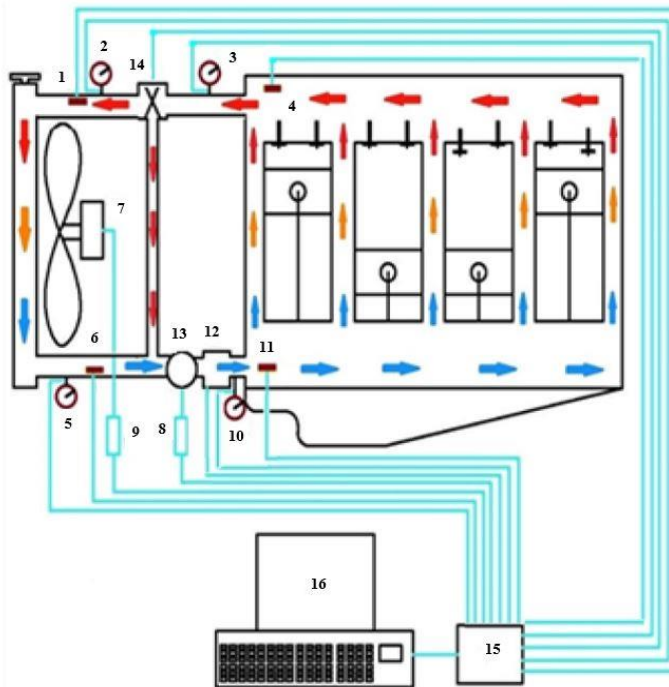
مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از یک موتور چهارزمانه، چهار سیلندر، آب خنک، انژکتوری بنزینی Ford MVH4۱۸ که بر روی یک دینامومتر ترمزی سوار شده، استفاده شده است. مشخصات این موتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات تکنیکی موتور استفاده شده برای آزمون.

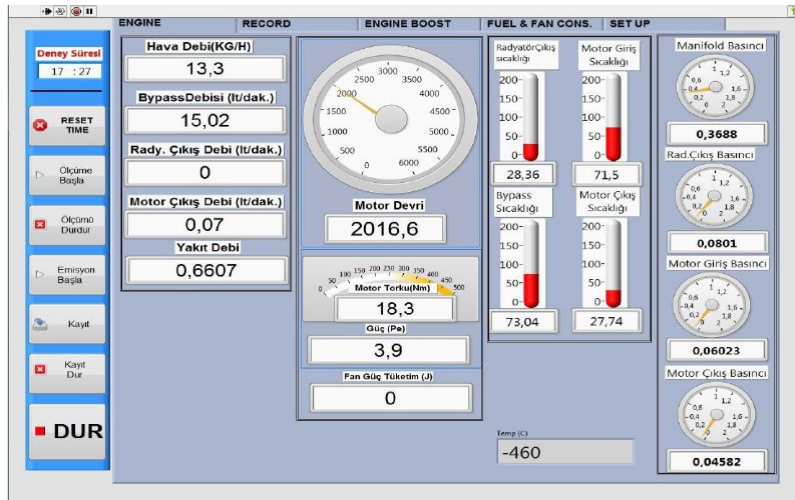
Ford MVH۴۱۸	نوع موتور
DOHC-۱۶V ردیفی چهار سیلندر	تعداد و تیب سیلندرها
۱-۳-۴-۲	ترتیب احتراق
۸۰/۶۰ میلی‌متر	قطر سیلندر
۸۸ میلی‌متر	کورس
۱۷۹۶ سانتی‌متر مکعب	حجم موتور
۱۰:۱	نسبت تراکم
۹۳ کیلووات (در ۶۲۵۰ دور بر دقیقه)	توان حداکثر
۱۵۷ نیوتن متر (در ۴۵۰۰ دور بر دقیقه)	گشتاور حداکثر
۹۰۰ دور بر دقیقه	دور آرام
ال پی جی - بنزین بدون سرب	سوخت
BOSH KE-Jetronik	سیستم سوخت‌رسانی
۶۰ درجه میل‌لنگ	آوانس باز شدن سوپاپ گاز
۵۴ درجه میل‌لنگ	ریتارد بسته شدن سوپاپ گاز
۵۴ درجه میل‌لنگ	آوانس باز شدن سوپاپ دود
۶۰ درجه میل‌لنگ	ریتارد بسته شدن سوپاپ دود

در این تحقیق همانند شکل ۱ سیستم خنک‌کاری کلاسیک تغییر داده شده و برای اندازه‌گیری تأثیرات این تغییرات، تجهیزات اندازه‌گیری مطابق شکل به سیستم موتور اضافه شده است.

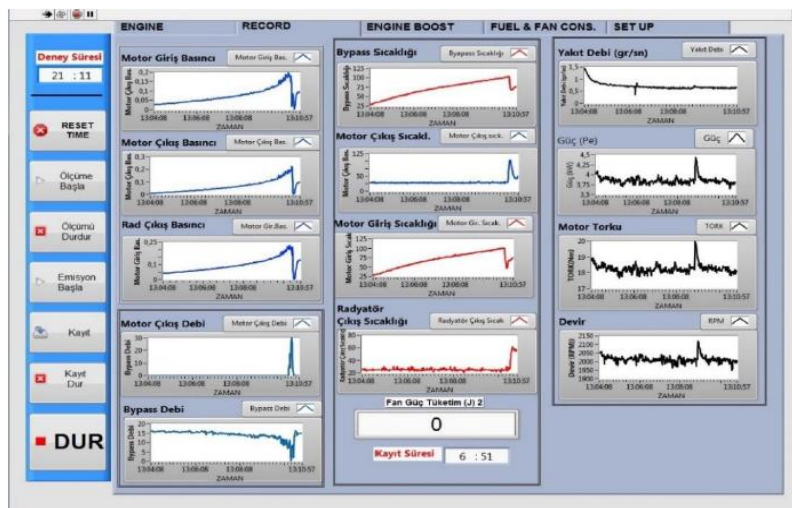


شکل ۱. شماتیک سیستم خنک‌کاری تست‌شده.
 (۱۲) اندازه‌گیر دبی آب ورودی به موتور - (۷) شمارنده دور فن - (۹) کنترل‌کننده فن - (۱۵) سخت‌افزار اندازه‌گیری و کنترل - (۱۶) کامپیوتر
 (۱۰۱۱،۶،۴) ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما - (۲،۳،۱۰ و ۵) فشارسنج - (۱۴) ترموستات الکترونیکی - (۱۳) پمپ آب برقی - (۸) کنترل‌کننده پمپ آب -

برای جمع‌آوری داده‌های عملکردی موتور (گشتاور، دور موتور، مصرف سوخت، دبی هوای ورودی به موتور، تغییر دما، فشار و دبی سیال خنک‌کاری موتور، میزان دودهای خروجی از موتور) و همچنین کنترل پمپ آب برقی، ترموستات الکترونیکی، فن و همچنین برای تثبیت دور موتور در یک دور معین برای انجام یک آزمون خاص به‌وسیله کنترل دریچه گاز موتور، یک برنامه با استفاده از نرم‌افزار Lab View فراهم شد که صفحه اصلی آن و نمونه‌ای از قسمت نمایش و ذخیره پارامترها توسط این برنامه در شکل ۲ و ۳ نمایش داده شده است.



Şekil ۲. برنامه تهیه‌شده برای نمایش پارامترهای موتور.



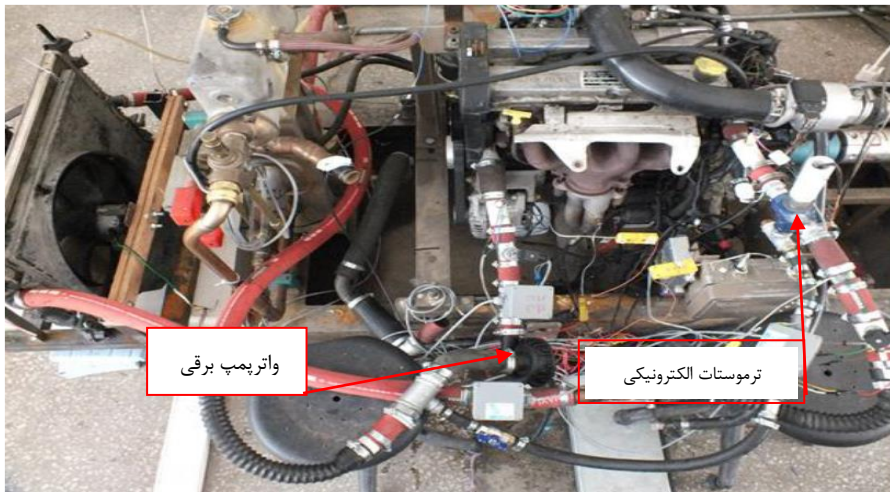
Şekil ۳. برنامه تهیه‌شده برای ذخیره و نمایش پارامترهای عملکردی موتور.

برای آزمون عملکرد سیستم خنک‌کاری موتور در شرایط مختلف کاری، یک تابلوی آزمون که از هشت آزمون در دورها و بارهای مختلف موتور تشکیل شده و در جدول ۲ نشان داده شده است طراحی گردید و هر دو سیستم خنک‌کاری کلاسیک و کنترل‌دار مطابق با این جدول و برای هر آزمون به مدت ۱۵ دقیقه مورد تست قرار گرفت.

جدول ۲. دور و بارهای مورد استفاده برای تست موتور.

دور موتور (n بر حسب دور بر دقیقه)	بار موتور (Load بر حسب %)	
۱۵۰۰	۱۵	۱
۲۰۰۰	۱۵	۲
۲۵۰۰	۱۵	۳
۳۰۰۰	۱۵	۴
۱۵۰۰	۳۰	۵
۲۰۰۰	۳۰	۶
۲۵۰۰	۳۰	۷
۳۰۰۰	۳۰	۸

ابتدا موتور در حالت کلاسیک خود در هشت حالت بالا آزمون و نتایج مربوط به سیستم خنک کاری آن به طور کامل اندازه گیری و ذخیره شد. سپس تسمه گرداننده پمپ آب و آلترناتور موتور دمنواژ و یک تسمه کوتاه تر فقط برای گرداندن آلترناتور جایگزین شد و یک پمپ آب برقی به سیستم خنک کاری موتور درست در محل قبل از واترپمپ مکانیکی (که دیگر توسط موتور چرخانده نمی شود) مونتاژ شد. با باز کردن درب ترموستات، ترموستات مکانیکی از روی موتور برداشته و یک شیر سه طرفه که توسط یک پیستون الکتریکی کنترل می شود در محل بعد از ترموستات به سیستم خنک کاری موتور اضافه شد.



شکل ۴. نمایی از موتور تغییر یافته به سیستم خنک کاری کنترل دار.

برای باز و بسته شدن ترموستات الکتریکی از یک پیستون برقی با حداکثر کورس ۹ میلی متر، سرعت عملکردی ۱۱.۵ میلی متر بر ثانیه و قدرت ۳۰۰ نیوتن استفاده شده است و برای پمپ آب برقی از یک پمپ سانترفیوژ برقی که ماکزیمم دبی آن ۱۱۵ لیتر بر دقیقه، بازه دمایی آن ۴۰- الی ۱۳۰ درجه سلسیوس، ولتاژ کاری آن ۳ الی ۱۵ ولت و حداکثر فشار کاری آن ۵۰۰ کیلو پاسکال است استفاده شد.

پس از انجام تغییرات مکانیکی گفته‌شده در بالا، مکانیزم کنترل‌کننده پمپ آب برقی، ترموستات الکترونیکی و فن طراحی شد. به‌عنوان پارامترهای ورودی برای کنترل‌کننده، مواردی همچون دور موتور، دمای سیال خنک‌کاری در چهار نقطه (خروجی رادیاتور، ورودی موتور، ورودی ترموستات الکترونیکی و خروجی آن)، دبی پمپ آب برقی، گرمای دفع شده از موتور به سیستم خنک‌کاری، بار موتور، درصد باز بودن ترموستات الکترونیکی، دمای رفرنس برای خروجی رادیاتور و موتور، حداقل و حداکثر دمای خروجی موتور اندازه‌گیری شد.

برای محاسبه گرمای دفع شده به سیستم خنک‌کاری از نتایج هشت آزمون انجام‌شده موتور (مطابق با جدول (۲)) در حالت کلاسیک موتور استفاده شده است؛ بدین‌صورت که برای هر هشت آزمون، دبی سیال پمپ شده به موتور اندازه‌گیری شد و با ضرب آن در ظرفیت گرمایی ویژه سیال خنک‌کاری و میانگین دمای ورودی و خروجی موتور، میزان گرمای دفع شده به سیستم خنک‌کاری در هر کدام از آزمون‌های هشت‌گانه محاسبه گردید؛ برای مثال برای آزمون ششم داریم:

$$\Delta T_{in-out(ave)} = 3.715^{\circ}C$$

$$\dot{m}_{ave} = 0.709 \text{ kg} / \text{s} \quad (1)$$

$$C_p = 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$q = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \rightarrow q = 0.709 * 4.2 * 3.715 \rightarrow q = 10.43 \text{ kW}$$

حالا با در نظر گرفتن این موضوع که در کلیه حالت‌های کارکردی موتور با سیستم خنک‌کاری کنترل‌دار می‌خواهیم اختلاف دمای بین ورودی و خروجی موتور همیشه یک مقدار ثابت و به اندازه ۸ درجه سلسیوس باشد دبی سیال خنک‌کننده‌ای که پمپ آب برقی باید پمپ کند را محاسبه می‌کنیم:

$$q = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \rightarrow 10.43 = \frac{\dot{m}}{60} * 4.2 * 8 \rightarrow \dot{m} = 18.62 \text{ lit} / \text{min} \quad (2)$$

برای همه هشت آزمون بیان شده در جدول ۲ این محاسبات را انجام و نتایج در جدول ۳ جمع‌آوری شده است:

جدول ۳. داده‌های به‌دست‌آمده برای کنترل دبی پمپ آب برقی.

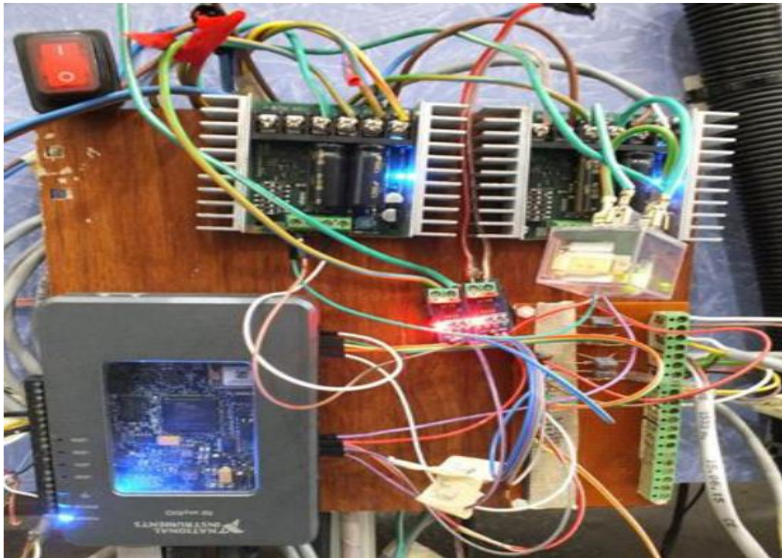
Q (lit/min)	n=۱۵۰۰ (RPM)	n=۲۰۰۰ (RPM)	n=۲۵۰۰ (RPM)	n=۳۰۰۰ (RPM)
Load=۱۵%	۱۳	۱۴.۷۵	۱۹.۶۴	۲۲.۰۷
Load=۳۰%	۱۶.۲۸	۱۸.۶۲	۲۵.۴۶	۳۲.۱۴

در این مرحله یک منحنی سه‌بعدی بر روی داده‌های جدول ۳ عبور داده شد که معادله این منحنی سه‌بعدی به‌عنوان تابع کنترلی برای کنترل دبی سیال پمپ شده توسط پمپ آب برقی در کلیه حالت‌های کارکردی موتور از طرف کنترل‌کننده استفاده می‌شود.

بقیه اطلاعات موردنیاز برای کنترل‌کننده یا از طریق تجهیزات اندازه‌گیری نصب‌شده بر روی موتور که در شکل ۱ نمایش داده شد به کنترل‌کننده داده می‌شود یا بعضی از آن‌ها همانند دمای رفرنس برای خروجی رادیاتور و موتور و حداقل، حداکثر دمای خروجی موتور به دلیل ثابت بودن مقدار آن‌ها به‌صورت دستی به برنامه کنترل‌کننده وارد می‌شوند.

از یک کارت myRIO به عنوان کنترل کننده ای که این اطلاعات به ورودی آن داده می شود استفاده شده است. این کارت بعد از تحلیل داده های ورودی به سه عملگر مورد نظر (پمپ آب برقی- ترموستات الکترونیکی- فن) دستورات لازم را از طریق خروجی خود ارسال می کند. توابع کنترلی این سه عملگر به صورت زیر می باشد:

۱- پمپ آب برقی: کنترل کننده بعد از دریافت دور موتور از سنسور مربوطه و با دانستن مقدار بار موتور، که به صورت دستی وارد می شود از نگاشت پمپ در جدول ۳ میزان مورد نیاز پمپ آب برقی برای دستیابی به دبی مورد نظر را محاسبه و به آن ارسال می کند.



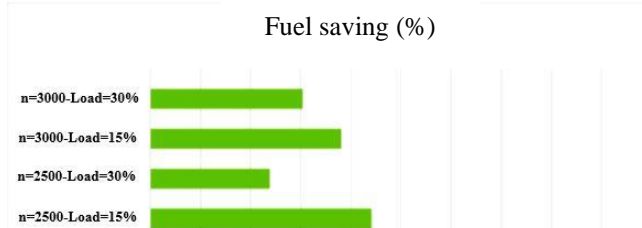
شکل ۵. سخت افزار کنترل کننده به کاررفته برای کنترل واترپمپ برقی.

۲- ترموستات الکترونیکی: کنترل کننده پس از دریافت پارامترهای به کاررفته در فرمول زیر آن ها را در این فرمول جای گذاری می کند و مقدار آن ها محاسبه و با ضرب کردن مقدار به دست آمده در مقدار ماکزیمم کورس ترموستات الکترونیکی (۶ میلی متر) میزان مورد نیاز برای باز بودن شیر را محاسبه می کند و آن ها به همان اندازه باز می کند.

$$Valve(\%) = \frac{T_{val-bef} - T_{eng-ref}}{T_{val-bef} - \left(\frac{T_{eng-in} + T_{rad-out}}{2} \right)} \quad (3)$$

نتایج و بحث

در نمودار ۱ میزان مصرف سوخت صرفه جویی شده موتور برای هشت آزمون مدنظر در حالتی که سیستم خنک کاری موتور از حالت کلاسیک به یک سیستم خنک کاری کنترل دار تغییر یافته است نشان داده شده است.



n=3000-Load=30%

n=3000-Load=15%

n=2500-Load=30%

n=2500-Load=15%

n=2000-Load=30%

n=2000-Load=15%

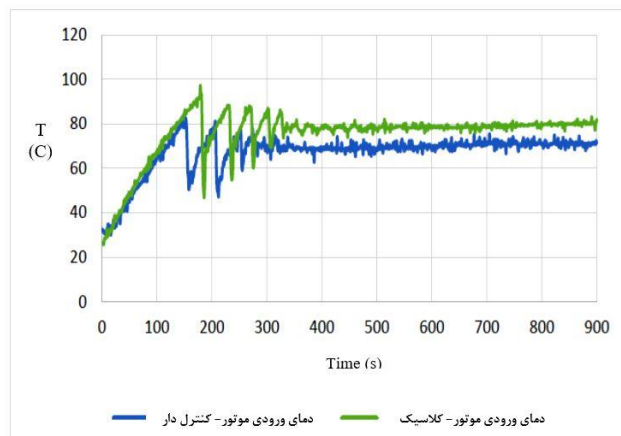
n=1500-Load=30%

n=1500-Load=15%

0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5

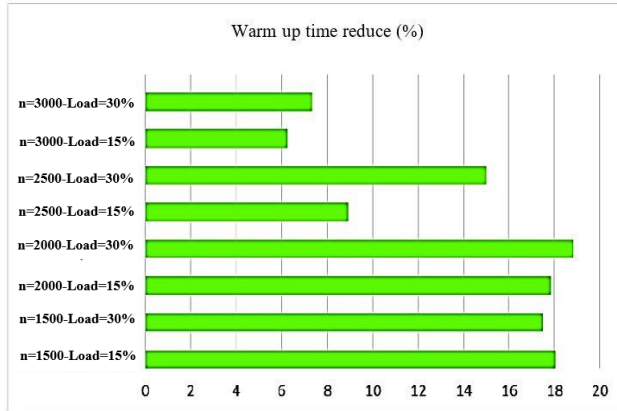
نمودار ۱. درصد سوخت صرفه‌جویی شده به وسیله سیستم خنک‌کاری کنترل‌دار.

این کاهش مصرف سوخت از آنجایی ناشی می‌شود که پمپ آب مکانیکی برای حالت بحرانی موتور طراحی می‌شود و از آنجایی که موتور فقط در ۳۰ درصد از سیکل کاری خود در حالت بحرانی کار می‌کند در ۷۰ درصد باقیمانده پمپ آب با مصرف توان موتور، عملاً بیشتر از حد نیاز موتور به آن سیال خنک‌کاری ارسال می‌کند که این موضوع باعث افزایش مصرف سوخت موتور می‌شود ولی پمپ آب برقی به وسیله کنترل‌کننده فقط در حد نیاز موتور کار می‌کند و از این رو مصرف سوخت موتور در این حالت نسبت به حالت کلاسیک کمتر است. از مزیت‌های دیگر استفاده از سیستم کنترل‌دار کاهش مدت‌زمان گرم شدن موتور و همچنین کاهش نوسانات دمایی موتور و رسیدن سریع‌تر موتور به دمای کارکردی بهینه خود می‌باشد. نمودار ۲ که برای دمای سیال خنک‌کننده در ورودی موتور برای آزمون ششم و دو حالت سیستم خنک‌کاری کلاسیک و کنترل‌دار به دست آمده است نشان می‌دهد کاهش مدت‌زمان گرم شدن موتور و کم شدن نوسانات دمایی آن در حالت کنترل‌دار نسبت به حالت کلاسیک بسیار محسوس و قابل توجه است.



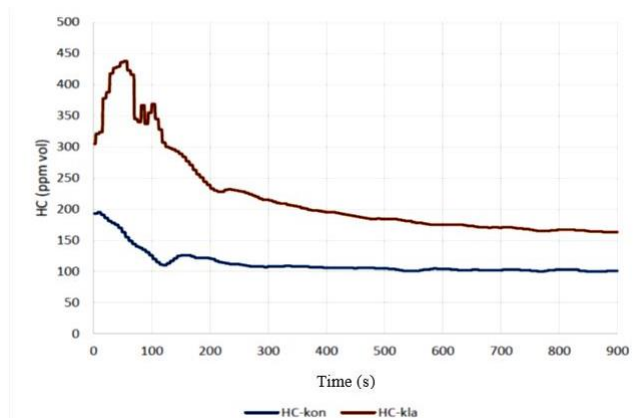
نمودار ۲. مقایسه دمای سیال خنک‌کاری ورودی به موتور در حالت کنترل‌دار با حالت کلاسیک (برای آزمون شماره شش).

کاهش مدت زمان گرم شدن موتور و پایدار شدن هرچه سریع تر نوسانات دمایی موتور، تأثیر به سزایی بر کاهش آلاینده‌گی‌های خروجی از موتور و کم شدن مصرف سوخت موتور دارد. درصد کاهش مدت زمان گرم شدن موتور برای همه هشت آزمون تعریف شده در این تحقیق در نمودار ۳ نشان داده شده است.

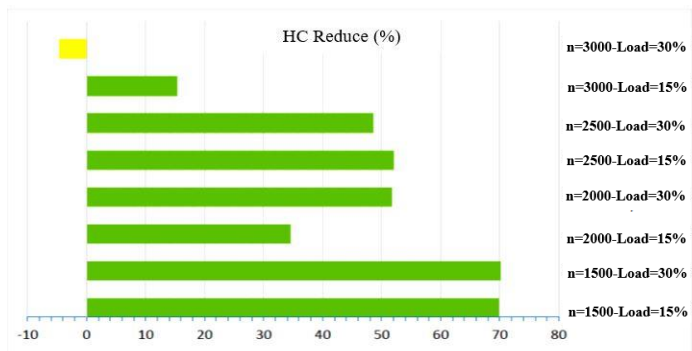


نمودار ۳. درصد کاهش مدت زمان گرم شدن موتور.

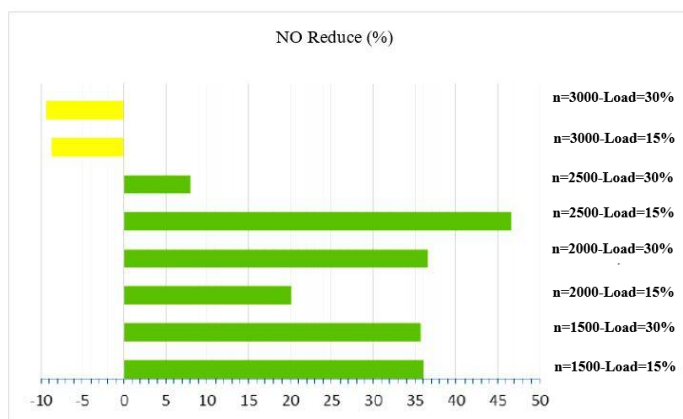
در حالت کارکرد موتور با سیستم خنک کاری کنترل دار چون میزان دبی ارسالی سیال خنک کننده به موتور در حد نیاز آن می باشد؛ نسبت به حالت کلاسیک که اکثراً میزان سیال پمپ شده بیشتر از حد نیاز موتور است مدت زمان گرم شدن موتور کاهش می یابد و از طرفی چون در حالت کنترل دار اختلاف دمای سیال ورودی به موتور با سیال خروجی از موتور ثابت می باشد؛ نوسانات دمایی سیال خنک کننده نیز در حالت کنترل دار نسبت به حالت کلاسیک، کاهش می یابد. سیستم خنک کاری کنترل دار علاوه بر کاستن از مصرف سوخت موتور و توان مصرفی پمپ آب و فن، میزان آلاینده‌گی‌های خروجی از موتور را نیز کاهش می دهد. از مهم ترین آلاینده‌گی‌های خروجی از موتور آلاینده‌های HC و NO می باشد. برای نمونه در آزمون شماره شش تأثیر کنترل دار کردن سیستم خنک کاری بر آلاینده‌گی HC در نمودار ۴ نشان داده شده است.



نمودار ۴. مقایسه میزان HC در دو حالت خنک کاری کلاسیک و کنترل دار (آزمون شماره ۶).



نمودار ۵. درصد کاهش میزان HC در حالت خنک‌کاری کنترل‌دار.



نمودار ۶. درصد کاهش میزان NO در حالت خنک‌کاری کنترل‌دار.

همان‌طور که از دو نمودار ۴ و ۵ مشخص است میزان HC در حالت خنک‌کاری موتور به‌صورت کنترل‌دار بسیار کاهش می‌یابد که دلیل آن کم شدن مدت‌زمان گرم شدن موتور، کاهش دامنه نوسان دمایی موتور و به تبعیت از آن خنک‌کاری هموزن موتور و همچنین کاهش مصرف سوخت در این حالت می‌باشد و تنها در آزمون هشتم که موتور با بیشترین دور و بار کار می‌کند میزان آن به مقدار اندکی افزایش می‌یابد که در مقایسه با درصد کاهش آن در آزمون‌های دیگر قابل چشم‌پوشی است.

همانند HC میزان NO تولیدی موتور برای کلیه هشت آزمون انجام‌شده اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که نمودار ۶ نشان می‌دهد مقدار NO برای شش آزمون اول در حالتی که موتور با سیستم خنک‌کاری کنترل‌دار خنک‌کاری می‌شود نسبت به حالت کلاسیک بسیار کاهش می‌یابد و فقط برای آزمون هفتم و هشتم مقدار بسیار اندکی میزان NO افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از این مسئله است که در دوره‌ها و بارهای زیاد چون میزان دبی ارسالی پمپ آب برقی برای کاهش انرژی مصرفی آن کم می‌باشد دمای ماکزیمم داخل سیلندر اندکی افزایش می‌یابد و این افزایش دما باعث افزایش NO می‌شود که البته مقدار این افزایش NO در مقایسه با کاهش آن در شش حالت قبلی بسیار اندک و قابل اغماض است.

نتیجه گیری

- در همه آزمون‌ها، میزان مصرف سوخت موتور در حالت خنک کاری موتور با سیستم کنترل دار نسبت به حالت کلاسیک کاهش می‌یابد و این کاهش مصرف حداقل ۱.۱۹ درصد و حداکثر ۴.۳۳ درصد است.
- مدت زمان گرم شدن موتور در حالت کنترل دار حداقل ۶.۲۵ درصد و حداکثر ۱۸.۸۴ درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش می‌یابد.
- به دلیل اینکه ترموستات الکترونیکی استفاده شده در سیستم خنک کاری کنترل دار همانند ترموستات مکانیکی مربوط به حالت کلاسیک دارای پسماند هیستریزس نیست در مقابل کوچک‌ترین تغییرات دمایی فوراً واکنش نشان می‌دهد و نوسانات دمایی موتور را کاهش می‌دهد.
- با استفاده از سیستم خنک کاری کنترل دار میزان انرژی مصرفی پمپ آب و فن به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- میزان آلایندگی HC خروجی از موتور در هفت آزمون اول حداقل ۱۵.۳۲ درصد و حداکثر ۷۰ درصد در مقایسه با سیستم کلاسیک کاهش می‌یابد و تنها در آزمون شماره هشت به میزان اندکی (۴.۵ درصد) افزایش می‌یابد.
- میزان آلایندگی NO خروجی از موتور در شش آزمون اول حداقل ۹.۲۸ درصد و حداکثر ۴۶.۵۸ درصد در مقایسه با سیستم کلاسیک کاهش می‌یابد.

زیر نویس‌ها

فهرست علائم

ΔT	اختلاف دما، (C)	<i>in</i>	ورودی
\dot{m}	دبی جرمی، (kg/s)	<i>out</i>	خروجی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، (kj/kg.k)	<i>ave</i>	میانگین
q	گرمای دفع شده از موتور، (kw)	<i>val</i>	ترموستات
Q	دبی حجمی، (lit/min)	<i>bef</i>	قبل از
n	دور موتور، (RPM)	<i>eng</i>	موتور
Load	بار موتور، (%)	<i>ref</i>	رفرنس
T	دمای سیال خنک کاری، (C)	<i>kon</i>	کنترل دار
		<i>kla</i>	کلاسیک

References

- [1] Ap, N. S., & Golm, N. C. (1997, May 19). *New Concept of Engine Cooling System (Newcool)*. 1995 Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, United States. <https://doi.org/10.4271/971775>
- [2] Wang, T. T., & Wagner, J. R. (2015). *A smart engine cooling system-experimental study of integrated actuator transient behavior*. Society of Automotive Engineers Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1604>
- [3] Phapale, S., Kommareddy, P., Sindgikar, P., & Jadhav, N. (2015). *Optimization of commercial vehicle cooling package for improvement of vehicle fuel economy*. Society of Automotive Engineers Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1349>

- [4] Mohamed, E. S. (2016). Development and analysis of a variable position thermostat for smart cooling system of a light duty diesel vehicles and engine emissions assessment during NEDC. *Applied Thermal Engineering*, 99, 358-372. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.099>
- [5] Castiglione, T., Pizzonia, F., & Bova, S. (2016). A novel cooling system control strategy for internal combustion engines. *Society of Automotive Engineers International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(2), 294-302. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0226>
- [6] Millo, F., Caputo, S., Cubito, C., Calamiello, A., Mercuri, D., & Rimondi, M. (2016). *Numerical simulation of the warm-up of a passenger car diesel engine equipped with an advanced cooling system*. Society of Automotive Engineers Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0555>
- [7] Tao, X., & Wagner, J. R. (2016). An engine thermal management system design for military ground vehicle-simultaneous fan, pump and valve control. *Society of Automotive Engineers International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 9(1), 243-254. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0310>
- [8] Tang, P., Zhang, Y., Xu, Z., & Tao, Q. (2016). *Fuel Economy Optimization with Integrated Modeling for Vehicle Thermal Management System*. Society of Automotive Engineers Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0225>
- [9] Liu, G., Zhao, Z., Guan, H., Liu, Y., Zhang, C., Gao, D., Zhou, W., & Knauf, J. (2016). Influence of advanced technology for thermal management on SUV. *Society of Automotive Engineers International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 9(1), 36-44. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0238>
- [10] Shetty, J., & Pinto, R. (2013). *Advanced Thermal Management Strategies*. Society of Automotive Engineers Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2013-36-0542>
- [11] Kang, H., Ahn, H., & Min, K. (2015). Smart cooling system of the double loop coolant structure with engine thermal management modeling. *Applied Thermal Engineering*, 79, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.042>
- [12] Ghasemi Zavaragh, H., Kaleli, A., Afshari, F., & Amini, A. (2017). Optimization of heat transfer and efficiency of engine via air bubble injection inside engine cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 123, 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.164>
- [13] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alasti, B. (2021). Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 97-115. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128.398>
- [14] Haghghat, A. K., Roumi, S., Madani, N., Bahmanpour, D., & Olsen, M. G. (2018). An intelligent cooling system and control model for improved engine thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 128, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.102>
- [15] Feng, L., Wikander, J., & Li, Z. (2020). Fuel Minimization of the Electric Engine Cooling System With Active Grille Shutter by Iterative Quadratic Programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(3), 2621-2635. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2962866>
- [16] Ghasemi Zavaragh, H., Kaleli, A., Solmuş, I., & Afshari, F. (2021). Experimental Analysis and Evaluation of Thermostat Effects on Engine Cooling System. *Journal of Thermal Science*, 30(2), 540-550. <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1264-8>
- [17] Kaleli, A. (2020). Development of the predictive based control of an autonomous engine cooling system for variable engine operating conditions in SI engines: design, modeling and real-time application. *Control Engineering Practice*, 100(1), 104424. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104424>