

شبیه‌سازی سامانه خنک‌کاری با تلمبه آب برقی در موتور ملی با استفاده از پیش‌گر فازی

کاظم محمدی^۱، آرش محمدی^{۲*}، سید مصطفی آقا میرسلیم^۳

^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران mohammadi.k@aut.ac.ir

^۲ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران amohammadi@srttu.edu

^۳ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران mirsalim@csr.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳ خرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۵

کلیدواژه‌ها:

موتور ملی

مدار خنک‌کاری

تلمبه آب برقی

در سامانه‌های متعارف خنک‌کاری گردش مایع خنک‌کننده به وسیله تلمبه آب مکانیکی انجام می‌شود که چرخش آن تابع دور موتور است و هیچ بازخوردی از دما و شرایط عملکردی موتور ندارد. یکی از روش‌های حل این مشکل، استفاده از تلمبه برقی است که سرعت دورانی آن در هر لحظه بر اساس دمای مایع خنک‌کننده تعیین می‌شود. در این تحقیق ابتدا مدار خنک‌کاری موتور ملی با تلمبه آب مکانیکی در نرم‌افزار GT-Suite شبیه‌سازی شده و از نظر زمان گرمایش موتور و افت فشار در راهگاه آب با مقادیر آزمایشگاهی، اعتبار سنجی گردید. سپس تلمبه آب برقی جایگزین تلمبه آب مکانیکی در الگوی شبیه‌سازی شده و سامانه پایشی فازی برای پایش دور تلمبه آب بر اساس دمای مایع خنک‌کننده در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب طراحی گردیده است. سامانه پایشی با مدار خنک‌کاری طراحی شده در GT-Suite جفت گردیده و تأثیر تلمبه آب برقی در مدار خنک‌کاری موتور ملی بر زمان گرمایش مطالعه شده است. نتیجه شبیه‌سازی کاهش ۳۹ درصدی زمان گرمایش موتور را نشان می‌دهد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

وظیفه سامانه خنک کاری در موتورهای احتراق داخلی انتقال حدود ۳۰٪ از حرارت تولید شده به محیط برای نگهداری قطعات موتور در دمای مناسب و همچنین افزایش دمای موتور تا دمای عملکردی به سریع ترین طریق ممکن بعد از راه اندازی است. شیر دما بان با افزایش دما باز می شود و تلمبه، مایع خنک کننده را در مدار خنک کاری موتور به گردش در می آورد. این سامانه به طور کلی نمی تواند خنک کاری موتور را به طور دقیق پایش نماید، زیرا طراحی آن به گونه ای است که حذف حرارت در بدترین شرایط موتور یعنی دور بیشینه در بار کامل را تضمین نماید. حال آن که این شرایط تنها حدود ۵٪ زمان استفاده وسیله نقلیه را شامل می شود. این رویکرد باعث اقتصاد ضعیف سوخت می شود که می تواند با مدیریت سامانه حرارتی بهبود یابد [۱].

همچنین دمای مایع خنک کاری به طور مستقیم بر دمای موتور و عملکرد موتور تأثیر می گذارد. مصرف سوخت، بازده موتور، وجود آلاینده هایی نظیر CO ، HC ، NO_x ، اصطکاک تحت تأثیر دمای سامانه خنک کاری موتور است.

دمای خنک مایع خنک کننده در بدنه، باعث سرد شدن گازهای حاصل از احتراق در محفظه استوانه و در نتیجه، خاموش شدن شعله در نزدیکی دیوار استوانه می شود. این امر موجب افزایش آلاینده های HC و CO و کاهش بازده احتراق و در نتیجه کاهش توان موتور می شود.

مطالعه بر روی سامانه خنک کاری موتور، به عنوان یک روش مؤثر برای افزایش بازده و کاهش آلاینده ها، بیشتر مورد توجه قرار دارد. اکثر مطالعات و آزمایش هایی که در زمینه سامانه خنک کاری موتور انجام شده است، به بهبود توان موتور و کاهش آلاینده ها از طریق کاهش خنک کاری (افزایش دمای سامانه خنک کاری)، اشاره می کند [۲].

بعلاوه کاهش خنک کاری در موتور، به دلیل لزوم استفاده کمتر از مقدار جریان مایع خنک کننده، می تواند به کاهش توان مورد نیاز تلمبه منجر شود [۳ و ۴].

در سامانه خنک کاری معمولی از قطعات مکانیکی شامل دما بان^۴ و تلمبه آب مکانیکی استفاده می شود اما در دهه گذشته مدیریت حرارتی سامانه خنک کاری مورد توجه قرار گرفت و راهکارهایی برای بکارگیری آن ارائه گردید. از جمله جداسازی اتصال مکانیکی تلمبه آب از میل لنگ موتور، که با این کار مشکل خنک کاری پیش از حد مورد نیاز حل می شود و تلفات انرژی ناشی از اتصالات مکانیکی کاهش می یابد.

این روش خنک کاری مزایای بسیاری را در کاهش آلاینده ها، کاهش مصرف سوخت ویژه به همراه دارد. در سامانه های خنک کاری معمولی دو اشکال عمده وجود دارد:

۱. حجم سیال خنک کننده بر اساس بدترین شرایط کارکرد موتور است

۲. وقتی موتور در حالت نیمه بار عمل می نماید، سامانه خنک کاری تمایل به خنک کاری بیش از حد موتور دارد.

برای غلبه بر این مشکلات نیاز به یک سامانه خنک کاری خودکار است که هدف عمده آن تنظیم دمای موتور بر اساس شرایط کاری آن است. در سامانه خنک کاری با تلمبه آب برقی، تلمبه مکانیکی متعارف با یک تلمبه برقی قابل پایش جایگزین می شود [۳]. سامانه پایشی به کار رفته در این نوع بر اساس دما و شرایط کاری موتور، شار خروجی تلمبه را پایش می کند، که این امر موجب کاهش زمان گرمایش موتور در حالت سرد می شود.

کوتوس و گنتیل در سال ۱۹۹۲ با افزایش دمای مایع خنک کننده از ۹۰ به ۱۱۵ درجه سانتیگراد، افزایش دمای روغن به ۱۴۰ درجه سانتیگراد را گزارش کرده اند [۴]. این افزایش دما سبب کاهش ۱۰٪ در مصرف سوخت، به دلیل کاهش اصطکاک شده بود.

آپ و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۵] توانستند با استفاده از سامانه خنک کاری جداگانه برای موتوری ۱،۲ لیتری، تلمبه مایع خنک کننده مکانیکی ۱۰۰ وات را با یک تلمبه برقی ۸۰ واتی جایگزین نمایند. نتیجه این پژوهش کاهش ۲،۵ درصدی مصرف سوخت و کاهش تلفات توان به مقدار ۶ درصد را نشان داد.

لهنر در سال ۲۰۰۱ [۶] به بررسی اثر سامانه های پایش برای تنظیم دمای آب موتور پرداختند. بریس و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۷] با جایگزینی تلمبه آب مکانیکی با تلمبه آب برقی در یک موتور ۱،۶ لیتری احتراق جرقه ای و استفاده از سامانه پایش گرمایش، تأثیر راهبردهای مختلف را بر زمان گرمایش موتور بررسی کردند.

چانفریو و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۸] با استفاده از سامانه خنک کننده جداگانه برای یک موتور ۳،۸ لیتری، یک تلمبه مایع خنک کننده مکانیکی ۳ کیلووات را با یک تلمبه برقی ۶۰۰ واتی جایگزین کرده است. آنها همچنین با افزایش دمای مایع خنک کننده از ۹۰ به ۱۱۰ درجه سانتیگراد، کاهش HC به مقدار ۱۷٪ و CO به مقدار ۱۵٪ را در کار خود گزارش کردند.

واگنر در سال ۲۰۰۳ [۹] سامانه خنک کاری هوشمند قابل پایش را با سامانه مکانیکی متعارف جایگزین نمودند. سامانه پایشی به کار رفته در این نوع بر اساس دما و شرایط کاری موتور، شار خروجی تلمبه را پایش می کند که این امر موجب کاهش آلاینده های HC و CO ، افزایش بازده، کاهش مصرف سوخت ویژه و کاهش زمان گرمایش موتور در حالت سرد می شود.

بدیج و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۱۰] یک الگوی شبیه سازی از سامانه خنک کاری موتور با تلمبه آب برقی برای وسایل نقلیه ارائه کردند و آن را با نتایج آزمون واقعی شامل اجزای سامانه مانند (مبدل حرارتی، تلمبه

3 Nitrogen Oxides
4 Thermostat

1 Carbon Monoxide
2 Hydrocarbon

شین و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۸] در یک مطالعه از چنگک برقی- مغناطیسی برای تلمبه آب در سامانه خنک کاری استفاده کردند. آن ها ابتدا از یک چنگک خورشیدی که توانایی کاهش سرعت را داشت استفاده کردند که نتیجه بهبود ۷,۳ درصدی کاهش زمان گرمایش و ۱,۷ درصدی در مصرف سوخت بود. همچنین آن ها از چنگک برقی- مغناطیسی که دارای حالت قطع و وصل بود استفاده کردند، که نتیجه کاهش ۲۴,۷ درصدی زمان گرمایش و ۴ درصدی مصرف سوخت بود. جانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۹] با استفاده از نرم افزار AMESim سامانه پایش هوشمند تلمبه برای سامانه خنک کاری به جای تلمبه مکانیکی متعارف در موتور احتراق داخلی دیزلی را شبیه سازی کردند. آنها زمان گرمایش در حالت سرد و مصرف سوخت را بررسی نمودند، که نتیجه حاصله کاهش مصرف سوخت به اندازه ۲,۵ درصد و کاهش زمان گرمایش به اندازه ۲۱,۳ درصد بود. زمان گرم شدن موتور در سامانه خنک کاری برقی حدود ۸۵ ثانیه نسبت به حالت معمولی کاهش یافته است.

آروناچالام و جواهر در سال ۲۰۱۴ [۲۰] تلمبه آب مکانیکی یک موتور را با نوع برقی آن جایگزین نمودند. ایشان در زمان گرمایش موتور، ۳ درصد کاهش مصرف سوخت را مشاهده نمودند.

تیمی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۱] معادلات غیرخطی خنک کاری موتور را حل نمودند. آنها با پیاده سازی پیشگر فازی و بهینه سازی آن، زمان گرمایش را کاهش دادند.

در این تحقیق ابتدا سامانه خنک کاری موتور ملی توسط نرم افزار یک بعدی GT-Suite شبیه سازی شده و اعتبارسنجی با داده های آزمایشگاهی انجام شده است. سپس تحلیل مدار خنک کاری با جایگزین نمودن تلمبه آب برقی بجای تلمبه مکانیکی انجام شده است. برای پایش دور تلمبه آب، یک سامانه پایشی فازی در نرم افزار متلب طراحی شده است که با نرم افزار GT-Suite جفت می شود. سرعت دورانی تلمبه آب در هر لحظه توسط سامانه پایش تعیین می شود و اثر آن بر دمای موتور و سیال خنک کننده، بررسی می گردد.

۲- معادلات حاکم

برای شبیه سازی مدار خنک کاری از GT-Cool و برای شبیه سازی مدار قدرت موتور از GT-Power از زیر مجموعه نرم افزارهای GT-Suite از شرکت Gamma Technology استفاده شده است. این نرم افزار توانایی شبیه سازی یک بعدی سامانه خنک کاری برای شرایط گذرا و پایدار را دارد. حل عددی جریان در مدار شبیه سازی شده، به کمک معادله پیوستگی، معادله تکانه و معادله انرژی انجام می پذیرد. معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی در معادله های ۱-۳ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

آب، منبع انبساطی، لوله ها، بار حرارتی موتور) اعتبار سنجی کردند. نتیجه این شبیه سازی افزایش توان موتور بود.

چیلگرن و آلبرت در سال ۲۰۰۴ [۱۱] به کمک جایگزینی تلمبه آب مکانیکی با تلمبه آب برقی در یک موتور ۵,۷ لیتری دیزلی، رفتار سامانه خنک کننده و پاسخ حالت گذرا را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند که نتایج حاصل بهبود فرآیند پایش دما و کاهش ۸ درصدی تلفات توان را نشان داد.

چوو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱۲] از یک تلمبه آب برقی قابل پایش در کامیون دیزل ۴,۶ لیتری شش استوانه استفاده کردند که نتایج این آزمایش نشان داد، اندازه مبدل حرارتی با جایگزینی تلمبه آب برقی به جای مکانیکی می تواند کاهش یابد. جایگزینی تلمبه آب برقی امکان کاهش ۲۷ درصدی اندازه مبدل حرارتی را فراهم کرده است.

مایکل در سال ۲۰۰۷ [۱۳] یک سامانه حرارتی با مجموعه ای از الگوهای ریاضی و عملگر برقی- مکانیکی قابل پایش ارائه دادند. این یک سامانه خنک کاری بود که برای حرارت دهی از یک گرمکن غوطه- ور برقی استفاده شده بود. در این پژوهش از قاعده مندی های غیرخطی برای تنظیم دما استفاده گردید و در آزمایش های انجام شده سرعت تلمبه آب و پنکه ثابت در نظر گرفته شد و دریچه دمابان هوشمند دمای مایع خنک کننده را پایش می نمود.

تورگوسا و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۴] آزمون های تجربی روی یک وسیله نقلیه اندازه متوسط که با سامانه مدیریت حرارتی هوشمند مجهز شده بود انجام دادند و عواملی نظیر بهبود در مصرف سوخت حالت تمام بار و شرایط عملیاتی حرارتی را بررسی نمودند.

والد نسیم و فوجون زانگ در سال ۲۰۱۲ [۱۵]، به شبیه سازی یک موتور چهار زمانه شش استوانه با نسبت تراکم ۱۷,۵ پرداخته اند. شبیه سازی به کمک نرم افزار GT-suite و با هدف کاهش زمان گرم شدن موتور به کمک سامانه های پایشی انجام پذیرفته است. در این مطالعه برای کاهش زمان گرم شدن موتور، از یک تلمبه و دمابان برقی در شبیه سازی استفاده شده است. در این شبیه سازی، ابتدا موتور معمولی به کمک نرم افزار شبیه سازی و پس از اعتبارسنجی با داده های آزمایشگاهی، تغییرات مورد نظر اعمال می گردد. زمان گرم شدن موتور در سامانه خنک کاری برقی حدود ۲۰۰ ثانیه نسبت به حالت معمولی کاهش یافته است.

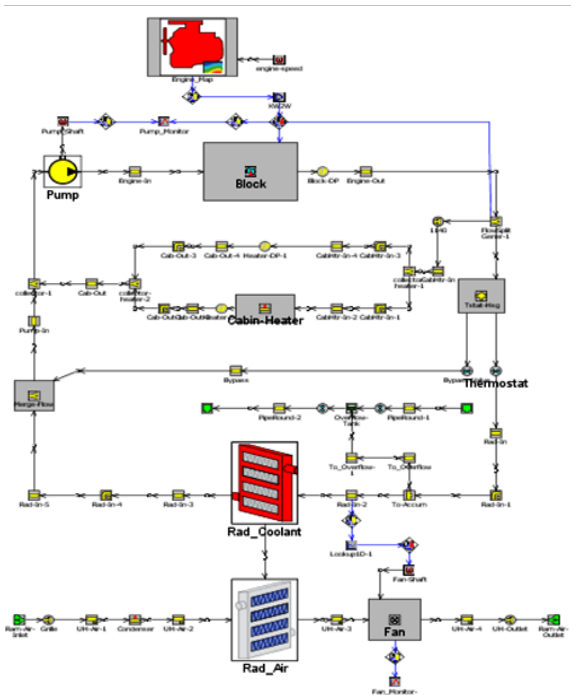
نالین و سنتهوش در سال ۲۰۱۲ [۱۶] سامانه خنک کاری هوشمند برای موتورهای احتراق داخلی را با نرم افزار Lab view شبیه سازی کردند، که در این شبیه سازی از دو عامل دمای مایع خنک کننده و سطح مایع خنک کننده برای پایش دور پنکه و تلمبه آب استفاده گردید. نتیجه کاهش ۱۵ درصدی مصرف سوخت بود.

اسکندر و فیلهو [۱۷] در سال ۲۰۱۲ مدار خنک کاری یک موتور دیزل را با تلمبه آب برقی نرم افزار GT-suite شبیه سازی کردند. برای تنظیم تلمبه آب از پیشگر PID استفاده نمودند.

شبیه‌سازی مدار آب سامانه خنک‌کاری مورد نظر، به جهت تعیین فشار و شار جریان سیال خنک‌کننده در قسمت‌های مختلف مدار است. برای شبیه‌سازی مشخصات موتور مانند، حجم موتور، نسبت تراکم، جنس و ابعاد قطعات مختلف موتور و نتایج حاصل از آزمایش موتور از قبیل داده‌های سوخت، اصطکاک، عملکرد پمپ و عملکرد تلمبه در دور و بارهای مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدار خنک‌کاری موتور، با شبیه‌سازی راهگاه‌های آب در داخل بدنه و بستار موتور و تعیین قطر، طول، جنس و زاویه خم‌های لوله‌های مدار خنک‌کاری و همچنین شبیه‌سازی مبدل، تلمبه، پمپ، دما بان و باقی قطعات انجام می‌گیرد.

در نهایت موتور و سامانه خنک‌کاری به صورت یکپارچه برای تحلیل حرارتی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت مایع خنک‌کننده پس از عبور از تلمبه وارد بدنه موتور شده و همزمان با خنک‌کاری بدنه، وارد بستار^۱ می‌شود و سپس از بستار موتور خارج می‌گردد. شکل (۱) مدار خنک‌کاری معمول موتور EF7 با تنفس طبیعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الگوی شبیه‌سازی مدار سیالاتی سامانه خنک‌کاری EF7

پس از شبیه‌سازی و حل عددی مدار آبی سامانه خنک‌کاری موتور EF7 با تنفس طبیعی، می‌بایستی نتایج حاصل از حل عددی با نتایج به‌دست آمده از آزمایش موتور مورد نظر، مقایسه گردد. برای این منظور افت فشار و شار سیال خنک‌کننده در دوره‌های ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، بررسی می‌شود. نمودار شکل (۲) افت فشار جریان خروجی از موتور را نسبت به دور موتور، با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کند.

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial e}{\partial x_k} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

با توجه به حل هزمان مدار عملکرد و خنک‌کاری لازم است انتقال حرارت به گونه‌های هدایت و جابجایی شبیه‌سازی شوند. مقدار انتقال هدایت در واحد سطح و بر واحد زمان را می‌توان به کمک قانون هدایت گرمایی فوریه بیان نمود:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

که k ضریب انتقال حرارت هدایتی است. حرارت به شکل هدایت حرارتی از سطح داخلی دیواره‌های بدنه و بستار به سطح خارجی و مجاور مایع خنک‌کننده انتقال می‌یابد.

مقدار انتقال حرارت جابجایی به وسیله یک سیال و سطح جامدی که دارای حرکت نسبی نسبت به یکدیگر اند، منتقل می‌شود. شار حرارت جابجایی اجباری که به یک سطح جامد با دمای T_w توسط جریان سیال با دمای متوسط T منتقل می‌شود از معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q} = h_c (T - T_w) \quad (5)$$

که h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی است و مقدار آن بدین شرح محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{h_c L}{K}\right) = C \left(\frac{\rho V L}{\mu}\right)^m \left(\frac{C_p \mu}{K}\right)^n \quad (6)$$

ثابت‌های m و n تجربی اند که با توجه به فیزیک مسئله و به شیوه تجربی تعیین می‌شوند.

۳- موتور پایه

الگوی استفاده شده برای شبیه‌سازی، موتور ملی EF7 تنفس طبیعی دارای ۴ استوانه و حجم ۱۶۵۰ سی‌سی است. مدار عملکرد و خنک‌کاری به صورت یک بعدی شبیه‌سازی شده است.

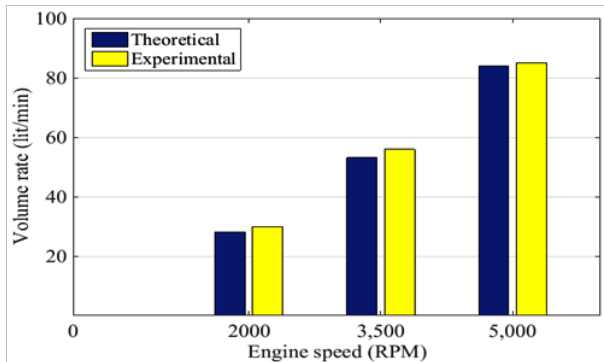
در این شبیه‌سازی، مدار خنک‌کاری در دو حالت خنک‌کاری با تلمبه آب مکانیکی و خنک‌کاری با تلمبه آب برقی شبیه‌سازی شده است. منحنی مشخصه عملکردی تلمبه آب و دما بان، مبدل حرارتی، گرم کن داخلی خودرو، پمپ و خنک‌کننده روغن به عنوان ورودی‌های نرم‌افزار وارد شدند. همچنین نمودارهای افت فشار نسبت به شار جریان عبوری برای مبدل و بخاری نیز در نرم‌افزار وارد شدند و شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری انجام شد. پس از اعتبارسنجی برای تحلیل مدار خنک‌کاری با تلمبه آب برقی موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴- شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری

شبیه‌سازی سامانه هیدرولیکی سامانه خنک‌کاری موتور EF7 را می‌توان به دو بخش سامانه داخلی (مدار خنک‌کاری بدنه و بستار) و مدار خارجی موتور (شامل لوله‌ها، مبدل، پمپ، تلمبه، دما بان و بخاری) موتور است.

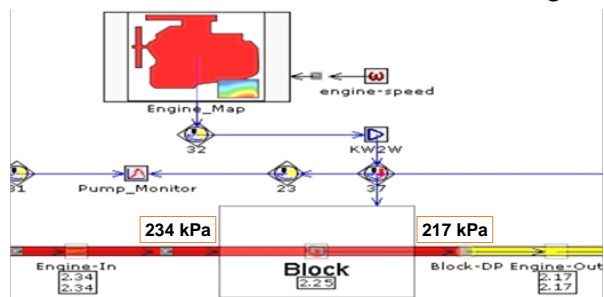
¹ Cylinderhead

نمودار شکل (۴) شار جریان خروجی از موتور را در دورهای ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کند.



شکل ۴. مقایسه شار جریان سیال خنک کننده عبوری در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

مقادیر فشار در قسمت‌های مختلف سامانه خنک کاری در دور ۵۰۰۰ د.د.د. در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار در ورودی موتور ۲۳۴ کیلوپاسکال و در خروجی آن ۲۱۷ کیلوپاسکال به دست آمده است.



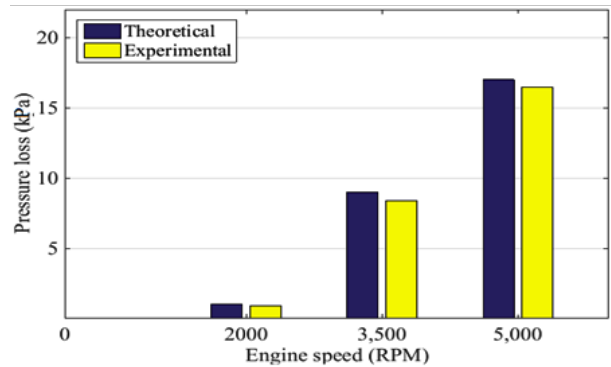
شکل ۵. فشار سیال خنک کننده در ورودی و خروجی موتور در ۵۰۰۰ د.د.د. مقادیر و خطاهای به دست آمده افت فشار سیال خنک کاری در موتور در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. افت فشار در سامانه خنک کاری

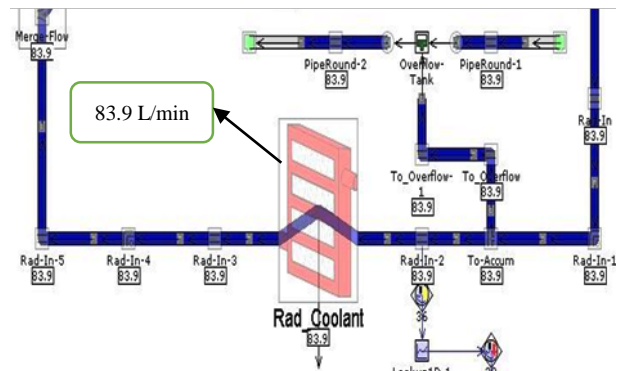
دور موتور (rpm)	افت فشار (kPa)		خطا (%)
	شبیه‌سازی	آزمایشگاهی	
۲۰۰۰	۱	۰٫۹	۱۱
۳۵۰۰	۹	۸٫۴	۷٫۱۴
۵۰۰۰	۱۷	۱۶٫۵	۳٫۰۳

مشاهده می‌شود مقادیر افت فشار حاصل از آزمون واقعی و شبیه‌سازی تقریباً یکسان است، خطای حاصل از اختلاف افت فشار بین مقادیر آزمایشگاهی و شبیه‌سازی می‌تواند ناشی از دقیق نبودن داده‌های وارد شده در نرم‌افزار باشد.

مقادیر شار سیال خنک کننده عبوری از مبدل حرارتی در دور ۵۰۰۰ د.د.د. در شکل (۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، مقدار شار سیال عبوری از مبدل حرارتی، ۸۳٫۹ لیتر بر دقیقه است.



شکل ۳. نمودار افت فشار سیال خنک کننده عبوری از مبدل حرارتی در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی



شکل ۳. شار سیال خنک کننده در مدار مبدل حرارتی در ۵۰۰۰ د.د.د.

مقادیر و خطاهای حاصل از نمودار شار جریان عددی و آزمایشگاهی مدار مبدل حرارتی سامانه خنک کاری موتور EF7 در دورهای ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، به صورت جدول (۱) نشان داده شده است. در جدول (۱) مشاهده می‌شود بیشترین مقدار خطای شار جریان در مبدل حرارتی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی ۶ درصد است، که این خطا با افزایش دور کاهش می‌یابد. خطای بوجود آمده ممکن است ناشی از خطا در داده‌های تعریف شده در نرم‌افزار GT-suite از جمله الگوی عملیاتی تلمبه آب باشد. با توجه به اینکه مقادیر حاصل از آزمون واقعی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی تقریباً یکسان است، الگوی شبیه‌سازی شده از نظر شار جریان مورد قبول است.

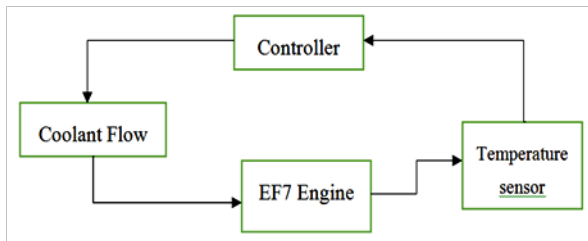
جدول ۱. شار جریان مبدل حرارتی سامانه خنک کاری

دور موتور (rpm)	شار (l/min)		خطا (%)
	شبیه‌سازی	آزمایشگاهی	
۲۰۰۰	۲۸٫۲	۳۰	۶
۳۵۰۰	۵۳٫۱	۵۶	۵٫۱۸
۵۰۰۰	۸۳٫۹	۸۵	۱٫۲۹

جدول ۴. دمای سیال خنک‌کننده در سامانه خنک‌کاری

زمان (s)	دمای سیال خنک‌کننده (°K)		خطا نسبی (%)
	آزمایشگاهی	شبیه‌سازی	
۱۲۶	۳۳۲,۴	۳۳۳,۲	۰,۲۴
۲۳۷	۳۴۷,۵	۳۴۹,۷	۰,۶۳
۴۰۴	۳۵۸,۸	۳۶۰,۳	۰,۴۲
۵۹۸	۳۶۱,۲	۳۶۳	۰,۵۰

پس از تکمیل الگوی سامانه متعارف خنک‌کاری موتور EF7 ارتباط میان تلمبه آب و سرعت موتور از بین می‌رود. سپس سامانه پایشی برای پایش سرعت تلمبه بر اساس دمای خروجی موتور در محیط سیمولینک^۱ طراحی شده و با نرم‌افزار GT-suite جفت می‌گردد. در این پایشگر مطابق شکل (۷) سرعت تلمبه بر اساس دمای خروجی موتور تعیین می‌گردد.



شکل ۷. نمای پایش سرعت تلمبه آب سامانه خنک‌کاری موتور EF7

۵- شبیه‌سازی سامانه پایشگر

برای شبیه‌سازی سامانه‌های پایشی، اشیاء مختلف شبیه‌سازی مانند پایشگرها، اتصال دهنده‌ها، تولیدکننده علامت، صفحه نمایش، واسط بین نرم‌افزار GT-suite و سیمولینک نرم‌افزار متلب و غیره، به همراه داده‌های مورد نظر استفاده می‌گردد.

واسط بین GT-suite و سیمولینک نرم‌افزار متلب

این ابزار برای پیاده‌سازی سامانه پایشی به کار می‌رود و نرم‌افزار GT-suite را با محیط سیمولینک جفت می‌کند، که در آن عوامل ورودی و خروجی مشخص شده و تعیین می‌گردد که اجرای شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار GT-suite و یا سیمولینک انجام گیرد. شکل (۸) نحوه استفاده از واسط بین GT-suite و سیمولینک را در مدار خنک‌کاری موتور EF7 نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتباط بین موتور و تلمبه آب قطع شده و سرعت تلمبه آب توسط پایشگر بین نرم‌افزار GT-suite و سیمولینک تعیین می‌گردد. پس از جفت کردن نرم‌افزار GT-suite با متلب باید پایشگر مورد نظر را در محیط سیمولینک طراحی نموده و سامانه خنک‌کاری موتور EF7 را در محیط سیمولینک فراخوانی نموده تا عمل پایش سامانه انجام گیرد.

اطلاعات متعلق به افت فشار در راهگاه‌ها، مجاری موتور و زوایای لوله‌ها از جمله داده‌هایی اند که در افت فشار تأثیر گذارند. همچنین ممکن است بخشی از خطای به وجود آمده ناشی از خطاهای حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باشد.

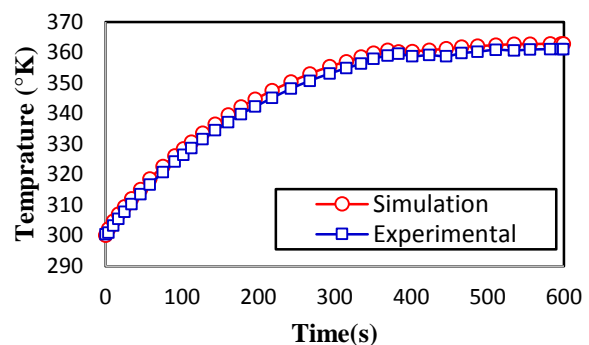
پس از تحلیل سامانه خنک‌کاری زمان گرمایش موتور حاصل از حل عددی با نتایج حاصل از آزمایش موتور مقایسه می‌کنیم. برای این منظور الگوی شبیه‌سازی شده برای شرایط کاری مطابق جدول (۳) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳. شرایط اولیه شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری

دور موتور (rpm)	۲۰۰۰
فشار متوسط ترمزی (BMEP)	۲
دمای سیال خنک‌کننده (°K)	۳۰۰
دمای محیط (°K)	۳۰۰
دمای قطعات داخلی موتور (°K)	۳۰۰

در نمودار شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی دمای خروجی آب موتور در شرایط کاری جدول (۳) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که دمای سیال خنک‌کننده، حدود ۳۹۰ ثانیه پس از شروع به کار سرد، دچار نوسانات حاصل از باز شدن مسیر جریان در دمايان می‌شود و پس از ۱۹۰ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد.

پس از شبیه‌سازی سامانه خنک‌کاری و تحلیل عددی سیالاتی و حرارتی، مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی تقریباً یکسان است؛ لذا می‌توان از الگوی شبیه‌سازی شده، برای شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری هوشمند موتور با تلمبه برقی استفاده کرد.

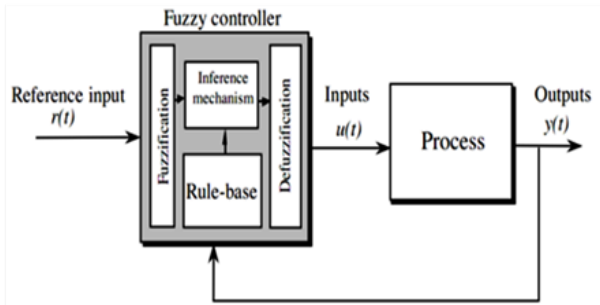


شکل ۶ تغییرات دمای مایع خنک‌کننده خروجی از موتور در حالت آزمایشی و شبیه‌سازی

مطابق با نمودار شکل (۷)، مقایسه تعدادی از مقادیر عددی و آزمایشگاهی دمای آب خروجی موتور به‌صورت جدول (۴) ارائه شده است.

¹ Simulink

طور کلی یک الگوی فازی از سه بخش فازی ساز، سامانه استنتاج فازی^۲ و غیر فازی ساز تشکیل شده است. در شکل (۹) قسمت‌های مختلف یک پیشگر فازی نشان داده شده است [۲۲].



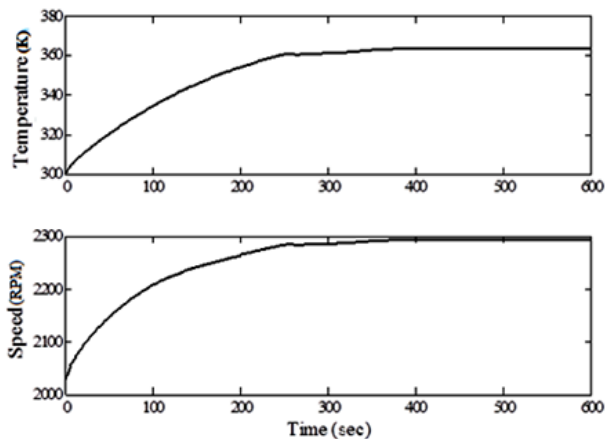
شکل ۹. قسمت‌های مختلف پیشگر فازی [۲۲]

در این پژوهش، هدف پایش دمای موتور و ارائه مقدار مناسب برای سرعت تلمبه در سامانه خنک کاری موتور EF7 است. برای این منظور، اختلاف دمای موتور با مرجع به سه مجموعه {زیاد، متوسط و کم} و همچنین سرعت تلمبه به سه مجموعه {سریع، متوسط و آهسته} تقسیم شده و با توجه به رفتار سامانه، عبارات منطقی زیر برای پایش سامانه در نظر گرفته شدند:

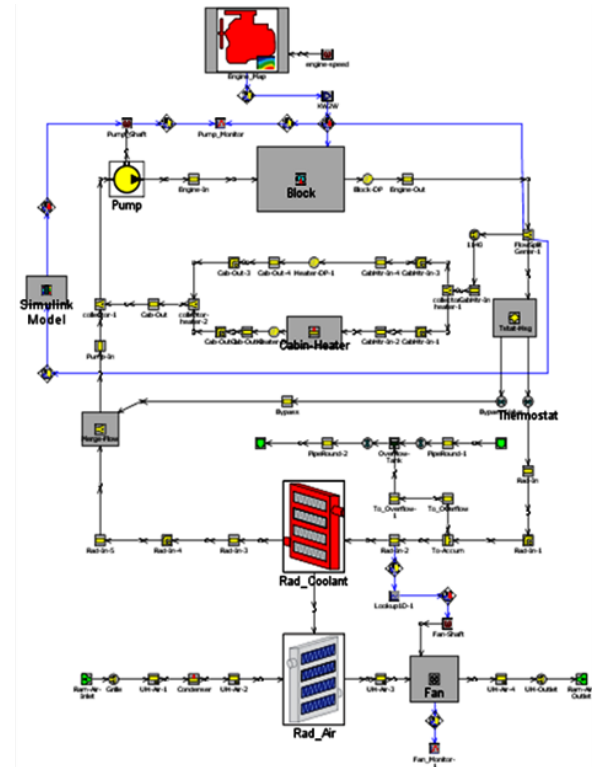
(۱) اگر اختلاف دمایی کم باشد، سرعت گردش تلمبه سریع خواهد بود.
 (۲) اگر اختلاف دمایی متوسط باشد، سرعت گردش تلمبه متوسط خواهد بود.

(۳) اگر اختلاف دمایی زیاد باشد، سرعت گردش تلمبه آهسته خواهد بود.

با در نظر گرفتن توابع عضویت ورودی و خروجی به صورت توابع مثلثی در جعبه ابزار متلب، پیشگر فازی طراحی گردید. پیشگر مذکور در محیط سیمولینک فراخوانی شد که پس از اجرای مدل نتیجه مطابق شکل (۱۰) حاصل شد.



شکل ۱۰. تغییرات سرعت تلمبه و دما بر حسب زمان با تنظیم دستی پیشگر



شکل ۸. مدار شبیه سازی سامانه خنک کاری موتور EF7 با تلمبه آب برقی

طراحی سامانه پایشی در نرم افزار متلب

در سامانه شبیه سازی شده برای شبیه سازی موتور، هدف پایش دمای موتور به وسیله تغییر سرعت گردش تلمبه آب است، به گونه ای که دمای موتور از حد خاصی تجاوز نکند و موتور بتواند به صورت ایمن کار کند. بنابراین برای طراحی پیشگر^۱ می توان کل این سامانه را به صورت یک بدنه با یک ورودی و یک خروجی در نظر گرفت که ورودی آن سرعت گردش تلمبه و خروجی آن نیز دمای موتور است. سرعت گردش تلمبه باید در محدوده ۱۰۰ تا ۳۵۰۰ دور در دقیقه باشد. هدف طراحی پیشگری است که دمای موتور از مقدار اولیه ۳۰۰ درجه کلوین به دمای مطلوب که ۳۶۴ درجه کلوین است برسد. باید به این نکته توجه کرد که به دلیل ماهیت غیرخطی این سامانه و در دست نداشتن معادلات دینامیکی سامانه، استفاده از بسیاری از روش های طراحی پیشگر مانند روش های شناسایی و تقریب خطی و همچنین سایر روش های مبتنی بر استفاده از الگوی سامانه غیر قابل استفاده می باشند. به همین علت در طراحی پیشگر از روش پایش فازی بهره خواهیم برد که این امکان را می دهد تا با داشتن کمترین اطلاعات در مورد سامانه بتوان با به کار بردن یک سری از عبارات منطقی، سامانه را پایش نمود.

طراحی پیشگر فازی

پیشگر فازی یک رویکرد مبتنی بر دانش و قواعد است که برای شبیه سازی دانش بشری پیرامون یک سامانه خاص به کار می رود. به

^۲ Fuzzy Inference System

^۱ Fuzzy Controller

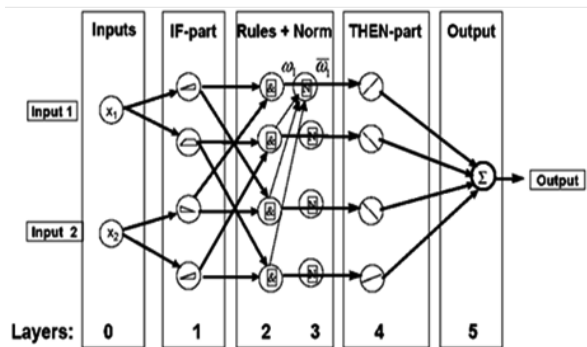
$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (11)$$

که \bar{w}_i خروجی i امین گره از لایه قبلی است، $\{p_i, q_i, r_i\}$ ضرایب این ترکیب خطی بوده، همچنین مجموعه عوامل بخش تالی الگوی فازی تاکاگی- سوگنو نیز اند.

لایه پنجم، گره‌های خروجی:

این تک گره، خروجی کلی را با جمع کردن همه علائم ورودی محاسبه می‌کند. در واقع در این لایه فرایند غیرفازی سازی انجام می‌گیرد و نتایج هر قانون فازی به خروجی غیرفازی تغییر شکل می‌دهد. در شکل (۱۱) قاعده مندی ساده‌ای از عملکرد و پیوند بین لایه‌ها در الگوی استنتاج عصبی فازی تطبیقی نشان داده شده است. این شبکه براساس یادگیری با نظارت، آموزش داده می‌شود. بنابراین هدف ما آموزش شبکه‌های تطبیقی است که قادر به تخمین توابع نامشخص حاصل از اطلاعات آموزش باشند و مقدار دقیقی برای عامل‌های یاد شده پیدا کنند.

$$O_{5,i} = \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^4 W_i f_i}{\sum_{i=1}^4 W_i} \quad (12)$$



شکل ۱۱. نمای ساده از الگوی استنتاج عصبی- فازی

پیاده سازی سامانه استنتاج عصبی- فازی تطبیقی با استفاده از نرم‌افزار متلب

برای اجرای این روش در نرم‌افزار متلب از جعبه ابزار آن استفاده می‌کنیم. این جعبه ابزار با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی یک سامانه استنتاج فازی-عصبی می‌سازد که در آن عوامل توابع عضویت با استفاده از یک قاعده مندی انتشار تنظیم می‌گردند. این تنظیم به سامانه فازی اجازه می‌دهد که خود را از داده‌های موجود آموزش دهند.

برای شروع کار ابتدا باید تعدادی داده تصادفی از رفتار ورودی به خروجی سامانه به دست آورد. این داده‌ها به ازای سرعت‌های دلخواه تلمبه با اجرای نرم‌افزار یافت می‌شوند. پس از تکمیل بخش‌های پیش‌گرم فازی، مشاهده می‌شود که وابستگی ورودی و خروجی این پیش‌گرم به صورت شکل (۱۲) است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود سامانه حلقه بسته به خوبی توانسته است ورودی مرجع را در زمان مناسب دنبال کند. ایرادی که به این نوع طراحی پیش‌گرم می‌توان گرفت آن است که قوانین فازی به صورت دستی تعریف شده‌اند. در نتیجه برای رفع این مشکل و طراحی پیش‌گرم به صورت نظام‌مند، از روش پایش تطبیقی فازی-عصبی استفاده شد.

سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی^۱

ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی می‌تواند روشی که دارای مزیت‌های هر دو روش مذکور است را به وجود آورد. سامانه استنتاج فازی عصبی ANFIS برای اولین بار توسط پروفیسور جنگ و در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۲۳]. این سامانه قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه بندی دارد و به طور تطبیقی یک قاعده-بنیاد می‌سازد. ساختار ANFIS شامل پنج لایه است:

لایه اول، گره‌های ورودی: هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند را با استفاده از تابع عضویت مطابق معادله‌های ۷ و ۸ را تولید می‌کند:

$$Q_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

$$Q_{2,i} = \mu_{B_j}(y) \quad j = 3, 4 \quad (8)$$

که x و y ورودی‌های غیرفازی به گره i و A_i و B_j (کوچک و بزرگ) برچسب‌های زبانی‌اند که به ترتیب با توابع عضویت مناسب μ_{A_i} و μ_{B_j} مشخص می‌شوند. در اینجا معمولاً از فازی‌سازهای گوسی شکل استفاده می‌شود. باید عامل‌های این توابع عضویت که به عنوان عوامل مقدماتی در این لایه شناخته می‌شوند، مشخص شوند.

لایه دوم، گره‌های قاعده: در لایه دوم، عملگر "و" به کار برده می‌شود تا خروجی (نسبت وزنی) که نمایان‌گر بخش مقدم آن قانون است، به دست می‌آید. نسبت وزنی به مقدار درجه‌ای که بخش مقدم یک قانون فازی برآورده شده، گفته می‌شود و به تابع خروجی آن قانون شکل می‌دهد. از این رو، خروجی‌های $O_{2,k}$ این لایه، حاصل ضرب درجات متعلق به لایه اول مطابق معادله (۹) اند:

$$O_{2,k} = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_j}(y) \quad (9)$$

لایه سوم، گره‌های متوسط: هدف اصلی در این لایه، تعیین نسبت وزنی i امین قانون به مجموع نسبت وزنی کل قوانین است. در نتیجه \bar{w}_i به عنوان نسبت وزنی بهنجار شده مطابق معادله (۸) به دست می‌آید.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{W_i}{\sum_{k=1}^4 W_k} \quad (10)$$

لایه چهارم، گره‌های نتیجه: تابع گره چهارمین لایه توزیع i امین قانون را به کل خروجی محاسبه می‌کند و به صورت معادله (۱۱) تعریف می‌شود:

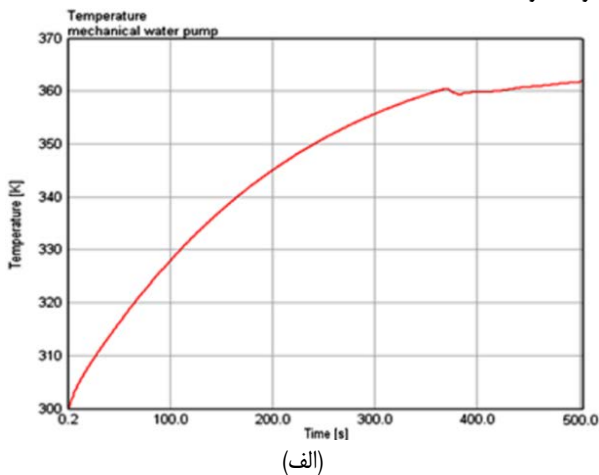
¹ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

شکل (۱۵) داده‌های به‌دست آمده برای دمای سیال خنک‌کننده خروجی از موتور را برای دو حالت تلمبه مکانیکی (۱۵-الف) و تلمبه الکتریکی (۱۵-ب) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، شیب افزایش دما سامانه خنک‌کاری با تلمبه آب برقی زیادتر است. این موضوع نشان‌دهنده نرخ انتقال حرارت کمتر در سامانه خنک‌کاری هوشمند در ابتدای کار است. انتقال حرارت از گازهای حاصل از احتراق به سیال خنک‌کننده، می‌تواند تابع عوامل متعددی باشد؛ که از آن جمله می‌توان به دمای دیواره بدنه، دمای سیال خنک‌کننده، ضریب جابجایی بین قطعات اشاره کرد. به عنوان مثال، با افزایش شار سیال خنک‌کننده، سرعت و در نتیجه ضریب جابجایی سیال افزایش می‌یابد.

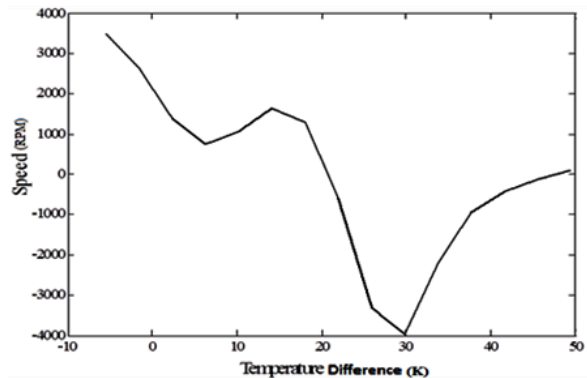
در این حالت، نرخ انتقال حرارت از دیواره استوانه به مایع خنک‌کننده افزایش می‌یابد. در این شرایط شار حرارتی عبوری از دیواره بدنه، صرف افزایش دمای سیال خنک‌کننده می‌شود.

بنابراین مقدار کمتری از آن باعث افزایش دمای دیواره می‌گردد. در این زمان با افزایش دمای سیال خنک‌کننده، نرخ انتقال حرارت در واحد زمان، کاهش می‌یابد. بنابراین در شرایط گذرا و شروع به کار سرد موتور، تا رسیدن به دمای پایدار که در آن مسیر عبور سیال از آن شروع به باز شدن می‌نماید، نرخ انتقال حرارت در هر لحظه متفاوت است.

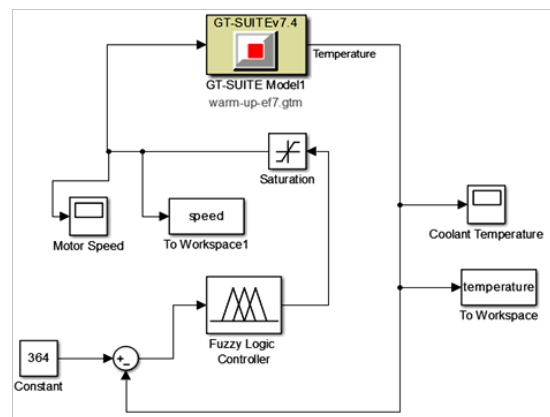
با توجه به اینکه شار حجمی سیال خنک‌کننده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت در سامانه خنک‌کاری معمولی وابسته به دور موتور است، لذا در حالت راه‌اندازی سرد سرعت تلمبه آب به صورت خطی با دور موتور تغییر می‌کند. بنابراین زمان گرم شدن موتور و رسیدن به حالت پایدار بیشتر خواهد بود.



مدار طراحی شده در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب برای پایش فازی-عصبی دمای ورودی در سامانه خنک‌کاری موتور EF7 مطابق شکل (۱۳) است.

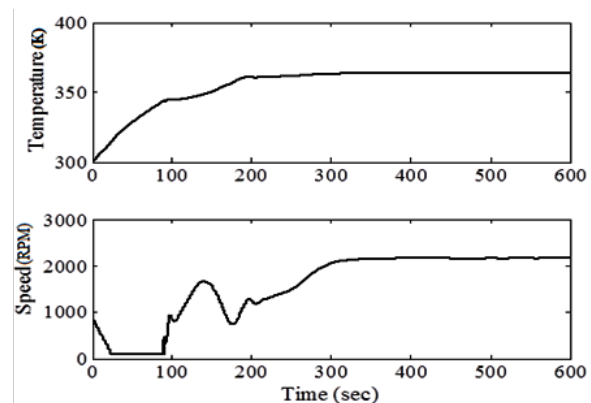


شکل ۱۲. نمودار وابستگی ورودی و خروجی پیش‌گر فازی-عصبی



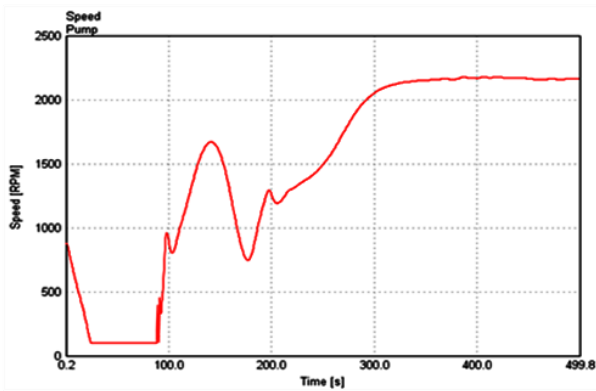
شکل ۱۳. الگوی سیمولینک برای پایش دور تلمبه آب

نتیجه شبیه‌سازی سامانه حلقه بسته به صورت شکل (۱۴) را نشان می‌دهد که الگوی سیمولینک طراحی شده پاسخ مناسبی را ارائه داده است.



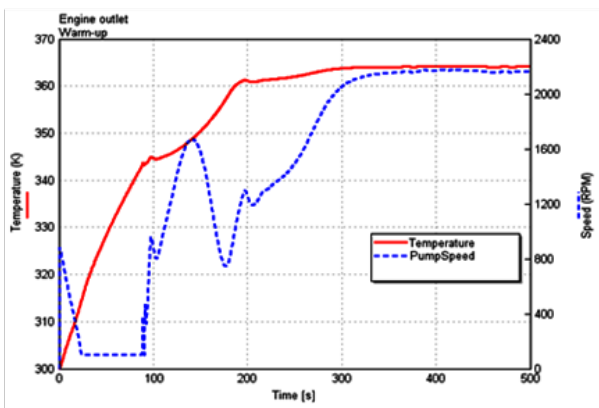
شکل ۱۴. نمودار تغییرات سرعت تلمبه و دما بر حسب زمان

بررسی نتایج از شبیه‌سازی سامانه خنک‌کاری با تلمبه برقی



شکل ۱۷. نمودار تغییر سرعت تلمبه آب برقی بر اساس زمان

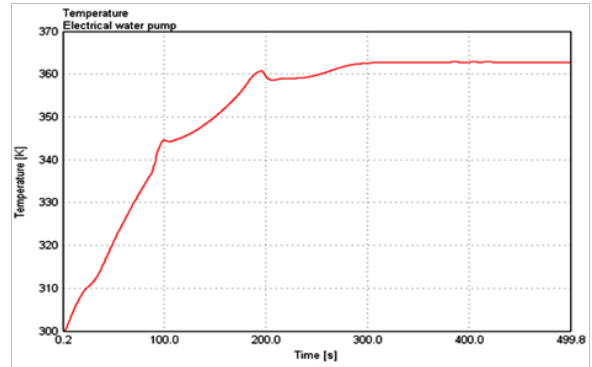
در شکل (۱۸) نمودار تغییرات سرعت تلمبه آب و دمای خروجی موتور EF7 با تنفس طبیعی با تلمبه آب برقی همان طور مشاهده می شود با پایش سرعت تلمبه آب، زمان گرم شدن موتور از ۵۱۱ ثانیه به ۳۰۸ ثانیه کاهش پیدا می کند. که این کاهش ۳۹٫۷۳ درصدی تأثیر زیادی بر کاهش آلاینده های موتور و مصرف سوخت در هنگام راه اندازی سرد دارد.



شکل ۱۸. نمودار تغییرات سرعت تلمبه آب و دمای خروجی موتور EF7 با تنفس طبیعی با تلمبه آب برقی

نتیجه گیری

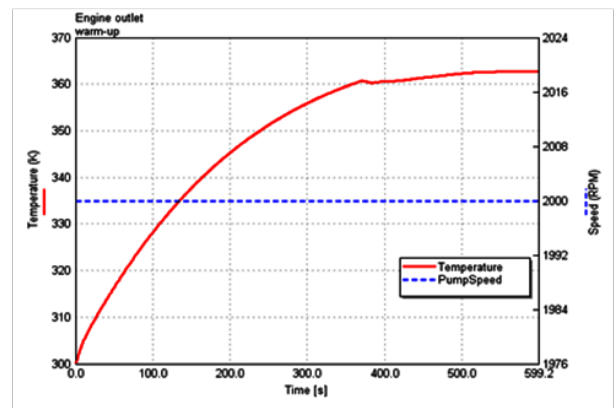
در این پژوهش ابتدا سامانه خنک کاری موتور ملی با استفاده از نرم افزار GT-SUITE شبیه سازی شده و با نتایج تجربی اعتبار سنجی شده است. سپس در سامانه خنک کاری، تلمبه آب مکانیکی با تلمبه آب برقی جایگزینی شده است تا سرعت آن وابسته به دور موتور نباشد و همچنین قابل پایش باشد. برای پایش سرعت تلمبه آب برقی با دمای مایع خنک کننده، یک پایشگر فازی در نرم افزار مطلب طراحی شده است بطوری که نرم افزارهای GT-SUITE و مطلب با هم جفت شوند. استفاده از تلمبه آب برقی موجب کاهش زمان گرمایش موتور حدود ۳۹ درصد شده است که کاهش تلفات انرژی و آلاینده ها را به همراه دارد



(ب)

شکل ۱۵- نمودار دمای سیال خنک کننده خروجی (الف) تلمبه آب مکانیکی (ب) با تلمبه آب برقی.

شکل (۱۶) مدت زمان گرم شدن موتور با تلمبه آب مکانیکی نشان داده شده است، که این زمان حدود ۵۱۱ ثانیه است.



شکل ۱۶. نمودار تغییرات دمای موتور با تلمبه آب مکانیکی.

در سامانه خنک کاری هوشمند با تلمبه آب برقی برای موتور EF7 تنفس طبیعی، شار حجمی عبوری از موتور مستقل از دور موتور است و با توجه به دمای خروجی موتور تنظیم می گردد. لذا در حالت سرد، سرعت تلمبه آب به گونه ای پایش می گردد که شار حجمی سیال خنک کننده کاهش می یابد که باعث افزایش نرخ دما در سیال خنک کننده می شود، بنابراین زمان گرم شدن سیال خنک کننده و رسیدن به حالت پایدار کاهش می یابد.

در شکل (۱۷) مشاهده می شود سرعت تلمبه در ابتدای کار به صورت ثابت و در حداقل مقدار، حدود ۱۰۰ دور بر دقیقه است که این امر موجب افزایش سریع دما می گردد. بعد از افزایش دما به حالت مطلوب، سرعت تلمبه به صورت غیر خطی افزایش پیدا کرده تا زمانی که دمای خروجی موتور به حالت پایدار برسد.

Control for Engine Thermal Management Systems," SAE Technical Paper 2003-01-0272, 2003.

[10] Jawad, B., Zellner, K., and Riedel, C., Small Engine Cooling and the Electric Water Pump, SAE Technical Paper 2004-32-0084, 2004.

[11] Chalgren, R., Thermal Comfort and Engine Warm-Up Optimization of a Low-Flow Advanced Thermal Management System, SAE Technical Paper 2004-01-0047, 2004.

[12] Cho, H., et al., Application of Controllable Electric Coolant Pump for Fuel Economy and Cooling Performance Improvement, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 129, Issue. 1, p. 239-244, 2007.

[13] Mitchell, T., Advanced Thermal Management for Internal Combustion Engines, PhD thesis, 2007.

[14] Torregrosa, A., Assessment of the Influence of Different Cooling System Configurations on Engine Warm-up, Emissions and Fuel Consumption, International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, Issue. 4, pp. 447-458, 2008.

[15] Nessim, W. and F. Zhang, Powertrain Warm-up Improvement using Thermal Management Systems. International Journal of Scientific & Technology Research Vol. 1, Issue. 4, 2012.

[16] Santhosh, K. and Sharma. N. K., LabVIEW Implementation of an Automated Cooling Technique for Internal Combustion Engine Using ANN. in Proc. International Conference on Computing and Control Engineering, Chennai, India. 2012.

[17] Iskandar, M. A. and Filho, A. A., Design and Analysis of a Cooling Control System of a Diesel Engine. ABCM Symposium in Mechatronics, Italy, 2012.

[18] Shin, Y. H., Kim, S. C. and Kim, M.S., Use of Electromagnetic Clutch Water Pumps in Vehicle Engine Cooling Systems to Reduce Fuel Consumption. Journal Energy Procedi, Vol. 82, pp. 265-272, 2013.

[19] Jung, D., et al., Analysis of Engine Temperature and Energy Flow in Diesel Engine using Engine Thermal Management. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 27., Issu. 2, pp. 583-592, 2013.

[20] Arunachalam, K., Jawaher, P. M., Conversion of Mechanical Water Pump to Electric Water Pump for a CI Engine, International Journal of Science and Technology, Vol. 8, No. 12, 2014.

[21] Al-Tamimi, A., Al-Jarrah, A. M., and Salah, M. H., Intelligent Control Technoques for Electrical Actuated AAutomotive Cooling Systems, Journal Control and Intelligent System, Vol. 42, No. 2, 2014.

[22] Passino, K. M., Yurkovich, S. and Reinfrank, M., Fuzzy Control, Vol. 42. Citeseer, 1998.

[23] Jang, J. S. R., Sun, C. T. and Mizutani, E., Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, 1997.

فهرست علائم

جرم هوا	m_a
جرم سوخت	m_f
ظرفیت گرمایی ویژه	C_p
توان ترمزی	P_b
نرخ انتقال حرارت به سیال خنک ساز	\dot{Q}_{cool}
آنتالپی گازهای خروجی از خودرو	h_{exh}
حرارت دفع شده به روغن	\dot{Q}_{misc}
توان موتور	P_u
انتقال حرارت از موتور به سیال خنک کاری	Q_m
شار حرارتی	\dot{q}
دمای دیواره	T_W
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h_c
ضریب رسانایی	K

مراجع

- [1] Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [2] Guillemot, P., Gatellier, B., and Rouveirrolles, P., The Influence of Coolant Temperature on Unburned Hydrocarbon Emissions from Spark Ignition Engine, SAE Technical Paper 941962, 1994.
- [3] Russ, S., Kaiser, E., and Siegl, W., Effect of Cylinder Head and Engine Block Temperature on HC Emissions from a Single Cylinder Spark Ignition Engine, SAE Technical Paper 952536, 1995.
- [4] Couëtouse, H. and Gentile, D., Cooling System Control in Automotive Engines, SAE Technical Paper 920788, 1992.
- [5] Ap, N., New Components Development for New Engine Cooling Systems. IMechE VTMS, pp. 543. 1999.
- [6] Lehner, C., Parker, G., Arici, O., and Johnson, J., Design and Development of a Model Based Feedback Controlled Cooling System for Heavy Duty Diesel Truck Applications Using a Vehicle Engine Cooling System Simulation, SAE Technical Paper 2001-01-0336, 2001.
- [7] Brace, C., Burnham-Slipper, H., Wijetunge, R., Vaughan, N. et al., Integrated Cooling Systems for Passenger Vehicles, SAE Technical Paper 2001-01-1248, 2001.
- [8] Chanfreau, M., Gessier, B., Farkh, A., and Geels, P., The Need for an Electrical Water Valve in a THERmal Management Intelligent System (THEMIS™), SAE Technical Paper 2003-01-0274, 2003.
- [9] Wagner, J., Srinivasan, V., Dawson, D., and Marotta, E., Smart Thermostat and Coolant Pump



Simulation of cooling circuit with electrical water pump in Iranian national engine with using Fuzzy controller

K. Mohammadi¹, A. Mohammadi^{2*}, S. M. Aghamirsalim³

¹ Amir Kabir University of Technology, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran, mohammadi.k@aut.ac.ir

² Rajaei Teacher Training University & Iran Khodro Powertrain Company, Tehran, Iran, amohammadi@srctu.edu

³ Amir Kabir University of Technology, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 May 2016

Accepted: 2 November 2016

Keywords:

Iranian national engine

Cooling circuit

Electrical water pump

ABSTRACT

In conventional cooling-circuit, circulation of coolant is carried out with mechanical water pump (MWP), which its rotation speed is a function of engine speed and no feedback of temperature and performance of engine exist. A solution to solve this problem is using electrical water pump (EWP) that its revolution is determined based on coolant temperature. In this research, first coolant circuit of Iranian National Engine was simulated with MWP in GT-Suite software. Warm up time and pressure loss in cooling circuit is validated with experimental data. Then, MWP was replaced with EWP and a Fuzzy controller for determination of EWP speed was designed using Matlab/Simulink environment. The proposed controller was coupled with cooling circuit which designed in GT-Suite and the effect of EWP in cooling circuit on warm up time, was investigated. Simulation result shows 39 percentage reduction of warm up time in comparison with conventional engine.

