



بررسی تأثیر الگوی رانندگی در عملکرد گرمایی موتور برقی خودروی نیسان LEAF

امیرحسین کاکایی^{۱*}، میلاد ماه‌جورقانی^۲، امین پیکانی^۳

^۱ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، Kakaee_ah@iust.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران M_mahjoorghani@auto.iust.ac.ir

^۳ استاد ارشد دانشگاه هرثفوردشایر انگلستان، A.pykani@herts.ac.uk

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۸ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

موتور برقی

خنک کاری

چرخه رانندگی

شبکه گرمایی تک دما

روش اجزاء محدود

چکیده

در حالی که کاهش آلاینده‌های کربنی و مصرف انرژی سوخت‌های سنگواره‌ای به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های محیط‌زیستی و اقتصادی موجود در جهان تبدیل شده، استفاده از خودروهای برقی جدی‌تر از همیشه در دستور کار تولیدکنندگان و طراحان بزرگ صنعت خودرو قرار گرفته است. پژوهش‌های بسیاری نیز در زمینه موضوع خنک‌کاری موتور برقی در حال انجام است. افت‌های مختلف الکترومغناطیسی و مکانیکی موجود در موتور مانند چشمه گرمایی عمل کرده و در صورتی که به نحو مناسبی توسط سامانه خنک‌کاری دفع نشوند، زمینه‌ساز افت عملکرد و در نهایت فرسودگی زودتر از موعد موتور خواهند شد. به همین منظور در پژوهش پیش‌رو، طرح موتور برقی بدون جاروبک آهنربای دائم خودروی نیسان LEAF، در نرم‌افزار Motor-CAD تشکیل شده و پس از شبیه‌سازی افت‌های مختلف موجود در آن با اجرای شبیه‌سازی‌های مختلف دوطبقه و سه‌بعدی با روش اجزاء محدود، با استفاده از چهار چرخه رانندگی مشهور استاندارد و متمایز از دیدگاه عملکرد سامانه خنک‌کاری و نقاط بحرانی دمایی مورد موشکافی قرار گرفته است. پس از اجرای این شبیه‌سازی‌ها مشخص شد تفاوت در الگوی رانندگی می‌تواند زمینه‌ساز ایجاد تغییر در رفتار گرمایی موتور برقی شود. این تغییر رفتاری ممکن است حتی منجر به جابجایی نقطه بحرانی یا داغ‌ترین نقطه موتور شود. به جز بحث مقدار عددی دمای بیشینه ثبت شده، از دیدگاه مدت زمان بحرانی بودن نقاط مختلف نیز رفتار متفاوتی متناسب با چرخه رانندگی مدنظر در نتایج شبیه‌سازی‌ها به چشم می‌خورد. بنابراین نوآوری اصلی این پژوهش ضرورت توجه به الگوهای رانندگی در طراحی یک سامانه خنک‌کاری مناسب و بهینه برای موتور برقی با کاربرد محرکه خودرو است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

افزایش دمای قسمت‌های مختلف موتور هم سبب ایجاد اتلافات گرمائی شده و هم باعث می‌شود عملکرد کلی موتور در گستره‌های مختلف کاری دچار افت شود و حتی طول عمر آن نیز با تهدید مواجه شود [۳].

پیشرفته‌ترین گونه موتور برقی مورد استفاده در صنعت خودروسازی موتورهای بدون جاروبک^۱ هستند که در آنها سیم‌پیچ‌ها در محور ثابت^۲ و آهنرباهای دائمی در محور دوار^۳ قرار گرفته‌اند. اگرچه این موتورها از بازدهی خوب و وزن کم و اندازه کوچکی برخوردار هستند اما به سبب افت کارکرد و پدیده آهنربازدایی آهنرباها [۴] در دمای داغ و همچنین اثر ژول حاصل از افت گرمائی درون سیم‌پیچ‌ها، نیازمند پشتیبانی گرمائی از طرف یک سامانه خنک‌کاری مناسب هستند [۵].

به طور کلی موتورهای برقی چند نوع اتلاف دارند. افت‌های هسته‌ای^۴ شامل افت‌های مقاومتی محور دوار و ثابت، افت‌های هیستریزس و افت‌های جریان اددی می‌شوند. افت‌های اصطکاک^۵ ناشی از یاتاقان‌های موتور و افت‌های هوایی^۶ شامل نیروی مقاوم پسا در هوای بین محور دوار و محور ثابت‌اند. این افت‌ها به عنوان منبع گرمائی عمل کرده و سبب افزایش دمای اجزای مختلف موتور می‌شوند [۶]. در وهله اول انتقال همرفت طبیعی^۷ به جبران این افزایش دما کمک می‌کند اما در صورت عدم کفایت احتمالی این روش، سامانه‌های خنک‌کاری متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

لی و همکاران سامانه هواخنک را به عنوان یک گزینه مرسوم و مناسب مورد تحقیق قرار دادند و نشان دادند با اعمال تغییراتی در ثابت انتقال حرارت همرفت می‌توان عملکرد موتور را ارتقا داد [۷].

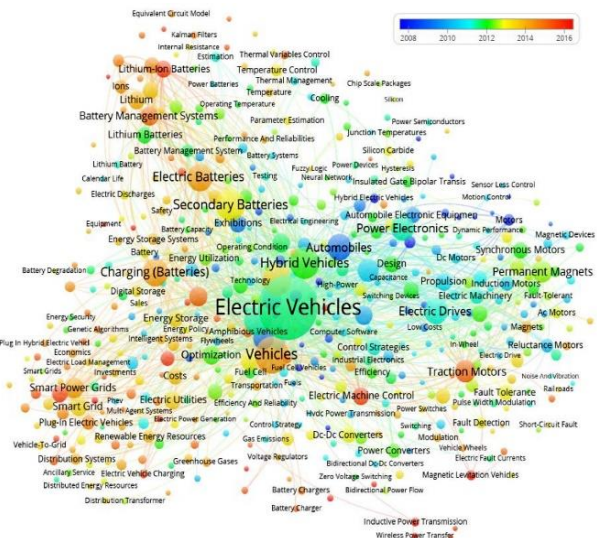
فارسان و همکاران نیز با تحلیل‌های آزمایشگاهی موفق به بهینه‌سازی سطوح خارجی مورد استفاده در سامانه هواخنک موتورهای القایی شدند. استفاده از فن و انتقال حرارت همرفت اجباری از دیگر روش‌های مرسوم خنک‌کاری موتورهای برقی است که البته مستلزم تأمین توان مکانیکی از سوی محور موتور است [۸].

روش دیگر، خنک‌کاری با کمک مایعاتی مانند آب و روغن است. اگرچه این روش به معنی اضافه شدن یک سامانه چرخش سیال به کل مجموعه و افزایش وزن و پیچیدگی طراحی و کاهش بازدهی کلی سامانه است اما در سالهای اخیر در این زمینه نیز تحقیقات قابل ملاحظه‌ای انجام شده‌است.

سینگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ طی آزمایشات متعدد به بررسی تأثیر مقاومت گرمائی پوسته تماسی بین سامانه گردش آب و بدنه محور ثابت موتورهای برقی پرداختند [۹].

لیم و همکاران نیز در سال ۲۰۱۴ عملکرد گرمائی افشانه روغن روی موتورهای درون چرخ را تحلیل کردند [۱۰].

امروزه استفاده از خودروهای برقی به جای خودروهای احتراق داخلی از قالب یک ایده مناسب روی کاغذ خارج شده و به اصلی‌ترین و به روزترین اهداف شرکت‌های خودروسازی مطرح دنیا تبدیل شده‌است. برداشت بی‌رویه و دغدغه کاهش منابع سوخت‌های سنگواره‌ای، محدودیت‌های روزافزون نهادهای مدافع محیط‌زیست بر صنعت خودرو و پیشرفت‌های اخیر در زمینه سامانه‌های کنترلی و ذخیره انرژی برقی دست به دست هم داده‌اند تا خودروهای برقی با شبیهی چشمگیرتر از پیش‌بینی‌های ابتدای قرن بیست و یکم، جایگاه خود را در بازار جهانی خودرو باز کنند. قابل پیش‌بینی است که با ظهور موج نیاز خودروسازان به طرح‌های مختلف در ساخت خودروهای برقی، تحقیقات متعدد و گوناگونی در زمینه‌های متنوع این صنعت در مراکز دانشگاهی و آزمایشگاهی انجام شود. شکل ۱ به خوبی تمرکز تحقیقات پیرامون جوانب مختلف خودروهای برقی در بازه سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۶ را به خوبی نشان می‌دهد [۱]:



شکل ۱: مرسوم‌ترین کلمات کلیدی تحقیقات در زمینه خودروهای برقی طی سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۸

در سالهای اخیر خودروسازان مشهور دنیا با همکاری دانشگاه‌های معتبر به توسعه تحقیقات در زمینه‌های مختلف خودروی برقی مشغول هستند و در کشور ما نیز گام‌های مثبتی در این زمینه برداشته‌شده و حتی اخیراً نمونه‌های آزمایشی موفق نیز از خودروهای برقی ساخته شده‌اند [۲].

استفاده از موتورهای برقی به عنوان سامانه محرکه اگرچه همواره گزینه جذابی به نظر می‌رسیده است، اما چالش‌های متعددی نیز در پی دارد که یکی از اصلی‌ترین و بحرانی‌ترین این چالش‌ها متناسب با نیازهای روز صنعت خودرو، مساله خنک‌کاری موتورهای برقی است.

⁵ Friction Losses

⁶ Air Losses

⁷ Natural Convection

¹ Brushless

² Stator

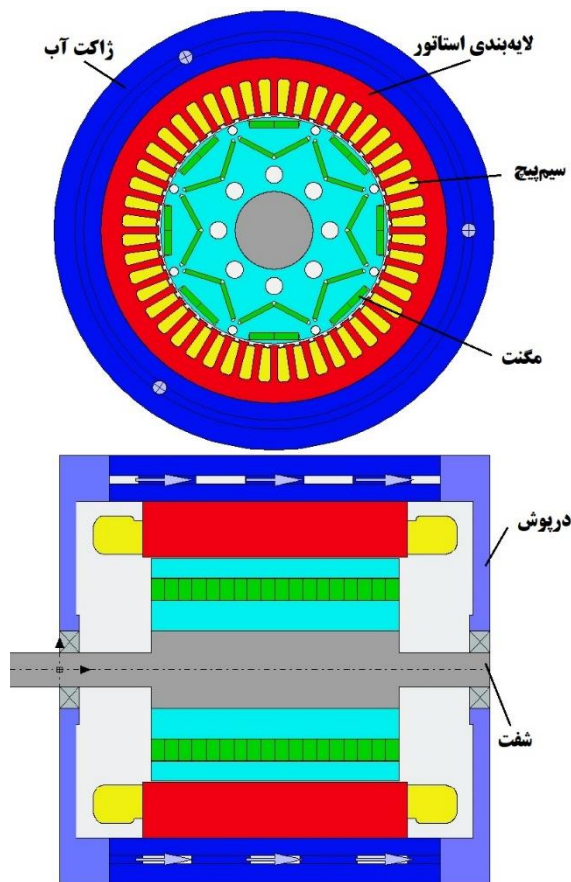
³ Rotor

⁴ Core Losses

۲- شبیه‌سازی موتور برقی خودروی نیسان LEAF

در انتهای سال ۲۰۰۶ شرکت خودروسازی نیسان طرحی با نام برنامه سبز نیسان ۲۰۱۰ مطرح کرد که محصول این طرح، تولید خودروی نیسان LEAF بود. این خودرو که در سال ۲۰۱۹ به عنوان پرفروش‌ترین خودروی برقی تاریخ با قابلیت پیمایش جاده‌ای معرفی شد از سامانه محرکه‌ای با بیشینه گشتاور ۲۸۰ نیوتون‌متر و بیشینه توان ۸۰ کیلووات برخوردار است [۱۴].

شکل ۲ اجزای مختلف طرح موتور برقی این خودرو را به همراه سامانه خنک‌کاری آن در نرم‌افزار Motor-CAD در دو نمای شعاعی و محوری نشان می‌دهد:



شکل ۲: مقاطع محوری و شعاعی طرح نرم‌افزاری موتور برقی خودروی نیسان LEAF در نرم‌افزار Motor-CAD

همانطور که در شکل پیداست این موتور از خانواده موتورهای بدون جاروبک آهنربا دائم است. محور ثابت این موتور ۴۸ شکاف برای جایگذاری دسته سیم پیچ و محور دوار آن نیز ۸ قطب آهنربائی دو لایه دارد. بیشینه دور کاری آن ۱۰۰۰ دور در دقیقه است و یک مبدل سه فاز وظیفه تبدیل و انتقال ولتاژ ۳۷۵ ولت باس با بیشینه جریان فازی ۴۸۰ آمپر را بر عهده دارد. سیم پیچ این موتور از جنس مس

از سوی دیگر یکی از مفاهیم تأثیرگذار در بررسی عملکرد یک خودرو چرخه رانندگی^۱ است که در تحلیل رفتاری موتور احتراق داخلی از جوانب مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و در موتورهای برقی نیز با توجه به بحرانی بودن مساله گستره کاری آنها، موضوعی با اهمیت است.

یکی از عوامل اصلی بحرانی بودن این موضوع، مساله ذخیره انرژی برقی است که سبب شده در مرحله طراحی موتورهای برقی با کاربرد محرکه خودرو توجه ویژه‌ای به این موضوع اختصاص داده شود. به طور کلی دو روش محاسباتی و آزمایشی برای بررسی عملکرد موتور با این رویکرد وجود دارد. روش اول بررسی موتور در شرایطی با سرعت ثابت است که اگرچه به واقعیت نزدیک نیست اما به منظور تحلیل اولیه مناسب به نظر می‌رسد. در روش دوم یعنی روش واقعی‌تر، عملکرد موتور در یک بازه زمانی با سرعت‌های مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد که این روش در حقیقت همان استفاده از چرخه‌های رانندگی استاندارد است [۳].

در سالهای اخیر تحقیقات با ارزشی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۱۵ نیسچورک و همکاران به بررسی تأثیر چرخه‌های رانندگی مختلف روی عملکرد موتور از نظر بازدهی و همچنین افت‌های اینورتر^۲ و در نهایت شبیه‌سازی دقیق رفتار گذرای مبدل‌های^۳ دو قطبی^۴ آن پرداختند و فارغ از تحلیل‌های گرمائی نشان دادند در برخی از چرخه‌های استاندارد این رفتار به وضوح قابل بررسی است [۱۱]. در سال ۲۰۱۶ نیز جئونگ و همکاران عملکرد موتورهای برقی در چرخه‌های مختلف رانندگی استاندارد را ارزیابی کرده و دو طرح چرخه رانندگی مناسب‌تر به منظور موشکافی این عملکرد ارائه دادند [۱۲]. فیوری و همکاران نیز در همین سال ضمن ارائه یک طرح به منظور محاسبه بازدهی ترمز بازیابی برحسب مشخصات عملکردی موتور به بررسی تأثیر چرخه‌های مختلف رانندگی روی رفتار طرح خود و به طور کلی مصرف انرژی برقی موتور پرداختند [۱۳].

به نظر می‌رسد مدیریت گرمائی و خنک‌کاری موتورهای برقی مرسوم مورد استفاده در صنعت خودروهای برقی نیز می‌تواند به عنوان یک مفهوم تعیین‌کننده در مرحله طراحی در چرخه‌های مختلف رانندگی مورد بررسی قرار بگیرد. به همین سبب در پژوهش پیش‌رو موتور برقی مورد استفاده در یکی از مشهورترین و محبوب‌ترین خودروهای برقی دنیا یعنی نیسان LEAF مورد تحلیل الکترومغناطیسی و گرمائی قرار گرفته و پس از شناسایی نقاط بحرانی و رفتارهای دمایی اجزای مختلف موتور، تمامی این مشخصه‌ها در چرخه‌های رانندگی مختلف استاندارد بررسی شده‌اند تا تأثیر الگوهای مختلف رانندگی روی عملکرد سامانه خنک‌کاری آنها مشخص شود.

³ Transistor

⁴ Insulated-gate bipolar transistor

¹ Driving Cycle

² Inverter



شکل ۴: نمونه موتور برقی مورد پژوهش و سامانه خنک کاری [۱۶]

این نرم افزار در زمینه تحلیل کلی عملکرد موتورهای برقی شامل سه پودمان^۲ اصلی و کاربردی است: پودمان اول به منظور تحلیل های اجزاء محدود دو بعدی الکترومغناطیسی و برقی موتور مورد استفاده قرار می گیرد.

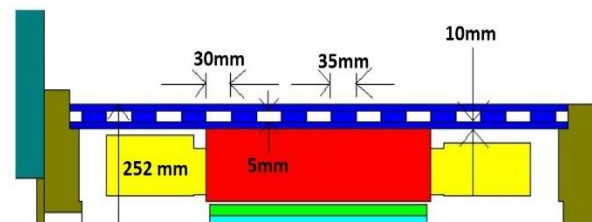
پودمان دوم متناسب با منابع گرمائی تعریف شده به حل شبکه گرمایی موتور و به دست آوردن تغییرات دمایی بخش های مختلف موتور پرداخته و در پودمان سوم با استفاده از نتایج به دست آمده از دو پودمان قبلی نقشه های بازدهی موتور و رفتار کلی موتور تحت بارگذاری ها و شرایط کاری مختلف محاسبه می شود.

بادوام، لایه بندی محور دوار و محور ثابت آن از جنس فولاد 30DH و آهنربا مورد استفاده در محور دوار از جنس N30UH است. دیگر مشخصات هندسی این موتور در جدول ۱ ذکر شده اند. [۱۴]

جدول ۱: مشخصات هندسی موتور

قطر لایه بندی محور ثابت	۱۹۸ میلی متر
قطر اصلی محور ثابت	۱۳۲ میلی متر
عرض دندان	۴,۱۵ میلی متر
عمق شکاف	۲۱,۱ میلی متر
شعاع انحنا کنج شکاف	۲ میلی متر
ضخامت شکاف هوا	۱ میلی متر
قطر محور	۴۴,۴۵ میلی متر

سامانه خنک کاری مورد استفاده در این موتور سامانه مایع خنک استفاده از کانال های تعبیه شده در ژاکت آبی (پانویس) سه مسیری و سردکننده مخلوط آب و اتیلن گلیکول با نام تجاری EGW50/50 است. در ضمن در این شبیه سازی ها، دمای ورودی سردکننده و دمای محیط ۶۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. دیگر مشخصات هندسی سامانه خنک کاری موتور در شکل ۳ نشان شده اند: [۱۵]



شکل ۳: مقطع محوری شامل ابعاد هندسی سامانه خنک کاری

در شکل ۴ نمایی از موتور و مسیرهای تعبیه شده در پوسته سامانه خنک کاری آن نشان داده شده است.

۳- معرفی روش حل و اعتبارسنجی طرح نرم افزاری موتور

در پژوهش پیش رو یک طرح شبکه گرمائی پارامتر تک دما^۱ که در نرم افزار Motor-CAD تعبیه شده است، مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از بارزترین نقاط مثبت و ویژگی های خاص استفاده از روش شبکه گرمائی تک دما، سرعت تند محاسبات به واسطه ساده سازی کل سامانه است.

همین سرعت تند سبب می شود بتوان در مدت کوتاه و با هزینه های محاسباتی محدود، شبیه سازی های متعددی در شرایط مختلف کاری اجرا کرد و حتی در زمینه تحلیل حساسیت خروجی موتور نسبت به مشخصه های مختلف ساختاری آن نیز تحقیقاتی انجام داد.

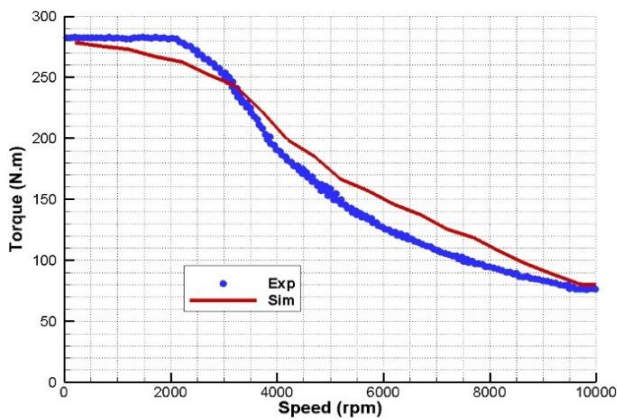
² Module

¹ Lumped Parameter Thermal Network

موتور قابل محاسبه هستند که در یک مورد خاص با توجه به اینکه مقاومت برقی مس خود تابعی از دماست، افت‌های ژولی آن نیز یک وابستگی درونی به مقادیر دمایی موجود دارد. این اتلاف با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

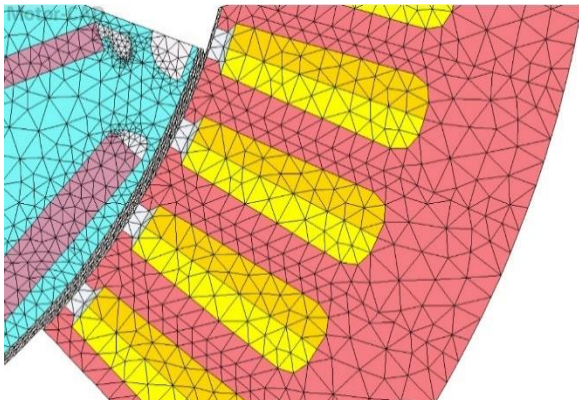
$$P_{wdg} = P_{ref} [1 + \alpha_{ref}(T - T_{ref})] \quad (3)$$

که در آن P_{ref} یک نمایش ثابت از افت‌های مسی در دمای T_{ref} است و α_{ref} یک عدد ثابت است. به طور کلی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Motor-CAD شامل دماهای گره‌ای، جریان‌های گرمایی، افت‌های مسی، ثوابت انتقال گرمایی، سرعت و افت فشار مایع مبرد در پوشش آبی و... است. طرح مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی موجود در منابع [۱۷-۱۵] در نرم‌افزار Motor-CAD تشکیل شده است. این طرح از دو جنبه عملکرد الکترومغناطیسی و گرمایی-دمایی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در مرحله اول همانطور که در شکل بعدی مشخص است نمودار گشتاور خروجی موتور بر حسب دور آن با شبیه‌سازی به دست آمده و با داده‌های تجربی موجود در پژوهش مقایسه شده است که دقت نسبتاً مناسبی در این مقایسه به چشم می‌خورد:



شکل ۶: گشتاور خروجی موتور حاصل از شبیه‌سازی و حاصل از آزمایش

نمونه شبکه تشکیل شده در این مرحله به منظور تحلیل رفتار الکترومغناطیسی موتور به روش اجزاء محدود در شکل ۷ ترسیم شده است:



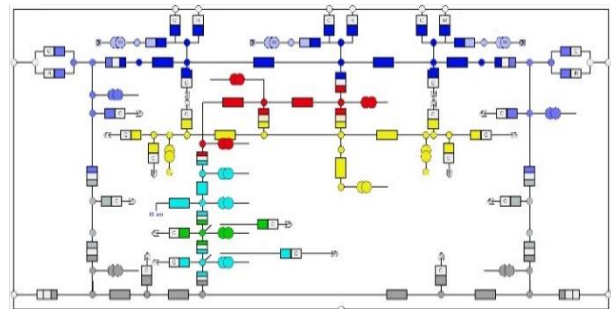
شکل ۷: نمونه شبکه تولیدشده در تحلیل الکترومغناطیسی عملکرد موتور با روش اجزاء محدود

بدیهی است با توجه به اینکه در این تحقیق قصد داریم رفتار گرمایی موتور را در قبال افت‌های مختلف ایجاد شده در شرایط مختلف کاری و چرخه‌های متنوع رانندگی بسنجیم، باید از یک استراتژی اتصال^۱ مناسب بین این سه پودمان استفاده کنیم. به این صورت که در هر نقطه عملیاتی از چرخه رانندگی مدنظر، با استفاده از فرض‌های اولیه دمایی عملکرد الکترومغناطیسی موتور بررسی شده و افت‌ها محاسبه شوند. سپس با توجه به مقادیر افت بدست‌آمده عملکرد گرمایی سامانه خنک‌کاری بررسی شده و مقادیر دمایی جدید به دست می‌آیند.

در گام بعد عملکرد الکترومغناطیسی موتور دوباره با مقادیر دمایی جدید محاسبه شده و سپس افت‌های جدید بدست‌آمده وارد پودمان گرمایی می‌شوند تا مقادیر جدید دما به دست آیند. این فرایند رفت‌وبرگشتی تا زمانی که مقادیر دمایی به یک همگرایی مناسب برسند، ادامه خواهد داشت.

پس از مشخص شدن مشخصات هندسی و عملکردی طرح موتور و سامانه خنک‌کاری آن است که شبکه گرمایی معادل تک دما تشکیل می‌شود. این شبکه شامل گره‌ها و مقاومت‌های گرمایی است که منابع گرمایی و دماهای اعمالی به آن به عنوان شرایط مرزی ویژه نقاط خاص عمل می‌کنند.

مقادیر مقاومت گرمایی از مشخصات ورودی و مقادیر دمایی در گره‌ها و توان گرمایی در هر مقاومت پس از حل کردن شبکه به دست می‌آیند. نمونه شبکه گرمایی طرح موتور برقی مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۵ ترسیم شده است:



شکل ۵: شماتیک شبکه گرمایی طرح موتور برقی

در روش شبکه گرمایی پارامتری تک دما، مقاومت گرمایی هدایتی با معادله ۱ تعریف می‌شود:

$$R_{cnd} = \frac{L}{\lambda A} \quad (1)$$

که مقدار آن به مشخصات هندسی ورودی (L و A) و ضریب هدایت گرمایی جنس ماده یعنی λ بستگی دارد. همین تعریف برای مقاومت گرمایی انتقال همرفی وجود دارد که عبارت است از:

$$R_{cnv} = \frac{1}{h_{cnv} A} \quad (2)$$

که در آن مقدار ضریب h_{cnv} به صورت پیش‌فرض در کد مورد استفاده نرم‌افزار تعریف شده است. متناسب با مشخصات کاری افت‌های مختلف

همچنین مشخصات خودروی نیسان LEAF نیز مطابق با جدول ۲ در شبیه‌سازی اعمال شده‌است [۱۵]:

جدول ۲: مشخصات خودروی نیسان LEAF	
جرم خودرو	۱۵۲۱ کیلوگرم
ثابت مقاومت غلشی	۰,۰۰۷
اندازه مقطع سطح از روبه‌رو	۲,۲۹ متر مربع
ضریب پسا	۰,۲۸
نسبت انتقال نهایی	۷,۹۳۸
شعاع چرخ	۰,۳ متر

۳- نتایج و بحث

به منظور شبیه‌سازی دقیق عملکرد موتور، افت‌های اصلی توسط طرح‌های استفاده‌شده در نرم‌افزار محاسبه شده‌اند. افت‌های جریان مستقیم درون سیم‌پیچ با استخراج ضریب تنظیم^۱ از شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی با روش اجزاء محدود، شبیه‌سازی شده‌اند. برای افت‌های مکانیکی موتور مانند افت اصطکاک درون یاتاقان‌ها نیز از مقادیر تجربی استفاده شده‌است. افت‌های ناشی از فرایند ساخت قطعات فلزی نیز توسط ضرایب تجربی موجود در منابع در نظر گرفته شده‌اند.

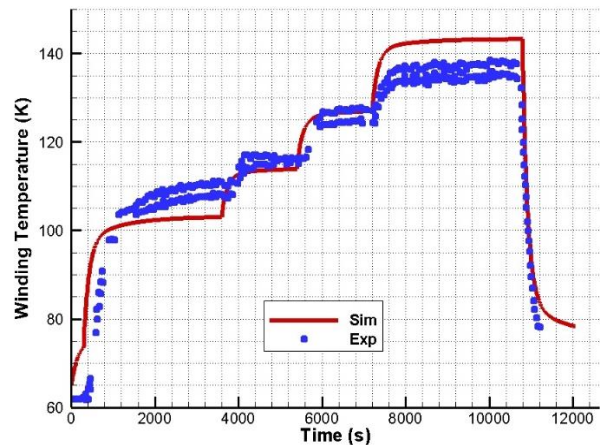
یکی از دیگر معیارهای رفتار الکترومغناطیسی موتور در شرایط مختلف، شرایط اشباع القایی و مقادیر نشت شار است که در این پژوهش از بهترین دقت موجود نرم‌افزار در کل چرخه استفاده شده است. همچنین در بررسی دسته‌سیم‌های موجود در سیم‌پیچ از طرح مکعبی چهارگانه استفاده شده تا نتایج دقت مناسبی داشته باشند و شیب افزایش دما در قسمت‌های تحتانی سیم‌پیچ‌ها قابل تحقیق باشند.

به منظور بررسی عملکرد طرح‌های مورد استفاده در طرح نرم‌افزاری موتور، عملکرد آنها در یک نقطه عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. این نقطه عملیاتی در سرعت دورانی ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه و جریان قلّه محور ثابت برابر ۴۸۰ آمپر قرار دارد که در حقیقت مقادیر بیشینه کارکرد موتور نیز هستند.

علت این انتخاب این است که بسیاری از افت‌های جزئی موتور در بسامدهای بزرگ قابل مشاهده هستند و طرح‌های مورد استفاده تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در نتایج بدست‌آمده در این شبیه‌سازی حالت پایا، در حالیکه توان خروجی محور موتور در این شرایط حدوداً ۱۲۰ کیلووات بدست‌آمده و موتور بازدهی ۹۰,۵ درصدی دارد حدوداً ۱۱ کیلووات افت مسی در محور ثابت به دست آمده است.

۳ کیلووات از این افت سهم افت DC و حدوداً ۸ کیلووات سهم بخش AC است که نشان از اهمیت شبیه‌سازی این افت در عملکرد الکترومغناطیسی

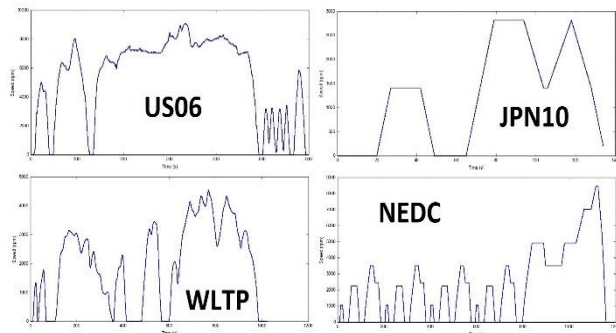
در مرحله دوم فرایند اعتبارسنجی طرح نرم‌افزاری موتور، از نتایج یک آزمایش گرمایی [۱۵] شامل اعمال گشتاور با مقادیر مختلف در چند مرحله به موتور و استخراج دمای داغ‌ترین نقطه موتور (انتهای سیم‌پیچ محور ثابت) استفاده شده‌است. مشخصات بار کاری این آزمایش در نرم‌افزار تعریف شده و پس از شبیه‌سازی عملکرد سامانه خنک‌کاری طرح مورد استفاده، مقادیر دمای بیشینه با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند که در این مرحله نیز تطابق قابل قبولی بین مقادیر موجود مشاهده می‌شود:



شکل ۸: مقادیر دمای داغ‌ترین نقطه موتور حاصل از شبیه‌سازی و حاصل از آزمایش

همانطور که گفته شد هدف اصلی این پژوهش تحلیل عملکرد گرمایی سامانه خنک‌کاری موتور برقی بدون جاروبک آهنربا دائم مورد استفاده در خودروی برقی نیسان LEAF در چرخه‌های رانندگی متمایز و بررسی تأثیر این تمایزها در رفتار موتور و مقادیر مختلف و بحرانی دمای درون موتور است.

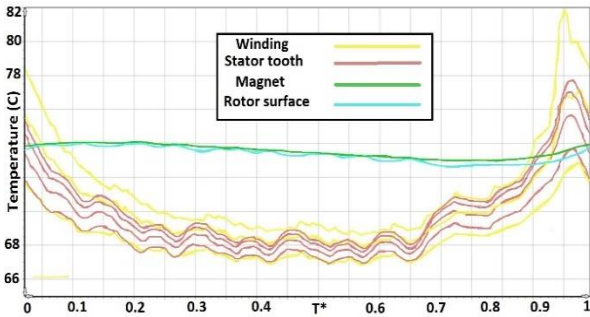
به همین منظور ۴ چرخه رانندگی مشهور طبق الگوی رانندگی در ۴ رویکرد متفاوت انتخاب شده‌اند که عبارتند از: چرخه رانندگی US06 آمریکا، چرخه رانندگی JPN10 ژاپن، چرخه رانندگی NEDC اروپا و چرخه رانندگی جهانی WLTP. در شکل ۹ نمودار سرعت دورانی موتور برحسب زمان در این چهار چرخه ترسیم شده‌است.



شکل ۹: نمودار سرعت/زمان برای ۴ چرخه رانندگی استاندارد

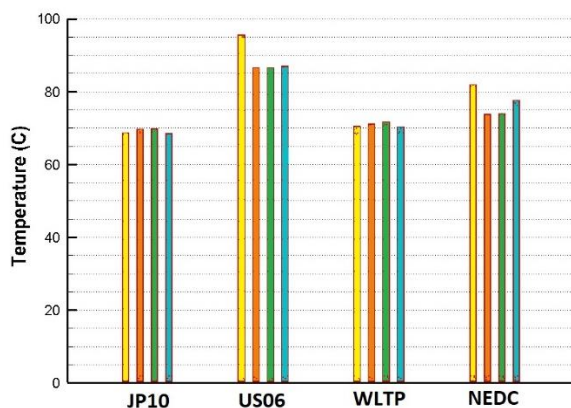
^۱ Calibration

شناسایی می‌شود اما با این حال در محدوده دیگری از چرخه، دماهای سیم‌پیچ و حتی دماهای دندان‌محور ثابت مقدار بیشتری دارند و به نوعی داغ‌ترین قسمت موتور جابجا می‌شود. این اختلاف دمایی در بحرانی‌ترین حالت به حدود ۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که بر مبنای دمای میانگین آهنربا، به معنی اختلافی حدوداً ۱۱ درصدی و قابل ملاحظه است.



شکل ۱۱: دمای قسمت‌های بحرانی موتور در یک دوره زمانی کامل چرخه رانندگی استاندارد NEDC

پس از اجرای شبیه‌سازی در هر چهار چرخه رانندگی و استخراج مقادیر دمایی، در هر حالت مقادیر بیشینه دمایی به دست آمدند. همانطور که در نمودار ۱۲ مشخص است چه از نظر عنوان نقطه بحرانی دمایی و چه از نظر مقداری رفتارهای متفاوتی از موتور در این ۴ چرخه رانندگی ثبت شده‌است. در چرخه رانندگی US06 (که بزرگترین میانگین دمایی را دارد) و NEDC، سیم‌پیچ و دندان‌محور ثابت داغ‌ترین نقاط هستند. این درحالی است که در دو چرخه دیگر یعنی WLTP و JP10 نقاط بحرانی گرمایی موتور در درجه اول آهنربا و سطح محور دوار هستند که البته لازم به ذکر است در این دو چرخه اختلاف دمایی چشمگیری وجود ندارد و سامانه خنک‌کاری موتور خروجی آهنربا ارائه می‌دهد.

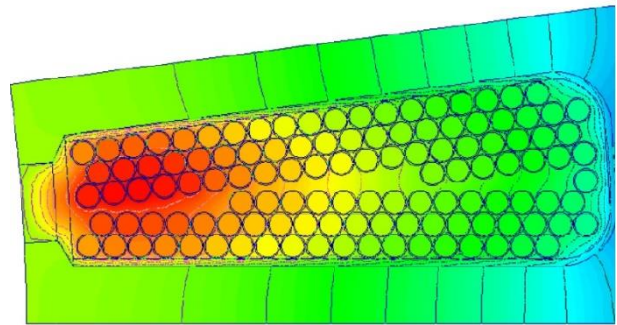
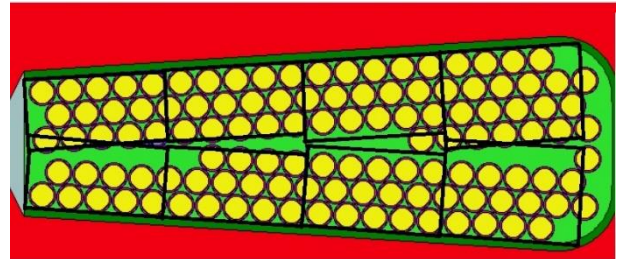


شکل ۱۲: مقادیر بیشینه دما در هر قسمت از موتور برقی (با رعایت رنگ‌بندی اشکال قبلی) در چرخه‌های رانندگی استاندارد

از سوی دیگر اگرچه مقادیر بیشینه دمایی مساله‌ای بسیار تعیین‌کننده در طراحی سامانه خنک‌کاری هستند اما مساله دیگر که تحلیل واقعی‌تری از عملکرد گرمایی موتور ارائه می‌دهد گستره زمانی است که

موتور و متعاقباً در عملکرد گرمایی دارد. در این نقطه عملیاتی افت آهنربا سهم خیلی کمتری در افت کلی دارد (کمتر از ۱ کیلووات) و افت‌های مکانیکی نیز قابل ملاحظه نیستند. با این وجود به نظر می‌رسد فضای تحقیقاتی بسیاری برای ارتقای شبیه‌سازی نرم‌افزار در زمینه محاسبه افت‌های مذکور وجود دارد.

در شکل ۱۰ طرح مکعبی چهارگانه در یک دسته‌سیم جاگذاری شده در یک شکاف از محور ثابت، و توزیع دماهای به دست آمده در این شرایط عملیاتی در همین شکاف ترسیم شده‌اند.



شکل ۱۰: طرح مکعبی چهارگانه در یک شکاف از محور ثابت و کانتور دمای دسته‌سیم جاگذاری شده در همان شکاف در شرایط عملیاتی مذکور

همانطور که در شکل مشخص است طرح مکعبی چهارگانه مورد استفاده با موفقیت توانسته شیب افزایش دمای دسته‌سیم‌های سیم‌پیچ را از بخش خارجی محور ثابت به بخش داخلی آن به خوبی نشان دهد.

در مرحله آخر شبیه‌سازی عملکرد موتور برقی یعنی شبیه‌سازی در چرخه‌های رانندگی معرفی شده در بخش قبل، به منظور یکپارچه‌سازی مقایسه گرمایی و باتوجه به متفاوت بودن بازه زمانی فعالیت این چرخه‌ها، در یک مدت زمان یکسان یعنی حدود ۸۴۰۰ ثانیه شبیه‌سازی انجام شده و در نهایت مقادیر دما در نقاط اصلی بحرانی در آخرین تکرار چرخه رانندگی به دست آمده‌اند. به همین سبب در این نمودارها محور افقی با معرفی متغیر کسر زمانی به صورت بی‌بعد در آمده‌اند. دماهای بحرانی نیز عبارتند از: ۳ مقدار برای سیم‌پیچ (بیشینه - میانگین - کمینه)، ۴ مقدار برای دندان‌محور ثابت (از لایه درونی به سمت بیرونی)، یک مقدار برای سطح محور دوار و یک مقدار برای آهنربا. به عنوان نمونه در شکل ۱۱ این ۹ دما در یک دوره زمانی کامل چرخه رانندگی NEDC ترسیم شده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است در اکثر محدوده زمانی، دمای آهنربا به عنوان بحرانی‌ترین دما

پس از اجرای شبیه‌سازی گذرا و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی پایا در نقاط عملیاتی مختلف به خصوص نقطه عملیاتی نزدیک به حد نهایی موتور (سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه و بیشینه جریان محور ثابت ۴۸۰ آمپر) در وهله اول مشخص شد دماهای واقعی موتور در چرخه‌های رانندگی استاندارد اختلاف معناداری با بیشینه دما در نقاط عملیاتی مرزی دارد. به همین سبب به نظر می‌رسد مبنای قراردادن دماهای واقعی در طراحی سامانه خنک‌کاری موتور انتخابی منطقی‌تر باشد و حتی سبب کاهش توان موردنیاز در سامانه‌های خنک‌کاری و افزایش ظرفیت استفاده از سامانه‌های کم‌حجم‌تر و سبک‌تر شود.

نکته بعدی اهمیت تنوع رفتاری موتور از دیدگاه گرمایی در شرایط کاری مختلف است. نشان داده شد که در ۴ چرخه رانندگی استاندارد، سوای اختلاف مقداری در دماهای به دست آمده، نقاط بحرانی گرمایی با بیشینه دما در موتور نیز می‌توانند با هم تفاوت داشته باشند و به عبارت دیگر نقطه بحرانی تحت تأثیر بار روی خودرو جابجا می‌شود. (شکل ۱۱). این مهم نشان‌دهنده این است که سامانه خنک‌کاری پیش‌فرض طراحی شده متناسب با نقاط کاری خاص یا چرخه‌های رانندگی استاندارد جهانی که لزوماً با الگوهای رانندگی محلی یک کشور خاص همخوانی ندارد، لزوماً بهینه‌ترین و بهترین سامانه ممکن نیست و متناسب با الگوی رانندگی و بار کاری روی خودرو، می‌توان سامانه خنک‌کاری بهینه‌تری برای موتور برقی خودرو ارائه داد. البته این امر مستلزم در اختیار داشتن چرخه رانندگی بومی نیز است که خود نیازمند پژوهش‌های آماری متعدد و عمیق است. موضوع جابجایی نقطه بحرانی گرمایی در شرایط کاری مختلف حتی ممکن است سبب تغییر ساختار خنک‌کاری موتور شود. به عنوان مثال در صورتی که مانند نتایج شکل ۱۰ مشخص شود در یک الگوی رانندگی خاص دماهای بحرانی بیشتر در بخش زیرین سیم‌پیچ اتفاق می‌افتند می‌توان به جای استفاده از سامانه ژاکت‌آبی، از سامانه افشانه مایع خنک‌کاری روی نقاط داغ بهره گرفت.

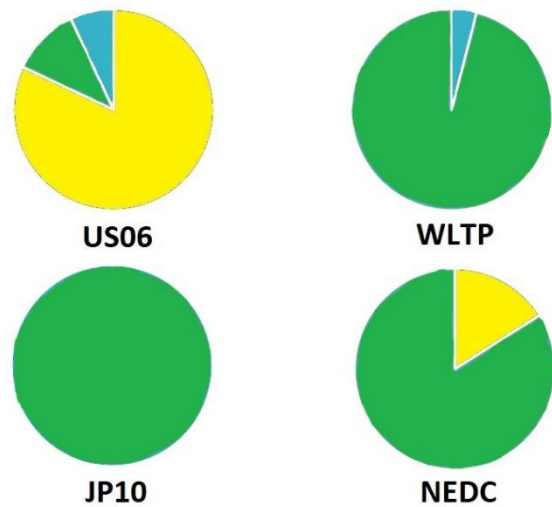
با این وجود مبنای قرار دادن عدد بیشینه دما در تحلیل عملکرد گرمایی موتور در یک چرخه رانندگی به خودی خود امری کامل و بدون ایراد نیست چرا که لازم به تحقیق است که دمای بحرانی ایجاد شده در چه سهم زمانی از عملکرد کلی موتور اتفاق می‌افتد.

این موضوع نیز طبق نتایج نمودار ۱۲ بررسی شد. بدیهی است که یک سامانه خنک‌کاری بهینه و مناسب باید تمام نقاط بحرانی را از نظر دمایی پوشش دهد هرچند اینکه این مقدار دما در یک لحظه اتفاق بیفتد اما با این وجود چنانچه مشخص شود سهم زمانی این نقطه بحرانی در برابر کل زمان کارکرد موتور در خودرو اندک است می‌توان از رویکرد تغییر ساختار خنک‌کاری اجتناب کرد.

در نهایت باید گفت برابری بین دو مفهوم شدت اختلاف دمای نقطه بحرانی با باقی نقاط موتور از یک سو و سهم زمانی رخداد این دمای بیشینه نسبت به کل مدت زمان عملکرد موتور از سوی دیگر یک موضوع جذاب برای تحقیقات تکمیلی آینده است.

دماهای بحرانی در موتور اتفاق می‌افتند. به عبارت دیگر همانطور که مشخص شد عملکرد واقعی موتور برقی از نظر دمایی با دماهای به دست آمده در یک نقطه عملیاتی نزدیک به حالت بیشینه عملکرد موتور اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد، می‌توان نشان داد که در یک چرخه رانندگی استاندارد اگرچه دماهای بحرانی با مقادیر قابل ملاحظه در قسمتی از این چرخه اتفاق می‌افتند اما از نظر گستره زمانی، مقطع وقوع این دماها در برابر کل چرخه نسبتی متغیر و قابل تحقیق دارد.

به همین سبب در نمودار ۱۳ مشخص گردیده که در این ۴ چرخه استاندارد، در چه کسری از گستره زمانی دماهای بحرانی در نقاط مشخص شده در بخش قبلی اتفاق می‌افتند. همانطور که مشخص است در چرخه‌های WLTP و JP10 که بیشینه دما در کل دوره زمانی متعلق به آهنربا بود، از نظر زمانی هم در اکثر لحظات چرخه آهنربا بحرانی‌ترین نقطه گرمایی موتور است. در چرخه US06 نیز سهم بیشتر زمانی از نظر داغ‌ترین نقطه به سیم‌پیچ اختصاص دارد که از نظر مقداری نیز بیشترین دمای ثبت شده را به خود اختصاص داده است. در چرخه NEDC اما بیشترین گستره زمانی گرم‌ترین دما به داغ‌ترین نقطه ثبت شده دمایی در کل چرخه یعنی سیم‌پیچ اختصاص ندارد. بلکه همان طور که می‌بینیم در ۸۴ درصد گستره زمانی چرخه، آهنربا گرم‌ترین دما را دارد.



شکل ۱۳: سهم زمانی محدوده بحرانی‌ترین نقطه از نظر گرمایی در یک دوره زمانی چرخه‌های رانندگی استاندارد (با رعایت رنگ‌بندی اشکال قبلی)

۴- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی تأثیر چرخه رانندگی روی رفتار گرمایی موتور برقی و عملکرد سامانه خنک‌کاری آن، موتور برقی خودروی نسان LEAF در نرم‌افزار Motor-CAD شبیه‌سازی شد و پس از شبیه‌سازی افت‌های عملی موجود در موتور با روش اجزاء محدود دوبعدی و سه‌بعدی و اعتبارسنجی طرح در قیاس با نتایج تجربی موجود در منابع در دوا بخش الکترومغناطیسی و گرمایی، طرح موردنظر در ۴ چرخه رانندگی متمایز مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

[7] Li, H., Cooling of a permanent magnet electric motor with a centrifugal impeller. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010. 53(4): p. 797-810.

[8] Bone, J., Cooling and cooling circuits for electric motors. 1 ed. 1978: IEE J. Electr. Power Appl.

[9] Singh, O., et al., Parametric study of centrifugal fan performance: experiments and numerical simulation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2011. 1(2): p. 33.

[10] U. SanAndres, G.A., J. Poza, G. Ugalde, A.J. Escalada, Radial fan simulations by computational fluid dynamics and experimental validation. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, 2014.

[11] Knischourek, E. and D. Gerling. Analysis of electric vehicle driving cycles for inverter efficiency improvement at partial load. in 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2015. IEEE.

[12] Jeong, N.T., et al., Urban driving cycle for performance evaluation of electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 2016. 17(1): p. 145-151.

[13] Fiori, C., K. Ahn, and H.A. Rakha, Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 2016. 168: p. 257-268.

[14] Sato, Y., et al., Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle. 2011, SAE International.

[15] Staton, D. and J. Goss, Open source electric motor models for commercial EV & Hybrid traction motors.

[16] Burrell, T., Benchmarking of Competitive Technologies. 2012, Oak Ridge National Laboratory.

[17] Yang, R., N. Schofield, and A. Emadi. Comparative study between interior and surface permanent magnet traction machine designs. in 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2016. IEEE.

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
L	طول مشخصه، m
R	مقاومت گرمایی، K/W

علائم یونانی

λ	ضریب هدایت گرمایی،
-----------	--------------------

زیرنویس ها

cmd	هدایت گرمایی
cnv	همرفتی گرمایی

مراجع و منابع

[1] Gandoman, F.H., et al., Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019. 183: p. 1-16.

[۲] خاوری، ف.، س. بطحایی، ف. اکبری برومند، خودروی هیبریدی الکتریکی-پیل سوختی و خورشیدی قاصدک ۳ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، در نخستین کنفرانس ملی انرژی، فناوریهای خودرو، توسعه پایدار. ۱۳۹۰، شرکت مشاوران مدیریت توسعه عمید.

[3] Larminie, J., J. Lowry, and P.C.C.L.J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. 2003: Wiley.

[4] Hanselman, D.D., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2 ed. 2003: Cranston, RI, Magna Physics Publishing.

[5] Carriero, A., et al., *A Review of the State of the Art of Electric Traction Motors Cooling Techniques*. 2018, SAE International.

[6] Galloni, E., et al., CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018. 8: p. 470-476.



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Investigation the effect of driving pattern on thermal performance of Nissan Leaf's electric motor

A.Kakae^{1*}, M. Mahjoorghani², A. Paykani³

¹ Associate Professor, Faculty of Automotive Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Kakae_ah@iust.ac.ir

² PhD Candidate, Automotive Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, M_mahjoorghani@auto.iust.ac.ir

³ Senior Lecturer, University of Hertfordshire, UK, A.paykani@herts.ac.uk

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 December 2019

Accepted: 18 February 2020

Keywords:

Electric motor

Cooling

Driving cycle

Lumped-parameter thermal network

Finite element method

ABSTRACT

Whereas reducing carbon pollutant and fossil fuel energy consumption have become the most important environmental and economic concerns in the world, electric vehicles and their cooling system are in automotive industry manufacturers and designers agenda more than ever. Various motor electromagnetic and mechanical losses act as heat sources and could lead to performance falloff and premature exhaustion indisputably, if they don't dissipate by an appropriate cooling system. Thus, in present work, a model has been prepared in Motor-CAD software for Nissan LEAF's BPM electric motor and after modelling various losses in it by means of 2D and 3D simulations with finite element method, it has been attentively investigated in terms of cooling system performance and hotspot temperatures and locations in four popular distinct standard driving cycles. It has been revealed in results that diversities in driving patterns can lead to different thermal reactions in vehicle's electric motor. These changes can even rearrange thermal critical points and move hotspots to different parts of motor. Beside quantitative point of maximum temperatures, various transient responses have been monitored in simulations results and hotspot location moved differently in each cycle. Main novelty of the present research is clarifying the point that in order to design an efficient and suitable cooling system for electric motors in vehicles, driving pattern characteristics must be taken into account.



© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.