آشنایی با مدار خنک‌کاری هوشمند خودرو

مسعود دهمرده[1]، پژمان کورانی[2]

۱ استادیار دانشکدهٔ مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، mdahmardeh@iust.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳

چکیده

روزبه‌روز قدرت موتورهای احتراق داخلی روبه پیشرفت می‌نهد و درپی آن، گرمای تولیدشده در موتور بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه بیش از ۳۰ درصد از این اتلافات باید به‌صورت گرما به محیط منتقل شود، مدیریت حرارتی در موتور از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. مشکلات زیست‌محیطی و آلودگی ناشی از موتورهای احتراق داخلی هم اهرم فشاری است تا سیستم‌های خنک‌کاری خودرو متناسب با پیشرفت موتورهای احتراق داخلی، هوشمند شوند تا بتوانند در مواقع مورد نیاز گرما را انتقال دهند. مهم‌ترین وظیفهٔ سیستم مدار خنک‌کاری جلوگیری از گرم‌شدن بیش‌ازحد موتور در شرایط مختلف و گرم‌کردن سریع موتور در هنگام شروع به کار موتور است. از جمله مهم‌ترین قسمت‌هایی که در انجام وظیفهٔ مدار خنک‌کاری کارآمد است، واترپمپ مدار خنک‌کاری است که به‌عنوان قلب تپندهٔ مدار به‌کار می‌رود. با پیشرفت دانش الکترونیک و برق و با توجه به مزایایی که واترپمپ‌های الکتریکی نسبت به نوع مکانیکی دارند، محققان درصدد جایگزینی آنها با انواع مکانیکی رایج هستند. کاهش زمان گرم‌شدن موتور، کاهش حجم رادیاتور تا ۲۷ درصد، کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده از مزایای جایگزینی واترپمپ الکتریکی نسبت به مکانیکی می‌باشد. هدف این مقاله، بررسی انواع واترپمپ الکتریکی برای مدار خنک‌کاری و طراحی آن به‌منظور ارتقای بازده مدار و کاهش مصرف سوخت است. درنهایت مشخص می‌شود که استفاده از واترپمپ الکتریکی و سیستم خنک‌کاری هوشمند می‌تواند مصرف سوخت را به‌میزان ۱/۲ درصد کاهش دهد.

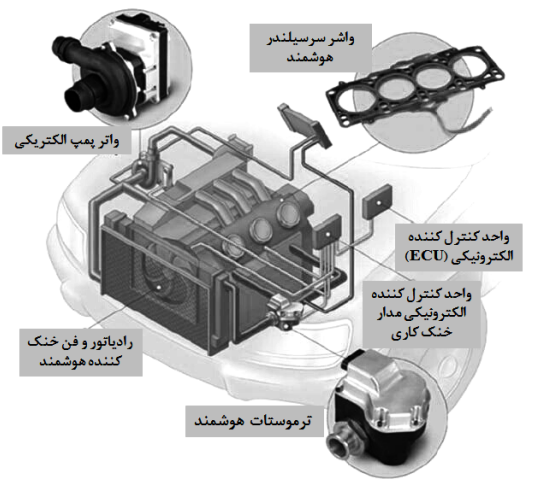
واژگان کلیدی: واترپمپ الکتریکی، مدار خنک‌کاری هوشمند، کاهش مصرف سوخت، موتور الکتریکی

۱. مقدمه

در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ م، تعداد خودروها در جهان از چهارصد میلیون به هشتصد میلیون دستگاه رسیده است؛ این افزایش، خود سبب ایجاد آلودگی محیط زیست و درپی آن ایجاد اثر گلخانه‌ای شده است. علاوه بر این منابع مصرفی فسیلی هم در جهان روبه کاهش است، این دلائل باعث شده تا توجه انسان به‌سمت خودروهای الکتریکی و هیبریدی و الکتریکی‌کردن تجهیزات خودروهای رایج جلب شود. در مدار خنک‌کاری هوشمند همانند مدار مکانیکی، جریان آب توسط واترپمپ بین

دیوارهٔ سیلندر گردش می‌کند و ترموستات الکتریکی وظیفهٔ کنترل دمای مایع خروجی از موتور را برعهده دارد و تنها تفاوت عمدهٔ مدار هوشمند با مدار مکانیکی، الکترونیکی‌بودن واترپمپ و ترموستات است و درنتیجه تمامی اجزای تحت کنترل ایی. سی. یو.[۱] مربوط به خود می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سیستم خنک‌کاری هوشمند از قسمت‌های متنوعی تشکیل شده است که هر کدام وظیفهٔ مشخصی دارند؛ وظایفی چون:

۱. مجاری سیلندر و سرسیلندر برای عبور مایع خنک‌کاری
۲. واترپمپ الکتریکی برای گردش مایع خنک‌کاری در مدار
۳. ترموستات الکتریکی برای کنترل دمای مایع خنک‌کاری
۴. رادیاتور برای خنک‌کردن مایع خنک‌کاری
۵. درپوش رادیاتور برای تنظیم فشار مدار خنک‌کاری
۶. لوله‌های اتصال‌دهنده برای اتصال رادیاتور به موتور
۷. فن رادیاتور برای پایین‌آوردن دمای آب داخل رادیاتور



شکل ۱. مدار خنک‌کاری هوشمند [۳]

مدار خنک‌کاری هوشمند فوایدی نسبت به نوع مکانیکی خود دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش سایز رادیاتور تا ۲۷ درصد و کاهش توان مصرفی واترپمپ تا ۸۷ درصد اشاره کرد [۱]. خودروسازانی چون فولکس‌واگن، تویوتا، لکسوس، بی. ام. دابلیو، آئودی، فورد و مرسدس بنز از واترپمپ الکتریکی بهره برده‌اند [۲]. چون واترپمپ به‌عنوان جز مهم در مدار خنک‌کاری محسوب می‌شود، در ادامه توضیحات بیشتری در مورد آن ارائه خواهد شد.

در این مقاله نخست به معرفی موتورهای الکتریکی مورد استفاده به‌عنوان واترپمپ الکتریکی در مدار خنک‌کاری هوشمند در خودرو پرداخته و سپس مقایسه می‌شوند؛ در پایان نیز به طراحی یک واترپمپ الکتریکی به‌عنوان جایگزینی برای مدل‌های مکانیکی پرداخته می‌شود.

۲. واترپمپ‌های الکتریکی و مکانیکی

در جدول ۱ مزایا و معایب هر کدام از واترپمپ‌های الکتریکی و مکانیکی ذکر شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، واترپمپ الکتریکی از لحاظ کاهش زمان گرم‌شدن موتور، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلایندگی موتور و کاهش سایز رادیاتور نسبت به نوع مکانیکی دارای مزیت است. از طرفی، بالابودن ولتاژ کاری آن و سادگی، قیمت پایین و عدم نیاز به نگهداری واترپمپ مکانیکی سبب شده است که استفاده از واترپمپ‌های مکانیکی همچنان مورد توجه باشد. واترپمپ‌های الکتریکی نه‌تنها در خودروهای رایج امروزی قابلیت کاربرد دارند، که در خودروهای الکتریکی و هیبریدی نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۴].

۳. موتورهای الکتریکی رایج در مدار خنک‌کاری هوشمند

در جدول ۲ مزایا و معایب موتورهایی که می‌توانند به‌عنوان واترپمپ الکتریکی در مدار خنک‌کاری هوشمند به کار روند، معرفی شده است و در ادامه به مقایسهٔ دقیق‌تر عملکرد موتورهای القایی[۲]،AFPM[۳]، SPM[۴]، IPM[۵] و رلوکتانس متغیر[۶] پرداخته خواهد شد. در شکل ۲ نمایی شماتیک از موتورهای مورد استفاده در مدار خنک‌کاری نمایش داده شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ و ۵ و ۶ اعداد ۱ تا ۱۱ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ موتور القایی ۴، موتور القایی ۶، موتور رلوکتانس متغیر ۴-۶، موتور مغناطیس دائم آهنربای سطحی ۴، موتور مغناطیس دائم آهنربای سطحی ۶، موتور مغناطیس دائم شار محوری ۶r، موتور مغناطیس دائم شار محوری ۸r، موتور مغناطیس دائم شار محوری ۶، موتور مغناطیس دائم شار محوری ۸، موتور مغناطیس دائم آهنربای داخلی ۴، موتور مغناطیس دائم آهنربای داخلی ۶ می‌باشد. همچنین اندیس‌های به‌کار رفته، تعداد قطب‌های روتور[۷] و استاتور[۸] آنها را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در موتور رلوکتانس متغیر که اندیس ۴-۶ دارد، به‌معنای استاتور

۶ قطبی و روتور ۴ قطبی است. در موتورهایی که اندیس r دارند، نشان‌دهندهٔ کاربرد مواد مغناطیس نادر زمینی در آنهاست.

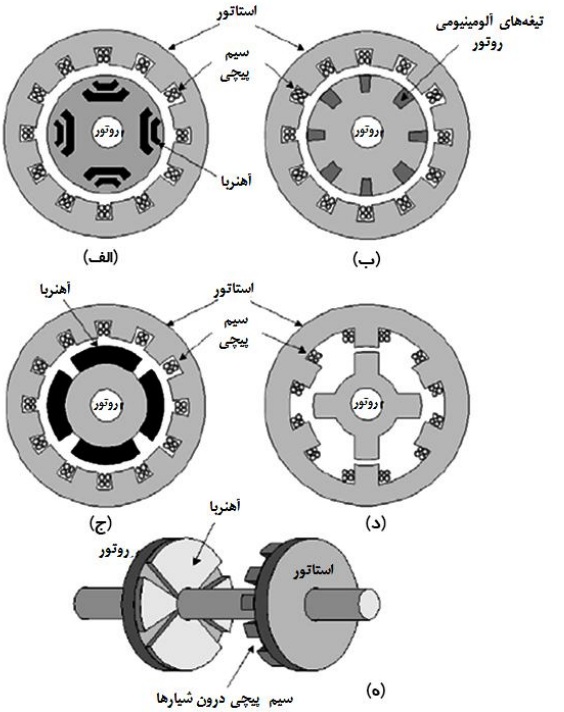
جدول ۱. مقایسهٔ واترپمپ الکتریکی و مکانیکی

واترپمپ الکتریکی	
مزایا [۱]، [۵]، [۶]	کاهش زمان گرم‌شدن[۹] [۵] کاهش سایز رادیاتور کاهش اتلافات پارازیتی کاهش مصرف سوخت کاهش آلایندگی قابلیت کنترل دمای مایع خنک‌کاری
معایب [۵]	بالابودن ولتاژ مصرفی
واترپمپ مکانیکی	
مزایا	ساده‌بودن ساختار عدم نیاز به نگهداری پایین‌بودن قیمت اولیه
معایب [۶]	افزایش آلایندگی راندمان احتراق پایین افزایش مصرف سوخت ناتوانایی در ایجاد گرمای کابین در زمان گرم‌شدن

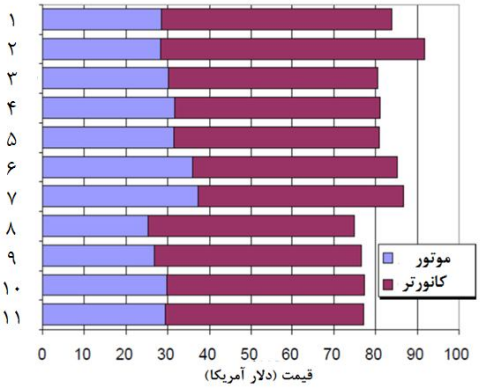
جدول ۲. مزایا و معایب موتورهای الکتریکی

انواع موتورهای الکتریکی		
موتور القایی [۷]	مزایا	حجم کم — وزن پایین مقرون‌به‌صرفه — راندمان بالا
موتور مغناطیس دائم شار محوری [۸–۹]	مزایا	بالابودن نسبت گشتاور به وزن راندمان بالا — کم صداتر استحکام بالا — ساخت آسان محدودهٔ وسیع سرعت
	معایب	تلفات زیاد در سرعت‌های بالا عدم کنترل تحریک به علت وجود آهنربای دائم روی روتور نیروی جاذبه زیاد بین استاتور و روتور
موتور دی سی بدون کموتاتور[۱۰] [۷]	مزایا	راندمان بالا — عملکرد سریع بدون صدا — رنج سرعت‌بالا بالابودن نسبت گشتاور / اندازه بهتر بودن مشخصه‌های سرعت و گشتاور
موتور رلوکتانس متغیر [۷]	مزایا	قیمت پایین — ساختار ساده کنترل ساده — ظرفیت سرعت‌بالا راندمان بالا حتی در سرعت‌های بالا استحکام بالا و عدم نیاز به نگهداری

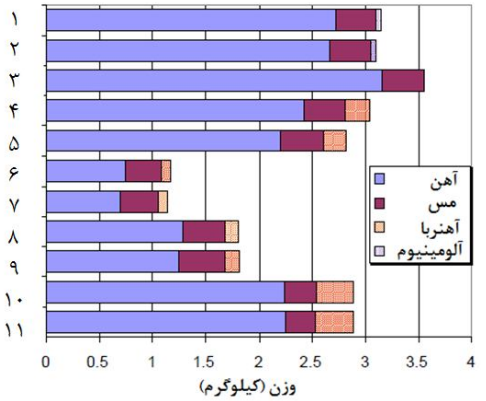
شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که موتورهای AFPM کمترین وزن و حجم را در بین موتورهای معرفی‌شده دارند. اما همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به‌دلیل وجود مواد مغناطیسی نادر زمینی قیمت بالاتری دارند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تفاوت قیمتی که بین همهٔ موتورها وجود دارد کمتر از ۵ درصد است و موتورهای IPM و همچنین موتورهای VR با تفاوت قیمتی کمتر از ۳ درصد نسبت به موتورهای AFPM، در رقابت با این موتور می‌باشند. در موتورهای القایی هم اگر توانسته شود فاصلهٔ هوایی بین روتور و استاتور کمتر از ۰/۶ میلی‌متر در نظر گرفته شود و سپس موتور طراحی شود، می‌توان این موتور را رقیب خوبی برای موتورهای AFPM دانست. شکل ۶ برشی مقطعی از موتورهای طراحی‌شده را نشان می‌دهد که مقایسهٔ خوبی را از نظر ظاهری به تصویر می‌کشد. موتورهای AFPM از نظر طولی کوتاه‌تر هستند و در جایی که فضای کمی موجود است، قابل استفاده می‌باشند. بعد از موتورهای AFPM، موتورهای القایی و رلوکتانس متغیر طول کمتری دارند و موتورهای SPM و IPM از نظر طولی از همهٔ موتورها بلندتر می‌باشند [۱۰].



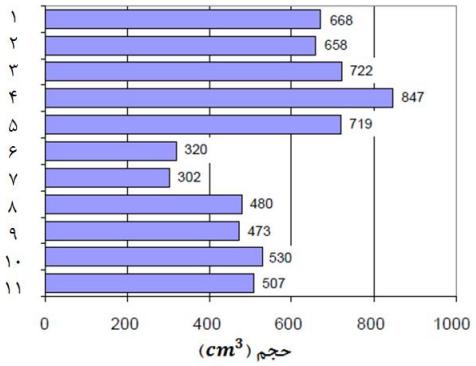
شکل ۲. نمایی از الف) موتور مغناطیس دائم آهنربای داخلی، ب) موتور القایی، ج) موتور مغناطیس دائم آهنربای سطحی، د) موتور رلوکتانس متغیر، ه) موتور مغناطیس دائم شار محوری [۱۰]



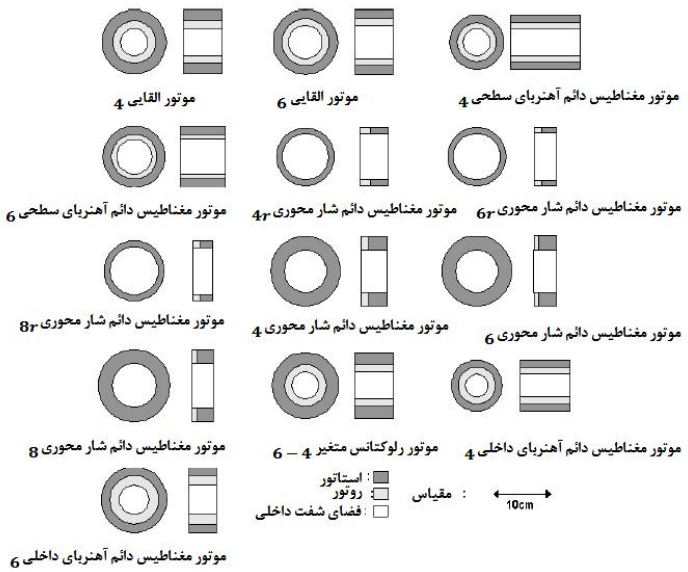
شکل ۳. قیمت موتور و کانورتر [۱۰]



شکل ٤. تفکیک وزن موتورها با مواد مختلف بکار رفته در آنها [۱۰]



شکل ۵. حجم الکترومغناطیس موتورها [۱۰]

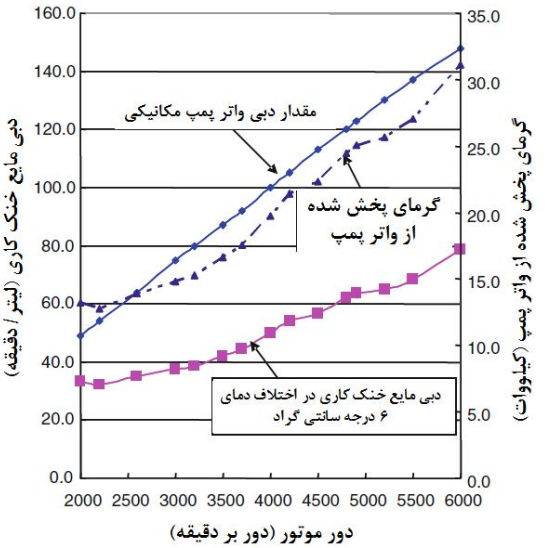


شکل ٦. برش مقطعی موتورهای طراحی‌شده [۱۰]

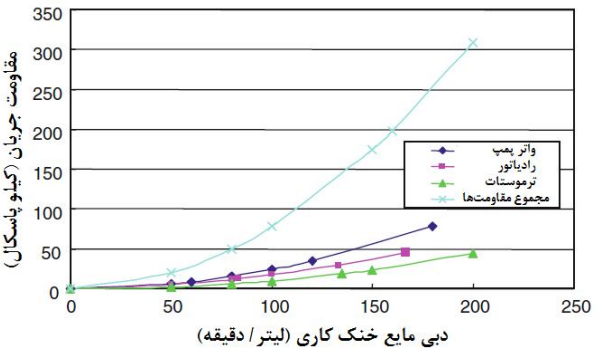
۴. تحلیل میزان بار خنک‌کاری موتور

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، محور افقی معرف دور موتور و محور عمودی سمت چپ معرف مقدار دبی مایع خنک‌کاری و محور عمودی سمت راست میزان انرژی که مایع خنک‌کاری حمل می‌کند است. این شکل نشان می‌دهد که در واترپمپ‌های مکانیکی[11] وقتی سرعت موتور افزایش می‌یابد، دبی مایع خنک‌کاری نیز افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود؛ یعنی ۱۵۰ لیتر بر دقیقه در دور ۶۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد و به‌علت اختلاف دما بین ورودی و خروجی، انرژی پخش‌شده به محیط در حدود ۳۱ کیلووات می‌باشد. در این حالت مقدار دمای مایع خنک‌کاری بین راهگاه ورودی و خروجی فقط ۳ درجهٔ سانتی‌گراد زیاد می‌شود، که این اختلاف طبق هدف طراحی باید بیشتر از 3 ± 5 درجهٔ سانتی‌گراد باشد [۴]. منحنی قرمز در شکل ۷ مقدار جریان محاسبه‌شدهٔ مایع خنک‌کاری را در شرایطی که دمای آن ۶ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند، نشان می‌دهد. در این حالت میزان انرژی پخش‌شده به محیط حدود ۱۷/۵ کیلووات است. بیشترین مقدار دبی مایع خنک‌کاری در دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه، ۸۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد. از این نتایج می‌توان دریافت که اگر واترپمپ الکتریکی[12] نیاز خنک‌کاری موتور را با دبی کمتر از ۸۰ لیتر بر دقیقه، که حدود نیمی از ظرفیت واترپمپ‌های مکانیکی می‌باشد، بتواند تأمین کند، شرایط موردنیاز برای عملکرد مناسب سیستم خنک‌کاری فراهم شده است. شکل ۸ مقاومت جریان اجزای مختلف مدار را نشان می‌دهد و همان‌طور که در شکل مشخص است در دبی ۸۰ لیتر بر دقیقه برآیند مقاومت در برابر جریان در اجزای نشان داده‌شده در شکل، حدود ۴۰ کیلوپاسکال می‌باشد؛ بنابراین برای

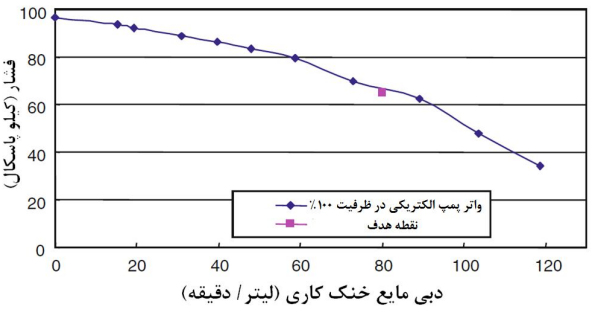
جبران مقاومت جریان قسمت‌های دیگر مثل لوله‌ها و گذرگاه‌ها، هد پمپ ۶۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل۷. نتایج آزمایش بالانس حرارتی [٤]



شکل ۸. مقاومت جریان مدار خنک‌کاری [٤]



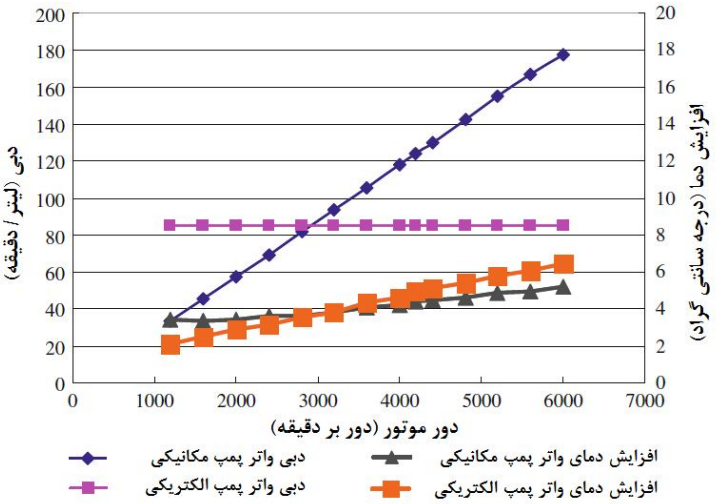
شکل ۹. نقشهٔ عملکردی EWP [٤]

۵. آزمایش روی واترپمپ الکتریکی

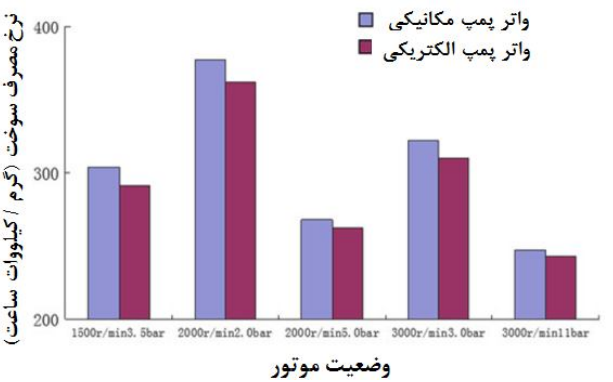
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، منحنی آبی در شکل، عملکرد واترپمپ الکتریکی و نقطهٔ صورتی نقطه هدف است (فشار ۶۵ کیلوپاسکال در دبی ۸۰ لیتر بر دقیقه). واضح است که عملکرد واترپمپ الکتریکی از مقدار هدف کمی بهتر است.

۶. آزمایش موتور مجهز به واترپمپ الکتریکی

در ادامه و در جهت انجام آزمایش‌های عملکرد خنک‌کاری و مصرف سوخت، واترپمپ الکتریکی روی یک موتور نصب شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که دبی واترپمپ مکانیکی، همزمان با افزایش دور موتور تا نزدیکی ۱۸۰ لیتر بر دقیقه در دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه زیاد می‌شود، در حالی‌که دبی واترپمپ الکتریکی در حدود ۸۳ لیتر بر دقیقه ثابت می‌ماند و منحنی دمای واترپمپ الکتریکی نشان می‌دهد که بیشترین دمای افزایش‌یافته شده حدود ۶/۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد، در حالی‌که دمای واترپمپ الکتریکی کمتر از ۵ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. از آزمایش‌های بالا نتیجه‌گیری می‌شود که واترپمپ الکتریکی می‌تواند تمام نیازهای خنک‌کاری موتور را فراهم کند و همان وظایفی را که واترپمپ مکانیکی روی موتور خودرو انجام می‌دهد به‌خوبی انجام دهد. شکل ۱۱ مصرف سوخت در شرایط مختلف کارکرد موتور را نمایش می‌دهد. همان‌طور که نمایش داده شده است، مصرف سوخت با استفاده از واترپمپ الکتریکی در همهٔ شرایط کارکردی موتور کمتر از حالتی است که از واترپمپ مکانیکی استفاده می‌شود.



شکل ۱۰. رابطهٔ بین دمای خنک‌کاری و سرعت موتور [٤]



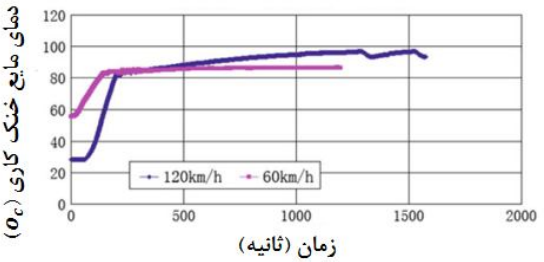
شکل ۱۱. مقایسهٔ مصرف سوخت در بارهای مختلف موتور [٤]

۷. آزمایش خودروی مجهز به واترپمپ الکتریکی

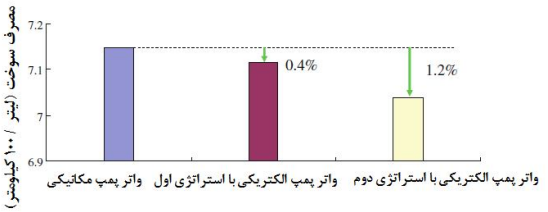
جهت بررسی آثار خنک‌کاری و مصرف سوخت خودرویی که به واترپمپ الکتریکی مجهز شده است، آزمایش زیر انجام شده است.

هنگامی که موتور گرم شد، خودرو به‌صورت شبیه‌سازی‌شده به سرعت‌های ثابت ۶۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت که به‌ترتیب شرایط شهری و اتوبان را شبیه‌سازی می‌کند، حرکت می‌کند. در حین آزمایش اطلاعاتی در مورد مایع خنک‌کاری، اندازه‌گیری و نوشته شد. در شکل ۱۲ نتایج نشان داده شده است. از این شکل معلوم می‌شود که دمای مایع خنک‌کاری بالا می‌رود و بعد از ۲۰۰ ثانیه در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت به دمای ۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد و سپس دمای مایع خنک‌کاری از این بیشتر نمی‌شود و دما در همان مقدار ثابت می‌ماند. وقتی سرعت خودرو ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است بیشترین دمای مایع خنک‌کاری طی ۱۳۰۰ ثانیه به دمای ۹۶ درجه می‌رسد و سپس به‌دلیل عملکرد واترپمپ الکتریکی و فن خنک‌کاری به دمای ۹۳ درجه کاهش می‌یابد و وقتی واترپمپ الکتریکی و فن رادیاتور خاموش می‌شود، دما دوباره بالا می‌رود و به ۹۴ درجه می‌رسد. همان‌طور که در شکل نمایش داده شده است، تلفات پارازیتی در واترپمپ الکتریکی کمتر است. نتایج بالا نشان می‌دهد که توان واترپمپ الکتریکی برای برآوردن نیاز خنک‌کاری خودرو کافی است و کاملاً سیستم خنک‌کاری تحت کنترل است. بعد از تعیین ظرفیت واترپمپ الکتریکی، آزمایش در سیکل NEDC[۱۳] انجام شده است. در حین آزمایش افزایش دمای مایع خنک‌کاری در هنگام گرم‌شدن و مصرف سوخت اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۳ نرخ مصرف سوخت را در سیکل NEDC هم با واترپمپ الکتریکی و هم واترپمپ مکانیکی نشان می‌دهد. این آزمایش با دو استراتژی کنترلی برای واترپمپ الکتریکی انجام و مشخص

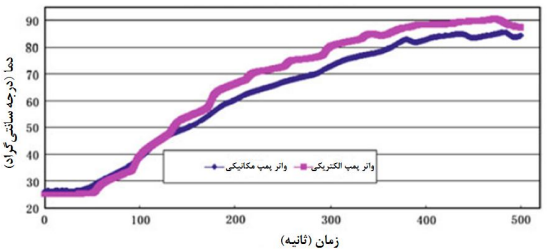
شد که استراتژی دوم می‌تواند مصرف سوخت را تا ۱/۲ درصد کاهش دهد. شکل ۱۴ بخشی از منحنی دمای مقایسه‌ای بین واترپمپ مکانیکی و واترپمپ الکتریکی در سیکل NEDC را نمایش می‌دهد. می‌توان دریافت که واترپمپ الکتریکی می‌تواند فرایند گرم‌شدن موتور را تسریع کند و در ۱۰۰ ثانیه موتور از دمای ۲۵ به ۶۵ درجه برسد و افزایش دمای واقعی بلوکه موتور سریع‌تر انجام می‌شود و این مهم، سبب کاهش آلایندگی موتور می‌شود.



شکل ۱۲. نقشهٔ دمای مایع خنک‌کاری خودرو با EWP [٤]



شکل ۱۳. مقایسه مصرف سوخت دو واترپمپ با دو استراتژی در ۱۰۰ کیلومتر [٤]



شکل ١٤. مقایسهٔ دمای بین واترپمپ الکتریکی و واترپمپ مکانیکی در سیکل NEDC [٤]

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب گفته‌شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدار خنک‌کاری هوشمند در موتورهای احتراق داخلی دارای مزایای متعددی نظیر کاهش مصرف سوخت، کاهش حجم مایع خنک‌کاری و افزایش راندمان است. یکی از مشکلاتی که سبب کاهش رشد استفاده از این فناوری در خودروها شده است، بالابودن هزینهٔ اولیه ساخت این سیستم‌ها می‌باشد. اگرچه پیش‌بینی می‌شود با افزایش قیمت سوخت و تصویب قوانین سخت‌گیرانه‌تر در مورد میزان مصرف سوخت خودروها، استفاده از این فناوری در خودروها فراگیر شود. در ادامه پیشنهادهای زیر قابل‌طرح می‌باشد:

۱.انتخاب و تحقیق روی یک موتور الکتریکی غیر از BLDC برای استفاده از آن در مدار خنک‌کاری خودرو. در مورد موتورهای الکتریکی که در مدار خنک‌کاری قابل‌استفاده می‌باشند، روی موتور BLDC بیشترین تحقیق صورت گرفته است و روی موتورهای دیگر در این کاربرد بخصوص تحقیق زیادی صورت نگرفته است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، روی موتورهای دیگر هم تحقیق و بررسی صورت گیرد.

۲.استفاده از پمپ‌های الکتریکی فتوولتاییک در مدار خنک‌کاری هوشمند. چون خورشید منبع بی‌پایان انرژی روی زمین می‌باشد، استفاده از آن بدون هزینه و پاک می‌باشد. پمپ‌های الکتریکی فتوولتاییک مبحثی تازه در دنیا می‌باشند که می‌توانند در مدار خنک‌کاری هوشمند نیز مورد استفاده قرار گیرند. مزایای پمپ‌های الکتریکی خورشیدی این است که هیچ توانی از خودرو دریافت نمی‌کنند و از معایب آن می‌توان به گران بودن فناوری ساخت آن اشاره نمود؛ اما با توجه به پیشرفت صنعت الکترونیک این مبحث آینده روشنی دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده این مبحث موردبررسی قرار گیرد.

۳.شبیه‌سازی موتور الکتریکی و اعمال آن به شبیه‌سازی‌های سطح خودرویی در سیکل تهران. با توجه به کاربرد مدار خنک‌کاری هوشمند خودروها در دنیا، نیاز به مدار خنک کاری هوشمند در خودروهای داخلی نیز حس می‌شود. این نیاز سبب می‌شود شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری هوشمند در سطح خودرویی در سیکل تهران هم انجام شود. عمدهٔ شبیه‌سازی‌ها در مورد موتور الکتریکی به‌تنهایی انجام‌گرفته است و به‌طور خاص در زمینهٔ شبیه‌سازی مدار خنک‌کاری هوشمند و عملکرد آن در سیکل تهران تحقیقی صورت نگرفته است. لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده این مبحث هم به‌طورجدی موردتوجه قرار گیرد.

۹. مآخذ

[1] H. Cho, D. Jung, S. Zoran, Filipi, D. N. Assanis, J. Vanderslice, W. Bryzik, Application of controllable electric coolant pump for fuel economy and cooling performance improvement, *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 129,N. 1, pp. 239-244, 2007.

[2] electric water pumps, https://www.gates.com/~/media/files/gates/automotive/resources/product-brochures/352electric-water-pump_addendum_r2.pdf, accessed 7 Jan 2017.

[3] intelligent cooling system system, http://machinedesign.com/hydraulics/intelligent-cooling-system-your-car, accessed 7 Jan 2017.

[4] W. Cai, S. Xiong, L. Fang, S. Zha, Electric Water-Pump Development for Cooling Gasoline Engine, in *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, 2012.

[5] K. B. Kim, K. H. Lee, K. S. Lee, Active coolant control strategies in automotive engines, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 767–772, 2010.

[6] Y. Hyuk, S. Chul, M. Soo, Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption, *Energy*, vol. 57, pp. 624–631, 2013.

[7] A. Emadi, M. Ehsani, Y. Gao, *modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*, Taylor and Francis Group, 2010.

[۸] ج. طرقی، ن. واحدی، *طراحی موتور شار محوری آهنربای دائم با هدف افزایش گشتاور حجمی*، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۲.

[9] J. Gieras, W. Rong-Jie, K. J. Maarten, *Axial flux permanent magnet brushless machines*, Springer Science & Business Media, 2008.

[10] N. C. Harris, T. M. Jahns, S. H. S. Huang, Design of an integrated motor/controller drive for an automotive water pump application, *Conf. Rec. 2002 IEEE Ind. Appl. Conf. 37th IAS Annu. Meet. (Cat. No.02CH37344)*, vol. 3, pp. 2028–2035, 2002.

[11] Y. Zhaocheng, Engine design, in *China Machine Press, Beijing*, 2008.

پی‌نوشت

1. electronic control unit
2. induction motor (IM)
3. axial flux permanent magnet (AFPM)
4. surface permanent magnet
5. internal permanent magnet
6. variable reluctance (VR)
7. rotor
8. stator
۹. زمان گرم شدن موتور از زمانی موتور شروع به‌کار می‌کند را warm-up می‌گویند.
10. brushless direct current motor (BLDC)
11. mechanical water pump (MWP)
12. electrical water pump (EWP)
13. new european driving Cycle