

ارائه‌ی روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری سرعت پایین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی

حجت حاتمی^۱، دانشجوی دکتری، محمدباقر بناءشریفیان^۲، استاد، محمدرضا فیضی، استاد^۳

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - h-hatami@tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - sharifian@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - feyzi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به کاربرد ویژه‌ی ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری به صورت محرکه‌های مستقیم داخل چرخ در ساختمان خودروهای هیبریدی پرداخته می‌شود. ضمن بررسی اجمالی مزایا و معایب ساختارهای مختلف این نوع از ماشین‌ها مناسب‌ترین ساختار ممکن برای کاربرد مذکور معرفی می‌گردد. روند کلی طراحی ماشین مذکور ارائه شده و ضمن بررسی روش‌های رایج در تعیین پارامترهای طرح نهایی، روش جدیدی برای هدف مذکور بر مبنای پروفیل سرعت خودروی هیبریدی ارائه می‌گردد. در روش پیشنهادی مقادیر مورد نیاز جهت طراحی یک ماشین الکتریکی باهدف دستیابی به ساختاری بهبودیافته برای یک کاربرد خاص تعیین می‌شود. با استفاده از روش‌های رایج موجود و نیز روش پیشنهادی، ماشین مغناطیس دائم شار محوری، طراحی شده و همچنین ساختار ماشین حاصل از هر روش در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌سازی می‌شود. مشخصه‌های هر کدام از ماشین‌های مدل‌سازی شده استخراج گردیده و جهت استفاده در مدل خودروی هیبریدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل، بیانگر بهبود کلی بهره خودروی هیبریدی در شرایطی است که از ماشین الکتریکی طراحی شده با روش پیشنهادی در این مقاله استفاده می‌گردد. بر اساس نتیجه روش طراحی پیشنهادی، نمونه‌ای از ماشین الکتریکی مورد نظر ساخته شده و نتایج آزمایشگاهی حاصل نیز با نتایج تحلیلی حاصل از مدل‌سازی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: خودروی الکتریکی هیبریدی، ماشین مغناطیس دائم شار محوری، روش اجزاء محدود.

A New Method for Improved Design of Low Speed Axial Flux Permanent Magnet Machines Used in HEV

H. Hatami¹, M. B. Bannae Sharifian², M. R. Feyzi³

1, 2, 3- Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract: In this paper, the specific application of axial flux permanent magnet (AFPM) machines as an in-wheel direct drive machine used in hybrid electric vehicles (HEV) is presented. Meanwhile a brief study of the merits and demerits of different structures for this type of machine, the most suitable structure for this application is introduced. The general design procedure and common methods for determining the parameters of the final design is presented. A new method to determine the design parameters, based on HEV velocity profiles, is proposed. Using the conventional and the proposed methods, different structures of AFPM are designed and performance analysis of them is done using finite element method. Characteristics of each AFPM are extracted and used in HEV model. The results show that, the overall efficiency of the hybrid car is improved using the electric car designed by the proposed method. Based on the results of the proposed design method, a sample of the AFPM is built and the obtained experimental results are compared with the analytical results.

Keywords: Hybrid electric vehicle, axial flux permanent magnet machine, finite element method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۸/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵ و ۱۳۹۲/۱۲/۰۹

تاریخ مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: حجت حاتمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

امروزه با تلاش مهندسان در زمینه‌های مختلف، به‌ویژه مهندسی برق، ماشین‌های الکتریکی هر روز در حال طراحی، تولید و بهبود یافتن هستند. ولی با این وجود حوزه‌ی بهبود ساختار ماشین‌های الکتریکی همچنان زمینه‌ی بسیار مناسبی برای گسترش و توسعه دارد. از جمله دلایل این امر می‌توان به گسترش و پیشرفت ایجادشده در زمینه‌ی تولید ادوات الکترونیک قدرت و همچنین مواد مناسب‌تر ساختمانی، برای ماشین‌های الکتریکی اشاره کرد. مبدل‌های الکترونیک قدرت که برای کنترل ماشین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، امکان تغذیه موتورهای با فرکانس‌های مختلف را فراهم می‌کنند. همچنین استفاده از مواد جدید مانند Soft Magnetic Composit (SMC) و مواد مغناطیس دائم با قابلیت بالا، امکان بهبود ساختاری ماشین‌ها را فراهم نموده و بدین ترتیب می‌توان مشخصات عملکردی ماشین‌های الکتریکی را تا اندازه‌ی بسیار زیادی بهبود بخشید [۱]. در میان ماشین‌های الکتریکی، امروزه استفاده از ساختارهای با ابعاد کوچک‌تر و فشرده‌تر یکی از مواردی است که در صنایع مورد توجه بسیار قرار می‌گیرد.

ساختار ماشین‌های شار شعاعی با توجه به پیشینه‌ی بسیار خوبی که از آن‌ها در کاربردهای مختلف وجود دارد تا به امروز مورد تأیید اکثریت کاربران آن‌ها بوده است [۲]. با این وجود در سال‌های اخیر ساختار خاص ماشین‌های شار محوری و نیاز روزافزونی که به فشرده‌سازی تجهیزات انتقال توان در سیستم‌های مختلف وجود دارد جایگاه این نوع از ماشین‌ها را در سیستم‌های مختلف برای کاربری‌های گوناگون ارتقا بخشیده است. حجم فشرده، طول محوری کم، قابلیت استفاده در کاربردهای درایو مستقیم و همچنین کیفیت بالای گشتاور تولیدی این نوع از ماشین‌ها تنها تعدادی از مهم‌ترین مزایای آن‌ها می‌باشند. گسترش تولید و استفاده از ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با اختراع مواد مغناطیس دائم (نئودیمیوم-آهن-برن) (Nd-Fe-B) با کارایی بالا، در سال ۱۹۸۳ آغاز گردید [۲]. استفاده از این نوع ماشین‌های مغناطیس دائم معمولاً در زمینه‌ی کاربردهای صنعتی سرعت پایین و سرعت متغیر دارای مقبولیت بیشتری بوده است. در اغلب کاربردهای صنعتی، ماشین‌های القایی با جعبه‌دنده‌های کاهنده، جهت دستیابی به سرعت مورد نظر استفاده می‌شدند. ولی مطالعات انجام گرفته و نیز دستیابی به تکنولوژی‌های جدید نشان داد که اتصال موتور الکتریکی بدون استفاده از جعبه‌دنده می‌تواند تا حدود بسیار زیادی هزینه‌های نگهداری و از طرف دیگر فضای مورد نیاز را کاهش دهد. با ساختار درایو مستقیم قابلیت اطمینان کل سیستم نیز افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش درایو

مستقیم در ساختار خودروهای برقی و هیبریدی است. با توجه به شکل بسیار مناسب ماشین‌های شار محوری، استفاده از این نوع ماشین‌ها در کاربرد مورد نظر در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته و در مواردی از این نوع ماشین‌ها به‌عنوان موتور محرک خودروهای الکتریکی و هیبریدی استفاده شده است [۳-۵].

عدم وجود باتری‌های بزرگ جهت ذخیره انرژی الکتریکی برای مسافت‌ها و کاربردهای طولانی، و نیاز بسیار فراوان به استفاده از شارژرها جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز ادامه مسیر و همچنین زمان نسبتاً زیاد مورد نیاز جهت هر بار شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی، محدودیت‌های زیادی برای استفاده‌ی دائم و مناسب از این خودروهای پاک ایجاد می‌کنند. علی‌رغم اینکه استفاده از خودروهای الکتریکی هیبریدی به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است، لیکن یکی از بزرگ‌ترین مشکلات موجود بر سر راه گسترش استفاده از این نوع خودروها نیز نبود انرژی لازم جهت طی مسافت‌های طولانی و بدون توقف است. استفاده از ماشین‌های با شار شعاعی در این موارد وزن و حجم خودرو را به‌شدت افزایش داده و مصرف انرژی را زیاد می‌کند. بنابراین استفاده از ماشین‌هایی که علاوه بر داشتن توانایی‌های ماشین‌های شار شعاعی، حجم و وزن کم داشته و در اکثر موارد نیز بهره و کارایی بالاتری نیز داشته باشند، می‌تواند پیشرفت بسیار زیادی در تکنولوژی خودروهای هیبریدی ایجاد نماید [۶].

در این مقاله استفاده از ساختار ماشین‌های مغناطیس دائم با شار محوری جهت افزایش بهره و بهبود عملکرد خودروهای هیبریدی برای بهبود وضعیت انرژی الکتریکی مورد نیاز در طی مسافت‌های طولانی و با پروفایل‌های سرعت استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته و با طراحی ساخت یکی از انواع ماشین‌های مذکور جهت کاربرد مورد نیاز میزان انرژی تأمین‌شده و نیز بهره کلی سیستم، مورد مطالعه و اندازه‌گیری واقع می‌شود. در این کاربرد ماشین مغناطیس دائم شار محوری در حالت درایو مستقیم و در درون چرخ‌های یک خودروی هیبریدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با استفاده از یک روش طراحی مناسب و جدید به ساختاری بهبودیافته برای کاربرد مذکور دست یافته و با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته بر مبنای روش طراحی پیشنهادی می‌توان به مؤثر بودن این روش طراحی در افزایش بهره سیکل یک خودروی هیبریدی و در نتیجه افزایش مسافت قابل پیمایش آن با مقدار مشخصی از سوخت و انرژی الکتریکی در سیکل‌های استاندارد داخل شهری و همچنین جاده پی برد.

مختلف و متفاوت (برای هر مقدار توان و گشتاور)، فشردگی بالا، مقاومت و استحکام زیاد، بهره و گشتاور بالا باشند. ماشین‌های شار محوری یک راه‌حل جالب توجه است که در آن موتور الکتریکی به‌صورت کوپل مستقیم و یا قرار گرفتن درون چرخ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختارهای مختلفی برای ماشین‌های شار محوری با در

۲- ساختار ماشین مغناطیس دائم شار محوری

برای سیستم‌های رانش خودروهای برقی استفاده از موتورهای بر روی چرخ‌ها یکی از کاربردهایی است که نیاز به ماشین‌های الکتریکی خاصی دارد. این نوع از ماشین‌ها باید دارای امکان ساخت با ابعاد

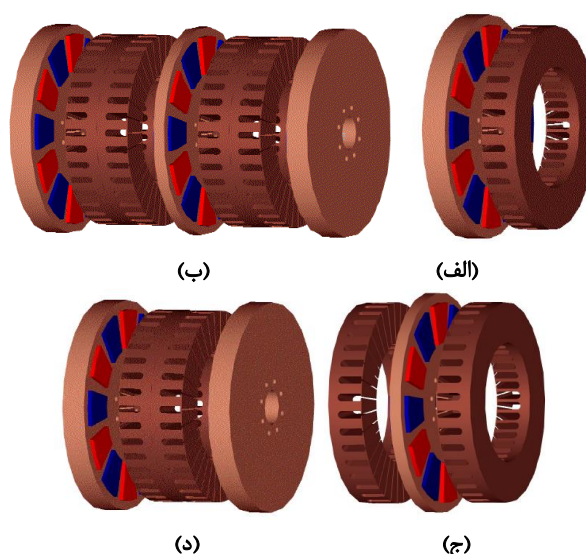
شار فاصله‌ی هوایی پایین است، در کاربردهای با توان پایین و با سرعت نسبتاً بالا استفاده می‌شود. در چنین ماشین‌هایی سیم‌پیچی‌های استاتور با استفاده از لاستیک و رزین تثبیت می‌شوند و تلفات آهن در این نوع از ماشین‌ها به کمترین مقدار خود کاهش می‌یابد. هادی‌های مسی در این نوع از ماشین مغناطیس دائم شار محوری به‌صورت مستقیم در معرض شار متناوبی که از طریق PMها تولید می‌شود قرار دارند و بنابراین تلفات فوکو در هادی‌های مسی ایجاد می‌شود، بدین ترتیب تلفات مسی تا حدودی افزایش خواهد داشت. تبعات این مشکل را می‌توان با به‌کارگیری هادی‌های با ضخامت کمتر کاهش داد.

در ساختار TORUS نیز شار اصلی از دو مسیر امکان عبور دارد: یکی از طریق استاتور به‌صورت محوری و دیگری به‌صورت محیطی از طریق یوغ استاتور. ساختارهای نوع TORUS از لحاظ ضخامت یوغ استاتور و آرایش سیم‌پیچی با یکدیگر متفاوت هستند. در ساختار نوع شمال-شمال (NN) سیم‌پیچی فاز به دور هسته استاتور پیچیده شده است و ماشین در هر دو جهت محوری و شعاعی دارای انتهای سیم‌پیچی کوتاهی هستند (شکل ۲-الف). در این ساختار قطب‌های مغناطیس دائم نصب‌شده بر روی هر روتور (در دو طرف استاتور)، روبه‌روی قطب موافق خود تثبیت شده و تلفات مسی، به دلیل کوتاه بودن سیم‌پیچی‌های انتهایی، کمتر خواهد بود. این آرایش باعث می‌شود، شار اصلی به‌صورت محیطی از درون هسته استاتور جاری شده و بنابراین هسته‌ی استاتور ضخیم‌تری مورد نیاز است. استاتور ضخیم‌تر، تلفات آهنی و به‌نوبه‌ی خود، طول سیم‌پیچی انتهایی را افزایش می‌دهد. در ساختار نوع شمال-جنوب (NS) قطب‌های مغناطیس دائم نصب‌شده بر روی هر روتور، روبه‌روی قطب مخالف خود تثبیت شده‌اند، به‌نحوی که شار اصلی در راستای محوری و به‌صورت عمود بر صفحه‌ی استاتور از ماشین عبور می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استاتور اصولاً نیازی به یوغ نخواهد داشت (شکل ۲-ب). با توجه به این موضوع، تلفات آهنی کاهش پیدا کرده ولی چون نیاز به استفاده از سیم‌پیچی‌های روی هم برای تولید گشتاور در این نوع ماشین وجود دارد و این نوع سیم‌پیچی طول انتهای کلاف‌ها را در ساختار مذکور افزایش می‌دهد، تلفات مسی زیادتر خواهد شد. در مقایسه دو نوع NS و NN می‌توان به‌صورت خلاصه گفت که ماشین‌های نوع NN تلفات مسی و قطر خارجی کوچک‌تر و همچنین تلفات آهنی و طول محوری بیشتری نسبت به نوع NS دارند [۸ و ۹].

در این مقاله با توجه به اینکه هدف طراحی استفاده از ماشین‌های شار محوری برای کاربرد داخل چرخ‌های از نوع درایو مستقیم است و با در نظر گرفتن اینکه در این حالت طول محوری ماشین یکی از فاکتورهای محدودکننده خواهد بود، از میان انواع ساختارهای ماشین‌های شار محوری معرفی‌شده نوع TORUS-NS انتخاب می‌گردد. ارتفاع شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب)، نمایانگر طول محوری ماشین است. با توجه به مقایسه‌ی این دو نوع ساختار در شکل (۲)، می‌توان به راحتی مشاهده نمود که ساختار نوع TORUS-NS دارای

نظر گرفتن محل قرارگیری استاتورها نسبت به روتورها می‌توان ایجاد نمود. این ساختارهای مختلف با آرایش‌های گوناگون سیم‌پیچی‌های آن‌ها امکان انتخاب گزینه مناسب را برای کاربرد مورد نظر ایجاد می‌نماید [۷].

از دید طراحی، ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری به اشکال و ساختارهای مختلف قابل ساخت هستند. ساختمان کلی این نوع از ماشین‌ها را می‌توان به چهار گروه کلی تقسیم‌بندی نمود: (۱) یک‌طرفه، (۲) چندطبقه، (۳) ساختار با دو استاتور بیرونی و یک روتور میانی، (۴) ساختار با دو روتور بیرونی و یک استاتور میانی (TORUS). شکل (۱) ساختار کلی انواع مذکور را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): انواع کلی ساختار ماشین‌های شار محوری؛ (الف) ساختار یک‌طرفه، (ب) ساختار چندطبقه، (ج) ساختار با دو استاتور و یک روتور میانی، (د) ساختار با دو روتور و یک استاتور میانی (TORUS)

گروه اول ساده‌ترین نوع ساختارهای ماشین‌های شار محوری هستند. ایراد عمده‌ی این ساختار نیروی محوری نامتقارن بین روتور و استاتور است که موجب می‌شود تمهیدات در نظر گرفته‌شده برای بلبرینگ‌ها و یاتاقان‌ها پیچیده‌تر شوند. همچنین در این ساختار در مقایسه با ساختارهای با نیروی محوری متقارن به روتور با ضخامت بیشتری نیاز است. در گروه دوم با توجه به افزایش تعداد طبقات ماشین، قابلیت‌های زیادی مانند افزایش توان و گشتاور بسیار بالا به ساختار آن اضافه می‌گردد ولی با توجه به اینکه طول محوری ماشین افزایش یافته است، استفاده از آن را در مواردی که نیاز اساسی به طول محوری کم و حجم فشرده‌تر باشد، بسیار محدود می‌کند. گروه‌های سوم و چهارم تا حدودی عملکرد مشابهی دارند. در ساختار یک روتور بین دو استاتور شار اصلی می‌تواند به دو صورت محوری و محیطی از درون دیسک روتور جاری گردد. در این نوع از ماشین می‌توان از استاتور بدون هسته فرومغناطیس نیز استفاده نمود. آرایش استاتور بدون آهن به دلیل اینکه دارای فاصله‌ی هوایی بزرگ و در نتیجه چگالی

پیشنهادی و مدنظر این مقاله جهت پیاده‌سازی روش موردنظر، از نوع خودروی هیبریدی "سری-موازی پیچیده" خواهد بود. ساختارهای رایج از این گروه دارای دو ماشین الکتریکی می‌باشند. در این آرایش، به شکلی متفاوت با ساختارهای رایج از این نوع، یکی از ماشین‌های الکتریکی با دو ماشین داخل چرخه جایگزین شده است. چرخ‌های جلوی خودرو از طریق سیستم انتقال قدرت با استفاده از یک متصل‌کننده و ترکیب‌کننده‌ی مکانیکی نیروی موردنیاز را همزمان از موتور احتراق داخلی و ماشین الکتریکی دوم دریافت می‌کنند. چرخ‌های عقب خودرو نیز با استفاده از ماشین‌های داخل چرخه مذکور نیروی موردنیاز را دریافت می‌کنند. البته امکان کار در حالت ژنراتوری برای هر دو ماشین الکتریکی مورد استفاده در این ساختار وجود دارد. در صورتی که هر کدام از این ماشین‌ها در حالت ژنراتوری کار کنند، واحد الکترونیک قدرت انرژی برگشتی را به باتری‌ها منتقل می‌نماید. در شکل (۳) نحوه‌ی اتصالات آرایش پیشنهادی را می‌توان مشاهده نمود. هر خودروی هیبریدی برای شرایط مختلف دارای حالت‌های کاری متفاوتی خواهد بود. حالت‌های کاری هر خودروی هیبریدی را می‌توان در چهار حالت کلی زیر تعریف نمود:

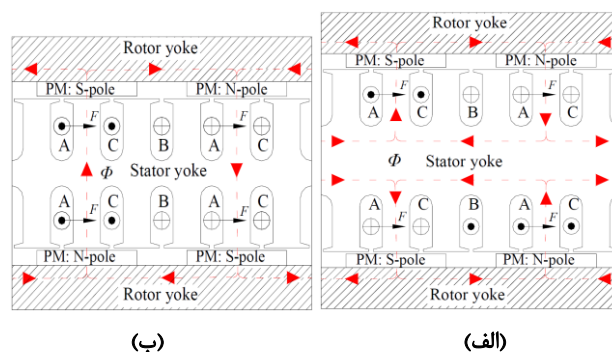
الف) توان پایین: در تمام ساختارهای خودروی هیبریدی در این حالت کاری استفاده از موتور احتراق داخلی موجب کاهش بهره می‌شود، بنابراین موتور الکتریکی و انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری وظیفه تأمین توان موردنیاز را بر عهده دارد. در آرایش مذکور نیز، توان موردنیاز را می‌توان از طریق ماشین‌های الکتریکی داخل چرخه (موتور) تأمین نمود.

ب) توان بالا: در هنگام نیاز به توان زیاد مانند فرایند افزایش سرعت و یا حرکت در سربالایی‌ها، انرژی موردنیاز همزمان از موتور احتراق داخلی و ماشین‌های الکتریکی تأمین می‌شود.

ج) برگشت انرژی: در حین کاهش سرعت و یا ترمز، باتری توسط انرژی برگشتی شارژ می‌شود و موتور احتراق داخلی خاموش است. هر دو ماشین الکتریکی در حالت ژنراتوری کار می‌کنند.

د) توان متوسط: با توجه به اینکه در ساختار سری-موازی پیچیده‌ی پیشنهادی، امکان کنترل نقطه‌ی کار موتور احتراق داخلی در هر لحظه برای بهترین بازده وجود دارد و شرایط متفاوتی ممکن است به وجود آید، در پیاده‌سازی روش این مقاله، حالت کاری مذکور به سه زیرحالت تقسیم شده است. در زیرحالت (۱) توان موردنیاز حرکت خودرو، با توجه به شرایط مسیر، به مقدار ناچیزی از توان تولیدی موتور احتراق داخلی در نقطه‌ی کار بهینه‌ی مرتبط بیشتر است. در این شرایط مقدار کمبود توان از طریق موتورهای الکتریکی داخل چرخ‌های عقب خودرو تأمین می‌شود. در زیرحالت (۲) توان موردنیاز حرکت خودرو به مقدار ناچیزی از توان تولیدی موتور احتراق داخلی در نقطه‌ی کار بهینه‌ی مرتبط کمتر است. در این حالت کاری خودرو توان موردنیاز خود را از موتور احتراق داخلی تأمین می‌کند و مقداری از توان تأمین‌شده نیز برای شارژ باتری از طریق ماشین الکتریکی دوم

طول محوری کمتر (ارتفاع کمتر) نسبت به نوع TORUS-NN است. از میان انواع ساختارهای موجود برای این نوع از ماشین‌ها، نوع استاتور بدون هسته با پوششی از یک ماده‌ی ترکیبی مخصوص به نام Epoxy resin، برای نگهداری کلاف‌های استاتور استفاده می‌گردد. این ماده‌ی نگه‌دارنده، ترکیبی از یک نوع لاستیک و چسب مخصوصی است که هر دو در حالت عادی مایع بوده و بعد از مخلوط شدن و در مجاورت جریان هوا به ماده‌ای سخت و محکم تبدیل می‌شود. بعد از مخلوط نمودن این دو ماده و ریختن آن در یک قالب مخصوص با حضور کلاف‌های استاتور، و سفت شدن آن، امکان تراش و ترازکاری جهت ایجاد یکنواختی و تعادل دیسک استاتور نیز وجود دارد. با توجه به اینکه در شرایط عادی دمای ذوب این ترکیب در حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و ماشین مورد استفاده نیز در درون چرخ‌ها همواره از طریق جریان هوای عبوری، در اثر حرکت خودرو، خنک‌کاری می‌شود، خاصیت این ماده‌ی نگه‌دارنده تخریب نشده و قابل اعتماد است.



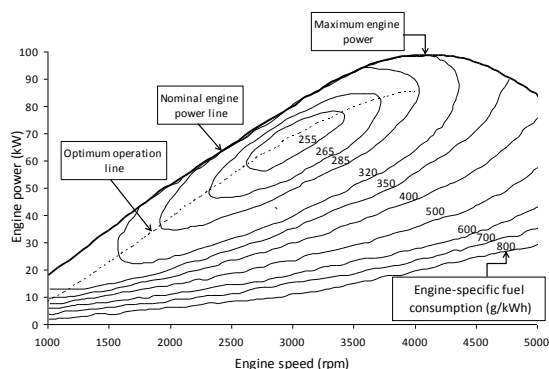
شکل (۲): انواع کلی ساختار TORUS در ماشین‌های شار محوری؛ الف) نوع NS، ب) نوع NN

با توجه به این ساختار علاوه بر بالا بودن مقدار کلی بهره به لحاظ کاهش چشمگیر تلفات آهنی، میزان گشتاور cogging نیز قابل چشم‌پوشی خواهد بود [۱۰-۱۲]. علت این امر حذف اثر دندانه و شیار استاتور به سبب عدم استفاده از ساختار استاتور با هسته آهنی است. بنابراین در حالت کلی می‌توان انتظار داشت که در صورت انجام طراحی مناسب ماشین الکتریکی با پارامترهای بهبودیافته، این ماشین هم در حالت موتوری و هم در حالت ژنراتوری مشخصه‌ی عملکردی مناسبی داشته باشد [۱۳].

۳- مشخصه‌های خودروی هیبریدی

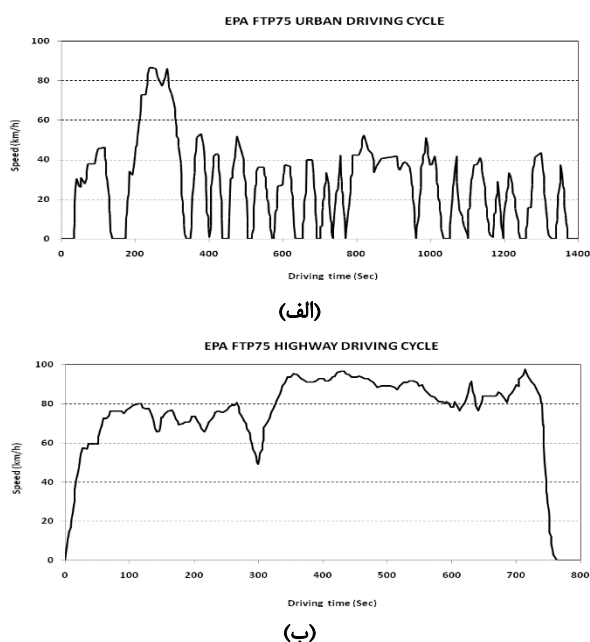
برای درک بهتر کاربرد ماشین‌های الکتریکی در خودروهای الکتریکی و هیبریدی ابتدا باید مشخصه‌ها و اطلاعات موردنیاز در خودروهای هیبریدی را مورد بررسی قرار داد [۱۰-۱۲ و ۱۴]. امروزه خودروهای هیبریدی در ساختارهای مختلفی تولید و عرضه می‌شوند. تعدادی از ساختارهای مدرن نیز در مرحله‌ی تحقیق و توسعه قرار دارند. با توجه به گوناگونی موجود در این عرصه تعیین نوع آرایش خودروی هیبریدی مورد مطالعه، در هر نوع تحقیق مرتبط، لازم به نظر می‌رسد. آرایش

به نقاط بار کامل بسیار نزدیک هستند. سرعت موتور نیز به قدر کافی از بهره‌وری اقتصادی سوخت تأثیرپذیر است. بر اساس توان خروجی داده‌شده، مصرف سوخت اغلب در سرعت‌های پایین در مقایسه با سرعت‌های بالا کمتر است. هدف از ایجاد ساختارهای هیبریدی برای خودروها، ایجاد امکان برای موتور احتراق داخلی جهت کار در شرایط نزدیک به مشخصه‌ی کار بهینه در جهت مصرف سوخت کمتر است.



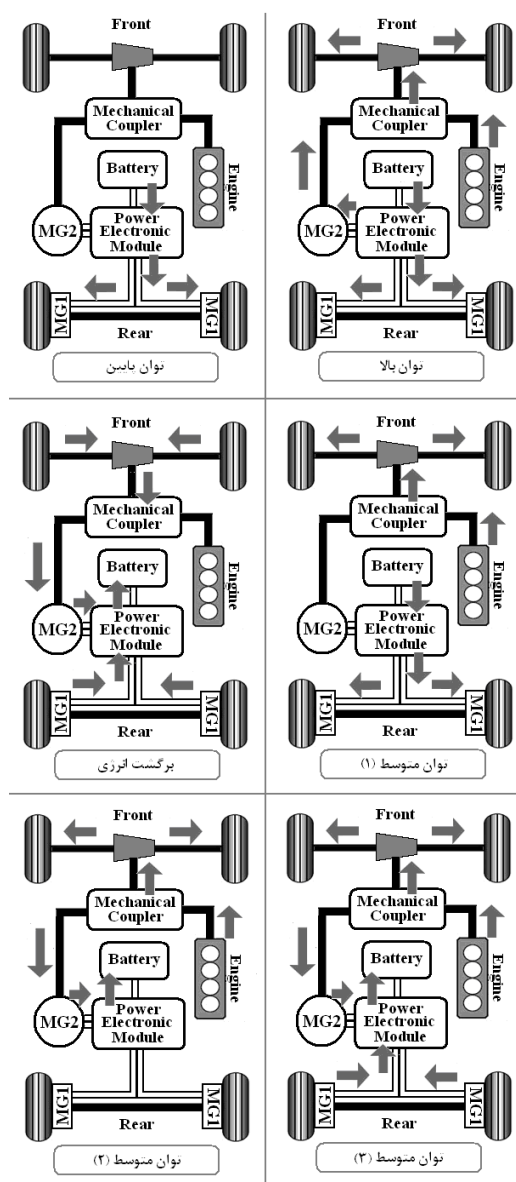
شکل (۴): مشخصه بهره‌وری اقتصادی سوخت در یک نمونه موتور بنزینی

با توجه به اینکه هر خودرو بر اساس نوع حرکت خود انرژی مصرفی متفاوتی خواهد داشت، سیکل‌های استاندارد برای خودروهای مختلف ارائه شده است، تا معیار یکسانی برای آزمایش روش‌ها و ساختارهای مختلف در دسترس باشد. در شکل (۵) دو سیکل استاندارد شهری و خارج شهری که تحت عنوان EPA FTP75 مطرح می‌شود، نشان داده شده است.



شکل (۵): نمونه‌ی سیکل‌های استاندارد؛ (الف) درون‌شهری، (ب) برون‌شهری

قابل استفاده خواهد بود. در زیرحالت (۳) نیز توان تولیدی موتور احتراق داخلی در نقطه‌ی کار مذکور، بیش از مقدار توان موردنیاز حرکت خودرو بوده و شرایط برگشت انرژی از طریق ژنراتورهای داخل چرخ‌ها نیز ممکن خواهد بود. حرکت شتاب‌گیرنده‌ی خودرو در سرازیری‌ها را از نمونه‌های زیرحالت (۳) می‌توان برشمرد. شمای کلی آرایش موردنظر و نحوه‌ی شارژ توان در حالت‌ها و زیرحالت‌های کاری این ساختار، در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): حالت‌های کاری خودروهای هیبریدی

مشخصه بهره‌وری اقتصادی سوخت یک موتور احتراق داخلی اغلب بر اساس مقدار سوخت مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت انرژی خروجی ارائه می‌شود. یک نمونه از مشخصه انرژی یک نوع موتور احتراق داخلی در شکل (۴) ارائه شده است. مصرف سوخت از یک نقطه‌ی کار تا نقطه‌ی دیگر کاملاً متفاوت خواهد بود. نقاط کار بهینه

یک دور کامل طی می‌کند، می‌توان سرعت موردنظر ماشین الکتریکی را نیز برآورد نمود. در استانداردهای بین‌المللی، تولیدکنندگان لاستیک‌ها برای معرفی هر نوع لاستیک مورد استفاده در چرخ‌ها از عبارت P_{www}/hhR_{dd} استفاده می‌نمایند. هرکدام از حروف به کاررفته در این عبارت مفهوم مشخصی دارد. در این عبارت، P و R به ترتیب بیانگر تایر مسافری و نوع رادیال (شعاعی) می‌باشند. حروف www عرض تایر را برحسب میلی‌متر نشان می‌دهند. hh بیانگر ارتفاع جانبی تایر برحسب درصدی از مقدار www بوده و dd نیز قطر داخلی حلقه‌ی تایر را برحسب اینچ نشان می‌دهد. در خودروی موردنظر این مقاله جهت انجام مراحل روش‌ها، از تایر با سایز P205/50R17 استفاده شده است. محیط خارجی این تایر حدود ۲ متر است. به عبارتی دیگر در هر دور این تایر مسافت پیموده شده حدود ۲ متر خواهد بود. در صورتی که حداکثر سرعت خودرو ۱۰۰ کیلومتر در ساعت در نظر گرفته شود، سرعت چرخش حداکثر ماشین الکتریکی داخل این نوع از چرخ‌ها و تایرها حدود ۸۴۰ دور بر دقیقه خواهد بود. قطر داخلی این تایر ۱۷ اینچ یا حدود ۴۳ سانتی‌متر است. با در نظر گرفتن مسائلی مانند ضخامت رینگ‌ها و اتصالات ماشین الکتریکی در درون چرخ‌ها حداکثر قطر بیرونی ماشین جهت نصب در داخل چرخ با تایر مذکور را می‌توان حدود ۳۰ سانتی‌متر و یا کمتر از این مقدار لحاظ نمود [۱۲].

بنابراین با توجه به مطالب ارائه‌شده برای طراحی این ماشین الکتریکی با استفاده از روش تک‌سرعت بر مبنای سرعت و توان نامی می‌توان برای مقدار توان ماشین الکتریکی در حالت کاری "توان پایین" در حدود ۳ کیلووات لحاظ نمود. سرعت نامی نیز برای ۸۴۰ دور بر دقیقه قابل طراحی خواهد بود.

۴-۲- روش طراحی بر مبنای توزیع احتمال پروفیل سرعت

با استفاده از تجزیه و تحلیل کامل سیکل خودرو، سرعتی که بیشترین زمان کارکرد ماشین الکتریکی در یک سیکل رانندگی استاندارد، در آن سرعت است، به عنوان سرعت موردنظر طراحی انتخاب می‌شود. پارامترهای ساختاری در طراحی، با استفاده از فرایندها و روش‌های بهبودسازی برای به دست آوردن بیشترین بهره در این سرعت مشخص، مورد استفاده قرار گرفته و درواقع نقطه‌ی کاری که به عنوان هدف طراحی مدنظر قرار می‌گیرد، با استفاده از این روش به دست می‌آید. مبنای این روش، استفاده از تابع چگالی احتمال سرعت خودرو است.

۴-۲-۱- پروفیل سرعت داخل شهری

با استفاده از پروفیل سرعت داخل شهری استاندارد می‌توان توزیع چگالی سرعت را در شرایط درون شهری استخراج نمود. با استفاده از مفهوم سطح زیر نمودار می‌توان مشاهده نمود که در بیش از ۷۰ درصد زمان‌ها در یک سیکل کامل حرکت استاندارد، سرعت خودرو در داخل شهر در محدوده ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت است. بنابراین

برای مقایسه نتایج این تحقیق با موارد و ساختارهای پیشین از سیکل‌های استاندارد استفاده می‌شود. برای به دست آوردن بهره‌ی مناسب، خودرو باید در تمام نقاط سیکل‌های شکل (۵) در محدوده خط کار بهینه (optimum operation line) که در شکل (۴) نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گیرد.

۴- طراحی ماشین‌های شار محوری برای کاربرد خودروهای هیبریدی

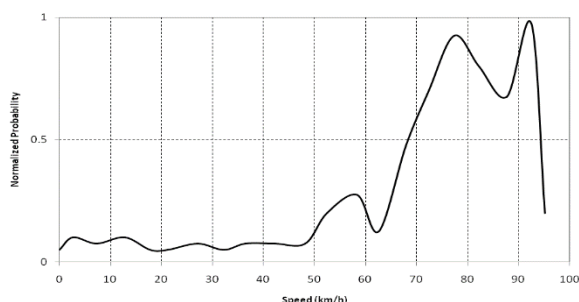
در این قسمت به ارائه‌ی روش‌های مختلف در طراحی ماشین‌های الکتریکی برای کاربردهای ویژه، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که روش‌های ذکر شده در قسمت‌های ۲-۴ و ۳-۴، با توجه به وابستگی‌های عملیاتی که به شرایط کارکرد ماشین دارند، برای حالتی که مشخصات رفتاری ماشین در آن کاربرد، در طول دوره‌های زمانی استفاده از ماشین، قابل تخمین و برآورد باشد، قابل به کارگیری خواهد بود. این روش طراحی ماشین‌ها، در مواردی که تکنولوژی ویژه‌ی به کارگیری آن‌ها در دسترس باشد، می‌تواند مورد توجه واقع شود.

۴-۱- روش طراحی بر مبنای سرعت نامی

در این روش برای یافتن ساختمان موردنظر و انجام طراحی مناسب ماشین الکتریکی از سرعت و توان نامی به عنوان هدف فرایند طراحی استفاده می‌شود. در این حالت ماشین الکتریکی در حالت موتوری یا ژنراتوری فقط در سرعت و یا توانی که طراحی در آن انجام شده است، از لحاظ هدف طراحی، دارای بهترین عملکرد بوده و بالاترین کیفیت کارکرد را خواهد داشت. در اکثر موارد هدف نهایی از طراحی یک ماشین دستیابی به بالاترین بهره و کمترین تلفات است. در این حالت در صورت استفاده از روش مذکور، ماشین طراحی‌شده در سرعت و توان نامی دارای بیشترین بهره بوده و کمترین تلفات را نیز خواهد داشت. از آنجایی که این روش طراحی صرفاً برای یک نقطه‌ی کار مشخص انجام می‌شود و از مشخصات این نقطه‌ی کار می‌توان به سرعت چرخش ماشین که سرعت نامی است، اشاره نمود، در این مقاله از آن با نام "روش طراحی تک‌سرعت" یاد می‌شود. استفاده از این روش در طراحی با هدف دستیابی به بالاترین بهره، موجب می‌شود یک طرح بهینه برای ساختمان ماشین حاصل شود.

این طرح بهینه در نقطه‌ی کاری که طراحی در آن انجام گرفته است دارای بالاترین بهره بوده ولی در سایر نقاط کار ماشین این ویژگی را نخواهد داشت. بنابراین در صورتی که ماشین در سرعت و یا توانی غیر از سرعت و توان نامی مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است بهره‌ی آن به شدت کاهش یافته و تلفات آن نیز افزایش یابد.

با توجه به اینکه در روش‌های مورد استفاده در این مقاله از ماشین‌های داخل چرخ جهت تولید توان (مکانیکی یا الکتریکی) استفاده می‌شود، سرعت چرخش ماشین مستقیماً با سرعت خودرو متناسب خواهد بود. با در نظر گرفتن ابعاد چرخ و مسافتی که چرخ در



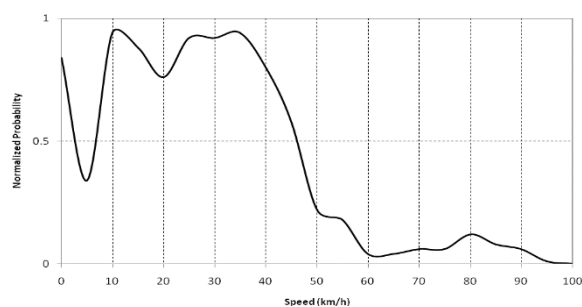
شکل (۷): تابع توزیع احتمال نرمالیزه شده سرعت خودرو در سیکل استاندارد خارج شهری

۴-۲-۳- طراحی نهایی

با توجه به اینکه نمی توان هدف از یک طراحی را برای یک خودروی هیبریدی صرفاً برای استفاده در داخل شهر و یا خارج شهر قرار داد و معمولاً کاربرد هر خودرو برای شرایط متفاوت و مختلفی در نظر گرفته می شود، طراحی ماشین الکتریکی داخل چرخشی نیز باید بر اساس کاربردهای مختلف مدنظر قرار گیرد. برای انجام طراحی نهایی می توان از یک تابع وزن دار برای ترکیب میزان کارکرد خودرو در دو سیکل داخل شهری و خارج شهری استفاده نمود. در صورتی که یک خودرو بر حسب نوع طراحی و شرایط محیطی که ممکن است مورد استفاده قرار گیرد در طول عمر مفید خود احتمال یکسانی برای کار در شرایط داخل شهری و خارج شهری داشته باشد، می توان با جمع دو تابع توزیع سرعت در طی دو سیکل مذکور به توزیع نهایی سرعت در طول عمر مفید خودرو دست یافت. با متوسط گیری از مجموعه ی توزیع نهایی می توان سرعت در نقطه کار را برای طراحی نهایی محاسبه نمود. در شرایطی که درصد کار خودرو در طول عمر آن در سیکل داخل شهری و خارج شهری متفاوت باشد، می توان دو منحنی مربوطه را با ضرایب وزنی مختلف و متناسب با میزان کارکرد خودرو در هر یک از این دو سیکل باهم جمع نمود و منحنی توزیع نهایی سرعت را به دست آورد. سپس با فرایندی مشابه می توان سرعت متوسط موردنظر جهت طراحی را تعیین نمود و در نقطه ی کار بهینه، طراحی ماشین الکتریکی مورد استفاده در داخل چرخ خودرو را انجام داد.

در شکل (۸) تابع توزیع احتمال سرعت خودرو برای یک سیکل ترکیبی با ضرایب وزنی یکسان برای کاربرد داخل شهری و خارج شهری ارائه شده است. این شکل حاصل جمع وزنی نمودارهای توزیع احتمال سرعت در سیکل های داخل شهری (شکل ۶) و خارج شهری (شکل ۷) است. برای به دست آوردن این شکل در هر سرعت خودرو، مقادیر احتمال مربوط به هریک از نمودارهای داخل شهری و خارج شهری در مقدار $0/5$ (برای ضرایب وزنی یکسان) ضرب شده و با یکدیگر جمع می شوند. در صورتی که مقادیر ضرایب وزنی یکسان نباشند، ضرب اعمالی برای مقادیر احتمال کار خودرو در سرعت مشخص برای هر یک از نمودارها برابر با درصد استفاده از خودرو در هریک از شرایط داخل و یا خارج شهری، در طول عمر وسیله نقلیه،

در صورتی که هدف از طراحی ماشین الکتریکی موردنظر صرفاً برای کاربرد در سیکل داخل شهری باشد می توان یک سرعت متوسط برای خودرو در بازه ی مذکور بین ۱۰ تا ۴۰ انتخاب نمود. مطالعه ی دقیق منحنی چگالی سرعت در بازه موردنظر نشان می دهد که با متوسط گیری از تغییرات سرعت در این بازه مقدار سرعت خودرو جهت انجام طراحی به دست می آید. با توجه به نوع خودرو هیبریدی مدنظر و استفاده از درایوهای مستقیم داخل چرخشی این سرعت متوسط معادل سرعت متوسط ماشین الکتریکی خواهد بود. بنابراین ماشین الکتریکی در نقطه کار موردنظر طراحی با توجه به میزان کارکرد بالای ماشین در این نقطه کار دارای توان حداکثر در حالت تک سرعتی مطرح شده در قسمت قبل و سرعت متوسط آن مقداری در حدود $27/5$ کیلومتر بر ساعت خواهد بود. در شکل (۶) توزیع شکل تابع توزیع سرعت در سیکل استاندارد درون شهری مدنظر (شکل ۵-الف)، قابل مشاهده است. این تابع به صورت یک تابع احتمال نرمالیزه شده رسم شده است.



شکل (۶): تابع توزیع احتمال نرمالیزه شده سرعت خودرو در سیکل استاندارد درون شهری

۴-۲-۲- پروفیل سرعت خارج شهری

با انجام مراحل مشابه با قسمت قبل می توان پروفیل سرعت استاندارد جاده (خارج شهر) را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و منحنی توزیع احتمال سرعت را برای این سیکل کاری خودرو استخراج نمود. همان طور که انتظار می رود در این نوع سیکل، خودرو در اکثریت زمان ها در محدوده ی سرعت بین ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در حال حرکت است. می توان با روشی مشابه با سیکل داخل شهری با متوسط گیری از این منحنی در بازه ی سرعت مذکور مقدار متوسط سرعت حرکت خودرو را که به عنوان سرعت چرخش ماشین الکتریکی در داخل چرخ در نقطه کار طراحی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، به دست آورد. با توجه به این مطلب اگر این خودروی هیبریدی صرفاً برای کاربرد خارج از شهر مورد استفاده قرار گیرد این نقطه کار می تواند به عنوان نقطه ی بهینه ی طراحی، برای ماشین الکتریکی در نظر گرفته شود. شکل (۷) توزیع احتمال نرمالیزه شده ی سرعت خودرو را در سیکل استاندارد خارج شهری مدنظر (شکل ۵-ب) نشان می دهد.

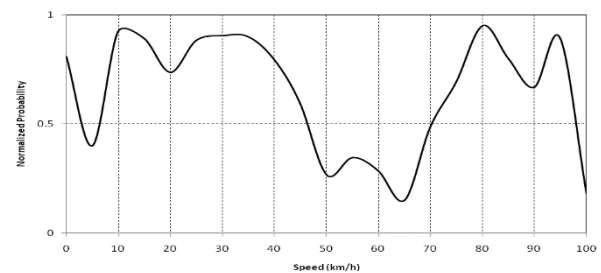
الکتریکی تعریف می شود. برای یافتن نقطه‌ی کار بهبود یافته برای خودروی هیبرید و نحوه‌ی تقسیم توان مناسب بین موتور احتراق داخلی و ماشین الکتریکی در هر حالت کاری، ابتدا باید بهره‌ی موتور احتراق داخلی برای سرعت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به انواع مختلف موتورهای احتراق داخلی تعیین نقطه‌ی کار بهبود یافته به شدت تابعی از نوع موتور احتراق داخلی خواهد بود. در این مقاله از منحنی شکل (۴) که مربوط به مشخصه‌ی بهره‌وری اقتصادی سوخت یک نوع موتور بنزینی می باشد، برای ارزیابی کارایی روش طراحی و تعیین مناسب ترین نقطه‌ی کار استفاده شده است.

در این نمودار با استفاده از سیستم کنترلی مناسب، مشخصه‌ی موتور احتراق داخلی در هر حالت کاری، در صورتی که در آن حالت کاری، موتور روشن باشد، در نقطه‌ی کار بهینه مشخصه‌ی آن تعریف می شود. این سیستم کنترلی می تواند با ارزیابی توان و گشتاور لحظه‌ای مورد نیاز خودرو، از طریق برآورد جرم کل خودرو (شامل جرم خودرو، بار، سوخت و سرنشینان آن) در لحظات مختلف سیکل کاری، شیب مسیر حرکت و همچنین شتاب و سرعت مورد درخواست (از طریق فرمان‌های دریافتی از راننده، مانند میزان فشار اعمال شده بر پدال گاز)، با اعمال فرمان‌های کنترلی مناسب به درجه‌های سوخت و هوای موتور احتراق داخلی، تعداد دور آن را برحسب توان مورد نیاز تنظیم نماید. با توجه به اینکه می توان در یک سیکل کاری استاندارد امکان استفاده از موتور احتراق داخلی در سرعت‌های مختلف را ایجاد نمود، نقطه‌ی کار موتور احتراق داخلی در سرعت مشخص و مدنظر، بر روی خط کار بهینه‌ی موتور احتراق داخلی انتخاب می شود. با تعیین نقطه‌ی کار بر روی این خط، بهره‌ی موتور احتراق داخلی (η_1) در هر حالت کاری حداکثر مقدار خود را خواهد داشت. بنابراین برای یافتن حداکثر مقدار برای بهره‌ی سیکل خودرو (η_{cv}) نیاز به یافتن α_k و دستیابی به حداکثر بهره‌ی ماشین الکتریکی خواهد بود.

با انتخاب نقطه‌ی کار بهینه، برای موتور احتراق داخلی، در حالت‌های کاری که این موتور مورد استفاده قرار می گیرد، می توان ضریب α_k را تعیین نمود. با این انتخاب، موتور احتراق داخلی (در صورتی که در آن حالت کاری مورد استفاده قرار گیرد) همواره در حداکثر بهره‌ی خود بوده و کمترین مصرف سوخت را خواهد داشت.

در حالتی که خودرو به توانی بیش از توان تولیدی بهینه در موتور احتراق داخلی نیاز داشته باشد، توان اضافی مورد نیاز (بالا تر از خط کار بهینه) توسط ماشین الکتریکی (در حالت کار موتوری) تأمین می شود. در این حالت موتور الکتریکی از طریق مبدل الکترونیک قدرت دوطرفه که در این نوع خودروها مورد استفاده قرار می گیرد، از باتری‌ها انرژی الکتریکی ذخیره شده را دریافت نموده و توان مکانیکی مورد نیاز را تأمین می نماید. در صورتی که توان مورد نیاز خودرو کمتر از توان تأمین شده توسط موتور احتراق داخلی در خط کار بهینه، در سرعت مورد نظر، باشد، موتور احتراق داخلی در نقطه‌ی کار بهینه در سرعت مورد نظر مورد استفاده قرار گرفته و مازاد توان مکانیکی تولیدی به

خواهد بود. به این ترتیب تابع توزیع احتمال سرعت خودرو برای یک سیکل ترکیبی با ضرایب وزنی غیریکسان نیز برای کاربرد داخل شهری و خارج شهری قابل استحصال خواهد بود.



شکل (۸): تابع توزیع احتمال سرعت خودرو برای یک سیکل ترکیبی با ضرایب وزنی یکسان برای کاربرد داخل شهری و خارج شهری

۳-۴ روش پیشنهادی (طراحی چندسرته)

در این روش با در نظر گرفتن سیکل کاری خودرو (شهری یا جاده) مقادیری را که ماشین در آن بیشترین زمان کارکرد خود را دارد محاسبه نموده و با توجه به این مقادیر تابع بهره سیکل خودرو (در چهار حالت کاری ممکن) بیشترین مقدار را به خود خواهد گرفت. تابع بهره سیکل خودرو (η_{cv}) به شکل زیر تعریف می شود:

$$\eta_{cv} = \frac{\sum_{k=1}^4 t_k [\alpha_k \eta_{lk} + (1 - \alpha_k) \eta_{ek}]}{T} \quad (1)$$

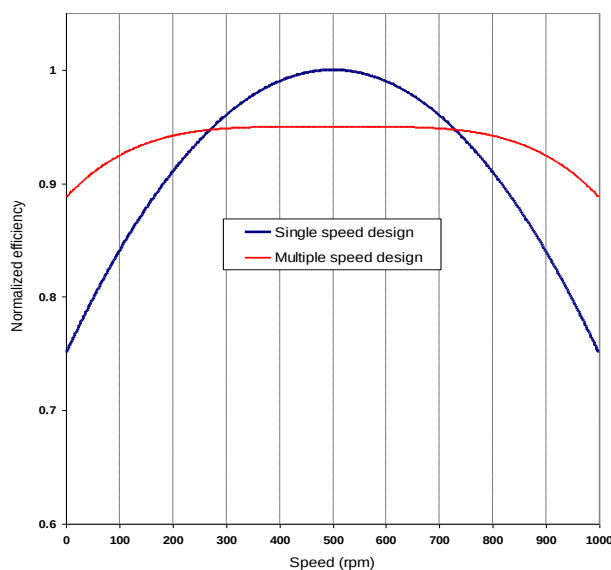
که در آن t_k ، η_{lk} و η_{ek} به ترتیب بازه‌ی زمانی، بهره‌ی موتور احتراق داخلی و بهره‌ی ماشین الکتریکی در حالت کاری k و T بازه‌ی زمانی کل سیکل خودرو است. در این رابطه، α_k ، ضریب استفاده از توان موتور احتراق داخلی در خودروی هیبریدی در حالت کاری k است. این ضریب مقداری بین ۰ تا ۱ را می تواند اختیار کند. اگر $\alpha_k = 0$ ، در این صورت موتور احتراق داخلی در حالت کاری k خاموش بوده و تمام توان مورد نیاز خودرو از طریق ماشین الکتریکی (استفاده به صورت موتوری) تأمین می شود. به این ترتیب ضریب استفاده از توان ماشین الکتریکی مورد استفاده در خودروی هیبریدی ($1 - \alpha_k$) برابر با ۱ خواهد بود. در حالتی دیگر اگر $\alpha_k = 1$ ، در این صورت موتور احتراق داخلی به تنهایی وظیفه‌ی تأمین توان خودروی هیبریدی را به عهده داشته و خودرو در این حالت کاری به صورت یک خودروی بنزین سوز مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت از توان ماشین الکتریکی جهت حرکت خودرو و یا شارژ باتری‌های آن استفاده نشده و این ماشین (در حالت موتوری و ژنراتوری) خاموش است.

در رابطه‌ی (۱)، بهره‌ی ماشین الکتریکی در هر حالت کاری تابعی از توان ورودی و توان خروجی است.

$$\eta_E = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، توان خروجی (P_{out}) با توجه به اینکه ماشین در حالت موتوری باشد یا ژنراتوری، به ترتیب به صورت مکانیکی و

ماشین الکتریکی در این شکل ساده، از مقدار صفر تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است.



شکل (۹): منحنی نرمالیزه شده بهره، در دو روش تک‌سرعتی و چندسرعتی

در منحنی نرمالیزه‌شده بهره مربوط به طراحی در یک نقطه کار مشخص (منحنی تک‌سرعتی) در نقطه‌ای (سرعتی) که در آن ماشین طراحی شده است و تحت عنوان سرعت نامی در طراحی‌ها شناخته می‌شود، بهره‌ی ماشین در مقدار حداکثر قرار می‌گیرد. این مقدار حداکثر، که در حالت نرمالیزه‌شده به مقدار واحد رسانده شده است، در حالت کلی از مقدار حداکثر به‌دست‌آمده از فرایند روش پیشنهادی در این مقاله بالاتر است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود مقدار حداکثر منحنی نرمالیزه‌شده بهره‌ی ماشین در روش پیشنهادی که با عنوان روش طراحی چند سرعتی (multiple speed design) معرفی می‌شود، پایین‌تر از منحنی روش رایج است. ولی افت بهره در سرعت‌های غیر از سرعت نامی در منحنی اول بسیار ملموس‌تر و بیشتر است. در طول یک سیکل خودرو اگر ماشین الکتریکی به‌صورت موتوری مورد استفاده قرار گیرد ممکن است در طول یک محدوده‌ی سرعت مشخص مورد استفاده قرار گیرد و مدت‌زمان بسیار اندکی در حالت نقطه کار ماشین مورد استفاده داشته باشد. بنابراین اگر طراحی ماشین به‌گونه‌ای انجام گیرد که بتوان به‌جای منحنی اول بهره، منحنی دوم را به دست آورد شرایط بهتری از لحاظ بهره‌ی ماشین در کل سیکل خودرو حاصل می‌شود.

مقدار $\sum_{k=1}^4 (1-\alpha_k) \eta_{Ek}$ در منحنی دوم نسبت به منحنی اول بیشتر است. درواقع به‌جای طراحی ماشین در سرعتی که در آن بهره‌ی ماشین الکتریکی η_{Ek} (بدون توجه به میزان تأثیر آن در بهره‌ی سیکل خودروی هیبریدی) در حداکثر قرار دارد، می‌توان با یافتن سرعتی که در آن مقدار عبارت $\sum_{k=1}^4 (1-\alpha_k) \eta_{Ek}$ مقدار حداکثر را داشته باشد، بهره‌ی سیکل خودرو η_{cv} را بهبود بخشید.

توان الکتریکی تبدیل می‌گردد. این توان صرف شارژ باتری‌های خودرو در حین حرکت خواهد شد.

در این مرحله هدف تعیین α_k و درنتیجه $1-\alpha_k$ در تمام لحظات یک سیکل خودرو با توجه به تغییرات بسیار زیاد به وجود آمده در حالت‌های کاری در بازه زمانی یک سیکل (T) خواهد بود.

با توجه به نوع عملکرد اشاره‌شده، استفاده از چهار حالت کاری معمول به‌صورت گسسته امکان‌پذیر نبوده و در شرایط عملی حالت‌های میانی نیز وجود خواهد داشت، که در آن‌ها درصدهای مختلفی از توان موردنیاز توسط موتور احتراق داخلی و ماشین الکتریکی تأمین می‌شود و درصد مشارکت هریک از این تجهیزات در تأمین توان به‌صورت پیوسته قابل تغییر و تعیین است. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مقاله، استفاده از تقسیم‌بندی کل حالات خودروی هیبریدی به چهار حالت کاری را جهت ساده‌سازی می‌توان استفاده نمود. با توجه به رابطه‌ی (۱) درصورتی‌که مقدار عبارت $\sum_{k=1}^4 (1-\alpha_k) \eta_{Ek}$ را بتوان به بیشترین مقدار خود رساند، رابطه فوق (برای بهره‌ی سیکل خودرو) به حداکثر خود رسیده و به‌این‌ترتیب مسافت کل پیموده شده توسط خودرو با استفاده از مقدار سوخت و شارژ معین باتری‌ها افزایش خواهد یافت.

در این مقاله هدف از طراحی ماشین الکتریکی مورد استفاده در خودروی هیبریدی، افزایش بهره‌ی سیکل خودرو است. با استفاده از این روش که از یک ماشین الکتریکی به‌صورت مجتمع هم برای کاربرد موتوری و هم برای کاربرد ژنراتوری در حالت‌های مختلف کاری استفاده می‌گردد، فضای اشغال‌شده در درون خودرو کاهش یافته و با استفاده از ماشین‌های شار محوری مغناطیس دائم می‌توان به ساختار ماشین‌های داخل چرخ‌ی در این کاربرد دست یافت.

با توجه به اینکه ماشین الکتریکی به‌کاررفته در خودروی هیبریدی در حالت‌های مختلف کاری و در شرایط مختلف درصدهای مختلفی از توان نامی را تولید نموده و زمان‌های اندکی در توان نامی مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از یک نقطه‌ی کار مشخص، مانند مقادیر نامی، برای طراحی ماشین مورد استفاده در این نوع خودروها نتیجه مطلوبی از جهت دستیابی به حداکثر بهره‌وری و بهره‌ی ماشین را نخواهد داشت. در روش پیشنهادی ممکن است بهره‌ی ماشین در نقطه کار نامی که در کارهای مشابه قبلی جهت طراحی مورد استفاده قرار می‌گرفت، حداکثر بهره را نداشته باشد، ولی در کل سیکل خودرو و تجربه نمودن همه‌ی شرایط مختلف و حالت‌های کاری خودرو در مجموع، شرایط بهتری را از لحاظ بهره‌ی سیکل ایجاد نماید. شکل (۹) تفاوت روش پیشنهادی (چندسرعتی) را با روش‌های مرسوم (تک‌سرعتی) به شکل ساده‌شده‌ای نمایش می‌دهد. در این شکل برای کل سیکل، $\alpha_k = 0$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در این شکل، پروفیل سرعت در یک سیکل رانندگی استاندارد، به‌صورت ساده و سرعت ثابت در کل سیکل در نظر گرفته شده است. محدوده سرعت

۴-۳-۱- پروفیل سرعت داخل شهری

در شرایطی که خودرو برای استفاده در سیکل‌های داخل شهری مدنظر قرار گیرد بازه‌ی موردنظر برای پیاده‌سازی روش چند سرعت را می‌توان در محدوده‌ای که احتمال حرکت خودرو در آن سرعت زیاد است، انتخاب نمود. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز اشاره گردید ضریب α_k را، که به تعبیری از آن با نام ضریب هیبریداسیون می‌توان یاد نمود، باید به نحوی انتخاب نمود که موتور احتراق داخلی در محدوده‌ی با مصرف پایین کار نموده و نقطه‌ی کار آن به خط کار بهینه بسیار نزدیک باشد. با توجه به اینکه توان ماشین الکتریکی مورد اشاره در این مقاله در مقایسه با توان موتور احتراق داخلی کوچک است، مقدار ضریب α_k بیش از ۰/۹ خواهد بود. برای دستیابی به توان موردنظر در نقطه‌ی کار طراحی نیز می‌توان فرایند مشابهی را پیاده نمود. برای ساده‌سازی نیز می‌توان مقدار توان نامی را که برای روش طراحی تک‌سرعت مورد استفاده قرار گرفت، برای شروع فرایند طراحی استفاده نمود.

۴-۳-۲- پروفیل سرعت خارج شهری

در سیکل کاری خارج شهری نیز مشابه سیکل داخل شهری می‌توان برای کاهش حجم محاسبات صرفاً بر اساس محدوده‌ای که بیشترین احتمال استفاده از ماشین الکتریکی در آن بازه سرعت وجود دارد، محاسبات را انجام داد. می‌توان با صرف زمان محاسبه بیشتر و انجام محاسبات در کل محدوده‌ی سرعت خودرو نتایج دقیق‌تر را نیز به دست آورد. نتایج ارائه‌شده در این مقاله بر اساس تحلیل‌های کامل و در کل محدوده‌ی سرعت خودرو بوده و ساده‌سازی انجام نشده است. لازم به ذکر است در فرایندهای طراحی، زمان مطرح نیست و مدل به‌دست‌آمده هرچه دقیق‌تر باشد، نتایج بهره‌برداری نیز مفیدتر خواهند بود.

۴-۳-۳- طراحی نهایی

برای انجام طراحی نهایی و دستیابی به نقطه‌ی کار بهبودیافته علاوه بر اینکه می‌توان تجمیع وزن‌داری از توزیع نرمالیزه‌شده تابع احتمال سرعت با دو سیکل داخل شهری و خارج شهری انجام داد، محدوده‌ی وسیع‌تری را با استفاده از روش پیشنهادی برای طراحی و دستیابی به نقطه‌ی کار بهبودیافته مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور باید ابتدا تعیین نمود که چه درصدی از طول عمر یک وسیله‌ی نقلیه هیبریدی در داخل شهر و چه درصدی از آن در خارج شهر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از یک تجمیع وزن‌دار به شکل رابطه (۳) می‌توان نتایج پارامترهای طراحی نهایی را برآورد نمود.

$$\eta_{cvt} = UF_U \eta_{cvu} + UF_H \eta_{cvh} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، η_{cvt} بهره‌ی سیکل نهایی خودروی هیبریدی است، که به شکل یک تابع وزن‌دار از بهره‌ی سیکل خودرو در حالت

درون شهری (η_{cvu}) و خارج شهری (η_{cvh}) بیان شده است. در این رابطه، UF_U و UF_H ، ضرایب استفاده از خودرو در طول عمر مفید آن به ترتیب در داخل شهر و خارج شهر می‌باشند.

برای دستیابی به نقطه‌ی کار طراحی یک ماشین الکتریکی با کارکرد بهینه، در طول عمر یک خودروی هیبریدی، پس از تعیین بهره‌ی سیکل خودرو با استفاده از ماشین الکتریکی طراحی‌شده در هریک از سیکل‌های داخل شهری و خارج شهری باید ضرایب استفاده از خودرو در هریک از سیکل‌های یادشده نیز در طول عمر مفید آن تعیین گردند. به این ترتیب هدف نهایی از طراحی ماشین الکتریکی مورد استفاده در یک خودروی هیبریدی در این روش پیشنهادی دستیابی به مقدار بیشینه در رابطه‌ی (۱) خواهد بود.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه در آرایش خودروی هیبریدی موردنظر، ماشین‌های الکتریکی داخل چرخ‌های عقب خودرو قسمتی از انرژی برگشتی خودرو را از طریق چرخ‌های جلو و با استفاده از کوپلینگ جاده به باتری‌ها منتقل می‌کنند، برای محاسبات کامل باید بازه جاده نیز دخالت داده شود. در محاسبات انجام‌یافته در این مقاله، برای ساده‌سازی، در هر سه روش، این ضریب برابر با ۱۰۰ درصد لحاظ شده است. برای به‌کارگیری روش‌های مذکور مقادیر تعیین‌شده‌ی روش طراحی و اطلاعات اولیه مورد نیاز، برای هر سه روش، در جدول (۱) بیان شده‌اند. همچنین نتایج نهایی استفاده از این روش‌ها در حالت نهایی در جدول (۲) و (۳) به تفصیل ارائه شده است.

۵- مقایسه‌ی روش‌های طراحی ماشین‌های الکتریکی

با اعمال روش‌های مختلف جهت تعیین پارامترهای طراحی و مخصوصاً سرعت ماشین الکتریکی موردنظر، تعدادی از نتایج حاصل از سه روش ارائه‌شده در این مقاله، به‌صورت خلاصه در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توان و گشتاور نامی در حالت‌های ژنراتوری و موتوری به‌صورت مشابه در حالت نامی در نظر گرفته می‌شود. با اعمال روشی مشابه با مقدار سرعت، برای این پارامترها نیز می‌توان مقادیر لازم برای بهبود ساختار ماشین الکتریکی طراحی‌شده را، جهت استفاده در کاربردی خاص مانند خودروی هیبریدی، به دست آورد.

جدول (۱): تعدادی از پارامترهای نهایی برای طراحی ماشین الکتریکی

پارامتر	روش اول (مقادیر نامی)	روش دوم (توزیع احتمال سرعت)	روش سوم (چندسرعت-پیشنهادی)
توان نامی (کیلووات)	۳	۳	۳
گشتاور نامی (نیوتن‌متر در سرعت طراحی)	۳۵	۳۵	۳۵
سرعت در نقطه کار طراحی (دور بر دقیقه)	۸۴۰	۴۵۰	پروفیل سرعت در یک سیکل
بیشترین سرعت وسیله نقلیه (کیلومتر در ساعت)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

سینوسی، در حالت بدون هسته استاتور، تعداد کلافها (قطبها)ی استاتور به ازای هر فاز برابر با نصف تعداد زوج قطبهای روتور در نظر گرفته می‌شوند [۱۵ و ۱۶]. در این حالت خروجی ماشین دارای بهترین شرایط خواهد بود.

با توجه به دسترسی موجود و هدف مورد نظر طراحی، در این مقاله از یکی از تولیدات شرکت ANSYS با نام ANSYS Maxwell 16.02، برای انجام محاسبات و تحلیل‌های اجزاء محدود، استفاده شده است.

برای تحلیل اجزاء محدود جهت کاهش زمان تحلیل و درعین حال حفظ میزان دقت در بازه‌ی قابل قبول، از روش شبه‌سهم‌بندی به‌جای روش سهم‌بندی استفاده شده است [۱۷]. مدل حاصل از روش تحلیلی در محیط اجزاء محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیری نظیر تلفات و بهره با توجه به اهداف مورد نظر در هر کدام از سه روش محاسبه شده و دوباره به برنامه‌ی نرم‌افزاری ارجاع داده می‌شود، تا در صورت نیاز، تغییرات لازم در ساختار ماشین الکتریکی طراحی شده اعمال گردیده و اطلاعات لازم جهت مدل‌سازی مجدد در محیط اجزاء محدود استخراج گردد. با این روش تکرار ساده، مناسب‌ترین ساختار حاصل از هر سه روش حاصل شده و نتایج تحلیل مدل‌های نهایی در جدول (۳) ارائه گردیده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) مشاهده می‌شود که مقادیر بیشترین بهره در یک سیکل ترکیبی خودروی هیبریدی مورد نظر برای حالتی که ماشین مغناطیس دائم داخل چرخه با دو روش اول طراحی شده باشد، بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و نیز از مقدار بیشترین بهره برای ماشین الکتریکی که در روش سوم به دست آمده، بالاتر است. همچنین در مورد کمترین مقدار بهره مشاهده می‌شود که مقادیر حاصل از دو روش اول از مقدار حاصل از روش سوم بسیار پایین تر بوده و بنابراین از این موارد می‌توان دریافت که مشخصه بهره در دو روش اول تغییرات زیادی داشته و برای سرعت‌های مختلف دارای مقادیر بسیار متفاوتی است. برعکس، مشخصه بهره در روش سوم حالت صاف‌تری داشته و تغییرات شدید در سرعت‌های مختلف دیده نخواهد شد.

جدول (۳): نتایج بهره‌ی ماشین الکتریکی و بهره‌ی کل خودروی هیبریدی

پارامتر	روش اول (مقادیر نامی)	روش دوم (توزیع احتمال سرعت)	روش سوم (چند سرعت- پیشنهادی)
بیشترین بهره‌ی ماشین الکتریکی (درصد)	۹۴/۶	۹۴/۱	۸۹/۶
کمترین بهره‌ی ماشین الکتریکی (درصد)	۴۵/۴	۴۵/۸	۶۵/۳
بهره‌ی نهایی سیکل خودروی هیبریدی (درصد)	۳۹/۲	۴۱/۹	۴۸/۷

همچنین از جدول (۳) می‌توان مشاهده نمود که با اعمال یک سیستم کنترلی مناسب که نقطه کار موتور احتراق داخلی (با ساختار سری-موازی) را، با در نظر گرفتن مشخصه اقتصادی سوخت خود،

در روش دوم، گشتاور نامی ذکر شده در جدول (۱)، بیانگر گشتاور قابل استحصال از ماشین الکتریکی طراحی شده، در طول دوره‌ی استفاده از آن بوده و مقدار گشتاور در سرعت نقطه‌ی طراحی با توجه به توان نامی ذکر شده، قابل محاسبه است.

مقادیر پارامترهایی را که هدف طراحی ماشین الکتریکی می‌باشند، در فرایند طراحی ماشین‌های الکتریکی مغناطیس دائم شار محوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب برای هریک از فرایندهای طراحی مطرح شده، با استفاده از روابط تحلیلی، ساختار مناسب برای این نوع از ماشین‌ها با کاربرد ویژه‌ی آن به دست آمده است. در جدول (۲) تعدادی از پارامترهای ساختمانی، الکتریکی و مغناطیسی ماشین طراحی شده در هر کدام از روش‌ها ارائه شده است. برای دستیابی به این نتایج و انجام فرایند طراحی، ابتدا نقاط اولیه‌ی طراحی با استفاده از روش تحلیلی به دست آمده و سپس با تغییر پارامترها (مانند ابعاد قسمت‌های مختلف) به یک ساختار بهبود یافته با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) می‌توان دست یافت. در هر کدام از سه روش، هدف دستیابی به بهترین عملکرد از لحاظ بهره است. برای تحقق این هدف با استفاده از برنامه نرم‌افزاری تهیه شده جهت طراحی تحلیلی، ماشین مغناطیس دائم شار محوری با مشخصات لازم طراحی گردیده و در هر بار نتایج خروجی نرم‌افزار طراحی، جهت مدل‌سازی به نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود فرستاده می‌شود.

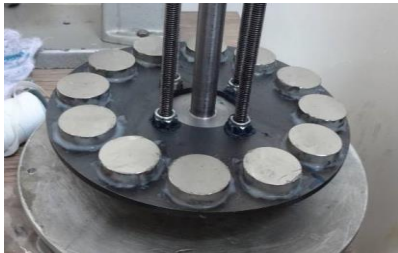
جدول (۲): نتایج حاصل از طراحی ماشین الکتریکی

پارامتر	روش اول (مقادیر نامی)	روش دوم (توزیع احتمال سرعت)	روش سوم (چند سرعت- پیشنهادی)
بیشترین مقدار جریان هر فاز (آمپر)	۱/۹۶	۱/۹۷	۲/۰۳
گشتاور متوسط (نیوتن متر)	۳۵/۸	۳۶/۱	۳۸/۱
چگالی شار (تسلا)	۰/۹	۰/۹	۰/۸
وزن ماشین (کیلوگرم)	۱۴/۹	۱۵	۱۶/۵
کل طول فاصله هوایی (میلی متر)	۱/۶	۱/۷	۱/۹
تعداد قطب‌های روی هر دیسک روتور	۱۲	۱۲	۱۲
تعداد کلاف‌های استاتور	۹	۹	۹
قطر خارجی (میلی متر)	۲۲۵	۲۳۰	۲۴۵
قطر داخلی (میلی متر)	۱۵۰	۱۵۵	۱۴۰
ارتفاع مغناطیس‌های دائم روی روتور (میلی متر)	۱۰	۱۱	۱۰
کل طول محوری ماشین بدون قاب خارجی (میلی متر)	۹۲	۸۹	۸۳

در فرایند طراحی در هر سه روش، با توجه به نیاز به تعیین تعداد قطب‌های روتور و استاتور، از ترکیب مشابه ۱۲/۹ استفاده شده است. در این ترکیب که استاتور دارای ۹ کلاف بوده و هر کدام از روتورها دارای ۱۲ مغناطیس دائم نصب شده بر روی سطح خود می‌باشند، به سبب وجود ضرایب سیم‌پیچی، محتوای هارمونیک در شکل موج شار و ولتاژ ایجاد می‌شود. با این وجود با توجه به شرایط مشابه در هر سه روش، می‌توان از این ترکیب برای مقایسه‌ی روش‌ها استفاده نمود. جهت انجام بهینه‌سازی در ساختار نهایی برای ماشین مغناطیس دائم



شکل (۱۰): کلاف‌های استاتور



شکل (۱۱): ساختار روتور و استاتور



شکل (۱۲): شمای کلی ماشین ساخته‌شده و قاب خارجی

۷- نتیجه

در این مقاله جهت انجام فرایند طراحی برای یک ماشین مغناطیس دائم شار محوری که در حالت درایو مستقیم داخل چرخ‌ی در یک خودروی هیبریدی مورد استفاده خواهد داشت، سیکل کاملی از خودرو برای درک شرایط متفاوت عملکرد ماشین الکتریکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از انتخاب مناسب‌ترین ساختار با ویژگی‌های ساختمانی متناسب، طراحی بهبودیافته‌ای برای کاربرد موردنظر بر مبنای میزان کارکرد خودرو در سرعت‌های مختلف و

همواره بر روی خط کار بهینه حفظ نموده و با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله، ساختاری از ماشین الکتریکی مغناطیس دائم شار محوری داخل چرخ‌ی را برای کاربرد در حالت‌های مختلف خودروی هیبریدی مورد استفاده موتور و یا ژنراتوری قرار دهد، در یک سیکل ترکیبی، دارای بهره‌ی سیکل ۶ تا ۹ درصد بیشتر خواهد بود. بنابراین به همین میزان با استفاده از این استراتژی در کنترل موتور احتراق داخلی و همزمان با طراحی بهبودیافته‌ی ماشین الکتریکی موردنظر با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان با مقدار مشخصی از سوخت و شارژ باتری مسافتی بیشتر را طی نمود.

۶- ساخت ماشین طراحی‌شده در روش بهبودیافته و نتایج آزمایشگاهی

برای دستیابی به نتایج عملی و تأیید روش ارائه‌شده، نمونه‌ای از ماشین الکتریکی موردنظر با ابعاد و مشخصه‌های حاصل از روش پیشنهادی، ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. این ماشین یک ماشین الکتریکی مغناطیس دائم شار محوری با ساختار دو روتور خارجی و یک استاتور میانی (از نوع TORUS-NS) است. استاتور آن نیز در حالت بدون هسته‌ی آهنی ساخته شده است. برای مقایسه نتایج حاصل از دو نوع ساختار با هسته و بدون هسته، مدل ساخته‌شده در محیط اجزاء محدود برای هر دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفته و تلفات آن‌ها جهت تعیین بهره مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل جهت مقایسه‌ی دو نوع ساختار با هسته و بدون هسته در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین برای تأیید نتایج حاصل از مدل‌سازی برای ساختار بدون هسته، نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌یافته برای تعیین تلفات بر روی ماشین بدون هسته در جدول (۴) آورده شده است.

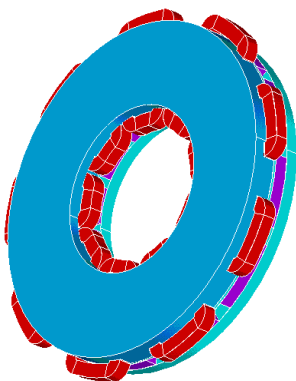
جدول (۴): نتایج نهایی مدل‌سازی و عملی ماشین الکتریکی در حالت

هسته‌دار و بدون هسته

پارامتر	نتایج مدل‌سازی هسته‌دار	نتایج مدل‌سازی بدون هسته	نتایج عملی بدون هسته
گشتاور متوسط (نیوتن‌متر)	۴۳/۴	۳۸/۱	۳۴/۴
تلفات نهایی ماشین الکتریکی (وات)	۳۸۱/۷	۳۱۰/۵	۴۰۴/۰
بهره‌ی ماشین الکتریکی (درصد)	۸۷/۳	۸۹/۶	۸۶/۵

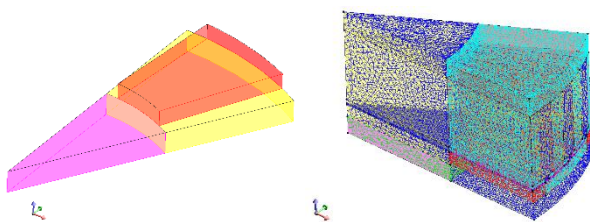
قسمتی از مراحل ساخت قطعات مختلف ماشین الکتریکی موردنظر به همراه شمای کامل آن در شکل‌های (۱۰) - (۱۲) نمایش داده شده است. شکل (۱۰) نحوه‌ی انجام سیم‌پیچی برای کلاف‌های استاتور را نمایش می‌دهد. در شکل (۱۱) ساختمان روتور که از نوع مغناطیس‌های نصب‌شده بر روی سطح است، به همراه چیدمان یک‌فاز متشکل از سه کلاف استاتور و مجموعه‌ی کامل کلاف‌های استاتور مشاهده می‌شود. در شکل (۱۲) نیز می‌توان ساختمان کامل ماشین الکتریکی مغناطیس دائم شار محوری با طراحی انجام‌شده را مشاهده نمود.

با استفاده از تقارن صفحه xy در آن به دو قسمت تقسیم می‌شود. در هریک از این قسمت‌ها یک دیسک روتور به همراه نصف استاتور قرار می‌گیرد. در این حالت از شرایط تقارن مرزی "Even (flux normal)" استفاده می‌شود. با این شرط مرزی که به آن "شرایط مرزی Neumann" نیز گفته می‌شود، خطوط فلو را به صورت عمود بر صفحه تقارن و درواقع اضلاعی از صفحات طراحی (در تبدیل به شبه‌سه‌بعدی) که بر روی این صفحه واقع شده‌اند، تنظیم کرده و در واقع قسمت حذف شده با یک ماده خارجی با نفوذپذیری مغناطیسی بی‌نهایت در محل بیرون صفحه جایگزین می‌گردد. سپس این ساختار هندسی جدید با استفاده از تقارن صفحه xz و با در نظر گرفتن شرایط مرزی "Master" و "Slave" (که به شرایط مرزی پریودیک نیز مشهور است) به "۳" قسمت تقسیم می‌شوند. عدد "۳" بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک تعداد کلاف‌ها (یعنی ۱۲) و تعداد قطب‌ها (یعنی ۹) است. با این روش، کل محدوده تحلیلی، به یک ششم مدل ماشین اولیه کاهش می‌یابد. اکثر خصوصیات ماشین در این حالت با استفاده از این مدل کاهش یافته قابل محاسبه هستند. با این وجود برای محاسبه تعداد کمی از خصیصه‌های ماشین حداقل به نصف مدل اولیه نیاز خواهد بود. بنابراین برای تأیید نتایج محاسبه این تعداد از خصوصیات در مدل کاهش یافته، به صورت محدود، بعضی از شبیه‌سازی‌ها در مدل کامل ماشین نیز انجام می‌شوند.



شکل (۱۳): مدل کلی نصف ماشین و اجزای آن در محیط المان محدود

در شکل (۱۴) قطعی از نصف مدل ماشین که فقط شامل یک قطب PM می‌باشد و نتایج مش‌بندی حاصل از نرم‌افزار نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۵) میزان چگالی فلو در قسمت‌های مختلف دیسک‌های روتور و PM‌های آن را نمایش می‌دهد. شکل (۱۶) توزیع چگالی فلو فاصله هوایی را در ماشین موردنظر ارائه می‌نماید.



شکل (۱۴): قطاع و مش‌بندی المان محدود در زیر یک قطب روتور

شرایط متفاوت استفاده از این ماشین الکتریکی در خودروی هیبریدی انجام گرفته است. در روش پیشنهادی به جای استفاده از یک نقطه‌ی کار مشخص برای طراحی ماشین از مفهومی به نام "بهره‌ی سیکل خودرو" کمک گرفته شده و بر مبنای این روش، طراحی بر اساس بهبود این مقدار و با تابعی از یک تجمیع وزن‌دار از مجموعه‌ای از نقاط کار باهدف افزایش بهره‌ی کلی خودروی هیبریدی در سیکل کامل آن در داخل و خارج شهر (سیکل ترکیبی) انجام گرفته است.

انجام طراحی به روش ارائه شده در این مقاله، برای نوع خاصی از ماشین‌های الکتریکی که در کاربردهای ویژه، با مشخصه‌های عملکردی معین، مورد استفاده قرار می‌گیرند، نتایج تأثیرگذاری در بهره‌وری ماشین موردنظر خواهد داشت. روش طراحی "چند سرعت"، یا به عبارتی روش "سرعت متغیر"، به شرایط عملی و کارکردی ماشین در دوره‌ی زمانی بهره‌برداری از آن بستگی دارد. این روش در شرایطی که بتوان از ماشین ساخته شده، با تکنولوژی در دسترس، در کاربرد ویژه‌ی آن، استفاده نمود، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

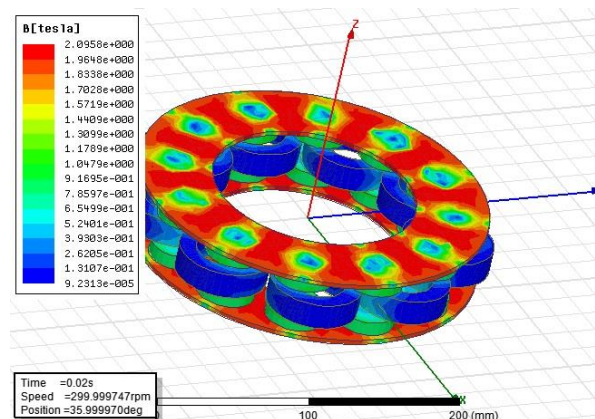
با توجه به نوع روش طراحی پیشنهادی، مشاهده می‌شود در کاربرد ویژه‌ی خودروی هیبریدی، نتایج طراحی می‌تواند تابعی از نوع آرایش خودروی هیبریدی، نوع سیکل حرکتی خودرو، مشخصه‌ی موتور احتراق داخلی مورد استفاده، ضریب هیبریداسیون، مشخصات تأیر مورد استفاده، حالت‌های کاری خودروی هیبریدی و غیره باشد.

نتایج حاصل به وضوح کارایی روش پیشنهادی را نسبت به روش‌های معمول نشان می‌دهد. این روش می‌توان برای طراحی هر نوع ماشین الکتریکی که برای یک سیکل به نسبت مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرند، کاربرد داشته باشد. در انتها برای تأیید نتایج طراحی نمونه‌ای از ماشین مغناطیس دائم شار محوری با استاتورهای بدون هسته از نوع دو روتور با یک استاتور میانی ساخته شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها بر روی نمونه‌ی ساخته شده نیز نتایج حاصل از طراحی تحلیلی و اجزاء محدود را تأیید می‌نماید.

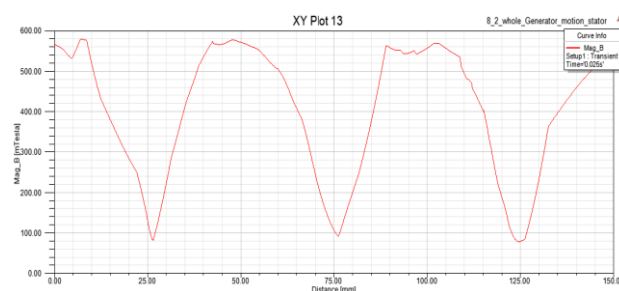
ضمیمه: مدل‌سازی المان محدود

در فرایند مدل‌سازی المان محدود در هر بار، مشخصه‌های مدل ماشین استخراج شده و در نهایت میزان تلفات مسی و بازده کلی ماشین با توجه به مطالب و روابط ارائه شده، محاسبه گردیده است. سپس بر اساس بازده سیکل خودروی هیبریدی در محیط برنامه‌نویسی و اعمال ضرایب مربوط به موتور احتراق داخلی و ماشین الکتریکی، بازده سیکل خودرو محاسبه شده و در روش‌های طراحی مطرح شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (۱۳) مدل ایجاد شده برای نصف ماشین الکتریکی موردنظر ارائه می‌شود. با توجه به اینکه تعداد مدل‌سازی‌ها در محیط المان محدود در روش پیشنهادی برای دستیابی به بازده سیکل خودرو زیاد است، برای کاهش حجم و زمان محاسبات تحلیلی المان محدود علاوه بر استفاده از روش مدل‌سازی شبه سه‌بعدی، از تقارن موجود در ساختمان هندسی ماشین نیز استفاده شده است. ماشین در مرحله اول

- applications,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 4, pp. 1015–1023, Apr. 2010.
- [11] P. Zheng, J. Zhao, R. Liu, C. Tong and Q. Wu, “Magnetic characteristics investigation of an axial-axial flux compound-structure PMSM used for HEVs,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 2191–2194, Jun. 2010.
- [12] H. Hatami, M. B. B. Sharifian, M. R. Feyzi and M. Sabahi, “analysis and improved design of direct-drive coreless afpm in-wheel machine for HEV application,” International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), Issue. 15, vol. 5, no. 2, pp. 161-166, Jun. 2013.
- [13] T. F. Chan, L. L. Lai and S. Xie, “Field computation for an axial flux permanent-magnet synchronous generator,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2009.
- [14] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T. A. Lipo, “A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp. 185–192, Jun. 1999.
- [15] R. J. Wang, M. J. Kamper, K. V. Westhuizen and J. F. Gieras, “Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator,” Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 1, pp. 55–64, Jan. 2005.
- [16] R. Martin, *Axial flux permanent magnet machines for direct drive applications*, Ph.D. Thesis, Durham University, Durham, UK, 2007.
- [17] A. Parviainen, M. Niemela and J. Pyrhonen, “Modeling of axial flux permanent-magnet machines,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 5, pp. 1333–1340, Sep./Oct. 2004.



شکل (۱۵): میزان چگالی فلو در قسمت‌های مختلف دیسک‌های روتور



شکل (۱۶): توزیع چگالی فلوئی فاصله هوایی در ماشین TORUS-NS بدون هسته استاتور

مراجع

- [1] D. Kowal, P. Sergeant, L. Dupre and A. V. Bossche, “Comparison of nonoriented and grain-oriented material in an axial flux permanent-magnet machine,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 2, pp. 279–285, Feb. 2010.
- [2] A. J. Rix and M. J. Kamper, “Radial-flux permanent-magnet hub drives: a comparison based on stator and rotor topologies,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2475–2483, Jun. 2012.
- [3] F. Profumo, Z. Zhang and A. Tenconi, “Axial flux machines drives: a new viable solution for electric carsm” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 1, pp. 39–45, Feb. 1997.
- [4] C. C. Chan, A. Bouscayrol and K. Chen, “Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: architectures and modeling,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, Feb. 2010.
- [5] S. C. Oh and A. Emadi, “Test and simulation of axial flux-motor characteristics for hybrid electric vehicles,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, no. 3, pp. 912–919, May. 2004.
- [6] F. Locment, E. Semail and F. Piriou, “Design and study of a multiphase axial-flux machine,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1427–1430, Apr. 2006.
- [7] J. F. Gieras, R. J. Wang and M. J. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer Science, Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [8] J. H. Choi, J. H. Kim, D. H. Kim and Y. S. Baek, “Design and parametric analysis of axial flux pm motors with minimized cogging torque,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 6, pp. 2855–2858, Jun. 2009.
- [9] S. Huang, M. Aydin and T. A. Lipo, “TORUS concept machines: pre-prototyping design assessment for two major topologies,” In Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, vol. 3, p. 1619-1625, 2001.
- [10] S. Javadi and M. Mirsalim, “Design and analysis of 42-v coreless axial-flux permanent-magnet generators for automotive