NRI-ER-747-PEAPN20-00-F

کسب دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC کم‌هزینه برای کاربرد دوچرخه برقی و ساخت یک نمونه نیمه‌صنعتی ۵۰۰ واتی



مدیر پروژه: امین بیرامی ایناللو
مجری: سهراب امینی ولاشانی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312


بسم الله الرحمن الرحيم

کسب دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC کم‌هزینه برای کاربرد دوچرخه برقی و ساخت یک نمونه نیمه‌صنعتی ۵۰۰ واتی

مدیر پروژه:

امین بیرامی ایناللو

همکاران پروژه:

شیما توکلی، بهاره زارعی، ارمغان علی‌عسکری، اعظم مختاری، منصوره کریمی، سیده مهسا هاشمی، مهدی سیدموسوی و نادر نظری

مجری:

سهراب امینی ولاشانی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-747-PEAPN20-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

کسب دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC کم‌هزینه برای کاربرد دوچرخه برقی و ساخت یک نمونه نیمه‌صنعتی ۵۰۰ واتی/ مدیر پروژه: امین بیرامی اینانلو. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۳۱۰ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. توکلی، شیما، همکار پروژه. ۲. زارعی، بهاره، همکار پروژه. ۳. علی‌عسکری، ارمغان، همکار پروژه. ۴. مختاری، اعظم، همکار پروژه. ۵. کریمی، منصوره، همکار پروژه. ۶. هاشمی، سیده مهسا، همکار پروژه. ۷. سیدموسوی، مهدی، همکار پروژه. ۸. نظری، نادر، همکار پروژه.

انتشارات پژوهشگاه نیرو

مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب،انتهای‌بلوارشهیددادمان،پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه:www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب امین بیرامی اینانلو متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران: شیما توکلی، بهاره زارعی، ارمغان علی‌عسکری، اعظم مختاری، منصوره کریمی، سیده مهسا هاشمی، مهدی سیدموسوی و نادر نظری

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

پیشگفتار

دوچرخه‌های برقی در سال‌های اخیر به دلیل مطرح‌شدن حمل و نقل درون‌شهری سبز، جایگاه خاصی یافته‌اند. در این میان، شرکت‌هایی شکل گرفته‌اند که با طراحی‌های مدرن محصولات خود، سعی در به دست آوردن بازارهای سال‌های آینده را دارند.

دوچرخه برقی، دوچرخه‌ای مجهز به یک موتور الکتریکی کوچک است که دوچرخه‌سوار را در پدال زدن یاری می‌نماید. انواع مختلف بسیاری از دوچرخه‌های برقی در جهان وجود دارند، از مدل‌هایی که دارای یک موتور برقی کوچک هستند و پدال زدن را ساده‌تر می‌کنند تا مدل‌هایی که به یک موتورسیکلت کوچک (موتورگازی) نزدیک‌ترند. به هر حال تا زمانی که فرد می‌تواند پدال بزند، دوچرخه برقی محسوب می‌گردد و به‌عنوان موتورسیکلت برقی شناخته نمی‌شود. اغلب کشورها قوانین متفاوتی برای این طبقه‌بندی‌ها دارا هستند.

دوچرخه برقی از باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌کند و معمولاً می‌تواند با سرعتی بین ۲۵ تا ۳۲ کیلومتر در ساعت حرکت نماید. بسته به قوانین کشورها میزان قدرت موتور و سرعت دوچرخه‌های برقی با هم متفاوت هستند، برخی موتورگازی‌های برقی دارای سرعت ۴۵ کیلومتر در ساعت هستند. به‌طور متوسط دوچرخه‌های برقی با یک باتری کاملاً شارژ شده می‌توانند مسافت بین ۲۵ تا ۶۰ کیلومتر را طی کنند که البته طول این مسافت بستگی به کیفیت دوچرخه، کیفیت باتری، شرایط جاده و حتی دمای هوا و شرایط جوی دارد.

می‌توان گفت مهم‌ترین بخش یک دوچرخه برقی، موتور الکتریکی محرکه آن است که بایستی ازنظر بازدهی، نسبت گشتاور به وزن و هزینه، قابلیت بالایی داشته باشد تا بتواند در این فناوری توجیه به‌کارگیری داشته باشد. در سال‌های اخیر با توجه به ویژگی‌های خوب موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC)، مانند دوام زیاد، بازدهی بالا، کنترل مناسب و ساده و ضریب قدرت بالا، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده است. موتورهای BLDC علاوه بر داشتن مزایای گفته‌شده، دارای قابلیت شتاب بالا به دلیل اینرسی پایین روتور و داشتن مشخصه‌های مطلوب موتورهای DC با گشتاور ایستای بالا با کارکرد در سرعت بالا را دارا می‌باشند. موتور BLDC از دسته موتورهای الکتریکی سنکرون است که شباهت زیادی با موتورهای DC دارد. به دلیل پاسخ بهتر سرعت و گشتاور، پاسخ دینامیکی بالا، بازده بالا، طول عمر بالا، عملکرد بدون نویز و محدوده عملکرد متفاوت سرعت، این موتور نسبت به موتورهای DC و القایی برتری دارد.

با توجه به اینکه تجربه ساخت الکتروموتور BLDC با استفاده از مواد اولیه وارداتی مانند مواد مغناطیسی دائم نئودمیوم و ورقه‌های سیلیکونی در ایران وجود دارد و از طرفی یک الگوریتم طراحی صفر تا صد برای این الکتروموتور در کاربرد دوچرخه برقی وجود ندارد، لازم است تا پروژه‌ای در این خصوص تعریف گردد تا دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC دوچرخه برقی با استفاده از موادی مانند ماده مغناطیس دائم فریتی و ورقه‌های کربنی که امکان ساخت و استحصال آنها با هزینه کمتر در داخل کشور وجود دارد، بومی گردد. بدین ترتیب موانع توسعه این فناوری به دلیل مشکلات تأمین مواد، مرتفع می‌گردد. گرچه استفاده از مواد کم‌هزینه ممکن است منجر به ابعاد بزرگ‌تر و بازدهی پائین الکتروموتور شود ولی در شرایط فعلی، دستیابی به این دانش با توجه به هزینه کمتر و امکان تأمین راحت‌تر مواد، قابل‌قبول خواهد بود و همچنین می‌تواند مسیر اصلاح و بهبود طراحی این نوع

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

الکتروموتورها را برای پژوهش‌های بعدی باز کند.

در راستای پیشبرد صنعت کشور در زمینه تولید و بومی‌سازی ساخت دوچرخه برقی‌های کاربردی و کم‌هزینه، پروژه "کسب دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC کم‌هزینه برای کاربرد دوچرخه برقی و ساخت یک نمونه نیمه‌صنعتی ۵۰۰ واتی" در قالب زیرپروژه از طرح "بومی‌سازی زیرساخت و اجزای خودرو برقی" در مرکز توسعه فناوری خودرو برقی با همکاری مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته تعریف و آغاز گردیده است.

گزارش پیش رو مربوط به مرحله اول تا سوم خدمات پروژه مذکور می‌باشد که در قالب ۱۲ فصل و با مدیریت آقای امین بیرامی ایناللو و محققین خانم شیما توکلی، بهاره زارعی، ارمغان علی‌عسکری، اعظم مختاری، منصوره کریمی و سیده مهسا هاشمی و آقایان سیدمهدی موسوی و نادر نظری و نظارت آقای دکتر مسعود دهمرده، نگارش و تدوین شده است. مجری پروژه نیز آقای سهراب امینی ولاشانی از مرکز توسعه فن‌آوری موتورهای الکتریکی پیشرفته می‌باشند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فهرست مطالب **شماره صفحه**

فصل۱- انواع دوچرخه برقی و فن‌آوری مربوط به آن ۲
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس کاربرد آنها ۲
۱-۲-۱- دوچرخه‌های برقی کوهستانی ۳
۱-۲-۲- دوچرخه برقی جاده‌ای ۴
۱-۲-۳- دوچرخه‌های برقی هیبریدی ۵
۱-۲-۴- دوچرخه‌های برقی شهری ۶
۱-۲-۵- دوچرخه‌های برقی تاشو ۷
۱-۳- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس سیستم کنترلی آنها ۸
۱-۳-۱- دوچرخه‌های PAB ۸
۱-۳-۲- دوچرخه‌های PDB ۱۲
۱-۳-۳- دوچرخه برقی با power-on-demand (با دسته‌ی تراتل) و pedal-assist (نوع هیبریدی) ۱۲
۱-۴- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس موقعیت قرارگیری موتور ۱۳
۱-۴-۱- موتورهای Mid-Drive ۱۳
۱-۴-۲- موتور در هاب چرخ ۱۶
۱-۵- جمع‌بندی ۲۱
فصل۲- اجزاء الکتریکی و مشخصه‌های دوچرخه برقی ۲۳
۲-۱- مقدمه ۲۳
۲-۲- اجزای الکتریکی دوچرخه برقی ۲۳
۲-۲-۱- موتور الکتریکی در دوچرخه برقی ۲۳
۲-۲-۲- سنسور در سیستم PAS ۲۵
۲-۲-۳- سنسور اثر هال ۲۸
۲-۲-۴- تراتل در دوچرخه‌های PDB ۳۰
۲-۲-۵- کنترل‌کننده دوچرخه‌برقی ۳۲
۲-۲-۶- ترمز احیاکننده ۳۵
۲-۳- مشخصات الکتریکی دوچرخه برقی ۳۷
۲-۳-۱- گشتاور (نیوتن. متر) ۳۷
۲-۳-۲- توان (وات) ۳۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۳-۳-۲- ولتاژ (ولت) ۳۸
۳-۳-۲- آمپرساعت ۳۸
۳-۳-۲- وات‌ساعت ۳۸
۳-۲- مباحث مورد نظر در طراحی دوچرخه برقی ۳۸
۳-۴-۲- شیب پیمایی ۳۹
۳-۴-۲- وزن دوچرخه برقی ۴۲
۳-۵-۲- مدل‌سازی بار دوچرخه شهری ۴۵
۳-۵-۲- نیروی سایشی ۴۵
۳-۵-۲- نیروی برخورد باد ۴۶
۳-۵-۲- نیروی وزن در سطح شیب‌دار ۴۶
۳-۶-۲- استخراج مشخصه گشتاور- سرعت دوچرخه برقی ۴۶
۳-۷-۲- جمع‌بندی ۴۹
فصل ۳- استانداردها و آزمونهای عملکردی دوچرخه برقی ۵۱
۳-۱- مقدمه ۵۱
۳-۲- قوانین و محدودیت‌های دوچرخه برقی در دنیا ۵۱
۳-۲-۳- استرالیا ۵۱
۳-۲-۳- کانادا ۵۳
۳-۲-۳- چین ۵۳
۳-۲-۳- اتحادیه اروپا ۵۴
۳-۲-۳- هند ۵۵
۳-۲-۳- اسرائیل ۵۶
۳-۲-۳- زلاندنو ۵۶
۳-۲-۳- روسیه ۵۶
۳-۲-۳- ایالات‌متحده آمریکا ۵۶
۳-۳- استانداردهای دوچرخه برقی ۵۷
۳-۳-۳- استاندارد EN 15194 ..... ۵۷
۳-۳-۳- استاندارد LEVA ۶۳
۳-۴- تست و آزمایش موتور BLDC ۷۰
۳-۴-۳- ارزیابی عملکرد موتورهای BLDC کوچک و متوسط ۷۱
۳-۴-۳- تعیین مشخصه‌ها و پارامترهای موتور BLDC ۷۴
۳-۵- آزمون‌های استاندارد دوچرخه برقی ۸۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۱-۵-۳- تست جاده ۸۲
۲-۵-۳- تست عملکرد فرسودگی ۸۲
۳-۵-۳- تست شیب‌پیمایی ۸۲
۶-۳- جمع‌بندی ۸۴
فصل۴- امکان سنجی تامین مواد اولیه و قطعات ساخت و تست محصول نهایی در داخل کشور ۸۵
۱-۴- مقدمه ۸۵
۲-۴- تامین مواد اولیه الکتروموتور ۸۵
۱-۲-۴- ورق هسته ۸۵
۲-۲-۴- آهنربا ۱۰۲
۳-۲-۴- قطعات درایو ۱۱۶
۳-۴- تست دوچرخه برقی ۱۲۰
۴-۴- جمع‌بندی ۱۲۱
فصل۵- مشخصات فنی نهایی سیستم الکتروموتور BLDC و دوچرخه برقی ۱۲۳
۱-۵- مقدمه ۱۲۳
۲-۵- کاربرد و مشخصات کلی و ساختاری دو چرخه ۱۲۳
۳-۵- سیستم کنترلی دوچرخه برقی ۱۲۳
۴-۵- موقعیت قرارگیری موتور در دوچرخه برقی ۱۲۴
۵-۵- ترمز احیاکننده در طراحی دوچرخه برقی ۱۲۵
۶-۵- جمع‌بندی و انتخاب نهایی ۱۲۵
فصل۶- مطالعه طراحی موتور BLDC ۱۲۷
۱-۶- مقدمه ۱۲۷
۲-۶- الگوریتم طراحی الکتروموتور BLDC ۱۲۷
۳-۶- محدودیت‌های طراحی الکتروموتور هدف ۱۲۸
۴-۶- تعیین ساختار الکتروموتور به لحاظ محل قرارگیری روتور ۱۲۹
۵-۶- بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی ۱۳۰
۶-۶- طراحی روتور ۱۳۱
۱-۶-۶- تعیین آرایش و شکل آهنرباها بر روی روتور ۱۳۲
۲-۶-۶- تعیین تعداد قطب (تعداد آهنربا) روتور ۱۳۴
۳-۶-۶- تعیین ابعاد آهنربا ۱۳۴
۴-۶-۶- تعیین قطر روتور و یوغ آن ۱۳۵
۷-۶- طراحی استاتور ۱۳۶
۱-۷-۶- تعداد فاز استاتور ۱۳۶
۲-۷-۶- انتخاب تعداد شیار استاتور ۱۳۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۳-۷-۶- فاصله هوایی ۱۳۷
۴-۷-۶- قطر بیرونی استاتور ۱۳۷
۵-۷-۶- محاسبه یوغ استاتور ۱۳۷
۶-۷-۶- شکل شیارهای استاتور ۱۳۸
۷-۷-۶- محاسبات مربوط به ابعاد شیار ۱۳۸
۸-۷-۶- سیم‌پیچی استاتور ۱۴۰
۸-۶- جمع‌بندی ۱۴۳
فصل۷- طراحی، شبیه سازی و تحلیل یک نمونه ۵۰۰ واتی الکتروموتور BLDC ۱۴۵
۱-۷- مقدمه ۱۴۵
۲-۷- طراحی مفهومی الکتروموتور BLDC ۵۰۰واتی ۱۴۵
۱-۲-۷- گشتاور نامی الکتروموتور ۱۴۶
۲-۲-۷- سرعت نامی الکتروموتور ۱۴۶
۳-۲-۷- نوع سیم‌پیچی ۱۴۷
۴-۲-۷- انتخاب تعداد قطب و شیار مناسب ۱۴۷
۵-۲-۷- طراحی ابعاد روتور ۱۴۸
۶-۲-۷- طراحی ابعاد استاتور ۱۵۰
۷-۲-۷- تعیین دامنه موثر ولتاژ و جریان ۱۵۰
۸-۲-۷- محاسبه تعداد دور سیم‌پیچی ۱۵۱
۹-۲-۷- محاسبات مربوط به شیار استاتور ۱۵۴
۱۰-۲-۷- محاسبه یوغ استاتور ۱۵۵
۱۱-۲-۷- جمع‌بندی طراحی اولیه ۱۵۶
۳-۷- طراحی تفصیلی الکتروموتور BLDC ۵۰۰واتی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری ۱۵۶
۱-۳-۷- ولتاژ القائی یا Back-Emf ۱۵۹
۲-۳-۷- بررسی چگالی شار در آهنربا و فاصله هوایی ۱۵۹
۳-۳-۷- بررسی گشتاور دندانه‌ای ۱۶۰
۴-۳-۷- مشخصه‌های خروجی ماشین در حالت بار کامل ۱۶۱
۵-۳-۷- بهینه‌سازی موتور طراحی‌شده ۱۶۳
۶-۳-۷- دست‌یابی به توان طراحی با اعمال شیفت فاز ۱۷۳
۷-۳-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۷۶
۴-۷- تحلیل حرارتی الکتروموتور طراحی‌شده ۱۷۷

۷-۴-۱- حالت‌های عملکرد مختلف موتور ۱۷۸
۷-۴-۲- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد پیوسته (مود S3) ۱۷۹
۷-۴-۳- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد کوتاه‌مدت (مود S2) ۱۸۰
۷-۴-۴- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد متناوب (مود S3) ۱۸۱
۷-۵- نتیجه‌گیری ۱۸۲
فصل۸- شبیه‌سازی طرح بهینه الکتروموتور ۵۰۰ واتی در نرم افزار تحلیل مغناطیسی JMAG Designer ۱۸۳
۸-۱- مقدمه ۱۸۳
۸-۲- تحلیل موتور بهینه‌سازی شده در نرم افزار JMAG Designer ۱۸۳
۸-۲-۱- مشخصات موتور با طراحی بهینه ۱۸۳
۸-۲-۲- شبیه سازی حالت بی باری ۱۸۴
۸-۲-۳- شبیه سازی حالت دائمی تحت بار ۱۸۶
۸-۳- شبیه‌سازی الکتروموتور طراحی شده با تغییر نوع آهنربا ۱۹۲
۸-۳-۱- شبیه‌سازی حالت بیباری ۱۹۳
۸-۳-۲- شبیه‌سازی تحت بار ۱۹۵
۸-۳-۳- شبیه‌سازی حالت گذرا ۱۹۹
۸-۳-۴- نتیجه گیری ۲۰۰
فصل۹- پارامترها و مدل‌سازی ریاضی الکتروموتور BLDC جهت طراحی کنترل سیستم ۲۰۱
۹-۱- مقدمه ۲۰۱
۹-۲- اصول عملکردی الکتروموتورهای BLDC ۲۰۱
۹-۳- گشتاور ایجادشده در موتورهای BLDC و مشخصه گشتاور- سرعت آن ۲۰۳
۹-۴- مدار معادل و معادلات حاکم بر موتور BLDC ۲۰۶
۹-۵- اینورتر مورد استفاده در درایو موتور BLDC ۲۰۷
۹-۵-۱- روش‌های کنترل موتور BLDC ۲۰۸
۹-۵-۲ کنترل موتور BLDC در کاربرد دوچرخه برقی ۲۰۹
۹-۶- طراحی و ساخت درایو موتور BLDC در کاربرد دوچرخه الکتریکی ۲۱۶
۹-۶-۱- طراحی اینورتر ۲۱۶
۹-۶-۲- طراحی گیت‌درایور برای مبدل ۲۱۸
۹-۶-۳- طراحی مدار تغذیه ۲۱۹
۹-۶-۴- طراحی مدار سنسور جریان ۲۲۰
۹-۶-۵- میکروکنترلر ۲۲۱

۷-۹- جمع‌بندی ۲۲۱
فصل۱۰- بررسی و طراحی مجدد چندین طرح الکتروموتور ۵۰۰ و ۲۵۰ واتی بر پایه الگوریتم طراحی پیشین ۲۲۳
۱-۱۰- مقدمه ۲۲۳
۲-۱۰- محدودیتها و مفروضات طراحی ۲۲۳
۳-۱۰- گشتاور و سرعت نامی ۲۲۴
۴-۱۰- نوع سیم‌پیچی ۲۲۴
۵-۱۰- انتخاب تعداد قطب و شیار ۲۲۴
۶-۱۰- انتخاب ابعاد آهنربا ۲۲۵
۷-۱۰- طراحی اولیه ۲۲۶
۸-۱۰- طراحی تکمیلی ۲۳۲
۱-۸-۱۰- طرح-۱، ۵۰۰W ۲۳۲
۲-۸-۱۰- طرح-۲، ۵۰۰W ۲۳۵
۳-۸-۱۰- طرح-۳، ۵۰۰W ۲۳۸
۴-۸-۱۰- طرح-۴، ۵۰۰W ۲۴۰
۵-۸-۱۰- طرح-۵، ۵۰۰W ۲۴۳
۶-۸-۱۰- طرح-۶، ۲۵۰W ۲۴۶
۹-۱۰- نتیجه‌گیری ۲۵۵
فصل۱۱- نقشه‌های ساخت موتور BLDC و PCB درایو آن ۲۵۶
۱-۱۱- مقدمه ۲۵۶
۲-۱۱- موتور ۲۵۶
۱-۲-۱۱- یوغ روتور ۲۵۸
۲-۲-۱۱- یوغ استاتور ۲۶۰
۳-۲-۱۱- حلقه میانی ۲۶۱
۴-۲-۱۱- شفت و متعلقات آن ۲۶۲
۵-۲-۱۱- محفظه نگهدارنده الکتروموتور BLDC ۲۶۳
۳-۱۱- درایو ۲۶۵
۴-۱۱- جمع‌بندی ۲۶۷
فصل۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۶۸
پیوست ۱ ۲۷۱
مراجع ۲۸۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱-۱: دوچرخه کوهستانی ۳
شکل ۱-۲: دوچرخه برقی جاده ۴
شکل ۱-۳: دوچرخه هیبریدی ۵
شکل ۱-۴: دوچرخه شهری ۶
شکل ۱-۵: نمای دوچرخه تاشوی کامپکت ۷
شکل ۱-۶: دوچرخه pedelec ۹
شکل ۱-۷: توان موتور الکتریکی و انسان در pedelec ۹
شکل ۱-۸: دوچرخه PDB ۱۲
شکل ۱-۹: موقعیت قرارگیری موتور- الف) در هاب چرخ، ب) Mid-Drive ۱۳
شکل ۱-۱۰: موقعیت قرارگیری موتور در دوچرخه برقی Mid-Drive ۱۴
شکل ۱-۱۱: دو طراحی متفاوت از موتور کرنک ۱۴
شکل ۱-۱۲: دوچرخه برقی با موتور Mid-Drive با تسمه ۱۵
شکل ۱-۱۳: محفظه موتور در هاب چرخ ۱۷
شکل ۱-۱۴: موتور در هاب مستقل از زنجیر ۱۷
شکل ۱-۱۵: محل قرارگیری موتور در هاب چرخ، الف) چرخ عقب و ب) چرخ جلو ۱۸
شکل ۱-۱۶: فریم یک دوچرخه ۱۸
شکل ۱-۱۷: موتور DD ۲۰
شکل ۱-۱۸: موتور با گیربکس سیاره‌ای ۲۱
شکل ۲-۱: برش عرضی موتور BLDC ۲۴
شکل ۲-۲: دیاگرام کنترل موتور BLDC ۲۴
شکل ۲-۳: سنسور Garmin GSC10 ..... ۲۵
شکل ۲-۴: سنسور توپی تنه به نام X-Cell RT ۲۶
شکل ۲-۵: الف) سنسور TMM4- ب) سنسور TMM4 در دوچرخه ۲۷
شکل ۲-۶: موتور در هاب شرکت BionX سری D ۲۷
شکل ۲-۷: سنسور دوقلو شرکت ST Suntour ۲۸
شکل ۲-۸: سنسور سنجش فنری شرکت Stromer ۲۸
شکل ۲-۹: الف) سنسور اثر هال سه پایه- ب) سنسور اثر هال در موتور دوچرخه ۲۹
شکل ۲-۱۰: تراتل و سنسور هال ۲۹
شکل ۲-۱۱: پروفیل ولتاژ خروجی سنسور اثر هال تراتل ۲۹
شکل ۲-۱۲: تراتل دکمه‌ای ۳۰
شکل ۲-۱۳: تراتل شستی ۳۱

شکل ۱۴-۲: تراتل تمام پیچشی ۳۱
شکل ۱۵-۲: تراتل نیمه پیچشی ۳۲
شکل ۱۶-۲: اتصال کنترل‌کننده به اجزای دوچرخه برقی ۳۳
شکل ۱۷-۲: دیاگرام بلوکی درایو چرخ بصورت هیبریدی موازی ۳۳
شکل ۱۸-۲: کنترل‌کننده دوچرخه برقی شرکت Bafang ۳۵
شکل ۱۹-۲: مثال محاسبه درصد شیب ۳۹
شکل ۲۰-۲: دوچرخه کاتالینا ۴۸ ولت ۵۰۰ وات ۴۱
شکل ۲۱-۲: سناریو وزن دوچرخه ۴۴
شکل ۲۲-۲: نیروهای وارده بر مجموعه دوچرخه و دوچرخه‌سوار ۴۵
شکل ۲۳-۲: نمایش دو نمونه سطح مؤثر برخورد هوا با دوچرخه و موتورسیکلت ۴۶
شکل ۲۴-۲: مشخصه نیروهای مقاوم وارده بر دوچرخه بر حسب سرعت حرکت ۴۷
شکل ۲۵-۲: مشخصه بار دوچرخه در شیب‌های مختلف و مشخصه توان ۵۰۰ وات ۴۸
شکل ۲۶-۲: مشخصه بار دوچرخه در شیب‌های مختلف و دو مشخصه الکتروموتور با توان ۵۰۰ وات ۴۹
شکل ۲۷-۲: مشخصه بار دوچرخه برای وزن‌های مختلف دوچرخه‌سوار در شیب ۷ درصد ۴۹
شکل ۱-۳: استانداردهای تعیین‌شده توسط LEVA برای انواع دوچرخه‌های برقی ۶۴
شکل ۲-۳: نیمکت آزمایش ۶۵
شکل ۳-۳: میز آزمایش غیرخطی تست موتور BLDC ۷۰
شکل ۴-۳: پیکربندی بستر اپشتاین ۷۵
شکل ۵-۳: پاسخ پله گشتاور در حالت ثابت ۷۹
شکل ۶-۳: آزمایش ریپل گشتاور ۸۰
شکل ۷-۳: دستگاه آزمایش ریپل گشتاور ۸۰
شکل ۸-۳: نمونه‌ای از پایه تست دوچرخه برقی ۸۱
شکل ۹-۳: شماتیک کلی دوچرخه برقی مورد آزمایش ۸۲
شکل ۱-۴: تغییر مشخصات مغناطیسی براثر آنیلینگ برای دو ورق متفاوت a- 50CS470 b-50CS1300 ..... ۸۷
شکل ۲-۴: مقایسه حلقه هیسترزیس مواد نرم (سبز) و سخت مغناطیسی (صورتی) ۸۸
شکل ۳-۴: بستر تست اپشتاین ۹۰
شکل ۴-۴: نحوه قرارگیری نمونه ورق‌های مغناطیسی در بستر اپشتاین ۹۰
شکل ۵-۴: شمای کلی و اندازه‌های بستر اپشتاین ۹۱
شکل ۶-۴: پیکربندی بستر اپشتاین ۹۱
شکل ۷-۴: ورق فولاد کربن گیری شده ساخت شرکت الکتروموتور بلال الف- تک ورق ب- آرایش ورق ها برای تست اپشتاین ۹۴
شکل ۸-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۵۰ هرتز ۹۶

شکل ۹-۴: منحنی تلفات هسته برحسب چگالی شار در فرکانس ۵۰ هرتز ۹۷
شکل ۱۰-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار ۵۰ هرتز ۹۷
شکل ۱۱-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۹۰ هرتز ۹۸
شکل ۱۲-۴: منحنی تلفات توان هسته برحسب چگالی شار در فرکانس ۹۰ هرتز ۹۹
شکل ۱۳-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار در فرکانس ۹۰ هرتز ۹۹
شکل ۱۴-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۱۰۰ هرتز ۱۰۱
شکل ۱۵-۴: تغییرات تلف‌شده برحسب چگالی شار در فرکانس ۱۰۰ هرتز ۱۰۱
شکل ۱۶-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار در فرکانس ۱۰۰ هرتز ۱۰۲
شکل ۱۷-۴: منحنی هیسترزیس برای یک آهنربای دائم ۱۰۳
شکل ۱۸-۴: فلوچارت تولید آهنربای فریتی ۱۰۵
شکل ۱۹-۴: وزن و ترکیب پودر آهن و دیگر مواد اولیه ۱۰۵
شکل ۲۰-۴: گندله‌سازی از پودر آهن و افزودنی‌ها ۱۰۶
شکل ۲۱-۴: پیش تف‌جوشی ۱۰۶
شکل ۲۲-۴: آسیاب گلوله‌ای پودر پیش-تف¬جوشی ۱۰۷
شکل ۲۳-۴: قالب‌گیری آهنربا ۱۰۸
شکل ۲۴-۴: مراحل ساخت نگهدارنده ۱۰۹
شکل ۲۵-۴: مدار معادل نگهدارنده ۱۰۹
شکل ۲۶-۴: الگوی مغناطیس‌شوندگی آهنربا ۱۱۱
شکل ۱-۵: قرارگیری موتور در دوچرخه: الف) در چرخ جلو، ب) در وسط و ج) در چرخ عقب ۱۲۴
شکل ۱-۶: فلوچارت طراحی کلی موتور BLDC ۱۲۸
شکل ۲-۶: ساختار موتور الف- روتور بیرونی و ب- موتور روتور درونی ۱۳۰
شکل ۳-۶: انواع آرایش آهنربای دائم الکتروموتور الف- ساختار دفنی محوری ب- ساختار سطحی بیرونی ج- ساختار دفنی شعاعی د- ساختار سطحی درونی ۱۳۲
شکل ۴-۶: نمایش ابعاد کلی الکتروموتور BLDC هدف طراحی ۱۳۵
شکل ۵-۶: انواع شکل شیار استاتور ماشین‌های الکتریکی ۱۳۸
شکل ۶-۶: شمای تقریبی شیار و دندانه استاتور و فاصله هوایی ۱۳۸
شکل ۷-۶: پارامترهای ابعادی دقیق شکل شیار انتخابی ۱۳۹
شکل ۸-۶: موتور BLDC با سیم‌پیچی متمرکز و شار ذوزنقه‌ای ۱۴۱
شکل ۹-۶: نحوه قرارگیری آهنرباها بر روی روتور ۱۴۲
شکل ۱-۷: گام قطب و قوس قطب برای یک موتور با روتور درونی ۱۴۹
شکل ۲-۷: نحوه سیم‌پیچی دندانه‌های مجاور در یک فاز ۱۵۳
شکل ۳-۷: شکل سیم‌بندی موتور ۱۵۵

شکل ۴-۷: (الف) نمای دوبعدی موتور BLDC با ۶۳ شیار و ۷۰ قطب و (ب) شکل مش‌بندی اجزاء موتور ۱۵۷
شکل ۵-۷: مشخصه گشتاور سرعت موتور ۱۵۸
شکل ۶-۷: مشخصه توان خروجی بر حسب سرعت موتور ۱۵۸
شکل ۷-۷: دامنه موثر ولتاژ القائی سیم‌پیچی سه‌فاز استاتور در حالت بی‌باری ۱۵۹
شکل ۸-۷: چگالی شار آهنرباهای دائمی روتور در حالت بی‌باری ۱۵۹
شکل ۹-۷: چگالی شار فاصله هوایی روتور در حالت بی‌باری ۱۶۰
شکل ۱۰-۷: شکل موج گشتاور دندانه‌ای ۱۶۰
شکل ۱۱-۷: شکل موج گشتاور خروجی ۱۶۱
شکل ۱۲-۷: توان خروجی موتور در سرعت نامی ۱۶۲
شکل ۱۳-۷: (الف) توزیع چگالی شار در هسته و (ب) مسیر عبور شار در هسته ۱۶۳
شکل ۱۴-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب تغییرات دهانه شیار ۱۶۴
شکل ۱۵-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب تغییرات ارتفاع شیار ۱۶۵
شکل ۱۶-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب دو پارامتر Bso و Hs2 ..... ۱۶۵
شکل ۱۷-۷: شکل موج گشتاور خروجی ۱۶۶
شکل ۱۸-۷: تغییرات ریپل گشتاور بر حسب تغییرات طول و عرض دهانه شیار ۱۶۶
شکل ۱۹-۷: منحنی سه‌بعدی تغییرات ریپل گشتاور ۱۶۶
شکل ۲۰-۷: مقادیر گشتاور دندانه‌ای بر حسب Embrace های مختلف ۱۶۸
شکل ۲۱-۷: شکل موج گشتاور دندانه‌ای ۱۶۸
شکل ۲۲-۷: شکل موج گشتاور خروجی ۱۶۹
شکل ۲۳-۷: شکل موج گشتاور خروجی ۱۷۲
شکل ۲۴-۷: شکل موج جریان خروجی ۱۷۲
شکل ۲۵-۷: توزیع چگالی شار در هسته ۱۷۲
شکل ۲۶-۷: توزیع چگالی شار در دندانه‌های استاتور ۱۷۳
شکل ۲۷-۷: شکل موج جریان و ولتاژ ضدمحرکه در حالت بدون اعمال شیفت فاز و پس از اعمال آن ۱۷۳
شکل ۲۸-۷: منحنی‌های گشتاور سرعت به ازای شیفت فازهای مختلف ۱۷۴
شکل ۲۹-۷: شکل موج جریان و ولتاژ در حالت شیفت فاز ۴۰ درجه ۱۷۴
شکل ۳۰-۷: منحنی گشتاور سرعت با شیفت فاز صفر تا ۳۰ درجه ۱۷۵
شکل ۳۱-۷: مشخصه گشتاور-سرعت با شیفت فاز ۳۰ درجه ۱۷۵
شکل ۳۲-۷: منحنی توان خروجی موتور ۱۷۶
شکل ۳۳-۷: نمای رو به روی الکتروموتور در نرم‌افزار MotorCAD ۱۷۸
شکل ۳۴-۷: نمای جانبی الکتروموتور در نرم‌افزار MotorCAD ۱۷۸
شکل ۳۵-۷: مدار معادل الکتروموتور ۱۷۹

شکل ۳۶-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی S1 ..... ۱۸۰
شکل ۳۷-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی S2 ..... ۱۸۱
شکل ۳۸-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی S3 ..... ۱۸۲
شکل ۱-۸: شکل موج ولتاژ القایی فازها در حالت بی باری ۱۸۴
شکل ۲-۸: شکل موج گشتاور دندانهای ۱۸۵
شکل ۳-۸: شکل موج چگالی شار فاصله هوایی در حالت بی باری ۱۸۵
شکل ۴-۸: شکل موج چگالی شار آهنربا ۱۸۵
شکل ۵-۸: شکل موج‌های تئوری عملکرد الکتروموتور BLDC ۱۸۶
شکل ۶-۸: شکل موج ایدهآل جریان ورودی استاتور ۱۸۷
شکل ۷-۸: شکل موج ولتاژ خط در حالت جریان ایدهآل ورودی ۱۸۷
شکل ۸-۸: شکل موج گشتاور خروجی با جریان ایدهال ورودی ۱۸۸
شکل ۹-۸: شماتیک مدار کنترلی الکتروموتور شبیهسازی شده ۱۸۸
شکل ۱۰-۸: شکل موج گشتاور خروجی در حالت تغذیه با منبع ولتاژ و کنترل جریان ۱۸۹
شکل ۱۱-۸: شکل موج جریان سیمپیچهای استاتور ۱۸۹
شکل ۱۲-۸: منحنی مغناطیس زدایی آهنربای فریتی در دماهای مختلف ۱۹۰
شکل ۱۳-۸: شکل موج جریان فازهای استاتور با حداکثر ۳۱A ۱۹۰
شکل ۱۴-۸: شکل موج ولتاژ ترمینالهای استاتور ۱۹۱
شکل ۱۵-۸: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور در دمای عملکرد و جریانهای مختلف ۱۹۲
شکل ۱۶-۸: چگالی شار آهنربا Y35 در حالت بی باری ۱۹۴
شکل ۱۷-۸: شکل موج چگالی شار فاصله هوایی موتور در حالت بی باری با آهنربای Y35 ..... ۱۹۴
شکل ۱۸-۸: شکل موج گشتاور دندانهای ۱۹۵
شکل ۱۹-۸: شکل موج ولتاژ القایی فازهای مختلف در سرعت بیباری ۳۳۷rpm ۱۹۵
شکل ۲۰-۸: شکل موج جریان فازهای استاتور در سرعت نامی ۱۹۶
شکل ۲۱-۸: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور در سرعت نامی ۱۹۶
شکل ۲۲-۸:توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در هسته ۱۹۷
شکل ۲۳-۸: مشخصه گشتاور-سرعت الکتروموتور با آهنربای تغییر یافته ۱۹۸
شکل ۲۴-۸: مشخصه توان-سرعت الکتروموتور با آهنربای تغییر یافته ۱۹۸
شکل ۲۵-۸: نمودار تغییرات جریان فاز استاتور و جریان لینک DC بر حسب روتور ۱۹۹
شکل ۲۶-۸: نمودار تغییرات تلفات هسته و تلفات مسی بر حسب سرعت ۱۹۹
شکل ۲۷-۸: الف) شکل موج گشتاور خروجی گذرا، ب) شکل موج سرعت زاویهای روتور در حالت گذرا، ج) شکل موج جریان فاز a استاتور در حالت گذرا ۲۰۰
شکل ۱-۹: ترتیب عملکرد سنسورهای اثر هال برای عمل کموتاسیون در موتور BLDC ۲۰۲

شـــکل ۲-۹: الف) شـــکل موج شـــار پیوندی و ولتاژ القایی در ســـیم‌پیچی موتور BLDC ب) نمایش القای ولتاژ در سیم‌پیچی استاتور موتور BLDC با چرخش روتور با فرض دو قطبی‌بودن ماشین ۲۰۲
شکل ۳-۹: شکل موج‌های تئوری عملکرد الکتروموتور BLDC ۲۰۳
شکل ۴-۹: نمودار گشتاور سرعت موتور BLDC ۲۰۵
شکل ۵-۹: مشخصه گشتاور سرعت موتور BLDC برای انواع بار ۲۰۶
شکل ۶-۹: مدار معادل موتور BLDC سه‌فاز ۲۰۶
شکل ۷-۹ اینورتر تمام موج برای موتور BLDC ۲۰۷
شکل ۸-۹ درایو موتور BLDC به روش الف) کنترل جریان لینک dc ب) کنترل مستقیم جریان فازها ۲۰۸
شکل ۹-۹ تغییرات گشتاور و جریان فازها در روش الف) کنترل جریان لینک dc ب) کنترل جریان فازها ۲۰۹
شـــکل ۱۰-۹: نمایش برداری کنترل MTPA موتور BLDC با توجه به محدودیت‌های موتور و درایو و مشـــخصـــه باردوچرخه. ۲۱۲
شکل ۱۱-۹: دیاگرام کلی روش کنترلی الکتروموتور BLDC دوچرخه برقی ۲۱۴
شکل ۱۲-۹ : الف) ولتاژهای ضد محرکه و سیگنال‌های خروجی سنسورهای اثر هال سه فاز ب) شکل موج‌های هم‌فاز با جریان‌های سه فاز موتور BLDC ۲۱۵
شکل ۱۳-۹ کنترل‌کننده هیسترزیس جریان برای کنترل موتور BLDC ۲۱۶
شکل ۱۴-۹: شماتیک مدار مبدل موتور BLDC ۲۱۷
شکل ۱۵-۹: شماتیک مدار گیت‌درایور برای یک ساق مبدل ۲۱۹
شکل ۱۶-۹: مدار رگولاتور LM2576 ..... ۲۱۹
شکل ۱۷-۹: شماتیک مدار تغذیه برای ایجاد سطوح ولتاژ ۵ و ۳.۳ ولت ۲۲۰
شکل ۱۸-۹: مدار سنسور جریان ۲۲۰
شکل ۱۹-۹: میکروکنترلر استفاده‌شده در درایور موتور BLDC ۲۲۱
شکل ۱-۱۰: نمایی از نرم افزار طراحی ماشین JMAG Express ۲۲۶
شکل ۲-۱۰: مشخصههای طراحی اولیه موتور طرح-۱ ..... ۲۲۹
شکل ۳-۱۰:مشخصههای طراحی اولیه موتور طرح-۲ ..... ۲۲۹
شکل ۴-۱۰:مشخصههای طراحی اولیه موتور طرح-۳ ..... ۲۳۰
شکل ۵-۱۰:مشخصههای طراحی اولیه موتور طرح-۴ ..... ۲۳۰
شکل ۶-۱۰: مشخصه¬های طراحی اولیه موتور طرح-۵ ..... ۲۳۱
شکل ۷-۱۰ : مشخصههای طراحی اولیه موتور طرح-۶ ..... ۲۳۱
شکل ۸-۱۰: الف) نمای دو بعدی طرح-۱ با ۶۰ قطب و ۵۴ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۱ ..... ۲۳۲
شـکل ۹-۱۰:شـکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشـتاور دندانهای، ج) چگالی شـار فاصـله هوایی مربوط به طرح-۱ ..... ۲۳۳
شکل ۱۰-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریانهای استاتور الکتورموتور طرح-۱ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۳۴

شکل ۱۱-۱۰: مشخصههای الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۱ ..... ۲۳۴
شکل ۱۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۱ ..... ۲۳۵
شکل ۱۳-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۲ با ۸۰ قطب و ۷۵ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۲..... ۲۳۵
شکل ۱۴-۱۰:شکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانهای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۲.....۲۳۶
شکل ۱۵-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریان¬های استاتور الکتورموتور طرح-۱ در سرعت rpm160 ..... ۲۳۷
شکل ۱۶-۱۰:مشخصههای: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۲ ..... ۲۳۷
شکل ۱۷-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۲ ..... ۲۳۸
شکل ۱۸-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۳..... ۲۳۸
شکل ۱۹-۱۰:شکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانهای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۳..... ۲۳۹
شکل ۲۰-۱۰: شکل موج: الف) گشتاور خروجی و ب)جریانهای استاتور الکتورموتور طرح-۳ در سرعت ۲۳۹۱۶۰rpm
شکل ۲۱-۱۰:مشخصههای: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۳..... ۲۴۰
شکل ۲۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۳..... ۲۴۰
شکل ۲۳-۱۰: الف) نمای دو بعدی طرح-۱ با ۶۰ قطب و ۵۴ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۱ ..... ۲۴۱
شکل ۲۴-۱۰:شکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانهای، ج) چگالی شار فاصله هوایی مربوط به طرح-۴ ..... ۲۴۲
شکل ۲۵-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریان¬های استاتور الکتورموتور طرح-۱ در سرعت rpm160 ..... ۲۴۲
شکل ۲۶-۱۰:مشخصههای: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۴..... ۲۴۳
شکل ۲۷-۱۰:توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۴ ..... ۲۴۳
شکل ۲۸-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۵..... ۲۴۴
شکل ۲۹-۱۰:شکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانهای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۵..... ۲۴۵
شکل ۳۰-۱۰: شکل موج: الف) گشتاور خروجی و ب)جریانهای استاتور الکتورموتور طرح-۵ در سرعت ۲۴۵۱۶۰rpm
شکل ۳۱-۱۰:مشخصههای: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۲.....۲۴۶
شکل ۳۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۵.....۲۴۶
شکل ۳۳-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مشبندی قطاعی از طرح-۶..... ۲۴۷
شکل ۳۴-۱۰: شکل موجهای: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانهای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۶ ..... ۲۴۸
شکل ۳۵-۱۰: توزیع چگالی شار مغناطیسی در الکتروموتور طرح-۶..... ۲۴۸
شکل ۳۶-۱۰: شکل موج گشتاور خروجی الکتورموتور طرح-۱ در سرعت ۱۲۰rpm..... ۲۴۹
شکل ۳۷-۱۰: شکل موج جریان فازهای استاتور الکتروموتور طرح-۶..... ۲۴۹
شکل ۳۸-۱۰: تغییرات متوسط گشتاور خروجی بر حسب دو پارامتر عرض و ارتفاع دهانه شیار ۲۵۰
شکل ۳۹-۱۰: تغییرات ریپل گشتاور خروجی بر حسب دو پارامتر عرض و ارتفاع دهانه شیار ۲۵۱

شکل ۴۰-۱۰: مشخصه نهایی گشتاور-سرعت الکتروموتور طرح-۶ ۲۵۲
شکل ۴۱-۱۰: مشخصه نهایی توان-سرعت الکتروموتور طرح-۶ ۲۵۲
شکل ۴۲-۱۰: مشخصه تغییرات جریان فاز استاتور بر حسب سرعت الکتروموتور طرح -۶ ۲۵۳
شکل ۴۳-۱۰: مشخصه تغییرات جریان لینک DC بر حسب سرعت الکتروموتور طرح -۶ ۲۵۳
شکل ۴۴-۱۰: الف) تلفات مسی، ب) تلفات هسته الکتروموتور طرح-۶ ۲۵۴
شکل ۴۵-۱۰: نمودار بازده بر حب سرعت الکتروموتور طرح-۶ ۲۵۴
شکل ۴۶-۱۰: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۵rpm ۲۵۴
شکل ۴۷-۱۰: شکل موج جریان فازهای استاتور الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۵rpm ۲۵۵
شکل ۱-۱۱: ابعاد قسمت الکترومغناطیسی موتور ۲۵۶
شکل ۲-۱۱: شماتیک دو بعدی و سه بعدی الکتروموتور BLDC ۲۵۷
شکل ۳-۱۱: شماتیک انفجاری موتور BLDC ۲۵۷
شکل ۴-۱۱: دیاگرام سیم‌پیچی الکتروموتور ۲۵۸
شکل ۵-۱۱: یوغ روتور : الف) شماتیک در نرم افزار، ب) نقشه ساخت یوغ روتور و ج) یوغ روتور همراه با جایگزاری آهنرباها ۲۶۰
شکل ۶-۱۱: نقشه ساخت یوغ استاتور موتور BLDC طراحی شده ۲۶۰
شکل ۷-۱۱: الف) شماتیک و ب) نقشه ساخت حلقه میانی ۲۶۱
شکل ۸-۱۱: نقشه ساخت شفت الکتروموتور طراحی شده ۲۶۲
شکل ۹-۱۱: شماتیک شفت و نحوه قرارگیری بیرینگ ها ۲۶۲
شکل ۱۰-۱۱: مسیر کابل در شفت ۲۶۳
شکل ۱۱-۱۱: دنده بر روی شفت الکتروموتور BLDC ۲۶۳
شکل ۱۲-۱۱: الف)شماتیک و ب) نقشه ساخت محفظه راست ۲۶۴
شکل ۱۳-۱۱: الف)شماتیک و ب) نقشه ساخت محفظه چپ ۲۶۵
شکل ۱۴-۱۱: شماتیک PCB طراحی شده برای مبدل موتور BLDC ۲۶۶
شکل ۱۵-۱۱: تصویر PCB چاپ شده برای مبدل موتور BLDC (روی برد) ۲۶۶
شکل ۱۶-۱۱: تصویر PCB چاپ شده برای مبدل موتور BLDC (پشت برد) ۲۶۶
شکل ۱۷-۱۱: تصویر برد مبدل موتور BLDC بعد از مونتاژ قطعات ۲۶۷
شکل ۱-۱۲: دوچرخه برقی نسل سوم آگونا AGONA Grizzly ۲۷۱
شکل ۲-۱۲: دوچرخه برقی آگونا AGONA Patrol ۲۷۲
شکل ۳-۱۲: دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس ۲۷۳
شکل ۴-۱۲: دوچرخه شهری سبک ۲۷۴
شکل ۵-۱۲: دوچرخه برقی AMP6006 ۲۷۵
شکل ۶-۱۲: دوچرخه مدل AMP5003 ۲۷۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۷-۱۲: دوچرخه برقی AMP5002 ..... ۲۷۷
شکل ۸-۱۲: دوچرخه برقی AMP5001 ..... ۲۷۸
شکل ۹-۱۲: دوچرخه برقی AMP6004 ..... ۲۷۹
شکل ۱۰-۱۲: دوچرخه برقی AMP6001 ..... ۲۸۱

فهرست جداول

صفحه

جدول ۱-۱: مقایسه دوچرخه‌های برقی با موتور در هاب چرخ عقب و جلو ۱۹
جدول ۲-۱: مزایا و معایب موتورهای DD و گیربکس‌دار ۲۱
جدول ۱-۲: مقایسه‌ی موتورهای Dc همراه با جاروبک و بدون جاروبک ۲۴
جدول ۲-۲: مقایسه تولیدکنندگان مختلف موتورهای دوچرخه برقی و کنترل‌کننده‌ها ۳۵
جدول ۱-۳: استاندارد دوچرخه‌های برقی در دنیا ۵۷
جدول ۲-۳: انتخاب سنسورهای مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش ۷۰
جدول ۳-۳: افزایش درجه حرارت ۷۲
جدول ۴-۳: تغییرات سرعت ۷۲
جدول ۵-۳: درصد تغییرات سرعت پایه نامی ۷۳
جدول ۶-۳: حد لرزش فیلترنشده برحسب استاندارد NEMA ۷۴
جدول ۷-۳: مقادیر مختلف ثابت k به ازای واحد گشتاور ۷۸
جدول ۸-۳: دمای موردنیاز برای تصحیح مقدار مقاومت سیم‌پیچ‌ها ۷۸
جدول ۱-۴: حداکثر تلفات آهنی مجاز ورق فولادی نیمه آماده مطابق استاندارد۶۰۴۰۴-۸-۳ IEC ۹۲
جدول ۲-۴: حداکثر تلفات آهنی مجاز ورق‌های فولادی کاملاً آماده مطابق استاندارد IEC 60404-8-4 ۹۳
جدول ۳-۴: نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار مختلف ۹۵
جدول ۴-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱/۵ تسلا ۹۶
جدول ۵-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۵۰ هرتز ۹۷
جدول ۶-۴ : نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۹۰ هرتز و چگالی شار مختلف ۹۷
جدول ۷-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۹۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱/۵ تسلا ۹۸
جدول ۸-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۹۰ هرتز ۹۹
جدول ۹-۴: نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۱۰۰ هرتز و مقادیر مختلف چگالی شار ۹۹
جدول ۱۰-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۱۰۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱.۵ تسلا ۱۰۰
جدول ۱۱-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۱۰۰ هرتز ۱۰۱
جدول ۱۲-۴: مرجع استاندارد ورق کربنی تولید شرکت فولاد مبارکه اصفهان ۱۰۲
جدول ۱۳-۴: مشخصات تولید آهنربای فریتی – دانشگاه مالک اشتر ۱۱۳
جدول ۱۴-۴: خواص مغناطیسی آهنربای فریتی- دانشگاه مالک اشتر ۱۱۳
جدول ۱۵-۴: خواص فیزیکی آهنربای تبادلی ارتجاعی فریتی- دانشگاه مالک اشتر ۱۱۴
جدول ۱-۵: مشخصات ساختاری دوچرخه ۱۲۳
جدول ۲-۵: انتخاب موتور بر اساس موقعیت آن در دوچرخه ۱۲۴
جدول ۳-۵: مشخصات فنی نهایی دوچرخه طراحی‌شده ۱۲۶
جدول ۱-۶: رابطه طول و گام قطب ماشین ۱۲۹
جدول ۲-۶: محدوده بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی ۱۳۱
جدول ۱-۷: محدودیت‌های طراحی موتور ۱۴۶
جدول ۲-۷: پارامترهای طراحی اولیه الکتروموتور موتور BLDC ۱۵۶
جدول ۳-۷: مشخصات خروجی طراحی اولیه ۱۵۷

جدول ۴-۷: مشخصات موتور بهینه‌سازی‌شده با Embrace =۰/۶۶ ..... ۱۶۶
جدول ۵-۷: مشخصات بهینه‌شده طرح با Embrace=۰/۸ ..... ۱۶۹
جدول ۶-۷: مشخصات بهینه‌شده طراحی با Embrace=۰/۹۷ ..... ۱۷۰
جدول ۷-۷: مقایسه سه طرح شبیه‌سازی‌شده ۱۷۱
جدول ۸-۷: مشخصات نهایی موتور ۱۷۶
جدول ۹-۷: دمای قسمت‌های مختلف الکتروموتور طی عملکرد پیوسته ۱۷۹
جدول ۱۰-۷: دمای قسمت‌های مختلف موتور طی عملکرد کوتاه‌مدت ۱۸۰
جدول ۱-۸: مشخصات بهینه‌شده طرح با Embrace=۰/۸ ..... ۱۸۳
جدول ۲-۸: مشخصات خروجی الکتروموتور بهینه سازی شده از نرم افزار JMAG Designer ۱۹۱
جدول ۳-۸: مشخصات خروجی الکتروموتور در دمای عملکرد و جریانهای مختلف ۱۹۲
جدول ۴-۸: مشخصات مغناطیسی آهنربای فریتی گرید Y35 ..... ۱۹۳
جدول ۵-۸: مشخصههای خروجی الکتروموتور با آهنربای تغییر یافته در سرعت نامی ۱۹۶
جدول ۱-۱۰: قیود جدید طراحی الکتروموتور ۲۲۳
جدول ۲-۱۰: مشخصات تعداد قطبها و شیارهای طرحهای مختلف ۲۲۵
جدول ۳-۱۰: مشخصات برخی از آهنرباهای موجود در بازار ۲۲۵
جدول ۴-۱۰:مشخصات ابعاد اولیه طرحهای مختلف ۲۲۷
جدول ۵-۱۰: مشخصات الکتریکی اولیه طرحهای مختلف ۲۲۸
جدول ۶-۱۰:مشخصات اولیه عملکرد طرحهای مختلف در سرعت rpm160 ..... ۲۲۸
جدول ۷-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۱ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۳۴
جدول ۸-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۲ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۳۷
جدول ۹-۱۰:اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۳ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۳۹
جدول ۱۰-۱۰:اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۴ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۴۲
جدول ۱۱-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۵ در سرعت ۱۶۰rpm ۲۴۵
جدول ۱۲-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۰rpm ۲۴۹
جدول ۱۳-۱۰: ابعاد و مشخصات نهایی الکتروموتور طرح-۶ ..... ۲۵۱
جدول ۱۴-۱۰: مشخصات عملکرد نامی الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۵rpm ۲۵۴
جدول ۱-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی نسل سوم آگونا ۲۷۱
جدول ۲-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی آگونا پاترول ۲۷۲
جدول ۳-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس ۲۷۳
جدول ۴-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری سبک AMP2001 ..... ۲۷۴
جدول ۵-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی کلاسیک-AMP6006 ..... ۲۷۶
جدول ۶-۱۲: مشخصات دوچرخه شهری مدرن- AMP5003 ..... ۲۷۷
جدول ۷-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5002 ..... ۲۷۸
جدول ۸-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5001 ..... ۲۷۹
جدول ۹-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری مدرن – AMP6004 ..... ۲۸۰
جدول ۱۰-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری مدرن - AMP6001 ..... ۲۸۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مقدمه

پروژه حاضر با هدف اکتساب دانش فنی طراحی الکتروموتورهای BLDC دوچرخه برقی با استفاده از مواد ارزان‌قیمت تولید داخل تعریف شده است که شامل جمع‌آوری اطلاعات اولیه، طراحی مفهومی الکتروموتور، مدل‌سازی و شبیه‌سازی و تصحیح مدل، ساخت و صحت‌سنجی آن بر اساس استانداردهای مربوطه است.

در مرحله اول و دوم پروژه طراحی الکتروموتور برای دوچرخه برقی، یک الکتروموتور BLDC با توان ۵۰۰ وات، با در نظر گرفتن امکان استحصال مواد اولیه در داخل کشور، با استفاده از آهن‌ربای فریتی و ورقه‌های کربنی طراحی و تحلیل شده است. در بهینه‌سازی طراحی به منظور کاهش گشتاور دندانه¬ای و به دنبال آن ریپل گشتاور، چندین پارامتر از جمله ارتفاع و عرض دهانه شیار و نسبت کمان قطب به گام قطب به عنوان خروجی در نظر گرفته و در نهایت یک طرح به عنوان طرح بهینه انتخاب شده است.

در مرحله سوم به منظور بررسی و تایید صحت طرح بهینه، الکتروموتور طراحی شده در یک نرم افزار تحلیل مغناطیسی دیگر مدلسازی و تحلیل شده است. در این تحلیل مشخص شده است که در طراحی اولیه برخی پارامترها همچون دمای آهن‌ربا در نظر گرفته نشده است که این امر موجب کاهش گشتاور تولیدی و در نتیجه توان خروجی الکتروموتور می‌شود. همچنین با توجه به مقدار جریان حداکثر ۳۳ آمپر برای الکتروموتور، دستیابی به توان ۵۰۰ وات در جریان کمتر از این مقدار امکان پذیر نمی‌باشد.

با توجه به محدودیت درایو و جریان باتری، با افزایش قطر خارجی و طول محوری چندین طرح مختلف با توان ۵۰۰ وات و منبع ولتاژ ۴۸ ولت و یک طرح با توان ۲۵۰ وات، منبع ولتاژ ۳۶ ولت ارائه شده است. رفتار هر یک در حالت بی باری و تحت بار اختصاص یافته و بررسی شده‌اند و در نهایت طرح شماره ۱ از بین این ۶ طراحی جدید به عنوان طرح معقول و دارای بازده مناسب معرفی گردید. در ادامه نقشه‌های ساخت موتور BLDC طراحی شده و PCB درایو آن ارائه گردیده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۱- انواع دوچرخه برقی و فن‌آوری مربوط به آن

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر دوچرخه‌های برقی به جهت ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود در سراسر جهان بیشتر از پیش مورد استقبال قرار گرفته‌اند. اولین آزمایش‌ها و اقدامات برای ساخت دوچرخه برقی بسیار زود انجام شده است. در واقع اولین دوچرخه برقی در طی دهه ۱۸۹۰ میلادی ساخته شده است. در سال ۱۸۹۵ اولین پرونده ثبت اختراع برای دوچرخه برقی توسط یک شخص آمریکایی به نام بولتن[1] ثبت شده است. این دوچرخه دارای باتری ۱۰ ولتی و موتوری با حداکثر جریان ۱۰۰ آمپر بوده است [۱]. همچنین فن‌آوری دوچرخه برقی مذکور از نوع هاب-موتور در چرخ عقب بوده است. بعد از اختراع بولتن، دانشمندان آمریکایی مشهوری سعی بر ارتقا طرح بولتن نمودند. ابتدا یک شخص از بوستون به نام حُسِا جی لیبی[2] دوچرخه با موتور دوقلو برای کمک به کوه‌پیمایی اختراع نمود. همچنین اولین نمونه از یک کنترل‌کننده در یک e-bike بود. سپس فردی از نیویورک به نام جان اسنپف۳ یک سیستم غلتکی اصطکاک برای چرخاندن چرخ عقب اختراع نمود. تقریباً ۵۰ سال بعد، یک کالیفرنیایی به نام جسی دی تاکر[4] یک اختراع برای یک موتور با چرخ‌دنده داخلی و توانایی چرخ آزاد[5] و درنتیجه توانایی استفاده از پدال در ترکیب با و یا بدون موتور الکتریکی را به ثبت رساند [۲].

امروزه بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که مشخصات فنی و انواع دوچرخه برقی در کشورهای مختلف، متفاوت است. شرکت‌های بزرگ از فنّاوری‌های پیشرفته در طراحی دوچرخه‌های برقی بهره می‌برند. از این‌رو دوچرخه‌های برقی به دلیل دارا بودن مشخصاتی مانند وزن کم، ظاهر مناسب و خوب، بسیار موردتوجه قرارگرفته‌اند [۱]. از نظر زیست‌محیطی نیز کاهش احتمالی گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در صورت استفاده از دوچرخه‌های برقی در حمل‌ونقل شهری برای فواصل کوتاه، تخمین زده شده است. از سوی دیگر استفاده از این دوچرخه‌ها در مقیاس عملکردی بزرگ می‌تواند به کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهبود سلامت جامعه و همچنین شرایط آب و هوایی جهانی کمک نماید.

یک دوچرخه برقی یا e-bike دوچرخه‌ایست با یک موتور الکتریکی که می‌توان از آن برای نیروی محرکه استفاده نمود. دوچرخه‌های برقی را می‌توان بر مبنای توان تحویلی الکتروموتور، سیستم کنترلی دوچرخه و یا نوع کاربری آن دسته‌بندی نمود.

۱-۲- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس کاربرد آن‌ها

انتخاب دوچرخه برقی متناسب با نیاز بسیار مهم است. علیرغم بازه وسیع در حال رشد دوچرخه‌های برقی موجود،

1- Odgen Bolton
2- Hosea J Libby
3- John Schnepf
4- Jesse D Tucker
5- freewheel

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

انتخاب درست آن ساده‌تر از حد تصور است. فاکتورهای که باید به آن توجه شود دقیقاً مانند دوچرخه‌های معمولی است: سبک سواری، نوع زمین، مسافت و ... [۳]. در این بخش از مطالعات به‌مرور کلی از انواع مختلف آن پرداخته شده است.

۱-۲-۱- دوچرخه‌های برقی کوهستانی[1]

این دسته از دوچرخه‌ها، مانند هر دوچرخه کوهستانی، باید توانایی مقاومت در برابر تنش‌های سواری آف-رود با موانع از قبیل سنگ‌ها را داشته باشد. علاوه بر آن، باید از توانایی استقامت اجزای الکترونیکی در برابر شرایط سخت اطمینان حاصل گردد. موتور و باتری هردو باید در مقابل شرایط جاده، شرایط آب و هوا و ... محافظت شوند؛ همچنین تمامی کابل‌ها و اتصالات آن‌ها نیز باید مهروموم شود.

زمانی که صحبت از صعود تپه در میان است، یک موتور با دنده معمولاً بهتر خواهد بود. این موضوع در ادامه در بخش موتورهای گیربکس‌دار و Mid-Drive و مبحث شیب پیمایی به‌تفصیل موردبررسی قرارگرفته است. مسئله مهم در کوه‌پیمایی با دوچرخه انتخاب دنده مناسب است. به همین علت، در دوچرخه‌های کوهستانی از دنده‌های بسیاری بهره برده می‌شود. در واقع استفاده از دوچرخه با تک دنده منطقی نیست. با دلایل مشابه استفاده از دوچرخه با یک سرعت نیز قابل‌درک نیست. این عمل سبب تولید گرمای بسیار و جلوگیری از عملکرد دوچرخه در حالت بهینه می‌گردد. استفاده از دوچرخه‌ی تک دنده و تک سرعته در شهر، اکثراً در نواحی مسطح می‌تواند قابل‌قبول باشد.



شکل ۱-۱: دوچرخه کوهستانی [۴]

برای استفاده از دوچرخه برقی کوهستانی در مسیرهای آف-رود، توان ۵۰۰ تا ۷۵۰ وات پیشنهاد می‌شود. هر موتوری با توان کم‌تر، قدرت کافی برای پیمودن و صعود از تپه‌ها را ندارد. امروزه اکثر دوچرخه‌های برقی دارای توان ۲۵۰ وات هستند؛ این بیشترین مقدار توانی است که استاندارد اتحادیه اروپا مجاز می‌داند. در آمریکا می‌توان از موتری تا توان ۷۵۰ وات بهره برد. اگر از موتوری با دنده استفاده شود، توان ۵۰۰ وات نیز می‌تواند مناسب باشد.

مسافت اعلام‌شده توسط تولیدکننده‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی، جاده مسطح، بدون باد، بدون دست‌انداز و بدون موانع است؛ یعنی اگر مسافت اعلام‌شده ۳۵ کیلومتر باشد، در شرایط صعود از تپه، نصف این بازه پوشش داده می‌شود. لذا برای پیمودن مسافت بیشتر نیاز به باتری با ظرفیت بیشتر است که سبب افزایش وزن دوچرخه نیز می‌گردد. توصیه می‌شود از موتور گیربکس‌دار استفاده شود زیرا در این صورت نه‌تنها وزن دوچرخه بلکه وزن باتری نیز کم‌تر خواهد شد.

این روزها جذب شوک چرخ عقب و جلو بسیار محبوب هستند. آن‌ها کمک به حل مشکل کاهش سرعت در هنگام

2- Electric Mountain Bike

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

برخورد دوچرخه به مانع می‌کنند و همچنین منجر به سواری آسان‌تر بر روی سطوح سخت و تنش فیزیکی کم‌تر برای دوچرخه‌سوار می‌گردند. استفاده از زین باکیفیت نیز به کمک به کاهش جهش‌ها می‌کند. در مورد دوچرخه‌های برقی کوهستانی، سیستم جذب شوک می‌تواند به کاهش شرایط استرس بر روی موتور و باتری کمک کند. اگر موتور محافظت‌شده نباشد، از قرار دادن آن در سطوح پایین باید خودداری نمود زیرا ممکن است توسط صخره‌ها و موانع آسیب ببیند.

در دوچرخه‌های ارزان‌قیمت از تایرهای ارزان استفاده می‌شود. باید از میزان مقاومت تایرها در برابر فشارها و قدرت ناشی از عملکرد موتور اطمینان حاصل نمود. اگر موتور و باتری هردو در مرکز چرخ قرار بگیرند (عقب یا جلو)، چرخ سنگین‌تر می‌شود. هرچه چرخ سنگین‌تر باشد، در هنگام برخورد با یک مانع بیشتر از زمین فاصله می‌گیرد. سپس، دوچرخه‌سوار باید منتظر بماند تا چرخ به زمین برسد تا بتواند آن را کنترل نماید؛ بنابراین، استفاده از چرخ‌های تا حد امکان سبک، مطلوب است.

در طراحی دوچرخه‌های برقی کوهستانی نیازی به نگه‌داری به‌خصوصی نسبت به دوچرخه‌های معمولی نیست. اگر موتور، باتری، کابل‌ها و تمام اجزای الکتریکی دوچرخه به‌خوبی مهروموم شده باشند، نیازی به نگهداری جز باتری نیست [۴].

۱-۲-۲- دوچرخه برقی جاده‌ای[1]

دوچرخه‌های جاده‌ای معمولاً توسط افرادی که هدفشان دوچرخه‌سواری است، استفاده می‌شوند. برخلاف دوچرخه‌های کوهستانی که افراد خواهان شور و هیجان آف-رود سواری هستند و از کمک گرفتن در حین دوچرخه‌سواری استقبال می‌کنند یا برخلاف کسانی که از دوچرخه‌های راحتی یا موپدها برای رفت‌وآمدهای شهری استفاده می‌کنند و فقط فعالیت فیزیکی متوسط و رسیدن به مقصد را می‌خواهند، دوچرخه‌سواران جاده‌ای قصد دوچرخه‌سواری دارند.

دوچرخه‌های برقی جاده‌ای باید ظاهری شبیه به دوچرخه‌های معمولی داشته و باید سبک باشند. وزن یک دوچرخه برقی جاده‌ای نباید تفاوت چندانی با همتای معمولی خود داشته باشد. همچنین، جدا کردن باتری و حتی موتور باید آسان، در دسترس و سریع باشد تا دوچرخه‌سوار یک سواری غیر الکتریکی داشته باشد (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: دوچرخه برقی جاده [۴]

برای تمام دوچرخه‌های برقی به‌خصوص دوچرخه برقی جاده‌ای، موتور باید حداقل اصطکاک را داشته باشد.

1- Electric Road Bik

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دوچرخه‌سواری بدون کمک الکتریکی باید بی‌صدا و نرم باشد. دوچرخه‌های جاده‌ای به دلیل طراحی و نحوه قرارگیری بدن، مقاومت هوا کمی دارند. آن‌ها برای پیشروی در این نواحی ساخته شده و به همین دلیل مهم است که موتور و یا هر جز الکتریکی دیگر حداقل تأثیر را بر روی مقاومت هوا داشته باشد.

دوچرخه‌های جاده‌ای معمولاً سیستم تعلیق ندارند. برخورد با دست‌اندازها، هرچند خیلی کوچک، می‌تواند قابل‌توجه باشد. دوچرخه‌سواران می‌دانند که باید قبل از برخورد با دست‌انداز، خود را به بالا بکشند و وزن خود را بر روی پدال‌ها متعادل کنند؛ اما اجزای الکتریکی در دوچرخه برقی جاده‌ای هیچ‌گونه حفاظتی ندارند و احتمالاً اکثر انرژی ناشی از این برخوردها را جذب می‌کنند. کار خاصی نمی‌توان برای این موضوع انجام داد، مگر تلاش برای عدم برخورد.

برخی از دوچرخه‌سواران به دلایل مختلف، کمک الکتریکی (استفاده از توان برقی) را می‌خواهند. شاید می‌خواهند مطمئن شوند که به خانه برمی‌گردند، یا راه رفت را دوچرخه‌سواری کنند و راه برگشت را با استفاده از کمک الکتریکی برگردند. همچنین سیستم کمک الکتریکی می‌تواند به دوچرخه‌سوارانی که می‌خواهند دامنه پیمایش خود را برای سفرهای طولانی گسترش دهند، مفید باشد. دوچرخه‌های جاده‌ای حتی بدون کمک الکتریکی بسیار سریع هستند. رسیدن به حداکثر سرعت مجاز حتی بدون استفاده از سیستم کمکی الکتریکی (موتور)، امری شدنی است.

دوچرخه‌های جاده‌ای تک سرعته (معروف به fixie) برای سفرهای شهری که در آن‌ها دوچرخه‌سوار مجبور به شروع و توقف است، بسیار مناسب می‌باشند. این نوع از دوچرخه‌های جاده‌ای ساده بوده و اجازه تمرکز بر ترافیک شهری را به دوچرخه‌سوار می‌دهد. همچنین روند نگه‌داری آن نیز ساده است. بازده آن‌ها بالاتر بوده زیرا هیچ تلفاتی در سیستم انتقال وجود ندارد و دوچرخه سبک‌تر است؛ اما از طرفی صعود از تپه برای این نوع از دوچرخه چالش خواهد بود زیرا تک دنده بوده و توانایی انتخاب دنده متناسب با سطح علتی است که دوچرخه را کارآمدترین وسیله نقلیه در دنیا می‌کند [۴].

۳-۲-۱- دوچرخه‌های برقی هیبریدی[1]

دوچرخه هیبریدی برقی یک اصطلاح گیج‌کننده در دنیای دوچرخه برقی است. یکی از تعاریف آن، ترکیب موتور و پدال است. این نوع از تعریف تمامی دوچرخه‌های برقی را در برمی‌گیرد. تعریف دیگری از آن ترکیب دوچرخه کوهستانی (ساخته‌شده برای مقاوم بودن) با دوچرخه جاده‌ای (ساخته‌شده برای سرعت) است (شکل ۳-۱). در ادامه به این تعریف پرداخته می‌شود [۴].



شکل ۳-۱: دوچرخه هیبریدی [۴]

1- Electric Hybrid

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دوچرخه‌های برقی هیبریدی درست مانند دوچرخه‌های هیبریدی استاندارد هستند. آن‌ها برای سواری در جاده‌ها مناسب بوده و می‌توانند از عهده‌ی مسیرهای آف-رود سبک نیز برآیند. بعضی از آن‌ها در چنگال‌های جلو مجهز به سیستم تعلیق[1] کوچک هستند تا بتوانند هنگام سواری در زمین‌های سخت و خشن دست‌اندازها را جذب کنند و بقیه دارای چنگال‌های سفت و مستحکم هستند. بعضی از مدل‌های این دوچرخه‌های برقی به‌طور کامل مجهز به گلگیرها، سبد و حتی قفل هستند. حالت دوچرخه‌سوار هنگام سواری می‌تواند از حالت صاف به یک موقعیت ورزشی‌تر، بسته به‌راحتی و ترجیح دوچرخه‌سوار متفاوت باشد [۳].

دوچرخه‌های هیبریدی برقی انتخاب خوبی برای رفت‌وآمدهای شهری و یا مسیرهای محلی می‌باشند. این نوع دوچرخه‌ها واقعاً برای رفت‌وآمد ایده‌آل هستند چراکه به‌اندازه کافی قوی بوده تا بتوانند چاله‌ها را تحمل کرده و کیف دوچرخه‌سوار را حمل کنند. با این حال، آن‌ها به‌اندازه دوچرخه‌های کوهستانی سنگین نیستند و دوچرخه‌سوار با وزن اضافی سر و کله نخواهد زد [۵].

بنابراین، یک دوچرخه هیبریدی سازش میان دو دنیای متفاوت است. این نوع دوچرخه‌ها برای رفت‌وآمد شهری ساخته‌شده‌اند و به همین ترتیب، هر جز برای ارائه بهترین نتیجه برای این محیط انتخاب شده است. به‌طور مثال، چرخ‌های دوچرخه‌های هیبریدی بسیار عریض‌تر از چرخ‌های دوچرخه‌های جاده‌ای بوده و شبیه به چرخ‌های دوچرخه‌های کوهستانی هستند. این باعث ثبات و دوام دوچرخه می‌شود؛ اما چرخ‌های دوچرخه‌های هیبریدی فشار هوای بیشتری نسبت به دوچرخه‌های کوهستانی دارند. فشار هوای بالاتر، امکان حرکت سریع‌تر دوچرخه را با کاهش مقاومت غلتشی فراهم می‌کند [۴].

۴-۲-۱- دوچرخه‌های برقی شهری[2]

اولین سؤال این است که دوچرخه برقی شهری چیست؟ جواب کوتاه این است که وسیله‌ایست که شخص را از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B می‌رساند، مانند سفرهای درون‌شهری از خانه به محل کار یا مدرسه و برگشت. دوچرخه برقی را می‌توان خرید ولی اگر نیاز به دوچرخه برقی، کم و مسافت کوتاه باشد، می‌توان دوچرخه برقی را ساخت [۶].



شکل ۴-۱: دوچرخه شهری [۴]

دوچرخه‌های برقی معمولاً موقعیت نشستن راحت و صافی دارند (شکل ۴-۱). اساساً این دوچرخه‌ها برای مسافت‌های کوتاه و تفریحی هستند. فرض استفاده از این دوچرخه‌ها، تعداد بسیار کم تپه‌ها بوده و نه سرعت و نه حمل بار اولویت زیادی ندارند. درحالی‌که سرعت برای دوچرخه‌های برقی شهری مهم نیست، گشتاور و شتاب مهم است که به دلیل طبیعت سفرهای شهری، یعنی توقف‌های مکرر است؛ بنابراین برای مطمئن شدن از این‌که تجربه

1- Suspension
2- Electric City Bike

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

راحت و بدون عرق‌ریزی باشد، داشتن توانایی شتاب برای دوچرخه‌های برقی شهری مناسب است. همچنین، با توجه به اینکه توقف و شروع‌های مکرر سبب تخلیه باتری به سرعت می‌گردند، داشتن باتری خوب لازم است [۵].

۵-۲-۱- دوچرخه‌های برقی تاشو[1]

این دسته از انواع دوچرخه کوچک‌تر و سبک‌تر از دوچرخه‌های عادی بوده و دارای چرخ‌های کوچک‌تر هستند. موقعیت نشستن بر روی زین این دوچرخه‌ها صاف بوده که آن را ایده‌آل برای سواری در ترافیک می‌کند (شکل ۵-۱).

دوچرخه‌های تاشو انتخاب مناسبی برای گزینه‌های حمل‌ونقل ترکیبی می‌باشند- مانند دوچرخه‌سواری به ایستگاه قطار، استفاده از قطار و دوچرخه‌سواری از ایستگاه قطار تا محل کار و سپس تا کردن دوچرخه و قرار دادن آن در زیر میز برای کل روز. آن‌ها همچنین برای رفت‌وآمدهای کوتاه‌مدت مناسب هستند، زیرا می‌توان آن را تا نمود و به هر جا که مدنظر است بُرد.



شکل ۵-۱: نمای دوچرخه تاشوی کامپکت [۷]

دوچرخه‌های تاشو به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که سبک باشند، به‌طوری‌که مردم بتوانند به‌راحتی آن را حمل کنند. البته که افزودن موتور در دوچرخه تاشو ناگزیر وزن دوچرخه را افزایش می‌دهد. درحالی‌که یک دوچرخه تاشو وزنی معادل ۲۰ تا ۳۰ پوند دارد، افزودن موتور به‌طورمعمول وزن آن را تا ۴۰ الی ۵۰ پوند افزایش می‌دهد. برای برخی از دوچرخه‌سواران، حمل دوچرخه برقی ۴۰ پوندی می‌تواند خیلی سنگین باشد.

به هنگام خرید یک دوچرخه برقی تاشو باید به این نکته توجه نمود که موتور مانع از کارکرد مکانیزم تاشو دوچرخه نشده باشد. درهرصورت این مورد باید قبل از خرید بررسی گردد. در حالت ایده‌آل، دوچرخه‌ای مدنظر است که به‌آسانی و درست تا شود، به‌اندازه کافی سبک باشد تا بتوان آن را حمل نمود. این خصوصیات انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی در اختیار می‌گذارد.

مورد دیگری که در هنگام خرید باید در نظر گرفته شود این است که آیا دوچرخه دارای دنده است یا خیر. برخی مجهز به دنده و برخی فاقد آن هستند که این مورد می‌تواند در هنگام صعود از تپه مشکل‌آفرین شود. همچنین، برخی از دوچرخه‌های برقی تاشو دارای سیستم تعلیق هستند و اگر در شهر از آن استفاده شود ممکن است سبب ناراحتی دوچرخه‌سوار گردد [۵].

1- Folding Electric Bike

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۳-۱- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس سیستم کنترلی آن‌ها

در بخش گذشته مروری بر انواع دوچرخه با توجه به کاربری آن‌ها انجام شد. در این قسمت به انواع دسته‌بندی دوچرخه‌های برقی مبتنی بر سیستم محرکه و کنترلی آن‌ها پرداخته می‌شود.

اولین نسل دوچرخه‌های برقی فاقد هرگونه مدار الکترونیکی (کنترل‌کننده) بوده و فقط شامل کلید سه حالته خاموش، کم و زیاد بوده است. این دوچرخه حالت جهشی داشته و به‌خوبی کنترل نمی‌گردید. همچنین دارای نقاط ضعفی بوده که عبارت‌اند از:

۱. عدم تأمین توان موردنیاز؛ در بعضی مواقع نیاز به توان بیشتر و یا کمتری از سمت موتور است ولی این نوع دوچرخه قادر به تأمین آن نبود.

۲. کلید مربوطه در معرض تخریب؛ این کلید در معرض پدیده قوس داخلی (جرقه مخرب بین تیغه‌های فلزی) بوده که سبب ایجاد تماس الکتریکی گردیده و منجر به تخریب کلید در زمان کوتاهی می‌شود.

لذا با توجه به این مطالب نیاز به استفاده از مدارات الکترونیکی و سیستم‌های کنترلی دوچرخه برقی است [۸]. بر اساس نحوه‌ی کمک موتور به دوچرخه‌سوار، دوچرخه‌های برقی به دو دسته‌ی pedal-assist (پدال کمکی) و power-on-demand (استفاده از تراتل[1]) تقسیم می‌گردند [۹]؛ بنابراین اساسی‌ترین دسته‌بندی دوچرخه‌های برقی موجود بر اساس سیستم کنترلی آن به‌قرار زیر است [۹]، [۱۰] و [۱۱]:

- دوچرخه برقی با pedal-assist (PAB[2])
- دوچرخه برقی با power-on-demand (PDB[3])
- دوچرخه برقی با power-on-demand (تراتل) و pedal-assist (نوع هیبریدی)

در ادامه به بررسی و توضیح هر کدام از این دوچرخه‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۱- دوچرخه‌های PAB

این نوع از دوچرخه‌های برقی به pedelec[4] معروف هستند که در آن‌ها به عمل پدال‌زنی دوچرخه‌سوار توسط یک موتور الکتریکی کوچک کمک می‌شود (شکل ۶-۱)؛ بنابراین، یک نوع از دوچرخه‌برقی کم- قدرت است. بااین‌حال، برخلاف برخی از انواع دیگر دوچرخه‌های برقی، در بسیاری از کشورها pedelec-ها در زمره دوچرخه دسته‌بندی می‌گردند و قوانین حاکم بر دوچرخه‌ها برای آن‌ها نیز صدق می‌کند. pedelec شامل یک کنترل‌کننده بوده که فرمان قطع موتور را هنگامی‌که دوچرخه‌سوار پدال نمی‌زند و یا به سرعت خاصی رسیده است (معمولاً ۲۵ کیلومتر بر ساعت) می‌دهد [۱۲].

1-Throttle
2- Pedal-assist bicycle
3- Power-on-demand bicycle
4 -Pedal-electric cycle

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۶-۱: دوچرخه **pedelec**[۱۰]

در pedelec موتور الکتریکی توسط پدال کنترل می‌شود؛ یعنی تا زمانی که دوچرخه‌سوار به پدال زدن ادامه دهد، موتور الکتریکی نیز توان تولید کرده و به دوچرخه‌سوار کمک می‌کند. ولی به‌محض قطع پدال‌زنی موتور خاموش می‌گردد. از سوی دیگر در این نوع دوچرخه‌ها، شروع کار موتور الکتریکی منوط به پدال زدن دوچرخه‌سوار است. در واقعیت pedelec-ها رفتار مشابهی با دوچرخه‌های معمولی استاندارد همراه با پدال دارند و فقط در آن‌ها از یک موتور الکتریکی سبب افزایش قدرت (نه جایگزینی نیروی انسانی) استفاده می‌گردد. همان‌طور که از شکل ۷-۱ برمی‌آید، توان موتور با توان انسانی جمع می‌شود و توان کل در هر مرحله افزایش می‌یابد ولی به‌محض رسید به حداکثر سرعت مجاز، توان موتور صفر شده و توان کل برابر با توان انسانی خواهد بود. همچنین نیازی به استفاده از دسته تراتل و استفاده از مچ دست و یا انگشت شست نیست و دوچرخه‌سواری نرمالی را ارائه می‌دهد [۱۳].



شکل ۷-۱: توان موتور الکتریکی و انسان در **pedelec**[۱۳]

pedelec-ها دارای سنسور برای تشخیص سرعت پدال زدن (کَدِنس[1])، نیرو وارد بر پدال (گشتاور) و یا هر دو هستند. از مکانیزم فعال شدن ترمز نیز برای غیرفعال کردن موتور می‌توان استفاده نمود [۱۴]؛ یعنی اگر دوچرخه‌سوار در سطح PAS بالا بوده و مایل به حرکت با سرعت کم، توقف و یا دو زدن باشد، بودن موتور در توان کامل ممکن است سبب اتفاق ناگوار سقوط نیز بشود. برای مقابله با این موضوع و جلوگیری از مشکلات دیگر، اکثر دوچرخه‌های برقی به‌خصوص از نوع pedelec مجهز به کلیدهای قطع موتور در دسته‌های ترمز هستند؛ یعنی دوچرخه‌سوار می‌تواند در هر لحظه که احساس کرد توان موتور بیش از حد است، با اعمال فشار سریع بر ترمز موتور را به صورت الکتریکی خاموش نماید [۸].

pedelec شهری نوع بسیار شایع از دوچرخه‌های pedelec بوده، درحالی‌که یک pedelec می‌تواند هر نوع دوچرخه‌ای (کوهستانی، شهری و ...) باشد. یک دوچرخه معمولی با افزودن اجزای لازم مانند موتور، باتری و ... می‌تواند

1-Cadence

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

به‌راحتی به یک pedelec تبدیل گردد.

بسیاری از حوزه‌های قضایی pedelec را به‌عنوان دوچرخه مخالف با موپدها یا موتورسیکلت‌ها دسته‌بندی می‌کنند. دوچرخه‌های برقی قدرتمندتر مانند S-pedelecها و PDB ها (تولید توان الکتریکی بدون نیاز به پدال‌زنی) اغلب به‌عنوان موپد یا حتی موتورسیکلت دسته‌بندی می‌شوند که در این صورت نیاز به گواهینامه و ثبت وسیله و استفاده از کلاه ایمنی است [۱۲].

- **مزایا pedelec**

۱. تحرک

می‌توان در مناطق تپه‌ای از pedelec به‌جای وسایل نقلیه موتوری (خودروها و موتورسیکلت‌ها) استفاده نمود. دوچرخه‌های pedelec به‌خصوص برای افراد مسن که دیگر ظرفیت تلاش شدید برای صعود تپه ندارند مفید است.

۲. سرعت

مسافت‌ها سریع‌تر پیموده می‌شوند، به‌طوری‌که میانگین سرعت بیشتر بوده درحالی‌که میزان تلاش یکسان است.

۳. تلاش

متناوباً سرعت‌های مشابه به نسبت با دوچرخه معمولی با تلاش کم‌تر به‌دست می‌آید. به این معنی که دوچرخه‌سوار از تلاش‌های غیرضروری پرهیز می‌کند- به‌خصوص هنگام صعود از تپه یا برخلاف جهت باد.

۴. بازه گسترده‌تر

درنتیجه‌ی عدم خستگی دوچرخه‌سوار و میانگین سرعت‌های بیشتر، پیمودن مسافت‌های بیشتر امکان‌پذیر است [۱۲].

- **معایب pedelec**

بزرگ‌ترین عیب pedelec قیمت آن است که به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای از دوچرخه مشابه اما معمولی بیش‌تر است. هزینه‌های اضافی دیگر جزئی هستند. این هزینه‌ها شامل: هزینه‌های شارژ الکتریکی و تعویض احتمالی باتری که باهم محاسبه می‌شوند. ازجمله عیوب دیگر، سطح ریسک بالاتر دزدیده شدن به علت ارزش بالاتر آن و همچنین وزن بیشتر آن به علت استفاده از باتری، موتور و ساختار مستحکم آن است [۱۲].

- **اجزای pedelec**

pedelec-ها با یک موتور الکتریکی کمکی، پک باتری، کنترل‌کننده و سنسور تشخیص حرکت در قسمت رکاب از دوچرخه‌های معمولی متمایز می‌گردند. اکثر مدل‌ها نیز به یک نشانگر شارژ باتری و تنظیمات توان موتور مجهز هستند.

- **S-pedelec**

گروهی دیگر از دوچرخه‌های pedelec وجود دارند که حداکثر سرعت مجاز آن برابر با ۴۵ کیلومتر بر ساعت (mph ۲۸) است. به این گروه از pedelec-ها که سرعت بالاتر از معمول دارند، S-pedelec[1] می‌گویند [۱۵]. یعنی درصورتی‌که برخی از قیود موجود در دوچرخه‌های pedelec مانند محدودیت سرعت، حذف شود، دوچرخه برقی

1- Speed-pedelec

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مذکور به نام دوچرخه S-pedelec شناخته می‌شود. در واقع دوچرخه‌های S-pedelec و یا motorbike نوعی از دوچرخه برقی (e-bike) با قدرت بالا است که برای دریافت نیروی کمکی از سوی موتور، محدودیت سرعت وجود ندارد ولی حداکثر سرعتی برای طراحی دوچرخه در نظر گرفته می‌شود ۴۵ km/h است. ساخت این نوع دوچرخه برای شرکت‌های سازنده ساده‌تر است زیرا می‌تواند بدون هیچ محدودیتی و در هر مسیری حرکت کند [۱].

قیود زیر برای استفاده از S-pedelec-ها لازم است [۱۵]:

۱- تائید نوع دوچرخه

۲- بیمه اجباری (مدرک بیمه باید بر روی دوچرخه نمایان باشد)

۳- گواهینامه رانندگی موپد لازم است.

۴- استفاده در جاده‌ها (نه مسیرهای دوچرخه)

۵- استفاده از کلاه ایمنی مناسب (مانند کلاه ایمنی موتورسیکلت)

۶- سیستم ترمز قوی، روشنایی و علامت دادن و لاستیک‌ها (منطبق بر دستورالعمل اتحادیه اروپا)

۷- آینه دید عقب

۸- حداکثر قدرت ۵۰۰ وات

۹- حداکثر سرعت ۴۵ کیلومتر بر ساعت

بسته به کشور، S-pedelec-ها یا در گروه دوچرخه و یا در زمره وسایل نقلیه موتوری دسته‌بندی می‌شوند. به‌طور مثال در سوئیس، pedelec و S-pedelec هردو از مسیرهای دوچرخه‌سواری استفاده می‌کنند و در اتحادیه اروپا، در خارج از شهر، S-pedelec ها باید از جاده استفاده کنند.

- **سطوح PAS**

دوچرخه‌های pedelec معمولاً دارای سیستم تنظیمات میزان کمک از توان موتور الکتریکی (PAS[1]) در هنگام دوچرخه‌سواری هستند. سطوح میزان کمک اساساً بخشی از قدرت کامل سیستم را تعیین می‌کنند که با توجه به نیاز دوچرخه‌سوار به‌صورت دستی توسط وی تعیین می‌گردد؛ بنابراین هنگامی‌که دوچرخه‌سوار پدال می‌زند، توان تأمینی از سوی موتور به طور خودکار به سطح تعیین شده می‌رسد و در همان حد باقی می‌ماند. این سطوح به‌صورت پله‌ای تنظیم‌شده‌اند [۱۶]:

۰- در این حالت هیچ نیروی کمکی از جانب موتور اعمال نمی‌گردد.

ECO- این سطح، توان موردنیاز برای حمل وزن دوچرخه را تأمین می‌کند.

۳،۲،۱- به ترتیب سطوح افزایش میزان توان کمکی از جانب موتور تا رسیدن به حداکثر سرعت مجاز است.

S, Sport- حداکثر توان موتور برای رسیدن به سرعت ۴۵ کیلومتر بر ساعت (در صورت S-pedelec بودن).

Off-Road/Race- حداکثر توان سیستم بدون داشتن محدودیت سرعت (تنها در مکان‌های مجاز (غیرعمومی)

1- Pedal-assist-system

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

کاربرد دارد).

۲-۳-۱- دوچرخه‌های PDB

عملکرد دوچرخه‌های PDB بسیار شبیه به موتورسیکلت یا اسکوتر است. همان‌طور که در شکل ۸-۱ مشاهده می‌گردد، هنگامی‌که تراتل فعال می‌شود، موتور نیروی لازم را تأمین نموده و سبب حرکت دوچرخه به سمت جلو می‌گردد [۱۷].



شکل ۸-۱: دوچرخه **PDB**[۱۰]

برخلاف pedelec، در دوچرخه‌های PDB الزامی به پدال‌زدن نیست. در واقع مکانیزم پدال‌ها و موتور از یکدیگر مجزا است و می‌توان به هر اندازه که دلخواه دوچرخه‌سوار است پدال بزند، بی‌آنکه تأثیری بر میزان توان کمکی از سمت موتور بگذارد و هرچه دوچرخه‌سوار بیشتر پدال بزند، سرعت بیشتر و مسافت بیشتری طی خواهد شد.

دوچرخه‌های برقی (e-bike) با هدف تجمیع نیرو با توان انسانی طراحی‌شده‌اند ولی دوچرخه‌های PDB به دوچرخه‌سوار این اجازه را می‌دهند که این قانون را دور بزنند.

دو انتخاب در این نوع دوچرخه‌ها وجود دارد [۱۳]:

۱. کروز بدون پدال‌زنی- دوچرخه‌سواری تنها با استفاده از نیروی موتور

۲. پدال‌زدن در حین استفاده از موتور (تراتل)- عملکرد هیبریدی موتور و پدال، مانند pedelec

وظیفه کنترل‌کننده در دوچرخه‌های PDB، تنظیم توان موردنیاز از سمت موتور دوچرخه با توجه به تراتل تعبیه‌شده بر روی فرمان آن است و به سنسورهای پیچیده نیازی نیست [۱۳]. در واقع در دوچرخه‌های PDB به ازای درصد پیچش و یا فشار وارد بر تراتل، درصدی از توان موتور (۰٪ تا توان کامل) اعمال می‌گردد و به دوچرخه‌سوار اجازه تعیین مقدار توان موردنیاز برای سواری را می‌دهد.

در دوچرخه‌های PDB ممکن است این‌گونه به‌نظر آید که از توان دوچرخه‌سوار به صورت موثرتری استفاده می‌شود در حالیکه همیشه چنین نیست. اضافه نمودن توانی بیش از توان موردنیاز دوچرخه‌سوار آسان است، به‌علاوه اگرچه گزینه پدال نزدن در این دوچرخه بسیار مقبول باشد (بر خلاف دوچرخه‌های pedelec)، اما سبب تخلیه زودتر باتری دوچرخه می‌گردد [۸].

۳-۳-۱- دوچرخه برقی با power-on-demand (با دسته‌ی تراتل) و pedal-assist (نوع هیبریدی)

در این نوع دوچرخه‌های برقی دو سیستم pedelec و PDB تعبیه شده‌اند و دوچرخه‌سوار می‌تواند بنا بر ترجیح خود از آن‌ها بهره ببرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

در این دوچرخه‌ها می‌توان دوچرخه را به‌عنوان pedelec استفاده نمود و بعد از تراتل برای افزایش سرعت بیشتر بهره نمود. البته ذکر این نکته واجب است که در بعضی دوچرخه‌ها هر دو سیستم کنترلی وجود دارد ولی نمی‌توان هردوی آن‌ها را هم‌زمان استفاده نمود [۱۷].

۱-٤- انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس موقعیت قرارگیری موتور

دسته‌بندی دیگری که برای دوچرخه‌های برقی وجود دارد، بر اساس موقعیت موتور در دوچرخه است. دوچرخه‌های برقی به شکل فزاینده‌ای از میان وسایل نقلیه دو-چرخ، برای دو هدف رفت‌وآمد و لذت بردن از سواری محبوب شده‌اند. استایل‌های مختلفی برای قرارگیری موتور الکتریکی در دوچرخه برقی وجود دارد که رایج‌ترین این استایل‌ها، قرار گرفتن موتور در مرکز چرخ (هاب- موتورها) و در زیر پدال (Mid-Drive) است (شکل ۹-۱).



(الف) (ب)

شکل ۹-۱: موقعیت قرارگیری موتور- الف) در هاب چرخ، ب) **Mid-Drive**[۱۸]

موتورهای قرارگرفته در هاب چرخ، مطمئناً یکی از رایج‌ترین نحوه قرارگیری موتور در دوچرخه برقی هستند. از طرفی در دو- سه سال اخیر موتورهای Mid-Drive که در آن موتور را نزدیک‌تر به مرکز دوچرخه قرار داده و توان موتور به چرخ عقب توسط زنجیر چرخ انتقال می‌یابد، بسیار رایج شده‌اند. هر دو استایل موردبحث دارای مزایا و معایب منحصر به خود هستند؛ بنابراین، انتخاب موتور مناسب به‌طور عمده به نیازها و انتظارات از دوچرخه برقی بستگی دارد. در ادامه به هریک از این حالات و مزایا و معایب آن‌ها پرداخته می‌شود [۱۸].

۱-٤-۱- موتورهای Mid-Drive

موتور Mid-Drive که به موتور کرنک[1] نیز معروف است، در ناحیه میل‌لنگ و پدال دوچرخه، معمولاً در انتهای قاب قرار دارد. شکل ۱۰-۱ یک مثال از موقعیت تقریبی قرار گرفتن موتور در دوچرخه برقی‌های Mid-Dive نشان می‌دهد. قرار دادن موتور بین پدال‌ها اجازه استفاده از سیستم انتقال دوچرخه به‌عنوان یک چرخ‌دنده برای موتور را می‌دهد، پس وزن آن می‌تواند سبک‌تر باشد و همیشه در محدوده بهینه سرعت عمل کند؛ بنابراین، دوچرخه‌های برقی با فن‌آوری موتور Mid-Drive عملکرد خوبی در شرایط تپه‌های شیب‌دار و دوچرخه‌سواری در کوهستان دارند.

1- Crank

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۰-۱: موقعیت قرارگیری موتور در دوچرخه برقی **Mid-Drive**[۹]



شکل ۱۱-۱: دو طراحی متفاوت از موتور کرنک [۹]

موتورهای کرنک می‌توانند ظاهر متفاوت داشته باشند و به‌گونه‌ای طراحی شوند که متناسب با دوچرخه باشند. با این وجود، موتور Mid-Drive را نمی‌توان پنهان کرد و به‌صورت یک جز اضافی که به دوچرخه معمولی اضافه شده است، دیده می‌شود. شکل ۱۱-۱ دو طرح متفاوت از موتورهای Mid-Drive را نشان می‌دهد [۹].

- **مزایای موتورهای Mid-Drive**

موتورهای Mid-Drive برای بهبود تعدادی از کاستی‌های موجود در فن‌آوری هاب- موتورها طراحی‌شده‌اند. بزرگ‌ترین مزیت این موتورها نسبت به موتورهای در هاب چرخ، نسبت تبدیل دنده آن است. این نوع موتور به دوچرخه‌سوار اجازه می‌دهد که به چرخ عقب را از طریق همان زنجیر و دنده همانند پدال نیرو وارد کند، به این معنی که دنده پایین را می‌توان برای تپه‌های شیب‌دار و یا شتاب‌گیری بعد از توقف انتخاب نمود. یک موتور Mid-Drive در مقایسه با یک موتور در هاب چرخ با توان مشابه، می‌تواند با دنده پایین از تپه با شیب تندتر بالا رود و تپه‌ها را به مدت طولانی‌تری نسبت به موتور در هاب که بیش‌ازحد گرم می‌شود، بالا رود.

موتور Mid-Drive معمولاً کوچک‌تر و سبک‌تر از یک موتور در هاب با توان مشابه است. موتورهای Mid-Drive کوچک‌تر و سبک‌تر اغلب بی‌سروصدا هستند زیرا می‌توان آن‌ها را مستقیماً در داخل قاب دوچرخه نصب نمود.

تعویض یک تایر در دوچرخه با موتور Mid-Drive به‌مراتب آسان‌تر است، زیرا خبری از موتور سنگین در هاب چرخ نیست. با توجه به این موضوع می‌توان از هر نوع چرخ، تایر و کاست استفاده نمود.

درنهایت، این نوع موتورها اجازه استفاده از سنسور گشتاور را برای سیستم‌های PAS که توان موتور را متناسب با چگونگی فشار روی پدال‌ها به‌صورت اندازه‌گیری شده بر میل‌لنگ تنظیم می‌کند. موتورهای در هاب چرخ اغلب از سنسورهای کدِنس برای سیستم PAS استفاده می‌کنند که تنها سرعت موتور را بر اساس سرعت پدال‌زنی تنظیم

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

می‌کند و می‌تواند دچار خطا شوند، به‌خصوص در زمان صعود از تپه و یا حرکت دوچرخه در اطراف موانع [۱۸].

مزایای این نوع موتورها را به‌صورت خلاصه به این‌گونه نوشت [۹]:

- ✓ استفاده از سیستم انتقال نیروی دوچرخه (زنجیر و دنده) به‌عنوان گیربکس برای موتور
- ✓ مشخصه‌های مناسب گشتاور- عملکرد موتور در گشتاور بهینه
- ✓ عملکرد بالا در تپه‌ها با شیب تند
- ✓ اضافه نکردن وزن تایرها
- ✓ تعویض راحت‌تر تایرها
- ✓ زمان اجرای طولانی‌تر باتری (در مقایسه با موتور در هاب چرخ) به علت عملکرد بهینه موتور
- ✓ استفاده از سنسور گشتاور برای سیستم PAS

- **معایب دوچرخه برقی با موتور Mid-Drive**

علاوه بر مزایا و ویژگی‌های بیان‌شده، معایبی نیز دارند که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

انسان سالم می‌تواند ۱۰۰ وات توان را برای مدت طولانی تأمین کند و تأمین توان ۲۵۰ وات در طول یک پیمایش با سرعت بالا معقول است؛ اما موتورهای Mid-Drive می‌توانند توان ۲۵۰ تا ۷۵۰ وات را به‌طور مداوم تأمین کنند. این مثل پدال‌زنی یک دوچرخه‌سوار حرفه‌ای در طول روز است. زنجیر چرخ ارزان و ساده شانسی برای تحمل این ضربات را ندارد. دوچرخه‌های برقی با موتور Mid-Drive معمولاً از زنجیرهای تقویت‌شده استفاده می‌کنند، زیرا اولین مسئله تعمیر و نگهداری در این نوع دوچرخه‌ها زنجیر شکسته است، ازاین‌رو که موتور و پدال‌ها نیاز به زنجیر برای راه‌اندازی چرخ دارند. یک راه‌حل برای مسئله زنجیر استفاده از دوچرخه با موتور Mid-Drive با تسمه است (شکل ۱۲-۱)، گرچه قیمت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲-۱: دوچرخه برقی با موتور **Mid-Drive** با تسمه [۱۸]

به دلیل افزایش تعداد قطعات متحرک در یک موتور Mid-Drive، احتمال فرسودگی و خرابی بیشتری وجود دارد. اگر موتور خراب شود، با توجه به اینکه موتور به‌طور مستقیم در قاب دوچرخه ساخته شده است، تعویض آن نسبت به موتور در هاب چرخ گران‌تر است. در حقیقت، موتورهای Mid-Drive بسیار گران‌تر از انواع متداول موتورهای در هاب چرخ هستند که در بسیاری از دوچرخه‌های برقی دیده می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

یکی دیگر از ضعف‌های این نوع موتور که اکثر مردم تا لحظه‌ی اولین توقف آن را در نظر نمی‌گیرند، عدم توانایی تعویض دنده دوچرخه مگر در حالت حرکت است. از طرفی تعویض دنده درحالی‌که موتور تحت بار است کار درستی نیست، زیرا در این صورت زنجیر دوچرخه به دو پاره تقسیم می‌شود. همچنین در دوچرخه میزان گشتاور بالا است و استرس اضافی می‌تواند به‌راحتی زنجیر را بین دندانه‌ها بشکند. دوچرخه‌های مطلوب با موتور Mid-Drive دارای قطع کننده‌ها برای تعویض دنده هستند که در لحظه‌ی تعویض دنده، تراتل را برای لحظه‌ی کوتاه قطع می‌کنند؛ اما بسیاری از دوچرخه‌های برقی این ویژگی را نداشته و بر عهده‌ی دوچرخه‌سوار است که در هنگام تعویض دنده، تراتل را خلاص کند [۱۸].

معایب را می‌توان به‌صورت خلاصه نوشت [۹]:

- هزینه بالا
- عملکرد پر صدا به علت سیستم زنجیر
- احتمال شکست زنجیر
- نصب و اجرا دشوار
- قابلیت اطمینان نه‌چندان بالا، به علت قطعات متحرک زیاد

۱-٤-۲- موتور در هاب چرخ

در این بخش به مزایا و معایب کلی این استایل از قرارگیری موتور در دوچرخه پرداخته می‌شود و در ادامه مقایسه‌ای میان قرارگیری در چرخ جلو و عقب صورت گرفته و درنهایت انواع هاب موتورها -گیربکس‌دار[1] و درایو مستقیم (DD)[2]- بررسی می‌شوند.

- **مزایای دوچرخه برقی با موتور در هاب چرخ**

یکی از بزرگ‌ترین مزایای این نوع موتورها نیاز به نگه‌داری کم و یا عدم نگه‌داری است. در واقع یک سیستم درایو کاملاً مستقل هستند که تمام اجزای آنها را در داخل محفظه موتور قرار داشته و قسمتی برای تعمیر و نگه‌داری در بیرون از محفظه نمی‌گذارد (شکل ۱۳-۱). همچنین سیستم محصور در محفظه به معنی احتمال خیلی کم‌تر شکست است.

1- Geared Hub
2- Direct Drive

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۳-۱: محفظه موتور در هاب چرخ [۹]

همچنین موتورهای در هاب چرخ به کاهش نگه‌داری و تعمیر دوچرخه نسبت به موتورهای Mid-Drive کمک می‌کنند. از آنجایی‌که این موتورها به سیستم درایو پدال اصلی متصل نیستند، استرس مضاعفی به زنجیر چرخ یا شیفترها وارد نمی‌کند و منجر به تسریع فرآیند فرسوده‌شدن این اجزا نمی‌شود. زنجیر در این نوع دوچرخه برقی (شکل ۱۴-۱) احتمالاً بیشتر از یک دوچرخه معمولی عمر می‌کند و این موضوع به‌خاطر وجود موتور در هاب چرخ است که اغلب باعث استراحت زنجیر می‌گردد.



شکل ۱۴-۱: موتور در هاب مستقل از زنجیر [۱۸]

از آنجایی‌که موتور در هاب چرخ و سیستم درایو پدال به‌طور کامل مستقل هستند، می‌توان تنها با استفاده از یکی از این سیستم‌ها به مسیر ادامه داد. اگر زنجیر چرخ پاره شود، می‌توان تنها با استفاده از موتور الکتریکی به مقصد رسید. اگر موتور کار نمی‌کند می‌توان با استفاده از پدال به مقصد رسید. در هر صورت یک سیستم پشتیبان برای دوچرخه برقی از نوع موتور در هاب چرخ وجود دارد. این می‌تواند مزیت بزرگی باشد.

وزن موتور در هاب چرخ بسته به شرایط می‌تواند اثر مثبت و منفی بر روی تعادل یک دوچرخه بگذارد. در بعضی موارد، می‌توان وزن موتور را به جلو یا عقب چرخ‌ها داد. این موضوع به‌خصوص در مورد دوچرخه‌های برقی با باتری در عقب صدق می‌کند. در چنین مواردی، یک موتور در هاب چرخ در جلو می‌تواند وزن را مجدداً به‌گونه‌ای توزیع نماید که مرکز ثقل دوچرخه همچنان مرکز دوچرخه باشد.

درنهایت، موتورها در هاب بسیار ارزان‌تر از موتورهای Mid-Drive هستند. دوچرخه‌های موتور در هاب چرخ توسط صدها هزار و شاید حتی میلیون‌ها نفر بسته به نوع کارخانه تولید انبوه می‌شوند. طرح‌های مشابه در برخی موارد برای استفاده بیش از یک دهه استفاده شده است. این به این معنی است که قیمت‌ها به طرز شگفت‌انگیزی ارزان هستند.

- **معایب دوچرخه با موتور در هاب چرخ**

تقریباً همه موتورهای در چرخ فقط یک نسبت چرخ‌دنده دارند. اگرچه برای پیمودن سطح هموار خوب است ولی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

برای صعود از تپه، دنده‌ی سرعت کم‌تر با گشتاور بالاتر ترجیح داده می‌شود. استفاده از یک موتور تک سرعته در رنج سرعت‌های پایین‌تر تحت بار کارآمد نیست.

این نوع موتورها معمولاً سنگین‌تر از نوع Mid-Drive بوده و این وزن بر روی سیستم تعلیق دوچرخه اثر می‌گذارد که می‌تواند تأثیرگذاری آن را کاهش داده و ضربات بیشتری به سوار انتقال دهد.

تعویض لاستیک‌ها نیز باوجود موتور در هاب چرخ مشکل‌تر است، زیرا اغلب باید موتور جدا گردد یا باید درحالی‌که چرخ به دوچرخه متصل است، آن را چرخاند.

- **قرارگیری موتور در چرخ (جلو یا عقب)**

در بازار موجود دوچرخه‌های برقی هر دو گزینه قرارگیری موتور در چرخ جلو یا عقب مورداستفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۵-۱). اگرچه تفاوت میان این دو مدل قرارگیری موتور در چرخ، خیلی زیاد نیست، اما هر کدام از آن‌ها دارای ویژگی‌ها و مشخصه‌های مخصوص به خود هستند که باید در هنگام طراحی یک دوچرخه برقی موردتوجه قرار گیرند.



شکل ۱۵-۱: محل قرارگیری موتور در هاب چرخ، الف) چرخ عقب و ب) چرخ جلو [۱۸]

همان‌طور که از شکل ۱۶-۱ پیداست، چنگال عقب دوچرخه به‌طورمعمول تقویت می‌شود، درحالی‌که چنگال جلو ضعیف‌تر است. به همین علت اگر در طراحی دوچرخه موتور در هاب چرخ جلو قرارگرفته باشد، توصیه می‌گردد تا از چنگال استیل (فولادی) بجای چنگال آلومینیومی استفاده گردد.



شکل ۱۶-۱: فریم یک دوچرخه [۹]

این تفاوت چندین مزیت و عیب منحصربه‌فرد را ایجاد می‌کند:

- از آنجایی‌که بیشتر وزن بر روی چرخ عقب متمرکز است، با استفاده از موتور در هاب چرخ جلو می‌توان

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

به متعادل کردن دوچرخه کمک کرد.

- چرخ‌های جلو نیز عموماً نسبت به چرخ‌های عقب با سطوح صاف کم‌تری برخورد دارند، زیرا اغلب آن‌ها به ضایعات جاده ضربه می‌زنند و آن را برای چرخ عقب صاف می‌کنند. استفاده از یک موتور در هاب چرخ جلو منجر به ساختار ساده‌تر چرخ عقب ازنقطه‌نظر تعویض لاستیک و رینگ چرخ می‌شود.
- چنگال‌های چرخ جلو به‌لندازه‌ی چرخ عقب مقاوم نیستند و بنابراین یک موتور قدرتمند در هاب چرخ جلو می‌تواند به چنگال‌های چرخ جلو آسیب بزند، موتورهای با توان ۷۵۰ وات یا بیشتر، بهتر است در چرخ عقب قرار داده شوند.
- موتورها در هاب چرخ عقب دارای مزایای کشش بهتر و قاب قوی‌تر برای نصب موتور هستند.
- در حرکت در سرعت ثابت و خط مستقیم تفاوت میان موتور در هاب چرخ جلو و چرخ عقب غیرقابل تشخیص است.

مقایسه‌ای کلی میان این دو موقعیت قرارگیری موتور در هاب چرخ در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱: مقایسه دوچرخه‌های برقی با موتور در هاب چرخ عقب و جلو [۹]

چرخ جلو	چرخ عقب
نیروی وارده بر چنگال جلو بیشتر بوده، مناسب دوچرخه‌های آلومینیومی نیست.	می‌توان از چنگال‌های آلومینیومی برای چرخ عقب استفاده نمود.
عملاً درایو دو چرخ	کشش بهتر در هنگام تپه نوردی.
سیستم دنده‌ی دوچرخه بدون تغییر باقی می‌ماند.	محدودیت دنده دوچرخه
توزیع بهتر وزن اگر باتری در عقب جایگذاری شود.	توزیع وزن نابرابر، عقب دوچرخه سنگین‌تر می‌شود به‌خصوص اگر باتری در عقب نصب شود.
وزن اضافی بر چرخ جلو و نیروی بیشتر بر فرمان	فشار بیشتر بر چرخ عقب

- **موتور DD- موتور گیربکس‌دار**

علاوه بر دسته‌بندی موتور در هاب چرخ از دیدگاه قرارگیری موتور در چرخ جلو یا چرخ عقب، دسته‌بندی دیگری نیز وجود دارد. از دیدگاه ساختار موتور، دو نوع موتور در هاب وجود دارد:

- ✓ موتور DD (بدون گیربکس)
- ✓ موتور گیربکس‌دار

در این بخش به توضیح انواع آن و مزایا و معایب هر کدام پرداخته شده است

أ. موتورهای DD

موتور DD ساده‌ترین نوع موتور در دوچرخه برقی است. دیواره بیرونی هاب چرخ بخشی از موتور است و دارای یک

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

حلقه بزرگ از آهنربای قوی خاکی کمیاب است که بر روی آن نصب‌شده است. وقتی موتور شروع به کار می‌کند، مستقیماً چرخ را به حرکت درمی‌آورد. علت نام‌گذاری این نوع موتورها نیز همین عملکردشان است، به این معنی شفت ثابت است به‌طوری‌که بدنه موتور (دیواره خارجی هاب موتور) به‌جای شفت می‌چرخد[۱۹].

به‌طورمعمول موتورهای در هاب چرخ DD، بزرگ و سنگین هستند. می‌تواند این‌گونه توضیح داد که سرعت چرخش چرخ در این نوع موتورها آهسته است، در حدود ۲۰۰ دور بر دقیقه در مقابل بیش از ۳۰۰۰ دور بر دقیقه برای موتورهای گیربکس‌دار. چگالی توان موتور الکتریکی به‌طور مستقیم با سرعت بین آهنرباها و سیم‌پیچ‌ها متناسب است، بنابراین برای داشتن توان و گشتاور کافی، موتور باید بزرگ باشد. بعضی از تولیدکنندگان سعی می‌کنند تا با افزایش قطر موتور این مشکل را حل کنند، زیرا سرعت نسبی بالاتر بین روتور و سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌شود. بااین‌حال، برخی از مشکلات مکانیکی برای ساختن موتورها با قطر بیش‌ازحد وجود دارد. یکی از ویژگی‌های مهم موتورهای DD این است که به‌طور مکانیکی درگیر بوده که امکان نصب سیستم ترمز احیاکننده[1] را می‌دهد. بااین‌وجود، به این معنی است که دوچرخه‌سوار باید همیشه به مقاومت موتور غلبه کند حتی اگر کار نکند. شکل ۱۷-۱ یک مثال از موتور DD است [۹].



[۹][۱۹] **DD**شکل ۱۷-۱: موتور

موتورهای DD قطعات متحرک به‌جز یاتاقان‌های خود نداشته، بنابراین اساساً چیزی برای فرسوده‌شدن وجود ندارد. تا زمانی که این موتورها زنگ نزنند و یا یاتاقان‌های موجود فرسوده نشوند، می‌توانند به کار خود ادامه دهند [۱۸].

ب. موتور گیربکس‌دار

این نوع موتورها دارای یک سیستم دنده است که اجازه کاهش سرعت موتور سریع و کارآمد را تا سرعت موردنیاز چرخ دوچرخه می‌دهد. موتورهای گیربکس‌دار در هاب چرخ به‌طورمعمول کوچک‌تر هستند و حدود ۵۰٪ وزن کمتر از موتورهای مستقیم با قدرت مشابه دارند.

اگرچه انتخاب‌های مختلفی برای نوع ساختار گیربکس امکان‌پذیر است اما رایج‌ترین موتور پیشران با چرخ‌دنده سیاره‌ای است. اکثر موتورهای گیربکس‌دار موجود در بازار دارای یک چرخ آزاد[2] در داخل هستند و درنتیجه زمانی که از موتور استفاده نمی‌شود اصطکاک غلتشی برای موتور بسیار کم است. بااین‌حال، با این فن‌آوری، امکان نصب ترمز احیاکننده وجود ندارد. شکل ۱۸-۱ یک مثال از موتور گیربکس‌دار است.

1- Regenerative Braking System
1- Free wheel

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۸-۱: موتور با گیربکس سیاره‌ای [۹]

موتورهای گیربکس‌دار معمولاً یک نقطه‌ضعف دارند: چرخ‌دنده‌ها! به‌مرور زمان، ممکن است دندانه چرخ‌دنده‌ها خرد شود و حتی چرخ‌دنده‌های نایلونی تقویت‌شده درنهایت از بین می‌روند.

- **مقایسه موتور DD و گیربکس‌دار**

جمع‌بندی کلی موتورهای DD: آنها سریع‌تر هستند، اما گشتاور کمتری دارند، آنها بادوام‌تر هستند، درعین‌حال نیز سنگین‌تر بوده و کشش داشته و باعث کاهش کارایی پدال‌زنی می‌شوند و بازه‌ی مسافت پیموده شده آن‌ها در شارژ کامل کمتر است. موتورهای DD تقریباً ساکت هستند [۱۹].

جمع‌بندی کلی موتورهای گیربکس‌دار: دارای سروصدای بوده اما کم و کوچک هستند. تقریباً هیچ کششی در هنگام پدال‌زنی وجود ندارد، اما حداکثر سرعت آن‌ها کم‌تر است و در مقابل گشتاور بیشتری تولید می‌کنند که منجر به صعود سریع‌تر از تپه و شتاب گیری بهتر می‌شود. چرخ‌دنده‌های نایلونی در اثر استفاده زیاد فرسوده می‌شوند و چرخ‌دنده‌ها در اثر چرخیدن سروصدا ایجاد می‌کنند [۱۹]. مزایا و معایب این نوع موتورها به‌طور خلاصه در جدول ۲-۱ آورده شده است.

جدول ۲-۱: مزایا و معایب موتورهای **DD** و گیربکس‌دار [۹] [۱۹]

	مزایا	معایب
موتور DD	✓ سریع‌تر ✓ بی‌صداتر ✓ بادوام (قطعات متحرک کم) ✓ امکان نصب ترمز احیاکننده	× کشش بیشتر در هنگام پدال زدن × حجم بزرگ‌تر × بازه‌ی کمتر × سنگین‌تر
موتور گیربکس‌دار	✓ گشتاور بیشتر ✓ کشش کمتر ✓ حجم کوچک‌تر ✓ سبک‌تر	× سرعت حداکثری کمتر × سروصدای بیشتر × عدم امکان نصب ترمز احیاکننده × دوام کمتر (قطعات متحرک بیشتر)

۱-۵- جمع‌بندی

در این فصل مروری بر مباحث کلی مطرح در زمینه دوچرخه‌های برقی انجام شده است. معیار های اساسی برای

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

انجام این بررسی و مرور عبارتند از:

۱. کاربرد
۲. سیستم کنترلی
۳. موقعیت قرارگیری موتور در بدنه دوچرخه

در این فصل تلاش بر جمع‌بندی اطلاعات کلی پیرامون دوچرخه‌های برقی بوده است. از این رو انواع کاربردهای آنان در شهر، جاده، کوهستان و ... بررسی شده است. همچنین به سیستم‌های کنترلی موجود برای انواع دوچرخه‌های برقی پرداخته شده و به تفصیل توضیح داده شده اند. مورد اساسی دیگری که برای طراحی دوچرخه‌های برقی مطرح است، نحوه قرارگیری موتور در بدنه دوچرخه است، لذا از این منظر انواع دوچرخه‌ها بررسی شده اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۲- اجزاء الکتریکی و مشخصه‌های دوچرخه برقی

۲-۱- مقدمه

یک دوچرخه برقی از اجزای الکتریکی و مکانیکی مختلفی تشکیل شده است که در کنار یکدیگر ساختار واحدی را ایجاد می‌کنند. در طراحی یک دوچرخه برقی باید مشخصه‌های عملکرد دوچرخه و همچنین خواسته‌های مورد انتظار از آن مثل گشتاور تولیدی، شیب پیمایی، مدت زمان عملکرد و ... مورد توجه قرار گیرند. در این فصل اجزاء الکتریکی دوچرخه که شامل موتور محرکه و سایر اجزایی که برای کنترل الکتروموتور نیاز است، معرفی می‌شوند. سپس به طور خاص به معرفی مشخصه‌های الکتروموتور دوچرخه پرداخته می‌شود و در ادامه مباحث طراحی و خواسته‌هایی که باید برآورده شود معرفی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲- اجزای الکتریکی دوچرخه برقی

دوچرخه‌های برقی از ادوات مختلفی تشکیل‌شده‌اند، به‌طور مثال موتور، انواع گوناگون سنسور، کنترل‌کننده، باتری و ... . در این بخش از گزارش به معرفی و بررسی این اجزا پرداخته می‌شود [۹].

۲-۲-۱- موتور الکتریکی در دوچرخه برقی

پیش‌تر بیان شد که فرق دوچرخه‌های برقی با دوچرخه‌های معمولی در اجزای الکتریکی آن از قبیل موتور الکتریکی برای سیستم نیروی محرکه آن است. موتور بخش مهمی از دوچرخه برقی را تشکیل می‌دهد، زیرا مسئولیت حرکت دوچرخه دارد. موتور دوچرخه برقی را می‌توان با استفاده از فن‌آوری هاب[1]- موتور (قرارگیری موتور در مرکز چرخ) با چرخ جلو و یا عقب یکپارچه نمود و یا می‌توان آن را مستقیماً زیر پدال قرار داد (دوچرخه برقی با موتور Mid-Drive).

از بین انواع مختلف موتور، موتورهای DC[2] و موتورهای بدون جاروبک[3] (BLDC) رایج‌ترین نوع هستند که در دوچرخه برقی کاربرد دارند. بااین‌حال، موتورهای BLDC تا ۹۰٪ بازار دوچرخه برقی را به خود اختصاص داده‌اند. این نوع موتور در مقایسه با نوع جاروبک‌دار سریع‌تر، تمیزتر، راندمان بیشتر، قابل‌اطمینان و بی‌صداتر است.

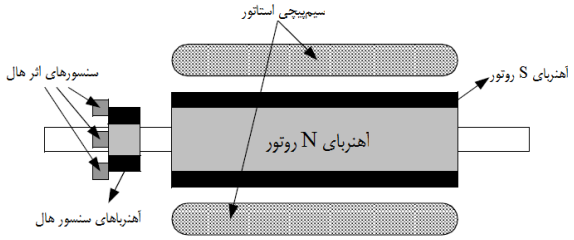
- **موتور BLDC**

موتور BLDC یک نوع موتور سنکرون است؛ یعنی میدان مغناطیسی ناشی از استاتور در فرکانس مشابه با فرکانس روتور می‌چرخد؛ بنابراین، برخلاف موتورهای القایی "لغزش" وجود ندارد. موتورهای BLDC دارای روتور متشکل از آهنرباهای دائم و سیم‌پیچی‌های استاتور است. این ساختار اجازه‌ی حذف جاروبک‌ها و کموتاتورها را می‌دهد و در عوض نیاز به کنترل الکترونیکی است که سیم‌پیچ موردنظر را تغذیه نماید. به همین علت لازم است موقعیت روتور توسط سنسورهای اثر هال[4] یا سنسورهای نوری تعیین گردد. شکل ۱-۲ برش عرضی موتور BLDC را نشان می‌دهد. حسگرهای اثر هال به استاتور متصل می‌شوند و به‌منظور تسهیل در نصب این سنسورها، برخی موتورها دارای آهنرباهای

1- Hub
2- BDC
3-Brush Less DC
4- Hall Sensor

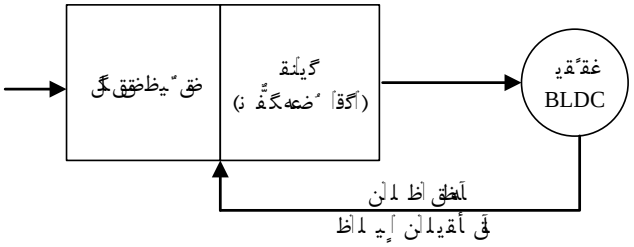
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

سنسور هال هستند. این آهنرباها، کپی کوچکی از روتور هستند و درنتیجه، هر زمان که روتور بچرخد آهنرباهای سنسور اثر مشابه با آهنرباهای اصلی از خود نشان می‌دهند. وقتی قطب‌های مغناطیسی در نزدیکی حسگرهای هال قرار می‌گیرند، آن‌ها سیگنال بالا یا پایین را می‌دهند و بنابراین نشان می‌دهند که قطب N یا S از نزدیکی حسگرها عبور می‌کند. معمولاً موتورها به سه حسگر اثر هال مجهز شده‌اند.



شکل ۱-۲: برش عرضی موتور **BLDC**[۹]

علاوه بر این، سیگنال‌های حسگرهای اثر هال به کنترل‌کننده موتور که وظیفه تعیین ترتیب تغذیه سیم‌پیچ مناسب استاتور را از طریق کلیدهای قدرت بر عهده دارد، فرستاده می‌شود. شکل ۲-۲ مثالی برای این نوع سیستم کنترلی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: دیاگرام کنترل موتور **BLDC**[۹]

مقایسه‌ی ویژگی‌های اصلی و مشخصه‌های دو موتور DC همراه با جاروبک و بدون جاروبک در جدول ۱-۲ به‌طور خلاصه آورده شده است. در بخش‌های پیش رو به انواع دوچرخه برقی بر اساس نحوه و موقعیت قرارگیری موتور الکتریکی در آن‌ها پرداخته می‌شود.

جدول ۱-۲: مقایسه‌ی موتورهای **Dc** همراه با جاروبک و بدون جاروبک [۹]

ویژگی	موتور BLDC	موتور DC با جاروبک
ارتباط	الکترونیکی	جاروبک
نگه‌داری و طول عمر	طول عمر بیشتر، نگه‌داری هم و یا عدم نیاز به نگه‌داری	طول عمر کمتر، نگه‌داری دوره‌ای
راندمان	زیاد	متوسط
اینرسی روتور	اینرسی کم- بهبود پاسخ دینامیکی	اینرسی زیاد- محدودسازی مشخصه‌های دینامیکی
هزینه	زیاد	کم
کنترل	پیچیده و گران	ارزان و ساده
کنترل‌کننده	همیشه لازم	اگر سرعت متغیر مهم باشد- لازم

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲-۲-۲- سنسور در سیستم PAS

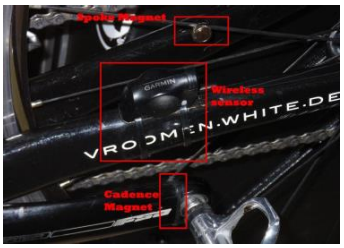
سنسورها از اجزای بسیار مهم دوچرخه‌های برقی هستند، زیرا وظیفه‌ی آن‌ها جمع‌آوری اطلاعات با توجه به مشخصه‌های فعلی دوچرخه و ارسال آن‌ها به کنترل‌کننده است. کنترل‌کننده اطلاعات دریافتی را آنالیز کرده و بر اساس آن دستورات لازم را به موتور و باتری دوچرخه ارسال می‌کند؛ بنابراین، انتخاب دقیق و محافظت درست از سنسورها، برای عملکرد خوب دوچرخه برقی واجب و حیاتی است [۹].

همان‌طور که در بخش‌های گذشته اشاره شد، بر اساس قوانین اتحادیه اروپا، موتور دوچرخه تنها با پدال‌زنی کار می‌کند. تشخیص اینکه آیا سنسورهای کدِنس یا گشتاور می‌توانند استفاده شوند باید به ، تفاوت‌های بزرگ در عملکرد و ویژگی‌ها آن‌ها توجه شود [۹].

- **سنسور کَدِنس**

سنسور کَدِنس پایه‌ای از آهنربا بر روی قسمت کِرَنک دوچرخه استفاده می‌کند. به هنگام پدال‌زدن سیگنال ارسالی از این سنسور سبب روشن شدن موتور می‌گردد [۲۰].

محبوب‌ترین نوع سنسور کَدِنس ترکیبی از سنسور سرعت و کَدِنس است که توانایی اندازه‌گیری هر دو پارامتر (سرعت و کَدِنس) را دارد. سنسور Garmin GSC10 یک نمونه از این سنسور است. همان‌طور که در شکل ۳-۲ نشان داده‌شده است این سنسور شامل سه قسمت می‌شود: آهنربای اسپوک[1]، آهنربای کَدِنس و پاد الکترونیکی که در بین این دو آهنربا نصب شده تا بتواند سرعت و کَدِنس را ارزیابی کند.



شکل ۳-۲: سنسور **Garmin GSC10**[۹]

اگرچه سنسورهای کَدِنس این قابلیت را دارند که در هر لحظه، رکاب زدن دوچرخه‌سوار را تشخیص دهند و می‌توان از آن‌ها در دوچرخه‌های برقی برای این منظور استفاده نمود، اما همچنان بهترین راه‌حل برای این هدف نیستند. یکی از مشکلاتی که در صورت استفاده از این حسگر با آن می‌توان مواجه شد این است که وقتی دوچرخه‌سوار شروع به حرکت می‌کند، موتور می‌خواهد با قدرت کامل روشن شود. بااین‌حال، در حین بالا رفتن از تپه پدال‌زدن کند می‌شود و سنسور کَدِنس اطلاعاتی برای دادن قدرت کم‌تر از جانب موتور به کنترل‌کننده ارسال می‌کند، درحالی‌که در واقعیت به قدرت بیشتری برای صعود لازم است[۹].

بااین‌حال، این نوع سنسور به دلیل قیمت مقرون‌به‌صرفه آن، همچنان توسط سازندگان دوچرخه‌های برقی با سیستم PAS به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. قیمت سنسور Garmin GSC10، سنسور ترکیبی کَدِنس و سرعت، در وب‌سایت رسمی برابر ۶۰ دلار است، اما می‌توان سنسورهای برندهای دیگر را حتی با قیمت ارزان‌تر پیدا نمود [۹].

1- Spoke

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- **سنسور گشتاور**

با هدف تجربه نمودن سواری بهتر و کنترل بیشتر، در دوچرخه‌های برقی گران‌قیمت از سنسورهای گشتاور استفاده می‌شود. اساساً، سنسور گشتاور فشار وارد بر پدال‌ها از جانب دوچرخه‌سوار را اندازه‌گیری می‌کند و بر مبنای آن به موتور میزان توان موردنیاز را اطلاع می‌دهد؛ بنابراین، سنسور گشتاور در مقایسه با سنسور کَدِنس، قدرت را بسیار نرم‌تر اعمال می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، اگر دوچرخه‌سوار به سرعت پدال بزند، قدرت کمتری از سمت موتور اعمال می‌شود و در شرایط پدال زنی آهسته دوچرخه‌سوار، موتور قدرت بیشتری برای رفع کمبود توان اعمال می‌کند.

انواع مختلف سنسورهای گشتاور در بازار وجود دارد: سنسور توپی تنه[1]، سنسور چرخِ دنده‌ای بر زنجیر[2]، سنسور سنجش فشار در محور عقب[3]، سنسور رکاب[4] و سنجش فنر[5] [۹].

۱- سنسور توپی تنه

این نوع سنسورها به بخش توپی تنه دوچرخه متصل می‌شوند و غیرقابل روئیت هستند (شکل ۴-۲). چندین سازنده این نوع سنسورها برای دوچرخه‌های برقی مانند Thun، NCTE یا Bafang وجود دارد و برای هر یک از آن‌ها فن‌آوری مورداستفاده می‌تواند کمی متفاوت باشد. بااین‌وجود، از آن‌ها معمولاً در برابر آب‌وخاک محافظت می‌شود و قادر به کار در دماهای پایین و بالا هستند. همچنین، نیازی به نگهداری و کالیبراسیون مجدد ندارند.



شکل ۴-۲: سنسور توپی تنه به نام **X-Cell RT**[۹]

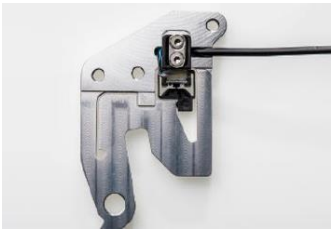
اگرچه این نوع سنسورها دارای مزایای فراوانی هستند و برای دوچرخه برقی مفید هستند، اما بزرگ‌ترین عیب آن‌ها احتمالاً قیمت بالا آن‌ها است که می‌تواند تا ۲۴۵ یورو باشد.

۲- سنسور چرخِ دنده‌ای بر زنجیر

یک مثال برای این نوع سنسور، TMM4 از شرکت IDbike است. به‌گونه‌ای طراحی شده تا تنش و فشار بر زنجیر را حس کند و درنتیجه گشتاور تولیدشده پنجه‌رکاب توسط دوچرخه‌سوار را اندازه‌گیری کند. شکل ۵-۲ نشان می‌دهد که سنسور را می‌توان به‌طور کامل توسط یک صفحه پوشاند تا از آن در مقابل عوامل خارجی محافظت کند و عملکرد آن را بهبود بخشد.

1- Bottom bracket sensor
2- Idler wheel on chain sensor
2- Strain gauge on rear axle sensor
3- Crank sensor
4- Spring gauge

DOI: 10.30503/nripress.2020.312




شکل ۵-۲: الف) سنسور **TMM4**- ب) سنسور **TMM4**[۹] در دوچرخه

اصول کار این سنسور مبتنی بر صفحه سنسور است؛ یعنی، انحراف صفحه که توسط نیرو زنجیر ایجاد شده است، اندازه‌گیری می‌شود که منجر به اندازه‌گیری گشتاور حاصل از عملکرد دوچرخه‌سوار می‌شود. سنسور خود شامل یک برد چاپی مدار، آهنربا و یک پیچ تنظیم کوچک است.

۳- سنسور سنجش فشار در محور عقب

این سنسور توسط BionX مورداستفاده قرار می‌گیرد که یک شرکت تولیدکننده کیت‌های دوچرخه برقی و همچنین محصولات جداگانه برای تبدیل دوچرخه معمولی به دوچرخه برقی است. آن‌ها با استفاده از فن‌آوری سنجش فشار (PSG[1]) که در موتور قرار دارد، کار می‌کنند. بدین ترتیب، عملکردی نرم فراهم می‌کند. با توجه به اینکه سنسور بخشی از موتور است، امکان خرید آن به‌صورت جداگانه وجود ندارد. شکل ۶-۲ مثالی از یک موتور در هاب چرخ برای دوچرخه برقی همراه با سنسور ساخت شرکت BionX را نشان می‌دهد.



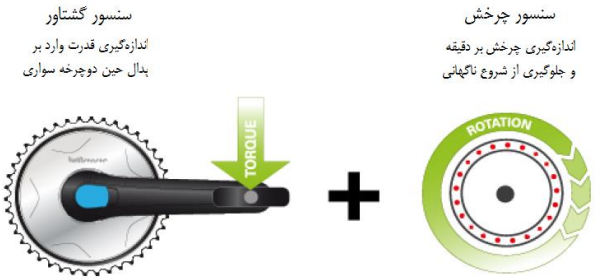
شکل ۶-۲: موتور در هاب شرکت **BionX** سری **D**[۹]

۴- سنسور رکاب

این سنسور ترکیبی از سنسور چرخش و سنسور گشتاور است که به‌طور مداوم فشار روی پدال را کنترل می‌کند (شکل ۷-۲). علاوه بر این، با این اطلاعات کنترل‌کننده قادر به محاسبه دقیق میزان قدرت لازم موتور برای نگهداری سرعت موردنظر چرخ می‌باشد. ترکیبی از سنسورهای گشتاور و چرخش، باعث عملکردی نرم و طبیعی می‌شود؛ علاوه بر این، با توجه به اینکه گشتاور در اولین نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌گردد که بر آن وارد می‌شود؛ لذا، دارای دقت بالای اندازه‌گیری خواهد بود.

1- Proven Strain Gauge

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲-۷: سنسور دوقلو شرکت **ST Suntour**

۵- سنجش فنری

این نوع سنسور گشتاور در دوچرخه‌های ساخت شرکت Stromer استفاده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است، ساختار آن بسیار ساده بوده و شامل یک فنر و یک سنسور است که باید زیر دو شاخ چرخ عقب (در Dropout) دوچرخه نصب گردد.



شکل ۲-۸: سنسور سنجش فنری شرکت **Stromer**[۹]

۲-۲-۳- سنسور اثر هال

سنسورهای هال نوعی از سنسورهای مغناطیسی هستند که حضور میدان مغناطیسی را تشخیص می‌دهند. عملکرد این سنسورها به‌گونه‌ای است که جریان الکتریکی از یک پد آهنی می‌گذرد. زمانی که میدان مغناطیسی در نزدیکی این صفحه باشد، الکترون‌ها توسط میدان مغناطیسی بر روی پد آهنی به یک سمت منتقل می‌شوند. در این صورت بار صفحه در یک سمت مثبت و در سمت دیگر منفی خواهد بود. این عدم تعادل در بارها می‌تواند به‌عنوان ولتاژ (در سراسر پد) اندازه‌گیری شود. هنگامی‌که مقدار این ولتاژ زیاد است یعنی میدان مغناطیسی در نزدیکی وجود دارد و زمانی که ولتاژ کم است هیچ میدان مغناطیسی وجود ندارد.

- سنسور اثر هال در موتور

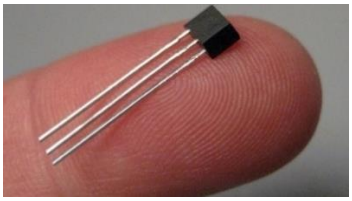
علاوه بر سنسورهای سرعت و گشتاور، سنسور دیگری با توجه به نوع موتور دوچرخه، BLDC، کاربرد دارد که به سنسور اثر هال[1] معروف است (شکل ۲-۹-الف). در اکثر موتورهای دوچرخه برقی سنسور اثر هال وجود دارد. سنسور اثر هال در این موتورها شامل سنسورهای مغناطیسی هستند که به کنترل‌کننده برای دانستن موقعیت موتور در حالت چرخش کمک می‌کنند [۲۱].

بنابراین چگونه این سنسور در موتور استفاده می‌شود؟ برای کنترل موتور دوچرخه برقی، کنترل‌کننده نیاز به

1- Hall effect sensor

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دانستن موقعیت موتور در هر لحظه از زمان را دارد تا بتواند موتور را به چرخیدن وا دارد. معمولاً از سه سنسور هال استفاده می‌شود (شکل ۹-۲-ب)، به‌گونه‌ای که اگر سیگنال ارسالی از سنسور زیاد باشد، یعنی یکی از آهنرباهای موتور همان لحظه از جلوی سنسور عبور کرده است و اگر این سیگنال کم باشد، یعنی آهنربای مگنت از آنجا گذشته است [۲۱].



(الف)



(ب)

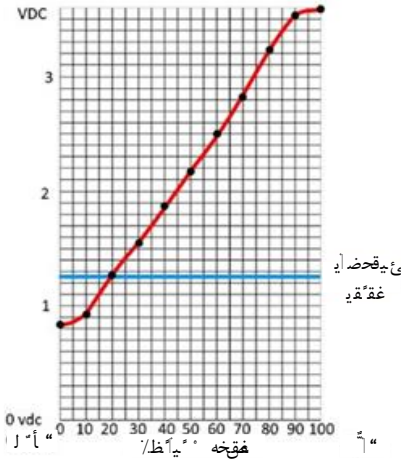
شکل ۹-۲: الف) سنسور اثر هال سه پایه- ب) سنسور اثر هال در موتور دوچرخه

- سنسور اثر هال در تراتل

همان‌طور که در بخش دوچرخه‌های PDB بررسی شد، انواع مختلفی از تراتل (شستی، تمام پیچشی، نیمه پیچشی و ...) برای استفاده در دوچرخه برقی وجود دارد. هیچ‌کدام از این تراتل‌ها را نباید با تراتل نوع مقاومتی که با یک پتانسیومتر برخلاف سنسور اثر هال کار می‌کند اشتباه گرفت [۲۲].



شکل ۱۰-۲: تراتل و سنسور هال [۲۲]



شکل ۱۱-۲: پروفیل ولتاژ خروجی سنسور اثر هال تراتل [۲۲]

هدف از این سنسور ارائه اطلاعات ولتاژ مربوط به موقعیت تراتل و/یا سرعت موردنظر به کنترل‌کننده دوچرخه برقی است. ولتاژ خروجی این سنسور موجود در تراتل معمولاً از ۰٫۸ vdc تا ۳٫۵ vdc با ولتاژ ورودی تقریبی ۴٫۳ vdc و آمپر خیلی کم در حدود ۶ میلی‌آمپر، تغییر می‌کند (شکل ۱۱-۲).

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲-۲-٤- تراتل در دوچرخه‌های PDB

در اینجا به مرور برخی از تراتل‌های مختلف در دوچرخه‌های برقی پرداخته می‌شود. می‌توان تراتل‌ها را به سه زیرگروه دسته‌بندی نمود:

۱- دکمه‌ای

یکی از انواع ارزان و ابتدایی تراتل‌ها، نوع دکمه‌ای آن است (شکل ۱۲-۲).



شکل ۱۲-۲: تراتل دکمه‌ای [۱۷]

خصوصیات این نوع تراتل عبارت است از:

✓ استفاده آسان

برای استفاده از این نوع، نیاز به مهارت خاصی نیست. با فشار دادن آن، نیرو از سمت موتور تأمین می‌گردد و زمانی که دوچرخه به شتاب موردنظر رسید، با رها کردن دکمه، تأمین نیرو از سمت موتور متوقف می‌شود و یا می‌توان در تمام طول مسیر از دکمه را فشار داد و از نیروی موتور بهره برد. بعضی از تراتل‌های دکمه‌ای، در واقع کلید روشن/ خاموش هستند و قابلیت دستیابی به سرعت‌های متغیر را ندارند.

✓ نصب و نگه‌داری آسان

ازآنجاکه این دکمه بخشی از کابل دوچرخه برقی به‌حساب می‌آید، هیچ سیم اضافی، شماتیک پیچیده‌ای و هیچ اجزای اضافی به‌عنوان خطر خرابی در جاده‌ها وجود ندارد. این قطعه بسیار قابل‌اعتماد است.

✓ موقعیت قرارگیری قابل تنظیم

دکمه خاکستری کوچک به نوار تسمه‌ای متصل می‌شود که اجازه‌ی نصب آن را در هرکجا که برای دوچرخه‌سوار و دوچرخه راحت‌تر است، می‌دهد.

✓ امنیت

بیشتر تراتل‌های دکمه‌ای موجود از نوع کلید "روشن" هستند که در عمل ممکن است بسیار خطرناک باشند؛ زیرا در بعضی مواقع نیاز به توقف اضطراری پیش می‌آید و این در حالی است که موتور روشن است. این نوع از سیستم‌ها نیاز به ترمز برای غیرفعال شدن دارند. به همین منظور تراتل‌های دکمه‌ای ساخته‌شده‌اند که اجازه قطع نیرو از سمت موتور برای ترمز گیری در هر موقعیتی را بدون نیاز به تغییر هر کدام از کلیدها و یا تغییر برنامه می‌دهد [۲۳].

۲- شستی

همان‌طور که از نامش پیداست، این نوع تراتل با استفاده از شست کار می‌کند (شکل ۱۳-۲) و شامل بازو کوچکی از فرمان به سمت دوچرخه‌سوار است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۳-۲: تراتل شستی [۲۴]

تراتل شستی، یکی از کم آزارترین انواع تراتل است. یکی از خصوصیات بارز آن، عدم ایجاد تداخل با اهرم‌های ترمز یا تعویض دنده است. فقط گاهی اوقات با اهرم تعویض دنده تداخل کند، اما این موضوع با کمی چرخاندن اهرم تراتل شستی به بالا یا پایین قابل حل شدن است. استفاده از تراتل شستی بیشترین آزادی را برای متعلقات روی فرمان در اختیار می‌گذارد؛ مانند چراغ‌ها و آینه‌ها. همچنین امکان تعویض فرمان را به دوچرخه‌سوار می‌دهد. دیگر مزیت غیرمنتظره آن، افزایش میزان امنیت آن است. همان‌طور که در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود، احتمال استفاده تصادفی از تراتل در انواع دیگر بیش‌تر است .

عیب اصلی این تراتل، خستگی انگشت شست است. اگرچه این مشکل، چندان جدی به نظر نمی‌آید ولی بعد از مدت طولانی دوچرخه‌سواری، افراد بسیاری از این موضوع و درد در انگشت شست خود به دلیل نگه‌داشتن اهرم تراتل شستی در کل زمان سواری شکایت می‌کنند. برخلاف دیگر تراتل‌ها که بار را بر روی کل دست گسترش می‌دهند، در این نوع، تمام نیروی بازگشت فنر تنها بر روی انگشت شست قرار می‌گیرد. یکی دیگر از معایب، الزام دوچرخه‌سوار به گرفتن دسته با یک انگشت کم‌تر است. گرفتن بهترِ دسته فرمان منجر به کنترل بهتر دوچرخه برقی می‌گردد، به‌خصوص در موقعیت اضطراری که تنها چند میلی‌ثانیه برای واکنش نشان دادن فرصت وجود دارد. عیب دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود، استفاده از این تراتل در زمستان‌های بسیار سرد است. درحالی‌که چهار انگشت به دور دسته‌فرمان پیچیده شده و به گرم ماندن یکدیگر کمک می‌کنند، انگشت شست به‌تنهایی در معرض سرمای زیاد قرار می‌گیرد. ترکیب هوای بسیار سرد و یک دوچرخه برقی، یک انگشت شست یخ‌زده را حاصل می‌شود. البته این عیب به موقعیت جغرافیایی ناحیه کاربری دوچرخه بستگی دارد [۲۴].

۳- پیچشی

نوع دیگر از تراتل‌ها، نوع پیچشی آن است که خود به دو نوع دیگر تقسیم‌بندی می‌گردد:

أ. تمام پیچشی

تراتل‌های تمام پیچشی به نوعی نقطه مقابل تراتل‌های شستی هستند که بزرگ‌ترین نوع تراتل نیز به شمار می‌آیند و با استفاده از تمام دست، کار می‌کنند (شکل ۱۴-۲). تراتل تمام پیچشی تمامی انتهای فرمان را در برمی‌گیرد و به‌طور کامل جایگزین دسته‌فرمان می‌شود. برای استفاده از آن دوچرخه‌سوار باید آن را به سمت خود بپیچاند.



شکل ۱۴-۲: تراتل تمام پیچشی [۲۴]

هرکسی که موتورسیکلت و یا موپد سوار شده باشد، با نحوه کار این تراتل آشنایی دارد. بسیاری از افراد تراتل تمام

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

پیچشی را ترجیح می‌دهند، زیرا در آن از تمام دست و انگشتان بر روی دسته استفاده می‌شود که اجازه نگه‌داشتن تراتل، کنترل بهتر و استفاده از مچ به‌جای شست را می‌دهد.

بااین‌حال، به همین دلیل بسیاری از مردم از اینکه تراتل تمام پیچشی منجر به درد مچ دست می‌گردد، شکایت دارند؛ همان‌طور که تراتل شستی سبب پیدایش درد و خستگی در شست دوچرخه‌سوار می‌گردد. یکی دیگر از ضعف‌های تراتل‌های تمام پیچشی، درگیر شدن تصادفی آن‌ها است. همچنین به دلیل اینکه این نوع تراتل تمام انتهای دسته‌فرمان را در برمی‌گیرد، استفاده از آینه‌های انتهایی فرمان امکان‌پذیر نیست [۲۴].

ب. نیمه پیچشی

نوع نیمه پیچشی، در واقع برادر کوچک‌تر نوع تمام پیچشی است. نحوه استفاده و عملکرد آن‌ها دقیقاً مانند یکدیگر است با این تفاوت که نوع نیمه پیچشی تا انتهای فرمان را دربرنمی‌گیرد. (مانند شکل ۱۵-۲ تا نیمه دسته‌فرمان).



شکل ۱۵-۲: تراتل نیمه پیچشی [۲۴]

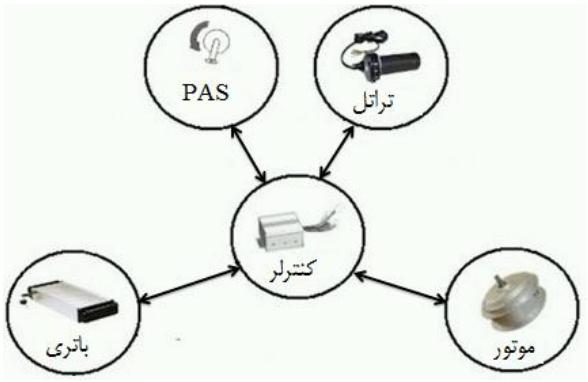
نیمه دیگر دسته‌ی تراتل نیمه پیچشی با یک دسته‌ی لاستیکی تطبیقی جایگزین می‌شود که ثابت در جای خود و متصل به فرمان قرار می‌گیرد و نمی‌پیچد. نوع نیمه پیچشی اکثر مزیت‌های نوع تمام پیچشی را دارد، مانند استفاده از چند انگشت که معمولاً انگشت شست و دو انگشت اول، برای پیچاندن تراتل و به حرکت درآوردن دوچرخه برقی استفاده می‌شوند.

تراتل نیمه پیچشی تا حدی نسبت به نوع تمام پیچشی در برابر استفاده تصادفی امن‌تر است. همچنین می‌توان از متعلقات بر روی انتهای دسته‌ی فرمان، ازجمله آینه انتهایی، بهره برد زیرا در نوع نیمه پیچشی، تراتل تمام دسته‌فرمان را دربرنمی‌گیرد. تراتل نیمه پیچشی یک‌راه‌حل منحصربه‌فرد برای جلوگیری از خسته شدن مچ دست دارد. در حین عملکرد، دوچرخه‌سوار می‌تواند تراتل را با سه انگشت گرفته و دو انگشت باقیمانده نیمه دیگر دسته را که محکم به‌فرمان متصل شده، بگیرند. این ترتیب گرفتن تراتل، مانع از برگشت به موقعیت صفر آن شده و به دوچرخه‌سوار اجازه گرفتن فرمان را درآن‌واحد می‌دهد و مانع از خستگی عضلات مچ و یا شست به دلیل فشار پی‌درپی می‌گردد [۲۴].

۲-۲-۵- کنترل‌کننده دوچرخه‌برقی

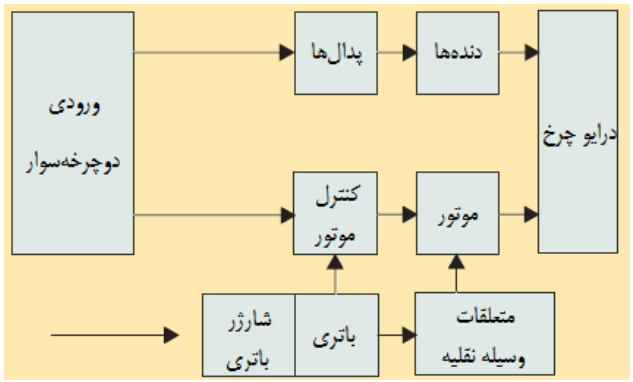
کنترل‌کننده را می‌توان به‌عنوان مغز دوچرخه برقی در نظر گرفت که اطلاعات را از سنسورهای هال مربوط به موقعیت روتور دریافت می‌کند تا موتور BLDC به نحوی مناسب تغذیه شود. علاوه بر این، داده‌ها از سایر منابع دیگر، مانند سنسورهای سرعت، سنسور تراتل، سنسور کدِنس یا سنسور گشتاور توسط کنترل‌کننده دریافت و تحلیل می‌شوند شکل ۱۶-۲). بر اساس اطلاعات ارائه‌شده، کنترل‌کننده قدرت موتور را تنظیم می‌کند. حفاظت‌های اضافه ولتاژ، اضافه جریان و حرارتی نیز از طریق کنترل‌کننده دوچرخه برقی انجام می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۶-۲: اتصال کنترل‌کننده به اجزای دوچرخه برقی [۲۵]

پیکربندی اولیه درایو یک دوچرخه برقی شامل یک کنترل‌کننده است که میزان شارش توان از باتری به موتور الکتریکی را کنترل می‌کند. این شارش توان به‌صورت موازی با توان پدال‌زنی دوچرخه‌سوار عمل می‌کند (شکل ۱۷-۲) [۱۱]



شکل ۱۷-۲: دیاگرام بلوکی درایو چرخ بصورت هیبریدی موازی [۱۱]

به‌طورکلی کنترل‌کننده وسایل نقلیه الکتریکی نقش واسطه میان باتری و موتور را ایفا می‌کند. جریان DC باتری را به فرم AC برای موتور تبدیل می‌کند. برخی از کنترل‌کننده‌ها نیز قادر به تبدیل موتور به یک ژنراتور هستند، به‌طوری‌که فن‌آوری ترمز احیاکننده (REGEN) نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده‌های مدرن توان موتور را تنظیم می‌کنند و بنابراین سرعت و شتاب وسیله نقلیه را از طریق مدولاسیون پهنای پالس تنظیم می‌کنند. این روش بر مبنای ادوات سوئیچینگ است، به‌عنوان‌مثال یکسوکننده‌های کنترل‌شده سیلیکونی که به سرعت جریان برق به موتور را متوقف می‌کنند. هنگامی‌که فواصل قطع و وصل کوتاه باشد، توان بالا به دست می‌آید و درصورتی‌که این فواصل طولانی باشد، توان کم‌تر خواهد است.

بر اساس نوع دوچرخه برقی، یعنی pedelec یا PDB و همچنین ویژگی‌های خاص که دوچرخه ممکن است داشته و یا نداشته باشد، کنترل‌کننده آن می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

کنترل‌کننده باید به قطعات دیگر نصب شود. نمی‌توان فقط یک نمونه را خریداری نمود و به هر موتور یا باتری دلخواه متصل کرد. در این صورت، در بهترین حالت سیستم کار نخواهد کرد اما ممکن است سبب سوختن و خرابی قسمت‌های دیگر شود [۹]. وظایف کنترل‌کننده در قبال دیگر اجزا عبارت است از [۲۵]:

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- نیروی محرکه

در ابتدا، کنترل‌کننده باید به سیستم نیروی محرکه متصل شود: Pedelec یا Power On Demand (تراتل). مدار داخلی آن باید بداند که آیا فقط باید یک جریان و ولتاژ خاصی را به موتور بر اساس ورودی از تراتل مدیریت کند یا باید از اندازه‌گیری‌های پیچیده‌ی توان انسانی استفاده کند تا بداند که چقدر توان از موتور برسد.

- باتری

در گام بعدی، کنترل‌کننده باید اطمینان حاصل کند که باتری‌ها تحت استرس بیش‌ازحد قرار نگیرند. به عبارت ساده، رفتار خوب با باتری. برای مثال، باتری لیتیوم-یون بسیار حساس به تخلیه بیش‌ازحد است. این کار بسیار مهم بوده و بسیاری از کنترل‌کننده‌های پیشرفته در بازار امروز این عمل را انجام می‌دهند. برخی از مواردی که کنترل‌کننده باید برای محافظت از باتری انجام دهد عبارت‌اند از:

- ✓ نگه‌داشتن جریان باتری در بین سطوح خاص
- ✓ عدم تخلیه بیش‌ازحد باتری
- ✓ تغییرات جریان و ولتاژ بر اساس اندازه‌گیری‌های دما
- ✓ اقدام علیه اضافه حرارت

ولتاژ کنترل‌کننده باید با ولتاژ پک باتری مطابقت داشته باشد. همچنین هرچه مقدار آمپر قابل تأمین توسط کنترل‌کننده بیش‌تر باشد، اجزای آن قطورتر و گران‌تر است. یک کنترل‌کننده باکیفیت می‌تواند موتور را بی‌صداتر و نرم‌تر و با بازده بیش‌تر راه بیندازد. کنترل‌کننده‌ها با آمپراژ بالا و ویژگی‌های کیفیت بالا گران هستند [۲۶].

- موتور

گام سوم، کنترل موتور است. بر اساس ورودی‌های باتری و تراتل / پدال، سیگنال‌ها به موتور منتقل می‌شود تا نهایتاً دوچرخه را حرکت دهد. کنترل‌کننده باید مطمئن شود که این سیگنال‌ها سبب اضافه‌بار موتور نمی‌شوند. هر نوع موتور نیاز به سیگنال‌های مختلف دارد. درنهایت، با تغییر میدان مغناطیسی یا جریان کوئل موتور، سرعت دوچرخه تغییر می‌کند.

سیگنال‌های موتور با جاروبک بسیار ساده است درحالی‌که سیگنال‌های موتور BLDC می‌تواند بسیار پیچیده باشد. به‌عنوان‌مثال، در مورد موتور با جاروبک، یک جزء با نام مدولاتور پهنای پالس (PWM) سیگنال کنترلی را از تراتل یا از اندازه‌گیری قدرت انسان گرفته و به یک شکل موج خاص با ولتاژ خاص و فرکانس که سرعت موتور را تعیین می‌کند، تبدیل می‌کند.

- ترمز احیاکننده

درنهایت، در برخی از سیستم‌های پیشرفته، کنترل‌کننده به‌گونه طراحی شده است تا موتور را به یک ژنراتور تبدیل کند و انرژی را به باتری منتقل کند. بهترین زمان برای استفاده از این نوع سیستم:

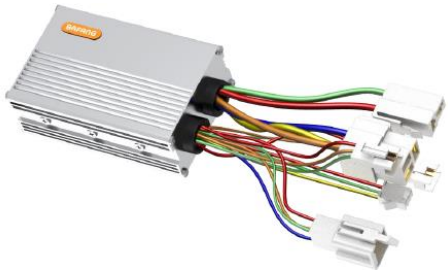
۱- در حال ترمز گیری

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲- هنگام پایین آمدن از تپه

کارایی این نوع سیستم نسبتاً کم است و مشخص نیست که پیچیدگی اضافی سیستم کنترل‌کننده واقعاً ارزشمند است یا خیر. کیت Bionx معروف‌ترین کیت دارای توانایی ترمز REGEN است.

بعضی از شرکت‌های تولیدکننده دوچرخه برقی، به‌طور مثال Bafang، کنترل‌کننده نیز تولید می‌کنند که به بهترین نحو مناسب موتورهای تولید خود باشد (شکل ۱۸-۲). علاوه بر این، موتورهای دوچرخه برقی با کنترل‌کننده یکپارچه نیز تولید می‌شوند.



شکل ۱۸-۲: کنترل‌کننده دوچرخه برقی شرکت **Bafang**[۹]

جدول ۲-۲ مروری از چند موتور و کنترل‌کننده برای دوچرخه‌های برقی ارائه می‌دهد و محصولات آن‌ها را مقایسه می‌کند.

جدول ۲-۲: مقایسه تولیدکنندگان مختلف موتورهای دوچرخه برقی و کنترل‌کننده‌ها [۹]

شرکت	Bafang	Bionx	Bosch	Ananda	ETM Power	Falco	Heinzmann
موتورها	در هاب چرخ و Mid-Drive	در هاب چرخ	Mid-Drive	در هاب چرخ	در هاب چرخ	در هاب چرخ	در هاب چرخ
کنترل‌کننده مجزا	✓	×	×	✓	×	×	✓
کنترل یکپارچه	×	✓	✓	✓	×	✓	×
سنسور گشتاور یا کَدِنس یکپارچه	×	گشتاور	گشتاور،کَدِنس و سرعت	سرعت یا گشتاور	×	گشتاور و/یا کِرَنک	×
سنسورهای مجزا	✓	×	×	✓	×	×	✓

با توجه به این واقعیت که شرکت مونتاژ کننده دوچرخه برقی به‌احتمال‌زیاد موتور را از شریک دیگری خریداری می‌کند، توصیه می‌شود که یک کنترل‌کننده از همان تولیدکننده موتور خریداری شود. این امر برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از موتور و کنترل‌کننده کمک خواهد کرد [۹].

۶-۲-۲- ترمز احیاکننده

ترمز احیاکننده از موتور به‌عنوان ژنراتور برای جذب انرژی جنبشی دوچرخه در هنگام ترمز گیری استفاده می‌کند. این انرژی به باتری هدایت و در آن ذخیره شده و عمر باتری و بازده سیستم را افزایش می‌دهد [۲۷]. ترمزهای احیاکننده در خودروهای الکتریکی بسیار رایج بوده و در دوچرخه‌ها کم است. ترمز احیا دوچرخه برقی معمولاً فقط

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

روشن یا خاموش است و قدرت متوقف کردن خفیفی دارد و علاوه بر ترمزهای دستی (مکانیکی) استفاده می‌شود. معمولاً هنگامی که فشار نرمی به دسته‌ی ترمز وارد شود ترمز احیا فعال می‌شود. برای استفاده از ترمز معمولی دوچرخه (مکانیکی) باید به دسته‌ی ترمز فشار بیشتری وارد شود [۲۸].

برای شروع، ساخت یک دوچرخه برقی دارای سیستم ترمز احیاکننده نیاز به استفاده از موتور DD دارد که نسبت به موتورهای گیربکس‌دار و موتورهای Mid-Drive بزرگ‌تر و سنگین‌تر است که در آن پدال‌زنی (به دلیل طراحی ذاتی آن‌ها) به‌واسطه‌ی پدیده‌ی گشتاور دندانه‌ای[1] دشوار می‌شود.

در بعضی از طراحی‌ها تلاش شده تا مقدار گشتاور دندانه‌ای به حداقل برسد، اما به هر حال هرچند کم، این مشکل وجود دارد. در سرعت‌های بالاتر این اثر از بین می‌رود و قابل‌چشم‌پوشی می‌شود، اما در لحظه‌ای که برای شروع حرکت پدال زده می‌شود (توقف کامل) این پدیده خود را نشان می‌دهد؛ بنابراین عالی نیست.

یک واقعیت جالب در مورد موتورهای DD این است که همه آن‌ها به نوعی دارای «احیاکنندگی» هستند، چه مطلوب باشد، چه نباشد که به دلیل نحوه‌ی اتصال آن‌ها است. در واقع این موضوع سرآغاز همه‌چیز است. مردم متوجه شدند که اگر در هر صورت انرژی برمی‌گردد، پس چرا از آن بهره نبرند؟ بنابراین " ترمز احیاکننده" به وجود آمد! در اصل یک نوع "اشکال" است که در حال حاضر "ویژگی" محسوب می‌گردد. به همین دلیل است که این موضوع خیلی گیج‌کننده است. ترمز احیاکننده یک ویژگی نیست که اضافه گردد، بلکه پدیده‌ای است که مدیریت می‌گردد.

موتورهای گیربکس‌دار و Mid Drive را نمی‌توان به‌راحتی برای ترمزهای احیاکننده استفاده نمود؛ زیرا این نوع موتورها دارای چرخ آزاد هستند که باعث قطع ارتباط میان چرخ عقب و موتور شده و مانع از چرخاندن موتور توسط این چرخ (و بنابراین احیا کردن انرژی) می‌شود. در حقیقت طراحی سیستم درایو موتور گیربکس‌دار یا Mid Drive که امکان ترمز احیا را فراهم کند، وجود دارد؛ اما لیست ترفندهای مهندسی موردنیاز برای این عمل طولانی بوده و به‌طورکلی توسط سازندگان مطرح دوچرخه برقی انجام نشده است.

در صدر تمام این چالش‌ها، مقدار توانی که با دوچرخه برقی بازگردانی می‌شود بسیار کم است. تحت بهترین شرایط، با بهترین طراحی و دوچرخه‌سوار که تمام تلاش خود را برای حداکثر سازی مقدار بازگشت توان می‌کند، می‌توان ۵-۱۰٪ ظرفیت باتری را برگرداند. یک دوچرخه‌سوار متوسط در حدود ۲٪ را می‌تواند مدیریت کند. چرا؟ زیرا دوچرخه‌های برقی وزن چندانی نداشته، مسافت خیلی طولانی را نمی‌پیمایند و تنها زمانی در حالت "احیاکنندگی" قرار می‌گیرند که در حالت پایین رفتن از یک تپه یا حالتی مشابه باشند؛ بنابراین، نیروی موجود برای تبدیل به الکتریسیته بسیار ناچیز است. علاوه بر این تعدادی از جزئیات مهندسی دقیق مانند این حقیقت که نمی‌توان الکتریسیته را به سرعت به باتری انتقال داد (که یعنی درصدی از انرژی احیاشده به‌سادگی به شکل گرما هدر می‌رود زیرا به‌طور فیزیکی نمی‌تواند به‌اندازه کافی، سریع به باتری منتقل گردد) و یا در حین ترمز گیری در سرعت بالا ۷۵٪ نیروی ترمز به‌جای چرخ عقب (جایی که موتور قرار دارد) به چرخ جلو می‌رود، نیز وجود دارند.

بنابراین، باید از موتورهای سنگین استفاده کرد ولی به همان اندازه که تلاش برای موتور می‌شود، انرژی بازگردانده نمی‌شود. در طی سال‌ها، بعضی از ایده‌های هوشمندانه برای به حداکثر رساندن مقدار انرژی بازگشتی وجود داشته و مانند تمام چالش‌های مهندسی، باید از ترکیب پول، وزن و قابلیت اطمینان برای این کار استفاده نمود.

1- Cogging Torque

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

به طور خلاصه می‌توان گفت که ترمز احیاکننده یک پدیده کاملاً واضح است که در وسایل نقلیه سنگین مانند خودروهای برقی عالی عمل می‌کند؛ اما دوچرخه برقی دارای تعادل ظریف بین توانایی و هزینه خود است و روش خوب و مقرون‌به‌صرفه برای ساخت یک دوچرخه با این توانایی (ترمز احیا) وجود ندارد. در بهترین حالت، این یک قابلیت اضافی است که در صورت انتخاب موتور DD در هر صورت وجود دارد. در بدترین حالت، این یک ویژگی است که بسیاری از دوچرخه‌سواران از آن بهره نمی‌برند [۲۹].

۲-۳- مشخصات الکتریکی دوچرخه برقی

در این بخش به معرفی پارامترهای الکتریکی دوچرخه برقی پرداخته شده است.

۲-۳-۱- گشتاور (نیوتن. متر)

گشتاور موتور نشان‌دهنده کشش (رانش) بوده و برای بالا رفتن از تپه مهم است. گشتاور بیشتر امکان شیب پیمایی بیشتری می‌دهد. نیروی کشش برابر با تقسیم گشتاور بر شعاع چرخ ($F=T/R$) است. چرخ با قطر کوچک‌تر نیروی کشش یا توانایی صعود بیشتری را با گشتاور مشابه می‌دهد. گشتاور در چرخ برای موتورهای Mid Drive باید به‌صورت زیر محاسبه گردد [۳۰]:

حداکثر گشتاور چرخ = حداکثر گشتاور × تعداد دندانه‌های دنده چرخ عقب/ تعداد دندانه‌های زنجیر چرخ

۲-۳-۲- توان (وات)

برای مقایسه دوچرخه‌ها باهم، دانستن نوع مقایسه بر اساس پیک توان یا مقدار دائمی آن مهم است. هنگامی‌که میزان قدرت یک موتور بیان می‌گردد در واقع میزان توان نامی موتور است. در واقع این میزان توانی است که می‌توان در طول روز موتور را تغذیه نمود درحالی‌که مشکل جدی برای موتور پیش نیاید.

آنچه آسان نیست، به‌دست آوردن میزان پیک توان موتور است. توان پیک مقداری است که می‌توان برای مدت کوتاهی به موتور اعمال گردد، بااین‌حال اگر برای مدت طولانی در این مقدار قرار گیرد، مشکل به وجود می‌آید و معمولاً سبب ذوب شدن عایق سیم فاز می‌شود اما ممکن است سبب ذوب شدن سنسورهای اثر هال و یا سیم‌پیچی‌های کلاچ گردد [۳۱]. مقدار به وات نشان‌دهنده توان (P) موتور است. توان برای سرعت بخشیدن به سواری در هر دو حالت مسیر مسطح و شیب‌دار مهم است. معمولاً حداکثر یا پیک توان بالاتر از توان نامی است [۳۰]. توان مصرفی برای راندن دوچرخه و دوچرخه‌سوار اولاً به دلیل غلبه بر مقاومت باد و بالا رفتن از تپه‌ها در سرعت‌های نرمال و ثانیاً برای اصطکاک تایر و یاتاقان است. اصطکاک تایر و یاتاقان، هرچند کوچک، می‌تواند برابر با اندازه‌ی مقاومت باد در سرعت‌های پایین باشد [۳۲].

مقدار واتی که موتور الکتریکی در هر لحظه استفاده می‌کند برابر است با ولتاژ باتری تغذیه‌کننده مدار ضرب در مقدار جریان از باتری به موتور. همان‌طور که استنباط می‌گردد، محاسبه‌ی توان پیک برای یک دوچرخه آسان است. کافی است تا ولتاژ باتری در حداکثر آمپراژی که دوچرخه می‌تواند تحمل کند، ضرب شود. حداکثر آمپری که دوچرخه می‌تواند تحمل کند، توسط کنترل‌کننده دوچرخه تعیین می‌گردد و معمولاً این مقدار بین ۱۵ تا ۳۰ آمپر است [۳۳].

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

میزان توان موردنیاز علاوه بر سه فاکتور کلی اشاره شده در بخش شیب پیمایی ، به وزن دوچرخه‌سوار نیز بستگی دارد [۳۴]. هرچه دوچرخه‌سوار سنگین‌تر باشد، توان بیشتری برای شتاب‌گیری دوچرخه لازم است.

۲-۳-۳- ولتاژ (ولت)

ولتاژ اثر مکانیکی بر عملکرد دوچرخه برقی ندارد. این پارامتر بر اساس ویژگی‌های الکتریکی موتور / کنترل‌کننده و سیم‌کشی تعیین می‌گردد. ولتاژ در باتری‌های لیتیومی، تعداد سلول‌های سری است.

توان برابر است با ولتاژ در جریان. هرچه ولتاژ بالاتر باشد، به جریان کم‌تری برای دریافت همان مقدار توان نیاز می‌شود. ولتاژ باید با مصالحه بین ایمنی و جریان نامی مدیریت شود. داشتن موتور یا باتری بالاتر، معنی عملکرد بالاتر یا بازه بیشتر را به‌خودی‌خود نمی‌دهد. ولتاژ به‌تنهایی هیچ‌یک از ویژگی‌های عملکرد دوچرخه برقی را نشان نمی‌دهد مگر اینکه آمپر موتور/کنترل‌کننده یا ظرفیت باتری (آمپرساعت) معلوم باشد. ولتاژ باتری ثابت نخواهد بود و بر اساس SOC[1] (حالت شارژ) متفاوت است. ولتاژ باتری ۳۶ ولتی در حالت کاملاً شارژشده برابر با ۴۲ ولت است و ولتاژ ۳۰ ولت حالت تخلیه باتری در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-٤- آمپرساعت

این ظرفیت جریان باتری است، حداکثر جریان که باتری می‌تواند به‌طور مداوم به مدت ۱ ساعت تخلیه شود. به‌طور مثال، از باتری با ظرفیت ۱۰ (Ah) می‌توان ۱۰ آمپر در ۱ ساعت و یا ۵ آمپر در دو ساعت کشید. این پارامتر بازه را تعیین می‌کند. بااین‌حال، برای مقایسه سیستم باتری در ولتاژ مختلف باید از چگالی انرژی باتری به وات‌ساعت (Wh) استفاده شود. زمانی که از سلول‌های لیتیومی با ظرفیت بالاتر یا از سلول‌های لیتیومی بیشتر به‌صورت موازی در پک باتری استفاده شود، آمپرساعت افزایش می‌یابد.

۲-۳-۵- وات‌ساعت

این ظرفیت انرژی باتری است. $Wh = Ah \times V$. به‌عنوان‌مثال، یک باتری (v) ۴۸ و (Ah) ۸٫۸، انرژی معادل (Wh) ۴۲۲٫۴ دارد که در حالت ایدئال می‌توان ۴۲۲ وات در یک ساعت از آن کشید [۳۰].

وات‌ساعت رنج عملکردی دوچرخه برقی، هزینه دوچرخه، وزن دوچرخه و ... را تعیین می‌کند که سه عامل مهم در خرید دوچرخه برقی هستند.

۲-۴- مباحث مورد نظر در طراحی دوچرخه برقی

بر سر راه طراحی و ساخت دوچرخه‌برقی چالش‌های بسیاری وجود دارد که باید بر اساس آن‌ها نوع طراحی دوچرخه و موتور آن، انتخاب موقعیت قرارگیری موتور و انتخاب نوع سیستم کنترلی آن صورت گیرد. در ادامه این بخش به بررسی برخی از این چالش‌ها پرداخته می‌شود.

1- State of charge

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲-٤-۱- شیب پیمایی[1]

شیب[2] با محاسبه نسبت "تغییر عمودی" به "تغییر افقی" بین (هر) دو نقطه متمایز در یک خط محاسبه می‌شود. گاهی اوقات این نسبت به‌عنوان یک نسبت (" پیمایش عمودی[3] بر پیمایش افقی[4]") بیان می‌شود و همان مقدار را برای هر دو نقطه متمایز در همان خط ارائه می‌دهد [۳۵].

۱. یک خط صعود می‌کند اگر از سمت چپ به راست، بالا رود. در این صورت شیب مثبت است.
۲. یک خط نزول می‌کند اگر از سمت چپ به راست، پایین رود. در این صورت شیب منفی است.
۳. اگر یک خط افقی باشد، شیب صفر است. این یک تابع ثابت است.
٤. اگر یک خط عمودی باشد، شیب نامشخص است.

- **شیب جاده یا راه**

حداکثر شیب قابل پیمایش، پارامتر بسیار مهم و مفیدی است که به هنگام انتخاب وسیله نقلیه باید به آن توجه نمود. ابتدا توضیحاتی درباره‌ی نحوه محاسبه شیب به‌صورت درجه و درصد (بدون واحد) ارائه می‌شود.

دو روش معمول برای توصیف شیب راه یا جاده وجود دارد. یکی از زاویه بین ۰ تا ۹۰ درجه است و دیگری توسط شیب به درصد بیان می‌شود. فرمول‌های تبدیل درصد شیب به درجه و بلعکس به‌صورت زیر هستند:

$$\text{(زاویه)} = \arctan\frac{slope}{۱۰۰٪} \qquad ۲-۱$$

$$slope = ۱۰۰\% \times \tan(\text{زاویه}) \qquad ۲-۲$$

زاویه و توابع مثلثاتی به درجه هستند. به‌طور مثال، شیب ۱۰۰٪ برابر با زاویه ۴۵° است.



شکل ۱۹-۲: مثال محاسبه درصد شیب [۳۶]

- **نوع قرارگیری موتور در دوچرخه برای پیمایش شیب**

هنگام برنامه‌ریزی و طراحی ساخت یک دوچرخه برقی، یکی از اولین سؤالاتی را که سازنده باید از خود بپرسد این

1- Grade ability
2- Slope
3- rise
4- run

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

است که چه مقدار توان موردنیاز است؟ یک نمونه ساخته‌شده عالی باید توان کافی برای بالا رفتن از بزرگ‌ترین تپه در مسیر رفت‌وآمد با سرعت موردنظر و همچنین بیشترین سرعت در مسیرهای هموار را داشته باشد [۳۱].

ساخت یک دوچرخه برقی با توان بیشتری نسبت به نیاز به این معنی است که مجبور به‌صرف هزینه بیشتر و حمل وزن اضافی است. همچنین ساختن یک دوچرخه برقی با توان کمتر بدرد نمی‌خورد [۳۱].

بزرگ‌ترین تصمیم که ابتدای طراحی و ساخت باید گرفته شود، نوع موتور است: DD، گیربکس دار و یا نوع Mid-Drive

- موتور DD در شیب کمتر از ۵٪ به‌خوبی کار می‌کند و نیاز به توان بیشتری نسبت به دو نوع دیگر برای بالا رفتن از شیب‌های تیزتر دارد. با موتور DD شیب پیمایی بیشتر از ۲۰٪ را باید فراموش کرد زیرا در آن لحظه به دلیل وات بالا، دیگر نمی‌توان با مسائل حرارتی مقابله کرد. برخی از موتورهای DD سنگین‌تر می‌توانند مقدار وات بسیار زیادی (۵۰۰۰+ وات) را برای دوره‌های زمانی کوتاه تحمل کنند و گرمای خود را به سرعت خاموش کنند. در حال حاضر هیچ موتور گیربکس‌داری در بازار وجود ندارد که بتواند در این سطوح توان قرار بگیرد.
- نوع گیربکس‌دار معمولاً نسبت تبدیل ۵ به ۱ داشته تا در تپه‌ها خیلی بهتر از موتورهای DD کار کنند. آنها می‌توانند شیب‌های ۱۰٪ و تندتر را بپیمایند اما در شیب‌های تندتر از این مقدار مشکلات جدی گرما پیش می‌آید. ازآنجایی‌که موتور در داخل محفظه هیدرولیکی قرار دارد، ممکن است به‌سرعت خنک نشود و درنتیجه در تپه‌های طولانی بیش از حد گرم شود. به‌سختی می‌توان بیش از چندین هزار وات را به این موتورها برای هر زمان بدون مشکلات جدی حرارت، داد.
- یک سیستم Mid-Drive برای پیمایش تپه بی‌رقیب است. تمام موتورهای الکتریکی در یک محدوده مشخصی از RPM به بهترین نحو کار می‌کنند و توانایی تغییر دنده‌ها به این معنی است که موتور در سرعت موردنظر می‌تواند حرارت را دفع کند و بیشترین توان را برای حداقل مقدار وات تولید کند. اگر به‌طور مرتب نیاز به صعود تپه‌های بلند که شیب آن‌ها ۱۰٪ یا تندتر باشد، استفاده از Mid-Drive گزینه مناسبی است. اکثر موتورهای Mid-Drive در حدود ۱۸ تا ۳۰ بار (برای ایجاد پدال زدن راحت) کاهش یافته و سپس برای دست‌یابی به سرعت بیشتر دوباره افزایش می‌یابد.

برای نوع DD و گیربکس‌دار، اندازه چرخ بسیار مهم است. اگر گشتاور بیشتر و توانایی بالا رفتن از تپه مهم باشد، چرخ‌های کوچک‌تر مناسب‌تر هستند. اگر ماکزیمم سرعت بالاتری نیاز باشد، از چرخ بزرگ‌تر استفاده می‌شود مگر اینکه در بازه‌ی توان موتور نباشد.

برای Mid-Drive-ها می‌توان اندازه حلقه زنجیر را تنظیم کرد تا نسبت دنده‌ای مناسب به دست آید. یک Mid-Drive عالی به این معنی است که در اکثر تپه‌ها بر روی دومین دنده سنگین[1] بالا می‌رود که هنوز بزرگ‌ترین دنده سنگین برای تپه‌های بسیار شیب‌دار است. هنگامی‌که در بالاترین دنده خود قرار دارد، باید بتواند به بالاترین سرعت در سراشیبی پایین آمدن از تپه دست یابد درحالی‌که پدال زدن راحت باشد [۳۱].

- **میزان توان موردنیاز**

1- Granny gear

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جواب این سؤال به‌راحتی به‌دست نمی‌آید و به سه معیار زیر بستگی دارد:

۱. حداکثر سرعت بر روی زمین مسطح

۲. شیب پیمایی با چه درجه و سرعتی

۳. نوع موتور DD، گیربکس‌دار و یا Mid-Drive

استفاده از سیستم DD نیاز به توان زیاد برای پیمایش شیب ۱۰٪ با سرعت ۳۲ کیلومتر بر ساعت دارد. این عمل توسط موتورهای بزرگ DD با ظرفیت ۲۰۰۰ وات یا بیشتر امکان‌پذیر است؛ اما باید دانست که یک موتور DD به کندی تحت بار بسیار زیاد می‌چرخد و به سرعت گرمای بیشتر از آنچه که قابل دفع باشد تولید می‌کند، مگر اینکه پر از سیال و یا دارای دریچه‌ی هوا باشد. یک سیستم DD بزرگ به‌خوبی به‌عنوان وسیله رفت‌وآمد کار می‌کند و می‌تواند در سرعت‌های بالا بسیار کارآمد باشد، اما در تپه‌های لغزنده توان بسیار زیادی برای پیمودن شیب تپه‌ها مصرف می‌کند.

یک سیستم گیربکس‌دار درون چرخ باید بتواند هر سه حالت پیمودن مسافت مسطح، سربالایی و سراشیبی را به‌شرط داشتن یک کنترل‌کننده و پک باتری به‌اندازه‌ی کافی بزرگ داشته باشد. در تپه‌های بزرگ موتور گیربکس‌دار به سرعت گرمای بیش‌تری نسبت به توانایی دفع حرارت خود تولید می‌کند.

تا کنون اثر شیب سطوح پیمایش بر روی توان و انتخاب نوع فن‌آوری قرارگیری موتور در دوچرخه برقی (DD، گیربکس‌دار و Mid-Drive) بررسی گردید. ذکر این مطلب نیز واجب است که استاندارد هر کشور برای توان و سرعت موتور نیز بر روی این انتخاب تأثیرگذار است.

به‌طور مثال در ایالات‌متحده آمریکا، قوانین فدرال توان دوچرخه برقی را به ۷۵۰ وات محدود کرده است که در این حالت می‌توان از هر مدل قرارگیری موتور در طراحی بهره برد ولی در اروپا یا استرالیا یا در بعضی از مناطق جهان که محدودیت ۲۵۰ وات بر روی دوچرخه‌ها وجود دارد بهتر است که از سیستم Mid-Drive استفاده شود. در توان‌های کم، موتور DD و گیربکس‌دار در اکثر تپه‌ها بی‌فایده هستند ولی Mid-Drive می‌تواند در پایین‌ترین دنده از پس این موضوع برآید [۳۱].

- **مشخصات یک نمونه دوچرخه برقی با قابلیت شیب پیمایی**



شکل ۲۰-۲: دوچرخه کاتالینا ۴۸ ولت ۵۰۰ وات [۳۷]

مشخصات کلی	مشخصات فنی
– دوچرخه کوهستانی برقی رنج زیاد ۴۸ ولتی	– موتور ۵۰۰ وات
– باتری لیتیومی پک با ۱۰٫۴ آمپرساعت (۱۵	– پک باتری لیتیومی ۱۰٫۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

آمپرساعت پک باتری انتخابی) – موتور همراه با کلاچ ۵۰۰ واتی در چرخ عقب – پیمودن ۱۱۲ کیلومتر با استفاده از PASسطح ۱ و مسیر مسطح و استفاده از سیستم کمکی پدال – تست دوچرخه تحت شرایط سرعت ثابت (۲۸ کیلومتر بر ساعت) به مدت ۴۵ دقیقه با شیب ۷-۸٪ – با باتری – سیستم دیجیتالی هوشمند PAS با LCD و پورت شارژ تلفن – سیستم تعویض دنده ۹ سرعت Shimano Altus – ترمزهای هیدرولیکی – تایرهای Kenda High End Beach – قاب و بدنه آلومینیومی- بدون زنگ – نگه‌دارنده‌ی نوشیدنی	آمپرساعت – ۴۸ ولت – باتری سبک‌وزن LiPo4 ۴۸ ولتی – سیستم درایو زنجیر چرخ، یا با موتور درون چرخ یا قدرت پدال – سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت در حالت استفاده از تراتل به‌تنهایی – شارژر ۴۸ ولت ۲ آمپرساعت، شارژر تائید شده با خروجی UL (زمان شارژ +/- ۳ ساعت)

۲-۴-۲- وزن دوچرخه برقی [۳۸]

اکثر مردم تصور می‌کنند که استفاده از موتور با توان بیش‌تر در دوچرخه برقی مفیدتر است. این در صورتی است که موتور بزرگ‌تر منجر سنگین‌تر شدن دوچرخه برقی شده و علاوه بر این موتور قدرتمندتر نیاز به باتری بزرگ‌تری نیز دارد تا بتواند همان مسافت قبلی (مشابه با دوچرخه سبک‌تر) را بپیماید که در این صورت به علت استفاده از باتری بزرگ‌تر، وزن دوچرخه افزایش می‌یابد.

پدال در دوچرخه برقی برای استفاده و کمک به موتور و یا استفاده از وسیله به‌صورت دوچرخه معمولی تعبیه شده‌اند. لذا، اگر دوچرخه برقی بیش‌ازاندازه سنگین باشد، پدال زدن به عملی سخت بدل خواهد شد.

- **تعادل درست**

دوچرخه برقی سنگین‌تر بیش‌تر به یک اسکوتر الکتریکی شباهت دارد و از طرفی به علت سنگینی انرژی زیادی مصرف می‌کند و برای پدال زدن اصلاً مناسب نیست؛ بنابراین برای دستیابی به یک عملکرد بهینه، یافتن تعادل مناسب میان قسمت‌های مختلف دوچرخه برقی مهم است.

از طرفی باید به یاد داشت که اگرچه با باتری بزرگ‌تر مسافت بیشتری را می‌توان طی نمود ولی زمانی که شارژ

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

باتری تمام شود و دوچرخه برقی به یک دوچرخه معمولی تبدیل گردد، باید وزن بیشتری را به علت باتری بزرگ‌تر با پدال زنی حمل نمود. در واقع باید در هنگام اتمام شارژ باتری مطمئن شد که همچنان می‌توان دوچرخه برقی را با پدال زدن به حرکت درآورد. از سویی دیگر، زمانی که صحبت از ۱ تا ۵ کیلوگرم وزن اضافه است، تأثیر آن به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای اغراق شده است.

- **سناریو معمول وزن دوچرخه**

سناریو وزن دوچرخه بر طبق شکل ۲۱-۲ به گونه زیر است:

وزن‌های معمول:

- وزن یک دوچرخه سبک از جنس آلومینیوم ~ ۱۰ کیلوگرم
- وزن اضافی برای اجزای قوی‌تر و بزرگ‌تر مانند تایرها ~ ۴ کیلوگرم
- وزن موتور
  - ✓ گیربکس‌دار یا Mid-Drive ~ ۴ کیلوگرم
  - ✓ DD ~ ۸ کیلوگرم
- وزن باتری
  - ✓ اگر باتری سرب اسید باشد ~ ۲۰ کیلوگرم
  - ✓ اگر لیتیومی باشد ~ ۳ کیلوگرم

فرض:

- وزن دوچرخه‌سوار ~ ۸۰ کیلوگرم

مقایسه وزن دوچرخه با دو نوع باتری نسبت به وزن دوچرخه‌سوار با موتور گیربکس‌دار یا Mid-Drive

حالت ۱. اگر باتری از نوع سرب- اسید باشد ~ ۳۷ کیلوگرم و یا تقریباً برابر با ۵۰٪ وزن دوچرخه‌سوار

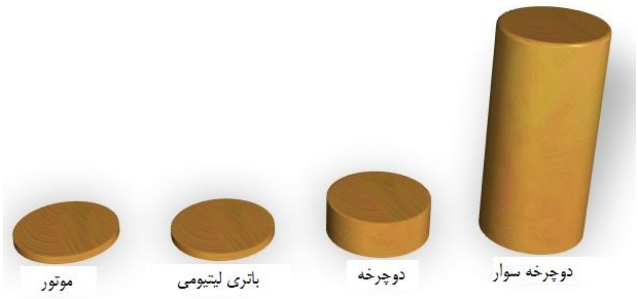
حالت ۲. اگر باتری از نوع لیتیومی باشد ~ ۲۱ کیلوگرم و یا ۲۵٪ وزن دوچرخه‌سوار

مقایسه وزن دوچرخه با دو نوع باتری نسبت به وزن دوچرخه‌سوار با موتور DD

حالت ۱. اگر باتری از نوع سرب- اسید باشد ~ ۴۲ کیلوگرم و یا تقریباً برابر با ۵۰٪ وزن دوچرخه‌سوار

حالت ۲. اگر باتری از نوع لیتیومی باشد ~ ۲۵ کیلوگرم و یا تقریباً ۲۵٪ وزن دوچرخه‌سوار

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۱-۲: سناریو وزن دوچرخه [۳۸]

می‌توان با مقایسه این چهار حالت دریافت که از نظر وزنی، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با یکدیگر بر اساس نوع باتری مصرفی دارند. بقیه تفاوت‌ها به‌اندازه‌ی تفاوت باتری‌ها بزرگ نیستند.

- **وزن دوچرخه‌سوار**

وزن دوچرخه‌سوار در بعضی مواقع ۲ تا ۸ برابر وزن دوچرخه برقی است (برخلاف اتومبیل یا موتورسیکلت که وزن سوار آن تنها یک وزن حاشیه‌ای از وزن کلی است)؛ بنابراین، در اغلب موارد وزن دوچرخه‌سوار بیشترین تفاوت را ایجاد می‌کند. باید وزن دوچرخه‌سوار را رکن مهم قرار داد زیرا رنج سرعت بر اساس آن نیز تعیین می‌گردد.

- **وزن مخزن باتری**

مدل‌های مختلفی از دوچرخه برقی وجود دارند که می‌توانند بیش از یک باتری را حمل نمایند. در چنین مدل‌هایی هر باتری کوچک‌تر بوده و فقط می‌تواند یک‌بار برای هر کار کوتاهی استفاده نمود.

- **تعادل و راحتی**

هنگام صحبت در مورد هدایت، تعادل و راحتی، دو رکن مهم هستند:

۱- باید مرکز ثقل پایین نگه‌داشته شود؛ یعنی نمی‌توان باتری‌ها و موتور را در هرجای دوچرخه قرار داد. بهترین جا برای هر کدام از این اجزا، زیر دوچرخه‌سوار است.

۲- وزن زیادی نباید بر روی چرخ‌ها، به‌خصوص چرخ جلو قرار گیرد. هرچه چرخ سنگین‌تر باشد، در هنگام برخورد به موانع دورتر از زمین قرار می‌گیرد و دوچرخه‌سوار باید منتظر بماند تا چرخ به زمین برسد تا دوباره بتواند آن را کنترل کند.

- **قوانین نهایی**

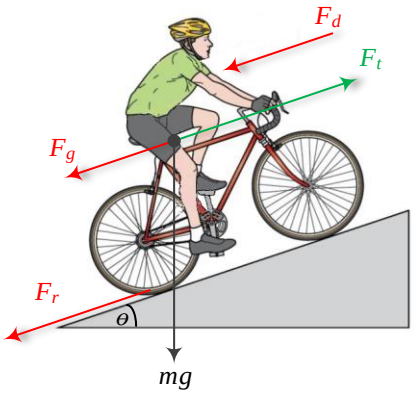
- ✓ وزن کل دوچرخه نباید از ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم فراتر رود. هدف این است که تا حد امکان در بازه‌ی ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم بماند.
- ✓ تلاش برای حداقل کردن وزن چرخ‌ها، این عمل سبب بهبود کنترل و تعادل می‌گردد.
- ✓ در صورت اجبار به حمل دوچرخه (دوچرخه تاشو)، باید وزن آن حتماً در بازه ۲۰ کیلوگرم باشد. حمل وزن بیشتر از این مقدار ورزش خوبی است ولی بعد از مدتی آزاردهنده می‌شود.
- ✓ در بعضی کشورها برای دوچرخه‌های برقی محدودیت وزن وجود دارد. باید حتماً به این محدودیت‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

توجه نمود.

۲-۵- مدل‌سازی بار دوچرخه شهری

نیروهای بار وارد بر یک دوچرخه را می‌توان با سه نیروی سایشی[1] با نماد F_r، نیروی باد[2] با نماد F_d و نیروی وزن در سطوح شیب‌دار[3] با نماد F_g بیان کرد که این نیروها به همراه نیروی محرکه دوچرخه (با نماد F_t) که شامل نیروی وارده از سمت دوچرخه‌سوار و نیروی محرکه الکتروموتور است، در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. به‌منظور مدل‌سازی دقیق بار دوچرخه که الکتروموتور محرکه آن بایستی بر این بار غلبه کند، باید هر یک از این نیروها بر حسب پارامترهای تأثیرگذار محاسبه شوند که در ادامه به این امر پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۲۲: نیروهای وارده بر مجموعه دوچرخه و دوچرخه‌سوار

۲-۵-۱- نیروی سایشی[4]

به نیرویی که در برابر غلتیدن یک جسم بر روی یک سطح مقاومت می‌کند، مقاومت سایشی یا مقاومت اصطکاکی[5] گفته می‌شود و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$F_r = c_{rr}.(m.g) \qquad ۲-۳$$

که در رابطه فوق، c_{rr} ضریب مقاومت سایشی، m جرم مجموعه دوچرخه، متعلقات و دوچرخه‌سوار و g نیز شتاب گرانشی زمین (۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه) است. ضریب c_{rr} یک پارامتر بدون واحد می‌باشد که به جنس تایر، فشار باد تایر و جنس سطحی که دوچرخه بر روی آن حرکت می‌کند، بستگی دارد.

1- Rolling resistance force
1- Wind drag force
2- Weight force of gravity
3- Rolling friction

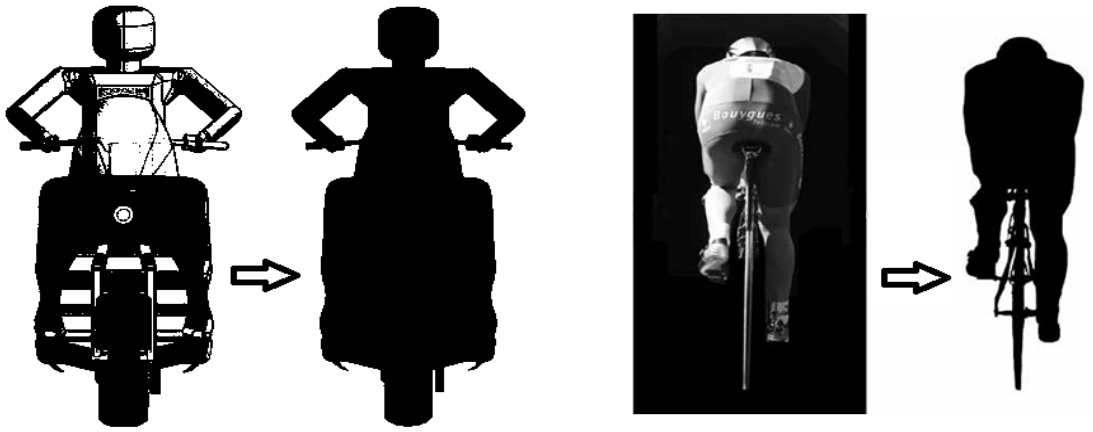
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲-۵-۲- نیروی برخورد باد

هر جسمی که در فضای یک ماده سیال حرکت کند، نیرویی ناشی از برخورد ذرات به دلیل فشار یا تراکم ماده و تنش وارده بر سطح جسم را تجربه می‌کند. این نیرو را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$F_d = \frac{1}{2} c_d . \rho v^2 . A \qquad ۲-۴$$

که در آن، c_d ضریب برخورد (بدون واحد)، ρ چگالی سیال، v سرعت حرکت جسم و A مساحت سطح مؤثر برخورد سیال با جسم[1] است.



شکل ۲۳-۲: نمایش دو نمونه سطح مؤثر برخورد هوا با دوچرخه و موتورسیکلت [۴۰]

۲-۵-۳- نیروی وزن در سطح شیب‌دار

نیروی دیگری نیز در سطوح شیب‌دار، دوچرخه را به عقب می‌راند که این نیرو به دلیل وزن دوچرخه و دوچرخه‌سوار ایجاد می‌شود و با سینوس زاویه سطح با افق (شکل ۲۳-۲) رابطه مستقیم دارد:

$$F_g = m.g.\sin\theta \qquad ۲-۵$$

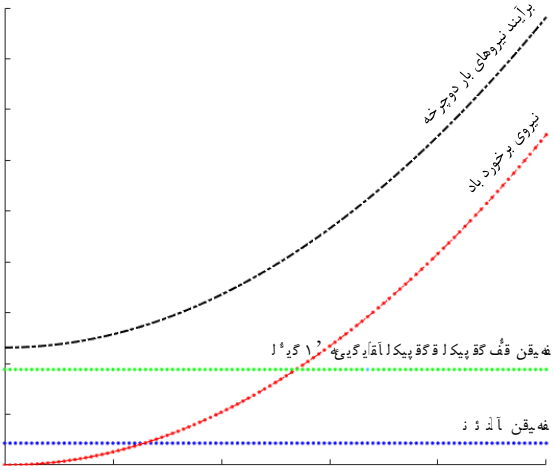
۲-۶- استخراج مشخصه گشتاور- سرعت دوچرخه برقی

در بخش قبل، نیروهای مقاوم وارده بر دوچرخه مورد بررسی قرار گرفت. از میان این نیروها، نیروی وزن در سطح شیب‌دار و نیروی سایشی، در سرعت‌های مختلف حرکت دوچرخه، ثابت بوده و تنها نیروی برخورد باد است که با افزایش سرعت حرکت، به‌صورت نمایی رشد می‌کند. در شکل ۲۴-۲، مشخصه نیروهای وارده بر دوچرخه بر حسب تغییرات سرعت حرکت دوچرخه نشان داده شده است. در این مطالعه، مقدار این ضریب برای یک دوچرخه شهری معمولی بر روی سطح آسفالت، ۰/۰۰۴ در نظر گرفته شده است [۴۱]. سطح برخورد مجموعه یک دوچرخه شهری و دوچرخه‌سوار ایستاده A[2]، ۵/۵ فوت مربع یا ۰/۵۱ مترمربع و ضریب برخورد سیال c_d به این سطح ۱/۱ است [۴۲].

1- Frontal Area
1- Upright Commuter

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

همچنین با توجه به اینکه در سیال موردمطالعه، هوا می‌باشد، چگالی هوا ρ در ارتفاع شهر تهران (حدود ۱۲۰۰ متر)، برابر ۱٫۲ کیلوگرم بر مترمکعب با سرعت باد صفر در نظر گرفته شده است. همچنین مجموعه دوچرخه، متعلقات و دوچرخه‌سوار، ۱۱۰ کیلوگرم (۲۰ کیلوگرم دوچرخه) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۴-۲: مشخصه نیروهای مقاوم وارده بر دوچرخه بر حسب سرعت حرکت

به‌منظور استخراج مشخصه گشتاور- سرعت در محور چرخ دوچرخه (با فرض در هاب چرخ قرار گرفتن الکتروموتور)، بایستی برآیند نیروهای وارده بر چرخ در نقطه برخورد آن با سطح زمین را در شعاع چرخ ضرب کرد که این:

$$T_L = F_L \times r \qquad ۲-۶$$

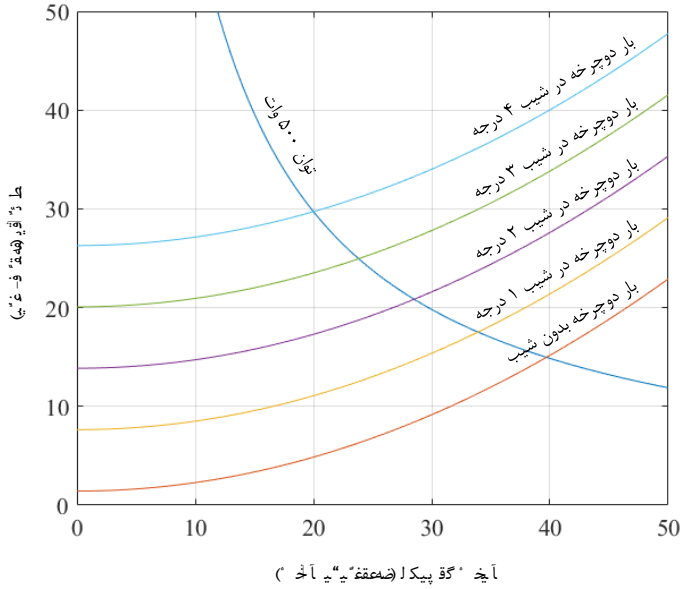
در رابطه فوق، F_L، مجموع سه نیروی وارده بر دوچرخه و r شعاع چرخ است که در این پروژه، شعاع چرخ ۲۶ اینچ در نظر گرفته شده است.

از طرفی با توجه به این‌که هدف پروژه، طراحی و ساخت یک الکتروموتور با توان ۵۰۰ وات است، مشخصه گشتاور - سرعت در توان ۵۰۰ وات را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد:

$$T_m = \frac{P_m}{w} = \frac{۵۰۰}{(\frac{۱۰۰۰}{۲۶\times ۰/۰۲۵۴\times \pi \times ۶۰} \times \frac{۲\times\pi}{۶۰})\times v} = \frac{۵۹۴/۴}{v} \qquad ۲-۷$$

که در رابطه فوق، P_m، T_m، w و v به ترتیب توان نامی موتور، گشتاور در توان نامی، سرعت زاویه‌ای چرخ و سرعت خطی دوچرخه است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

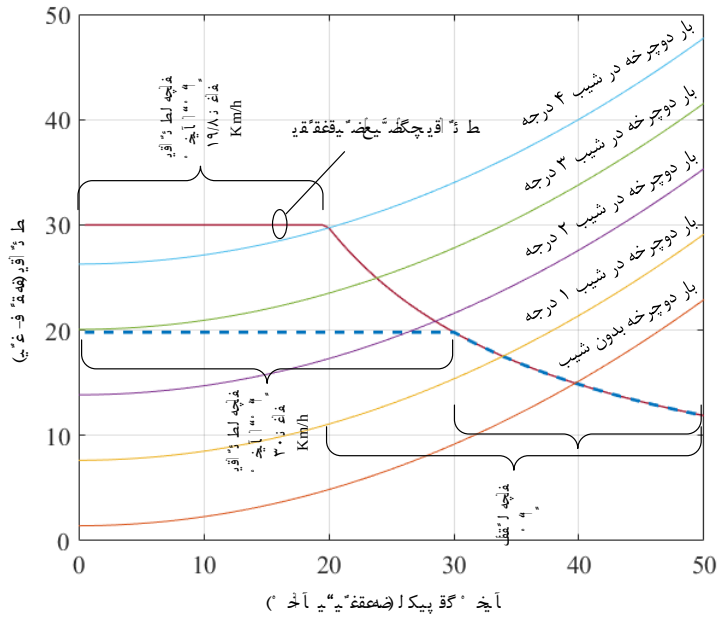


شکل ۲۵-۲: مشخصه بار دوچرخه در شیب‌های مختلف و مشخصه توان ۵۰۰ وات

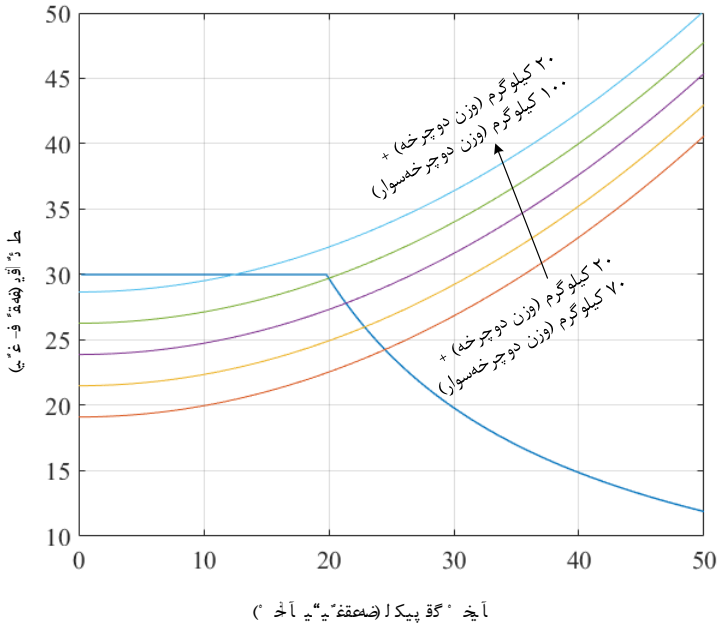
بدین ترتیب مشخصه گشتاور- سرعت بار دوچرخه در شیب‌های مختلف سطح جاده و همچنین مشخصه گشتاور- سرعت توان ۵۰۰ وات درشکل ۲۵-۲ نشان داده شده است. این نمودارها بیانگر این است که کلیه نقاطِ بر روی منحنی‌های‌بار که در زیر نمودار توان ۵۰۰ وات قرار می‌گیرند، در محدوده توان مجاز یک الکتروموتور ۵۰۰ واتی قرار دارد و الکتروموتور می‌تواند با استفاده از درایو مربوطه، در این محدوده کنترل سرعت داشته باشد.

یک الکتروموتور، علاوه بر محدودیت توان، محدودیت گشتاور نیز دارد. به‌طورکلی می‌توان گفت که یک الکتروموتور، دو ناحیه عملکردی گشتاور ثابت و توان ثابت دارد که تا سرعت نامی، در ناحیه گشتاورِ ثابت و برای سرعت‌های بالاتر، با کاهش گشتاورِ حداکثر و تضعیف شار توسط درایو، می‌تواند به‌صورت توان ثابت کار کند. در کاربردهای حمل و نقل برخلاف سایر کاربردهای الکتروموتوری مانند فن و پمپ، معمولاً هر چه گشتاور حداکثرِ الکتروموتور، بیشتر باشد بهتر است؛ بنابراین در طراحی این الکتروموتورها برای یک توان معین، ترجیحاً سرعت نامی الکتروموتور را تا حد امکان، پایین طراحی می‌کنند تا بدین ترتیب، ضمن کاهش ناحیه گشتاور ثابت، گشتاور حداکثر الکتروموتور افزایش یابد. در شکل ۲۶-۲ دو مشخصه الکتروموتور با توان ۵۰۰ وات؛ یکی با سرعت نامی ۳۰ کیلومتر بر ساعت (خط‌چین آبی‌رنگ) و دیگری با سرعت ۱۹٫۸ کیلومتر بر ساعت (خط قرمزرنگ) نشان داده شده است که مشاهده می‌شود در سرعت نامی، ۳۰ کیلومتر بر ساعت، حداکثر گشتاور قابل استحصال از الکتروموتور، حدود ۲۰ نیوتن‌متر و در سرعت نامی ۱۹٫۸ کیلومتر بر ساعت، حدود ۳۰ نیوتن‌متر است. بدین ترتیب الکتروموتور می‌تواند نیروی لازم برای به حرکت درآوردن بار دوچرخه تا شیب حدود ۷ درصد (۴ درجه) (حتی تا وزن ۱۰۰ کیلوگرم برای دوچرخه‌سوار طبق شکل ۲۷-۲)، تأمین کند. جهت دستیابی به سرعت‌های بالاتر نیز، با تضعیف شار توسط درایو، می‌توان این امر را امکان‌پذیر نمود. لازم به ذکر است طراحی الکتروموتور برای سرعت‌های پایین و گشتاور بالا، چالش‌های خاصی از جمله، تعداد قطب بالا، وزن بیشتر و همچنین نیاز به طراحی برای جریان بالاتر را دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۶-۲: مشخصه بار دوچرخه در شیب‌های مختلف و دو مشخصه الکتروموتور با توان ۵۰۰ وات



شکل ۲۷-۲: مشخصه بار دوچرخه برای وزن‌های مختلف دوچرخه‌سوار در شیب ۷ درصد

۲-۷- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی و توضیح اجزای الکتریکی دوچرخه برقی از قبیل موتور الکتریکی BLDC، انواع سنسورهای موجود و کاربردی در دوچرخه‌های برقی (سنسور در سیستم PAS، سنسور اثر هال، تراتل در دوچرخه‌های PDB)، کنترل‌کننده دوچرخه برقی، ترمز احیاکننده پرداخته شد. همچنین در ادامه این فصل به مشخصات الکتریکی لازم

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

برای طراحی دوچرخه برقی از جمله گشتاور، توان، ولتاژ، آمپرساعت لازم، وات ساعت پرداخته شد.

علاوه بر موضوعات ذکر شده، مباحث کلی و اساسی برای طراحی یک دوچرخه برقی ارائه گردید. این مباحث شامل میزان شیب قابل پیمایش دوچرخه، اثر وزن دوچرخه و مدلسازی بار دوچرخه و تعیین حد مجاز آن با توجه به میزان پیمایش شیب، بررسی نیروی سایشی، برخورد باد و نیروی وزن در سطح شیب‌دار بوده است که منجر به استخراج مشخصه گشتاور- سرعت دوچرخه برقی می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۳- استانداردها و آزمون‌های عملکردی دوچرخه برقی

۳-۱- مقدمه

تعریف قانونی از دوچرخه برقی در کشورهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد و در هر کجا دنیا اعلام شده است که وسیله الکتریکی مذکور در گروه دوچرخه یا موپِد[1] و یا موتورسیکلت قرار دارد [۹]. برای طراحی یک دوچرخه کاربردی لازم است که قوانین حاکم بر کشوری که دوچرخه در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شود و بر اساس استانداردها و آزمون‌هایی که باید پشت سر گذاشته شود، طراحی صورت پذیرد. در این فصل به معرفی قوانین، استانداردها و آزمون‌های مربوط به دوچرخه برقی در دنیا پرداخته می‌شود.

۳-۲- قوانین و محدودیت‌های دوچرخه برقی در دنیا

بسیاری از کشورها برای استفاده از دوچرخه برقی قوانینی وضع نموده‌اند. کشورهایی نظیر ایالات‌متحده آمریکا و کانادا دارای مقررات فدرال هستند که بر اساس الزامات ایمنی و استانداردهای تولید در نظر گرفته می‌شوند. کشورهای دیگر مانند اعضای اتحادیه اروپا به تصویب قوانین گسترده‌تر مربوط به استفاده و ایمنی وسیله نقلیه الکتریکی[2] (EPAC) توافق کرده‌اند.

بااین‌حال، قوانین و اصطلاحات متنوع هستند. برخی از کشورها دارای مقررات ملی هستند، اما قانونی بودن استفاده از جاده‌ها را دولت‌ها و استان‌ها تعیین می‌کنند. قوانین و محدودیت‌های شهرداری پیچیدگی بیشتری افزوده است. سیستم‌های طبقه‌بندی و نام‌گذاری نیز متفاوت است. حوزه‌های قضایی ممکن است به نام‌های "دوچرخه توان-کمکی" (کانادا) یا "چرخه‌ی توان-کمکی" (انگلستان) یا "چرخه‌های الکتریکی پدال-کمکی" (اتحادیه اروپا) یا به سادگی "دوچرخه‌های برقی" نام‌گذاری کند. برخی pedelec را ازدیگر دوچرخه‌های که از موتور الکتریکی بهره می‌برند متمایز می‌کنند؛ بنابراین، سخت‌افزار مشابه ممکن است مبنای بسیاری از دسته‌بندی‌های و مقررات گوناگون باشد [۱۴].

در ادامه قوانین استفاده از دوچرخه‌های برقی در کشورهای مختلف در سراسر دنیا آورده شده است. این قوانین با مرور زمان ممکن است تغییر کنند پس باید قبل از شروع مرحله طراحی پروژه در مورد صحت آنان و منطبق بودن با قوانین روز بررسی انجام شود.

۳-۲-۱- استرالیا

استرالیا دارای ۶ ایالت و دو سرزمین اصلی و هزاران جزیره است. خوشبختانه، همه‌ی آن‌ها دارای مقررات تقریباً مشابه هستند [۴۳]:

- قدرت موتور دوچرخه نباید بیش از ۲۰۰ وات باشد
- استفاده از کلاه ایمنی

1- **Moped**
2 -**Electric Pedal Assist Cycle**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- داشتن زنگ یا بوق
- داشتن ترمز مؤثر
- وضوح در شب
- استفاده از پدال به‌عنوان نیرومحرکه

در استرالیا دوچرخه برقی توسط استانداردهای خودرو استرالیا به‌عنوان یک دوچرخه دارای موتور کمکی با حداکثر توان خروجی تا ۲۰۰ وات بدون در نظر گرفتن محدودیت سرعت یا سنسورهای پدال تعریف می‌شود. هر ایالت مسئول تصمیم‌گیری چگونگی برخورد با چنین وسیله‌ای است و در حال حاضر تمامی ایالت‌ها بر عدم نیاز این وسیله نقلیه به گواهینامه یا ثبت آن موافق هستند. بعضی از ایالت‌ها قوانین خود را مانند عدم استفاده از انرژی الکتریکی در مسیرهای دوچرخه‌سواری دارند، بنابراین دوچرخه‌سواران باید قوانین ایالتی را با توجه به استفاده‌ی خود بررسی کنند. نیاز به گواهینامه و مجوز برای استفاده از دوچرخه برقی نیست [۱۴]. در ادامه به قوانین سه ایالت در استرالیا پرداخته شده است.

۱- نیو ساوت ولز[1]

در نیو ساوت ولز، دوچرخه‌های با موتور الکتریکی با توان خروجی کمتر از ۲۵۰ وات نیاز به ثبت ندارند. دوچرخه‌سواران معاف از ثبت، باید مقررات مشابهی با دوچرخه‌های بدون موتور دنبال کنند و وسایل نقلیه که نیاز به ثبت دارند (مانند موپدها) به‌عنوان موتورسیکلت دسته‌بندی می‌شوند.

۲- ویکتوریا[2]

یک دوچرخه که برای استفاده از نیروی انسانی طراحی‌شده است که شامل موتور برقی یا بنزینی می‌شود، نباید توانی بیش از ۲۰۰ وات داشته باشد.

بر طبق ۱۸ سپتامبر ۲۰۱۰، دوچرخه‌های pedelec (مبنی بر استاندارد EN15194) در دسته‌بندی دوچرخه‌های برقی در ایالت ویکتوریا قرارگرفته‌اند. دوچرخه pedelec بر طبق استاندارد EN15194 اتحادیه اروپا، دارای موتور با حداکثر توان نامی ۲۵۰ وات است که تنها در صورت پدال‌زنی روشن می‌شود (بین سرعت ۶ تا ۲۵ کیلومتر بر ساعت).

۳- کوییزلند[3]

مشابه با ایالت ویکتوریا، دو نوع دوچرخه برقی مجاز وجود دارد. در نوع اول توان موتور نباید از ۲۰۰ وات تجاوز کند. نوع دوم که به pedelec معروف است، باید منطبق بر استاندارد EN15194 اتحادیه اروپا (دارای محدودیت سرعت و توان) باشد.

پدال‌ها باید در دوچرخه‌های مجهز به موتور، منبع اولیه قدرت وسیله نقلیه باشند. اگر موتور منبع اولیه توان باشد، دیگر نمی‌توان این وسیله را در گروه دوچرخه‌ها قرار داد. به‌طور مثال، وسیله نقلیه‌ای که تنها با تراتل حرکت کند و

1- New South Wales
2- Victoria
1- Queensland

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

نیاز به پدال زدن نداشته باشد در گروه دوچرخه‌های برقی قرار ندارد.

از دوچرخه‌های برقی می‌توان در تمام جاده‌ها و مسیرها استفاده کرد جز مناطق از پیش تعیین‌شده. نیازی به گواهینامه برای استفاده از دوچرخه‌های برقی نیست [۱۴].

۲-۲-۳- کانادا

در هشت استان کانادا، دوچرخه‌های برقی به توان نامی خروجی ۵۰۰ وات محدودشده و حد سرعت مجاز آن‌ها نیز تا ۳۲ کیلومتر بر ساعت (۲۰ مایل بر ساعت) در صورت استفاده از موتور به‌تنهایی است. سن قانونی برای استفاده از این نوع وسیله نقلیه در هر استان متفاوت است؛ همچنین، استفاده از کلاه ایمنی الزامی است. مقررات منع استفاده از توان الکتریکی موتور در هنگام پدال نزدن بستگی به استان متفاوت است. بعضی از مدل‌های دوچرخه برقی نیاز به گواهینامه و محدودیت سنی در بعضی از استان‌ها دارند. مجوز خودرو و بیمه مسئولیتی لازم نیست.

مقامات کانادا قوانین مربوط به دوچرخه‌های برقی را در سال ۲۰۰۱ تصویب کرده‌اند. دوچرخه می‌تواند از نوع pedelec یا دوچرخه برقی کنترل شتاب‌دهنده باشد. این چیزی است که به‌عنوان دوچرخه برقی تعریف‌شده است و الزامات ایمنی آن به‌صورت زیر است [۴۳]:

- دوچرخ و یا سه‌چرخ
- دارای فرمان و پدال
- تعداد یک یا بیشتر از یک موتور الکتریکی با توان کمتر از ۵۰۰ وات
- قادر به حرکت با نیروی ماهیچه
- نوع pedelec
- نوع کنترل شتاب – خاموش شدن موتور با ترمز گیری
- سرعت مجاز تا ۳۲ کیلومتر بر ساعت
- داشتن برچسب دائمی
- دوچرخه باید یکی از ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

أ. مکانیزم توانمند برای روشن یا خاموش کردن موتور الکتریکی مجزا از کنترل‌کننده و به‌گونه‌ای تنظیم شود که توسط دوچرخه‌سوار قابل‌استفاده باشد.

ب. مکانیزمی که مانع از ورود موتور به مدار تا قبل از سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت بشود.

۳-۲-۳- چین

در چین، دوچرخه‌های برقی در حال حاضر در گروه دوچرخه‌ها دسته‌بندی می‌گردند و ازاین‌رو مجوز رانندگی لازم ندارند. پیش از آن لازم بود که کاربران به جهت حفظ از ربوده شدن دوچرخه آن را ثبت نمایند، گرچه به‌تازگی لغو شده است. با توجه به افزایش اخیر تصادفات مربوط به دوچرخه‌های برقی که اغلب توسط دوچرخه‌سواران بی‌تجربه‌ای که در طرف اشتباه دوچرخه‌سواری می‌کنند، از چراغ قرمز عبور می‌کنند و ... رخ می‌دهند، دولت چین قصد تغییر وضعیت قانونی دوچرخه‌های غیرقانونی را دارد که وسایل نقلیه با وزن کامل ۲۰ کیلوگرم (۴۴ lb) یا بیشتر و سرعت

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۳۰ کیلومتر بر ساعت (۱۹ mph) یا بیشتر نیاز به گواهینامه موتورسیکلت دارند. این در حالی است که وسایل نقلیه سبک‌تر از ۲۰ کیلوگرم و سرعت کم‌تر از ۳۰ کیلومتر نیازی به گواهینامه ندارند.

دوچرخه‌های برقی با سرعت کم‌تر از ۲۰ کیلومتر بر ساعت بدون پدال، از نظر قانونی به‌عنوان یک وسیله نقلیه غیر مکانیکی در چین شناخته می‌شود. در بعضی از شهرهای چین استفاده از دوچرخه همچنان ممنوع است [۱۴].

۴-۲-۳- اتحادیه اروپا

انجمن استانداردسازی اروپای (CEN) قوانینی برای دوچرخه‌های برقی وضع کرده است. دوچرخه‌های برقی در اتحادیه اروپا با معیارهای زیر تعریف می‌گردد:

- راه‌اندازی به‌صورت pedelec – موتور با پدال‌زدن روشن شده و باید به محض متوقف شدن پدال‌زنی موتور خاموش گردد.
- توان موتور الکتریکی- باید از ۲۵۰ وات کم‌تر باشد.
- سرعت حداکثری- ۲۵ کیلومتر بر ساعت. همچنین، توان موتور الکتریکی با افزایش سرعت دوچرخه، کاهش می‌یابد تا زمانی که دوچرخه به سرعت حداکثری برسد و موتور خاموش گردد.
- منطبق بر استاندارد اتحادیه اروپا- EN 15194 و EN 14764.

همچنین هر کشور می‌تواند مقررات را تغییر دهد:

۱. دانمارک

- نوع دوچرخه pedelec
- استفاده از سوپر دوچرخه (S-pedelec) با سرعت ۴۵ کیلومتر بر سرعت در مسیرهای مشخص‌شده
- کلاه ایمنی
- عدم نیاز به گواهینامه

۲. فنلاند

- توان نامی تا ۲۵۰ وات
- حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت
- استفاده از موتور به‌تنهایی
- دوچرخه برقی با موتورهای ۲۵۰ -۱۰۰۰ وات نیاز به بیمه دارند

۳. نروژ

- عدم نیاز به ثبت و گواهینامه
- حداکثر توان نامی ۲۵۰ وات
- حداکثر سرعت با استفاده از موتور کمکی، ۲۵ کیلومتر بر ساعت است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- منطبق بر استاندارد EN15194 اتحادیه اروپا
- نوع S-pedelec با سرعت ۴۵ کیلومتر بر ساعت و توان ۵۰۰ وات

۴. سوئد

- منطبق بر قوانین اتحادیه اروپا
- حداکثر توان نامی برابر با ۲۵۰ وات
- حداکثر سرعت مجاز در صورت استفاده از موتور ۲۵ کیلومتر بر ساعت

۵. سوئیس

- سرعت مجاز ۴۵ کیلومتر بر ساعت
- نیاز به گواهینامه

۶. ترکیه

موتور کمکی در دوچرخه برقی به‌صورت خودکار در سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت خاموش می‌گردد.

۷. انگلیس

در انگلیس قوانین اتحادیه اروپا قابل‌قبول است. همچنین سن دوچرخه‌سواران باید از ۱۴ سال بیشتر باشد و نیازی به گواهینامه نیست.

۸. آلمان

در آلمان قوانین به‌صورت زیر است:

- حداکثر توان ۳۵۰ وات
- حداکثر سرعت ۴۵ کیلومتر بر ساعت
- عدم نیاز به گواهینامه

۵-۲-۳- هند

به‌طورکلی هر وسیله نقلیه الکتریکی در هند باید به تصویب انجمن تحقیقات خودرو هند[1] (ARAI) برسد و دارای شروط زیر باشد:

- یک و یا بیشتر از یک موتور با توان کم‌تر از ۲۵۰ وات
- حداکثر سرعت مجاز برابر با ۲۵ کیلومتر بر ساعت
- عدم نیاز به گواهینامه

1- **Automotive Research Association of India**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۳-۲-۶- اسرائیل

در اسرائیل سن مجاز برابر با ۱۶ سال برای استفاده از دوچرخه PAB با حداکثر توان نامی ۲۵۰ وات و حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت است. دوچرخه‌های برقی در اسرائیل باید منطبق بر استاندارد اروپایی EN15194 بوده و به تصویب موسسه استاندارد اسرائیل نیز رسیده باشند.

بر طبق قانون جدید تصویب‌شده در ۱۹ ژانویه ۲۰۱۹، کسانی که بالای ۱۸ سال سن داشته و گواهینامه اتومبیل ندارند باید برای استفاده از دوچرخه برقی مجوز داشته باشند. از طرفی نیاز به گواهینامه یا بیمه نیست. وزن دوچرخه نباید از ۳۰ کیلوگرم تجاوز نماید.

۳-۲-۷- زلاندنو

در زلاندنو قوانین دوچرخه‌های برقی (PAB) به‌صورت زیر است:

- توان خروجی موتور الکتریکی نباید از ۳۰۰ وات بیشتر باشد.
- نیازی به ثبت و گواهینامه نیست

۳-۲-۸- روسیه

با توجه به قوانین و مقررات روسیه، دوچرخه‌های برقی می‌توانند موتور الکتریکی با حداکثر توان خروجی ۲۵۰ وات داشته باشند که در سرعت‌های بالاتر از حداکثر سرعت مجاز ۲۵ کیلومتر بر ساعت به‌صورت خودکار خاموش شوند. همچنین نیاز به گواهینامه نیز ندارند.

۳-۲-۹- ایالات‌متحده آمریکا

قانون ایمنی مصرف‌کننده فدرال "دوچرخه الکتریکی کم‌سرعت" را به‌وسیله نقلیه با دو یا سه‌چرخ با پدال، حداکثر سرعت ۳۲ کیلومتر بر ساعت (منحصراً فقط با موتور) و توان خروجی نامی کم‌تر از ۷۵۰ وات اطلاق می‌کند. قوانین برای دوچرخه‌های برقی در جاده‌ها، پیاده‌روها و مسیرهای عمومی تحت اختیارات حوزه قضایی بوده و متفاوت هستند. هر ایالت نیز می‌تواند علاوه بر قوانین فدرال، مقررات جداگانه‌ای نیز داشته باشد. در ادامه‌ی این بخش به‌منظور جمع‌بندی قوانین حاکم بر دوچرخه برقی در دنیا جدول ۱-۳ برای مقایسه آورده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۱-۳: استاندارد دوچرخه‌های برقی در دنیا

کشور		نوع مجاز دوچرخه	توان نامی خروجی (w)	حداکثر سرعت مجاز (Km/h)	نیاز به گواهینامه	سن مجاز	وزن مجاز
استرالیا		e-bike pedelec	۲۰۰ ۲۵۰	- ۲۵	-	بسته به ایالت	-
کانادا		e-bike/ pedelec	۵۰۰	۳۲	-	بسته به ایالت	-
چین		e-bike	-	۳۰	-	-	۲۰
اتحادیه اروپا	دانمارک	Pedelec s-pedelec	۲۵۰	۲۵ ۴۵	-	۱۵	-
	فنلاند	pedelec	۲۵۰ ۲۵۰-۱۰۰۰	۲۵	-	-	-
	نروژ	Pedelec Spedelec	۲۵۰ ۵۰۰	۲۵ ۴۵	- دارد	- -	- -
	سوئد	pedelec	۲۵۰	۲۵	-	-	-
	سوئیس	pedelec	۲۵۰	۲۵ ۴۵	- دارد	-	-
	ترکیه	pedelec	-	۲۵	-	-	-
	انگلیس	Pedelec	۲۵۰	۲۵	-	۱۴	-
	آلمان	s-pedelec	۳۵۰	۴۵	دارد	۱۶	-
هند		e-bike	۲۵۰	۳۰	-	-	-
اسرائیل		pedelec	۲۵۰	۲۵	- دارد	۱۶ ۱۸	۳۰
زلاندنو		e-bike	۳۰۰	-	-	-	-
روسیه		pedelec	۲۵۰	۲۵	-	-	-
آمریکا		e-bike/ pedelec	۷۵۰	۳۲	بسته به ایالت	بسته به ایالت	بسته به ایالت

۳-۳- استانداردهای دوچرخه برقی

در ادامه به استانداردهای موجود برای دوچرخه‌های برقی در دنیا پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- استاندارد EN 15194 [۴۴]

استاندارد EN 15194 یک استاندارد اروپایی در نظر گرفته‌شده برای تحت پوشش قرار دادن دوچرخه‌های برقی از یک نوع است که دارای حداکثر توان پیوسته استاندارد ۲۵۰ وات بوده که خروجی به‌طور مداوم کاهش می‌یابد و

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

درنهایت زمانی که وسیله نقلیه به‌سرعت ۲۵ کیلومتر در ساعت (حداکثر سرعت مجاز) برسد، یا زودتر، اگر دوچرخه‌سوار پدال‌زنی را متوقف کند، قطع می‌شود.

این استاندارد اروپایی الزامات ایمنی و روش‌های تست برای ارزیابی طراحی و مونتاژ دوچرخه‌ها و قطعات زیر را برای سیستم‌های با ولتاژ باتری تا ۴۸ ولت یا یک شارژر باتری با ورودی ۲۳۰ ولت مشخص می‌کند.

همچنین الزامات و روش‌های آزمون برای سیستم‌های مدیریت انرژی موتور، مدارهای الکتریکی شامل سیستم شارژ برای ارزیابی طراحی و مونتاژ چرخه‌های برقی و زیرمجموعه برای سیستم‌هایی با ولتاژ تا ۴۸ ولت DC یا با یک شارژر باتری با ورودی ۲۳۰ ولت را شامل می‌شود.

بر حسب گزارش آزمایش‌های انجام‌شده بر وسایل نقلیه الکتریکی (دوچرخه برقی و اسکوتر) تست‌های زیر از بندهای متناظر استاندارد EN 15194 برای آزمایش عملکرد دوچرخه برقی لازم است [۴۵]:

۴- الزامات

۴.۱- کلیات

دوچرخه‌های الکتریکی با نیروی برق باید مطابق بند ۴، ۵ و ۶ استاندارد اروپایی EN 14764: 2005 علاوه بر الزامات خاص در بند ۴.۲ این استاندارد باشد.

استاندارد EN 14764 الزامات ایمنی و عملکرد را برای طراحی، تجمع و تست دوچرخه‌ها و قطعات زیر را که برای استفاده در جاده‌های عمومی مورداستفاده قرار می‌گیرد، مشخص می‌کند و راهنمایی برای دستورالعمل‌های مربوط به استفاده و مراقبت از چنین دوچرخه‌ها را تعیین می‌کند [۴۶].

این استاندارد در مورد دوچرخه‌هایی که حداکثر ارتفاع زین آن‌ها ۶۳۵ میلی‌متر یا بیشتر و برای استفاده در جاده‌های عمومی در نظر گرفته شده، است.

این استاندارد در مورد دوچرخه‌های کوهستانی و دوچرخه‌های مسابقه‌ای، دوچرخه‌های تحویل بار، دوچرخه‌های حالت خوابیده ، دوچرخه‌های دونفره و دوچرخه‌های طراحی شده و مجهز برای استفاده در رویدادهای رقابتی مجاز نمی‌باشد.

توجه: برای دوچرخه با ارتفاع زین حداکثر ۴۳۵ میلی‌متر EN 71 و با ارتفاع زین حداکثر بیش از ۴۳۵ میلی‌متر و کمتر از ۶۳۵ میلی‌متر EN 14765 باید در نظر گرفته شود.

بند ۴ از این استاندارد شامل الزامات و روش‌های تست از قبیل تست‌های ترمز و مقاومت دوچرخه، لبه‌های تیز، امنیت و قدرت اتصال‌دهنده ایمنی، روش‌های تشخیص ترک، پیشانی، ترمزها، فرمان، فریم‌ها، دوشاخ جلو، چرخ‌ها و مونتاژ چرخ یا تایر، رینگ‌ها-لاستیک‌ها و تیوب‌ها، گلگیرها، پدال‌ها و سیستم درایو پدال یا کرنک، زین و ستون صندلی، زنجیر چرخ، محافظ زنجیر، محافظ پره، سبد حمل کیف، سیستم‌های روشنایی و بازتابنده، دستگاه هشدار است. بند ۵ شامل دستورالعمل‌های سازنده و بند ۶ دربرگیرنده نشانه‌گذاری از قبیل الزامات و تست دوام می‌باشد[۴۶].

۴.۲- الزامات اضافی ویژه دوچرخه برقی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۴.۲.۱- مدار الکتریکی

سیستم کنترل الکتریکی باید به‌گونه‌ای طراحی شود که اگر به شیوه خطرناک سو عملکرد داشت، باید موتور الکتریکی را خاموش نموده و برای روشن کردن آن نیاز به دوچرخه‌سوار باشد.

توجه: ترمز مکانیکی به‌عنوان یک دستگاه توقف اضطراری عمل می‌کند و در شرایط اضطراری توقف سریع و ایمن را فراهم می‌کند.

اگر از نمادها استفاده می‌شود، معنی آنها باید در دستورالعمل‌های استفاده‌شده شرح داده شود. عملکرد آن‌ها در ISO 2575 شرح داده‌شده است، طراحی آنها باید مطابق با آن استاندارد باشد.

۴.۲.۲- باتری‌ها

۴.۲.۲.۱- الزامات

دوچرخه و بسته باتری باید به‌منظور جلوگیری از خطر آتش‌سوزی و خرابی‌های مکانیکی ناشی از استفاده غیرعادی طراحی شوند. مطابق با تست در بند ۴.۲.۳.۲ بررسی می‌شود.

در طول آزمایش دوچرخه و باتری‌ها نباید شعله‌ها، فلزمذاب یا گاز قابل اشتعال سمی را در مقادیر خطرناک انتشار دهند و هیچ محفظه‌ای نباید صدمه‌ای را که می‌تواند با این استاندارد برآورده سازد، نشان دهد.

ایمنی و سازگاری ترکیب باتری / شارژر باید طبق مشخصات تولیدکننده تضمین شود.

پایانه‌های باتری باید در برابر ایجاد یک اتصال کوتاه تصادفی محافظت شوند. حفاظت مناسب باید لحاظ گردد تا اطمینان حاصل شود که باتری‌ها در برابر شارژ بیش‌ازاندازه محافظت می‌شوند. یک دستگاه حفاظت مناسب در مقابل اتصال کوتاه و گرمای بیش‌ازحد باید نصب شده باشد.

باتری‌ها واحد شارژر باید برای نشان دادن مطابقت آن‌ها برچسب‌گذاری شوند.

۴.۲.۲.۲- روش آزمون

۱) ترمینال‌های باتری در شرایط کاملاً شارژ شده اتصال کوتاه شده‌اند.

۲) ترمینال‌های موتور اتصال کوتاه هستند؛ تمام دستورات در موقعیت ON قرار دارند، درحالی‌که باتری‌ها کاملاً شارژ هستند.

۳) دوچرخه با موتور الکتریکی یا سیستم درایو مسدود شده تا زمانی که گشتاور موتور متوقف شود یا باتری کاملاً تخلیه شود، کار کند.

۴) باتری برای دو برابر بازه زمانی پیشنهادی شارژ شدن و یا ۲۴ ساعت (هرکدام بزرگ‌تر است) شارژ شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۴.۲.۳-کابل‌ها و اتصالات الکتریکی

۴.۲.۳.۱- الزامات

دمای کابل و توپی اتصال باید کمتر از آنچه توسط سازنده کابل‌ها و شاخه‌ها مشخص‌شده، باشد.

هیچ‌گونه خوردگی بر روی پین‌های توپی اتصال نباید وجود داشته باشد و هیچ عارضه‌ای در کابل و عایق توپی اتصال نباید ایجاد شود

۴.۲.۳.۲- روش تست

با توجه به موتور الکتریکی و / یا کنترل‌کننده و یا کنترل‌کننده باتری، باتری دوچرخه برقی کاملاً شارژشده را به حد دشارژ مشخص‌شده توسط سازنده دوچرخه یا موتور در حداکثر جریان مجاز توسط سیستم تخلیه و ثبت شود. دمای کابل و توپی اتصال اندازه‌گیری شود و با آزمون اطمینان حاصل شود که زوال عایق در مونتاژ آن‌ها وجود ندارد.

۴.۲.۳.۳- سیم بندی

الف) مسیرهای عبور سیم باید صاف و بدون لبه تیز باشد.

ب) سیم‌ها باید محافظت شوند تا با لبه‌های تیز مانند برخورد نکنند زیرا ممکن است به عایق‌بندی آن‌ها آسیب برساند. سوراخ‌های در فلز که از سیم‌های عایق شده عبور می‌کنند باید دارای سطوح صاف و جامد باشند و یا باید با بوشینگ باشند.

ج) سیم بندی نباید با قسمت‌های متحرک برخورد داشته باشد.

قطعات جداشونده یک دوچرخه برقی که در استفاده حالت عادی و یا حین طول تعمیر و نگهداری کاربر نسبت به یکدیگر، می‌توانند حرکت کنند نباید سبب ایجاد استرس بر روی اتصالات الکتریکی و هادی‌های داخلی، از جمله مواردی که تداوم زمین را فراهم می‌کنند، شوند.

مطابق با ((الف))، ((ب)) و ((ج)) باید توسط بازرسی چک شود.

د) اگر از یک فنر باز سیم‌پیچ استفاده شود، باید به‌درستی نصب‌شده و عایق‌بندی شود. در لوله‌های فلزی انعطاف‌پذیر نباید عایق‌بندی هادی‌های موجود در داخل آنها را آسیب ببینند.

مطابق با ((د)) باید توسط بازرسی و روش تست زیر بررسی شود.

اگر خم شدن در استفاده عادی اتفاق می‌افتد، دستگاه در موقعیت عملیاتی نرمال قرار می‌گیرد و با ولتاژ نامی قرار تغذیه می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

و) قسمت متحرک به عقب و جلو حرکت می‌کند، به‌طوری‌که هادی از طریق بزرگ‌ترین زاویه‌ای که امکان‌پذیر است خم می‌شود.

برای هادی‌هایی که در استفاده عادی از آن خم می‌شوند، بخش متحرک انعطاف‌پذیر برای ۱۰،۰۰۰ سیکل در فرکانس تست ۰/۵ هرتز جابجا خم می‌شود .

برای هادی‌هایی که در حین نگهداری کاربر خم می‌شوند، قسمت متحرک برای ۱۰۰ سیکل با فرکانس مشابه (۵ ± ۲۰ درجه سانتی‌گراد) خم می‌شود.

سیم‌کشی و اتصالات آن باید تست مقاومت الکتریکی را تحمل کند. ولتاژ آزمون بیان‌شده در ولت باید برابر با (۵۰۰ + ۲ × Vr) برای ۲ دقیقه و فقط بین قطعات متحرک و سایر قطعات فلزی اعمال شود.

توجه داشته باشید: Vr برابر با ولتاژ نامی است.

ه) عایق سیم‌کشی داخلی باید استرس الکتریکی را که احتمالاً در استفاده عادی رخ می‌دهد، تحمل کند.

ی) در صورت استفاده از شارژر باتری، ایمنی الکتریکی شارژر باتری اعمال می‌شود

۴.۲.۳.۴- کابل‌های قدرت و خطوط لوله

ورودی‌های کانال، ورودی‌های کابل باید به‌گونه‌ای ساخته و یا قرار گیرد تا اقدامات حفاظتی که توسط سازنده اتخاذ می‌شود را کاهش ندهد.

مطابقت با بازرسی بررسی می‌شود.

توجه: انتخاب کابل‌های برق باید با مراجعه به IEC 60364-5-52: 2001، مقررات ۵۲۲.۱.۲، ۵۲۳.۱۵۲۳.۳ و جدول A 52-10 انجام شود.

۴.۲.۳.۵- شرایط الکتریکی داخلی و خارجی

اتصال برق باید مطابق با IEC 60364-5-52: 2001، مقررات ۵۲۶.۱ و ۵۲۶.۲ باشد.

۴.۲.۳.۶- مقاومت رطوبتی

دوچرخه برقی تحت آزمایش IEC 60529 به شرح زیر است: دستگاه‌های IPX4 همان‌طور که در بند a.۱۴.۲.۴ شرح داده شده است.

۴.۲.۳.۷- قدرت مکانیکی

دوچرخه برقی باید دارای مقاومت مکانیکی مناسب باشد و به‌گونه‌ای ساخته شود تا موقعیت‌های خشن که ممکن است در استفاده عادی مورد انتظار باشد، را تحمل کند. مطابقت با:

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- اعمال ضربه به بسته باتری نصب‌شده بر روی دوچرخه برقی با استفاده از چکش فنری همان‌طور که در IEC 60068-2-75 مشخص‌شده، است سه ضربه به هر نقطه محفظه اعمال می‌شود که احتمالاً ضعیف است (۷/۰۵ ±۰/۰). پس از آزمایش بسته باتری نباید آسیب‌دیده باشد تا بتواند این استاندارد اروپایی را برآورده سازد؛

- بسته‌های باتری قابل جدا شدن در سه موقعیت مختلف در ارتفاع ۰/۹ متر است.

پس از آزمایش بسته باتری نباید هیچ آسیبی داشته باشد زیرا می‌تواند منجر به انتشار مواد خطرناک (گاز یا مایع) سوخته، آتش‌سوزی یا گرمای بیش‌ازحد شود.

توجه: باتری‌ها باید تمام آزمون‌های مربوطه را برای اطمینان از ایمنی انجام دهند.

۴.۲.۵- سازگاری الکترومغناطیسی

۴.۲.۵.۱- انتشار

دوچرخه برقی و ادوات الکترونیکی آن باید مطابق با پیوست C استاندارد باشند.

۴.۲.۵.۲- ایمنی

دوچرخه برقی و ادوات الکترونیکی آن باید مطابق با پیوست C استاندارد باشند.

۴.۲.۵.۳- شارژر باتری

با توجه به اینکه یک دوچرخه برقی در زمان شارژ شدن استفاده نمی‌شود، برای شارژر یکپارچه، کل مجموعه دوچرخه به همراه شارژر آزمایش می‌شوند.

استانداردهای اروپایی زیر برای شارژر باتری استفاده می‌شود: EN 55014-1، EN55014-2، EN61000-3-2، EN61000-3-3.

۴.۲.۷ -اندازه‌گیری حداکثر توان

۴.۲.۷.۱- اندازه‌گیری در شفت موتور

حداکثر توان مستمر بر اساس استاندارد EN 60034-1 اندازه‌گیری می‌شود، هنگامی‌که موتور به تعادل حرارتی خود همان‌طور که توسط سازنده مشخص‌شده، رسیده است.

نکته: تعادل حرارتی: درجه حرارت قطعات موتور بیش از ۲ K/h متغیر نیست.

در شرایطی که توان به‌طور مستقیم در محور موتور الکترونیکی اندازه‌گیری می‌شود، نتیجه اندازه‌گیری باید توسط ۱/۱۰ کاهش یابد تا عدم اطمینان اندازه‌گیری را در نظر بگیرد و سپس با ۱/۰۵ کاهش یابد تا به‌عنوان‌مثال ضایعات

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

انتقال را شامل شود، مگر این‌که مقادیر واقعی این تلفات تعیین می‌شود.

۴.۲.۷.۲- روش جایگزین

هنگامی‌که قدرت در چرخ اندازه‌گیری می‌شود، نتیجه اندازه‌گیری مقدار خوانده‌شده است.

ضمیمه D راهنمایی در مورد چگونگی اندازه‌گیری قدرت در چرخ می‌دهد.

۵- علامت‌گذاری، برچسب زدن

علاوه بر الزامات EN 14764، دوچرخه برقی باید به‌طور واضح و دائمی با توجه به EN 15194 به شرح زیر علامت‌گذاری شود:

- دوچرخه برقی بر طبق EN 15194

- XX کیلومتر بر ساعت

- XX وات

۶- دستورالعمل برای استفاده

علاوه بر دستورالعمل‌های موردنیاز استاندارد دوچرخه EN 14764، هر دوچرخه برقی باید مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها حاوی اطلاعات در مورد:

۱) مفهوم و شرح کمک برقی؛

۲) توصیه برای شستشو؛

۳) کنترل و بیان شرح؛

۴) توصیه‌های خاص دوچرخه برقی برای استفاده؛

۵) هشدارهای خاص دوچرخه برقی ؛

۶) توصیه‌های مربوط به شارژ باتری و استفاده از شارژر و همچنین اهمیت پیگیری دستورالعمل موجود در برچسب شارژر باتری.

۳-۳-۲- استاندارد LEVA[1]

انجمن خودرو سبک الکتریکی (LEVA) دارای استانداردهای جدید جهانی برای وسایل الکتریکی نقلیه سبک

1- Light Electric Vehicle Association

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

است. اد بنیامین[1]، رئیس LEVA می‌گوید: "استانداردهای عملکرد به مصرف‌کنندگان کمک خواهد کرد که دوچرخه برقی که نیازهای آن‌ها را برآورده نماید، انتخاب کنند."

LEVA منافع استراتژیک خرده‌فروشان خودرو، وسایل نقلیه سبک، توزیع‌کنندگان، تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگان را برای ترویج توسعه، فروش و استفاده از LEVs را در سراسر جهان نشان می‌دهد. اعضا در حین تلاش برای تأثیرگذاری و تصویب قانون، مقررات، استانداردهای عملکرد، ارتقاء و بهترین شیوه‌ها در صنایع سبک الکتریکی وسایل نقلیه، پشتیبانی و منابع آموزشی را برای گسترش تجارت خود دریافت می‌کنند. LEVA دارای بیش از ۳۳۰ عضو از ۲۹ کشور است [۴۷].

LEVA درحال‌توسعه اولین استاندارد جهانی استانداردهای عملکرد است تا مصرف‌کنندگان با استفاده از اطلاعات آسان برای انتخاب دوچرخه‌های الکتریکی با سطوح مختلف عملکرد: کارآمدترین، بالاترین توان و کمترین توان انتخاب کنند.



برای انواع دوچرخه‌های برقی [۴۸]**LEVA**شکل ۱-۳: استانداردهای تعیین‌شده توسط

این‌ها اولین استانداردهای منتشرشده برای صنعت جهانی دوچرخه است. این پروتکل استانداردهای عملکردی شامل موارد زیر است [۴۸]:

- یک برچسب متصل به دوچرخه برقی
- راهنمای سالانه با اطلاعات عملکرد اضافی و راهنمایی برای بهبود بازه

این استانداردها اطلاعاتی را در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد تا دوچرخه‌های برقی را مقایسه و خریداری نمایند و به آن‌ها جهت داده و به سؤالاتشان پیرامون عملکرد دوچرخه برقی پاسخ می‌دهد.

داده‌های عملکرد بر روی یک نیمکت آزمایش[2] با استفاده از پروتکل تست TripleS (آزمایش افزایش سرعت نیمه ثابت) به‌منظور اطمینان از نتایج برابر برای مدل‌های مختلف دوچرخه برقی، محاسبه می‌شوند.

1- Ed Benjamin
2- Test bench

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

داده‌های عملکرد عبارت‌اند از:

۱- شبیه‌سازی پیمایش شهری با توقف و حرکت‌های متعدد، تپه‌ها و باد

۲- صعود تپه (شیب پیمایی ۴٪)

۳- پروفیل شتاب (۰-۱۸ کیلومتر بر ساعت)



شکل ۲-۳: نیمکت آزمایش [۴۸]

هزینه صدور گواهینامه به قیمت ۱۳۰۰ یورو (۱۷۵۰ دلار آمریکا) برای هر نوع مدل Pedelec / Pedal-assist، E-bike / POD و حالت دوگانه تعیین شده است. برخی از آزمایشگاه‌های موجود برای تست دوچرخه عبارت‌اند از [۴۹]:

- ACT Lab
- TEC Eurolab
- IDbike Test Bench
- Urban Mover E-vehicle Simulation Lab (EVSL)
- SLG Electromagnetic Compatibility (EMC)
- InTouch Quality Control Standards in China
- FalconEV EE Labs
- Tüv Rheinland
- SGS
- Standard Motor Products (SMP)

پروتکل در حال توسعه با سه تولیدکننده دوچرخه برقی - Trek، Currie Technologies و OHM Cycles و دو شرکت آزمایشگاهی تست ID Bike و TEC Eurolab است [۵۰].

ادوارد بنجامین رئیس LEVA می‌گوید: "LEVA در تلاش برای ترویج توسعه نسل جدیدی از دوچرخه‌های با دوام بسیار بالایی است." و "با انتشار استانداردهای عملکرد، مصرف‌کنندگان در هنگام انتخاب دوچرخه برقی اطلاعات

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دقیق دارند." [۵۰]

دوچرخه‌های برقی اعضای شرکت‌کننده، برچسب استانداردهای عملکرد LEVA با اطلاعات جامع ازجمله محدوده برآورد شده، سرعت پایدار و شتاب را نشان می‌دهند [۵۰].

راهنمای استاندارد عملکرد به مصرف‌کنندگان طیف گسترده‌ای از اطلاعات را می‌دهد که آنها می‌توانند برای انتخاب دوچرخه برقی بعدی خود استفاده کنند. این راهنمای شامل فهرست ده دوچرخه برتر می‌شود. همچنین شامل هزینه‌های عملیاتی سالانه برای هر دوچرخه برقی می‌باشد. این تخمین بر اساس عمر بسته باتری و هزینه جایگزینی باتری جدید است [۵۰].

پروتکل‌های تست تعیین‌شده از سوی انجمن LEVA

امروزه بسیاری از دوچرخه‌های برقی در مغازه‌های فروشندگان و خرده‌فروشان و از طریق اینترنت در طیف وسیعی از قیمت‌ها در دسترس هستند. مقایسه عملکرد این دوچرخه‌ها برای مشتری بسیار مشکل است.

در انتخاب دوچرخه بخصوص، فروشنده می‌تواند به خریدار در جنبه‌های مربوط به دوچرخه، نوع دوچرخه (مسابقه‌ای، شهری، مدل‌های مردانه یا زنانه)، مشخصات (گلگیرها، نوع سیستم دنده)، وزن و محدوده دوچرخه و ... کمک کند. بااین‌حال برای مصرف‌کننده بسیار دشوار است که با انجام یک آزمایش سواری کوتاه قضاوت کند. بخصوص برای یک دوچرخه‌سوار بی‌تجربه که نمی‌داند باید به دنبال چه خصوصیتی در یک دوچرخه باشد تا تمام خواسته‌های را برآورده کند بسیار سخت است.

برای کمک به خریدار در انتخاب یک دوچرخه برقی، استاندارد آزمایش LEVA توسط یک گروه بین‌المللی از کارشناسان دوچرخه برقی توسعه یافته است. آزمایش LEVA تست عینی سیستم درایو دوچرخه را فراهم می‌کند؛ نتیجه در نمودارها و داده‌ها ارائه می‌شود. سه پروفیل مطرح عبارت‌اند از:

۱- پیمایش شهری

۲- صعود تپه

۳- تست شتاب

هنگامی‌که خریدار تصمیم می‌گیرد که کدام نوع سواری بیشترین کاربرد را برای او دارد (و درنتیجه، عملکرد در آن دسته برای او مهم است)، درجه‌بندی دوچرخه‌های مختلف را می‌توان به‌راحتی مقایسه کرد و سپس انتخاب بهینه را انجام داد.

آزمایش‌های انجام‌شده:

سیستم درایو (موتور-کنترل کننده-سنسور) از:

- دوچرخه pedelec (سنسور گشتاور یا سرعت متصل به پدال)
- دوچرخه PDB (توان با تراتل کنترل می‌شود و نیازی به پدال نیست)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

آزمایش انجام‌نشده:

- مشخصات باتری، تعداد دوره‌ها تا پایان عمر، ظرفیت کل.

موارد مربوط به دوچرخه که توسط فروشنده می‌تواند توصیه شود:

- ویژگی‌های سواری دوچرخه
- کیفیت اجزاء دوچرخه.

چگونگی آزمایش:

تمام دوچرخه‌های آزمایش بر روی یک دستگاه تست که استانداردها (دقت، مبدل‌های تائید و ...) را برآورده می‌کند، آزمایش می‌شوند.

همچنین بر اساس معیارهای آزمون (ذکرشده در ذیل) آزمایش می‌شوند. نیروهای وارده جاده‌ای برای سواری سطوح صاف، صعود تپه و سواری در شهر در هنگام انجام آزمایش‌ها محاسبه و تنظیم می‌شوند.

معیارهای تست:

دستگاه آزمایش با توجه به استاندارد آن:

- ❐ تمام سیکل‌ها با یک دوچرخه‌سوار بارگیری می‌شوند: وزن ۷۰ کیلوگرم، به سمت جلو مقاومت هوا ($Cd \times A = ۰/۶$)، تایر بر روی یک درام فلزی، مقاومت غلتشی در لاستیک‌ها (۰/۰۰۶).
- ❐ بار بر روی دوچرخه‌ها بر اساس شرایط استانداردشده محاسبه می‌شود: عمل پدال‌زنی (سینوسی با ۳۰٪ دامنه).
- ❐ دمای محیط ۱۸-۲۲ درجه سانتی‌گراد
- ❐ تست سطوح مسطح: بدون باد
- ❐ تست صعود تپه: زاویه صعود ۴٪
- ❐ تست‌ها در نسبت تبدیل حتی‌الامکان نزدیک به ۶/۶ متر در هر پدال انجام می‌شود. (~ ۶۳ دور در دقیقه در ۲۵ کیلومتر در ساعت).
- ❐ توان توسط یک منبع تغذیه سوئیچ خارجی تنظیم‌شده برابر با مقدار نامی باتری/ یا توسط باتری

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مطبوع دوچرخه تأمین می‌گردد: شارژ کامل در ظرفیت کامل (TBD).

- ❐ تست سرعت ثابت: به‌آرامی سرعت تست از ۱۰ کیلومتر بر ساعت تا حداکثر سرعت افزایش می‌یابد: (حداکثر سرعت به نوع وسیله برقی بستگی دارد: pedelec اروپایی ۳۰ کیلومتر در ساعت، دوچرخه در ایالات‌متحده ۲۲ مایل در ساعت، S-pedelec ۵۰ کیلومتر در ساعت)
- ❐ پیمایش شهری: مشخصات نمونه بر طبق نمودار زیر است: فاصله ۱.۲ کیلومتر، زمان ۵ دقیقه، سرعت متوسط ۱۴.۴ کیلومتر / ساعت.

دوچرخه بر روی یک دستگاه تست نصب‌شده است. یک موتور درایو سروو نیروی نوسانی پدال از سوی دوچرخه‌سوار را شبیه‌سازی می‌کند. چرخ عقب تعیین‌کننده سرعت است. نیروی محرکه چرخ عقب برای مطابقت با شرایط آزمایش تنظیم‌شده است.

پروتکل آزمایش LEVA شامل ۳ بخش است:

۱- پیمایش شهری

پیمایش شهری: پیمایش شهری شامل شتاب و توقف، سواری در سطوح مختلف سرعت ثابت و کشش کوتاه از صعود تپه است. آزمون نتیجه‌ای که بسیار قابل‌مقایسه با سواری، خرید و ... روزمره می‌باشد را نشان می‌دهد.

۲- پیمایش تپه، سرعت ثابت

آزمون سرعت ثابت نتایج برای پیمایش تپه با سرعت ثابت را نشان می‌دهد.

۳- تست شتاب در گشتاور ثابت

اندازه‌گیری زمان برای رسیدن به سرعت ۱۸ کیلومتر بر ساعت است.

پارامترهای آزمون عملکرد به‌طور مداوم اندازه‌گیری می‌شوند. این پارامترها عبارت‌اند از:

- توان ورودی از دوچرخه‌سوار (گشتاور و سرعت)،
- توان ورودی از منبع تغذیه (ولتاژ و جریان)،
- بار جاده (توان خروجی - نیرو سرعت درایو)

داده‌های آزمایشی در گزارش آزمون ثبت‌شده و تجزیه‌وتحلیل می‌شوند.

تعیین محدوده مسافت دوچرخه برقی:

برای محاسبه محدوده، از مشخصات نامی باتری استفاده می‌شود. عملکرد واقعی باتری باید در آزمون باتری جداگانه

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

آزمایش می‌شود. تست باتری یک امر پرهزینه وقت‌گیر است که در تست سیستم درایو ثبت‌نشده است.

محاسبه محدوده (رنج)

۱- تست سرعت ثابت: در تست سرعت ثابت، مصرف انرژی به‌طور مداوم اندازه‌گیری می‌شود. محدوده با تقسیم ظرفیت نامی باتری به مصرف در یک سرعت معین و ضرب در همان سرعت، تعیین می‌شود.
۲- پیمایش شهر:مصرف وات-ساعت در پیمایش ترکیبی اندازه‌گیری می‌شود. مسافت پیموده‌شده اندازه‌گیری می‌شود.

محدوده با محاسبه تعداد چرخه‌هایی که می‌توان با ظرفیت نامی باتری انجام داد، محاسبه می‌شود. محدوده برابر است با تعداد چرخه‌ها × مسافت در هر چرخه.

ارائه نتیجه تست:

نتایج را می‌توان برای مصرف‌کننده به‌صورت داده‌ها و نمودارها نشان داد. از این آزمایش یک معدن از اطلاعات در دسترس است. از طریق تجزیه‌وتحلیل، یک شکل یا نمودار ساده را می‌توان برای نشان دادن این به مصرف‌کننده به دست آورد. نکته این است که بهترین شکل یا نمودار را استفاده شود. راه‌های مختلفی برای نشان دادن نتایج وجود دارد:

یک شکل ساده از سرعت در توان مشخصی از پدال: پیشنهاد به‌عنوان‌مثال ۰/۱ اسب بخار (برابر با ۷۳/۵ وات). بنابراین داده‌ها می‌توانند برابر با :

جاده مسطح سرعت ۰/۱ اسب بخار ۲۴/۵ کیلومتر بر ساعت، محدوده ۶۰ کیلومتر

۳- صعود تپه: سرعت ۰/۱ اسب بخار ۱۴/۴ کیلومتر بر ساعت، محدوده ۲۲ کیلومتر

نسبت تبدیل کمک و محدوده (رنج)

دوچرخه‌سواری مداوم در صعود تپه می‌تواند با سرعت مذکور در ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ وات ورودی ناشی از پدال‌زنی دوچرخه‌سوار مجدد نشان داده شود.

تپه، ۵۰ وات ۲۳/۲ کیلومتر بر ساعت، ۸۴ کیلومتر

تپه، ۱۰۰ وات ۲۵/۸ کیلومتر بر ساعت، ۸۵ کیلومتر

تپه، ۱۵۰ وات ۲۶/۲ کیلومتر بر ساعت، ۲۰۰ کیلومتر و

. ...

برای دوچرخه PDB همان روش تست می‌تواند استفاده شود اما ارائه آن ساده‌تر خواهد بود: سرعت حداکثری، سرعت صعود از تپه به‌راحتی اندازه‌گیری می‌شوند. تست شتاب نیز مشابه است.

گزارش آزمون موارد زیر را در برمی‌گیرد:

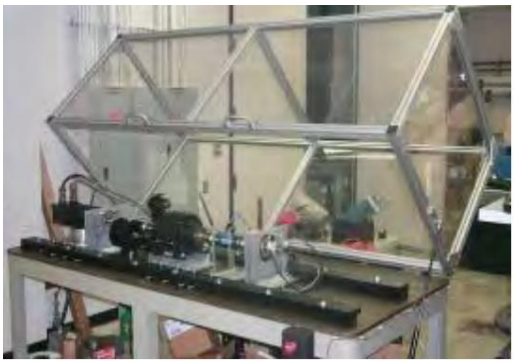
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- نتیجه سرعت ثابت در یک نمودار ارائه می‌شود که حداکثر محدوده و پشتیبانی را در شرایط ایده‌آل (سرعت ثابت) نشان می‌دهد.
- نتیجه پیمایش شهری: عملکرد سیستم درایو را در شرایطی که قابل‌مقایسه با شرایط واقعی است، نشان می‌دهد. نتیجه تست پشتیبانی متوسط، سطح حمایت در طول شتاب و محدوده است.
- محدوده و عملکرد بر روی ولتاژ و ظرفیت نامی باتری تعیین می‌شود.
- هزینه کلی آزمون: استاندارد ❋ قیمت ۱،۵۵۹.۰۰ $ - ۱،۶۹۸.۰۰ EUR 1300 - 1200 €) USD) در هر مدل

(❋: استاندارد = درصورتی‌که دوچرخه را بدون نصب در معاینه تست نصب کنید بدون نیاز به اصلاح، اگر اتصالات خاصی لازم باشد قیمت ممکن است افزایش یابد)

۳-٤- تست و آزمایش موتور BLDC

در شکل ۳-۳ نمونه‌ای از میز آزمایش جهت تست الکتروموتور نشان داده شده است. پارامترهایی که از خروجی میز آزمایش قرائت می‌شوند، عبارت‌اند از: موقعیت روتور، سرعت، گشتاور، درجه حرارت، ولتاژ، جریان و چگالی شار مغناطیسی. برای تعیین این پارامترها به سنسورهایی با کیفیت بالا نیاز است که سنسورهای موردنیاز تعدادی از پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری در جدول ۲-۳ نشان داده شده است. به‌منظور تعیین پارامترهای دیگر الکتروموتور، می‌توان از داده‌های اندازه‌گیری‌شده از میز آزمایش و روابط الکتروموتور بهره گرفت.



BLDCشکل ۳-۳: میز آزمایش غیرخطی تست موتور

جدول ۲-۳: انتخاب سنسورهای مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش

پارامترهای آزمایش	انتخاب سنسور
موقعیت و سرعت	انکدر
گشتاور	سنسور گشتاور
ولتاژ و جریان	سنسور جریان

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دما	ترمیستور
چگالی شار مغناطیسی	سنسور اثر هال

چگالی شار مغناطیسی جهت ارزیابی عملکرد یک الکتروموتور از این جهت اهمیت دارد که مقدار بیشینه‌ی آن، معیاری جهت ارزیابی اشباع الکترومغناطیسی است. چگالی شار مغناطیسی با استفاده از سنسور اثر هال و از طریق رابطه ۳- حاصل می‌شود. جهت اندازه‌گیری دمای بدنه الکتروموتور مورد آزمایش، می‌توان از ترموکوپل‌ها بهره گرفت [۵۱].

$$B = \frac{V_H \times Z}{R_H \times I} \qquad ۳-۱$$

در رابطه‌ی ۱-۳، V_H ولتاژ اثر هال، R_H ضریب هال، Z ضخامت صفحه حسگر و I جریان عبوری از حسگر است [۵۲].

به‌منظور استخراج تست‌های موردنیاز برای ارزیابی عملکرد موتور و تعیین مشخصه‌ها و پارامترهای آن از استانداردهای IEEE Std 113 و NEMA[1] MG1 بهره گرفته شده است که در ادامه بیان می‌گردد.

در استاندارد NEMA MG1، موتورهای DC بر اساس اندازه به سه گروه دسته‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از: موتورهای کوچک با توان نامی خروجی کمتر از یک-سوم اسب بخار و سرعت نامی کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه، موتورهای متوسط با توان خروجی تا ۱/۲۵ اسب‌بخار به ازای هر دور بر دقیقه است و موتورهای بزرگ با توان‌های خروجی بالاتر. عملکرد موتورهای کوچک و متوسط به دلیل داشتن اندازه و ابعاد ساخت استاندارد، با دقت بیشتری بررسی‌شده است. موتورهای بزرگ تولید انبوهی ندارند و معمولاً برای کاربردهای خاص طراحی می‌شوند. ازاین‌رو این موتورها ابعاد استانداردی نداشته و عملکرد کلی‌تری دارند [۵۳].

۳-٤-۱- ارزیابی عملکرد موتورهای BLDC کوچک و متوسط

در ادامه ابتدا تست‌های ارزیابی عملکرد موتور مورد آزمایش تحت شرایط مختلف بررسی می‌شوند که عبارت‌اند از:

- شرایط عملکردی
- افزایش دمای سیم‌پیچ
- تغییرات از ولتاژ نامی
- تغییرات سرعت
- اضافه جریان گذرا
- لرزش

- **شرایط عملکرد**

درجه حرارت محیط: درجه حرارت هوای اطراف باید بین ۱۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد باشد به‌جز حالاتی که توافق صورت می‌گیرد و ارتفاع نباید از ۱۰۰۰ متر (۳۳۰۰ فوت) تجاوز کند.

1- National Electrical Manufacturers Association

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مسیر چرخش: هنگامی‌که جهت چرخش مشخص نیست، موتورها باید با چرخش پادساعت‌گرد و ژنراتورها با چرخش ساعت‌گرد مورد آزمایش قرار گیرند [۵۴].

به‌طورکلی، شرایط عملکردی معمولی یا نرمال یک موتور BLDC موارد زیر را شامل می‌شود:

- در یک دمای خاص در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد
- در ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر
- در مکانی که مشکل جدی برای تهویه موتور وجود نداشته باشد.
- نصب بر روی یک سطح ثابت

- **افزایش درجه حرارت**

افزایش درجه حرارت هر یک از بخش‌های مختلف موتور، بالاتر از دمای خنک‌کنندگی، هنگامی‌که موتور در سرعت پایه آزمایش می‌شود، نباید از مقادیر داده‌شده در جدول ۳-۳ تجاوز کند. در این شرایط باید درجه حرارت محیط برابر با ۴۰ درجه سانتی‌گراد باشد [۵۳].

جدول ۳-۳: افزایش درجه حرارت

کلاس عایقی	A	B	F
دمای مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر	۷۰	۱۰۰	۱۳۰
دمای مقاومت سیم‌پیچ مغناطیسی	۷۰	۱۰۰	۱۳۰

- **تغییرات از ولتاژ نامی**

طبق استاندارد NEMA، موتورهای DC در حالتی که با منبع مناسب تغذیه می‌شوند، باید بتوانند تا ۱۱۰٪ ولتاژ نامی آرمیچر، عملکرد قابل قبولی داشته باشند. همچنین در حالتی که موتورها از طریق یک‌سوساز تغذیه می‌شوند، باید بتوانند با تغییرات ٪۱۰± ولتاژ نامی AC خط، عملکرد مناسب داشته باشند. اگرچه همان عملکرد موتور که در ولتاژ نامی به دست می‌آید در این تغییرات ولتاژ مورد انتظار نیست [۵۳].

- **تغییرات سرعت با بار**

هنگامی‌که موتور در ولتاژ نامی آرمیچر، سرعت پایه و درجه حرارت محیط نرمال کار می‌کند، تغییرات سرعت از بار نامی به بی‌باری، بایستی مطابق جدول ۴-۳ باشد. در واقع اگر موتور در ولتاژ نامی آرمیچر و سرعت پایه خود در بار نامی در حال کار باشد و ناگهان بار موتور جدا شود (حالت بی‌باری) درصد تغییرات سرعت موتور باید مطابق جدول ۴-۳ باشد [۵۳].

جدول ۴-۳: تغییرات سرعت

توان موتور (اسب بخار)	درصد مجاز تغییر سرعت در سرعت پایه
کمتر از ۳	۲۵
۵۰-۳	۲۰
۱۰۰-۵۱	۱۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

بیشتر از ۱۰۰	۱۰

در صورتی که موتور در سرعتی به غیر از سرعت نامی در حال حرکت باشد، میزان تغییرات سرعت از مقادیر داده‌شده در جدول ۴-۳ بیشتر خواهد بود.

- **تغییرات سرعت پایه به علت حرارت**

بر طبق استاندارد NEMA، تغییرات سرعت پایه از کارکرد موتور با بار نامی در دمای محیط (۴۰ درجه سانتی‌گراد) تا کارکرد با بار نامی و ولتاژ نامی آرمیچر در دمای حاصل از شرایط، نباید از مقادیر موجود در جدول ۵-۳ تجاوز کند [۵۳].

جدول ۵-۳: درصد تغییرات سرعت پایه نامی

نوع محیط	A	B	F	H
محیط باز	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
محیط بسته	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰

- **تغییرات سرعت نامی**

هنگامی‌که موتور در بار و ولتاژ نامی کار می‌کند و دمای سیم‌پیچی‌های آن ثابت است، تغییرات سرعت نامی توسط NEMA، ۰٫۵٪± تعریف‌شده است [۵۳].

- **اضافه جریان‌های گذرا**

طبق استاندارد NEMA، موتورهای DC می‌توانند تا ۵۰٪ اضافه جریان آرمیچر را برای یک دقیقه در ولتاژ نامی تحمل کنند. برای موتورهایی با سرعت قابل تنظیم این قابلیت برای تمام سرعت‌ها در بازه تا سرعت نامی، موردنیاز است [۵۳]. در صورتی‌که موتور در یک سرعت معین، با ولتاژی بسیار پایین‌تر از ولتاژ متناظر با آن سرعت کار کند، دچار اضافه‌جریان خواهد شد [۵۵].

- **لرزش**

لرزش موتور به علت عدم تقارن‌های مکانیکی یا الکترومغناطیسی ایجادشده، باید با استفاده از یک منبع dc با ریپل پایین به‌صورت یک ژنراتور، اندازه‌گیری شود. فرکانس لرزش به سرعت چرخش روتور مرتبط می‌شود. در مواردی که موتور با یک‌سوساز تغذیه می‌شود، علاوه بر عدم تقارن مکانیکی یا مغناطیسی، لرزش ممکن است به دامنه و فرکانس مؤلفه‌های ریپل جریان آرمیچر و میدان مرتبط باشد. آزمایش‌ها باید در بارهای مختلف بر روی محدوده کامل سرعت در موتورهای دارای کنترل سرعت انجام شود. اندازه‌گیری لرزش باید در محفظه یاتاقان‌ها که روی شفت الکتروموتور قرار دارند، انجام گیرد. اگر محفظه یاتاقان در دسترس نباشد باید در صورت امکان یک محفظه پشتیبان نزدیک به محفظه یاتاقان جهت قرائت مقادیر قرار داد [۵۴].

حد سرعت لرزش فیلترنشده برای موتورهای استانداردی که به‌صورت ارتجاعی نصب‌شده‌اند نباید از مقادیر موجود در جدول ۶-۳ تجاوز کند. نصب ارتجاعی برای موتور حالتی است که موتور روی یک فنر (رینگ) به‌صورت معلق نصب می‌شود [۵۳].

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۶-۳: حد لرزش فیلترنشده برحسب استاندارد **NEMA**

سرعت (r/min)	فرکانس چرخش روتور (Hz)	پیک سرعت لرزش mm/s، (in/s)
۳۶۰۰	۶۰	۳/۸ (۰/۱۵)
۱۸۰۰	۳۰	۳/۸ (۰/۱۵)
۱۲۰۰	۲۰	۳/۸ (۰/۱۵)
۹۰۰	۱۵	۳ (۰/۱۲)
۷۲۰	۱۲	۲/۳ (۰/۰۹)
۶۰۰	۱۰	(۰/۰۸)

برای موتورهایی که نصب آن‌ها سخت بوده و موتور مستقیماً به یک پایه بزرگ متصل می‌شود، اعداد موجود در جدول ۶-۳ در ۰/۸ ضرب خواهند شد [۵۳].

- **تست سنسورهای اثر هال الکتروموتور BLDC**

هدف از انجام این تست بررسی کارکرد صحیح سنسورهای اثر هال موتور می‌باشد. تجهیزات موردنیاز برای انجام این تست عبارت‌اند از: مولتی‌متر، موتور دوچرخه همراه با سنسور، کنترل‌کننده موتور، منبع توان (یک باتری معمولی) و یک جعبه یا پیچ‌گوشتی کوچک. کابل هال موتور به کابل هال کنترل‌کننده متصل می‌شود و کنترل‌کننده به باتری تغذیه وصل می‌شود. به کمک مولتی‌متر، ولتاژ دو سر سنسور اثر هال اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن حدود ۴ تا ۵ ولت dc می‌باشد. سپس چرخ به آرامی به سمت عقب به حرکت درآورده خواهد شد که در این زمان ولتاژ باید بین دو مقدار ۰ تا ۵ ولت تغییر کند و هنگامی‌که چرخ متوقف می‌شود، ولتاژ دو سر هر یک از سنسورهای هال باید برابر با ۰ یا ۵ ولت باشد. درصورتی‌که ولتاژ بین دو مقدار فوق تغییر نکند ممکن است که سیم‌پیچی سنسور هال دچار مشکل باشد و یا ممکن است خود سنسور دارای ایراد باشد. همچنین در صورتی‌که چرخ به‌سرعت چرخانده شود، مقدار ولتاژ دو سر سنسورها باید برابر با مقدار ثابت ۲/۵ ولت باشد که میانگین دو مقدار ۰ و ۵ ولت است [۵۶].

۲-۴-۳- تعیین مشخصه‌ها و پارامترهای موتور BLDC

در این قسمت به تست‌هایی از موتور پرداخته می‌شود که به کمک آن‌ها پارامترها و مشخصه‌های موتور تعیین خواهد شد.

- **تست اپشتاین ورقه‌های هسته**

سیم‌پیچی‌ها استوانه‌ای، به عرض داخلی ۳۲ میلی‌متر و ارتفاع پیشنهادی حداقل ۱۰ میلی‌متر است. پیچک‌های هر سیم‌پیچی مطابق شکل به‌گونه‌ای قرارگرفته‌اند که یک مربع تشکیل داده‌اند. به‌منظور کاهش اثر امپدانس سیم‌پیچی‌ها بر روی تلفات مداری فریم، رابطه‌ی امپدانسی سیم‌پیچی‌ها باید از روابط زیر پیروی کند:

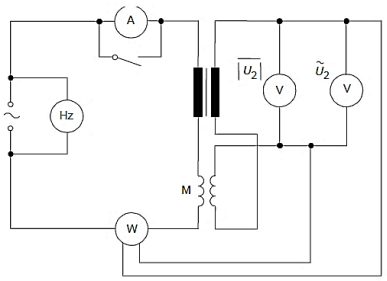
$$\frac{R_1}{N_1^2} \le 1.25\times10^{-6}\Omega \qquad \frac{R_2}{N_2^2} \le 5\times10^{-6}\Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \le 2.5\times10^{-9}H \qquad \frac{L_2}{N_2^2} \le 2.5\times10^{-9}H$$

که در آن R_1 و R_2 مقاومت الکتریکی، L_1 و L_2 اندوکتانس و N_1 و N_2 تعداد دور به ترتیب سیم‌پیچی اولیه و ثانویه

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

هستند. شکل ۴-۳ پیکربندی فریم اپشتاین را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۳: پیکربندی بستر اپشتاین [۵۷]

طول مؤثر مغناطیسی مدار فریم l_m به‌صورت پیش‌فرض ۰٫۹۴ متر است بنابراین وزن فعال مغناطیسی نمونه‌ها از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$m_a = \frac{l_m}{4l} m \qquad ۴-۲$$

که در آن l طول ورق نمونه به متر، m وزن کل نمونه‌ها به کیلوگرم است.

منبع ولتاژ فریم اپشتاین باید امپدانس بسیار کوچک داشته و از لحاظ دامنه ولتاژ و فرکانس از پایداری بالایی برخوردار باشد. حداکثر انحراف مجاز ولتاژ و فرکانس ۰٫۲٪ است. ولتاژ ثانویه فریم اپشتاین باید توسط یک ولت‌متر مناسب با امپدانس بیشتر از ۱۰۰۰ اهم بر ولت اندازه‌گیری گردد. ولت‌مترهای موردنیاز تست عبارت‌اند از: ولت‌متر با قابلیت اندازه‌گیری متوسط ولتاژ، ولت‌متر مقدار مؤثر ولت‌متر مقدار پیک. حداکثر تلورانس فرکانس ۰٫۱٪ و حداکثر تلورانس وات متر ۰٫۵٪ است. همچنین مقاومت مدار وات متر باید حداقل ۵۰۰۰ برابر راکتانس آن باشد [۵۷].

❖ روند اندازه‌گیری تلفات نمونه‌ها

ورق‌ها به‌دقت اندازه‌گیری وزن شده و داخل بستر وارد پیچک‌ها می‌گردند.

تنظیم دقیق منبع ولتاژ: همان‌طور که ولتاژ خروجی را به‌آرامی افزایش داده تا به مقدار یکسو شده $|\overline{U}_2|$، آمپرمتر وات‌متر را چک کرده تا جریان بیشتر از مقدار نامی نرسد. مقدار ولتاژ $|\overline{U}_2|$ از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$|\overline{U}_2| = 4N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} AJ \qquad ۴-۳$$

که در آن $|\overline{U}_2|$ متوسط ولتاژ یکسو شده القایی در ثانویه، A سطح مقطع نمونه‌ها به مترمربع، f فرکانس به هرتز، J پیک پلارازیسون مغناطیسی به تسلا، N_2 تعداد دور ثانویه، Ri مجموع مقاومت الکتریکی تمام اجزای سمت اولیه و Rt مجموع مقاومت الکتریکی تمام اجزای ثانویه است. سطح مقطع نمونه‌ها از معادله زیر قابل‌محاسبه است که در آن ρ جرم حجمی نمونه است.

$$A = \frac{m}{4l\rho_m} \qquad ۴-۴$$

❖ نحوه اندازه‌گیری توان

مقدار اندازه‌گیری شده P_m توسط وات‌متر شامل تلفات نمونه‌ها به‌علاوه‌ی توان مصرفی سمت ثانویه است که مقدار

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

تلفات واقعی نمونه‌های ورق P_c از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111|\overline{U}_2|)^2}{R_i} \qquad ۳-۵$$

همچنین تلفات مخصوص از رابطه‌ی زیر قابل‌محاسبه است:

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4l}{ml_m} \qquad ۳-۶$$

استاندارد فولاد غیر جهت‌دار برای ساخت موتورهای کوچک برای ورق آماده و نیمه‌آماده به ترتیب در استانداردهای IEC-60404-8-3 و IEC-60404-8-4 آمده است. ورق‌ها مطابق این دو استاندارد برش خورده، پانچ شده و سپس مطابق استاندارد IEC-60404-2 در بستر اپشتاین [۵۷] مورد آزمون قرار می‌گیرند.

- **تست مقاومت**

مقاومت سیم‌پیچ‌های موتور به‌منظور بررسی اتصالات سیم‌پیچی، محاسبه تلفات RI^2 و همچنین تعیین یک مقاومت مرجع در دمای مرجع برای تعیین دمای میانگین سیم‌پیچ‌ها، محاسبه می‌شود [۵۴]. با استفاده از یک مولتی‌متر می‌توان مقاومت سیم‌پیچی‌های موتور BLDC را با دقت اندازه‌گیری نمود. درحالی‌که موتور DC جاروبک‌دار به دلیل افت کنتاکتی جاروبک و تغییر مقاومت بر اساس مکان اتصال جاروبک به کموتاتور، دارای مقاومت متغیر است؛ بنابراین در موتورهای DC برای دستیابی به یک مقدار پایدار برای مقاومت باید از مقادیر به‌دست‌آمده از تکرار آزمایش روتور قفل‌شده، میانگین گرفته شود و یا از روش اندازه‌گیری دینامیکی برای به دست آوردن مقاومت بهره گرفت. برای انجام آزمایش، ترمینال‌های موتور باید به یک منبع تغذیه dc متصل شود و حد بالای جریان نیز باید طوری تنظیم گردد که سبب کاهش تغییرات افت کنتاکی و درجه حرارت در طول آزمایش شود. در صورتی‌که روش تشخیص حد بالای جریان موجود نباشد، ۲۵ درصد جریان نامی موتور به‌عنوان حد جریان در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ لازم برای حرکت موتور در جریان تعیین‌شده به دست می‌آید و درنهایت مقاومت محاسبه خواهد شد ($R=V/I$). در روش اندازه‌گیری دینامیکی به‌منظور حذف تأثیر نیروی محرکه الکترومغناطیسی معکوس باید پلاریته ولتاژ و یا جهت چرخش موتور معکوس شود و سپس میانگین دو مقدار به‌دست‌آمده برای مقاومت محاسبه گردد [۵۸].

- **استخراج مشخصه گشتاور- سرعت**

منحنی گشتاور- سرعت الکتروموتور از آزمایش بارداری به دست می‌آید. برای انجام این آزمایش پس از راه‌اندازی الکتروموتور و ضمن ثابت نگه‌داشتن ولتاژ، گشتاور بار طی چند مرحله افزایش می‌یابد و در هر مرحله سرعت روتور توسط دورسنج و گشتاور بار توسط گشتاورسنج اندازه‌گیری شده و نتایج آن ثبت می‌شود. مراحل آزمایش تا رسیدن جریان آرمیچر به مقدار نامی ادامه می‌یابد و می‌توان بار الکتروموتور را تا گشتاور نامی افزایش داد [۵۹].

- **تست مقاومت حرارتی**

در این تست، افزایش درجه حرارت موتور (درجه سانتی‌گراد) را به ازای هر وات تلفات الکتروموتور تعیین می‌شود. برای این تست، موتور در یک مکان ثابت قرارگرفته و شفت موتور قفل می‌شود. مقاومت سیم‌پیچی سرد به کمک مولتی‌متر اندازه‌گیری شده و دمای محیط ثبت می‌شود. به‌منظور مشاهده افزایش دما، یک ترموکوپل به بدنه موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

نصب خواهد شد. ترمینال‌های موتور به یک منبع تغذیه قابل‌برنامه‌ریزی اتصال می‌یابد. سطح ولتاژ به‌آرامی تا رسیدن به جریان نامی افزایش می‌یابد. جریان نامی پس از ثابت شدن دمای بدنه موتور، برای یک ساعت به موتور اعمال می‌شود. سپس بلافاصله ترمینال‌های موتور را جدا کرده و مقاومت سیم‌پیچی گرم اندازه‌گیری می‌شود و دمای محیط ثبت خواهد شد. آزمایش برای شرایط نامی تکرار خواهد شد. ثابت مقاومت حرارتی از رابطه‌ی ۳- محاسبه خواهد شد:

$$R_{th} = \frac{(R_{hot}/R_{cold}) - 1 + (amb_{hot} - amb_{cold})}{winding.const \times voltage_{hot} \times current_{hot}} \qquad ۳-۷$$

در رابطه‌ی فوق ثابت سیم‌پیچی $winding.const$ برای مس برابر با ۰٫۰۰۳۹۳ خواهد بود، amb_{hot} برابر با درجه حرارت محیط گرم، amb_{cold} برابر با درجه حرارت محدوده سرد، $voltage_{hot}$ برابر با ولتاژ سیم‌پیچ گرم، $current_{hot}$ جریان سیم‌پیچ گرم، R_{th} مقاومت حرارتی، R_{hot} مقاومت سیم‌پیچ گرم و R_{cold} برابر با مقاومت سیم‌پیچ سرد است [۵۸].

- **آزمایش منحنی ناحیه عملکردی ایمن (SOAC[1])**

منحنی SOAC مرزهای عملکرد ایمن الکتروموتور را تعیین می‌کند. ثابت مقاومت حرارتی جهت تخمین دمای سیم‌پیچی و حفظ دمای عملکردی ایمن (معمولاً پایین‌تر از ۸۵ درجه سانتی‌گراد به‌اضافه دمای محیط) استفاده می‌شود. برای این آزمایش مکان موتور باید ثابت باشد و شفت آن به یک نیروسنج و یک ترموکوپل به بدنه موتور جهت نمایش افزایش دما وصل می‌شود. پایانه‌های موتور به یک منبع تغذیه قابل‌برنامه‌ریزی اتصال می‌یابد تا ولتاژ منبع تغذیه در ولتاژ نامی موتور و جریان در پیک نامی تنظیم شود. جریان نامی به‌طور پیوسته با گشتاور مناسب به موتور اعمال می‌شود. ولتاژ منبع تغذیه جهت فراهم کردن دمای مناسب سطح بدنه تنظیم می‌شود. سرعت و گشتاور از کنترل‌کننده نیروسنج و ولتاژ و جریان از منبع تغذیه به دست می‌آید. گشتاور موردنیاز برای حفظ دمای سیم‌پیچی در ۸۵ درجه سانتی‌گراد بعلاوه دمای محیط، تنظیم می‌شود. آزمایش در سطوح دلخواه بعدی تکرار خواهد شد. داده‌ها در سرعت و گشتاور مختلف جهت رسم SOAC به دست می‌آیند. افزایش دمای سیم‌پیچی به‌طور تقریبی از رابطه ۸-۳ به دست می‌آید:

$$Temp_{widing} = R_{th} \times (\text{watts lost}) \qquad ۳-۸$$

$$Temp_{widing} = R_{th} \times \left(\frac{V \times I - W \times T)}{۱۳۵۱/۷} \right)$$

در رابطه فوق گشتاور برحسب اونس- اینچ است. مقاومت سیم‌پیچ سرد در شروع آزمایش، مقاومت سیم‌پیچ گرم در پایان آزمایش و محدوده دما در هر اندازه‌گیری ثبت می‌شود [۵۸].

- **بازده**

راندمان موتور برابر با نسبت توان خروجی به توان ورودی است. همچنین توان خروجی برابر با توان ورودی است که تلفات از آن کم شده است. ازاین‌رو درصورتی‌که دو پارامتر از سه پارامتر (توان ورودی، توان خروجی و تلفات) مشخص باشد، بازده به کمک رابطه ۳- محاسبه خواهد شد:

1-Safe Operating Area Curve

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$
$$Efficiency = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}}$$ ۳-۹

برای تعیین توان ورودی و خروجی می‌توان از روش اندازه‌گیری مستقیم استفاده کرد. در روش اندازه‌گیری مستقیم، پارامترهای ولتاژ و جریان ورودی و سرعت و گشتاور خروجی، دمای محیط، دما و مقاومت آرمیچر و دمای سیم‌پیچ میدان باید در ۶ مقدار بار متفاوت از ۰٫۲۵ تا ۱٫۵ برابر بار نامی، اندازه‌گیری شود. برای قرائت پارامترها، میزان افزایش درجه حرارت موتور باید بین ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ افزایش درجه حرارت نامی موتور باشد. به‌منظور محاسبه راندمان، پارامترها باید به ازای ولتاژ و سرعت نامی تعیین شوند. برای موتورهای دارای سرعت متغیر، اطلاعات باید در سرعت پایه تعیین شوند.

برای تعیین توان خروجی می‌توان از سنسور گشتاور و یا نیروسنج استفاده کرد. در این صورت توان خروجی از رابطه‌ی ۱-۳ حاصل می‌شود:

$$P_{out} = \frac{T - n}{k}$$ ۳-۱

در رابطه‌ی فوق T گشتاور، n سرعت چرخش (دور/دقیقه) و k ضریب ثابتی است که با توجه به واحد استفاده‌شده برای گشتاور دارای مقادیر مختلفی می‌باشد که درجدول ۷-۳ آورده شده است.

به‌منظور به دست آوردن نتایج دقیق، بازه نیروسنج نباید از سه برابر بازه موتور مورد آزمایش بیشتر باشد و نیروسنج باید به ۰٫۲۵ ٪ گشتاور نامی خود حساس باشد [۵۴].

جدول ۷-۳: مقادیر مختلف ثابت **k** به ازای واحد گشتاور

مقادیر k	واحد گشتاور (T)
$۹٫۵۴۹ \times ۱۰^{۳}$	نیوتن متر
$۷٫۰۴۳ \times ۱۰^{۳}$	پوند- نیرو (ft)
$۱٫۳۵۲ \times ۱۰^{۶}$	اونس-نیرو (in)

برای تعیین تلفات $RI^{۲}$، مقاومت هریک از سیم‌پیچ‌ها باید در دمایی برابر با دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌علاوه افزایش دمای بار نامی، تصحیح شود. درصورتی‌که افزایش دمای بار نامی اندازه‌گیری نشده باشد، مقاومت سیم‌پیچ‌ها باید مطابق با دمای شرح داده‌شده در جدول ۸-۳ تصحیح شود.

جدول ۸-۳: دمای موردنیاز برای تصحیح مقدار مقاومت سیم‌پیچ‌ها

کلاس عایقی سیستم	درجه حرارت
A	۸۵
B	۱۱۰
F	۱۳۵
H	۱۵۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

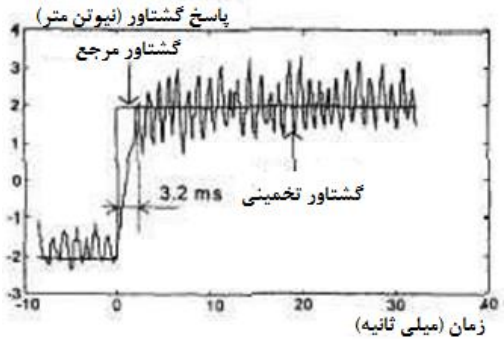
به‌منظور اصلاح مقاومت سرد اندازه‌گیری‌شده در یک درجه حرارت استاندارد، مانند ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌توان از رابطه ۲-۳ استفاده کرد:

$$R_1 = R_2\left(\frac{k + t_1}{k + t_2}\right) \qquad ۳-۲$$

در رابطه‌ی فوق R_1 مقاومت سیم‌پیچی اندازه‌گیری‌شده در درجه حرارت سرد استاندارد t_1، R_2 مقاومت سیم‌پیچی اندازه‌گیری‌شده در درجه حرارت t_2، ثابت k برای آلومینیوم برابر با ۲۲۵ و برای مس برابر با ۲۳۴٫۵ می‌باشد [۵۴].

- **زمان واکنش**

در آزمایش پاسخ گذرا، زمان پاسخ (زمان صعود) در سطوح مختلف گشتاور و سرعت، اندازه‌گیری خواهد شد. جهت شناسایی تغییرات دامنه گشتاور، یک گشتاور به‌صورت پله‌ای به ورودی موتور اعمال خواهد شد. شکل ۵-۳ پاسخ گشتاور برای یک تغییر گام گشتاور از ۲- به ۲ نیوتن. متر زمانی که روتور قفل‌شده است را نشان می‌دهد [۶۰].



شکل ۵-۳: پاسخ پله گشتاور در حالت ثابت [۶۰]

مشاهده می‌شود که زمان پاسخ به تغییرات گشتاور، بسیار سریع بوده (۳٫۲ میلی‌ثانیه) و هیچ‌گونه بالازدگی[1] وجود ندارد. به‌منظور محاسبه زمان صعود گشتاور باید از یک موتور مورد آزمایش و یک موتور بار برای تولید یک گشتاور ثابت استفاده کرد. روند آزمایش به شرح زیر است:

- دو موتور با استفاده از کلاچ به یکدیگر متصل می‌شوند.
- موتور بار با یک سرعت ثابت شروع به کار می‌کند. سرعت کل سیستم توسط موتور بار کنترل خواهد شد. در این مرحله موتور مورد آزمایش خاموش است.
- بعد از چند ثانیه موتور مورد آزمایش برای رسیدن به یک گشتاور معین، T_m، تغذیه می‌شود. سپس گشتاور موتور مورد آزمایش توسط کنترل‌کننده به یک مقدار مشخص افزایش یافته و برای چند ثانیه در این مقدار باقی می‌ماند.
- آزمایش برای سرعت‌های مختلف موتور بار تکرار خواهد شد.
- درنهایت زمان بین گشتاور کم و گشتاور بالاتر به‌عنوان زمان صعود گشتاور اندازه‌گیری می‌شود.

1- Overshoot

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

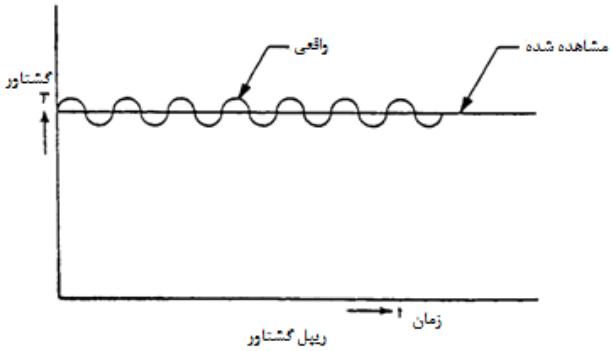
زمان صعود سرعت نیز از آزمایش بی‌باری تعیین می‌شود. برای این آزمایش موتور مورد آزمایش با یک سرعت مشخص و بدون بار و در یک ولتاژ معین در شرایط حالت پایدار کار می‌کند. سپس سرعت الکتروموتور تا رسیدن به مقدار مطلوب افزایش می‌یابد. زمان بین این دو سرعت به‌عنوان زمان صعود برای سرعت اندازه‌گیری خواهد شد [۶۰].

- **ریپل گشتاور**

ریپل گشتاور از رابطه ۳-۳ محاسبه می‌شود [۵۸]:

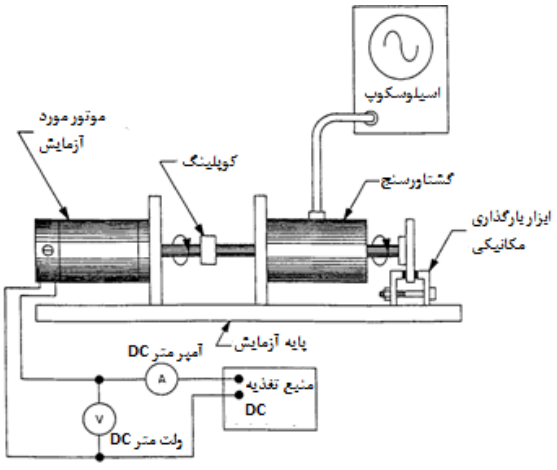
$$Tr = \frac{\text{Peak- to-Peak Torque Ripple}}{\text{Average Output Torque}} \times ۱۰۰(٪) \qquad ۳-۳$$

بررسی دقیق‌تر ریپل گشتاور در شکل ۳-۶ نشان داده‌شده است.



شکل ۳-۶: آزمایش ریپل گشتاور [۵۸]

ریپل گشتاور مشاهده‌شده ناشی از کلید زنی، گشتاور رلوکتانسی آرمیچر و گاهی اوقات از یاتاقان‌ها است. ریپل گشتاور معمولاً درصد بسیار کوچکی از گشتاور نامی خروجی بوده و در بسیاری از کاربردها قابل‌چشم‌پوشی است. همچنین ریپل گشتاور ممکن است در برخی از کاربردها مشکل‌ساز شده که در این صورت باید توسط وسیله‌ای اندازه‌گیری شود. درصورتی‌که اینرسی دستگاه اندازه‌گیری نشان داده‌شده در شکل ۳-۷ بسیار کوچک‌تر نسبت به اینرسی موتور باشد، این دستگاه می‌تواند ریپل گشتاور را به‌صورت دقیق اندازه‌گیری نماید (در غیر این صورت فیلتر کردن اینرسی، اندازه‌گیری ریپل را بی‌اعتبار می‌کند) [۵۸].



شکل ۳-۷: دستگاه آزمایش ریپل گشتاور [۵۸]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۵-۳- آزمون‌های استاندارد دوچرخه برقی

ایده یک آزمایش استاندارد سال‌هاست که در صنعت ماشین و موتورسیکلت متداول است و نیاز به استاندارد برای صنعت دوچرخه‌های برقی نیز وجود دارد- که محدوده (رنج) در آن مهم و بشدت مورد بحث قرارگرفته است [۴۸].

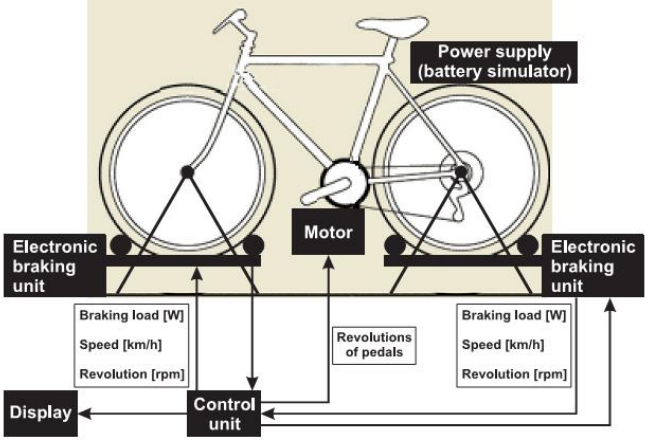
تجربه بسیاری از دوچرخه‌سواران در مورد محدوده (رنج) دوچرخه برقی این است که مقدار واقعی آن به‌اندازه درصد زیادی از آنچه تولیدکننده ادعا می‌کند کم‌تر است. بنابراین، نیازمند به استانداردسازی می‌باشد که هر مدل جدید دوچرخه برقی قبل از اینکه بتولند بفروش برسد باید تحمل نماید، همانند استلنداردسازی اندازه‌های CO_2 در خودروها [۴۸]. بخش چالشی این است که چگونه باید عامل انسانی را در نظر گرفت، چرا که هر انسان می‌تواند مقدار متفاوتی از توان را اعمال کند [۴۸].

به منظور تست دوچرخه برقی می‌توان از یک ایستگاه تست استفاده کرد که نمونه‌ای از آن در شکل ۸-۳ نشان داده‌شده است. یکی از مشخصات مهم این ایستگاه انعطاف‌پذیری است. اسکلت اصلی ایستگاه فلزی بوده و دوچرخه در این ایستگاه محکم می‌شود. چرخ‌ها نیز باید بتوانند آزادانه بچرخند. برای چرخاندن پدال‌ها و شبیه‌سازی شرایط عملکرد نرمال، یک موتور به پدال وصل می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی بار نیز ترمز الکترونیکی به چرخ‌ها متصل می‌شود. در این نمونه از ایستگاه تست دوچرخه، از شبیه‌ساز باتری استفاده‌شده که به کمک آن جریان، ولتاژ و توان ورودی اندازه گرفته می‌شود و درنهایت امکان محاسبه راندمان کلی دوچرخه را در اختیار قرار می‌دهد. شماتیک کلی دوچرخه برقی مورد آزمایش در شکل ۹-۳ نشان داده‌شده است.



شکل ۸-۳: نمونه‌ای از پایه تست دوچرخه برقی [۶۱]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۹-۳: شماتیک کلی دوچرخه برقی مورد آزمایش [۶۱]

در طول آزمایش پارامترهای متعددی مانند ولتاژ، جریان، گشتاور و سرعت اندازه‌گیری خواهند شد. در ادامه تست‌های موتور دوچرخه برقی بررسی خواهد شد [۶۱].

۳-۵-۱- تست جاده

الزامات

در هنگام انجام تست، نباید هیچ مشکلی و یا عدم تقارنی در سیستم و یا جزئی در دوچرخه و یا در ساختار آن (فرمان، زین، کنترل‌کننده‌ها و ...) وجود داشته باشد. دوچرخه برقی چه با سیستم کمکی و چه بدون سیستم کمکی باید کنترل پایداری در ترمز کردن، دور زدن و هدایت کردن داشته باشد و بتوان آن را حتی با یک دست بدون دشواری یا خطر برای دوچرخه‌سوار بتوان هدایت نمود.

روش تست

ابتدا، در صورت لزوم، هر EPAC انتخاب‌شده برای تست جاده بررسی و تنظیم شود که فرمان و چرخ‌ها به‌صورت آزاد و بدون لقی چرخانده می‌شوند، ترمزها به‌درستی تنظیم می‌شوند و مانع چرخش چرخ‌ها نمی‌شوند. در صورت لزوم هم‌ترازی چرخ‌ها بررسی و تنظیم شود و تایرها به‌اندازه‌ی فشار حک‌شده بر روی دیواره‌ی جانبی تایر، باد شوند. در صورت لزوم، تنظیم زنجیر چرخ بررسی و اصلاح شود و هر دنده- کنترل برای عملکرد صحیح و آزاد بررسی شود. همچنین موقعیت زین و صندلی به‌دقت تنظیم شود.

این تست باید با وزن کل مجاز تعیین‌شده توسط سازنده انجام شود. اطمینان حاصل شود که سواری دوچرخه برای حداقل ۱ کیلومتر تست می‌شود [۶۲].

۳-۵-۲- تست عملکرد فرسودگی

برای این تست باید بار موتور شبیه‌سازی شود. سپس به تعداد دفعات بالا، موتور راه‌اندازی و متوقف می‌شود [۶۳].

۳-۵-۳- تست شیب‌پیمایی

هدف از این تست بررسی میزان شیبی است که دوچرخه برقی می‌تواند در مسیر خود طی نماید. برای انجام این

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

آزمایش دوچرخه باید دارای شرایط زیر باشد [۶۴]:

- تمام قسمت‌ها و اجزای دوچرخه باید با مشخصات فنی اعلام‌شده توسط سازنده، منطبق باشد.
- تنظیم ترمزها، کلاچ، سیستم سوخت، سیستم احتراق و درجه، کیفیت و مقدار روان کننده‌ها برای قطعات مختلف متحرک باید با توصیه سازنده مطابقت داشته باشد.
- لاستیک‌ها باید به‌صورت هم‌زمان شروع به کار کرده و عمق عاج آن‌ها نباید از ۹۰ درصد عمق عاج لاستیک نو کم‌تر باشد. همچنین لاستیک‌ها باید بتواند برای فاصله حداقل ۵۰۰ کیلومتر و یا برای فاصله پیشنهادی برای کارکرد دوچرخه، هرکدام که کمتر بود، کارکرد داشته باشند.
- فشار لاستیک در شرایط هوای سرد باید مطابق با مقدار پیشنهادی سازنده، تنظیم شود.
- دوچرخه باید با یک وزن کلی مشخص، بارگذاری شود و توزیع بار بین محورها باید مطابق با مشخصات سازنده باشد.
- قبل از انجام آزمایش، دوچرخه، تمام اجزا و سیستم آن باید به یک دمای عملکردی پایدار نرمال رسیده باشند.

شرایط انجام آزمایش نیز به شرح زیر است:

- شرایط جوی در محل آزمایش مانند فشار، دما و رطوبت نسبی باید ثبت شود. چگالی هوا در محل آزمایش (d_t) باید با استفاده از رابطه ۴-۳ محاسبه گردد. چگالی هوای محاسبه‌شده نباید بیش از ٪۷/۵ با چگالی هوای مرجع متفاوت باشد.

$$d_t = d_0 \times \left(\frac{H_t}{H_0}\right) \times \left(\frac{T_0}{T_t}\right) \qquad ۴-۳$$

در رابطه فوق d_t چگالی هوا در شرایط تست و برحسب kg/m^3، H_t فشار محیط در شرایط تست و برحسب kP_a، T_t دمای محیط در شرایط تست و برحسب K، d_0 چگالی هوا در شرایط مرجع ($۱/۱۶۸ kg/m^3$)، H_0 فشار جوی در شرایط مرجع ($۱۰۰ kP_a$)، T_0 دما در شرایط مرجع ($۳۰۰ K$)، است [۶۴].

- رطوبت نسبی در محل آزمایش باید بین ۴۵ تا ۷۵ درصد باشد.
- سطح مسیر آزمون باید خشک باشد و جاده با آسفالت یا بتن پوشیده شده باشد. شیب جانبی این مسیر نباید بیش از ۳ درصد باشد. طول شیب باید حداقل برابر با پایه چرخ وسیله نقلیه به‌علاوه ۱۵ متر باشد.
- شیب مسیری که آزمایش‌ها بر روی آن انجام می‌شود، در سه مکان اندازه‌گیری شده و درنهایت زاویه‌ی میانگین این مقادیر به‌عنوان شیب گزارش خواهد شد.

مراحل انجام تست نیز به شرح زیر است [۶۴]:

- آزمایش باید ترجیحاً در یک شیب مشخص انجام شود. در صورتی که چنین شیبی در دسترس نباشد، نزدیک‌ترین شیب در دسترس برای آزمایش انتخاب خواهد شد. دوچرخه باید بر روی شیب با استفاده

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

از ترمز جلو و یا عقب پارک شود. جلوی دوچرخه به سمت بالا و تمام چرخ‌ها در شیب قرار داشته و نقطه عقب دوچرخه حداقل یک متر جلوتر از پایین شیب است.

- موقعیت دنده دوچرخه در لحظه‌ی شروع در حالت خلاص بوده و به محض شروع به حرکت به پایین‌ترین دنده منتقل می‌گردد.
- در مواردی که تست در شیب نامشخص انجام می‌گردد بار روی دوچرخه افزایش/کاهش یافته تا زمانی که دوچرخه توانایی شروع به کار و طی کردن شیب را داشته باشد. این عملیات بدون لرزش و ارتعاش شدید دوچرخه امکان‌پذیر است. آزمایش باید سه بار تکرار شود و در هر سه مورد آزمایش باید موفقیت‌آمیز بوده و در خلال آزمایش‌ها دمای عملکردی دوچرخه نباید از دمای عملکردی موتور/کلاچ تجاوز نماید.

میزان افزایش بار بر روی دوچرخه و محورها باید متناسب با توافق صورت گرفته با سازنده دوچرخه باشد. در صورت نیاز به با بیش‌تر آزمون باید در یک شیب مناسب دیگر انجام شود.

۳-٦- جمع‌بندی

هدف از تدوین این فصل، بررسی استانداردهای موجود در دنیا برای دوچرخه‌های برقی بوده است که طی تحقیقات انجام شده کشورهای استرالیا، کانادا، چین، اتحادیه اروپا، هند، اسرائیل، زلاندنو، روسیه و ایالات متحده آمریکا از جمله کشورهایی هستند که دارا قوانین برای استفاده از دوچرخه برقی در کشور می‌باشند. همچنین در ادامه فصل به مطالعه انواع استانداردهای موجود پرداخته شده است و تست‌ها و آزمون‌های دوچرخه برقی و موتور BLDC طراحی شده بر اساس استانداردها و مطالعات روز دنیا استخراج شده اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ٤- امکان سنجی تامین مواد اولیه و قطعات ساخت و تست محصول نهایی در داخل کشور

٤-١- مقدمه

در فصل‌های پیشین به بررسی انواع سیستم‌های کنترلی و محرکه دوچرخه‌های برقی و انواع قرارگیری موتور در دوچرخه برقی و اجزای الکترونیکی تشکیل‌دهنده آن پرداخته شد. از مهم‌ترین اجزای دوچرخه برقی می‌توان به موتورهای BLDC و درایو اشاره نمود که هرکدام شامل ریزبخش‌های متعددی می‌شوند. موتورهای BLDC شامل بخش‌هایی از قبیل آهنرباها، سیم پیچ‌ها، ورق‌های هسته و ... بوده و کنترل‌کننده و درایو دارای قطعات الکترونیکی از جمله میکروکنترلر، IC، PCB، هیت سینک[1] و ... هستند. در این فصل به امکان‌سنجی تولید هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده موتور و درایو و همچنین امکان تست دوچرخه برقی در کشور پرداخته می‌شود.

٤-٢- تامین مواد اولیه الکتروموتور

مواد مغناطیسی به‌کاررفته در ساختار الکتروموتورها تأثیر بسزایی در کیفیت ساخت و همچنین بازدهی آن‌ها دارد. ازجمله مهم‌ترین این مواد در ساخت الکتروموتورهای BLDC، می‌توان به ورق‌های مغناطیسی هسته‌ی موتور (مواد نرم مغناطیسی) و آهنربا (مواد سخت مغناطیسی) جهت تحریک جریان مستقیم در روتور الکتروموتور اشاره نمود. کیفیت هرچه بهتر هریک از این دو ماده منجر به بهبود خروجی‌های اساسی الکتروموتور ازجمله گشتاور و بازده آن است؛ بنابراین ضروری است که ویژگی‌ها، انواع، فناوری‌های جدید، ملاحظات مربوط به انتخاب و مهم‌تر از همه بررسی بازار داخلی آن‌ها با توجه به اهمیت بالای تولید الکتروموتور به کمک امکانات موجود داخلی، انجام گیرد. با روشن شدن اهمیت این موضوع، در بخش‌های بعدی به شرح و تحلیل مواد مورد اشاره پرداخته می‌شود.

٤-٢-١- ورق هسته

هدایت و تمرکز میدان مغناطیسی در سیم‌پیچی میدان به کمک هسته‌ی مغناطیسی که معمولاً از مواد فرومغناطیسی چون آهن و آلیاژهای آن است، اتفاق می‌افتد. عبور جزئی جریان متناوب از هسته باعث ایجاد تلفاتی موسوم به تلفات هسته می‌گردد. وجود و افزایش تلفات هسته به‌عنوان بخشی مهم و تأثیرگذار در تلفات کل الکتروموتور، موجب کاهش توان خروجی، بازده و گشتاور تولیدی الکتروموتور می‌شود؛ بنابراین شایسته است که هسته، مورق و از بهترین مواد موجود ساخته شود. این ورق‌ها که از جنس فولاد هستند، فولاد الکتریکی نامیده می‌شوند. ضخامت، ترکیب شیمیایی و نحوه ساخت این ورق‌ها مستقیماً بر روی تلفات هسته تأثیرگذار است.

تولید ورق‌های نازک مغناطیسی به کمک عبور غلتک از روی لایه‌های فولاد در دماهای مختلف، نورد نام دارد. بسته به فن‌آوری نورد می‌توان ضخامت ورق‌ها را کنترل نمود. نورد به‌طورکلی به دو دسته‌ی نورد سرد و گرم تقسیم می‌شود.

1- Heat Sink

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- **نورد گرم**

در این روش در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس فولاد گرم شده و به‌وسیله غلتک به شکل ورق‌هایی با ضخامت‌های کم درمی‌آید. این روش آسان و ارزان، اشکالاتی ازجمله عدم یکنواختی ضخامت ورق و تغییر در نفوذپذیری مغناطیسی هسته را دارد. عدم یکنواختی سطح ورق‌ها موجب افزایش فاصله‌ی هوایی و تلفات هسته می‌گردد.

- **نورد سرد**

در روش نورد سرد ورق‌ها در قالب با دمای پایین‌تری نسبت به نورد گرم قرارگرفته و سپس سرد و نرم می‌گردد (تاب‌کاری). در این روش به ضخامت کمتری برای ورق‌ها می‌توان دست پیدا کرد. این ضخامت معمولاً حدود ۰/۳۵ میلی‌متر است (این مقدار با فن‌آوری‌های خاص نورد سرد در کشورهای ژاپن و چین به ضخامت ۰/۱۸ میلی‌متر نیز می‌رسد).

- **ورق فولاد الکتریکی با دانه‌های جهت‌دار و غیر جهت‌دار**

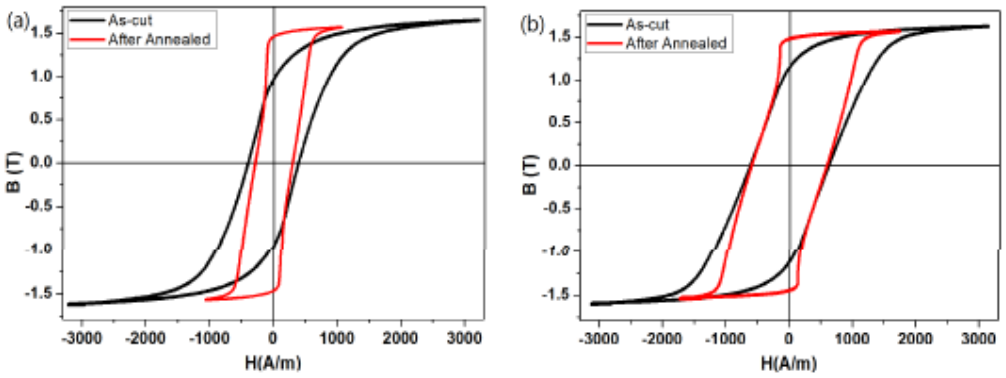
ورق‌های فولاد الکتریکی به هنگام تولید و تشکیل کریستال و نورد دارای حوزه‌های مغناطیسی هستند که به هنگام عبور جریان و شار مغناطیسی بسته به نوع و جهت خطوط، هم‌راستا می‌شوند. درصورتی‌که این حوزه‌ها، درواقع بلورها یا دانه‌های فولاد، هم‌جهت با میدان اعمالی باشند به‌راحتی کلیه‌ی خطوط شار هم‌راستا شده و ورق‌ها مغناطیس می‌شوند. به این نوع ورق، ورق فولاد الکتریکی جهت‌دار[1] می‌گویند. این ورق‌ها نسبتاً آسان مغناطیس شده و سخت دمغناطیس می‌شود. ورق فولاد الکتریکی غیر جهت‌دار[2]، دارای حوزه‌هایی با راستاهای پراکنده است که مغناطیس و دمغناطیس شدن، نفوذپذیری مغناطیسی و اشباع آن‌ها در همه جهات یکسان است. هسته مورداستفاده در موتورهای الکتریکی کوچک معمولاً از نوع غیر جهت‌دار است. (در ورق‌های غیر جهت‌دار اندازه بهینه حوزه‌ها حدود ۲ الی ۱۰ میلی‌متر است که بیشتر از آن منجر به افزایش تلفات گردابی خواهد شد.)

- **حرارت دهی ورق‌های فولاد الکتریکی نیمه آماده**

حرارت دهی یا آنیلینگ عموماً به فرایند حرارت دهی فلزات و سپس سرد کردن آن در کوره به‌منظور تغییر درجه سختی فولاد اطلاق می‌شود. انجام این فرایند بر روی ورق‌های مغناطیسی پس از برش و پانچ در کارخانه تولیدکننده و یا توسط کاربر (تولیدکننده الکتروموتور)، به‌منظور ایجاد تغییرات الکتریکی و مغناطیسی مدنظر ازجمله کاهش ابعاد حوزه‌های مغناطیسی باهدف بهبود تلفات ناشی از برش، پانچ، حمل نامناسب و دیگر نیروهای اعمالی احتمالی است. با انجام این فرایند می‌توان علاوه بر کاهش ابعاد حوزه‌های مغناطیسی، کربن موجود در ساختار فولاد را نیز به سطح رانده و ترکیب یکنواخت‌تری از عنصر سیلیسم را در ساختار ورق داشت. فرایند کربن‌زدایی علاوه بر بهبود خواص مغناطیسی ورق الکتریکی و کاهش تلفات هسته موتور، به‌عنوان پوشش مناسبی جهت عایق کردن ورق‌ها از هم نیز عمل می‌کند.

1- Grain oriented electrical steel
2- Non oriented electrical steel

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱-۴: تغییر مشخصات مغناطیسی براثر آنیلینگ برای دو ورق متفاوت **a- 50CS470 b-50CS1300**[۶۵]

طی این فرایند، ورق‌های الکتریکی داخل کوره، مطابق دستورالعمل تولیدکننده ورق، در محیط نیتروژن دار به مدت معین قرار می‌گیرند. به‌منظور کربن‌زدایی، هوای داخل کوره باید پیش از افزایش پلکانی دما، به کمک گازهای بی‌اثر، کاملاً خارج گردد. جریان و فشار گاز بی‌اثر نیز باید به‌گونه‌ای تنظیم گردد که با هر بار تکرار این مرحله و افزایش دما، خروج هوا و کربن‌زدایی کامل انجام گیرد. شکل ۱-۴ اثر آنیلینگ را بر روی حلقه هیسترزیس ورق‌ها نشان می‌دهد [۶۵].

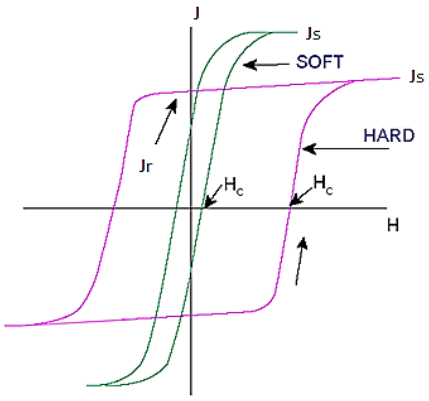
در [۶۵] بر روی دو ورق الکتریکی 50CS470 و 50CS1300 با حوزه‌های مغناطیسی مختلف (اندازه حوزه‌های مغناطیسی ورق 50CS470 بزرگ‌تر از ورق 50CS1300 است) آزمایش انجام گرفته است. نتایج مشاهده میکروسکوپی، پس ایجاد فشار ناشی از پانچ مشابه ورق‌ها، حاکی از افزایش ابعاد حوزه‌ها (ورق اول بیش از ورق دوم)[۱] و کاهش نسبی ابعاد پس از آنیلینگ است. اندازه‌گیری سطح حلقه و تلفات هسته پس از آنیلینگ، حاکی از کاهش ۳۷ درصدی تلفات برای ورق اول و کاهش ۲۳ درصدی را برای ورق دوم است. درمجموع ورق با گرید بالاتر و کیفیت بهتر بیش از ورق مشابه با گرید پایین‌تر آسیب دیده و درصد بهبود آن نیز بر اثر آنیلینگ بیشتر است. لازم به ذکر است که ورق‌ها پس از آنیلینگ، با جریان کمتر، همان چگالی شار را تولید می‌کنند.

- **تلفات هسته**

تلفات هسته به سه دسته اساسی تلفات پسماند، تلفات جریان‌های گردابی و تلفات اضافی تقسیم می‌شود که هریک با توجه به ویژگی‌های ماده فرومغناطیس نرم و جریان‌های عبوری از آن قابلیت کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را دارند. به‌طورکلی شایسته است که در ساخت هسته موتور از مواد فرو مغناطیس نرم با نفوذپذیری مغناطیسی بالا، شار پسماند کم، چگالی شار اشباع بالا و قابلیت مغناطیس شدن آسان استفاده گردد.

۱- ابعاد حوزه های ورق دوم پس از پانچ به دو گروه با ابعاد متفاوت تبدیل می شود

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲-۴: مقایسه حلقه هیسترزیس مواد نرم (سبز) و سخت مغناطیسی (صورتی)

در واقع مطابق موارد درج‌شده در شکل ۲-۴ که حلقه هیسترزیس دو ماده مغناطیسی نرم و سخت را نشان می‌دهد، ماده نرم مغناطیسی باید نیروی وادارندگی (مغناطیس زدا) H_c[۱] پایین و J_s[۲] و J_r[۳] بالایی داشته باشد. در ادامه به شرح هریک از این تلفات و راه‌های کاهش آن پرداخته می‌شود.

أ. تلفات پسماند مغناطیسی

این تلفات ناشی از باقی ماندن شار مغناطیسی در هر تناوب و پس از هر بار مغناطیس و دمغناطیس شدن هسته ایجاد می‌شود. مقدار این تلفات متناسب با مساحت حلقه هیسترزیس است. افزایش کربن در ساختار فولاد، هنگام تولید، به‌منظور افزایش مقاومت مکانیکی آن بوده درحالی‌که وجود مقادیر زیاد آن موجب افزایش تلفات هیسترزیس و کاهش نفوذپذیری مغناطیسی آن می‌شود. تلف هیسترزیس را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_h = V \int H_{dB} = K_h f B_m{}^k V \qquad ۴-۱$$

تلفات هیسترزیس مخصوص:

$$P_h = K_h f B_m{}^k \ (W / kg) \qquad ۴-۲$$

k ضریب اشتین متز بین ۱٫۵ الی ۲٫۵ و برای ورق‌های مغناطیسی هسته موتور در حدود ۲ است. K_h ضریب پسماند یک ورق هست. در عمل از منحنی تلفات آهنی جهت نمایش تلفات آهنی برحسب W/kg یا W/m^3 استفاده می‌شود.

ب. تلفات جریان‌های گردابی

عبور جریان‌های گردابی موجب بزرگ شدن حلقه هیسترزیس نیز می‌گردد. به حلقه جدید، حلقه دینامیکی می‌گویند که با کاهش ضخامت ورق‌ها و افزایش منطقی میزان سیلیسم به‌کاررفته در آن بهبود می‌یابد. اضافه کردن عنصر سلیسیم (حداکثر ۴٫۵ ٪) به ورق‌ها، مقاومت الکتریکی هسته نسبت به عبور جریان‌های گردابی را افزایش داده، درنتیجه تلفات گردابی ناشی از آن کمتر می‌شود. افزودن مقادیر منطقی از این عنصر، حلقه هیسترزیس را باریک‌تر، تلفات

۱- حداکثر شدت میدان مغناطیسی که یک ماده مغناطیسی بدون دمغناطیس شدن تحمل می‌کند را نیروی وادارندگی می‌نامند. واحد این پارامتر kA/m است.

۲- حداکثر چگالی‌شار مغناطیسی تولیدی به ازای اعمال یک مقدار معین از جریان در مواد فرومغناطیس

۳- چگالی شار پسماند میزان چگالی شاری است که بعد از قطع کردن منبع جریان تحریک ماده، در ماده مغناطیسی باقی می‌ماند. مقدار این پارامتر در مواد فرومغناطیس نرم باید پایین باشد تا تلفات کمتری در هر تناوب داشته باشیم.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

گردابی را کاهش و عمر هسته را افزایش می‌دهد [۶۶]. لازم به ذکر است که اضافه کردن بیش از این مقدار موجب شکنندگی ورق‌ها و سخت شدن فرم دهی و برش آن‌ها می‌شود.

تلفات گردابی با توان دوم فرکانس رابطه مستقیم دارد. افزایش غیرمنطقی فرکانس به‌منظور کاهش ابعاد موتور، موجب افزایش تلفات هسته می‌گردد. معادله زیر رابطه تلفات گردابی کل را با ابعاد و فرکانس را نشان می‌دهد:

$$P_e = \frac{\pi^2 t^2}{6\rho} bltf^2 B_m^2 = \frac{\pi^2 t^2}{6\rho} Vf^2 B_m^2 \qquad ۴-۳$$

تلفات گردابی مخصوص:

$$P = \frac{k_f^2 B_m^2}{6\rho} t^2 (W/kg) \qquad ۴-۴$$

k_f ضریب فرم[1] شکل موج است که برای یک موج سینوسی کامل برابر ۱٫۱۱ است. همچنین t ضخامت، b طول، l عرض ورق و ρ مقاومت مخصوص فولاد به‌کاررفته است.

برای اینکه جریان‌های گردابی از کل ورق‌ها عبور نکند باید ورق‌ها را نسبت به یکدیگر عایق نمود. عایق کردن ورق‌ها به دو روش غوطه‌وری در روغن، ورق‌های روغنی، یا قرار دادن کاغذهای بسیار نازک به ضخامت چند میکرومتر میان آن‌ها، انجام می‌گیرد. قرار گرفتن عایق میان ورق‌ها حجم هسته افزایش می‌یابد.

ج. تلفات اضافی

تلفات واقعی موتور در عمل بیش از مجموع دو مقدار تلف گردابی و هیسترزیس است. این تفاوت به‌دلایل گوناگونی همچون عبور جریان غیریکنواخت و هارمونیکی، عکس‌العمل آرمیچر، عبور جریان‌های گردابی غیر موازی با جهت ورق‌ها، عبور شار از دندانه‌ها و منافذ تعبیه‌شده جهت خنک‌سازی موتور و مغناطیس‌شدگی گردشی (غیرخطی) و غیره، پدید می‌آید؛ بنابراین جهت لحاظ نمودن اثر این تلفات، مقدار تلفات گزارش‌شده توسط آزمایش را باید در ضریب ۱٫۴ الی ۱٫۶ (برای موتورهای سنکرون با قطب برجسته) ضرب نمود.

- **ملاحظات مربوط به انتخاب هسته**

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ورق‌های الکتریکی مورداستفاده در هسته‌ی موتور از لحاظ الکتریکی و مغناطیسی متفاوت هستند؛ بنابراین هنگام استفاده از این ورق‌ها در ساخت هسته موتور باید پارامترهای زیر در نظر گرفته شود.

- منحنی هیسترزیس یا B-H ورق
- تلفات کل هسته (وات به کیلوگرم یا مترمکعب) × وزن مجموع ورق‌ها × ضریب درصد وزن هسته به وزن مجموع ورق‌ها (وزن مؤثر) در فرکانس معین

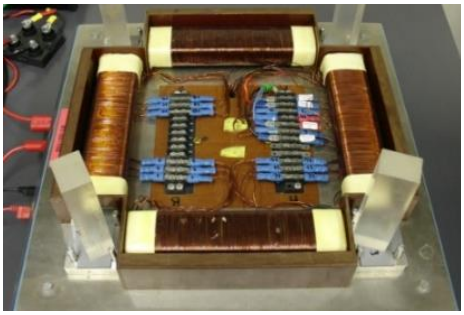
- **آزمون تلفات هسته (اپشتاین)**

آزمون اپشتاین، آزمونی برای اندازه‌گیری ویژگی مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم، به‌خصوص فولاد الکتریکی است. به‌منظور اندازه‌گیری تلفات بی‌باری یا هسته‌ی موتور، تعداد معینی از ورق‌های به‌کاررفته با ابعاد معین روی هم

1- Form factor

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

قرارگرفته، پانچ شده و تلفات توان در بستر اپشتاین تحت ولتاژ تحریک معینی اندازه‌گیری می‌شود. بستر اپشتاین دارای چهار پیچک است که هریک دو سیم‌پیچ فشارقوی (اولیه) و فشار ضعیف (ثانویه) دارد. سیم‌پیچی اولیه یا مغناطیس‌کننده داخل و سیم‌پیچی ثانویه یا ولتاژ، بیرون قرار دارد؛ به‌طوری‌که هر چهار سیم‌پیچ اولیه باهم و هر چهار سیم‌پیچ ثانویه باهم سری هستند. سیم‌پیچی‌ها به‌همراه نمونه ورق‌ها به‌عنوان هسته، به‌مانند یک ترانسفورماتور بی‌بار است که به‌کمک وات‌متر، آمپرمتر و ولت‌متر، توان بی‌باری یا همان تلفات هسته را اندازه‌گیری می‌کند. استاندارد فولاد غیر جهت‌دار برای ساخت موتورهای کوچک برای ورق آماده و نیمه‌آماده به ترتیب در استانداردهای IEC-60404-8-3 و IEC-60404-8-4 آمده است. ورق‌ها مطابق این دو استاندارد برش خورده، پانچ شده و سپس مطابق استاندارد IEC-60404-2 در بستر اپشتین مورد آزمون قرار می‌گیرند. ازجمله شرکت‌های داخلی که تست اپشتاین را انجام می‌دهند، می‌توان به شرکت ماشین‌های الکتریکی جوین (جمکو) و شرکت الکتروژن اشاره نمود. طبق اظهارات این دو شرکت، هردو این تست را مطابق استاندارد IEC 60404-2 انجام می‌دهند. شکل ۳-۴ بستر تست اپشتاین را نمایش می‌دهد:

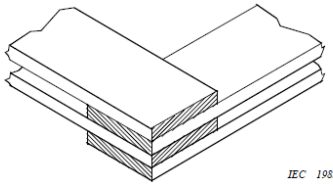


شکل ۳-۴: بستر تست اپشتاین

ویژگی‌های عمومی نمونه ورق‌ها در بستر تست

مطابق استاندارد IEC 604040-2 نمونه ورق‌های مغناطیسی باید در شرایط خاصی داخل بستر تست اپشتاین قرار گیرند. این شرایط به شرح زیر است [۵۷].

۱. نمونه باید به‌صورت نوارهایی روی هم سوار شوند که یک مربع تشکیل داده و در گوشه‌ها روی‌هم قرار گیرند؛ تا طول و سطح مقطع‌هایی یکسان ایجاد کنند. شکل ۴-۴ نحوه صحیح قرارگیری را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۴: نحوه قرارگیری نمونه ورق‌های مغناطیسی در بستر اپشتاین [۵۷]

۲. برش زدن و پانچ ورق‌ها موجب ایجاد کنگره و ناهمواری نگردد. ابعاد برش مطابق استاندارد IEC مربوطه است.

۳. درصورتی‌که ورق‌ها نیمه آماده باشند، حرارت‌دهی[1] مطابق استاندارد مربوط به ورق(IEC-60404-8-X)

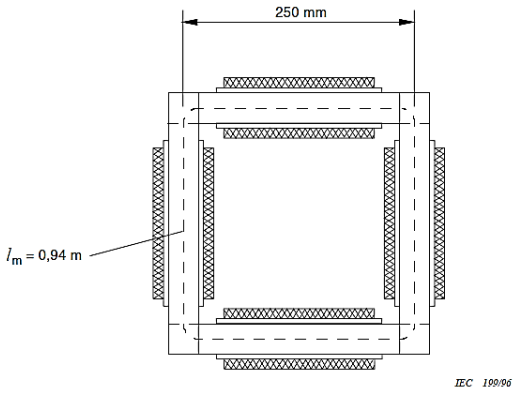
1- Annealing

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

انجام گیرد.

۴. اندازه‌گیری ابعاد بدون در نظر گرفتن مقادیر مربوط به عایق انجام گیرد.

۵. زاویه انحراف مجاز دربرش برای ورق‌های جهت‌دار حداکثر ۱± درجه و برای ورق‌های غیر جهت‌دار ۵± درجه باشد.

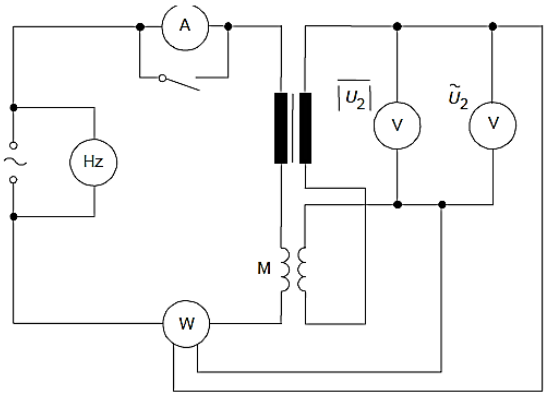


شکل ۵-۴: شمای کلی و اندازه‌های بستر اپشتاین [۵۷]

۶. برای فریم اپشتین استاندارد ۲۵۰ میلی‌متری، ابعاد مطابق ابعاد نشان داده‌شده در شکل ۵-۴ است. طول و عرض نمونه به‌ترتیب باید در حدود mm ۰٫۲ ± mm ۳۰ و $mm \leq l \leq$ ۳۲۰ mm ۲۸۰ با درصد خطا حداکثر ۰٫۵ میلی‌متر باشد. وزن نمونه ۲۴۰ گرم یا بیشتر است.

۷. ورقه‌ها به‌دقت وزن شده به‌طوری‌که خطای وزن کمتر از ٪ ۰٫۱ ± باشد.

شکل ۶-۴ پیکربندی فریم اپشتین را نمایش می‌دهد.



شکل ۶-۴: پیکربندی بستر اپشتاین [۵۷]

ملاحظات اندازه‌گیری

۱. ورق‌ها به‌دقت وارد فریم و پیچک‌ها شده به‌طوری‌که مربع داخلی ایجادشده دارای طول ۱±۲۲۰ میلی‌متر باشد. هردو ورق مقابل هم باید در جهت یا عمود برجهت لوله شدن ورق اصلی، برش خورده باشند. (دوبه‌دو در یک‌جهت برش خورده باشند.)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۲. دقت شود فاصله‌ی هوایی در گوشه‌ی ورق‌ها باید در حداقل میزان خود باشد. اعمال نیروی یک نیوتونی عمود بر ورق‌ها در چهارگوشه‌ها جهت محکم کردن آن‌ها مجاز است.

۳. درصورتی‌که ورق‌ها برای بار دوم یا بیشتر تحت تست قرار می‌گیرند، ابتدا باید توسط یک میدان مغناطیسی با شدت میدان بالاتر از میدان قبلی، دمغناطیس گردند.

- **استاندارد تولید ورق‌های مغناطیسی**

ورق‌های الکتریکی درواقع همان ورق‌های فولادی با مقادیر مختلفی از کربن و سایر عناصر هستند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، وجود کربن در بافت فولاد جهت افزایش استحکام مکانیکی لازم است، اما تلفات ورق را هنگام استفاده در الکتروموتور افزایش می‌دهد. افزودن مقادیر محدود (تا ۴٫۵ ٪) سیلیسیم این تلفات را کاهش می‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت در بهترین حالت باید تورق به روش نورد سرد و ورق، حاوی کربن کم و حداکثر میزان سیلیسیم مجاز باشد. بخشی از مشخصات و حداکثر تلفات مجاز ورق الکتریکی فولاد آلیاژ و غیر آلیاژ نیمه آماده و آماده در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱٫۵ تسلا مطابق استاندارد IEC 60404-8-3 به ترتیب در جدول ۱-۴ و جدول ۲-۴ آمده است.

درواقع تلفات چنین ورق‌هایی، با توجه به فرکانس و چگالی شار موتور موردنظر تعیین می‌گردد. میزان تلفات کل در فرکانس و چگالی شارهای دیگر متفاوت از مقادیر ذکرشده در این جدول است. در صورت نیاز به نسخه‌های دیگری از استاندارد IEC 60404 مراجعه گردد. ورق نیمه‌آماده توسط و به‌دلخواه کاربر تحت حرارت قرار می‌گیرد.

جدول ۱-۴: حداکثر تلفات آهنی مجاز ورق فولادی نیمه آماده مطابق استاندارد۶۰۴۰۴-۸-۳ **IEC** [۴]

Steel name	Nominal thickness mm	Reference heat treatment temperature °C (± 10 °C)	Maximum specific total loss at 1,5 T [a] W/kg		Minimum magnetic polarization in an alternating magnetic field for a magnetic field strength [a, b] T			Conventional density [c] kg/dm³
			50 Hz	60 Hz [d]	2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m	
M340-50K5	0,50	840	3,40	4,32	1,54	1,62	1,72	7,65
M390-50K5		840	3,90	4,97	1,56	1,64	1,74	7,70
M450-50K5		790	4,50	5,67	1,57	1,65	1,75	7,75
M560-50K5		790	5,60	7,03	1,58	1,66	1,76	7,80
M660-50K5		790	6,60	8,38	1,62	1,70	1,79	7,85
M890-50K5		790	8,90	11,30	1,60	1,68	1,78	7,85
M1050-50K5		790	10,50	13,34	1,57	1,65	1,77	7,85
M390-65K5	0,65	840	3,90	5,07	1,54	1,62	1,72	7,65
M450-65K5		840	4,50	5,86	1,56	1,64	1,74	7,70
M520-65K5		790	5,20	6,72	1,57	1,65	1,75	7,75
M630-65K5		790	6,30	8,09	1,58	1,66	1,76	7,80
M800-65K5		790	8,00	10,16	1,62	1,70	1,79	7,85
M1000-65K5		790	10,00	12,70	1,60	1,68	1,78	7,85
M1200-65K5		790	12,00	15,24	1,57	1,65	1,77	7,85

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

Steel grade	Nominal thickness mm	Reference heat treatment temperature °C (± 10 °C)	Maximum specific total loss at 1,5 T [a] W/kg		Minimum magnetic polarization in an alternating magnetic field for a magnetic field strength [a, b] T			Conventional density [c] kg/dm³
			60 Hz	50 Hz [d]	2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m	
M342-47K6	0,47	840	3,42	2,70	1,52	1,60	1,70	7,65
M364-47K6		840	3,64	2,88	1,53	1,60	1,70	7,65
M386-47K6		840	3,86	3,05	1,53	1,61	1,71	7,65
M419-47K6		840	4,19	3,31	1,54	1,62	1,72	7,70
M441-47K6		790	4,41	3,48	1,54	1,62	1,72	7,70
M507-47K6		790	5,07	4,01	1,57	1,65	1,75	7,75
M595-47K6		790	5,95	4,70	1,58	1,66	1,76	7,80
M728-47K6		790	7,28	5,75	1,59	1,67	1,77	7,80
M838-47K6		790	8,38	6,62	1,60	1,68	1,78	7,85
M441-64K6	0,64	840	4,41	3,48	1,52	1,60	1,70	7,65
M463-64K6		840	4,63	3,66	1,52	1,60	1,70	7,65
M485-64K6		840	4,85	3,83	1,53	1,61	1,71	7,65
M507-64K6		840	5,07	4,01	1,54	1,62	1,72	7,70
M573-64K6		790	5,73	4,53	1,56	1,64	1,74	7,70
M640-64K6		790	6,40	5,06	1,57	1,65	1,75	7,75
M794-64K6		790	7,94	6,27	1,58	1,66	1,76	7,80
M948-64K6		790	9,48	7,49	1,60	1,68	1,78	7,80
M1080-64K6		790	10,8	8,53	1,60	1,68	1,78	7,85
M992-79K6	0,79	790	9,92	7,84	1,57	1,65	1,75	7,75
M1190-79K6		790	11,9	9,42	1,58	1,66	1,76	7,80
M1350-79K6		790	13,5	10,67	1,59	1,67	1,77	7,85

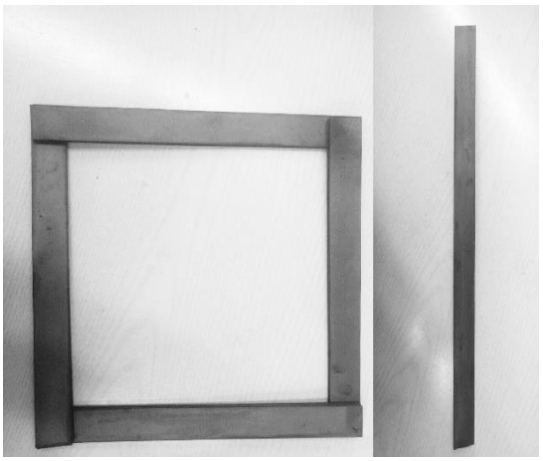
جدول ۲-۴: حداکثر تلفات آهنی مجاز ورق‌های فولادی کاملاً آماده مطابق استاندارد **IEC 60404-8-4** [۴]

Steel name	Nominal thickness mm	Maximum specific total loss at 1,5 T W/kg		Minimum magnetic polarization [a] in an alternating magnetic field for a magnetic field strength T			Maximum anisotropy of loss %	Minimum stacking factor	Minimum number of bends	Conventional density [c] kg/dm³
		at 50 Hz	at 60 Hz [b]	2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m				
M310-65A 5	0,65	3,10	4,08	1,49	1,60	1,70	±15	0,97	2	7,60
M330-65A 5		3,30	4,30	1,49	1,60	1,70	±15		2	7,60
M350-65A 5		3,50	4,57	1,49	1,60	1,70	±14		2	7,60
M400-65A 5		4,00	5,20	1,52	1,62	1,72	±14		2	7,65
M470-65A 5		4,70	6,13	1,53	1,63	1,73	±12		5	7,65
M530-65A 5		5,30	6,84	1,54	1,64	1,74	±12		5	7,70
M600-65A 5		6,00	7,71	1,56	1,66	1,76	±10		10	7,75
M700-65A 5		7,00	8,98	1,57	1,67	1,76	±10		10	7,75
M800-65A 5		8,00	10,26	1,60	1,70	1,78	±10		10	7,80
M1000-65A 5		10,00	12,77	1,61	1,71	1,80	±10		10	7,80
M600-100A 5	1,00	6,00	8,14	1,53	1,63	1,72	±10	0,98	2	7,60
M700-100A 5		7,00	9,38	1,54	1,64	1,73	±8		3	7,65
M800-100A 5		8,00	10,70	1,56	1,66	1,75	±6		5	7,70
M1000-100A 5		10,00	13,39	1,58	1,68	1,76	±6		10	7,80
M1300-100A 5		13,00	17,34	1,60	1,70	1,78	±6		10	7,80

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

Steel name	Nominal thickness	Maximum specific total loss at 1,5 T W/kg		Minimum magnetic polarization [a] in an alternating magnetic field for a magnetic field strength T			Maximum anisotropy of loss	Minimum stacking factor	Minimum number of bends	Conventional density [c]
	mm	at 50 Hz	at 60 Hz [b]	2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m	%			kg/dm³
M210-35A 5		2,10	2,65	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M230-35A 5		2,30	2,90	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M235-35A 5		2,35	2,97	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M250-35A 5		2,50	3,14	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M270-35A 5	0,35	2,70	3,36	1,49	1,60	1,70	±17	0,95	2	7,65
M300-35A 5		3,00	3,74	1,49	1,60	1,70	±17		3	7,65
M330-35A 5		3,30	4,12	1,49	1,60	1,70	±17		3	7,65
M360-35A 5		3,60	4,55	1,49	1,60	1,70	±17		3	7,65
M230-50A 5		2,30	2,95	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M250-50A 5		2,50	3,21	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M270-50A 5		2,70	3,47	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M290-50A 5		2,90	3,71	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M310-50A 5		3,10	3,95	1,49	1,60	1,70	±14		3	7,65
M330-50A 5		3,30	4,20	1,49	1,60	1,70	±14		3	7,65
M350-50A 5		3,50	4,45	1,50	1,60	1,70	±12		5	7,65
M400-50A 5	0,50	4,00	5,10	1,53	1,63	1,73	±12	0,96	5	7,70
M470-50A 5		4,70	5,90	1,54	1,64	1,74	±10		10	7,70
M530-50A 5		5,30	6,66	1,56	1,65	1,75	±10		10	7,70
M600-50A 5		6,00	7,53	1,57	1,66	1,76	±10		10	7,75
M700-50A 5		7,00	8,79	1,60	1,69	1,77	±10		10	7,80
M800-50A 5		8,00	10,06	1,60	1,70	1,78	±10		10	7,80
M940-50A 5		9,40	11,84	1,62	1,72	1,81	±8		10	7,85
M1000-50A 5		10,00	12,60	1,62	1,72	1,81	±8		10	7,85

طی تحقیقات انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو، ورق‌های حاوی سیلیسیم در ایران به‌صورت تجاری تولید نمی‌شود. بیشتر ورق‌های سیلیسیم‌دار مورداستفاده کارخانه‌های تولید الکتروموتور داخل به دلیل عدم صرفه اقتصادی تولید داخلی، از کشورهای دیگر وارد می‌گردد. در این میان شرکت تولید الکتروموتور بلال با استفاده از فرایند حرارت دهی خاصی، ورق‌های کربنی ساخت کارخانه فولاد مبارکه اصفهان، ورق‌ها را کربن‌گیری[1] کرده، به‌طوری‌که کربن به سطح آمده و از آن به‌عنوان عایق استفاده می‌شود. شکل ۷-۴ تصویر ورق‌های برش خورده و حرارت دیده توسط شرکت الکتروموتور بلال به ابعاد ۳۰۰×۳۰ میلی‌متر را جهت آماده‌سازی در تست اپشتاین نشان می‌دهد:



(ب) (الف)

شکل ۷-۴: ورق فولاد کربن گیری شده ساخت شرکت الکتروموتور بلال الف- تک ورق ب- آرایش ورق ها برای تست اپشتاین

1- Decarbonize

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

تست اپشتاین روی ۳۲ ورق مشابه شکل ۷-۴ – الف و مطابق آرایش شکل ۷-۴ – ب توسط شرکت الکتروژن در فرکانس ۵۰، ۹۰ و ۱۰۰ هرتز انجام شده است. نتایج حاصل از تست شامل حداکثر تلفات هسته، منحنی هیسترزیس و منحنی ضریب نفوذپذیری به ازای مقادیر مختلف چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی به شرح زیر است. ضخامت ورق ۴۹۸ میکرومتر، جرم کل ۸۱۱ گرم، جرم حجمی ۷٫۵۳۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و طول و عرض هر ورق به ترتیب ۳۰۰ در ۳۰ میلی‌متر است.

۱- نتایج تست در فرکانس ۵۰ هرتز

جدول ۳-۴ نتایج تست اپشتاین ورق‌های مغناطیسی را تحت ولتاژ ۵۰ هرتز و ضریب فرم استاندارد ۱٫۱۱ در چگالی شارهای مختلف نشان می‌دهد. رابطه‌ی کلی میان چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی ورق‌های الکتریکی در رابطه ۵-۴ آمده است.

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} \qquad ۴-۵$$

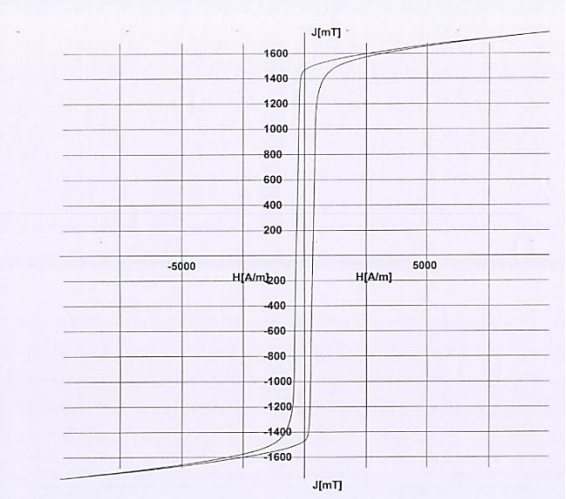
که در آن μ_0 ضریب نفوذپذیری هوا است. مقادیر چگالی شار پسماند، شدت میدان مغناطیسی حداکثر، شدت میدان مغناطیسی پسماند زدا، حداکثر تلفات ورق برحسب وات بر کیلوگرم و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ورق به ترتیب در ستون هفتم، دهم، دوازدهم، چهاردهم و پانزدهم آمده است.

جدول ۳-۴: نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار مختلف

Mess.	Js mT	Hs A/m	Jmax mT	Bmax mT	Je mT	Jr mT	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	100		99.938	100.1	70.639	43.148	-0.14268	1.1102	130.02	92.65	54.264	0.27267	0.1009	611.66	49.99
2	200		199.94	200.15	141.37	118.93	-0.38622	1.1107	172.9	126.19	99.044	0.7434	0.3836	920.2	50
3	300		299.77	300.01	212.04	208.46	-0.56576	1.1111	195.3	145.79	130.02	1.2881	0.78902	1221.4	50
4	400		399.82	400.07	282.88	303.67	-0.70904	1.1114	211.89	160.97	152.55	1.8974	1.283	1501.5	50
5	500		499.69	499.96	353.61	401.63	-0.67083	1.1116	226.47	174.15	169.97	2.5661	1.8457	1755.8	50
6	600		599.98	600.27	424.63	501.74	-0.57444	1.1118	240.7	186.69	185.11	3.3034	2.4772	1983.6	50
7	700		699.99	700.3	495.47	602.42	-0.53697	1.1119	255.33	199.23	199.23	4.1135	3.1731	2181.6	50
8	800		799.96	800.29	566.31	703.58	-0.50331	1.112	271.23	212.21	213.17	5.0078	3.9354	2347.1	50
9	900		900.01	900.37	637.23	805.05	-0.47627	1.1122	290.15	226.06	226.78	6.0015	4.7669	2468.4	49.99
10	1000		999.64	1000	707.89	906.15	-0.40668	1.1124	314.56	241.38	240.57	7.1188	5.6729	2528.9	49.99
11	1100		1099.9	1100.3	779.04	1008.1	-0.24571	1.1126	349.31	259.36	254.81	8.4193	6.6758	2505.7	50
12	1200		1199.7	1200.2	849.92	1109.1	-0.12855	1.1129	401.85	282.19	269.35	9.994	7.7863	2375.7	50
13	1300		1299.7	1300.3	919.5	1210.2	-1.3961	1.1114	494.82	315.8	284.68	12.1	9.0479	2090.2	50
14	1400		1400	1400.9	990.75	1310.4	-1.0385	1.1117	696.5	378.08	300.6	15.609	10.545	1599.5	50
15	1500		1499.7	1501.3	1061.8	1398.8	0.51647	1.1122	1275.7	553.75	315.79	24.501	12.364	935.48	50

شکل ۸-۴ منحنی حلقه هیسترزیس ورق را پس از آنیل کردن در فرکانس ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. مشخصات نهایی ورق به شرح زیر در جدول ۴-۴ آمده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۸-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۵۰ هرتز

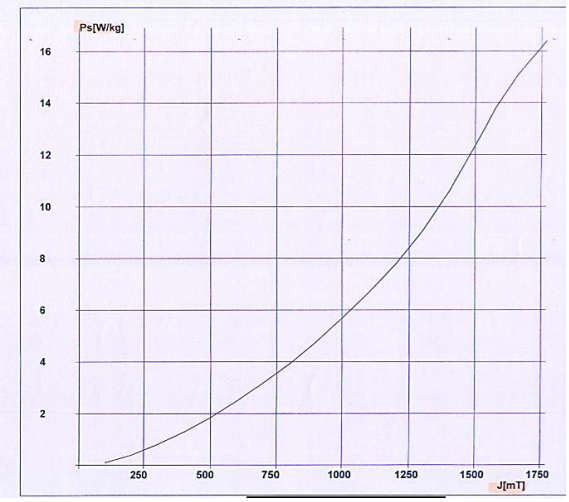
جدول ۴-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱/۵ تسلا

فرکانس Hz	حداکثر چگالی شار mT	حداکثر تلفات w/kg	حداکثر شدت میدان A/m	چگالی شار پسماند mT	شدت میدان مغناطیس-زدایی A/m	نفوذپذیری مغناطیسی	ضریب فرم
۵۰	۱۰۰۰	۵٫۶۷	۳۱۴٫۵۶	۹۰۶٫۱۵	۲۴٫۵۷۰	۲۵۲۸٫۹	۱٫۱۱
۵۰	۱۵۰٫۳۱	۱۲٫۳	۱۲۷٫۷۵	۱۳۹٫۸۸	۳۱٫۷۹۵	۹۳۵٫۴۸	۱٫۱۱

مطابق جدول ۴-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱/۵ تسلا حداکثر تلفات ورق تحت تست (به ضخامت ۰٫۴۹۸ میلی‌متر) تحت فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۱ و ۱٫۵ تسلا، به‌ترتیب حدود ۵٫۶۷ و ۱۲٫۳ وات بر کیلوگرم است، درحالی‌که حداکثر مقدار تلفات مجاز ورق فولاد الکتریکی در چگالی شار ۱٫۵ تسلا برای ورق نیمه آماده و آماده به ضخامت تقریبی ۰٫۵ میلی‌متر، به ترتیب ۱۰٫۵ و ۱۰ وات بر کیلوگرم و حداکثر مقدار مجاز تلفات در هردو حالت برای ضعیف‌ترین گرید ورق‌ها، به ترتیب حداکثر ۱۰٫۶۷ و ۱۳ وات بر کیلوگرم است.

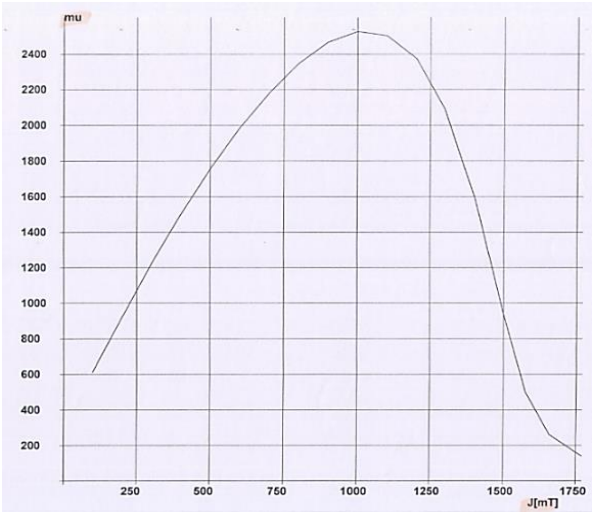
شکل ۹-۴ منحنی افزایش تلفات با افزایش چگالی شار را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار پیداست، تلفات در چگالی شار ۱ و ۱٫۵ تسلا به ترتیب برابر ۵٫۶۷ و ۱۲٫۳ وات بر کیلوگرم است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۹-۴: منحنی تلفات هسته برحسب چگالی شار در فرکانس ۵۰ هرتز

شکل ۱۰-۴ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار را نمایش می‌دهد. مقادیر ویژه‌ی مربوط به این نمودار در جدول ۵-۴ درج شده است.



شکل ۱۰-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار ۵۰ هرتز

جدول ۵-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۵۰ هرتز

μ_{min}	μ_{max}	μ (1T)	μ (1/5 T)
۱۴۰٫۹۳	۲۵۲۸٫۹	۲۵۲۸٫۹	۹۳۵٫۴۸

۲- نتایج تست در فرکانس ۹۰ هرتز

شکل ۱۱-۴ منحنی حلقه هیسترزیس ورق را پس از آنیل کردن در فرکانس ۹۰ هرتز نشان می‌دهد. مشخصات نهایی ورق به شرح زیر در جدول ۶-۴ آمده است.

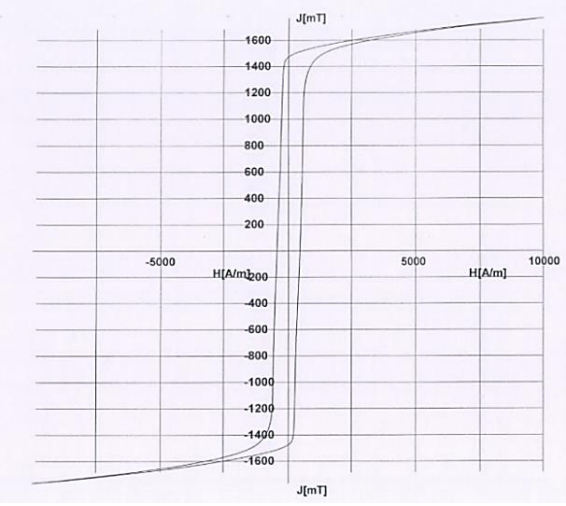
جدول ۶-۴ : نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۹۰ هرتز و چگالی شار مختلف

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

Mes s.	Js mT	Hs A/m	Jmax mT	Bmax mT	Je mT	Jr mT	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	100		100.01	100.17	70.728	45.152	0.016837	1.1109	129.87	93.291	57.416	0.49485	0.1951	612.84	89.99
2	200		199.97	200.18	141.45	122.93	-0.034278	1.1112	174.55	128.95	105.84	1.368	0.74579	911.66	89.99
3	300		299.91	300.15	212.19	213.99	0.052738	1.1114	199.7	150.98	140.12	2.4026	1.5454	1195.1	89.99
4	400		399.65	399.9	282.79	310.3	0.15363	1.1116	220.39	168.65	165.32	3.5769	2.5274	1443	89.99
5	500		499.97	500.24	353.82	410.15	0.089435	1.1117	239.14	184.48	185.17	4.8952	3.6744	1663.7	89.99
6	600		599.94	600.23	424.61	511.12	0.10707	1.1118	258.4	199.89	203.04	6.3653	4.9723	1847.6	89.99
7	700		699.79	700.09	495.29	612.15	0.048435	1.1118	278.57	215.62	220.78	8.0112	6.4297	1999.1	90.01
8	800		799.7	800.02	566.03	713.69	0.04881	1.1119	300.41	232.26	239.54	9.8619	8.0622	2118.4	90.01
9	900		899.6	899.94	636.79	815.15	0.0085476	1.1119	323.74	250.21	259.39	11.952	9.8853	2211.3	90.01
10	1000		999.68	1000	707.69	916.36	0.027558	1.112	349.22	270.26	281.09	14.347	11.928	2278	90.01
11	1100		1099.6	1100	778.55	1016.9	0.016618	1.1122	376.47	293.37	304.02	17.133	14.21	2324.3	90.01
12	1200		1199.8	1200.3	849.68	1117.7	-0.062272	1.1124	409.65	321.26	327.78	20.476	16.773	2330.7	90.01
13	1300		1299.7	1300.3	919.58	1217.5	0.50911	1.1113	501.96	358.21	351.58	24.71	19.634	2060.4	90.01
14	1400		1400.1	1401	990.68	1316.4	0.69333	1.1115	700.65	421.47	376.75	31.318	22.983	1590.2	90
15	1500		1500	1501.6	1061.9	1403.8	0.19187	1.1121	1287.2	592.49	403.37	47.19	26.97	927.27	90

جدول ۷-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۹۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱/۵ تسلا

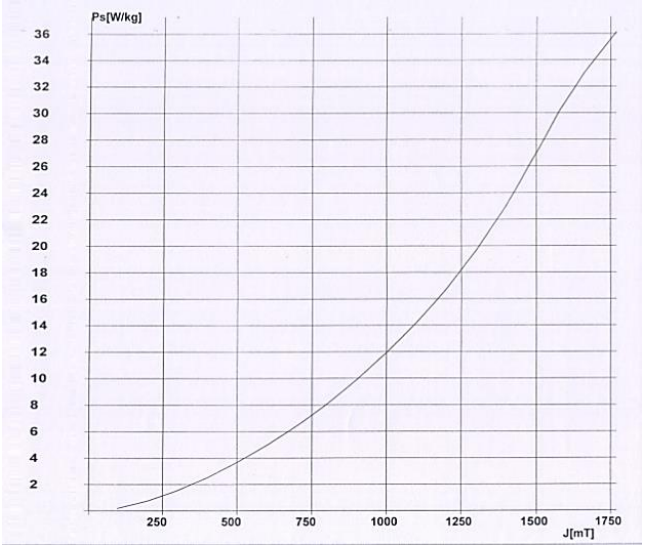
فرکانس Hz	حداکثر چگالی شار mT	حداکثر تلفات w/kg	حداکثر شدت میدان A/m	چگالی شار پسماند mT	شدت میدان مغناطیس-زدا A/m	نفوذپذیری مغناطیسی	ضریب فرم
۹۰	۱۰۰۰	۱۱٫۹۳	۳۴٫۲۲۹	۹۱۶٫۳۶	۲۸۱٫۱	۲۲۷۸	۱٫۱
۹۰	۱۵۰٫۶۱	۲۶٫۹۷	۱۲۸٫۲۷	۱۴۰٫۸۳	۴۰٫۳۷۳	۹۲۷٫۲۷	۱٫۱



شکل ۱۱-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۹۰ هرتز

شکل ۱۲-۴ منحنی افزایش تلفات با افزایش چگالی شار را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار پیداست، حداکثر تلفات در چگالی شار ۱ و ۱٫۵ تسلا به ترتیب برابر ۱۱٫۹۳ و ۲۶٫۹۷ وات بر کیلوگرم است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

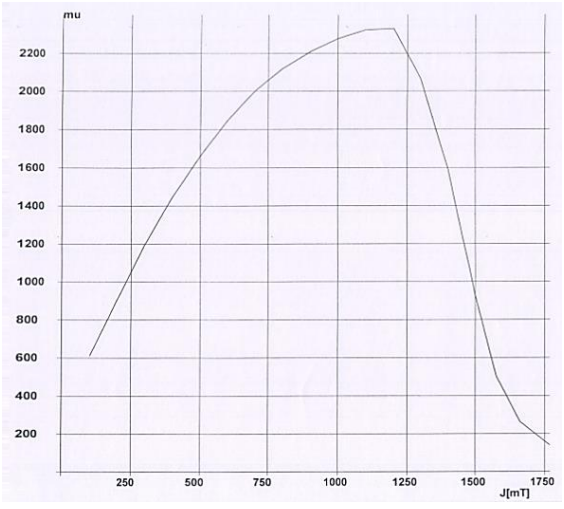


شکل ۱۲-۴: منحنی تلفات توان هسته برحسب چگالی شار در فرکانس ۹۰ هرتز

شکل ۱۳-۴ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار را نشان می‌دهد. مقادیر ویژه‌ی مربوط به این نمودار در جدول ۸-۴ درج شده است.

جدول ۸-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۹۰ هرتز

μ_{min}	μ_{max}	μ (1T)	μ (1.5T)
۱۴۰٫۷۸	۲۳۳۰٫۷	۲۲۷۸	۹۲۷٫۲۷



شکل ۱۳-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار در فرکانس ۹۰ هرتز

۳- نتایج تست در فرکانس ۱۰۰ هرتز

جدول ۹-۴: نتایج تست اپشتاین در فرکانس ۱۰۰ هرتز و مقادیر مختلف چگالی شار

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

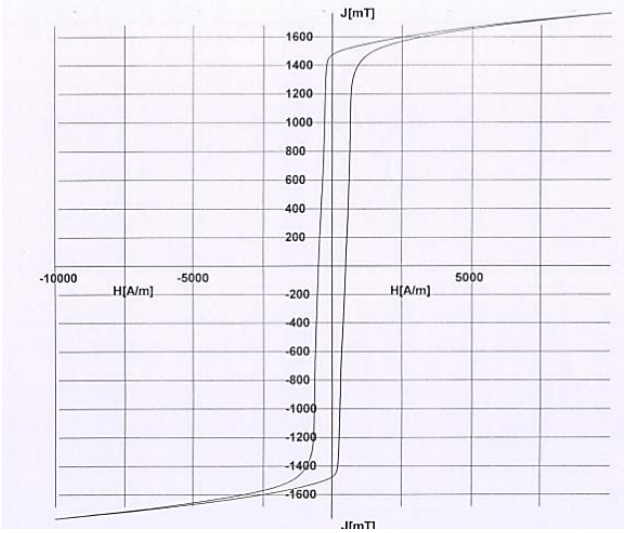
Mess.	Js mT	Hs A/m	Jmax mT	Bmax mT	Je mT	Jr mT	DC %	FF	Hmax A/m	He A/m	Hc A/m	Ss VA/kg	Ps W/kg	mur	Freq. Hz
1	100		99.962	100.13	70.695	45.923	-0.20054	1.111	132.15	95.048	59.581	0.55994	0.2253	601.92	9.99
2	200		200.01	200.22	141.49	124.7	-0.38682	1.1113	177.03	131.21	109.49	1.5472	0.85987	899.07	100
3	300		299.96	300.2	212.23	216.23	-0.43009	1.1115	202.72	153.54	144.02	2.7157	1.7715	1177.5	100
4	400		400	400.26	283.06	313.17	-0.40006	1.1116	223.54	171.3	169.05	4.0411	2.8878	1424	100
5	500		499.84	500.11	353.73	412.43	-0.26491	1.1117	243.11	187.35	188.75	5.523	4.1807	1636.1	100
6	600		599.75	600.04	424.44	513.12	-0.10425	1.1118	263.21	203.06	206.86	7.1829	5.6509	1813.3	100
7	700		699.96	700.26	495.39	614.68	0.055402	1.1118	284.73	219.37	225.25	9.0568	7.3178	1956.3	100
8	800		799.75	800.06	566.06	716.18	0.060552	1.1118	308.01	236.48	244.69	11.156	9.1836	2066.2	100
9	900		900.09	900.42	637.11	817.9	0.07987	1.1119	333.6	255.35	265.9	13.557	11.292	2147.1	9.99
10	1000		999.93	1000.3	707.84	919.03	0.067559	1.112	361.37	276.32	288.98	16.299	13.654	2201.9	9.99
11	1100		1099.6	1100	778.5	1019.4	0.016036	1.1121	391.56	300.6	313.89	19.501	16.308	2234.8	9.99
12	1200		1200.2	1200.6	849.78	1120	0.036335	1.1123	424.37	330.07	340.45	23.373	19.319	2250.5	9.99
13	1300		1300	1300.7	919.68	1219.3	-1.2171	1.1113	501.92	368.43	366.53	28.236	22.665	2061.2	9.99
14	1400		1399.7	1400.6	990.47	1317.4	1.3141	1.1115	702.07	431.63	393.95	35.629	26.541	1586.5	100
15	1500		1499.9	1501.5	1061.8	1404.9	-0.10378	1.1121	1281.4	601.08	422.85	53.192	31.172	931.53	100

شکل ۱۴-۴ منحنی حلقه هیسترزیس ورق را پس از آنیل کردن در فرکانس ۱۰۰ هرتز نشان می‌دهد. مشخصات نهایی ورق به شرح زیر درجدول ۱۰-۴ آمده است.

جدول ۱۰-۴: مشخصات مغناطیسی ورق پس از آنیل در فرکانس ۱۰۰ هرتز و چگالی شار ۱ و ۱.۵ تسلا

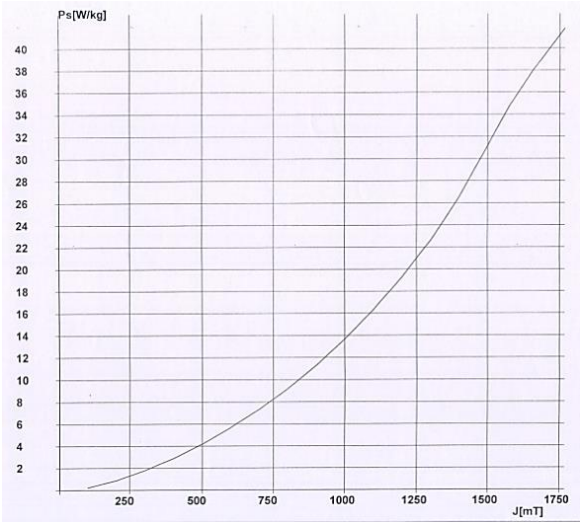
فرکانس Hz	حداکثر چگالی شار mT	حداک ثر تلفات w/kg	حداکثر شدت میدان A/m	چگالی شار پسماند mT	شدت میدان مغناطیس- زدا A/m	نفوذپذی ری مغناطیسی	ضری ب فرم
۱۰۰	۱۰۰٫۳۰	۱۳٫۶۵	۳۶۱٫۳۷	۹۱٫۰۳۹	۲۸٫۹۸۸	۲۲۰۱٫۹	۱٫۱
۱۰۰	۱۵۰٫۵۱	۳۱٫۱۷	۱۲۸٫۴۱	۱۴۰٫۹۴	۴۲٫۸۵۲	۹۳۱٫۵۳	۱٫۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۴-۴: منحنی هیسترزیس ورق در فرکانس ۱۰۰ هرتز

شکل ۱۵-۴ منحنی افزایش تلفات با افزایش چگالی شار را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار پیداست، حداکثر تلفات در چگالی شار ۱ و ۱٫۵ تسلا به ترتیب برابر ۱۳٫۶۵ و ۳۱٫۱۷ وات بر کیلوگرم است.



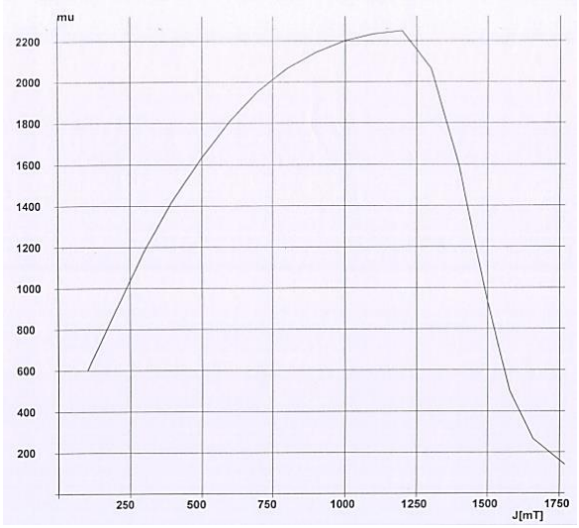
شکل ۱۵-۴: تغییرات تلف‌شده برحسب چگالی شار در فرکانس ۱۰۰ هرتز

شکل ۱۶-۴ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار را نشان می‌دهد. جدول ۱۱-۴ مقادیر ویژه‌ی مربوط به این نمودار را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۱-۴: مقادیر ویژه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۱۰۰ هرتز

μ_{min}	μ_{max}	μ (1T)	μ (1٫5 T)
۱۴۰٫۶۵	۲۲۵۰٫۵	۲۲۰۱٫۹	۹۳۱٫۵۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۶-۴: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برحسب چگالی شار در فرکانس ۱۰۰ هرتز

مطابق اظهار کارخانه فولاد مبارکه اصفهان ورق‌های فولاد الکتریکی کربنی به روش نورد سرد تولیدشده توسط آن کارخانه، مطابق استاندارد اروپایی EN 10341: 2006 ساخته می‌شوند. طبق استاندارد مذکور [۶۷] تلفات و ضخامت ورق‌ها در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱ تسلا در جدول ۱۲-۴ آمده است:

جدول ۱۲-۴: مرجع استاندارد ورق کربنی تولید شرکت فولاد مبارکه اصفهان [۶۷]

Steel grade		Nominal thickness mm	Reference heat treatment temperature °C	Maximum specific total loss at 1,5 T[a] W/kg		Minimum magnetic polarization in an alternating magnetic field for a magnetic field strength[a,b] T			Conventional density[c] kg/dm³
Steel name	Steel number		(± 10 °C)	50 Hz	60 Hz[d]	2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m	
M340-50K	1.0841	0,50	840	3,40	4,32	1,54	1,62	1,72	7,65
M390-50K	1.0842		840	3,90	4,97	1,56	1,64	1,74	7,70
M450-50K	1.0843		790	4,50	5,67	1,57	1,65	1,75	7,75
M560-50K	1.0844		790	5,60	7,03	1,58	1,66	1,76	7,80
M660-50K	1.0361		790	6,60	8,38	1,62	1,70	1,79	7,85
M890-50K	1.0362		790	8,90	11,30	1,60	1,68	1,78	7,85
M1050-50K	1.0363		790	10,50	13,34	1,57	1,65	1,77	7,85
M390-65K	1.0846	0,65	840	3,90	5,07	1,54	1,62	1,72	7,65
M450-65K	1.0847		840	4,50	5,86	1,56	1,64	1,74	7,70
M520-65K	1.0848		790	5,20	6,72	1,57	1,65	1,75	7,75
M630-65K	1.0849		790	6,30	8,09	1,58	1,66	1,76	7,80
M800-65K	1.0364		790	8,00	10,16	1,62	1,70	1,79	7,85
M1000-65K	1.0365		790	10,00	12,70	1,60	1,68	1,78	7,85
M1200-65K	1.0366		790	12,00	15,24	1,57	1,65	1,77	7,85

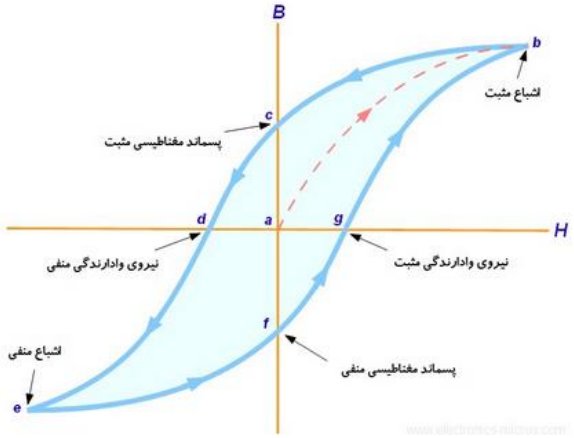
٤-٢-٢- آهنربا

آهنرباهای دائم در انواع بسیار زیادی به لحاظ ساختار شیمیایی و خواص مغناطیسی وجود دارند که چهار نوع آن در ساخت موتورهای الکتریکی رایج است. این چهار نوع آهنربا به ترتیب افزایش قدرت عبارت‌اند از: آهنربای فریتی، آهنربای آلنیکو، آهنربای ساماریم کبالت و آهنربای نئودیم آهن بور؛ دو آهنربای آخر به دلیل نادر بودن معادن عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها به آهنرباهای کمیاب خاکی معروف‌اند. آهنرباهای فریت و آلنیکو در دسته آهنرباهای معمولی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

قرار دارند؛ این آهنرباها انرژی بین ۲ الی ۸۰ کیلوژول بر مترمربع تولید می‌کنند؛ درحالی‌که آهنرباهای کمیاب خاکی که در دسته‌ی آهنرباهای پرانرژی قرار دارند و توانایی تولید انرژی بیش از ۸۰ کیلوژول بر مترمربع را دارند. انتخاب آهنربا با توجه به چگالی شار و انرژی موردنیاز تولیدی الکتروموتور و همچنین ملاحظات اقتصادی و فیزیکی آن انجام می‌گیرد؛ بنابراین به تناسب نیازمندی‌های ساخت الکتروموتور و قابلیت تولید داخل، خواص و ویژگی‌های هریک به‌اختصار در زیر آمده است.

مهم‌ترین مشخصه‌های یک آهنربای دائم، چگالی شار پسماند B_r، شدت میدان مغناطیسی وادارندگی (شدت میدان مغناطیس زدا) H_c، میزان انرژی مغناطیسی قابل‌تولید BH_{max} هستند که همگی در دمای عملکرد آهنربا برای هر آهنربا متفاوت است. شکل ۱۷-۴ مشخصه کلی یک آهنربای دائم را نشان می‌دهد که در آن نقطه c معادل B_r و نقطه g معادل H_c و BH_{max} سطح محصور در حلقه است. برخورد منحنی مشخصه بار با این نمودار در ربع دوم، مشخصه عملکرد آهنربا در موتور را به دست می‌دهد.



شکل ۱۷-۴: منحنی هیسترزیس برای یک آهنربای دائم

- آهنربای فریتی

فریت به ترکیب اکسید آهن با دیگر فلزات اطلاق می‌شود که فرمول کلی آن $M(Fe_xO_y)$ است. آهنربای فریتی سخت جزو رایج‌ترین و پراستفاده‌ترین آهنرباهای موجود، ارزان‌قیمت‌ترین نوع آهنرباها و در دسته مواد مغناطیسی فری مغناطیس قرار دارند. این مواد ترکیباتی غیرفلزی و عایق هستند که از ترکیب اکسید آهن $(Fe_{12}O_{19})$ با فلزات دو ظرفیتی (M) همچون استرانسیم، باریم، نیکل، منگنز و غیره تشکیل می‌شوند. فریت به روش‌های زینترینگ[1] (اغلب موارد)، قالب‌گیری تزریقی، اکستروژن و کلندرینگ[2] تهیه می‌شود. در ادامه به ویژگی‌های مغناطیسی دو فریت پرکاربرد یعنی فریت باریم و فریت استرانسیم پرداخته می‌شود.

أ. فریت‌باریم

این ترکیب دارای BH_{max} پایین و دمای کوری در حد ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. افزایش دما در آهنرباهای فریت برخلاف دیگر آهنرباها که منجر به کاهش B_r می‌گردد، باعث افزایش حداکثر چگالی شار تولیدی و بهبود عملکرد آن‌ها

1- Sintering
2- Calendaring

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

در دماهای بالا می‌گردد.

ب. فریت‌استرانسیم

خواص فریت استرانسیم تا حدودی از فریت باریم بهتر و دمای کوری آن ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. از فریت استرانسیم در کاربردهای سخت مغناطیسی استفاده می‌گردد.

مزایای آهنربای فریتی

- قیمت پایین و مقرون‌به صرفه
- به‌راحتی دمغناطیس نمی‌گردد.
- امکان چندقطبی شدن
- زنگ نمی‌زند.

چالش‌های آهنربای فریتی

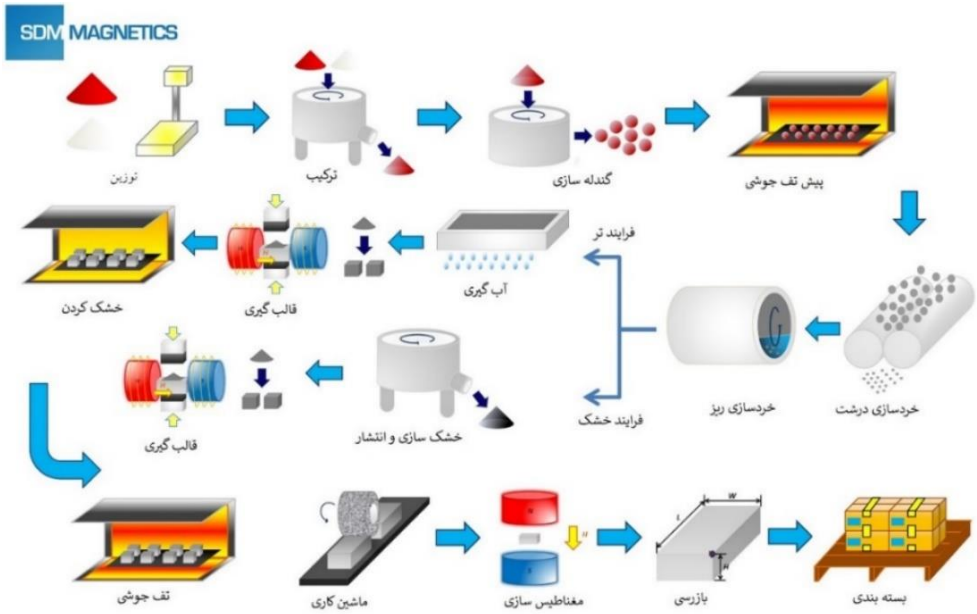
- سخت و شکننده است.
- پارامترهای مغناطیسی آن به‌صورت خطی با افزایش دما کاهش می‌یابد.

- **فرایند ساخت آهنربا**

فرایند ساخت آهنربا را به‌طور عمده می‌توان به دو بخش تولید شیمیایی آن از پودر آهنربا و مغناطیس نمودن آن به‌وسیله‌ی یک میدان مغناطیسی خارجی تقسیم نمود. در ادامه به‌تفصیل فرایند ساخت آهنربای فریتی شرح داده شده است.

آهنربای فریتی از ترکیب و سپس فشرده‌سازی پودر آهن به همراه پودر عناصر همراه چون استرانسیم یا باریم (به‌صورت کربنات) و همچنین چند عنصر جانبی دیگر جهت افزایش خواص مغناطیسی و استحکام فیزیکی، تولید می‌شود. مراحل این فرایند در فلوچارت شکل ۱۸-۴ نمایش داده شده است. تولید کربنات باریم و استرانسیم در ایران به‌صورت گسترده انجام می‌گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۸-۴: فلوچارت تولید آهنربای فریتی [۶۸]

۱. وزن کردن و ترکیب

مرحله اول وزن کردن پودر اکسید آهن Fe_2O_3 به همراه پودر فلزات همراه همچون کربنات باریم $BaCO_3$ یا کربنات استرانسیم $SrCO_3$ و پودر کربنات کلسیم $CaCO_3$ و دیگر مواد افزودنی و تنکارها است. تنکار یا فلاکس موادی هستند که مانع از اکسایش در منطقه جوش می‌شوند. وزن کردن دقیق این مواد پیش از ترکیب به دلیل اهمیت بالای ترکیب شیمیایی آهنربا بسیار مهم است. در مرحله بعد این پودرها با یکدیگر ترکیب می‌شوند (شکل ۱۹-۴).



شکل ۱۹-۴: وزن و ترکیب پودر آهن و دیگر مواد اولیه[۶۸]

۲. گندله‌سازی[1]

برای اطمینان از فرایند واکنش فاز جامد، ترکیب مواد مرحله قبل، پیش از تفجوشی و به‌منظور تحمل آن، باید گندله شود. به فرایند تولید گلوله‌های بسیار ریز از ترکیبات آهن و افزودنی‌ها گندله‌سازی می‌گویند. در این فرایند ماده خام اولیه طی چند مرحله پخته، رطوبت آن به‌آرامی گرفته شده و نهایتاً به‌صورت گلوله‌های سخت در می‌آید (شکل ۲۰-۴). سایز گندله‌ها مؤثر بر زمان موردنیاز برای تفجوشی پس از آن خواهد بود.

1- Pelletizing

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۰-۴: گندله‌سازی از پودر آهن و افزودنی‌ها [۶۸]

۳. پیش تفجوشی[۱]

مرحله پیش تفجوشی به‌منظور تبدیل گندله‌ها به فاز فریتی و تضمین واکنش فاز جامد انجام می‌شود. در این مرحله گندله‌ها پودر شده و از آن می‌توان به‌عنوان ماده خام اولیه برای تفجوشی، پرس یا قالب‌گیری تزریقی استفاده نمود (شکل ۲۱-۴). بسیاری از کارخانه‌های تولید آهنربا، این پودر را خریداری کرده و مراحل بعدی را خود انجام می‌دهد.



شکل ۲۱-۴: پیش تفجوشی [۶۸]

۴. خرد و آسیاب

در این مرحله پودر حاصل از مرحله پیش-تفجوشی خرد شده و به پودری نرم و یکنواخت تبدیل می‌شود. این مرحله توسط آسیاب گلوله‌ای[۲] انجام می‌گیرد (شکل ۲۲-۴).



1- Pre-Sintering

۲- Ball mill در این نوع از آسیاب از تعداد زیادی ساچمه فلزی یا سرامیکی استفاده می‌شود که با سازوکار همزن یا چرخش دوار آسیاب به‌طور دائم بر روی هم حرکت کرده و ذرات درشت را خرد می‌کنند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۲۲-۴: آسیاب گلوله‌ای پودر پیش-تف¬جوشی [۶۸]

۵. فرایند تَر و خشک

آهنرباها بر اساس جهت مغناطیس شدن به دو گروه همسانگرد و ناهمسانگرد تقسیم می‌شوند. آهنربای همسانگرد در همه‌ی جهات دارای خواص مغناطیسی یکسان است درحالی‌که خواص مغناطیسی آهنربای ناهمسانگرد تنها در یک جهت معین (جهت مغناطیس شدن) است. ایجاد خاصیت ناهمسانگردی به دو روش اعمال میدان مغناطیسی خارجی یا ایجاد فشار مکانیکی میسر است. در این مرحله پودر آهنربا طی فرایند تَر یا خشک بسته به نوع آهنربای مدنظر (به‌ترتیب ناهمسانگرد یا همسانگرد) شکل معین و یکپارچه‌ای به خود می‌گیرد. در فرایند تَر که منجر به تولید آهنربای ناهمسانگرد[۱] می‌شود، به پودر آهنربا آب افزوده تا حالت گِل مانند گرفته و سپس در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی آب‌گیری[۲] و درنهایت به روش پرسی یا اکستروژن تَر[۳] (تولید آهنربای هلالی) قالب‌گیری و مجدداً خشک می‌شود (ناهمسانگردی با اعمال فشار مکانیکی). در فرایند خشک به کمک استیرن[۴] شکل مکانیکی یکپارچه‌ای گرفته و سپس قالب‌گیری می‌شود. آهنربای ساخته‌شده بدین روش، همسانگرد خواهد بود. آهنربای فراوری‌شده به طریق تَر (آهنربای غیر همسانگرد) چگالی بیشتر و جهت‌گیری بهتری دارد؛ زیرا که ایجاد کریستال‌های آهنربا حین قالب‌گیری و آب‌گیری از ماده‌ی تر راحت‌تر انجام می‌شود. این انعطاف‌پذیری و جهت‌گیری در فرایند خشک (آهنربای همسانگرد) کمتر است.

۶. روش‌های قالب‌گیری (تف‌جوشی، پرس و تزریق)

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، طی هردو فرایند ماده خشک پودری، یکپارچه شده و با قالب‌گیری به روش‌های مختلف، به شکل مدنظر نهایی آهنربا درمی‌آید. قالب‌گیری به سه روش مختلف قالب‌گیری تزریقی، پرس و تف‌جوشی انجام می‌گیرد. چسباندن ذرات یک یا چند ماده به یکدیگر از طریق ذوب سطحی براثر افزایش حرارت (تا نیمی از دمای ذوب)، همراه فشار یا بدون آن به‌صورتی که پودر به شکل یک توده جامد درآید را، تف‌جوشی می‌نامند. طی این فرایند پیوند بین‌ذره‌ای به‌قدری بالا می‌رود که خواص فیزیکی، رسانایی و نفوذپذیری مغناطیسی آهنربا تنظیم می‌گردد. در برخی موارد از یک ماده دوم در فاز مایع یا جامد در کنار پودر آهنربا برای افزایش پیوند بین‌ذره‌ای استفاده می‌شود. برای تولید فریت، فرایند تف‌جوشی فعال‌شونده با یک ماده دوم جامد انجام می‌گیرد. در روش قالب‌گیری تزریقی، پودر آهنربا به‌اندازه دمای ذوب آن حرارت داده‌شده و با فشار داخل قالب تزریق می‌گردد. در روش پرسی نیز به‌وسیله‌ی ماشین پرس، پودر آهنربا در دمای اتاق به‌قدری تحت فشار قرار می‌گیرد تا یک شکل یکپارچه پیدا کند (شکل ۲۳-۴).

۱- به آهنربایی که خواص مغناطیسی آن تنها در یک جهت باشد، غیرهمسانگرد یا Anisotropic می‌گویند.

2- Dehydration

3- Extrusion

۴- Styrene یک نوع پیونده است. از پیونده‌ها برای تجمیع ذرات جامد اولیه ماده جهت ایجاد یک شکل مکانیکی یکپارچه استفاده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۳-۴: قالب‌گیری آهنربا [۶۸]

۷. ماشین‌کاری و کوتینگ

در این مرحله برای ایجاد اشکال مختلف جدید از آهنربا می‌توان آن را سنگ زده و پولیش نمود. فرایند سنگ‌زنی عموماً به کمک الماس و چرخ سنگ‌زنی انجام می‌شود. استفاده از وایرکات به دلیل ماهیت عایقی آهنربا توصیه نمی‌شود. پس از این عملیات، آهنربا شسته و خشک و آماده بسته‌بندی می‌شود.

۸. مغناطیس کردن و مگنتایزر[1]

آهنربا تنها با انجام مراحل قبل، خاصیت آهنربایی و مغناطیسی نخواهد داشت. مغناطیس سازی را می‌توان در سه مرحله، پس از ساخت آهنربا، پیش از مونتاژ و یا پس از مونتاژ در سازه مغناطیسی، انجام می‌گیرد. از مزایای مغناطیس کردن آهنربا درست پس از ساخت آن، می‌توان به عدم نیاز به بستر مغناطیس ساز[2] در محل استفاده مصرف‌کننده اشاره نمود؛ درحالی‌که امکان جذب آلودگی و صدمه مغناطیسی و فیزیکی به آهنربا هنگام حمل‌ونقل و بسته‌بندی، از معایب این روش هست. مغناطیس کردن آهنربا پس از تحویل به مصرف‌کننده و پیش از مونتاژ نیز، نیازمند بستر مغناطیس سازی است، درحالی‌که احتمال چسبیدن تراشه و دیگر آهنرباها به آن بسیار کمتر است. مغناطیس کردن آهنربا درحالی‌که داخل سازه قرار گرفته، احتمال چسبیدن و دشواری‌های کنار هم قرار دادن آهنرباهای مغناطیس شده داخل سازه را، به حداقل رسانده و مشکلات صدمات مغناطیسی (مانند کاهش شار تولیدی) وجود ندارد، با این حال نیاز به بستر مغناطیس سازی نیز ضروری است [۶۹].

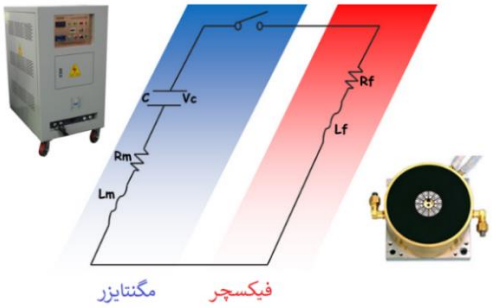
برای مغناطیس نمودن یک آهنربا لازم است که میدان مغناطیسی خارجی با شدتی بیش از شدت میدان اشباع آن، توسط مگنتایزر اعمال شود. معمولاً مگنتایزر منبع تولید ولتاژ الکتریکی است که به نگه‌دارنده[3] متصل می‌شود. نگه‌دارنده مابین مگنتایزر و آهنربا قرار گرفته و در آن میدان مغناطیسی تولید شده و مشخصاً برای همان کاربرد ساخته می‌شود. شکل ۲۴-۴ مراحل ساخت و شکل ۲۵-۴ مدار معادل کلی نگه‌دارنده را نمایش می‌دهند:

1- Magnetizer
2- Magnetization rig
1- Fixture

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۴-۴: مراحل ساخت نگهدارنده



شکل ۲۵-۴: مدار معادل نگهدارنده

مگنتایزرها درگذر زمان پیشرفت چشمگیری داشته که به ترتیب عبارت‌اند از:

- **آهنربای دائم:** برای مغناطیس کردن آهنرباهای کوچک با شدت میدان مغناطیسی پایین به‌کاررفته از یک آهنربای بزرگ U شکل (معمولاً آهنربای آلنیکو گرید ۵) با قطب‌های قابل تنظیم[1] استفاده می‌شود. فاصله هوایی معمولاً حدود ۱ الی ۱٫۲۵ اینچ بوده و مناسب مغناطیس سازی آهنرباهای هلالی شکل نیست. شدت میدان مغناطیسی قابل‌تولید برای فاصله هوایی ۱ اینچ، حدود ۳۰۰۰ ارستد است. از دیگر نکات منفی این روش می‌توان به سخت جدا شدن قطعه از آهنربا به دلیل تولید میدان مغناطیسی پیوسته اشاره نمود.
- **آهنربای الکتریکی:** شامل یک یا دو پیچک به دور هسته آهنی C شکل است. قطب‌های قابل تنظیم آهنربای الکتریکی امکان تنظیم فاصله‌ی هوایی و شدت میدان موردنیاز را فراهم می‌سازد. آهنربای الکتریکی قابلیت تولید شدت میدان به بزرگی ۳۰۰۰ ارستد را در فاصله‌ی هوایی ۸۰ میلی‌متر دارد. از معایب این مگنتایزر می‌توان به عدم توانایی شارژ آهنربای منحنی شکل (C یا U شکل) اشاره نمود. میدان مغناطیسی آهنربای الکتریکی مستقیم بوده و توانایی شارژ کامل این نوع آهنرباهای را ندارد. همچنین این مگنتایزر حرارت بسیار زیادی تولید می‌کند که نیازمند خنک‌سازی با آب است. مگنتایزر بدون خنک‌ساز پس از ۱۰ الی ۱۵ ثانیه کار، بایستی ۱ دقیقه استراحت کند. این روش منسوخ شده

۱- سازه‌های آهنی هستند که قطب‌های آهنربای دائم یا الکتریکی را افزایش داده و میدان مغناطیسی تولیدی را نیز متمرکز و تقویت می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

است. معمولاً برای کاربردهای تا حدود ۱۰۰۰۰ ارستد و حداکثر دو قطب از این روش استفاده می‌گردد.

- **شارژر نیم سیکل:** در این روش مگنتایزر پالس‌های بسیار زیادی را با نرخ بالا و با جدا کردن نیم‌سیکل از برق منبع ولتاژ (۱۱۰ الی ۶۰۰ ولت با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز) ایجاد می‌کند. مگنتایزر از یک نگه‌دارنده سیم‌پیچی شده یا ترانسفورماتور جریان به همراه یک نگه‌دارنده تک دور و مدار کنترلی استفاده می‌کند. از معایب این روش می‌توان به وابستگی به منبع ولتاژ سنگین و عدم امکان جابه‌جایی آن اشاره نمود. شارژر نیم‌سیکل در مقایسه با روش خازنی منسوخ شده است.
- **تخلیه خازنی پالسی:** مگنتایزر خازنی متداول‌ترین نوع مگنتایزر است. مگنتایزر دارای یک بانک خازنی است که طی چند ثانیه شارژ و ولتاژ را بسته به اندوکتانس نگه‌دارنده و ظرفیت خازنی، طی ۱۰۰ میکروثانیه تا چند ده میلی‌ثانیه از طریق کلید یک‌سویه SCR یا ایگنیتور[1] در نگه‌دارنده تخلیه می‌کند. این مگنتایزر، حرارت اضافی تولید نکرده و در این مورد مانند مگنتایزر نیم‌سیکل، نگرانی افزایش حرارت و خنک‌سازی وجود ندارد. از دیگر مزایای آن می‌توان به قابلیت مغناطیس‌سازی انواع اشکال آهنرباهای منحنی شکل و همچنین تأمین جریان و میدان مغناطیسی با شدت بسیار بالا، اشاره نمود. جریان موردنیاز پایین و از حدود ۱ الی ۳۰ آمپر، متغیر است.
- **آهنربای الکتریکی ابررسانا:** این روش مدرن‌ترین روش موجود و بسیار گران‌قیمت است که در آن از یک پیچک ابررسانا غوطه‌ور در هلیوم مایع (۴٫۲ کلوین) برای تولید ولتاژ بدون هسته آهنی استفاده می‌شود. این مگنتایزر شدت میدان مغناطیسی قابل‌تولید بسیار بالایی در حدود ۶۰۰۰۰ الی ۹۰۰۰۰ ارستد دارد.
- انتخاب شدت میدان مغناطیسی موردنیاز و نگه‌دارنده مناسب

- تعیین سایز نگه‌دارنده و شدت میدان موردنیاز (برای جلوگیری از اتلاف منابع)

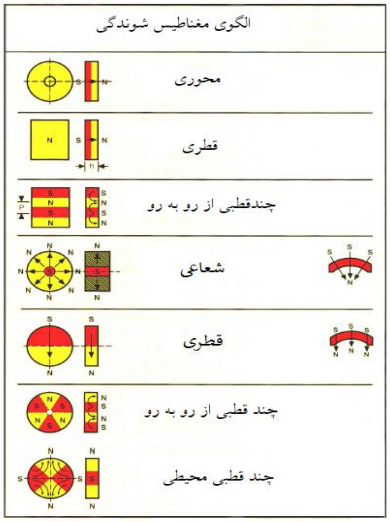
قطر، طول محوری و شکل کلی آهنربا و شدت میدان مغناطیس‌زدای آن

- تعیین نوع نگه‌دارنده (سلونوئید، پیچک مسی با هسته‌ی آهنی و یا فولاد لمینت شده چندقطبی) و سایز آن

تعداد، ابعاد و موقعیت آهنرباها (درصورتی‌که به‌جای تک آهنربا سازه مغناطیسی داشته باشیم)، نوع و ویژگی‌های مغناطیسی آهنربا و الگوی مغناطیس شوندگی، نوع و سایز نگه‌دارنده را تعیین می‌کند. شکل ۲۶-۴ انواع الگوی مغناطیس شوندگی را نمایش می‌دهد:

1- Ignitron

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۶-۴: الگوی مغناطیس‌شوندگی آهنربا

- تعیین سایز نگه‌دارنده، افزایش زمان هر پالس و افزودن میدان مغناطیسی در صورت نیاز

تعداد قطب‌ها، فواصل میان قطب‌ها، موقعیت فیزیکی قطب‌ها، پیکربندی، جهت[1] و زاویه کج شدگی قطب‌ها[2]، تعداد آهنرباها یا تعداد آهنربای به‌کاررفته در یک سازه مغناطیسی

- درصد دمغناطیس شدگی و دقت موردنیاز:

این مورد مربوط به ملاحظات تعیین نقطه‌ی کار آهنربا (یا سازه مغناطیسی) و دقت مدنظر آن است. این ملاحظات عبارت‌اند از شدت میدان مغناطیس زدا (حدود ۵ الی ۲۰ درصد شدت میدان اشباع) که مستقیماً میزان انرژی موردنیاز دمغناطیس شدگی و تعداد پالس‌های موفق و مدت‌زمان موردنیاز برای دمغناطیس شدن موفق را تعیین می‌کند.

- انتخاب نیازمندی‌های مربوط به حمل، نرخ پالس و کنترل‌کننده مگنتایزر:

تصمیم‌گیری برای مغناطیس کردن تک‌تک یا گروهی آهنرباها، حمل مکانیزه یا توسط اپراتور، نرخ هر سیکل، تنظیمات مربوط به PLC یا هر دستگاه کنترلی دیگر، ازجمله موارد مهم در تهیه دستگاه‌ها و نیروی کار موردنیاز خط تولید آهنربا هستند.

- ملاحظات مربوط به محیط کار مغناطیس سازی

بسته به اینکه محیط مغناطیس سازی، آزمایشگاهی یا کارگاهی باشد، دما، میزان رطوبت و آلودگی محیطی بایستی به‌دقت کنترل شود. دمای محفظه‌ی قرارگیری آهنربا نیز ازجمله دیگر ملاحظاتی است که باید بنا به نیازمندی‌های هر آهنربا یا سازه مغناطیسی، به‌دقت تنظیم گردد. لازم به ذکر است که دمای بیش‌ازحد، امکان دمغناطیس شدن آهنربا و آسیب به آن را در پی خواهد داشت.

- **کنترل کیفیت مغناطیس سازی**

کنترل کیفیت آهنربا به لحاظ مغناطیسی پس از ساخت و مغناطیس کردن آن، از اهمیت بالایی برخوردار است

1- Alignment
2- Skew angle

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

بنابراین لازم است موارد زیر پس از اتمام مراحل مغناطیس کردن، کنترل و بازرسی گردد:

چگالی شار پسماند، نیروی وادارندگی (مغناطیس زدا)، BH_{max}، ضریب حرارتی B_r و H_c (α و β)[1] و پایداری بلندمدت شار مغناطیسی کل، دقت الگوی مغناطیس شوندگی، سطح ولتاژ القائی و نیروی جاذب. بدین منظور دستگاه‌ها و تجهیزات زیر نیاز است:

۱. پایشگر جریان الکتریکی[2] به همراه مدار کامپرتور[3] جهت اندازه‌گیری و کنترل جریان موردنیاز مگنتایزر
۲. گوس-متر به همراه مدار کامپرتور جهت اندازه‌گیری دامنه و طول پالس و چگالی شار پسماند
۳. فلاکس-متر، مدار کامپرتور و پیچک تحقیق[4] (نصب‌شده در نگه‌دارنده) جهت اندازه‌گیری چگالی شار کل
۴. پایشگر دما جهت پایش افزایش دمای نگه‌دارنده و توقف فرایند در صورت افزایش دما بیش‌ازحد مجاز
۵. PLC یا کامپیوتر به همراه موارد بالا جهت کنترل فرایند و ثبت آماری فرایند جهت استفاده در فرایندهای بعدی
۶. یکی از تجهیزات اندازه‌گیری مقادیر مغناطیسی زیر:

پرماگراف - مگنتومتر میدان پالسی[5] - مگنتومتر ارتعاشی[6] - گوس متر

۷. تستر رینگ چندقطبی (فلاکس متر و پیچک هلم هلتز) برای اندازه‌گیری آهنربای چندقطبی- تستر گشتاور (ممان) مغناطیسی

- **تولیدات ملی آهنربا**

تولید آهنربای دائم در کشورمان به‌صورت محدود و بیشتر جهت نمونه‌سازی صورت گرفته و عمده‌ی نیاز آهنربا در کشور از طریق واردات از کشور چین برطرف می‌شود. با توجه به تحقیقات و پیگیری‌های انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو، شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان و دانشگاه مالک اشتر ازجمله معدود تولیدکنندگان آهنربای دائم در کشور هستند که توانمندی‌های آن‌ها به شرح زیراست.

- دانشگاه مالک اشتر، دانشکده مواد، گروه مواد مغناطیسی

با توجه به نیاز کشور به علوم و فناوری جدید در حوزه مهندسی مواد و همچنین با توجه به رقابت علمی کشورهای جهان و محدودیت خرید تجهیزات و عدم انتقال فن‌آوری ساخت آن‌ها به کشور، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه مالک اشتر با مأموریت انجام فعالیت‌های آموزشی و پروژه‌های گوناگون در زمینه مهندسی مواد و ساخت و تولید، به‌عنوان تنها جایگاه آموزشی- تحقیقاتی در زمینه مهندسی مواد- متالورژی و فن‌آوری ساخت قطعات از ابتدای مهرماه سال ۱۳۶۹ در شاهین‌شهر اصفهان تأسیس و شروع بکار کرده است.

هم‌اکنون دانشکده مهندسی مواد با استفاده از اساتید مجرب و آزمایشگاه‌ها و کارگاه‌های تخصصی مختلف مهندسی

۳- به ترتیب درصد کاهش چگالی شار پسماند و شدت میدان مغناطیس زدا به ازای افزایش دما به میزان یک درجه کلوین

1- Current monitor
2- Comparator
3- Search coil
4- Pulse field magnetometer
5- Vibrational magnetometer

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مواد، ساخت و تولید، به همراه صنعت‌های مختلف مشغول تعریف و تدوین پروژه‌های متنوع و برگزاری دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت (به‌صورت مصوب وزارت علوم و یا داخلی) موردنیاز کشور می‌باشد. محصولات آهنربای دائم تولیدشده توسط این دانشکده عبارت‌اند از آهنربای تبادلی ارتجاعی فریتی، آهنربای ساماریم کبالت و آهنربای نئودیم- آهن- بور. خواص و ویژگی‌های هریک به شرح زیر است:

أ. آهنربای دائم تبادلی ارتجاعی فریتی

جدول ۱۳-۴: مشخصات تولید آهنربای فریتی – دانشگاه مالک اشتر

تست‌های انجام‌شده روی محصول	**آزمون‌های مغناطیسی، آزمون‌های مکانیکی**
ظرفیت تولید سالانه	۱۲۰۰۰ قطعه در سال
میزان تولید محصول	۲۰۰۰ قطعه
زمان لازم برای تحویل کالا	دو ماه
تائیدیه‌ها و استانداردهای اخذشده	تائید شده توسط صنعت بومی‌سازی مواد فلزی و صنایع شهید هادی
قیمت فروش محصول (تومان / دلار)	بر اساس ابعاد آهنربا تعیین می‌شود
معرفی محصول مشابه خارجی	مشابه خارجی و تجاری برای این محصول وجود ندارد
معرفی محصول مشابه داخلی	مشابه داخلی ندارد
قیمت محصولات مشابه خارجی	این محصول به‌تازگی در دنیا موردتوجه قرارگرفته و مشابه خارجی ندارد.
مزیت رقابتی نسبت به محصولات خارجی	این‌یک کامپوزیت توسعه‌یافته در گروه مغناطیس دانشکده مواد دانشگاه مالک اشتر است و نمونه مشابه خارجی ندارد
نوع گارانتی محصول	تعویض کامل
طول مدت گارانتی محصول	یک سال
طول عمر اقتصادی	۵ سال
نام بین‌المللی	Exchange Spring Magnet

جدول ۱۴-۴: خواص مغناطیسی آهنربای فریتی- دانشگاه مالک اشتر

چگالی شار پسماند (kG-mT)	**۴۰۰-۴**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شدت میدان مغناطیس‌زدا (kOe-kA/m)	۳٫۲۸۰-۵
شدت میدان مغناطیس‌زدای ذاتی (kOe-kA/m)	۳٫۲۹-۷٫۵
بیشترین مغناطیسی انرژی تولیدی(MGO(KJ/m3	۴

جدول ۱۵-۴: خواص فیزیکی آهنربای تبادلی ارتجاعی فریتی- دانشگاه مالک اشتر

چگالی(g/cm3)	**۴٫۹**
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۸۰
استحکام کششی (MPa)	۳۴
ضریب انبساط حرارتی (10-6 /°C)	
عمود برجهت	۱۰
موازی جهت	۱۴

- شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان

شرکت گسترش مواد مغناطیس تابان اولین و تنها تولیدکننده آهنرباهای دائمی سرامیکی در ایران و خاورمیانه واقع در استان اصفهان، شهرک صنعتی اشتر جان در منطقه تکادو می‌باشد. این شرکت در آبان ۱۳۸۱ تولید آزمایشی خود را در زمینی به مساحت ۱۲ هزار مترمربع و یک سوله به مساحت ۱۳۰۰ مترمربع و با تعداد ۳۰ نفر پرسنل شروع نموده و ظرفیت تولید خود را به تولید ۱۰۰ تن قطعات مغناطیسی و حدود ۲۰۰ تن پودر مغناطیسی رساند. فاز دوم این کارخانه با سرمایه‌گذاری شرکت تابان نیرو سپاهان وابسته به شرکت سرمایه‌گذاری تکادو و شرکت گسترش مواد پیشرفته وابسته به سازمان گسترش نوسازی صنایع ایران، به‌منظور رشد و توسعه صنایع پیشرفته، با افزایش سرمایه و ساخت سوله‌ای به مساحت ۱۳۰۰ مترمربع و نصب کوره دوار به ظرفیت تولید ۲۵۰ تن پودر مغناطیسی در ماه، در سال ۱۳۸۳ احداث و در سال ۱۳۸۴ به بهره‌برداری رسید. در حال حاضر شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان با داشتن دانش فنی تولید آهنرباهای سرامیکی فریتی باریم و استرانسیم و با تلاش کارشناسان و متخصصین داخلی، موفق به تولید قطعات آهنربای همسانگرد و ناهمسانگرد صلب مغناطیسی شامل رینگ بلندگو، سگمنت موتورهای DC، آهنربای گیربکس پژو، بلوک مغناطیسی و پودر مغناطیسی جهت استفاده در واحدهای مختلف صنعتی و در اشکال گوناگون همچون رینگ، قرص و بلوک شده است. ۸۵ درصد از ماده اولیه موردنیاز این کارخانه (۱۷۰۰ تن اکسید آهن) از فولاد مبارکه و ۱۵ درصد باقیمانده (۲۵۰ تن اکسید آهن) از چین خریداری می‌شود. شرکت تابان در سال ۱۳۸۹ حدود ۵ میلیون قطعه آهنربا در سال تولید نموده که این میزان تولید پاسخگوی کامل نیاز صنعت ساخت

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

رادیاتور خودرو کشور بوده است. این شرکت محصولات خود را برابر استانداردهای بین‌المللی تولید نموده و هم‌اکنون بخشی از آن را صادر می‌نماید. محصولات دیگر این شرکت به شرح زیر است.

۱. دستگاه کاهنده مغناطیسی سوخت

این محصول یکی از تولیدات شرکت است که می‌تواند میزان مصرف سوخت را تا ۱۵٪ بسته به نوع خودرو کاهش دهد. دستگاه فوق کاربرد مؤثری در کاهش و بهسوزی انواع خودروهای سواری دارد.

۲. دستگاه تصفیه مغناطیسی آب (رسوب‌زدای مغناطیسی آب)

این دستگاه به‌منظور جلوگیری از تشکیل رسوب در انواع آب‌گرم‌کن‌ها و پکیج‌های خانگی استفاده می‌شود.

۳. ساخت و طراحی انواع درام‌های مغناطیسی، گیره‌های مغناطیسی، آهنرباهای معلق برای صنایع معدنی، سرامیک، سیمان و ... .

در حال حاضر به علت مشکلات سهام‌داری، خط تولید این کارخانه متوقف می‌باشد. طی صحبت تلفنی با مدیرعامل کارخانه جناب آقای پور مقدم، با توجه به عدم مشکلات فنی و عملکردی خط تولید، امید است این کارخانه ظرف مدت یک ماه مشکلات سهام‌داری را حل نموده و مجدداً شروع به کار نماید.

- **ملاحظات مربوط به راه‌اندازی خط تولید آهنربا**

با توجه به روند رو به رشد تولید موتورهای الکتریکی مغناطیس دائم و دیگر صنایع، تولید آهنربای دائم در مقیاس بالا و در داخل کشور به‌طوری‌که پاسخگوی نیازهای این صنایع بوده و وابستگی به واردات خارجی را کاهش دهد، ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس اظهارات شرکت گسترش مواد مغناطیسی تابان، قیمت تمام‌شده‌ی آهنربای دائم تولید داخل، حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد، ارزان‌تر خواهد بود. به‌طور مثال قیمت تمام‌شده تولید ۶ قطعه آهنربای دائم فریتی (هر قطعه وزنی حدود ۱۵۰ گرم و ابعاد آن ۷۰×۳۲×۱۰ میلی‌متر است) از یک کیلوگرم پودر مغناطیسی در داخل کشور، حدود ۲۴۰۰۰ تومان خواهد بود؛ درحالی‌که قیمت وارداتی آن حدود ۳۵۰۰۰ الی ۵۵۰۰۰ تومان است.

راه‌اندازی و سرمایه‌گذاری خط تولید آهنربای دائم، همان‌طور که در بخش‌های گذشته به‌تفصیل صحبت شد، مستلزم تأمین نیازمندی‌های فراوانی ازجمله تولید پودر آهنربا تا شکل‌دهی و مغناطیس کردن آن، بررسی و تحلیل بازار هدف، می‌باشد که به‌تفصیل در زیر آمده است:

۱. شناخت و بررسی شرایط بازار مغناطیس دائم داخلی و جهانی
۲. تهیه مواد اولیه مغناطیسی فلزی به‌صورت جامد یا پودری (آهن، کربنات باریم و کربنات استرانسیم و مواد پیونده)
۳. تهیه دانش فنی تولید هریک از آهنرباها (شامل روش تولید گندله و پودر، تکنیک‌های قالب‌گیری، تف جوشی و...)
۴. تهیه ماشین و ابزار گندله‌سازی و خردسازی، ریخته‌گری، انواع قالب‌گیری و تف جوشی
۵. ماشین‌ابزار مناسب سنگ‌زنی و شکل‌دهی آهنربا
۶. تهیه مگنتایزر مناسب، نگه‌دارنده، کنترل‌کننده PLC و دستگاه‌های عیب‌یابی و بازرسی کیفیت ساخت

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۷. ماشین‌آلات بسته‌بندی

۸. نیروی انسانی ناظر بر خط تولید و حمل مواد (تمهیدات لازم برای حمل مکانیزه مواد در صورت عدم استفاده از نیروی انسانی)

به قراری سرمایه اولیه احداث خط تولید آهنربا حدود ۸۰۰ الی ۹۰۰ هزار دلار بوده درحالی‌که خط تولید آن بایستی هر ۱۰ الی ۱۵ سال تعویض گردد.

٤-۲-۳- قطعات درایو

در ادامه گزارش به معرفی و بررسی اجزای درایو (میکرو کنترل‌کننده، هیت سینک[1]، IC-ها و PCB-ها) پرداخته می‌شود. همچنین در ادامه‌ی بخش توانمندی‌های موجود در ایران برای تهیه اجزای درایو بررسی و معرفی می‌شوند.

- **میکروکنترلر**

میکروکنترلر نوعی ریزپردازنده است که دارای حافظه دسترسی تصادفی[2] و حافظه فقط خواندنی[3]، تایمر، پورت‌های ورودی و خروجی (I/O) و درگاه ترتیبی پورت سریال[4] در درون خود تراشه بوده و می‌تواند به‌تنهایی بر روی ابزارهای دیگر، کنترل اعمال کند. به‌عبارت‌دیگر یک میکروکنترلر، مدار مجتمع کوچکی متشکل از یک CPU کوچک و اجزای دیگری نظیر نوسان‌ساز کریستالی، تایمر، درگاه‌های ورودی و خروجی آنالوگ و دیجیتال و حافظه است [۷۰]. از میکروکنترلرهای رایج در ایران، می‌توان به خانواده‌های PIC, ARM, 8051 و AVR اشاره کرد. برخی از وسایل که در آن‌ها میکرو کنترلر استفاده می‌شود: تلفن، موبایل، سیستم، ایمنی، دربازکن گاراژ، دستگاه فاکس، کامپیوتر شخصی PC، ویدئو، دوربین ویدئویی، چرخ‌خیاطی، سیستم‌های تهویه، سرعت‌سنج و ... .

- **مدار مجتمع IC**

مدار مجتمع (IC) به مجموعه‌ای از مدارات الکترونیکی اطلاق می‌گردد که با استفاده از مواد نیمه‌رسانا عموماً سیلیسیم در ابعادی کوچک (معمولاً کمتر از یک سانتی متر مربع) ساخته می‌شود. IC- ها به سه دسته کلی دیجیتال، آنالوگ و آنالوگ-دیجیتال تقسیم می‌شوند. مواد مورداستفاده در ساخت IC -ها بسیار پیچیده هستند و حتی از ترکیب ماسه نیز درون آنها استفاده می‌شود. تولید این مواد اولیه و به‌طور کلی تولید آن‌ها، تنها در دست چند کشور محدود مانند آمریکا است. شرکت‌های اینتل، سامسونگ، توشیبا، فیلیپس و سونی ازجمله بزرگ‌ترین تولیدکنندگان IC در جهان هستند [۷۱].

- **برد مدار چاپی PCB**

برد مدار چاپی "PCB[5]" شامل مجموعه‌ای از مدارهای الکتریکی بوده و می‌تواند یک‌طرفه (یک‌لایه مس)، دوطرفه (دولایه مس) یا حتی چندلایه باشد؛ به‌طوری‌که قطعات الکترونیکی مانند مقاومت، خازن و IC بر روی آن مونتاژ شده و جهت استفاده در تجهیزات الکترونیکی بکار می‌رود. این بردها از مواد مختلفی مانند فایبر، راجرز، تفلون، فلکسی بل

1- Heat Sink
1- RAM
2- ROM
3- Serial Port
4- Printed Circuit Board

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

و آلومینیوم ساخته شده و با ضخامت‌های ۰٫۲ تا ۳٫۲ میلی‌متر عرضه می‌گردند. استاندارد جهانی تولید PCB بر اساس استاندارد UL و IPC است. استفاده تجاری از آن‌ها به دهه ۱۹۵۰ میلادی بازمی‌گردد.

- قطعات DIP وSMD

قطعات DIP[1] داخل برد قرار گرفته و از زیر لحیم می‌شوند. استفاده از این قطعات بسیار راحت بوده و می‌توانند در آزمایش و تست‌های الکترونیکی استفاده شوند. قطعات SMD[2] روی سطح برد قرار می‌گیرند و از روی همان سطح لحیم خواهند شد.

نکاتی که برای انتخاب قطعات بین DIP وSMD باید در نظر گرفت عبارت‌اند از: قیمت قطعات، موجودی قطعه در بازار ایران، توان مصرفی و جریان قابل‌تحمل هر قطعه (قطعات DIP توان بالاتری دارند)، اختلاف ولتاژ دو سر قطعه استفاده از قطعات با ابعاد کوچک در ولتاژهای بالاتر از ۲۲۰ ولت باعث تولید جرقه الکتریکی می‌شود.

- مدار چاپی یک‌لایه (Single-side PCB)

موارد مصرف برد چاپی تک لایه عبارت‌اند از: منابع تغذیه، انواع رله (خودرویی و صنعتی)، تایمرها، سنسورها، صنایع روشنایی LED، لوازم صوتی و تصویری، صنایع بسته‌بندی، دوربین‌های مداربسته، ماشین‌حساب‌ها، چاپگرها، لوازم‌خانگی، صنایع جوش و برش، درایورها، ترازوهای دیجیتال [۷۲].

- مدار چاپی دولایه متالیزه (Double-sided PCB)

برخی کاربردهای مدار چاپی دولایه عبارت‌اند از: کنترل‌کننده‌های صنعتی، منابع تغذیه، مبدل‌ها، رله‌های کنترلی، ابزار دقیق، رگلاتورها، منابع تغذیه اضطراری (UPC)، درایورها، گرمایش تهویه مطبوع HVAC، چراغ‌های LED، چراغ‌ها، تلفن، مانیتورینگ، صنایع خودروسازی، ابزار اندازه‌گیری، آمپلی‌فایرها، سیستم‌های ترافیکی، صنایع جوش و برش [۷۲].

- مدار چاپی چندلایه (Multilayer PCB)

موارد مصرف مدار چاپی چندلایه عبارت‌اند از: کامپیوترها، سرورها، پایگاه داده‌ها، فن‌آوری GPS، کنترل‌کننده‌های صنعتی، تلفن‌های همراه، آنتن‌های مخابراتی، تجهیزات آزمایشگاهی، تجهیزات عکس‌برداری، تجهیزات پزشکی، گیرنده‌های فیبر نوری، تجزیه‌وتحلیل آب‌وهوا، سیستم‌های اعلام حریق و سیستم‌های ماهواره‌ای [۷۲].

- مدار چاپی آلومینیوم AL PCB

برخی از کاربردهای مدار چاپی آلومینیومی عبارت‌اند از: چراغ‌های خیابانی، چراغ‌های ترافیکی، نورافکن‌ها، نورپردازی شهری، گلخانه‌ها، باند فرودگاه، چراغ‌های تونلی، چراغ‌قوه‌ها، روشنایی آسانسور، محصولات انرژی خورشیدی [۷۲].

- شرکت‌های تأمین و تولید PCB

1- Dual In-line Pin
2- Surface-Mount Device

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

با توجه به اهمیت بومی‌سازی پروژه و استفاده از تولیدات داخلی در پروژه با عنوان کسب دانش طراحی و ساخت الکتروموتورهای BLDC کم‌هزینه برای کاربرد دوچرخه برقی و ساخت یک نمونه نیمه‌صنعتی ۵۰۰ واتی، به بررسی توانمندی شرکت‌های داخلی پرداخته می‌شود. از میان قطعات و اجزای درایو، برد مدار چاپی PCB در شرکت‌های داخل ایران تولید می‌شود که در ادامه شرکت‌های تولیدکننده و محصولات آنها شرح داده‌شده‌اند.

۱. آلفا مدار صنعت

آلفا مدار صنعت در زمینه تولید انواع بردهای مدار چاپی برای صنعت نفت و رباتیک فعالیت دارد. محصولات این شرکت به دو بخش بُردهای نمونه و بُردهای تیراژ تقسیم می‌شود، این محصولات شامل بُردهای یکرو، دورو معمولی، دورو متالیزه، فلکسی و بُردهای چندلایه است. شرکت آلفا مدار برد مدار چاپی از ۱ تا ۸ لایه را تولید می‌کند. این شرکت قابلیت تولید برد مدار چاپی تخت Rigid و ترکیبی از برد مدار چاپی سخت و انعطاف‌پذیر RF را دارد. مواد خام تشکیل‌دهنده بردهای مدار چاپی در این شرکت شامل فایبرگلاس، راجرز و تفلون است. بردهای مدار چاپی با حداکثر اندازه ۴۰۰mm*۵۰۰mm و ضخامت ۰٫۵ mm تا ۳٫۲mm می‌باشند [۷۳].

۲. جهان الکترونیک

خدمات انجام‌شده در شرکت جهان الکترونیک شامل موارد زیر است:

طراحی تا مونتاژ(ODM) ، تأمین تا مونتاژ(OEM) ، مونتاژ(EMS) ، پی سی برد(PCB) .

پروژه‌های انجام‌شده توسط شرکت جهان الکترونیک شامل موارد زیر می‌باشند:

۱) مخابراتی با شرکت‌های NEC (ژاپن)، Siemens (آلمان)، Alcatel (فرانسه)

۲) برق با شرکت‌های Ampy (انگلیس)، Actaris (فرانسه)

۳) الکترونیک صنعتی با شرکت Micro PCB (سوئیس) در پروژه‌های PLC-های صنعتی

۴) صوتی تصویری با شرکت‌های LG، SNOWA

۵) شبکه BTS کشوری

جهان الکترونیک از سال ۱۳۸۴ دارای صادرات به اروپا ازجمله آلمان، سوئیس و انگلیس است. دارا بودن استاندارد IPC (آمریکا)، عضویت رسمی در موسسه EIPC اروپا، استاندارد ۹۰۰۱ -ISO و ISO IATF-16949 و ... . منتخب رعایت TQM در زنجیره تولید توسط موسسه پروفسور کانو ژاپن و ... نیز ازجمله دستاوردهای این شرکت است [۷۴].

۳. کارا الکترونیک

محصولات این شرکت شامل مدار چاپی تک لایه، مدار چاپی دولایه، مدار چاپی دولایه متالیزه، مدار چاپی آلومینیوم و مدار چاپی چندلایه، تولید انواع شابلون (SMT)، مونتاژ مدار چاپی است.

کارا الکترونیک توانایی ساخت و تولید انواع بردهای تک لایه را به‌صورت نمونه (Prototype) و سفارش‌ها با تیراژهای متوسط و انبوه بر روی انواع فیبرهای فنولیک(XPC,FR1) ، فایبرگلاس (FR4) و نیمه فایبرگلاس (CEM1,CEM3)را دارا است. این شرکت بردهای مدار چاپی از ۱ تا ۳۲ لایه تولید می‌کند. همچنین پوشش نهایی مدار چاپی تک لایه به‌صورت قلع و سرب به روش غلتکی (RTL) و همچنین قلع و سرب و یا قلع بدون سرب به روش

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

(HASL)، فلاکس OSP[1] و آبکاری طلا ENIG[2] قابل ارائه می‌باشد.

کارا الکترونیک به‌عنوان اولین تولیدکننده مدار چاپی آلومینیومی (همچنین می‌توان گفت مدار چاپی پایه فلز MC PCB) نزدیک به ده سال است که تولید این نوع از مدار چاپی را به سبد محصولات خود اضافه کرده است. دریافت گواهینامه استاندارد بین‌المللی مدیریت کیفیت ISO9001:2008 از موسسه TUV NORD آلمان از سوابق کارا الکترونیک است [۷۵].

۴. دلتا یاران مدار

این شرکت توانایی طراحی، ساخت و مونتاژ انواع بُرد یکرو، دورو، متالیزه، فرکانس بالا، منعطف و مولتی لایه (سفارش تایوان) را دارد.

محصولات و خدمات این شرکت شامل طراحی انواع بردهای الکترونیک، ساخت انواع مدار چاپی، ساخت تخصصی انواع برد فرکانس بالا (ROGERS) با دقت بسیار بالا، طراحی و ساخت انواع شابلون استنسیل از جنس استیل برای مونتاژ قطعات SMD، چاپ انواع پنل و ساب رک و برنچینگ و ساخت انواع شیلدهای فلزی، مونتاژ DIP و SMD به‌صورت دستی و ماشینی، ساخت برد نمونه متالیزه و فرکانس بالا در عرض چهار ساعت، خدمات مدار چاپی (خدمات سوراخ‌کاری، خدمات متالیزه، آبکاری نیکل و طلا و ...) می‌شود. همچنین، توانایی ساخت بردها با ضخامت مدار ۰٫۰۷۵ میلی‌متر را دارد و اولین سازنده برد به ابعاد ۵۰×۲۳۷ سانتیمتر (برد منعطف) در ایران، سیستم Hot Air leveling جهت جلوگیری از اکسید شدن پدها و درنتیجه مونتاژ راحت‌تر برد است. خدمات آبکاری نیز شامل آبکاری مس، نیکل و طلا ، قلع و سرب، قلع و نقره شیمیایی می‌شود [۷۶].

۵. تجارت الکترونیک عرش گستر

شرکت عرش گستر (ETAG CO) در سال ۱۳۷۹ توسط جمعی از متخصصین دانشگاهی الکترونیک و مخابرات تأسیس شد. عرش گستر خدمات خود را در قالب برد مدار چاپی، PCB، سفارش فیبر، مونتاژ برد مدار چاپی، تأمین قطعه و قطعات الکترونیک، برد دولایه، برد مولتی لایه، بردهایRF ، برد آلومینیوم، طراحی برد مدار چاپی، برد مدار چاپی سرامیکی، برد مدار چاپیHDI ، قطعاتFBGA ، نرم‌افزار طراحی، سرویس OEM ، مدیریت پروژه‌های ساخت دستگاه‌های الکترونیک و مخابرات، تولید استنسیل و فعالیت‌های مشابه ارائه داده است. این شرکت در زمینه تولید PCB، PCBA و OEM & ODM خدمات ارائه می‌دهد. تولید مدار چاپی ۵۰-۲ لایه، تولید PCB-های مورد استفاده در کنترل امپدانس در دو نوع Rigid و Rigid-flex، PCB با HASL، finger gold، آبکاری قلع، آبکاری نقره، آبکاری طلا، طلای هارد، نمونه‌سازی و تولید انبوه، مونتاژ برد مدار چاپی SMD وDIP و انجام تست XRAY از خدمات این شرکت است [۷۷].

- **هیت سینک**

یک قطعه فلزی از جنس فلزهای با رسانای گرمای زیاد مثل مس و آلومینیوم که روی پردازنده‌ها یا چیپ‌های مادربرد یا هر چیپ دیگری که در اثر پردازش اطلاعات گرما تولید می‌کند قرار داده می‌شود تا سطح تماس پردازنده و چیپست رو با محیط اطراف بیشتر کرده و به پردازنده امکان دفع گرمای بیشتری را بدهد تا گرم نشود. معمولاً قسمت

1- Organic Solderability Preservative
2- Electroless Nickel Immersion Gold

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

بالای Heatsink-ها پره‌ای است (مانند رادیاتور) تا سطح تماس با محیط باز بیشتر باشد و در بعضی جاها، مانند CPU، روی آن یک فن قرار داده شده تا هوای گرم میان پره ها را خارج کند. در دنیای الکترونیک، قطعات حساس و محاسباتی چون کارت گرافیک، CPU و ...، به دلیل تولید حرارت بالا همیشه از یک مجموعه و شبکه هیت سینک به همراه فن (برای تهویه بهتر) استفاده می‌کنند.

٤-٣- تست دوچرخه برقی

آزمایشگاه دوچرخه برقی از نوع PDB در پژوهشگاه نیرو اجرا شده است و تمامی آزمون‌ها و تست‌های عملکردی دوچرخه در آن بر اساس استاندارد EN 15194 می‌باشد. این آزمایشگاه پروتابل (قابل‌حمل و متحرک) است. در یک کانکس تعبیه‌شده و قابلیت جابجایی دارد. دوچرخه بر روی دو غلتک قرار می‌گیرد. در این آزمایشگاه، صفحه موجود که غلتک‌ها بر روی آن قرار دارند، دارای لولا بوده تا بتوان قابلیت شیب پیمایی دوچرخه آزمایش شود. شیب در حال حاضر در ست آزمایشگاه به لحاظ هزینه به‌صورت دستی در نظر گرفته‌شده است ولی در نظر است تا جکی برای این منظور تعبیه گردد و شیب به‌صورت دقیق تنظیم شود. دوچرخه توسط نگه‌دارنده‌های موجود در دو طرف نگهداشته می‌شود.

تست‌های لازم

توسط انکودر موجود در غلتک‌های چرخ عقب سرعت چرخش اندازه‌گیری می‌شود. مسافت طی شده را نیز می‌توان به دست آورد. در دوچرخه‌هایی که موتور آن در چرخ جلو قرار دارد، نیز از همین انکودر استفاده می‌گردد. بدین‌صورت که غلتک‌های جلو عقب با تسمه به یکدیگر کوپل می‌شوند. زمان شارژ و دشارژ کامل باتری اندازه‌گیری می‌شود. شش سنسور دمایی و یک سنسور رطوبت‌سنج در داخل محیط آزمایشگاه قرار داشته و یک سنسور دما و رطوبت نیز در محیط وجود دارد. علت وجود سنسور رطوبت، بررسی عملکرد دوچرخه در شرایط محیطی گوناگون است. به‌طور مثال، رطوبت ۵۰٪ یا ۸۰٪ در نظر گرفته شود. رطوبت بر عملکرد موتور و باتری تأثیر می‌گذارد. در رطوبت بالاتر از محیط راندمان باتری‌ها به‌شدت افت می‌کند. ولی در این آزمایشگاه برخورد باد وجود ندارد.

یکی از آزمایش‌های مهم، شبیه‌سازی سرنشین‌ها با وزن‌های مختلف (بار) بر روی دوچرخه توسط نیروسنج است، در این حالت پارامترها از قبیل حداکثر پیمایش با یک‌بار شارژ کامل، حداکثر سرعت دوچرخه، حداکثر شیب قابل پیمایش، ... محاسبه می‌شوند.

این سامانه آزمون به‌گونه‌ایست که ادعاهای سازنده را اثبات و یا رد می‌نماید. درواقع این آزمایشگاه به جهت آزمودن دوچرخه بر طبق ادعاهای موجود است. به‌عنوان‌مثال، در مورد پارامتر شیب پیمایی، در استاندارد بررسی حداکثر شیب قابل پیمایش مطرح است. به این‌گونه که شیب از ۰ درجه به‌تدریج افزایش می‌یابد و موتور دوچرخه توسط سامانه موجود در بیرون از کانکس کنترل می‌شود، شیب به حدی می‌رسد که دیگر دوچرخه توانایی حرکت نداشته باشد.

جک موجود در قسمت فوقانی کانکس به همراه نیروسنج، وزن سرنشین را شبیه‌سازی می‌کند و فیدبک حاصل از این تجهیز به سیستم رؤیت، انتقال داده می‌شود. به‌توسط این تجهیزات می‌توان حداکثر وزن قابل‌تحمل را نیز محاسبه نمود.

به‌طورکلی پارامترهای موردنظر برای آزمون دوچرخه عبارت‌اند از: حداکثر وزن قابل‌تحمل، حداکثر شیب قابل

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

پیمایش، حداکثر سرعت دوچرخه در شیب‌های مختلف (از صفر تا حداکثر شیب مجاز)، زمان یک‌بار دشارژ کامل باتری، مسافت پیموده شده با یک‌بار شارژ (رنج عملکرد دوچرخه بدون کمک).

دوچرخه‌های برقی موردنظر در این آزمایشگاه قابلیت کمک‌گیری (رکاب زدن) را داشته ولی قابلیت شارژ مجدد باتری (ترمز Regen) را ندارند؛ بااین‌حال استاندارد موردنظر، آزمایش دوچرخه در شرایط بدون کمک است.

دیگر پارامترهای خیلی مهم مدنظر جریان شارژ و دشارژ باتری، جریان موتور، دمای موتور و دمای باتری است. پارامترهای دمایی برای جلوگیری از داغ کردن بیش‌ازحد موتور و باتری مورداستفاده قرار می‌گیرند تا بتوان آن‌ها را رصد نمود. دمای باتری و موتور توسط سنسورهای دما موجود در محیط آزمایشگاه، اندازه‌گیری می‌شوند بدین‌صورت که سنسور دما بر روی باتری به‌واسطه بسط‌های موجود و در نزدیکی موتور بسته به نوع دوچرخه قرار می‌گیرد. در واقع از سنسورهای دمایی موجود برای دمای محیط آزمایشگاه و برای اندازه‌گیری دمای موتور و باتری استفاده می‌شود.

استفاده از دیگر سنسورهای از قبیل ترمو نوری نیز وجود دارد ولی یکی از اهداف موجود در ساخت این آزمایشگاه، مقرون‌به‌صرفه بودن آن است. مضاف بر اینکه سیستم آزمایشگاه تمام‌خودکار است.

نرم‌افزار

در قسمت نرم‌افزار بسیاری از قابلیت‌ها دیده‌شده‌اند، به‌طور مثال، بعد از انجام تنظیمات در محیط آزمایشگاه، اپراتور از سناریوهای موجود در نرم‌افزار، از قبیل حداکثر مسافت پیموده‌شده، استفاده می‌نماید. در این سناریو تراتل به‌صورت خودکار بر روی حداکثر قرارگرفته و شارژ و جریان باتری اندازه‌گیری می‌شوند. هم‌زمان همه پارامترها از قبیل، دما، رطوبت، سرعت و ... ثبت و بر روی نمودار نمایش داده می‌شوند. تنظیمات و اطلاعات دوچرخه از قبیل اندازه چرخ (سرعت و مسافت قابل پیمایش) ، محدوده عملکرد تراتل آن و ... قابل تنظیم و اعمال است.

چون هدف خودکار بودن سیستم بوده، برخی از سنسورها مورداستفاده قرار نگرفتند. به‌طور مثال سنسورهای حرارتی برای دما معمولاً فاقد خروجی دیجیتال هستند و درصورتی‌که داشته‌باشند، هزینه بسیاری خواهد داشت.

تعادل دوچرخه با استفاده از نیروسنج و تسمه تأمین می‌گردد.

این آزمایشگاه برای نوع PDB در نظر گرفته شده است و اگر نیاز به آزمایش دوچرخه‌های pedelec باشد، باید تغییرات جزئی در آزمایشگاه انجام داد. این آزمایشگاه فقط گزارش آزمون می‌دهد زیرا آزمایشگاه مرجع نیست.

تست ارتعاش

با استفاده از سنسور ارتعاشی مگنتی می‌توان به‌سادگی ارتعاش را اندازه گرفت. ساختار آن ساده بوده و باید کف آن کاملاً صلب باشد. در سخت‌افزار باید دستگاه ارتعاش سنج نیز اضافه شود.

در استانداردهای مذکور در این بخش و همچنینی در گزارش‌های آزمون دوچرخه‌های برقی بررسی‌شده، اشاره‌ای به تست‌ها و استانداردهای ارتعاشات برای موتورهای تراکشن و یا انواع دوچرخه‌برقی نشده است.

٤-٤- جمع‌بندی

در این فصل از گزارش به امکان‌سنجی تامین مواد اولیه و قطعات ساخت دوچرخه برقی پرداخته شد. تامین مواد

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

اولیه شامل ورق هسته الکتروموتور، آهنربا مورد استفاده در الکتروموتور، قطعات لازم و مورد استفاده در درایو الکتروموتور از قبیل میکروکنترلر، IC، PCB، هیت سینک و .... همچنین شرکت‌های فعال در این حوزه معرفی شده اند. در نهایت به معرفی آزمایشگاه دوچرخه برقی از نوع PDB در پژوهشگاه نیرو پرداخته شده است. همچنین در جهت تکمیل این موضوع تست های لازم جهت انجام در محیط آزمایشگاه معرفی و توضیح داده شده اند

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۵- مشخصات فنی نهایی سیستم الکتروموتور BLDC و دوچرخه برقی

۵-۱- مقدمه

پس از معرفی انواع دوچرخه‌های برقی و مباحثی که باید در طراحی مورد بررسی قرار بگیرند، مشخصات فنی نهایی سیستم الکتروموتور و دوچرخه برقی در این فصل جمع‌بندی شده است. با توجه به اینکه هدف پروژه ساخت یک دوچرخه برقی نیمه‌صنعتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در کشور و شرایط حاکم بر آن است، لذا برخی پیچیدگی‌های موجود در نمونه‌های مشابه صنعتی حذف شده و در نهایت یک جمع‌بندی کلی از لحاظ کاربرد، ساختار، مواد اولیه و مشخصات فنی برای دوچرخه برقی ارائه شده است.

۵-۲- کاربرد و مشخصات کلی و ساختاری دو چرخه

از نظر کاربرد، دوچرخه برقی مذکور به‌منظور استفاده برای رفت‌وآمد در شهر که اکثراً مسیرهای پرترافیک مسطح یا دارای شیب جزئی می‌باشند، در نظر گرفته شده‌است. ازاین‌رو به‌منظور ساده‌سازی و کاهش پیچیدگی موتور و دوچرخه، در طراحی از یک دنده استفاده شده است. سایز چرخ آن ۲۶ اینچ بوده و وزن دوچرخه در حدود ۲۰ کیلوگرم است. بر اساس نمودار شکل ۲۶-۲ حاصل از مدل‌سازی روابط، دوچرخه برقی طراحی‌شده قابلیت تحمل وزن (مجموع دوچرخه‌سوار و دوچرخه) تا ۱۲۰ کیلوگرم در شیب ۴ درجه را نیز دارد. جمع‌بندی این مشخصات در جدول زیر آمده است.

جدول ۱-۵: مشخصات ساختاری دوچرخه

سایز چرخ دوچرخه	۲۶ اینچ
تعداد دنده دوچرخه	تک دنده
وزن دوچرخه	۲۰ کیلوگرم
قابلیت تحمل وزن	تا ۱۲۰ کیلوگرم
حداکثر شیب قابل پیمایش	۴ درجه

۵-۳- سیستم کنترلی دوچرخه برقی

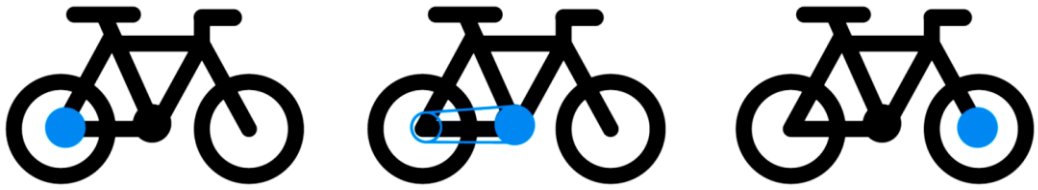
در بخش ۳-۱ به معرفی و بررسی انواع سیستم‌های محرکه و کنترلی دوچرخه‌های برقی (PAB و PDB) پرداخته شد و مکانیزم عملکردی، مزایا و معایب هرکدام به‌تفصیل بیان گردید. با انجام مقایسه میان این دو نوع سیستم،

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

درنهایت سیستم PDB برای طراحی دوچرخه برقی نیمه‌صنعتی در نظر گرفته شد؛ از دلایل این انتخاب می‌توان به کنترل آسان‌تر آن اشاره نمود. چرا که در این سیستم کنترلی نیازی به استفاده از انواع سنسورهای کَدِنس و گشتاور و درنتیجه استفاده از درایو سنگین‌تر نیست و فقط جریان و ولتاژ متناسب با سنسور تراتل بر روی فرمان دوچرخه مدیریت می‌گردد و نیازی به اندازه‌گیری‌های پیچیده توان انسانی برای تعیین میزان شارش توان از باتری به موتور در دوچرخه نیست. در نتیجه هزینه‌های دوچرخه و از طرفی پیچیدگی ساختار آن کاهش می‌یابد.

۵-٤- موقعیت قرارگیری موتور در دوچرخه برقی

هر یک از موقعیت‌های قرارگیری موتور در دوچرخه (شکل ۱-۵) در بخش ۴-۱ بررسی شده است.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱-۵: قرارگیری موتور در دوچرخه: الف) در چرخ جلو، ب) در وسط و ج) در چرخ عقب [۱۰]

در نظر است تا در طراحی با توجه به مقایسه صورت گرفته میان انواع موتورهای Direct Drive، گیربکس‌دار و Mid Drive و همچنین محل قرارگیری آن در چرخ جلو و عقب در جدول ۲-۵، از موتور DD در هاب چرخ عقب استفاده شود. این مدل، به طراحی قاب خاصی برای دوچرخه نیاز نداشته؛ بنابراین، تعویض تغذیه موتور اگر نیاز شد، آسان‌تر است. بهترین تجربه سواری را فراهم می‌کند و در مقایسه با موتورهای گیربکس‌دار و Mid-Drive فن‌آوری ساده‌تری داشته و دوام اجزاء موتور را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. عیب این نوع قرارگیری موتور در دوچرخه این است که قرارگیری موتور در چرخ عقب منجر به توزیع وزن نامطلوب در دوچرخه می‌گردد و قسمت انتهایی دوچرخه سنگین‌تر از جلو شده و مناسب برای صعود از تپه به‌مانند موتور Mid-Drive نیست [۱۰]. همچنین با توجه به این نکته که موتور BLDC طراحی شده با در نظر گرفتن توانمندی‌های داخلی کشور از قبیل استفاده از آهنربای فریت به‌جای آهنربای نئودیم-آهن-بور می‌باشد، حجم و وزن موتور افزایش یافته و بهتر است در چرخ عقب قرار گیرد. این مدل وابسته به طراحی خاصی برای قاب دوچرخه نیست و می‌توان موتور با توان بالاتر از ۲۵۰ وات را در آن قرار داد. علت دیگر انتخاب موتور در هاب چرخ عقب، بررسی‌های انجام شده پیرامون دوچرخه‌های موجود در بازار ایران (پیوست ۱) است که فن‌آوری این دوچرخه‌ها هاب-موتور در چرخ عقب می‌باشد.

جدول ۲-۵: انتخاب موتور بر اساس موقعیت آن در دوچرخه [۱۰]

	موتور در هاب چرخ جلو	موتور در وسط (Mid-Drive)	موتور در هاب چرخ عقب
مزایا	نصب و جداسازی آسان چرخ برای تعمیر	جداسازی چرخ جلو عقب به‌راحتی و عدم نیاز به کابل اضافه	راه طبیعی برای سوارشدن با یک دوچرخه، نوع متداول
	تعادل وزن بین چرخ جلو عقب بهتر از نوع موتور در هاب چرخ عقب	بهترین تعادل وزن- مرکزی	به علت توزیع وزن در انتهای عقب، "چرخش چرخ" (برخلاف موتور جلو) سخت است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

	-	بهترین گزینه برای دوچرخه کوهستانی به علت مشخصه خوب تپه نوردی	طیف گسترده‌ای از گزینه‌های موجود - سطوح مختلف قدرت و راه‌حل‌های یکپارچه (با سنسور گشتاور و کنترل موتور)
معایب	سواری غیرطبیعی - احساس "کشیده" شدن. بر اساس تجربه شخصی و بررسی‌های مجله	مضر برای اجزای هیدرولیک. همان‌طور که قدرت از طریق این اجزا انتقال می‌یابد، بیشتر قطعات مورداستفاده قرار می‌گیرند.	توزیع وزن بیشتر بر روی چرخ عقب- بد برای حمل و بلند کردن دوچرخه
	هنگامی‌که جاده لغزنده است یا دارای سربالایی است، "چرخش چرخ" بسیار آسان است.	نیاز به طراحی قاب سفارشی و الزام به یک تغذیه موتور از ابتدا دارد.	-
	نیاز به چنگال جلو سنگین	موتورهای ارزان بسیار بزرگ هستند. موتورهای خوب گران‌قیمت‌تر از موتورهای در هاب چرخ هستند.	-
	موتورهای موجود تا توان ۲۵۰ وات (توان کم)	-	-

۵-۵- ترمز احیاکننده در طراحی دوچرخه برقی

با توجه به بررسی مکانیزم ترمز احیاکننده در بخش ۲-۲ به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد که در خودروی برقی یا هیبریدی به دلایل متعدد از قبیل سنگین‌تر بودن وسیله نقلیه، قابلیت حمل بارهای سنگین‌تر و هزینه بیشتر آن‌ها می‌توان از ترمز احیاکننده بهره برد. در مقابل، در دوچرخه‌های برقی ترمز احیاکننده گزینه انتخابی مقبولی نمی‌باشد. برخی از دوچرخه‌های برقی موجود شامل این ویژگی هستند و برخی فاقد آن. عوامل مد نظر برای انتخاب این ویژگی در دوچرخه‌برقی عبارت‌اند از:

- افزایش پیچدگی موتور
- نیاز به ادوات الکترونیکی پیچیده‌تر و گران‌تر
- ساخت دشوارتر
- قیمت تمام‌شده بالاتر محصول برای مصرف‌کننده (مگر اینکه عوامل دیگر به کاهش هزینه کمک کنند)
- اجبار بهه استفاده از موتورهای DD در دوچرخه برقی (افزایش وزن ساختاری دوچرخه)

لذا با توجه به پرهیز از پیچیده‌سازی سیستم درایو و موتور و همچنین تلاش بر کاهش هزینه‌های ساخت دوچرخه، اگرچه موتور DD قابلیت اجرای ترمز REGEN را دارد اما از استفاده این نوع سیستم ترمزی صرف‌نظر شده است.

۵-۶- جمع‌بندی و انتخاب نهایی

توان الکتروموتور طراحی‌شده برابر با ۵۰۰ وات با سرعت نامی ۲۰ کیلومتر بر ساعت و حداکثر سرعت ۳۰ کیلومتر

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

بر ساعت است. رفت‌وآمد شهری نیز گاهی نیاز به گشتاور بیشتر برای شروع حرکت و یا پیمودن مسافت‌های با شیب کم دارد. با توجه به نوع موتور (DD و تک دنده) برای دستیابی به گشتاور بیشتر باید توانی بالاتر از ۲۵۰ وات در نظر گرفت زیرا این نوع دوچرخه در عین ساده‌تر بودن فن‌آوری در مقایسه با بقیه، قابلیت پیمایش شیب و تولید گشتاور بیشتر را ندارد. لذا باید توان آن حداقل برابر با ۵۰۰ وات باشد تا قابلیت پیمایش شیب ۴ درجه را داشته باشد (شکل ۲۶-۲). بررسی قوانین دوچرخه‌های برقی در دنیا نشان می‌دهد که در نظر گرفتن این توان و سرعت خارج از عرف نیست. در واقع استاندارد هر کشور برای توان و سرعت موتور نیز بر انتخاب توان موردنیاز تأثیرگذار است. جمع‌بندی مشخصات فنی نهایی به‌صورت خلاصه در جدول ۳-۵: مشخصات فنی نهایی دوچرخه طراحی‌شده‌آورده شده است.

جدول ۳-۵: مشخصات فنی نهایی دوچرخه طراحی‌شده

نوع کاربری	رفت‌وآمد شهری	نوع سیستم کنترلی	PDB
نوع سنسور	تراتل	موقعیت قرارگیری موتور	موتور- هاب در چرخ عقب
فن‌آوری موتور	Direct Drive	آهنربای موتور	فریت
توان موتور	۵۰۰ وات	سرعت نامی	۲۰ کیلومتر بر ساعت
سرعت حداکثری	۳۰ کیلومتر بر ساعت	شیب قابل پیمایش	۴ درجه (۷ درصد)
ترمز REGEN	-	تحمل وزن (مجموع)	۱۲۰ کیلوگرم

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ٦- مطالعه طراحی موتور BLDC

٦-١- مقدمه

موتور BLDC در مراجع مختلف دارای تعاریف متفاوتی است. مطابق تعریف انجمن سازندگان تجهیزات الکتریکی NEMA موتور BLDC همان موتور سنکرون آهنربای دائم است، با این تفاوت که ولتاژ و سیم‌پیچی استاتور آن از نوع ذوزنقه‌ای می‌باشد. تغذیه استاتور توسط یک درایو الکتریکی و روتور آن از نوع آهنربای دائم و عمل کموتاسیون در آن بدون جاروبک مکانیکی و به صورت الکترونیکی و به کمک حسگر هال اتفاق می‌افتد. از دیگر مزایای قابل توجه موتور BLDC می‌توان به بازده، طول عمر و قابلیت اطمینان بالا، وزن، حجم و نویز پایین، مشخصه‌ی گشتاور سرعت و پاسخ دینامیکی مطلوب و همچنین بازه‌ی سرعت وسیع اشاره نمود که باعث جذابیت هرچه بیشتر آن درکاربردهای وسایل نقلیه شده است.

در ادامه این فصل به توضیح الگوریتم طراحی این موتور جهت استفاده در دوچرخه‌برقی پرداخته می‌شود.

٦-٢- الگوریتم طراحی الکتروموتور BLDC

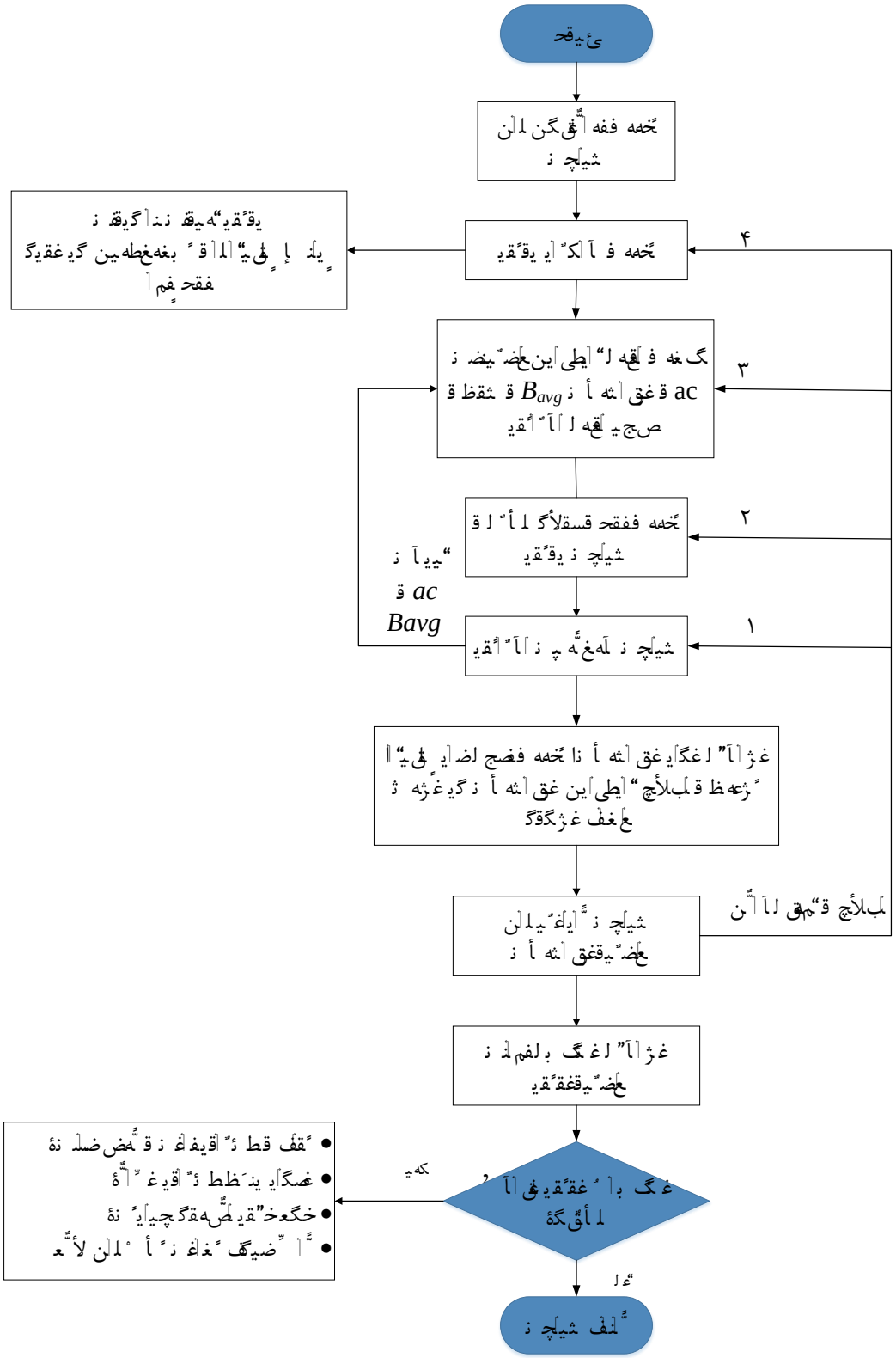
طراحی موتورهای BLDC عموما به دو روش EMDM[1] (طراحی الکترومغناطیسی) یا FCM[2] (طراحی میدانی-مداری) انجام می‌شود. طراحی به روش EMDM شامل چهار مرحله اساسی:

١. تعیین ساختار روتور بر اساس نیازمندی‌های کاربرد موتور
٢. تعیین بارگذاری مغناطیسی بر اساس ساختار روتور و آهنربای دائم
٣. تعیین بارگذاری الکتریکی بر اساس بارگذاری مغناطیسی
۴. تعیین طول و قطر ماشین بر اساس بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی

استفاده از این روش برای طراحی و ساخت موتور، مناسب اما دقت محاسباتی آن کم است. در روش FCM طراحی به کمک شبیه‌سازی المان محدود انجام گرفته، دقت بالایی داشته و طراح امکان مشاهده میدان مغناطیسی و دیگر خروجی‌های موتور را در محیط نرم‌افزار دارد. بنابراین در صورت نیاز بمنظور بهبود مشخصات موتور، پارامترهای طراحی را بطور آنلاین تغییر می‌دهد [۸۲]. با توجه به ویژگی‌های هر دو روش و نیاز به هر دو پارامترهای الکترومغناطیسی و مداری موتور، شایسته است که از هر دو روش همزمان استفاده شود. شکل ١-۶ روند طراحی کلی موتور BLDC را نشان می‌دهد:

1- Electromagnetic design method
2- Field circuit method

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱-۶: فلوچارت طراحی کلی موتور **BLDC**[۸۲]

۶-۳- محدودیت‌های طراحی الکتروموتور هدف

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

از جمله محدودیت‌های حائز اهمیت در طراحی موتور مورد استفاده در این دوچرخه باید به محدودیت طول و قطر موتور به دلیل فضای محدود نصب آن بر روی چرخ دوچرخه و محدودیت‌های اقتصادی آن اشاره نمود. جهت تعیین نسبت طول موثر ماشین به قطر آن از روابط موجود در استفاده نمود. برای داشتن به ترتیب هزینه، ضریب قدرت، راندمان ماشین مناسب، مقدار $\frac{L}{\tau}$ از جدول ۱-۶ انتخاب می‌گردد:

جدول ۱-۶: رابطه طول و گام قطب ماشین [۸۳]

هزینه حداقل	$1.5 < \frac{L}{\tau} < 2$
ضریب قدرت خوب	$1 < \frac{L}{\tau} < 2.5$
راندمان مناسب	$\frac{L}{\tau} = 1.5$
طرح کامل مناسب	$\frac{L}{\tau} = 1$

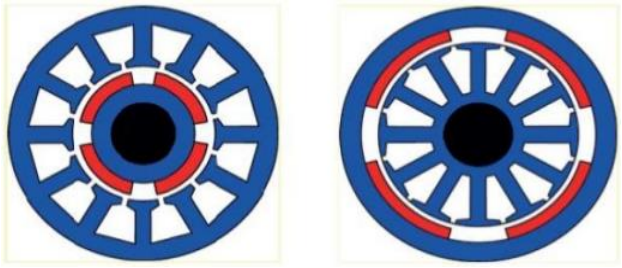
که در آن τ گام قطب است و از طریق رابطه‌ی $\tau = \frac{\pi D_{ag}}{۲p}$ حساب می‌شود. D_{ag}، قطر متوسط فاصله هوایی است که کلیه محاسبات طراحی الکتروموتور بر اساس آن صورت می‌گیرد. همچنین در طراحی این موتور از آهنربای دائم فریتی به علت قیمت کم و قابلیت تولید در ایران، با توجه به هدف کاهش قیمت تمام‌شده موتور، در نظر گرفته می‌شود.

٦-٤- تعیین ساختار الکتروموتور به لحاظ محل قرارگیری روتور

روتور بخش دوار موتور الکتریکی است که معمولا منبع تحریک به آن متصل است. در موتورهای جاروبک‌دار، منبع تغذیه به کمک فنر و جاروبک به روتور متصل است، در حالیکه تحریک در موتور BLDC، بدون جاروبک و مستقیما توسط آهنربا روی هسته روتور تامین می‌گردد. از جمله مزایای این ساختارمی‌توان به حذف منبع خارجی، عدم نیاز به یکسوسازی جریان به کمک کموتاتور و همچنین حذف جاروبک که خود معایب بسیاری چون خوردگی جاروبک، افت ولتاژ و نگهداری را دارد، اشاره نمود. جهت سادگی و سهولت در دسترسی و اتصال روتور به چرخ در طراحی موتور درون چرخ[1] بهتر است روتور از نوع بیرونی انتخاب گردد. در این ساختار روتور، خلاف روال عادی، با رعایت فاصله‌ی هوایی بیرون استاتور قراردارد. از مزایای این ساختار می‌توان به عدم نیاز به حلقه‌های لغزان در اتصال الکتریکی ولتاژ تحریک سیم‌پیچی استاتور اشاره نمود. بدین ترتیب اتصال تحریک از سمت اینورتر از طریق شفت توخالی میان استاتور انجام می‌گیرد. علاوه براین، ساختار روتور-درونی اینرسی بیشتری ایجاد کرده و ساختار بیرونی موتور صاف‌تر و حجم کمتری خواهدداشت. شکل ۲-۶ شمای کلی این نوع موتور را نمایش می‌دهد:

1- In-wheel

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



الف ب

شکل ۲-۶: ساختار موتور الف- روتور بیرونی و ب- موتور روتور درونی [۸۴]

ساختار روتور-بیرونی با قطر خارجی یکسان نسبت به ساختار روتور-درونی معمولا فاصله هوایی بیشتری دارد. از آنجا که گشتاور خروجی با مربع قطر فاصله هوایی متناسب است؛ گشتاور تولیدی توسط موتور آهنربای دائم با روتور بیرونی حدود ۱۵ درصد بیشتر از موتور آهنربای دائم با روتور درونی است. استفاده از ساختار روتور-بیرونی برای موتور BLDC دارای مزایای دیگری نیز هست. برخی از مزایای ساختار پیشنهاد شده عبارتند از:

- استفاده از ساختار روتور-بیرونی سبب می‌شود تا اندازه قطر فاصله هوایی موتور افزایش پیدا کرده و درنتیجه توان خروجی موتور افزایش پیدا کند.
- استفاده از ساختار روتور-بیرونی، امکان افزایش تعداد قطب بیشتری را برای روتور فراهم می‌سازد. بنابراین می‌توان از آهنرباهای معمولی مکعب مستطیل بجای آهنرباهای منحنی‌شکل استفاده نمود.
- در ساختار روتور-بیرونی، آهنرباها در کاربردهای سرعت بالا بدلیل نیروی گریز از مرکز از سطح روتور جدا نمی‌شوند، بلکه با نیروی بیشتری به سطح روتور می‌چسبند.
- نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور ساختار روتور-بیرونی بسیار ساده‌تر از سیم‌پیچی استاتور ساختار روتور-درونی می‌باشد، زیرا دهانه شیار استاتور به سمت بیرون است.
- طول و وزن ماشین برای یک ساختار روتور-بیرونی کمتر است.

در کل می‌توان گفت که استفاده از روتور-بیرونی سبب می‌شود تا ساخت موتور ساده‌تر شود.

٦-٥- بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی

ابعاد کلی روتور علاوه بر فضای محدود نصب الکتروموتور، توسط فرکانس نیز محدود می‌گردد. در واقع کاهش ابعاد موتور، نیازمند افزایش فرکانس کاری است که خود بر روی پارامترهای دیگری همچون افزایش تلفات هسته موثر است. قطر چرخ دوچرخه و طول محدود نصب موتور، از جمله محدودیت‌های ابعادی الکتروموتور دوچرخه برقی است. رابطه زیر ارتباط میان گشتاور و ابعاد موتور BLDC را نشان می‌دهد [۸۴]:

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$T = \frac{\pi}{\sqrt{6}} B_{avg} ac\ D_{ag}{}^{2} L \qquad 6\text{-}1$$

از ۱-۶ می‌توان فهمید که با در دست داشتن مقادیر محدود مربوط به طول و قطر خارجی موتور می‌توان مقادیر مربوط به بارگذاری مغناطیسی B_{avg} و بارگذاری الکتریکی ac را که بصورت تجربی با توجه به نوع آهنربای مورد استفاده و میزان جریان موتور تعیین می‌گردد، بدست آورد [۸۴]. بازه این مقادیر بصورت تقریبی در جدول ۲-۶ آمده است:

جدول ۲-۶: محدوده بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی

	B_{avg} بارگذاری مغناطیسی (T)	ac یا بارگذاری الکتریکی (Ac/m)
ماشین جریان مستقیم	۰٫۷۵ – ۰٫۳	۴۰۰۰۰ - ۶۰۰۰
ماشین سنکرون	۰٫۵۸ – ۰٫۴	۴۰۰۰۰ - ۱۳۰۰۰
ماشین القایی قفس سنجابی	۰٫۴۸ – ۰٫۳	۳۵۰۰۰ - ۱۱۰۰۰
ماشین القایی سیم پیچی‌شده	۰٫۵۳ – ۰٫۳	۳۷۰۰۰ - ۶۰۰۰

بارگذاری مغناطیسی مخصوص یا B_{avg} مجموع کل شار فاصله هوایی تولیدی زیر تمامی قطب‌های مغناطیسی به ازای سطح مقطع عبوری از آن است که بصورت زیر نشان داده می‌شود.

$$B_{avg} = \frac{2P\varphi_p}{\pi D_{ag} L} \qquad 6\text{-}2$$

در اینجا φ_p شار مغناطیسی تولیدی زیر هر قطب است. میزان بارگذاری مغناطیسی در یک الکتروموتور آهنربای دائم بر اساس نوع آهنربای انتخابی آن که در این مورد خاص فریت است، در حدود ۰٫۳ الی ۰٫۴ تسلا و کمتر از مقادیر ذکرشده در جدول ۲-۶ خواهد بود؛ بدین ترتیب مقدار بارگذاری الکتریکی را تا حد امکان باید دست بالا انتخاب نمود.

انتخاب مقدار بارگذاری الکتریکی نیز بسته به پارامترهای چگالی جریان و تعداد دور سیم‌پیچی انتخاب می‌گردد. در واقع با معین بودن جریان موثر موتور I_{rms} و اختیار مقدار چگالی جریان j می‌توان مقدار بارگذاری الکتریکی را تعیین نمود. رابطه ۳-۶ رابطه میان چگالی جریان، جریان و سطح مقطع سیم مورد استفاده را نشان می‌دهد:

$$j = \frac{I_{rms}}{A_{cu}} \qquad 6\text{-}3$$

مقدار چگالی جریان برای الکتروموتور BLDC یا j بدون نیاز به سیستم خنک‌کننده، حداکثر ۶ آمپر بر میلی‌متر مربع است. بدین ترتیب بر اساس رابطه ۳-۶ می‌توان سطح مقطع سیم مورد نیاز یا A_{cu} را بدست آورد.

به مجموع آمپردور کل هر موتور به ازای محیط متوسط فاصله هوایی آن نیز، بارگذاری الکتریکی مخصوص یا ac می‌گویند. جهت محاسبه بارگذاری الکتریکی می‌توان از معادله زیر بهره برد:

$$ac = \frac{6A_{cu}N_{ph}j}{\pi D_{ag}} \qquad 6\text{-}4$$

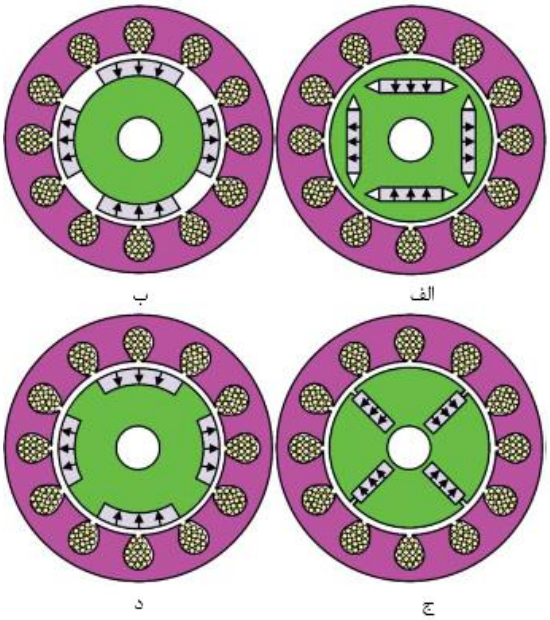
۶-۶- طراحی روتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

٦-٦-١- تعیین آرایش و شکل آهنرباها بر روی روتور

همانطور که پیش‌تر بحث شد، هر یک از آرایش‌های متداول آهنربا در روتور، منجر به گشتاور الکترومغناطیسی منحصر به فردی می‌شود؛ بنابراین شایسته است که آرایش آهنربا بنابر گشتاور مورد نیاز الکتروموتور و همچنین هزینه خرید و ساخت آن انتخاب گردند. شکل ۳-۶ انواع آرایش آهنربا را نمایش می‌دهد:

تعیین آرایش آهنرباها در روتور به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. از جمله این پارامترها می‌توان به نوع و ویژگی‌های مغناطیسی هر آهنربا، گشتاور تولیدی منتجه هر آرایش، دشواری تعبیه آهنربا به صورت سطحی یا درونی، امکان تعبیه آهنربا داخل هسته در صورت نصب داخلی و چسباندن آن به صورت سطحی، دشواری ساخت و برش آهنربا به اشکال پیچیده همانند آهنربای هلالی با خمش‌های خاص، امکان جای‌گیری تعداد آهنربا در فضای محدود روتور، عدم و یا حداقل‌سازی فاصله‌ی هوایی ایجادشده میان آهنربا و سطح خارجی روتور با انتخاب شکل و تعداد مناسب و غیره اشاره نمود. با توجه به هدف پروژه مبنی بر ساخت تمامی اجزای الکتروموتور با بیشترین صرفه اقتصادی ممکن و حداقل پیچیدگی، استفاده از آهنرباهای منحنی‌شکل، مورد توجه قرار نگرفته است. برش آهنربای منحنی‌شکل به ویژه با انحنای خاص دشوار بوده و موجب افزایش هزینه ساخت به طرز چشمگیری می‌گردد.



شکل ۳-۶: انواع آرایش آهنربای دائم الکتروموتور الف- ساختار دفنی محوری ب- ساختار سطحی بیرونی ج- ساختار دفنی شعاعی د- ساختار سطحی درونی

مزایا و معایب هر یک از آرایش‌های آهنربای نشان داده شده در شکل ۳-۶ به شرح زیر است:

- **ساختار دفنی محوری:** در این ساختار آهنرباها در درون هسته روتور دفن شده و قطب‌های هم نام بمنظور افزایش تراکم شار در فاصله‌ی هوایی روبروی هم قرار می‌گیرند. از جمله مزایای این ساختار می‌توان به استفاده از آهنرباهای معمولی بدون قوس و استحکام مکانیکی بالای آن اشاره نمود. در این

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

ساختار نیز همانند ساختار دفنی شعاعی، گشتاور رلوکتانسی و شار نشتی آهنرباها وجود دارد. شکل ۳-۶-الف نمایی دو بعدی از ساختار دفنی محوری را نشان می دهد.

- **ساختار سطحی بیرونی:** در این ساختار آهنرباها به سادگی بر روی سطح روتور قرار می‌گیرند. از آنجایی که نفوذپذیری مغناطیسی آهنرباها شبیه به هوا می‌باشد، بنابراین تغییرات رلوکتانس ناشی از چرخش روتور و درنتیجه گشتاور رلوکتانسی موتور تقریبا برابر صفر خواهد بود. دلیل این امر نزدیک بودن اندازه‌ی اندوکتانس محور d و q سیم پیچی استاتور می باشد. از جمله معایب این ساختار، ضعف مکانیکی آن است که در کاربردهای سرعت بالا نمایان می‌شود. دلیل این ضعف نیروی گریز از مرکز وارد شده بر هر کدام از آهنرباها است که باعث جدا شدن آن ها از روی سطح روتور می‌شود. شکل ۳-۶-ب نمایی دو بعدی از ساختار سطحی بیرونی را نشان می‌دهد.

- **ساختار دفنی شعاعی:** در این ساختار آهنرباها در درون هسته ی روتور دفن شده و در راستای شعاع مغناطیس می شوند. از جمله مزایای این ساختار استحکام مکانیکی آن در کاربردهای سرعت بالا می باشد. همچنین در این ساختار می توان از آهنرباهای معمولی بدون قوس استفاده کرد که این امر سبب سادگی ساختار روتور می شود. از جمله معایب این ساختار می توان به پیدایش گشتاور رلوکتانسی بدلیل تغییرات رلوکتانس فاصله‌ی هوایی و در نتیجه اختلاف قابل توجه بین اندازه‌ی اندوکتانس محور d و q سیم پیچی استاتور و شار نشتی ناشی از دفن شدن آهنرباها اشاره کرد. شار نشتی انتهایی آهنرباها سبب افزایش مواد مصرفی و درنتیجه کاهش چگالی توان موتور می شود. شکل ۳-۶-ج نمایی دو بعدی از ساختار دفنی شعاعی را نشان می دهد.

- **ساختار سطحی درونی:** در این ساختار آهنرباها بر روی سطح روتور دفن می شوند تا ساختار روتور از استحکام مکانیکی بالاتری نسبت به ساختار سطحی بیرونی برخوردار باشد. از جمله معایب این ساختار وجود گشتاور رلوکتانسی است. دلیل پیدایش گشتاور رلوکتانسی وجود تغییرات رلوکتانس فاصله‌ی هوایی و در نتیجه اختلاف قابل توجه بین اندازه‌ی اندوکتانس محور d و q سیم پیچی استاتور می باشد. شکل ۳-۶-د نمایی دو بعدی از ساختار سطحی درونی را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب بیان‌شده ساختار سطحی بیرونی بهترین عملکرد را در بین ساختارهای مختلف برای کاربردهای سرعت‌پایین را دارد. روتور موتور BLDC شامل هسته مغناطیسی مورق و تعدادی آهنربای دائم است که در ادامه به نحوه طراحی و انتخاب تعداد آنها پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۶-۶-۲- تعیین تعداد قطب (تعداد آهنربا) روتور

انتخاب تعداد قطب به تنهایی وابسته به پارامترهای زیادی همچون نوع و آرایش آهنربا، ساختار روتور (درونی یا بیرونی)، سرعت گردش، فرکانس، سرعت، گشتاور تولیدی، فضای محیطی محدود روتور و نیازمندی‌های اینرسی موتور است. سرعت مورد نیاز و فرکانس رابطه مستقیمی با تعداد قطب موتور دارند. در واقع این سه پارامتر مطابق رابطه ۵-۶ با یکدیگر ارتباط دارند:

$$\omega_m = \frac{۱۲۰ f_e}{P} \qquad ۶-۵$$

که در آن، f_e فرکانس الکتریکی و P تعداد جفت‌قطب روتور است. انتخاب تعداد قطب و سرعت باید با در نظر گرفتن این نکته که افزایش فرکانس موجب افزایش تلفات و ابعاد نیز می‌گردد، انجام گیرد. همچنین سرعت کلیدزنی حین کموتاسیون توسط ادوات الکترونیک قدرت را در سرعت ثابت نیز مرتبط با فرکانس الکتروموتور است. در واقع f_e طراحی مدار الکترونیک قدرت و قیمت آن را تعیین می‌کند. با افزایش فرکانس الکتریکی، ادوات الکترونیک قدرت باید با سرعت بیشتری عمل کلیدزنی را انجام دهند. بنابراین در طراحی درایو الکتروموتور، تعداد کمترِ آهنربا (قطب مغناطیسی) منجر به کاهش پیچیدگی درایو خواهد شد. از طرفی کاهش تعداد قطب‌های مغناطیسی منجر به کاهش گشتاور تولیدی نهایی خواهد شد، بنابراین ضروری است که تعداد قطب‌های مغناطیسی روتور با توجه به تجربه و سعی و خطا و مصالحه میان این دو پارامتر انتخاب گردد.

همچنین سیم‌پیچی استاتور با تعداد قطب پایین نیز منجر به افزایش کلگی[1] سیم‌پیچی، القای مغناطیسی در شفت و یاتاقان‌ها و همچنین نامتعادلی مغناطیسی می‌گردد. با افزایش تعداد قطب، پهنای یوغ و آهن پشتی و همچنین آمپر-هادی مورد نیاز به همان میزان کاهش یافته و اندوکتانس و راکتانس نشتی موتور را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان موتوری با ظرفیت اضافه بار و راندمان بیشتری داشت. هارمونیک‌های فضایی و همچنین نقاط تیز در موتور با تعداد قطب بالا، کمتر است بنابراین نویز و صدای موتور نیز کمتر می‌شود.

رابطه بین موقعیت زاویه‌ای مکانیکی و الکتریکی موتور بر حسب تعداد جفت قطب‌ها بصورت زیر است [۸۵]:

$$\theta_e = P\theta_m \qquad ۶-۶$$

این رابطه با تقسیم دو طرف به زمان و همچنین تقسیم نتیجه آن به رابطه $\frac{۲\pi}{۶۰}$ را می‌توان بر حسب سرعت زاویه‌ای و فرکانس نیز بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$\omega_e = P\omega_m \qquad ۶-۷$$

که در آن، با فرض رابطه فرکانس مکانیکی f_m به صورت $\frac{\omega_m}{۲\pi}$، می‌توان نوشت:

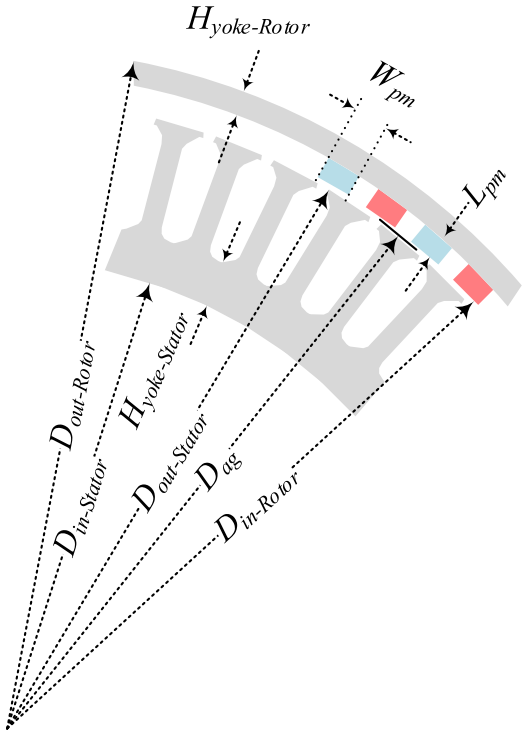
$$f_e = Pf_m \qquad ۶-۸$$

۶-۶-۳- تعیین ابعاد آهنربا

انتخاب طول آهنربا باید به گونه‌ای باشد تا فواصل میان آهنرباها کمتر بوده تا شار نشتی نیز کمتر باشد.

1- End winding

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۴-۶: نمایش ابعاد کلی الکتروموتور **BLDC** هدف طراحی

۶-۶-۴- تعیین قطر روتور و یوغ آن

روتور بیرونی همانطور که از اسم آن پیداست با رعایت فاصله هوایی بیرون‌تر از استاتور قرار دارد. تعیین قطر درونی روتور براساس تعداد قطب‌های مغناطیسی آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود، که در آن W_{pm} پهنای آهنربا است [۸۶].

$$D_{in-Rotor} = \frac{۲PW_{pm}}{\frac{۲}{۳}\pi} \qquad ۶-۹$$

از آهن پشتی یا یوغ[1] جهت متمرکز کردن شار مغناطیسی آهنربا استفاده می‌گردد. بنابراین قطر خارجی روتور را با در دست داشتن ارتفاع آهنربا (L_{pm}) و محاسبه ارتفاع یوغ ($H_{yoke\text{-}Rotor}$) می‌توان محاسبه نمود. شار مغناطیسی آهنربا (φ_{pm}) دو برابر شار عبوری از یوغ ($\varphi_{yoke\text{-}Rotor}$) است بنابراین می‌توان نوشت:

$$\varphi_{yoke-Rotor} = \frac{\varphi_{pm}}{۲} \rightarrow B_{yoke-Rotor}A_{yoke-Rotor} = \frac{B_{pm}A_{pm}}{۲} \rightarrow H_{yoke-Rotor} = \frac{B_{pm}L_{pm}}{۲B_{yoke-Rotor}} \qquad ۶-۱۰$$

که در آن B_{pm} و $B_{yoke\text{-}Rotor}$، به ترتیب چگالی نقطه کار آهنربا و یوغ می‌باشد. در نهایت با جمع ارتفاع آهنربا و ارتفاع یوک با قطر درونی روتور مطابق فرمول زیر می‌توان قطر خارجی را نیز محاسبه نمود:

$$D_{out-Rotor} = D_{in-Rotor} + ۲\times(L_{pm} + H_{yoke-Rotor}) \qquad ۶-۱۱$$

1- Back-iron or Yoke

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

٦-٧- طراحی استاتور

استاتور در موتور روتور بیرونی با رعایت فاصله‌ی هوایی داخل روتور قرار دارد. ساختار هسته استاتور به دلیل عبور جریان متناوب از آن به صورت مورق و شیاردار ساخته می‌شود که سیم‌پیچی درون این شیارها قرار می‌گیرند. در این بخش به طراحی و انتخاب ساختار کلی الکتروموتور پرداخته شده است. ولتاژ القائی توسط روتور در سیم‌پیچی از نوع متناوب است و به همین دلیل هسته استاتور به منظور کاهش اثر سوء جریان‌های گردابی و تلفات ناشی از آن، به صورت مورق ساخته می‌شود. ورقه‌های مورد نظر باید تا جای ممکن با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی آن، نازک باشند. تکنولوژی خاص کاهش ضخامت ورقه‌ها، موجب افزایش قیمت هسته و به تبع الکتروموتور می‌گردد. همچنین جهت کاهش تلفات آهن موتور شایسته است که حتی المقدور از ورقه‌های فولادی با درصد محدودی از سیلیسیم و درصد کربن پایین استفاده گردد. مسائل مربوط به ترکیب ورقه‌ها به طور کامل در مرحله اول پروژه شرح داده شده است. ورقه انتخابی در طراحی هسته استاتور موتورِ مد نظر این پروژه، ورقه کربنی ساخت شرکت فولاد مبارکه اصفهان است که حرارت‌دهی شده، بطوری که ناخالصی کربنی آن به سطح ورق آمده و به عنوان روکش عایق نیز عمل می‌کند.

٦-٧-١- تعداد فاز استاتور

موتورهای BLDC معمولا سه‌فاز هستند اما موتورهای BLDC تکفاز، دوفاز و چهارفاز نیز در مواردی طراحی و ساخته می‌شوند. موتور چهارفاز معمولا به منظور افزایش مقاومت به خطاهای احتمالی در سیم‌پیچی و موتور دوفاز برای کاربردهای با توان پایین مثل فن‌های کوچک کاربرد دارد. در موتور BLDC تکفاز گشتاور در هر ۱۸۰ درجه یا نیم سیکل، از نقطه صفر عبور می‌کند. بنابر این درصورتی که به طور اتفاقی عبور از صفر گشتاور با استراحت مقطعی موتور همزمان گردد، موتور مجددا راه‌اندازی نشده و نیاز به استفاده از تکنیک شیفت فاز گشتاور خواهد بود. در الکتروموتور BLDC سه‌فاز، فرآیند کنترل، ساده و مشخصه راه‌اندازی، بسیار خوب و نرم در هر دو جهت حرکتی است و ریپل گشتاور آن نیز بسیار پایین می‌باشد. جهت راه‌اندازی موتور BLDC سه‌فاز و ایجاد عدم تقارن در گشتاور راه‌اندازی، به ترتیب دو فاز از سه فاز در هر سیکل، برق‌دار می‌شود.

٦-٧-٢- انتخاب تعداد شیار استاتور

انتخاب تعداد شیار موتور (N_s) وابسته به تعداد قطب‌ها است. در واقع نسبت تعداد شیار به جفت‌قطب، مستقیما بر روی پارامترهای اساسی موتور مانند آرایش سیم‌پیچی، هارمونیک‌های فضایی و بطور غیر مستقیم بر روی اندوکتانس موتور، تلفات گردابی و گشتاور دندانه[1] نیز تاثیرگذار است. بنابراین برای دست یافتن به یک سیم‌پیچی ممکن و قابل انجام و کاهش هارمونیک‌های فضایی و کنترل منطقی دیگر پارامترها لازم است که نسبت معقولی بین تعداد شیار و قطب رعایت گردد. تعداد شیار بر قطب برای یک موتور سه فاز BLDC بهتر است حداقل ۰/۵ یا بیشتر و تعداد شیار بر قطب بر فاز (q) کمتر از ۱ باشد [۸۱] به طوریکه تعداد قطب همواره زوج و تعداد شیار ترجیحا ضریبی از عدد ۳ باشد (در این صورت بهتر است که تعداد قطب به ۳ قابل تقسیم نباشد).

$$q = \frac{N_s}{N_{ph} \times ۲P} \qquad ۶-۱۲$$

به دلیل پدید آمدن برخی گشتاورهای دندانه‌ای، استفاده از تعداد شیارهای زیر برای استاتور نسبت به تعداد شیار

1- Cogging torque

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

یا قطب روتور ممنوع است:

$$\frac{۲P}{N_s} \neq \text{عدد صحیح}$$

$$N_s - ۲P \neq \pm ۱, \pm ۲, \pm ۳, \pm ۲P, \pm ۴P, \pm ۶P, \pm (۲P+۱)$$

با افزایش تعداد شیارها، ضریب فضای شیارها کمتر شده و لذا حد بالایی برای تعداد شیارها وجود دارد که بستگی به اندازه ورق دارد. تعداد کم شیارها، هزینه سیم‌پیچی را کاهش داده و ضریب فضا را بهتر خواهد کرد و افزایش تعداد شیار، اعوجاج گشتاور و در نتیجه ارتعاشات و صدای موتور را کاهش می‌دهد. با توجه به همه این توضیحات تعداد شیار و قطب استاتور با مصالحه میان تمامی موارد ذکرشده انتخاب خواهد شد.

٦-٧-٣- فاصله هوایی

مقدار فاصله هوایی مقداری نسبتا انتخابی است که باید با توجه به ملاحظاتی انجام گیرد. از جمله این ملاحظات می‌توان به اندازه ریپل گشتاور، احتمال سایش و ناهم‌محوری و همچنین افزایش جریان مورد نیاز برای ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی اشاره نمود. در صورتی که فاصله هوایی خیلی کم باشد، احتمال سایش هسته روتور و استاتور و حتی سیم‌پیچی و آهنرباها به یکدیگر وجود خواهد داشت که خود منجر به صدمات مکانیکی و الکتریکی و یا ناهم-محوری می‌گردد. ساخت و یکنواختی سطوح استاتور و روتور با دقت بالا در صورتی که فاصله هوایی خیلی کم باشد، دشوار هست. افزایش منطقی فاصله هوایی اعوجاج، ریپل گشتاور و در نهایت صدای کارکرد کمتری را در بر دارد؛ اما در صورتی که افزایش فاصله هوایی زیاد و غیرمنطقی باشد، رلوکتانس فاصله‌ی هوایی بیشتر شده و در نتیجه آهنربای قوی‌تری را جهت تولید گشتاور می‌طلبد.

تجربه نشان می‌دهد که فاصله‌ی هوایی در موتورهای BLDC بهتر است از ۰/۴ میلی‌متر کمتر و از ۱ میلی‌متر بیشتر نباشد [۸۱]. با این حال با توجه به قدرت تولید گشتاور پایین آهنربای فریت بهتر است گشتاور حاصل از فاصله هوایی انتخابی، توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری چک شود.

٦-٧-٤- قطر بیرونی استاتور

قطر بیرونی استاتور که محل تماس یوغ آن با فاصله هوایی است از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸۶]:

$$D_{Out-Stator} = D_{in-Rotor} - ۲L_{ag} \qquad ۶-۱۳$$

$$D_{ag} = (D_{Out-Stator} + D_{in-Rotor}) / ۲ \qquad ۶-۱۴$$

که در آن $D_{in\text{-}Rotor}$ قطر درونی روتور و L_{ag} فاصله هوایی انتخابی از مرحله قبل است.

٦-٧-٥- محاسبه یوغ استاتور

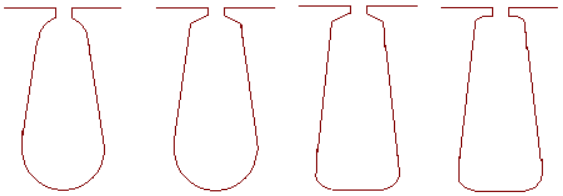
ارتفاع یوغ استاتور با توجه به عبور بخش اعظمی از شار مغناطیسی روتور را می‌توان برابر ارتفاع یوغ روتور در نظر گرفت.

$$H_{yoke-Stator} = H_{yoke-Rotor} \qquad ۶-۱۵$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

٦-٧-٦- شکل شیارهای استاتور

انتخاب شکل شیار، علاوه بر تعیین فضای کافی برای تعداد دور و تعداد پیچک‌های سیم‌پیچی، بر شکل دندانه و در نتیجه بر راکتانس نشتی و در نتیجه راندمان موتور تاثیرگذار است. متمرکز کردن تمامی شار به مسیرهای مفید تقریبا غیرممکن (شکفتگی شار) و همواره با مقادیری از شار نشتی همراه است که باعث افزایش راکتانس نشتی و در نتیجه افت ولتاژ و راندمان می‌گردد. شکل شیارهای متداول در شکل ۵-۶ نشان داده شده است:



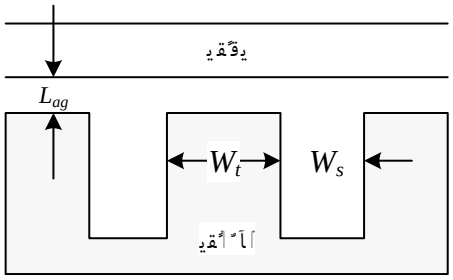
(۱) (۲) (۳) (۴)

شکل ۵-۶: انواع شکل شیار استاتور ماشین‌های الکتریکی

انتخاب شکل شیار معمولا بر اساس کمترین راکتانس نشتی منتجه انجام می‌گردد. محاسبات انجام‌شده برای اندوکتانس انواع شکل شیار، حاکی از آن است که شیارهای پهن، کم‌عمق و با دهانه گردتر[۱]، کمترین راکتانس نشتی و در نتیجه بیشترین راندمان را نتیجه می‌دهند؛ این در حالی است که پهنای شیارِ بیش از اندازه، پهنای دندانه را کاهش داده و در نتیجه دندانه زودتر اشباع می‌شود [۸۳]. بطور کلی می‌توان گفت که شیار بسیار عمیق شار نشتی زیاد و شیار بسیار پهن منجر به اشباع سریع می‌گردد. عامل موثر در انتخاب شیار پس از راندمان، گشتاور دندانه موتور است. جهت کاهش گشتاور دندانه نیز بهتر است شیار دهانه بازتری داشته باشد. با توجه به این تفاسیر، شیار شماره ۱ در مطالعه حاضر بکار گرفته شده است. پهنای دهانه شیار باید به قدری باز باشد تا ورود سیم و مونتاژ آن ممکن گردد.

٦-٧-٧- محاسبات مربوط به ابعاد شیار

محاسبه ابعاد شیار جهت سادگی کار با فرض مستطیلی بودن شیار انجام می‌شود. شکل ۶-۶ شمای کلی بخشی از شیارهای استاتور و فاصله هوایی و نمادهای انتخابی را نمایش می‌دهد:



شکل ۶-۶: شمای تقریبی شیار و دندانه استاتور و فاصله هوایی

۱- ایجاد زاویه در دهانه شیار موجب افزایش اندوکتانس نشتی در این ناحیه می‌گردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

با توجه به اینکه شار مغناطیسی عبوری از فاصله هوایی (φ_{ag}) و هسته استاتور (φ_{tooth}) یکسان است، می‌توان نوشت:

$$\varphi_{ag} = \varphi_{tooth} \rightarrow B_{ag}\pi D_{ag}L = B_t W_t L N_s \qquad ۶-۱۶$$

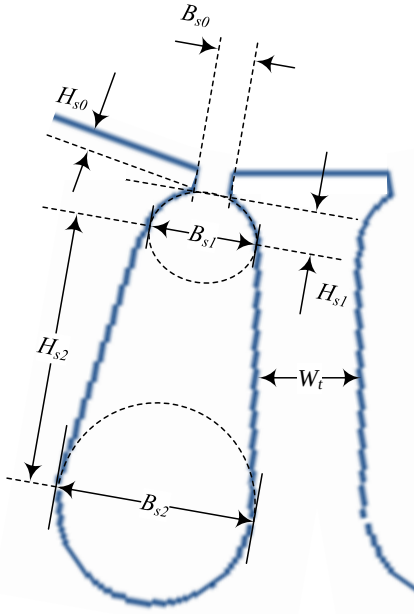
بنابراین عرض دندانه برابر است با:

$$W_t = \frac{B_{ag}\pi D_{ag}L}{B_t L N_s} \qquad ۶-۱۷$$

که در آن W_t، W_s، B_t و B_{ag} به ترتیب عرض دندانه استاتور، عرض شیار استاتور، چگالی شار دندانه استاتور و چگالی شار فاصله هوایی است. شیار و دندانه درست کنار یکدیگر قرار دارند بنابراین برای محاسبه عرض شیار کافی است محیط روتور به ازای هر شیار، از عرض شیار کم گردد:

$$W_s = \frac{\pi D_{ag}}{N_s} - W_t \qquad ۶-۱۸$$

شار مغناطیسی همواره کاملا از دندانه عبور نکرده و دارای شکفتگی است. شکل ۶-۷ پارامترهای ابعادی دقیق شیار را نشان می‌دهد:



شکل ۶-۷: پارامترهای ابعادی دقیق شکل شیار انتخابی

عرض دهانه شیار B_{s0} بستگی به قطر سیم دارد هر چند با بزرگ در نظر گرفتن آن نشت شار کمتر خواهد بود [۸۳]. H_{s1} یا ارتفاع بالای قوس شیار معمولا نصف عرض بالای شیار یا B_{s1} است:

$$H_{s1} = \frac{B_{s1}}{2} \qquad ۶-۱۹$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

عرض بالای شیار را می‌توان با کسر عرض دندانه از محیط استاتور به ازای هر شیار به صورت زیر به دست آورد:

$$B_{s1} = \frac{\pi(D_{out-Stator} - H_{s1} - H_{s2})}{N_s} - W_t \qquad ۶-۲۰$$

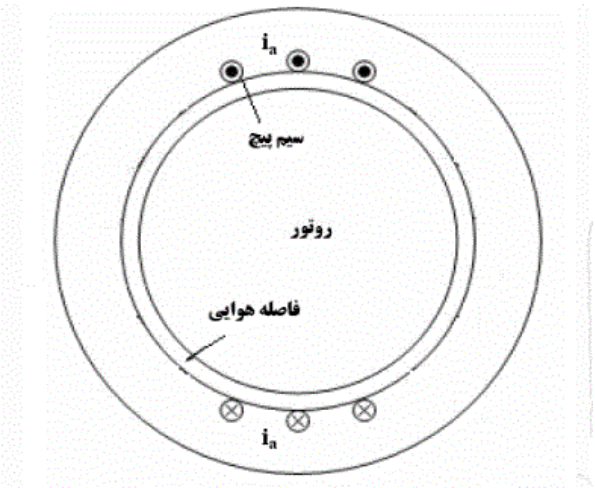
در نهایت برای محاسبه عمق کل شیار نیاز به تعیین قطر سیم مورد استفاده است. همچنین قطر سیم متناسب با جریان موثر عبوری از هر فاز موتور و دامنه‌ی موثر ولتاژ آن است.

٦-٧-٨- سیم‌پیچی استاتور

سیم‌پیچی در شیارهای استاتور به منظور ایجاد قطب‌های مغناطیسی، انجام گرفته که معمولا در موتورهای BLDC، فازهای استاتور به صورت ستاره به یکدیگر متصل شده و هر کدام از تعداد زیادی پیچک با تعداد دور برابر تشکیل می‌شوند. توزیع سیم‌پیچی استاتور در بیشتر کاربردهای موتوری به گونه است که ولتاژ القائی سینوسی خواهد بود؛ در حالیکه این سیم‌پیچی در موتورهای BLDC از نوع متمرکز بوده و منجر به القای ولتاژ mmf[1] و emf[2] منتجه ذوزنقه‌ای می‌گردد. از مزایای ولتاژ ذوزنقه‌ای می‌توان به mmf تولیدی بیشتر اشاره نمود. در شرایط برابر با تعداد دور و جریان سیم‌پیچی یکسان، mmf تولیدی ماشین BLDC با تحریک ذوزنقه‌ای ۲۷٪ بیشتر از ماشین با تحریک سینوسی است [۸۷]. در ادامه این بخش به شرح و نحوه انتخاب نوع و تعداد لایه‌های سیم‌پیچی پرداخته خواهد شد.

- نوع سیم‌پیچی

همانطور که پیش‌تر بحث شد، استاتور موتورهای BLDC داری ولتاژ تحریک و ولتاژ برگشتی[۳] ذوزنقه‌ای است. در ماشین‌های BLDC بر خلاف BLAC یا همان موتور سنکرون آهنربای دائم از سیم‌پیچی نوع متمرکز استفاده می‌گردد.



1- Magneto motive force
2- Electro motive force

۳- ولتاژ برگشتی در اثر چرخش موتور بوجود آمده و پلاریته آن مخالف با جهت ولتاژ تحریک سیم‌پیچی‌ها است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

با سیم‌پیچی متمرکز و شار ذوزنقه‌ای [۷۸]**BLDC**شکل ۸-۶: موتور

علت اصلی استفاده از سیم‌پیچی متمرکز در موتورهای BLDC، سهولت انجام آن در موتورهای با روتور بیرونی است؛ در واقع چون دهانه شیار استاتور رو به بیرون است، سیم‌پیچی آسان‌تر و میزان مس مصرفی در آن کمتر است[۱]. همچنین دور هر دندانه استاتور یک پیچک قرار می‌گیرد و هر شیار دارای یک پیچک و هر پیچک یک قطب مغناطیسی را ایجاد می‌کند که در نهایت مجموع برداری تمامی mmfهای ناشی از هر پیچک، mmf منتجه صاف‌تری را در هر فاز در اختیار می‌گذارد. شکل ۸-۶ توزیع نمادین پیچک‌های هر فاز و mmf منتجه آن را نمایش می‌دهد.

- تعداد لایه‌های سیم‌پیچی

در طراحی الکتروموتور دوچرخه برقی از این نوع سیم‌پیچی به صورت دولایه استفاده می‌گردد که از مزایای آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. می‌توان گام پیچک را به هر تعداد شیار کوتاه نمود. در نتیجه موج ولتاژ بهتر و میدان مغناطیسی صاف‌تر خواهد بود [۸۸].
۲. تمامی پیچک‌ها گام مساوی داشته و بنابراین ساخت آن‌ها آسان خواهد بود [۸۸].
۳. عدم وجود اندوکتانس متقابل میان فازها که خود منجر به افزایش مقاومت موتور نسبت به خطا می‌گردد.
۴. گشتاور دندانه کم [۸۷]
۵. عدم وجود کلگی زیاد در سیم‌پیچی که منجر به استفاده کمتر از مس و تلفات آن می‌گردد [۸۷].
۶. اندوکتانس محور مستقیم (L_d) برای هر فاز پایین بوده و موجب کاهش نیاز به جریان مغناطیس‌کننده می‌گردد. این ویژگی گستره تضعیف شار را برای کاربرد وسایل نقلیه افزایش می‌دهد [۸۷].

- محاسبه ولتاژ و جریان موثر سیم‌پیچی استاتور

با توجه به اینکه ولتاژ استاتور ذوزنقه‌ای است، مقدار ولتاژ موثری که در تولید توان شرکت می‌کند، ۱۲۰ درجه الکتریکی و از درجه ۳۰ الی ۱۵۰ درجه الکتریکی بصورت زیر محاسبه می‌شود [۸۹]:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} E_a^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}}E_m \qquad ۶-۲۱$$

که در آن E_m دامنه حداکثر ولتاژ الکتروموتور است.

- محاسبه قطر سیم مصرفی

۱- کلگی سیم‌پیچی در نوع متمرکز کمتر از نوع گسترده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

با در دست داشتن جریان موتور امکان محاسبه قطر سیم مورد نیاز از طریق رابطه زیر امکان‌پذیر است:

$$j = \frac{I_{rms}}{A_{cu}} \rightarrow A_{cu} = \frac{I_{rms}}{j} \qquad ۶-۲۲$$

که در آن j چگالی جریان سیم‌پیچی موتور و A_{cu} سطح مقطع سیم است. جهت عدم نیاز به سیستم خنک‌ساز لازم است که چگالی جریان کمتر از ۶ آمپر بر میلی‌متر مربع در نظر گرفته شود. قطر سیم از طریق فرمول مساحت دایره به شکل زیر است [۸۵]:

$$D_{cu} = \sqrt{\frac{۴}{\pi} A_{cu}} \qquad ۶-۲۳$$

- محاسبه تعداد دور سیم‌پیچی

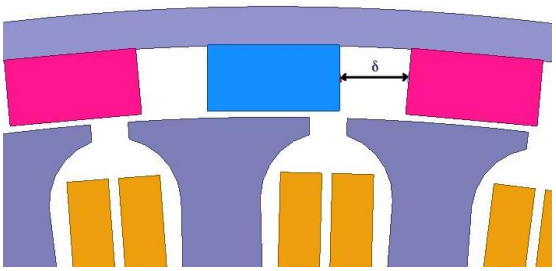
تعداد دور مورد نیاز سیم‌پیچی از فرمول ولتاژ موتور BLDC قابل محاسبه است [۸۵]:

$$E_{rms} = \frac{۱}{\sqrt{۲}} K_W N D_{ag} L \omega_m F_{PM۱} P_{ag} \qquad ۶-۲۴$$

پارامترهای F_{PM1}، P_{ag}، ω_m، N و K_w به‌ترتیب معرف هارمونیک اول نیروی محرکه مغناطیسی آهنرباهای دائمی روتور در فاصله هوایی، متوسط پرمانس فاصله هوایی، اندازه سرعت زاویه‌ای نامی موتور، تعداد دور سیم‌پیچی هرکدام از فازهای موتور و ضریب سیم‌پیچی استاتور می‌باشند. با توجه به نحوه قرار دادن آهنرباهای دائمی بر روی روتور، می‌توان پارامتر F_{PM1} را از رابطه زیر تخمین زد [۹۰]:

$$F_{PM۱} = \frac{۲}{\pi} \int_{\frac{\delta}{۲}}^{\pi - \frac{\delta}{۲}} F_{PM} \sin\theta d\theta = \frac{۴ B_{pm} L_{pm}}{\pi \mu_r \mu_۰} \cos(\frac{\delta}{۲}) \qquad ۶-۲۵$$

بطوریکه در این رابطه، پارامتر B_{PM} چگالی شار نقطه کار آهنربای دائمی، F_{PM} نیروی‌محرکه مغناطیسی آهنرباهای دائمی روتور در فاصله هوایی و μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در آهنربا می‌باشد. همچنین همانطورکه در شکل ۶-۹ نشان داده شده است، δ فاصله بین دو آهنربا می‌باشد. در بخش‌های قبل بیان شد که استفاده از فاصله بین آهنرباها سبب کاهش شار نشتی و مصرف آهنربا می‌شود.



شکل ۶-۹: نحوه قرارگیری آهنرباها بر روی روتور

برای تخمین پارامتر B_{pm} می‌توان از قانون گوس و قانون آمپر استفاده کرد. در ساختار موتور پیشنهاد شده، می‌توان

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

قانون آمپر را در حالت بی‌باری بصورت رابطه زیر تعریف کرد [۹۰]:

$$۲L_{ag}H_{ag}+۲H_{pm}L_{PM}=۰\Rightarrow H_{pm}=-\frac{L_{ag}H_{ag}}{L_{PM}} \qquad ۶-۲۶$$

$$B_{pm}=B_r+\mu_0\mu_r H_{pm}\xrightarrow{H_{pm}=-\frac{L_{ag}H_{ag}}{L_{pm}}}B_{pm}=B_r-\mu_0\mu_r\frac{L_{ag}}{L_{pm}}H_{ag}\xrightarrow{\mu_0H_{ag}=B_{ag(\max)}} \qquad ۶-۲۷$$

$$B_{pm}=B_r-\mu_r\frac{L_{ag}}{L_{pm}}B_{ag(\max)}$$

پارامترهای H_{ag} و H_{pm} بترتیب معرف شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی و شدت میدان مغناطیسی در آهنربای دائمی را نشان می‌دهند. پرمانس فاصله هوایی با استفاده از روش‌های تطبیقی[1] از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹۱]:

$$P_{ag}=\frac{\mu_o}{L_{ag-total}}(۱-۱.۶\beta C_o) \qquad ۶-۲۸$$

که در آن $L_{ag\text{-}total}$، اصطلاحا مجموع فاصله هوایی (مجموع طول فاصله هوایی و مگنت، بدلیل نفوذپذیری مغناطیسی یکسان) و عرض آهنربا، β ضریب کارتر[2] و C_0 نسبت دهانه شیار به گام شیار است. ضریب کارتر را برای یک ماشین آهنربای دائم می‌توان از طریق رابطه زیر حساب کرد [۹۱]:

$$\beta=\frac{۱}{۲}\left[۱-\left[۱+\left(\frac{B_{s۱}}{۲L_{ag-total}}\right)^{۲}\right]^{-\frac{۱}{۲}}\right] \qquad ۶-۲۹$$

همچنین C_0 به طریق زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_0=\frac{B_{s1}}{W_t+B_{s1}} \qquad ۶-۳۰$$

در نهایت با محاسبه‌ی P_{ag} از طریق این دو پارامتر، می‌توان تعداد دور مورد نیاز سیم‌پیچی را حساب نمود.

۶-۸- جمع‌بندی

طراحی الکتروموتور BLDC بر مبنای الگوریتم می‌باشد. در این فصل به الگوریتم طراحی، محدودیت‌های طراحی الکتروموتور هدف، تعیین ساختار الکتروموتور به لحاظ محل قرارگیری روتور و بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی آن پرداخته شده است. طراحی الکتروموتور به دو بخش اصلی طراحی روتور و طراحی استاتور تقسیم می‌شود. در طراحی روتور به موارد مد نظر زیر باید توجه نمود: آرایش و شکل آهنرباها بر روی روتور، تعداد قطب (تعداد آهنرباها) روتور، ابعاد آهنرباها و قطر روتور و یوغ آن. در طراحی استاتور نیز موارد از قبیل تعداد فاز استاتور، تعداد شیار استاتور، فاصله

1- Conformal Mapping
2- Carter’s coefficient

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

هوایی، قطر بیرونی استاتور، یوغ استاتور، شکل شیارهای استاتور، محاسبات مربوط به ابعاد شیار و سیم پیچی استاتور مد نظر است. در این فصل تلاش بر پوشش این مطالب به منظور تشریح بهتر روند طراحی بوده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۷- طراحی، شبیه سازی و تحلیل یک نمونه ۵۰۰ واتی الکتروموتور BLDC

۷-۱- مقدمه

پس از بررسی پارامترها و استخراج الگوریتم طراحی الکتروموتور BLDC و مدل‌سازی ریاضی آن در فصل قبل، در این فصل به طراحی مفهومی الکتروموتور مورد نظر و سپس طراحی تفصیلی، بهینه سازی و تحلیل عددی آن پرداخته می‌شود.

۷-۲- طراحی مفهومی الکتروموتور BLDC ۵۰۰واتی

برای طراحی اولیه موتور BLDC، نیاز است ابتدا گشتاور مورد نیاز و حداکثر شیب قابل پیمایش با مدل کردن بار دوچرخه مشخص شود، که در گزارش مرحله اول، این موارد با توجه به ملزومات بار، مشخص شده‌اند. سپس توان و سرعت نامی موتور مشخص شده و به طراحی هر بخش از الکتروموتور پرداخته شود.

در طراحی موتور دوچرخه محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که همان مشخصات خروجی و ابعاد فیزیکی موتور هستند و به عنوان مبنای اصلی طراحی مدنظر قرار می‌گیرند. برخی ازین محدودیت‌ها ذاتی، برخی بدلیل کاربرد خاص دوچرخه و برخی به علت محدودیت‌های موجود در مواد و ... دارای بازه تغییرات محدودی هستند. برخی از قیود و محدودیت‌ها مربوط به محدودیت‌های طراحی و برخی دیگر توسط سفارش مشتری مشخص می‌شوند. در ادامه برخی از قیود و محدودیت‌ها ذکر شده‌اند:

- محدودیت انتخاب جنس هسته و چگالی شار در هسته
- محدودیت انتخاب جنس و شکل آهنربای دائمی
- محدودیت طول فاصله هوایی
- محدودیت قطر خارجی
- محدودیت طول محوری
- محدودیت ولتاژ ورودی

یکی از شروط ذکرشده، محدودیت جنس و شکل آهنربای دائمی است که جزو محدودیت‌های مکانیکی محسوب می‌شود. در این طراحی از آهنربای نوع فریت و از آهنرباهای دائمی مکعب مستطیل به‌جای آهنرباهای دائمی قوس‌دار در ساختار روتور استفاده شده است. از آنجائیکه ساختار موتور پیشنهادی از نوع روتور بیرونی و نصب آهنرباها از نوع ساختار سطحی بیرونی بوده و همچنین از آهنربای معمولی بدون قوس بدلیل سادگی در ساخت و هزینه کم آن استفاده می‌شود، بهتر است تا تعداد قطب‌های موتور بالا در نظر گرفته شود. همچنین یکی دیگر از محدودیت‌های ذکر شده در جدول ۱-۷ چگالی شار در هسته است که توسط جنس هسته محدود می‌شود. در اینجا از ورق‌های تولید شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

توسط شرکت فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است و بر طبق نتایج تست اپشتاین در سه فرکانس مختلف حداکثر چگالی شار در هسته برابر با ۱/۷ تسلا در نظر گرفته شده است. از دیگر محدودیت‌های ذکرشده طول فاصله هوایی است، که از نظر مکانیکی و به جهت ساخت ساده‌تر طول فاصله هوایی کمتر از ۰/۴ میلیمتر در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین با افزایش طول فاصل هوایی مقدار گشتاور خروجی کاهش می‌یابد. در جدول ۱-۷ محدودیت‌های طراحی ذکر شده‌اند:

جدول ۱-۷: محدودیت‌های طراحی موتور

قیود طراحی	مقدار
طول محوری	کمتر از ۳۰ میلی‌متر
قطر خارجی	کمتر از۳۶۰ میلی‌متر
ولتاژ باتری	۳۶ ولت
فاصله هوایی	۰/۴ تا ۱/۵ میلی‌متر
چگالی شار در هسته	کمتر از ۱/۷ تسلا

۱-۲-۷- گشتاور نامی الکتروموتور

برای محاسبه گشتاور ماکزیمم موتور باید از حداکثر شیب قابل پیمایش درنظر گرفته شده برای دوچرخه استفاده شود. انتخاب موتور باید بر اساس مقدار گشتاور متوسط انجام گیرد و گشتاور ماکزیمم برای موتور باید به صورت گذرا قابل تأمین باشد. که این موارد در فصل اول گزراش، بررسی و گشتاور نامی موتور مورد نظر برابر با ۳۰ نیوتون‌متر و حداکثر شیب قابل پیمایش برابر با ۴ درجه درنظر گرفته شده است.

۲-۲-۷- سرعت نامی الکتروموتور

با توجه به مطالعاتی که بر روی دوچرخه‌های برقی صورت گرفته است و همچنین مطابق با استانداردها، سرعت حداکثری۳۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت نامی۲۰ کیلومتر بر ساعت (با توجه به گشتاور نامی ۳۰ نیوتن‌متر و توان ۵۰۰ واتی الکتروموتور) به عنوان اهداف طراحی در نظر گرفته شده‌اند. دست‌یابی به سرعت نامی ۲۰ کیلومتر بر ساعت در مرحله طراحی موتور و حداکثر سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت توسط درایو و با تضعیف شار امکان‌پذیر خواهد بود. این موتور در دوچرخه با سایز چرخ ۲۶ اینچ با قطر برابر با ۶۶/۰۴ سانتی‌متر استفاده می‌شود، لذا برای محاسبه سرعت موتور بر طبق روابط ۱-۷ و ۲-۷ ابتدا سرعت زاویه‌ای موتور بر حسب رادیان بر ثانیه و سپس بر حسب دور در دقیقه محاسبه خواهد شد.

$$n = \frac{v_n}{r_w} = \frac{۲۰}{۰.۳۳۰۲ \times ۳.۶} = ۱۶.۸۲ \ rad/s \qquad ۷-۱$$

$$n = \frac{۲\omega_m \pi}{۶۰} \rightarrow \omega_m = \frac{۳۰ n}{\pi} = ۱۶۰ \ rpm \qquad ۷-۲$$

در روابط بالا n، v_n و r_w به ترتیب معرف سرعت زاویه‌ای نامی موتور بر حسب رادیان بر ثانیه، سرعت خطی نامی برحسب متر بر ثانیه و شعاع چرخ دوچرخه بر حسب متر می‌باشد. با توجه به محاسبات بالا سرعت نامی موتور(ω) ۱۶۰ دور در دقیقه انتخاب شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۷-۲-۳- نوع سیم‌پیچی

یکی از مسائل اصلی در طراحی موتور انتخاب نوع سیم‌پیچی است. سیم‌پیچی فازها در یک ماشین سنکرون باید به گونه‌ای انجام شود که ولتاژ القایی در تمامی فازها و در تمامی کلاف‌ها، دارای اندازه و فرکانس برابری باشد. ولتاژهای القایی باید شکل موج یکسان داشته و نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند. سیم‌پیچی را می‌توان به صورت تک‌لایه و یا دولایه اجرا نمود. سیم‌پیچی های دولایه معمولا دارای اتصالات انتهایی ساده‌تری هستند و ساخت ماشین‌های الکتریکی با استفاده از سیم‌پیچی دولایه اقتصادی‌تر است [۹۲]. نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور ساختار روتور بیرونی بسیار ساده‌تر از سیم‌پیچی استاتور ساختار روتور درونی می‌باشد زیرا دهانه شیار استاتور به سمت بیرون است. همچنین استفاده از سیم‌پیچی متمرکز در ساختار استاتور باعث صرفه‌جویی در مصرف مس می‌شود، زیرا حجم انتهای کلاف سیم‌پیچی در حالت متمرکز خیلی کمتر از حالت توزیع‌شده می‌باشد.

از بین دو نوع سیم‌پیچی دوردندانه‌ای و یا سیم‌پیچی توزیع شده نوع دوم ضریب سیم‌پیچی بالاتر و در نتیجه دارای گشتاور خروجی بیشتری با تعداد دور کمتر هستند. از طرفی سیم‌پیچی نوع اول نیز دارای طول محوری کوتاه‌تری است. نهایتا برای کاربرد در دوچرخه برقی، سیم‌پیچی دوردندانه‌ای به دلیل نیاز به طراحی ظریف‌تر و دقیق‌تر آن انتخاب می‌شود [۹۳]. همچنین به جهت کاهش طول انتهای سیم‌پیچی و کاهش تلفات مسی از سیم‌بندی دو لایه که اطراف سه دندانه‌ی مجاور با جهت‌های متفاوت پیچیده شده‌اند، استفاده شده است [۹۴].

۷-۲-٤- انتخاب تعداد قطب و شیار مناسب

تعیین تعداد جفت قطب (P) و شیار (N_s) به عوامل مختلفی بستگی دارد. به دلیل اینکه موتور طراحی از نوع سه‌فاز انتخاب شده است، تعداد شیارها همواره مضربی از عدد ۳ می‌باشد. در طراحی موتورهای الکتریکی انتخاب تعداد قطب بالاتر موجب تعداد دور کمتر در هر شیار و کاهش مصرف مس و آهن می‌شود. از طرفی کاهش تعداد دور منجر به کاهش مقاومت سیم‌پیچی و در نتیجه کاهش تلفات مسی می‌شود. انتخاب تعداد قطب و شیار مناسب در میزان تولید گشتاور دندانه‌ای بسیار موثر است. کاهش گشتاور دندانه‌ای موجب عملکرد نرم‌تر موتور می‌شود. با توجه به اینکه گشتاور دندانه‌ای از برهم کنش میدان آهنرباهای دائمی و دندانه‌های استاتور حاصل می‌شود، لذا اندازه دامنه و فرکانس آن نیز وابسته به تعداد شیار در زیر هر قطب است. موتورهایی که دارای نسبت تعداد شیار در هر قطب درهر فاز برابر با ۱ یا بیشتر از ۱ هستند، بیشترین میزان دامنه گشتاور دندانه‌ای را دارند. با کاهش این نسبت دامنه گشتاور دندانه‌ای کاهش یافته و فرکانس آن افزایش می‌یابد. با انتخاب مناسب تعداد جفت قطب (P) و شیار (N_s) مقدار تعداد شیاردر زیر هر قطب در هر فاز ($N_s/2P/N_{ph}$) عددی کمتر از ۱ به دست آمده و هرچه این مقدار کوچکتر باشد، عملکرد موتور بهتر و گشتاور دندانه‌ای مقدار کمتری خواهد داشت [۹۳-۹۵]. تعیین تعداد شیارهای استاتور به تعداد قطب‌های موتور و نیز به تعداد شیارهایی که برای هر فاز در زیر هر قطب در نظر گرفته می‌شود، وابسته است. تعداد شیارهای استاتور به طور مستقیم بر هزینه و عملکرد ماشین تاثیرگذار است. بالا بودن تعداد شیارهای استاتور مزایا و معایب زیر را به همراه دارد [۹۶]:

- کاهش راکتانس نشتی
- توزیع حرارتی بهتر
- کاهش گشتاور دندانه‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- هزینه‌ی بالاتر
- افزایش چگالی شار در دندانه‌ها

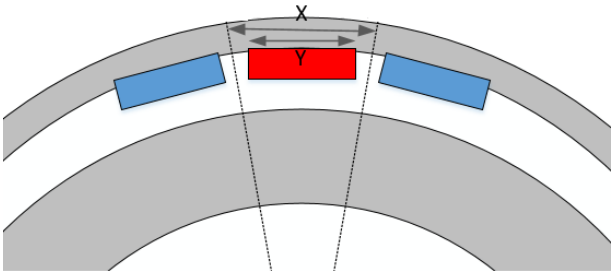
همانطور که در مطالب قبلی بیان شد، گشتاور دندانه‌ای مرتبط با آهنربای دائمی است. پارامتری که ارتباط میان گشتاور دندانه‌ای با تعداد قطب و شیار را نشان می‌دهد $LCM\ (2P\ ,\ N_S)$[1] تعریف شده است. فرکانس گشتاور دندانه‌ای برابر با کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب و شیار است و با انتخاب فرکانس گشتاور دندانه‌ای بالاتر، مقدار دامنه آن کاهش می‌یابد. در نتیجه در انتخاب تعداد قطب و شیار مناسب ترکیبی انتخاب می‌شود که مقدار LCM آن بزرگتر باشد [۹۷, ۹۸]. با توجه به محدودیت‌های قطر داخلی روتور، از بین تمام ترکیب‌های ممکن ترکیب ۶۳ شیار و ۷۰ قطب با LCM برابر با ۶۳۰ و با در نظر گرفتن سیم‌پیچی دور دندانه‌ای به دلیل کاهش مصرف مس، انتخاب شده است. انتخاب تعداد شیار بیشتر باعث کاهش مساحت شیار شده و برای موتور طراحی شده مناسب نیست. همچنین تعداد قطب هرچه بیشتر باشد امکان استفاده از آهنربا با شکل مستطیلی فراهم می‌شود و همچنین چگالی شار بیشتری در فاصله هوایی وجود خواهد داشت. در طراحی اولیه ابعاد ماشین از ساختار آهنربای مستطیلی با ابعاد ۱۰×۵ میلی‌متر، همانند نمونه‌های موجود در بازار استفاده شده است. حال با توجه به تعیین ملاحظات طراحی، نوبت به طراحی ابعاد روتور و استاتور موتور BLDC می‌رسد که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است.

۵-۲-۷- طراحی ابعاد روتور

برای طراحی روتور اولین گام تعیین قطر داخلی ($D_{in\text{-}rotor}$) و قطر خارجی ($D_{out\text{-}rotor}$) آن می‌باشد. از آنجائیکه ساختار موتور پیشنهادی از نوع روتور بیرونی می‌باشد، پس انتظار می‌رود ابعاد روتور بیرونی بزرگتر از روتور درونی انتخاب شود. همچنین با توجه به محدودیت‌های قطر خارجی موتور، اندازه قطر خارجی روتور باید کوچکتر از ۳۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شود. با توجه به مطالب بیان شده در بخش های قبل، تعداد قطب‌های روتور برابر ۷۰ و عرض هر کدام از آهنرباها برابر با ۱۰ میلیمتر می‌باشد. معمولا برای کاهش شار نشتی بین آهنرباها و همچنین کاهش آهنربای مصرفی در موتور، معمولا دو بخش از سه بخش از گام قطب یعنی ۱۲۰ درجه از ۱۸۰ درجه مکانیکی از گام قطب، آهنربا قرار می‌گیرد به‌عبارت دیگر می‌توان این نسبت را با $Embrace$ بیان کرد. $Embrace$ بیان‌گر نسبت کمان قطب به گام قطب است. تغییر نسبت کمان قطب به گام قطب موجب تغییر چگالی شار فاصله هوایی می‌شود و از آنجائیکه چگالی شار فاصله هوایی تاثیر مستقیم بر روی ولتاژ القا شده دارد و مقدار مناسب ولتاژ القائی در میزان گشتاور و ریپل گشتاور تاثیر مستقیم دارد، لذا میتوان نتیجه گرفت که مقدار $Embrace$ در ریپل گشتاور تاثیر بسزایی دارد. نسبت $Embrace$ نیز در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. عبارت X بیانگر گام قطب و عبارت Y بیانگر قوس قطب است و نسبت $\frac{Y}{X}$ برابر با $Embrace$ است [۹۸]. برای دست‌یابی به راندمان بالاتر مقدار $Embrace$ بین ۰٫۶۵ تا ۱ انتخاب می‌شود که این مقدار برای هر نوع موتوری ممکن است متفاوت باشد. به همین جهت در فصل بعد در قسمت بهینه‌سازی این پارامتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

1- Least common multiple

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱-۷: گام قطب و قوس قطب برای یک موتور با روتور درونی

بر اساس مطالب ذکرشده و با توجه به محدودیت‌های مکانیکی، حداقل اندازه فاصله هوایی برابر با ۰/۴ میلیمتر است. لازم به ذکر است که هرچه اندازه فاصله هوایی کمتر انتخاب شود، گشتاور بیشتری در خروجی موتور تولید می‌شود؛ از طرفی با در نظر گرفتن محدودیت مکانیکی جهت ساخت نمیتوان اندازه فاصله هوایی را برابر با کمترین مقدار در نظر گرفت. بنابراین در این طراحی اندازه فاصله هوایی برابر با ۰/۴۵ میلیمتر انتخاب شده است. قطر داخلی روتور را طبق مطالب ذکر شده میتوان با درنظر گرفتن این موضوع که نسبت دو-سوم از محیط داخلی روتور به آهنرباها اختصاص داده شده است، محاسبه نمود. قطر داخلی روتور و قطرخارجی استاتور بترتیب از ۳-۷و ۴-۷ قابل محاسبه هستند.

$$D_{in-Rotor} = \frac{۲PW_{PM}}{\frac{۲}{۳}\pi} = \frac{۷۰\times۱۰}{\frac{۲}{۳}\pi} = ۳۳۴.۲\ mm \qquad ۷-۳$$

$$D_{out-Stator} = D_{in-Rotor} - ۲L_{ag} = ۳۳۴.۲ - ۰.۹ = ۳۳۳.۳\ mm \qquad ۷-۴$$

برای تخمین قطر خارجی روتور، ابتدا باید اندازه یوغ روتور را تخمین زد. با توجه به اینکه نیمی از شار فاصله هوایی یا شارتولیدی توسط آهنرباهای دائمی مسیر خود را از داخل یوغ روتور می‌بندد، بنابراین می‌توان با یکسان در نظر گرفتن چگالی شار یوغ روتور و آهنربای دائمی، اندازه یوغ روتور را از رابطه ۵-۷ تخمین زد.

$$\phi_{yoke-Rotor} = \frac{\phi_{PM}}{۲} \Rightarrow H_{yoke-Rotor}B_{yoke-Rotor} = \frac{W_{PM}B_{PM}}{۲} \Rightarrow$$
$$H_{yoke-Rotor} = \frac{W_{PM}B_{PM}}{۲B_{yoke-Rotor}} \overset{B_{yoke-Rotor}=B_{PM}}{\Longrightarrow} H_{yoke-Rotor} = \frac{W_{PM}}{۲} = ۵\ mm \qquad ۷-۵$$

با توجه به اینکه چگالی شار باقیمانده آهنربای دائمی فریت تقریبا برابر با ۰/۴ تسلا می‌باشد، می‌توان اندازه یوغ روتور را مقدار کمتری درنظر گرفت. این امر سبب کاهش استحکام مکانیکی روتور شده و روتور در مقابل تنش‌های مکانیکی و مودهای لرزشی آسیب‌پذیرتر خواهد شد، در نتیجه اندازه یوغ روتور بیشتر از ۲ و تقریبا برابر با ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. حال با توجه به مشخص بودن قطر داخلی روتور، ضخامت آهنربا و اندازه یوغ روتور می‌توان قطر خارجی روتور را از رابطه ۱۱-۷ تخمین زد.

$$D_{out-Rotor} = D_{in-Rotor} + ۲L_{PM} + ۲H_{yoke-Rotor} = ۳۳۴.۲ + ۱۰ + ۵.۸ = ۳۵۰\ mm \qquad ۷-۶$$

حال با توجه به مشخص شدن پارامترهای اولیه روتور، نوبت به بررسی پارامترهای اولیه استاتور می‌رسد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۶-۲-۷- طراحی ابعاد استاتور

با توجه به مشخص شدن قطر خارجی استاتور در بخش قبل، در این بخش تنها به بررسی قطر داخلی استاتور و شکل شیار مربوط به آن پرداخته می‌شود. اگر فرض شود حداکثر چگالی شار فاصله هوایی موتور ۱۵ درصد کمتر از چگالی شار پسماند آهنربا باشد، دراین صورت با درنظر گرفتن چگالی شار پسماند برابر با ۰/۴ تسلا، حداکثر چگالی شار فاصله هوایی موتور برابر ۰/۳۴ تسلا است. آنگاه با فرض چگالی شار دندانه‌های استاتور برابر با ۰/۸ تسلا و با برابر قرار دادن شار عبوری از فاصله هوایی و دندانه استاتور می‌توان عرض دندانه استاتور را از رابطه ۷-۷ تخمین زد. طراحی چگالی شار پایین برای هسته روتور و استاتور، این امکان را به طراح می‌دهد تا از ورق آهن معمولی بجای ورق سیلیس‌دار استفاده کند و انتخاب این مقدار در اینجا نیز متناسب با ورق‌های استفاده شده است.

$$B_{ag}\pi D_{out-Stator}L = B_t W_t L N_s \Rightarrow W_t = \frac{B_{ag}\pi D_{out-Stator}L}{B_t L N_s} \qquad \text{۷-۷}$$

$$\Rightarrow W_t = \frac{۰.۳۴\times\pi\times۳۳۳.۳}{۰.۸\times۶۳} = ۷\ mm$$

با مشخص شدن عرض دندانه استاتور، می‌توان عرض شیار را نیز مشخص کرد. اندازه دهانه شیار (B_{so}) معمولا به اندازه قطر سیم مصرفی بستگی دارد. توجه به این نکته ضروری است که با کوچکتر در نظر گرفتن اندازه دهانه شیار، شار نشتی موتور افزایش پیدا می‌کند. ارتفاع بالای شیار (H_{s0}) ۱/۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. همچنین می‌توان اندازه ارتفاع قوس بالای شیار (H_{s1}) را نصف اندازه عرض بالای شیار (B_{s1}) در نظر گرفت. برای تخمین اندازه عرض بالای شیار و اندازه ارتفاع قوس بالای شیار از روابط ۷-۸ و ۷-۹ استفاده می‌شود.

$$B_{s۱} = \frac{(D_{out-Stator} - ۲H_{s.} - ۲H_{s۱})\pi}{۶۳} - W_t \overset{H_{s۱}=\frac{B_{s۱}}{۲}}{\Longrightarrow} B_{s۱} = \frac{(D_{out-Stator} - ۲H_{s.} - B_{s۱})\pi}{۶۳} - W_t \qquad \text{۷-۸}$$

$$\Rightarrow ۱.۰۴۹B_{s۱} = \frac{(D_{out-Stator} - ۲H_{s.})\pi}{۶۳} - W_t \Rightarrow B_{s۱} = \frac{(۳۳۳.۳ - ۲.۶)\pi}{۱.۰۴۹\times۶۳} - \frac{۷}{۱.۰۴۹} \approx ۹\ mm$$

$$H_{s۱} = \frac{B_{s۱}}{۲} = ۴.۵\ mm \qquad \text{۷-۹}$$

برای تخمین عمق شیار استاتور، نیاز است ابتدا تعداد دور و سطح مقطع سیم مسی استفاده شده در هر شیار محاسبه شود. اندازه سطح مقطع سیم مصرفی رابطه مستقیمی با اندازه جریان عبوری از هر کدام از فازها دارد. همچنین تعداد دور مربوط به هر کدام از فازها رابطه مستقیمی با دامنه ولتاژ دارد. بر همین اساس ابتدا باید دامنه ولتاژ و جریان موثر هر کدام از فازها مشخص شود، سپس به بررسی تعداد دور و سطح مقطع سیم هر کدام از فازها پرداخته شود.

۷-۲-۷- تعیین دامنه موثر ولتاژ و جریان

با توجه به اینکه موتور با اتصال ستاره به درایو متصل شده و ولتاژ منبع یا باتری ۳۶ ولت در نظر گرفته شده است، ولتاژ ۳۶ ولت برابر با ولتاژ خط به خط موتور است. با تبدیل ولتاژ خط به فاز می‌توان مقدار حداکثر ولتاژ را محاسبه نمود. همچنین برای محاسبه وتبدیل ولتاژ dc به ولتاژ فاز موتور، در حالت بدون بار و با صرفنظر کردن از افت ولتاژ

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

ناشی از سیم‌پیچی میتوان دامنه موثر ولتاژ برای هرکدام از فازها را طبق رابطه ۱۰-۷ محاسبه نمود. با توجه به اینکه ولتاژ القائی مورد نظر به شکل ذوزنقه‌ای فرض می‌شود، و تنها ۱۲۰ درجه الکتریکی از ولتاژ در تولید توان ورودی شرکت می‌کند، بنابر این می‌توان مقدار ولتاژ موثر را در ۱۲۰ درجه الکتریکی در نظر گرفت. بر همین اساس بازه انتگرال ولتاژ موثر از ۳۰ درجه الکتریکی تا ۱۵۰ درجه الکتریکی در نظر گرفته می‌شود [۹۹].

$$E_{rms}=\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}}E_m^2 d\theta}=\sqrt{\frac{2}{3}}E_m \Rightarrow E_m=\sqrt{\frac{3}{2}}E_{rms}=1.22E_{rms} \square \frac{36_V}{\sqrt{3}}=20.8 \Rightarrow E_{rms}=17\ v \qquad \textbf{۷-۱۰}$$

به دلیل اینکه ولتاژ القائی در حالت بی‌باری محاسبه شده است، برای محاسبه جریان نیاز است که روابط در حالت بارداری نوشته شود، پس با در نظر گرفتن یک ضریب افت ولتاژ می‌توان مقدار جریان را محاسبه نمود. مقدار ضریب افت ولتاژ ۰٫۸۵ فرض شده است. در این‌صورت با توجه به رابطه توان موتور BLDC، دامنه جریان موثر هر کدام از فازهای موتور در حالت بار کامل از رابطه ۱۱-۷ محاسبه می‌شود [۹۹].

$$P_{in}=2E_m.I.K_e \Rightarrow I=\frac{P_{in}}{2E_m\times K_e}=\frac{\frac{P_{Out}}{\eta}}{2E_m\times K_e}=\frac{\frac{500}{0.75}}{2\times 20.8\times 0.85} \square 18.8\ A \qquad \textbf{۷-۱۱}$$

پارامترهای P_{in}، P_{Out}، E_m، I، η و K_e به ترتیب معرف متوسط توان ورودی موتور، متوسط توان خروجی موتور، اندازه حداکثر دامنه ولتاژ هر کدام از فازها در حالت بی‌باری، اندازه حداکثر دامنه جریان ورودی، راندمان موتور و ضریب افت ولتاژ می‌باشند. با توجه به مشخصات خروجی موتور دوچرخه، توان خروجی موتور برابر با ۵۰۰ وات و راندمان موتور برابر ۷۵ درصد فرض شده است. با فرض چگالی جریان ۶ آمپر بر میلیمتر مربع برای سیم‌پیچی هرکدام از فازها، می‌توان سطح مقطع و قطر سیم را بترتیب از روابط ۱۲-۷ و ۱۳-۷ تخمین زد. با توجه به اینکه در موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک، همواره دو فاز از سه فاز دارای جریان می باشند، می‌توان بدون نیاز به خنک‌کننده دامنه چگالی جریان را کمی بالاتر از دیگر موتورها انتخاب نمود. چگالی جریان برای این دسته از موتورها با استاتور داخلی حداکثر برابر با ۸ آمپر بر میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است [۹۳].

$$I_{rms}=jA_{cu} \Rightarrow A_{cu}=\frac{I_{rms}}{j}=\frac{18.8}{6}=3.13\ mm^2 \qquad \textbf{۷-۱۲}$$

$$A_{cu}=\pi\frac{D_{cu}^2}{4} \Rightarrow D_{cu}=\sqrt{\frac{4A_{cu}}{\pi}} \square 2\ mm \qquad \textbf{۷-۱۳}$$

حال با توجه به محاسبه سطح مقطع سیم‌پیچی استاتور، نوبت به محاسبه تعداد دور هرکدام از فازهای استاتور می‌رسد.

۷-۲-۸- محاسبه تعداد دور سیم‌پیچی

برای محاسبه‌ی تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور، می‌توان از رابطه ولتاژ القائی استفاده کرد. برای اینکار ابتدا نیاز است که نقطه کار آهنربا تعیین گردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$B_{pm} = B_r + \mu_0 \mu_r H_{pm} \Rightarrow B_{pm} = B_r - \mu_0 \mu_r \frac{L_{ag}}{L_{PM}} H_{ag} \overset{\mu_0 H_{ag} \approx B_{ag}}{\Longrightarrow}$$

$$B_{pm} = B_r - \mu_r \frac{L_{ag}}{L_{PM}} B_{ag} = ۰.۴ - (۱.۰۴ \times \frac{۰.۴۵}{۵} \times ۰.۳۴) = ۰.۳۶۸\ T \qquad \textbf{۷-۱۴}$$

حال با توجه به تخمین چگالی شار نقطه کار آهنربا و با اندازه‌گیری زاویه مکانیکی بین آهنرباها که در اینجا برابر با ۱/۷ زاویه مکانیکی است و تبدیل آن به زاویه الکتریکی، می‌توان هارمونیک اصلی نیروی محرکه مغناطیسی آهنرباهای دائمی روتور در فاصله هوایی را بصورت رابطه زیر تخمین زد.

$$F_{PM۱} = \frac{۴ B_{pm} L_{PM}}{\pi \mu_r} Cos(\delta / ۲) = \frac{۴ \times ۰.۳۶۸ \times ۵}{\pi \times ۴\pi \times ۱۰^{-۷}} Cos(۶۰^{o} / ۲) = ۰.۱۶۱۴ \times ۱۰^{۷}\ AT \qquad \textbf{۷-۱۵}$$

پارامترهای دیگری که برای تخمین دامنه موثر ولتاژ القائی استاتور مورد نیاز است، $L_{ag\text{-}total}$، β و C_0 و P_{ag} می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$L_{ag-total} = L_{ag} + L_{PM} = ۰.۴۵ + ۵ = ۵.۴۵\ mm \qquad \textbf{۷-۱۶}$$

$$\beta = \frac{۱}{۲}\left[۱ - \left[۱ + (\frac{B_{s0}}{۲ L_{ag-total}})^{۲} \right]^{-\frac{۱}{۲}} \right] = ۰.۰۰۵ \qquad \textbf{۷-۱۷}$$

$$C_0 = \frac{B_{s0}}{\frac{\pi D_{out-Stator}}{N_s}} = \frac{۱.۵}{۱۶.۶} = ۰.۰۹ \qquad \textbf{۷-۱۸}$$

$$P_{ag} = \frac{\mu_0}{L_{ag-total}} (۱ - ۱.۶ \beta C_0) = \frac{۴\pi \times ۱۰^{-۷}}{۵.۴۵} (۱ - (۱.۶ \times ۰.۰۰۵ \times ۰.۰۹)) = ۲.۳ \times ۱۰^{-۷} (\frac{۱}{\Omega}) \qquad \textbf{۷-۱۹}$$

پارامتر دیگری که در رابطه ولتاژ القایی وجود دارد، ضریب سیم‌پیچی استاتور K_w می‌باشد. بطور کلی ضریب سیم‌پیچی استاتور تابع سه مولفه است. مولفه اول مربوط به ضریب توزیع سیم‌پیچی استاتور K_{d1} می‌باشد که بصورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۰۰].

$$K_{dn} = \frac{\sin(n \frac{q\gamma}{۲})}{q \sin(n \frac{\gamma}{۲})} \Rightarrow K_{d۱} = \frac{\sin(\frac{q\gamma}{۲})}{q \sin(\frac{\gamma}{۲})} \qquad \textbf{۷-۲۰}$$

پارامترهای q، γ و n بترتیب معرف تعداد شیارهای استاتور زیر هر قطب برای هر فاز، زاویه الکتریکی گام شیار استاتور و شماره هارمونیک تابع اصلی می‌باشد. زاویه الکتریکی گام شیار استاتور بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \frac{۳۶۰}{N_s} \times P = \frac{۳۶۰}{۶۳} \times \frac{۷۰}{۲} = ۲۰۰^{\circ} \qquad \textbf{۷-۲۱}$$

رابطه فوق در طراحی‌هایی بکار گرفته می‌شود که مقدار q در آنها بزرگتر از یک باشد. با توجه به اینکه مقدار q در

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

این طراحی، کمتر از یک می‌باشد ($q = \frac{N_s}{N_{ph} \times 2P} = \frac{63}{3 \times 70} = 0.3$)، مقدار آن، با تعداد دندانه‌هایی که در هر فاز بصورت متوالی سیم‌پیچی شده است، در نظر گرفته می‌شود که با توجه به شکل ۲-۷ برابر با ۳ است. در این حالت، γ نیز زاویه الکتریکی گام یک کویل با کویل مجاور در نظر گرفته می‌شود که طبق شکل ۲-۷ علاوه بر اختلاف ۲۰۰ درجه الکتریکی بین دو کویل مجاور، یک اختلاف ۱۸۰ درجه الکتریکی نیز به دلیل جهت عکس سیم‌پیچی در دو کویل مجاور وجود دارد که اختلاف زاویه الکتریکی در دو کویل مجاور را ۲۰ درجه ($200° + 180° = 20°$) می‌کند. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$K_{d1} = \frac{\sin(\frac{q\gamma}{2})}{q\sin(\frac{\gamma}{2})} = \frac{\sin(\frac{3 \times 20°}{2})}{3\sin(\frac{20°}{2})} = 0.96 \qquad \text{۷-۲۲}$$



شکل ۲-۷: نحوه سیم‌پیچی دندانه‌های مجاور در یک فاز

مولفه دوم مربوط به ضریب گام سیم‌پیچی K_{p1} است. از آنجائیکه در این موتور از سیم‌پیچی متمرکز دوردندانه‌ای استفاده شده است، می‌توان دامنه ضریب گام سیم‌پیچی را از رابطه ۲۳-۷ محاسبه کرد [۱۰۰].

$$K_{Pn} = \sin(n\frac{\xi}{2}) \Rightarrow K_{P1} = \sin(\frac{\xi}{2}) = \sin(\frac{200°}{2}) = 0.98 \qquad \text{۷-۲۳}$$

پارامتر ξ معرف زاویه الکتریکی گام سیم‌پیچی می‌باشد، که در اینجا مقدار آن برابر با زاویه گام شیار استاتور (۲۰۰ درجه الکتریکی) می‌باشد. مولفه سوم مربوط به ضریب مورب کردن شیار استاتور یا آهنربا می‌باشد. از آنجائیکه در این موتور از هیچ شیار موربی استفاده نشده است و آهنرباها به صورت مستقیم بر روی روتور قرار گرفته‌اند، دامنه این ضریب طبق رابطه ۲۴-۷ برابر ۱ می‌باشد [۱۰۰].

$$K_{sK} = \frac{2\sin(\frac{\theta_{sk}}{2})}{\theta_{sk}} = 1 \qquad \text{۷-۲۴}$$

پارامتر θ_{sk} معرف زاویه مورب کردن شیار استاتور می‌باشد که در اینجا صفر است. حال می‌توان ضریب سیم‌پیچی استاتور K_W را از رابطه ۲۵-۷ بدست آورد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$K_W = K_{p1} K_{d1} K_{sk} = ۰.۹۸ \times ۰.۹۶ \times ۱ = ۰.۹۴$$

۷-۲۵

پارامتر دیگری که جهت تخمین دامنه موثر ولتاژ محاسبه می‌شود، سرعت زاویه‌ای بی‌باری موتور ω_{NL} می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت نامی موتور در حالتی ۲۴۰ دور بر دقیقه می‌باشد، می‌توان سرعت بی‌باری موتور را ۱/۵ الی ۳ برابر سرعت نامی، در حدود ۳۷۵ دور بر دقیقه در نظر گرفت. آخرین پارامتری که باید برای تخمین دامنه موثر ولتاژ القائی مورد بررسی قرار بگیرد، طول موثر موتور می‌باشد. از آنجائیکه موتور جریان مستقیم بدون جاروبک دارای راندمان بالایی می‌باشد و استفاده از درایو باعث می‌شود تا ضریب قدرت بالایی نیز داشته باشد، بنابراین برای داشتن کمترین هزینه ساخت، نسبت طول موثر به گام قطب موتور برابر ۲ فرض شده است. بدین ترتیب برای محاسبه طول موثر موتور، می‌توان از رابطه ۲۶-۷ استفاده کرد [۱۰۱].

$$\frac{L}{\tau} = ۲ \Rightarrow L = ۲ \frac{\pi D_{in-Rotor}}{۲P} = ۲۹.۹۹ \ mm \qquad \textbf{۷-۲۶}$$

پارامتر τ معرف گام قطب موتور می‌باشد. اگر طول موثر موتور برابر ۲۹/۹۹ میلی‌متر فرض شود، آنگاه با توجه به رابطه ولتاژ القائی در حالت بی‌باری، تعداد دور سیم‌پیچی استاتور بصورت زیر بدست آورد.

$$E_{rms} K_e = ۰.۷۰۷ K_W N D_{ag} L \omega_m F_{PM1} P_{ag} \Rightarrow N = \frac{E_{rms} K_e}{۰.۷۰۷ K_W D_{ag} L \omega_m F_{PM1} P_{ag}} \Rightarrow \qquad \textbf{۷-۲۷}$$

$$N = \frac{۱۷ \times ۰.۸۵}{۰.۷۰۷ \times ۰.۹۴ \times ۰.۳۳۳۳ \times ۰.۰۲۹۹۹ \times (\frac{۳۷۵\pi}{۳۰}) \times (۰.۱۴۲۸ \times ۱۰^{۷}) \times (۲.۰۶۹ \times ۱۰^{-۷})} = ۱۸۷.۵$$

۷-۲-۹- محاسبات مربوط به شیار استاتور

از آنجائیکه تعداد کلاف‌های مربوط به هر فاز، برابر ۲۱ است، در نتیجه سیم‌پیچی برای هر فاز در ۷ دسته ۳تایی سیم‌پیچی دوردندانه‌ای تقسیم می‌شود، این تقسیم‌بندی در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. با محاسبه تعداد دور در هر فاز و مطالب ذکرشده تعداد دور در هر کلاف تقریبا برابر ۸ دور می‌باشد. با توجه به اینکه سیم‌پیچی در هر شیار استاتور بصورت دولایه است، بنابر این در هر شیار ۱۶ دور کلاف قرار می‌گیرد. همچنین برای تخمین اندازه مساحت شیار استاتور، می‌توان از رابطه ۲۸-۷ استفاده کرد [۱۰۱].

۷-۲۸

$$A_{slot} = \frac{\left[N_{coil} A_{cu}\right]}{K_{Fill}} = \frac{\left[۱۶ \times ۳.۱۳\right]}{۰.۴} = ۱۲۵.۲ \ mm^{۲}$$

$$K_{Fill} = ۴۰\%$$

در روابط فوق پارامترهای N_{coil}، A_{cu} و K_{Fill} به ترتیب معرف تعداد هادی‌های داخل هر شیار استاتور، سطح مقطع سیم و ضریب پرشدگی شیار استاتور می‌باشند، که در اینجا درصد پرشدگی شیار برابر با ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل شیار استاتور، می‌توان ابعاد هر شیار را به صورت تقریبی از روابط ۲۹-۷، ۳۰-۷ و ۳۱-۷ بدست آورد:

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۷-۲۹

$$B_{s2}=\frac{(D_{out-Stator}-2H_{s.}-2H_{s1}-2H_{s2})\pi}{63}-W_t \Rightarrow$$

$$B_{s2}=\frac{(333.3-2\times1.3-2\times4.5-2H_{s2})\pi}{63}-7 \Rightarrow B_{s2}=9.04-0.099H_{s2}$$

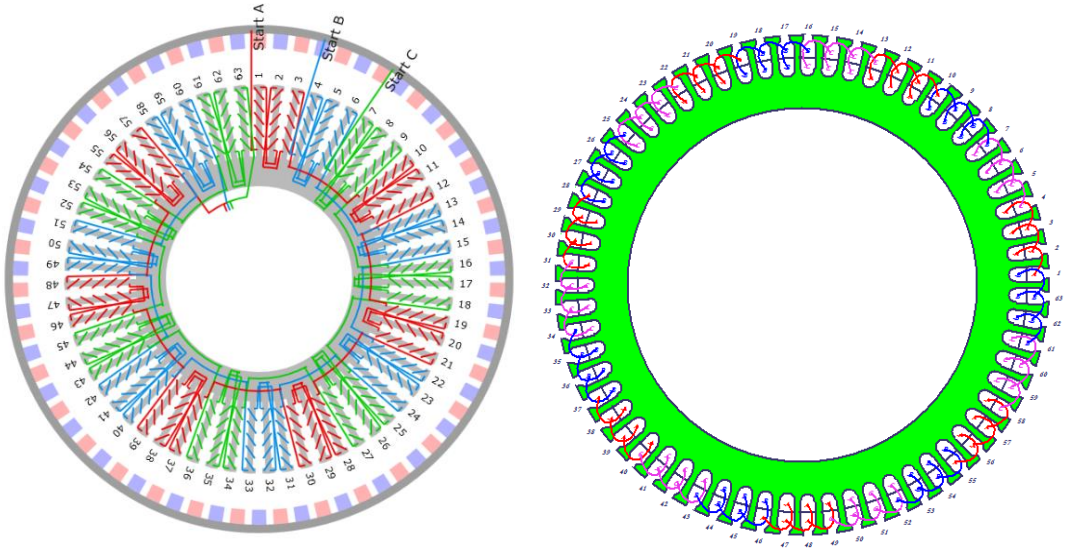
۷-۳۰

$$A_{Slot}=\frac{B_{s1}+B_{s2}}{2}H_{s2} \Rightarrow 125.2=\frac{9+B_{s2}}{2}H_{s2} \overset{B_{s2}=9.04-0.099H_{s2}}{\Longrightarrow} \begin{cases} B_{s2} \approx 7.54\ mm \\ H_{s2} \approx 15.13\ mm \end{cases}$$

۷-۳۱

$$H_{s2}'=H_{s2}+\frac{B_{s2}}{2} \Rightarrow H_{s2}'=15.13+3.77=18.9\ mm$$

در روابط فوق H_{s2}'، اندازه مجموع ارتفاع شیار و شعاع قوس پایین شیار استاتور می‌باشد.



شکل ۳-۷: شکل سیم‌بندی موتور

۷-۲-۱۰- محاسبه یوغ استاتور

بعد از طراحی ابعاد شیار استاتور، نوبت به طراحی اندازه یوغ استاتور می‌رسد. با توجه به اینکه در حالت بی‌باری، بخش بزرگی از کل شار عبوری از یوغ روتور وارد یوغ استاتور می‌شود، می‌توان اندازه ارتفاع یوغ استاتور را برابر اندازه ارتفاع یوغ روتور در نظر گرفت. به دلیل اتصال ورقه‌ها به یکدیگر و محل پیچ کردن آنها، نیاز به فضایی نسبتا بزرگتر از یوغ روتور است. پس می‌توان ارتفاع یوغ استاتور را تقریبا برابر با ۱۱ میلی‌متر در نظر گرفت.

۷-۳۲

$$H_{yoke-Stator}=11\ mm$$

پارامتر $H_{yoke-Stator}$ معرف اندازه ارتفاع یوغ استاتور می‌باشد. بنابراین با توجه به مقادیر بدست‌آمده برای ابعاد استاتور، می‌توان اندازه قطر داخلی استاتور $D_{in-stator}$ را بصورت زیر محاسبه کرد:

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$D_{in-Stator} = D_{out-Stator} - ۲H_{s۰} - ۲H_{s۱} - ۲H_{s۲}' - ۲H_{yoke-Stator} \Rightarrow$$
$$D_{in-Stator} = ۳۳۳.۳ - ۲\times۱.۳ - ۲\times۴.۵ - ۲\times۱۸.۹ - ۲\times۱۱ = ۲۶۱.۹\ mm$$ **۷-۳۳**

۷-۲-۱۱- جمع‌بندی طراحی اولیه

در این بخش به مباحثی همچون تعیین ملاحظات طراحی، نوع سیم‌پیچی، محدودیت‌های طراحی، انتخاب تعداد قطب و شیار مناسب، طراحی روتور، طراحی استاتور و محاسبات مربوطه پرداخته شد. در انتها تمامی پارامترهای طراحی اولیه موتور BLDC طراحی‌شده در

جدول ۲-۷ آورده شده است.

جدول ۲-۷: پارامترهای طراحی اولیه الکتروموتور موتور **BLDC**

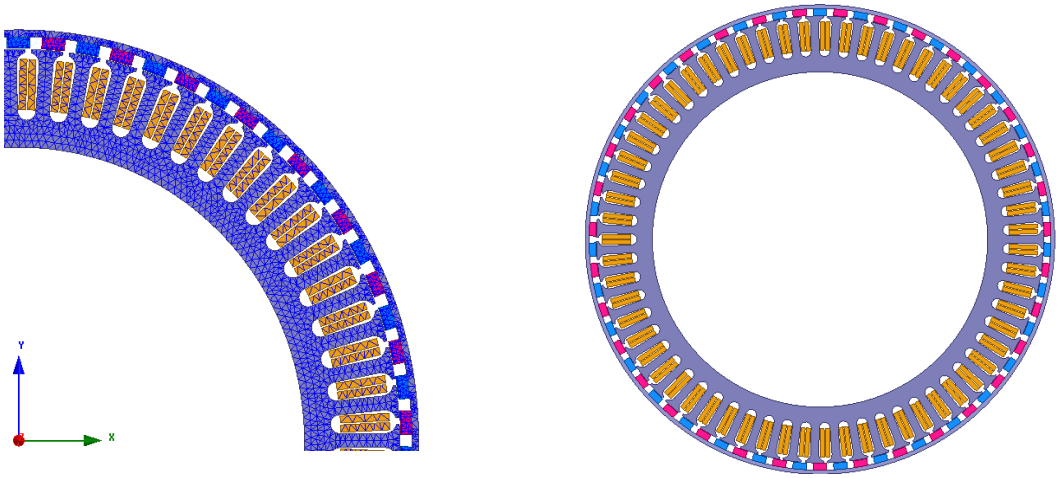
چگالی شار پسماند آهنربا (T)	۰/۴	قطر خارجی روتور (mm)	۳۵۰
چگالی شار فاصله هوایی (T)	۰/۳۷	قطر داخلی روتور (mm)	۳۴۳/۲
چگالی شار در دندانه (T)	۰/۷	قطر خارجی استاتور (mm)	۳۳۳/۳
ضخامت یوغ روتور (mm)	۲/۹	قطر داخلی استاتور (mm)	۲۶۱/۹
ضخامت یوغ استاتور (mm)	۱۱	طول موثر (mm)	۲۹/۹
عرض آهنربا (mm)	۱۰	متوسط دامنه جریان (A)	۱۸/۸
ارتفاع آهنربا (mm)	۵	دامنه ولتاژ باتری (v)	۳۶
عرض دندانه‌ی استاتور (mm)	۷	تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز	۱۸۰/۸
عرض دهانه شیار (mm)	۱/۵	ضخامت فاصله هوایی (mm)	۰/۴۵

۷-۳- طراحی تفصیلی الکتروموتور BLDC ۵۰۰واتی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری

در این بخش، در ابتدا به شبیه‌سازی و بررسی مولفه‌های خروجی موتور با طراحی اولیه پرداخته می‌شود و سپس طراحی اولیه در حالت بی‌باری شبیه‌سازی شده و نتایج آن استخراج می‌گردد. در انتها در حالت بارکامل تمامی مولفه‌های خروجی موتور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از انتخاب و نهایی شدن طرح، به تحلیل پارامتری برخی مشخصه‌های الکتروموتور پرداخته شده است.

با توجه به نتایج بدست‌آمده در فصل قبل، می‌توان موتور BLDC را مانند شکل ۴-۷-الف و به صورت دوبعدی مدل و تحلیل کرد. همچنین مش‌بندی موتور در شکل ۴-۷-ب نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۴-۷: (الف) نمای دوبعدی موتور **BLDC** با ۶۳ شیار و ۷۰ قطب و (ب) شکل مش‌بندی اجزاء موتور

جدول ۳-۷: مشخصات خروجی طراحی اولیه

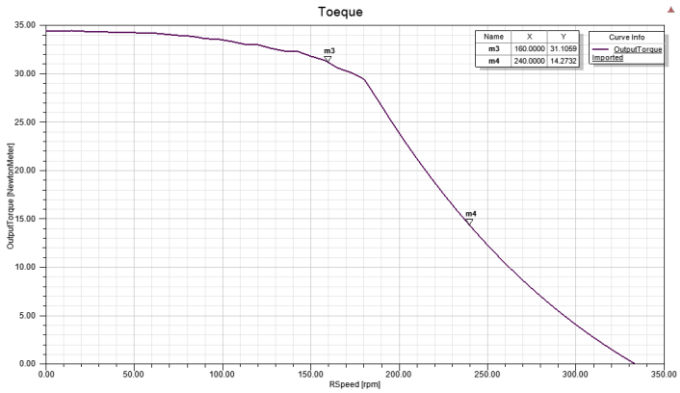
جریان ورودی (A)	۱۹٫۷	گشتاور نامی (Nm)	۳۱٫۱
چگالی جریان (A/mm^2)	۵٫۹	سرعت نامی (rpm)	۱۶۰
بارگذاری الکتریکی ویژه (A/m)	۲۵۰۰۰	توان خروجی (w)	۵۲۱
سرعت بی‌باری (rpm)	۳۳۶٫۶	راندمان	٪ ۷۴٫۴

پس از طراحی اولیه و شبیه‌سازی آن در قسمت RMxprt نرم‌افزار Ansys Maxwell نتایج خروجی مطابق با جدول ۳-۷ است. همانطور که مشاهده می‌شود توان خروجی تقریبا برابر با ۵۲۱ وات و گشتاور نامی برابر با ۳۱٫۵ نیوتون‌متر محاسبه شده است. همچنین در این طراحی، موتور مورد نظر باید بتواند در ۲ سرعت ۱۶۰ دور دردقیقه و ۲۴۰ دور دردقیقه قابلیت عملکرد مطلوب و تولید توان ۵۰۰ را داشته باشد. در ادامه به بررسی این دو حالت پرداخته شده است.

درشکل ۵-۷ مشخصه گشتاور- سرعت موتور با توان خروجی ۵۰۰ وات و گشتاور نامی ۳۰ نیوتون‌متر برحسب سرعت موتور نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با استفاده از محدودکننده جریان و با افزایش سرعت موتور از مقدار صفر تا سرعت نامی با افزایش سرعت مقدار گشتاور کاهش یافته است. در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی به دلیل افزایش ولتاژ القائی، مقدار جریان کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار گشتاور نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر از سرعت نامی به بعد با افزایش سرعت به دلیل رابطه مستقیم بین سرعت و ولتاژ ماشین، مقدار ولتاژ القا شده افزایش یافته و اختلاف ولتاژ بین ولتاژ القا شده و ولتاژ منبع کمتر می‌شود، نهایتا در سرعت بی‌باری (در اینجا تقریبا برابر با ۳۳۷ rpm است)؛ مقدار ولتاژ القا شده با ولتاژ باتری برابر می‌شود و مقدار جریان ورودی به موتور صفر می‌شود، در نتیجه میزان گشتاور خروجی نیز صفر می‌شود. از این نقطه به بعد با افزایش سرعت، موتور وارد ناحیه

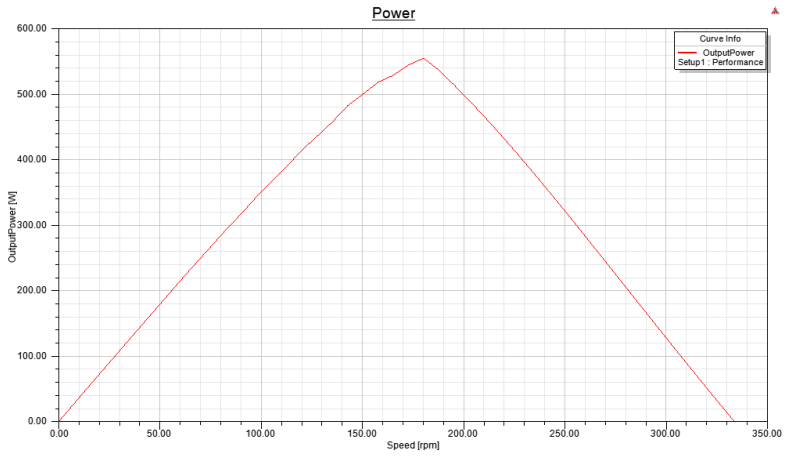
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

ژنراتوری می‌شود (ناحیه ترمزی) که در این طراحی این ناحیه مورد استفاده قرار نگرفته است.



شکل ۵-۷: مشخصه گشتاور سرعت موتور

با توجه به رابطه توان خروجی با افزایش جریان و سرعت مقدار توان خروجی نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۶-۷ مشاهده می‌شود در سرعتی بالاتر از سرعت نامی به دلیل محدود بودن مقدار جریان با افزایش سرعت، مقدار توان خروجی افزایش پیدا نکرده است و به دلیل افزایش سرعت و کاهش جریان و گشتاور، مقدار توان خروجی از مقدار حداکثر خود کاهش یافته است و نهایتا در سرعت بی‌باری مقدار توان خروجی به صفر رسیده است. یکی از اهداف این طراحی این است که موتور بتواند در دو سرعت ۱۶۰ و ۲۴۰ دور دردقیقه مقدار توان ۵۰۰ وات را تـأمین کند. با توجه به شکل ۶-۷ در منحنی توان می‌توان مشاهده کرد که موتور در سرعت ۱۶۰ دور دردقیقه توان ۵۰۰ وات را تأمین می‌کند اما در سرعت ۲۴۰ دور دردقیقه مقدار توان حدود ۳۳۰ وات است. این مطلب در مشخصه گشتاور-سرعت نیز مشخص شده است. نقطه M4 نشان‌دهنده سرعت ۲۴۰ دور دردقیقه است و گشتاور خروجی در این سرعت کمتر از ۲۰ نیوتون‌متر است. در نتیجه برای دست‌یابی به این مورد از دو روش میتوان استفاده کرد، روش اول استفاده از شیفت فاز توسط درایو موتور است. روش دوم بدون استفاده از شیفت فاز و تنها با تغییر برخی از پارامترهای طراحی، میتوان سرعت بی‌باری را افزیش داده و در دو سرعت مورد نظر به توان ۵۰۰ وات دست یافت.



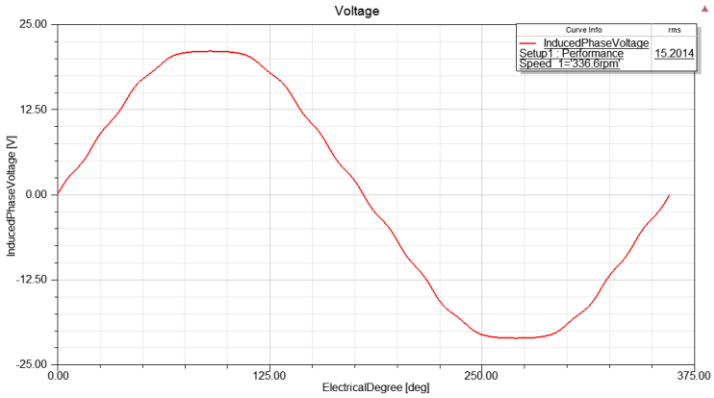
شکل ۶-۷: مشخصه توان خروجی بر حسب سرعت موتور

جهت افزایش سرعت بی‌باری و برآورده شدن هدف عملکرد مطلوب موتور در ۲ سرعت ۲۴۰ و ۱۶۰ دور دردقیقه، از روش اول یعنی شیفت فاز توسط درایو استفاده خواهد شد. در نتیجه در ادامه به بررسی مشخصه‌های خروجی موتور در حالت بی‌باری و بارداری با استفاده از حالت دوبعدی نرم‌افزار و سپس به بهینه‌سازی طراحی پرداخته خواهد شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۷-۳-۱- ولتاژ القائی یا Back-Emf

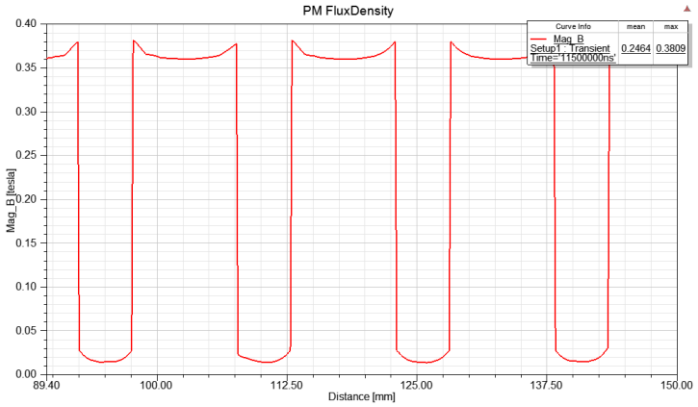
برای بررسی ولتاژ القائی استاتور در حالت بی‌باری، نیاز است تا روتور با سرعت ۳۶۷ دور دردقیقه بچرخد. شکل ۷-۷ دامنه موثر ولتاژ القائی سیم‌پیچی سه‌فاز استاتور را در حالت بی‌باری نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دامنه موثر ولتاژ القائی در حالت بی‌باری برابر با ۱۵٫۲ ولت است که در مقایسه با دامنه موثر ولتاژ القائی در نظر گرفته شده در طراحی اولیه، دارای ۱٫۸ ولت اختلاف ولتاژ است. این اختلاف ولتاژ ناشی از فرضیات طراحی اولیه و استفاده از برخی روابط تقریبی بوده و با این وجود این مقدار خطا عددی قابل قبول است.



شکل ۷-۷: دامنه موثر ولتاژ القائی سیم‌پیچی سه‌فاز استاتور در حالت بی‌باری

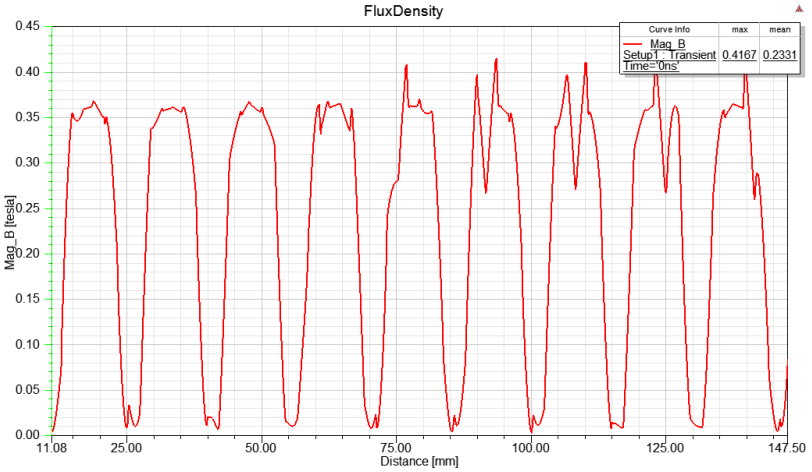
۷-۳-۲- بررسی چگالی شار در آهنربا و فاصله هوایی

شکل ۷-۸ و شکل ۷-۹ به ترتیب چگالی شار آهنرباهای دائمی روتور و چگالی شار فاصله هوایی را در حالت بی‌باری نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۷-۸ مشاهده می‌شود، اندازه حداکثر چگالی شار نقطه کار آهنربا تقریبا ۰٫۳۸ تسلا می‌باشد که این مقدار، ۰٫۰۲ تسلا بیشتر از اندازه چگالی شار نقطه کار آهنربا در طراحی اولیه است. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۷-۹ حداکثر دامنه چگالی شار فاصله هوایی روتور تقریبا برابر ۰٫۴ تسلا است که ۰٫۰۵ تسلا بیشتر از مقداری است که در طراحی اولیه درنظر گرفته شده است. برای بررسی چگالی شار نقطه‌کار آهنربا و چگالی شار فاصله هوایی روتور در حالت بارداری، نیاز به مشخص شدن شدت میدان مغناطیسی موتور در حالت بارداری است.



شکل ۷-۸: چگالی شار آهنرباهای دائمی روتور در حالت بی‌باری

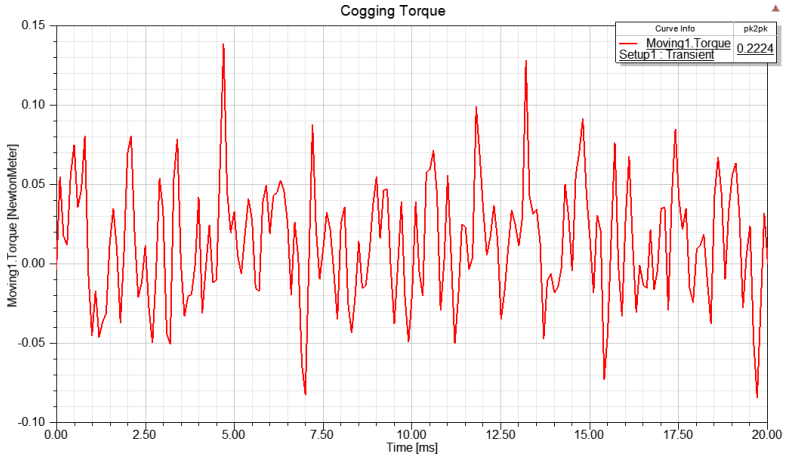
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۹-۷: چگالی شار فاصله هوایی روتور در حالت بی‌باری

۷-۳-۳- بررسی گشتاور دندانه‌ای

جهت بررسی گشتاور دندانه‌ای، در حالت بی‌باری با بررسی شکل موج گشتاور خروجی می‌توان مقدار گشتاور دندانه‌ای را اندازه‌گیری کرد. گشتاور دندانه‌ای به دلیل تقابل آهنرباها و شیارها به وجود می‌آید و باعث بروز مشکلاتی از قبیل نویز و لرزش در موتور می‌شود. در مرحله طراحی، ابعاد بالای شیار باید با ملاحظه این امر که با کاهش عرض بالای شیار، مقدار شار نشتی شیار افزایش پیدا می‌کند و با افزایش آن مقدار گشتاور دندانه‌ای افزایش پیدا می‌کند، انتخاب گردد. شکل ۱۰-۷ گشتاور دندانه‌ای در حالت بی‌باری را نشان می‌دهد. مقدار آن برابر با ۰٫۲۲۲ نیوتون‌متر می‌باشد که برابر با ۰٫۸ درصد مقدار گشتاور نامی است. جهت کاهش مقدار گشتاور دندانه‌ای و بهبود عملکرد موتور نیاز به بهینه‌سازی و تغییر برخی از پارامترهای تاثیرگذار در مقدار گشتاور دندانه‌ای، مانند عرض دهانه شیار است.



شکل ۱۰-۷: شکل موج گشتاور دندانه‌ای

همانطور که در بخش قبل مشاهده شد، نتایج برای مقادیر گشتاور و توان خروجی مطابق با مقادیر در نظر گرفته شده در طراحی اولیه به دست آمدند. در ادامه به بررسی نتایج شبیه‌سازی دو بعدی در نرم‌افزار Maxwell در حالت بار کامل پرداخته می‌شود.

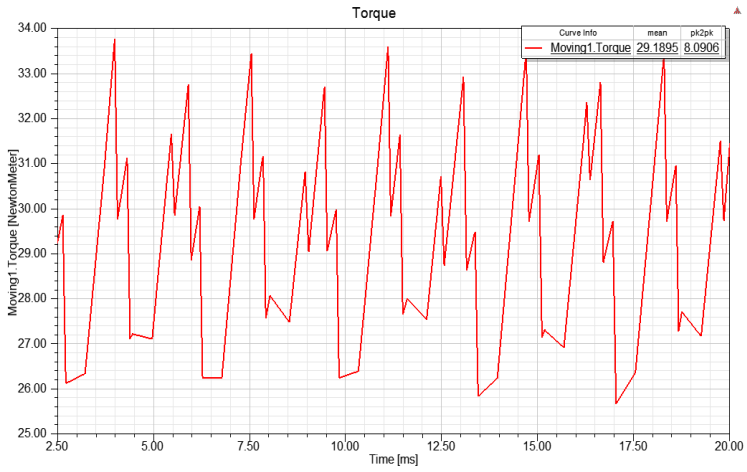
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۷-۳-٤- مشخصه‌های خروجی ماشین در حالت بار کامل

در قسمت قبل مشخصات خروجی موتور در حالت بی‌باری بررسی و تحلیل شد. در این قسمت مشخصه‌های خروجی موتور از قبیل گشتاور خروجی، توان خروجی و چگالی شار در هسته بررسی خواهد شد.

- **گشتاور خروجی**

پس از شبیه‌سازی موتور و دست‌یابی به مشخصات مورد نظر، نوبت به بررسی محدودیت‌ها و بهینه‌سازی مشخصات موتور می‌رسد. طبق محدودیت‌های ذکر شده در فصل قبل موتور طراحی شده باید مقدار گشتاور ۳۰ نیوتون‌متر و توان ۵۰۰ وات را در سرعت نامی در خروجی داشته باشد. همچنین مقدار گشتاور دندانه‌ای موتور نیز باید مقادیر کمی باشد. شکل ۱۱-۷ شکل موج گشتاور خروجی و مقدار ریپل آن را نشان می‌دهد. با توجه به این موضوع که در حالت دوبعدی نرم‌افزار شکل آهنربای مصرفی به آهنرباهای مستطیلی تغییر داده شده است، انتظار می‌رود که مقدار گشتاور خروجی نسبت به حالت قبل مقداری افت داشته باشد و همانطور که درشکل ۱۱-۷ مشاهده می‌شود گشتاور خروجی از مقدار ۳۰ نیوتون‌متر کمتر و برابر با ۲۹٫۱ نیوتون‌متر است. همچنین شکل موج گشتاور دارای ریپل ۸ نیوتون‌متر است. در ادامه با تغییر برخی از پارامترها، میزان گشتاور خروجی را تا ۳۰ نیوتون‌متر افزایش داده و سپس با بهینه‌سازی ابعاد موثر در ایجاد ریپل گشتاور که در قسمت بعد آورده شده است، ریپل گشتاور نیز کاهش یافته است.

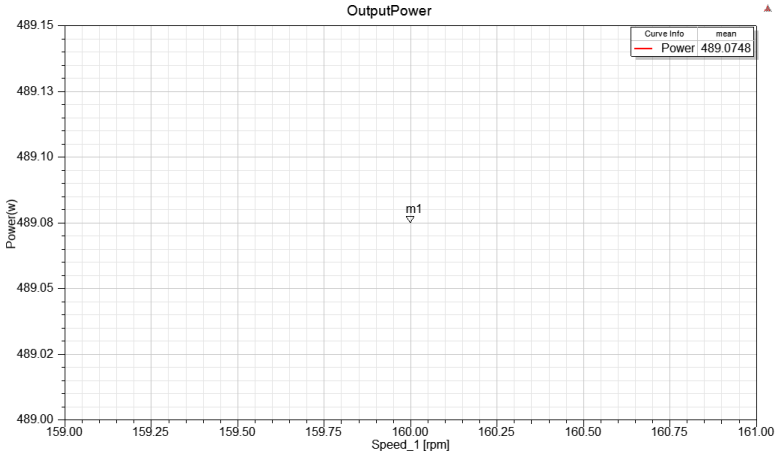


شکل ۱۱-۷: شکل موج گشتاور خروجی

- **توان خروجی**

در شکل ۱۲-۷ توان خروجی موتور بر حسب سرعت که در محیط دو بعدی نرم‌افزار شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. توان خروجی برابر با ۴۸۹ وات در سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه است که در قسمت بهینه‌سازی این کمبود توان جبران خواهد شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

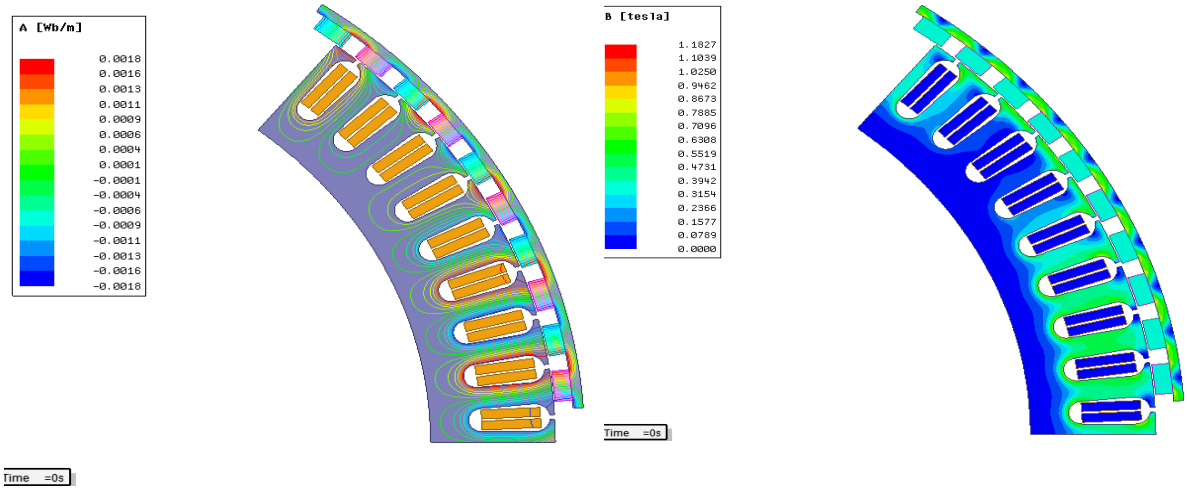


شکل ۱۲-۷: توان خروجی موتور در سرعت نامی

- بررسی چگالی شار در هسته

در شکل ۱۳-۷- الف توزیع چگالی شار در یک قطاع ۵۰ درجه‌ای از موتور نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است بیشترین چگالی‌شار در یوغ روتور، دندانه‌های استاتور و فاصله بین شیارها رخ داده است و مقدار ماکزیمم چگالی‌شار در این نقاط برابر با ۰/۷ تسلا محاسبه شده است. به‌دلیل اینکه در طراحی اولیه ماکزیمم چگالی شار در هسته برابر با ۱/۵ تسلا در نظر گرفته شد، پس مقدار ۰/۷ تسلا مقدار مناسبی است و هسته به اشباع نخواهد رفت. از طرفی همانطور که در شکل مشخص است در قسمت یوغ استاتور مقدار چگالی شار بسیار کم است در نتیجه می‌توان در بهینه‌سازی از این فاصله استفاده بهینه کرد و این مقدار را کاهش داد.

شکل ۱۳-۷-ب خطوط شار در یک قطاع از موتور را نشان می‌دهد. با بررسی تراکم خطوط شار در نقاط مختلف هسته و همچنین در شکل ۱۳-۷ می‌توان مشاهده کرد که هنگامی که آهنربا دقیقا روبه‌روی دندانه استاتور قرار می‌گیرد، شار آهنربا مسیر خود را با عبور از یوغ استاتور می‌بندد. در این حالت بیشترین مقدار شار پیوندی را شاهد هستیم. با چرخش روتور و جابه‌جایی آهنربا از روبه‌روی دندانه استاتور مقدار چگالی شار بین شیارها کاهش یافته و در نقطه‌ای که آهنربا دقیقا زیر دهانه شیار قرار می‌گیرد، شار مسیر خود را تنها از طریق دندانه استاتور بسته و از یوغ استاتور عبور نمی‌کند. در این نقطه شار نشتی در بیشترین مقدار خود قرار دارد.



DOI: 10.30503/nripress.2020.312

(الف) (ب)

شکل ۱۳-۷: (الف) توزیع چگالی شار در هسته و (ب) مسیر عبور شار در هسته

پس از بررسی مقدار گشتاور خروجی، توان خروجی، ریپل گشتاور و چگالی شار در هسته، نوبت به بهینه‌سازی موتور و مطالعه پارامتری ابعاد آن می‌رسد. در فرآیند بهینه‌سازی با هدف کاهش مواد مصرفی، کاهش گشتاور دندانه‌ای تا حد ممکن و بهبود عملکرد موتور به تغییر پارامترها پرداخته می‌شود. پس از بهینه‌سازی ابعاد موتور چند طرح نهایی بهینه با ابعاد مختلف آهنربا بررسی و بهینه‌سازی شده و در نهایت بهترین ساختار از لحاظ بهترین حجم، هزینه و عملکرد انتخاب شده است.

۷-۳-۵- بهینه‌سازی موتور طراحی‌شده

بعد از بررسی و طراحی اولیه موتور BLDC، نوبت به بهینه‌سازی ابعاد و پارامترهای طراحی اولیه موتور در جهت بهبود عملکرد آن می‌رسد. با توجه به فرضیات و محدودیت‌های طراحی اولیه موتور، تنها تعداد محدودی از پارامترهای موتور قابلیت بهینه‌سازی دارند. همچنین اندازه فاصله هوایی بین استاتور و روتور بر اساس محدودیت مکانیکی موتور انتخاب شده است و نمی‌توان اندازه طول آن را به‌منظور بهبود عملکرد موتور کاهش داد. تنها پارامترهایی که باعث تغییر در کاهش هزینه موتور می‌شوند و قابلیت بهینه‌سازی دارند، عبارتند از:

- اندازه طول موثر موتور
- تعداد دور سیم‌پیچی هرفاز استاتور
- پارامترهای دیگری نظیر عرض آهنربا، عرض دندانه‌ها، عمق شیار استاتور و ضخامت یوغ استاتور

این پارامترها نیز در جهت کاهش ریپل گشتاور و کاهش تلفات موتور قابلیت بهینه‌سازی دارند.

- **بهینه‌سازی ابعاد شیار و بررسی گشتاور دندانه‌ای**

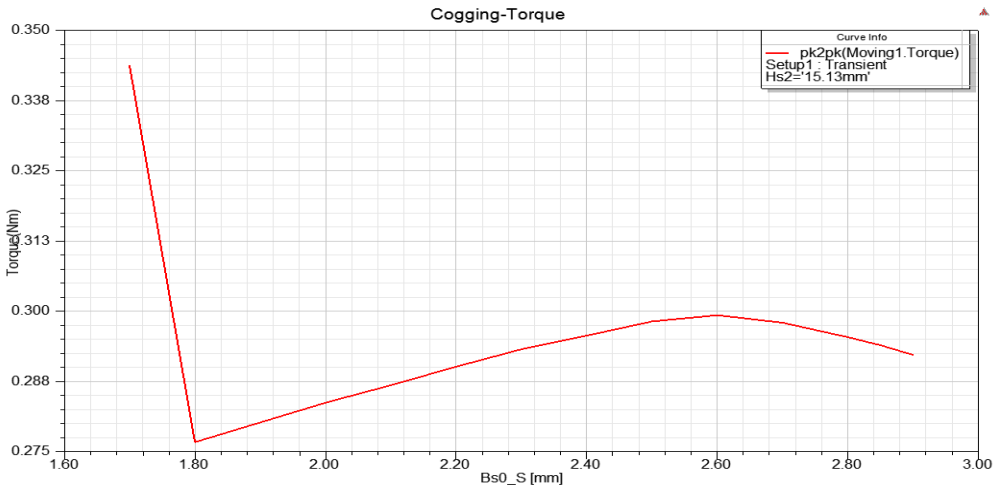
ابعاد شیار یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در میزان مصرف مس، اشباع هسته استاتور و میزان ریپل گشتاور است. به همین دلیل در این بخش چند پارامتر اصلی شیار از جمله عمق شیار، عرض دهانه شیار و عرض دندانه‌ی استاتور (فاصله بین دو شیار موازی) مورد تحلیل قرار گرفته است. برای طراحی و بهینه‌سازی ابعاد شیار موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

- اگر چگالی جریان خیلی زیاد باشد، تلفات مسی افزایش می‌یابد و مشکل خنک کنندگی اتفاق می‌افتد.
- اگر شیار خیلی عمیق و خیلی باریک باشد، شارنشتی شیار، افزایش خواهد یافت.
- اگر پهنای شیار خیلی بزرگ باشد، امکان دارد دندانه‌ها به اشباع بروند.
- اگر بالای شیار خیلی باز باشد، گشتاور دندانه‌ای افزایش خواهد یافت.
- اگر بالای شیار خیلی بسته باشد شار نشتی بالای دندانه شیار افزایش خواهد یافت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

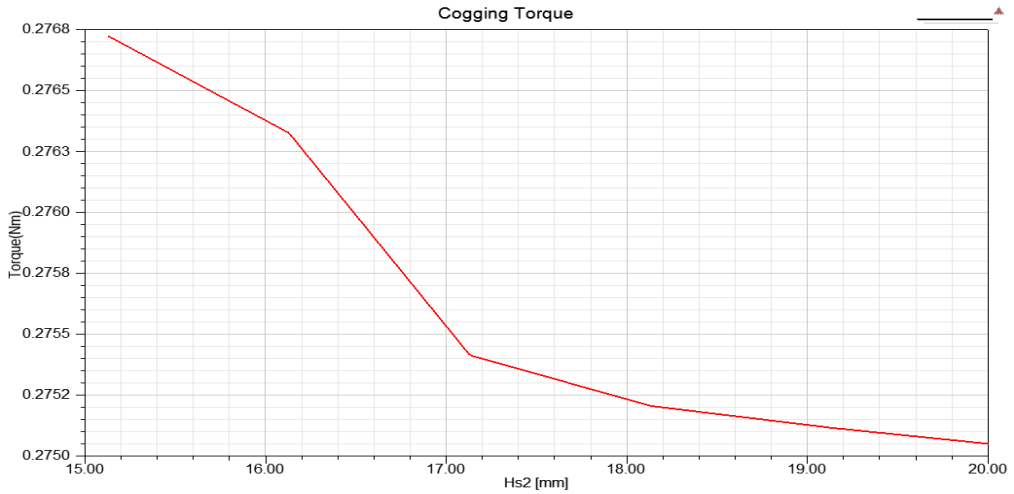
گشتاور دندانه‌ای در موتورهای درون چرخ، دارای مقدار بین ۰تا۱۰ درصد گشتاور نامی هستند [۱۰۲]. نتایج شبیه‌سازی حاصل از تغییرات دهانه شیار و عمق شیار بر گشتاور دندانه‌ای به ترتیب در شکل ۱۴-۷ و شکل ۱۵-۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه یکی از اهداف بهینه‌سازی دست‌یابی به کمترین میزان ریپل گشتاور است، در نتیجه در هر دو شکل مذکور حالتی که گشتاور دندانه‌ای کمترین مقدار را داشته باشد انتخاب خواهد شد. در شکل ۱۴-۷ محور افقی معرف تغییرات دهانه شیار و محور عمودی میزان گشتاور دندانه‌ای بر حسب نیوتون‌متر است و هریک از خطوط رسم شده یک عمق شیار متفاوت را نشان می‌دهد. دهانه شیار در بازه ۱٫۵ تا ۳ میلیمتر و عمق شیار در بازه ۱۵٫۱۳ تا۲۰ میلیمتر متغیر در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱۴-۷ مشخص است در نقطه‌ای که دهانه شیار برابر با ۱٫۸ میلیمتر بوده، ریپل گشتاور در کمترین مقدار خود قرار دارد. شکل ۱۵-۷ مقدار گشتاور دندانه‌ای را بر حسب ارتفاع شیار مختلف و شکل ۱۶-۷ نیز تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب دو پارامتر دهانه شیار و عمق شیار را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، در یک دهانه شیار ثابت، افزایش عمق شیار در میزان گشتاور دندانه‌ای تاثیر چندانی ندارد و تغییرات آن در حد ۰٫۰۰۱ نیوتون‌متر است.

با توجه به نتایج بالا بهترین ابعاد از نظر بهبود گشتاور دندانه‌ای عمق شیار برابر با ۲۰ میلیمتر، عرض دهانه شیار برابر با ۱٫۸ و طول ۳۰ میلیمتر و مقدار گشتاور دندانه‌ای متناسب با این ابعاد برابر با ۰٫۲۷۵ نیوتون‌متر و برابر با ۰٫۹ درصد مقدار گشتاور خروجی است.

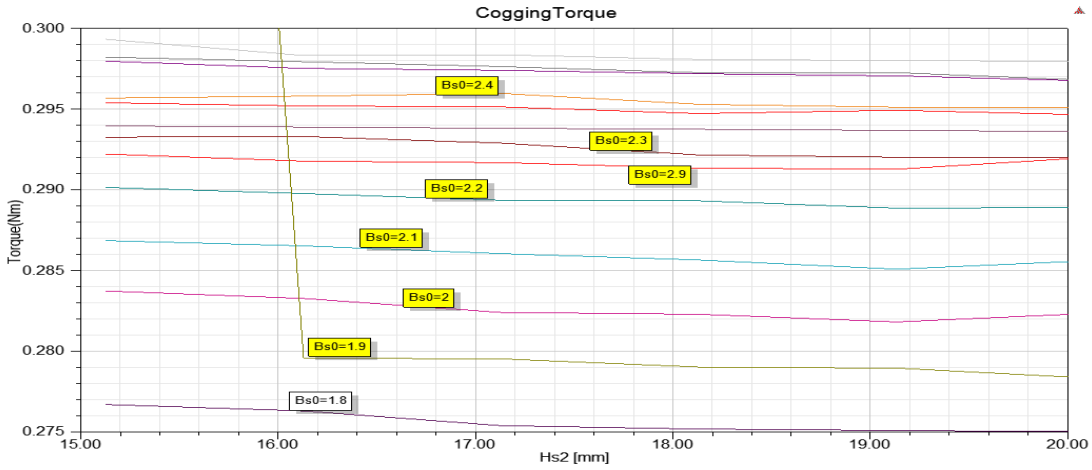


شکل ۱۴-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب تغییرات دهانه شیار

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



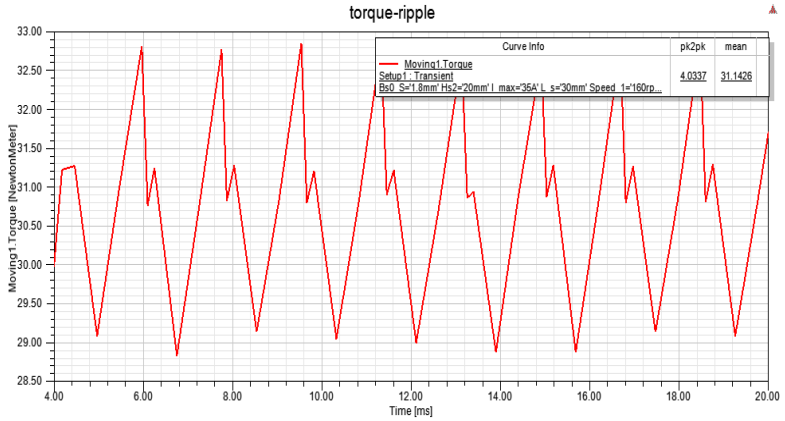
شکل ۱۵-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب تغییرات ارتفاع شیار



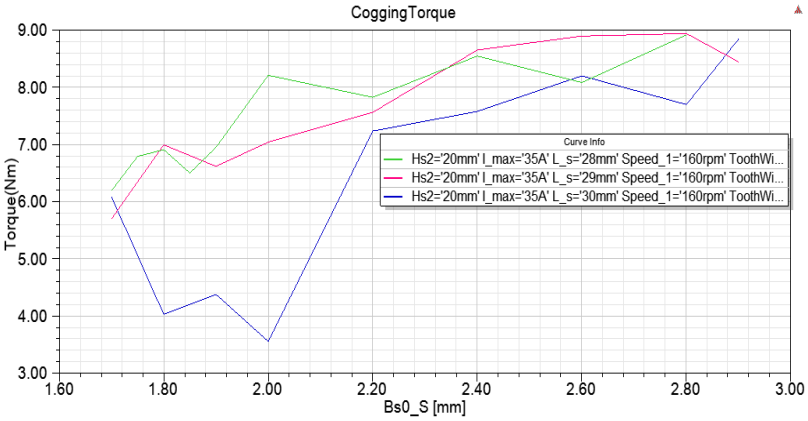
شکل ۱۶-۷: تغییرات گشتاور دندانه‌ای بر حسب دو پارامتر **Bso** و **Hs2**

پس از بهینه‌سازی گشتاور دندانه‌ای به بررسی مقدار گشتاور خروجی و ریپل آن پرداخته شده است. شکل ۱۷-۷، شکل موج گشتاور خروجی و مقدار ریپل آن نشان داده شده است. مطابق با شکل موج گشتاور، مقدار گشتاور خروجی برابر با ۳۱٫۱ نیوتون‌متر و مقدار ریپل آن برابر با ۴ نیوتون‌متر است. درصد ریپل گشتاور در اینجا ۱۲ درصد محاسبه شده است. جهت کاهش ریپل گشتاور در حالت بارداری تغییرات دهانه شیار و طول موتور بر ریپل گشتاور و مقدار متوسط گشتاور خروجی در شکل ۱۸-۷بررسی شده است. در شکل ۱۸-۷ محور افقی تغییرات دهانه شیار و هر یک از خطوط بیانگر یک طول مشخص است همچنین در شکل ۱۹-۷ نمای سه‌بعدی تغییرات ریپل گشتاور بر حسب دو پارامتر طول موتور و عرض دهانه شیار آورده شده است. در شکل ۱۹-۷ نقاط آبی رنگ کمترین میزان ریپل را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با کاهش طول موتور در یک دهانه شیار ثابت، مقدار ریپل گشتاور افزایش یافته است و کمترین ریپل گشتاور در حالتی رخ می‌دهد که میزان عرض دهانه شیار برابر با ۲ میلی‌متر، طول موتور برابر با ۳۰ میلیمتر و عمق شیار برابر با ۲۰ میلیمتر است. در این حالت ریپل گشتاور برابر با ۳٫۵ نیوتون‌متر (۱۱درصد) است.

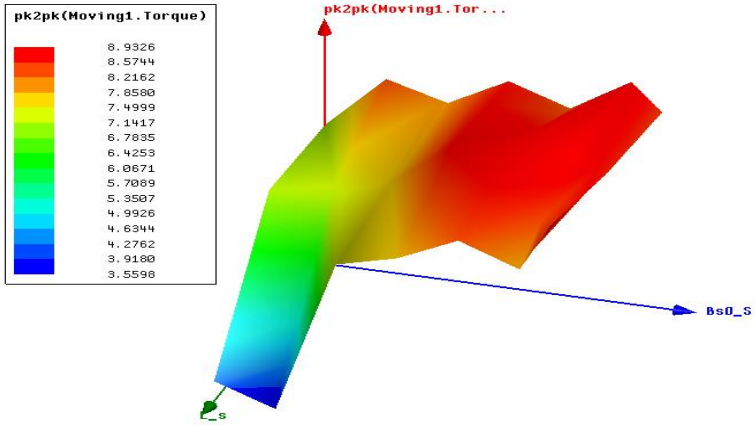
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۷-۷: شکل موج گشتاور خروجی



شکل ۱۸-۷: تغییرات ریپل گشتاور بر حسب تغییرات طول و عرض دهانه شیار



شکل ۱۹-۷: منحنی سه‌بعدی تغییرات ریپل گشتاور

در جدول ۴-۷ ابعاد نهایی و بهینه‌شده طراحی اولیه آورده شده است.

جدول ۴-۷: مشخصات موتور بهینه‌سازی‌شده با ۰/۶۶= **Embrace**

تعداد شیار	۶۳	تعداد قطب	۷۰	تعداد فاز	۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

قطر خارجی استاتور	۳۳۳٫۳ mm	طول موثر موتور	۳۰ mm	قطر خارجی موتور	۳۵۰ mm
ضخامت یوغ روتور	۳ mm	طول فاصله هوایی	۰٫۴۵ mm	قطر داخلی روتور	۳۳۴٫۲ mm
ضخامت یوغ استاتور	۱۱ mm	قطر داخلی استاتور	۲۶۱٫۹ mm		
مشخصات خروجی موتور					
توان خروجی	۵۱۰ w	گشتاور خروجی	۳۰٫۴ Nm	ریپل گشتاور	۳٫۵ Nm
گشتاور دندانه‌ای	۰٫۲۸۲ Nm	سرعت موتور	۱۶۰rpm	سرعت بی‌باری	rpm ۳۳۷٫۷
تلفات مسی	۱۱۸ w	تلفات هسته و تلفات بادخوری	۳۷ w	ماکزیمم جریان	۳۵ A
چگالی جریان	۴٫۹ A/mm^2	راندمان	% ۷۶٫۵	متوسط جریان ورودی	۱۸٫۵ A

ابعاد شیار			
عمق شیار	۲۰mm	دهانه شیار	۲ mm
تعداد لایه ها در هر شیار	۲	پهنای شیار	۹ mm
تعداد دور سیم در هر شیار	۱۶	عرض دندانه استاتور	۷ mm
قطر سیم	۰٫۹۱۲ mm	ارتفاع دهانه شیار	۱٫۳ mm
پرشدگی شیار	۵۲٪		

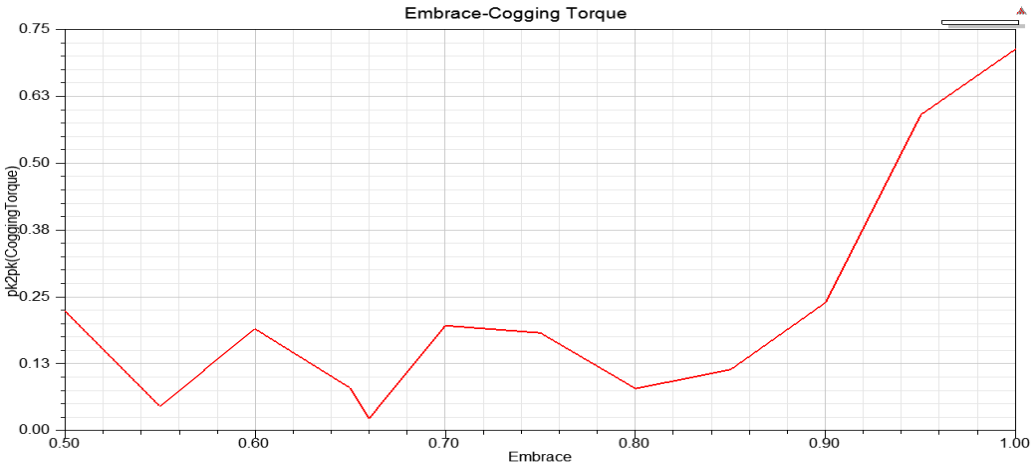
ابعاد آهنربا			
ارتفاع آهنربا	۵ mm	طول آهنربا	۳۰ mm
چگالی شار پسماند	۰٫۴ T	عرض آهنربا	۱۰ mm
Embrace	۰٫۶۶	شدت میدان ضد مغناطیسی	۲۸۰ kA/m

- **بهینه‌سازی نسبت کمان قطب به گام قطب**

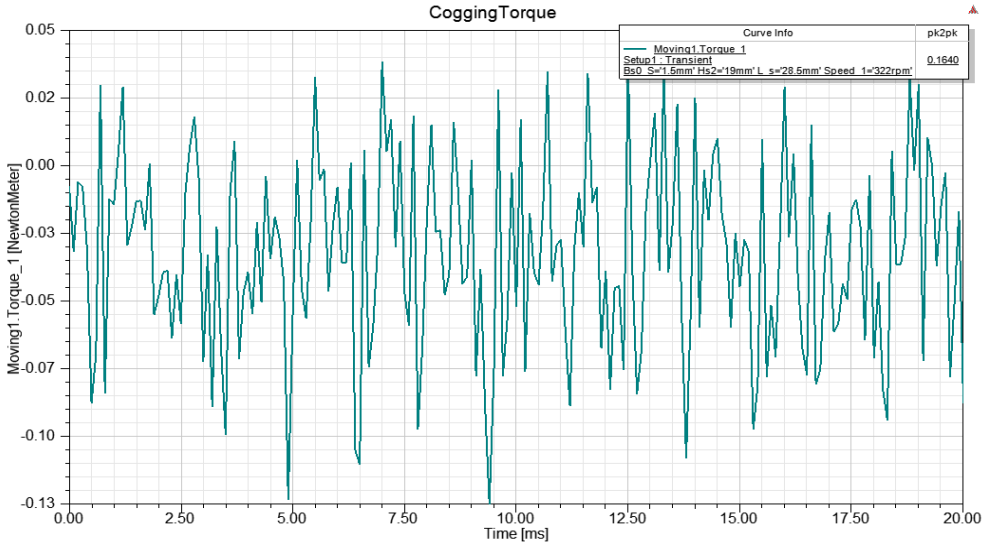
همانطور که در بخش‌های گذشته ذکر شد، نسبت گام قطب به کمان قطب (Embrace) همواره عددی کمتر یا مساوی ۱ است و طبق مطالب قبلی مقدار بهینه این نسبت وابسته به نوع موتور، نوع آهنربای انتخاب شده و عوامل دیگر عددی بین ۰٫۶۶تا ۱ است. نتایج شبیه‌سازی مقادیر مختلف نسبت کمان قطب به گام قطب و گشتاور دندانه‌ای متناظر با آن‌ها درشکل ۲۰-۷ آورده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در مقدار نسبت‌های پایین دامنه ریپل کمتر است و با افزایش این نسبت تا مقدار ۱ گشتاور دندانه‌ای افزایش محسوسی داشته است. با توجه به شکل چند مقدار مختلف که دارای دامنه گشتاور دندانه‌ای کمتر ومقدار گشتاور خروجی متناسبی هستند انتخاب شده، هرکدام بهینه‌سازی شده و در نهایت نتایج بهینه‌سازی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه و نتایج آن آورده شده است. مقادیر Embrace برابر با ۰٫۶۶، ۰٫۸ و ۰٫۹۷ انتخاب شده است که ابعاد آهنرباهای متناظر با هرکدام به ترتیب برابر با ۵×۱۰، ۵×۱۲و ۵×۱۵ میلیمتر است. لازم به ذکر است که در تمامی مراحل طراحی و بهینه‌سازی که از ابتدای فصل ذکر

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شد، از مقدار۰٫۶۶=Embace یعنی آهنربا با ابعاد ۵×۱۰ استفاده شده است.

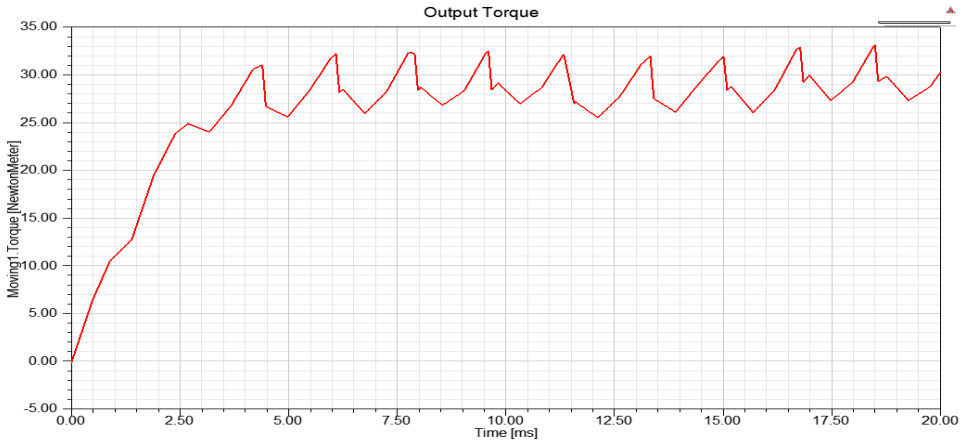


شکل ۲۰-۷: مقادیر گشتاور دندانه‌ای بر حسب **Embrace**های مختلف



شکل ۲۱-۷: شکل موج گشتاور دندانه‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۲-۷: شکل موج گشتاور خروجی

جدول ۵-۷: مشخصات بهینه‌شده طرح با Embrace=۰/۸

توان خروجی	۴۹۵ w	گشتاورخروجی	۲۹/۵ Nm	ریپل گشتاور	۷ Nm
گشتاور دندانه‌ای	۰/۱۶۴ Nm	سرعت موتور	۱۶۰ rpm	سرعت بی‌باری	۳۲۲ rpm
تلفات مسی	۱۰۲ w	تلفات هسته و تلفات بادخوری	۴۴ w	حداکثر جریان ورودی	۳۳ A
چگالی جریان	۴/۷ A/mm^2	طول موتور	۲۸/۵ mm	متوسط‌جریان ورودی	۱۸ A
راندمان	% ۷۷/۳	جریان‌موثر هر فاز	۲۳/۶ A		
ابعاد شیار					
عمق شیار	۱۹ mm	دهانه شیار	۱/۵ mm	قطر سیم	۰/۹ mm
تعدادرشته سیم موازی‌شده در هر دور	۸	پهنای شیار	۹ mm	ارتفاع دهانه شیار	۱/۳ mm
تعداد دور سیم در هر شیار	۱۶	عرض دندانه استاتور	۷ mm	پرشدگی شیار	٪ ۵۲
ابعاد آهنربا					
ارتفاع آهنربا	۵ mm	طول آهنربا	۲۸/۵ mm		
Embrace	۰/۸	عرض آهنربا	۱۲ mm		

- **نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آهنربا با Embrace =۰/۸**

در این حالت با نسبت کمان قطب به گام قطب برابر با ۰/۸، انتظار می‌رود به دلیل افزایش عرض آهنربا مقدار چگالی شار در فاصله هوایی افزایش یافته و مقدار گشتاور خرجی افزایش یابد، در نتیجه می‌توان مقدار طول ماشین و یا حد ماکزیمم جریان را کاهش داد. کاهش جریان موتور مزایایی همچون کاهش تلفات مسی و کاهش طول موتور مزایایی همچون کاهش تلفات هسته، کاهش طول سیم‌پیچی و به طور کلی کاهش مواد مصرفی و هزینه کلی موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

دارد. در ابتدا طرح اولیه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است. سپس نتایج نهایی حاصل از بهینه‌سازی در جدول ۵-۷ آورده شده است. در شکل ۲۱-۷ و در شکل ۲۲-۷ به ترتیب منحنی گشتاور دندانه‌ای و مشخصه گشتاور خروجی و ریپل آن آورده شده است. همانطور که در شکل ۲۱-۷ مشخص شده است.

جدول ۶-۷: مشخصات بهینه‌شده طراحی با Embrace=۰/۹۷

توان خروجی	۵۱۰ w	گشتاور خروجی	Nm ۳۰/۴	ریپل گشتاور	۸/۵ Nm
گشتاور دندانه‌ای	۰/۲۷۶ Nm	سرعت موتور	rpm ۱۶۰	سرعت بی‌باری	۳۱۸ rpm
تلفات مسی	۱۰۰ w	تلفات هسته و تلفات بادخوری	۴۷ w	حداکثرجریان ورودی	۳۳ A
چگالی جریان	۴/۷ A/mm^2	طول موتور	mm ۲۷/۵	متوسط جریان ورودی	۱۸/۲۵ A
راندمان	۷۷/۵ %	جریان موثر هر فاز	۲۳/۵ A		
ابعاد شیار					
عمق شیار	۱۸ mm	دهانه شیار	mm ۱/۶	قطر سیم	۰/۷۶ mm
تعداد رشته سیم موازی شده درهردور	۱۱	پهنای شیار	۹ mm	ارتفاع دهانه شیار	۱/۳ mm
تعداد دورسیم در هر شیار	۱۶	عرض دندانه استاتور	۷ mm	پرشدگی شیار	٪ ۵۴
ابعاد آهنربا					
ارتفاع آهنربا	۵ mm	طول آهنربا	۲۷/۵ mm		
Embrace	۰/۹۷	عرض آهنربا	۱۵ mm		

- **نتایج شبیه‌سازی آهنربا Embrace=۰/۹۷**

در بعضی از موتورهای الکتریکی که آهنرباها به صورت سطحی روی روتور قرار می‌گیرد جهت ساده‌تر شدن فرآیند ساخت و جایگذاری آهنرباها روی سطح، فاصله بین آهنرباها را بسیار کم در نظر گرفته و آهنرباها درکنار یکدیگر قرار داده می‌شوند در این حالت مقدار نسبت کمان قطب به گام قطب برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. در این طراحی با توجه به نکات ذکر شده، مقدار Embrace برابر با ۰/۹۷در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز مشابه حالت قبلی با افزایش ابعاد آهنربا مقدار بارگذاری مغناطیسی افزایش یافته و می‌توان برای جریان ورودی و همچنین طول موتور مقدار کمتری در نظر گرفت که این امر موجب کاهش تلفات مسی خواهد شد. طرح فوق شبیه‌سازی شده و نتایج بهینه‌سازی آن در جدول ۶-۷ آورده شده است.

- **مقایسه و انتخاب مشخصات طراحی نهایی**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

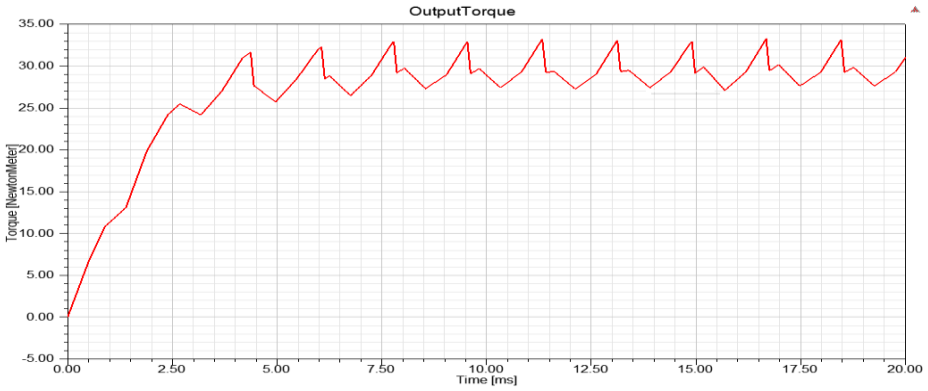
پس از بهینه‌سازی هرسه طراحی پیشنهادی، مشخصات آنها در جدول ۷-۷ مقایسه شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود مقدار راندمان در هر سه حالت تقریبا نزدیک به یکدیگر است و این به‌دلیل اختلاف جزئی در میزان تلفات مسی است. برای مثال در حالت Embrace برابر با ۰٫۶۶دامنه جریان و طول موتور نسبت به حالت با Embrace برابر با ۰٫۹۷، بیشتر است در نتیجه مقدار تلفات مسی بیشتر خواهد شد. با توجه به اینکه اندازه عرض آهنربا در حالت اول برابر با ۱۰ میلیمتر است، چگالی شار در فاصله هوایی مقدار کمتری نسبت به آهنربا با عرض ۱۵ میلیمتر است، از همین جهت انتظار می‌رود که تلفات هسته نیز مقدار کمتری داشته باشد. مقدار گشتاور دندانه‌ای در حالت اول بیشتر از دو حالت دیگر و میزان راندمان آن نیز نسبت به دو طرح دیگر مقدار کمتری محاسبه شده است، پس می‌توان نتیجه گرفت که از فضای موجود برای آهنربا به طور مناسب استفاده نشده است و میتوان عرض آهنربا را افزایش داد. در این طرح به دلیل پایین درنظر گرفتن مقدار نسبت قوس قطب به گام قطب از مقدار فضای موجود برای آهنربا، به طور کامل استفاده نشده است. به بیان دیگر به دلیل کم بودن مقدار بارگذاری مغناطیسی فریت، جهت جبران این خاصیت میتوان از حجم بیشتری از آهنربا استفاده کرد.

جدول ۷-۷: مقایسه سه طرح شبیه‌سازی‌شده

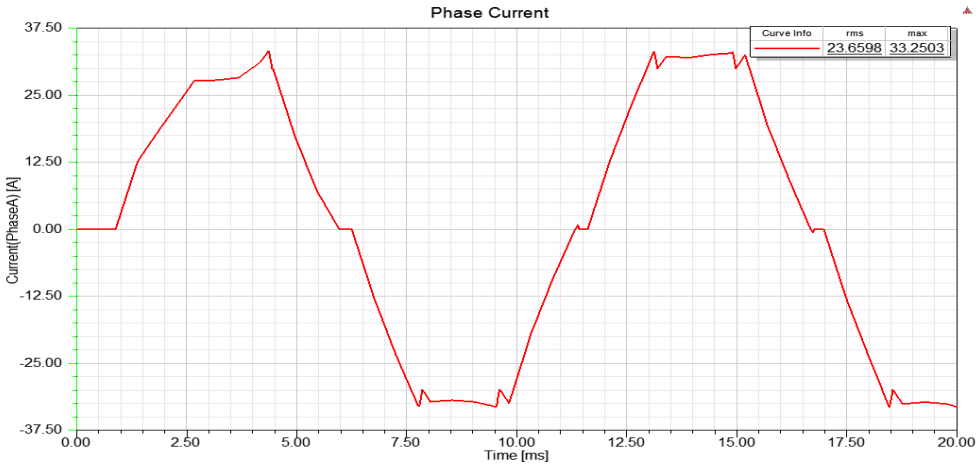
Embrace / پارامترها	۰٫۹۷	۰٫۸	۰٫۶۶
سایز آهنربا (mm × mm)	۵ × ۱۵	۵ × ۱۲	۵ × ۱۰
طول موتور (mm)	۲۷٫۵	۲۸٫۵	۳۰
تلفات مسی (w)	۱۰۰	۱۰۲	۱۱۸
دیگر تلفات (w)	۴۷	۴۴	۳۷
راندمان (٪)	۷۷٫۵	۷۷٫۳	۷۶٫۵
درصد ریپل‌گشتاور دندانه‌ای (٪)	۰٫۹	۰٫۵۴	۰٫۹
متوسط جریان ورودی (A)	۱۸٫۲۵	۱۸	۱۸٫۵

عاملی که در اینجا اهمیت بسیاری دارد مقدار گشتاور دندانه‌ای و راندمان است. همانطور که در جدول مشخص شده است، کمترین میزان گشتاور دندانه‌ای برابر با ۰٫۵درصد و مربوط به حالت Embrace برابر با ۰٫۸ است. همچنین راندمان این حالت برابر با ۷۷٫۳ درصد محاسبه شده که مقدار قابل قبولی است. چگالی جریان نیز کمتر از ۵ آمپر بر میلیمترمربع محاسبه شده است و از نظر خنک‌کاری نیازی به خنک‌کننده ندارد. در نتیجه حالت Embrace = ۰/۸ به عنوان طرح اصلی انتخاب شده است. مشخصه گشتاور خروجی در شکل ۲۳-۷، شکل موج جریان در شکل ۲۴-۷، توزیع چگالی شار در هسته در شکل ۲۵-۷ و چگالی شار در دندانه‌های استاتور در شکل ۲۶-۷ آورده شده‌اند. در شکل ۲۵-۷ توزیع چگالی شار در هسته نقاط قرمز رنگ، بیشترین چگالی شار را دارا هستند و مقدار ماکزیمم چگالی شار در هسته برابر با ۱٫۴ تسلا است که کمتر از مقدار ماکزیمم چگالی شار ورقه مورد استفاده است و هسته به اشباع نخواهد رفت.

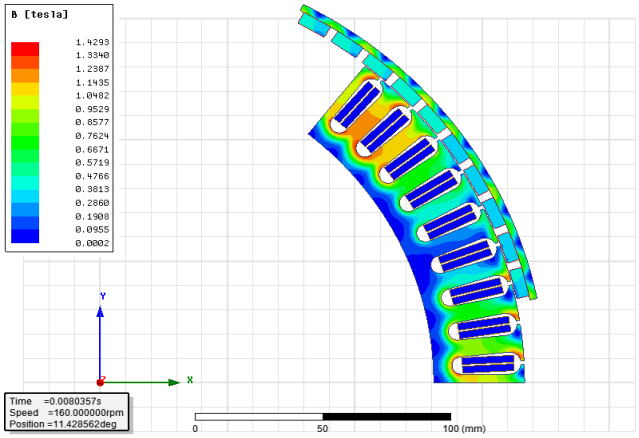
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۳-۷: شکل موج گشتاور خروجی

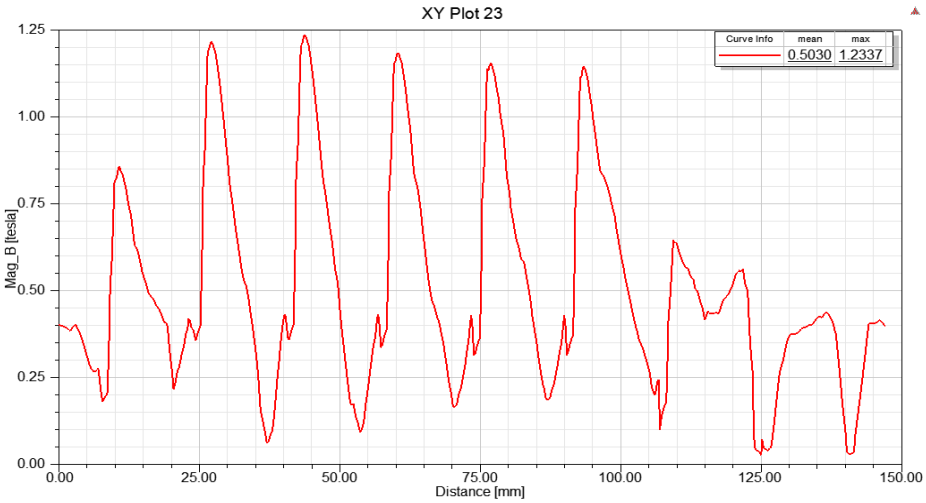


شکل ۲۴-۷: شکل موج جریان خروجی



شکل ۲۵-۷: توزیع چگالی شار در هسته

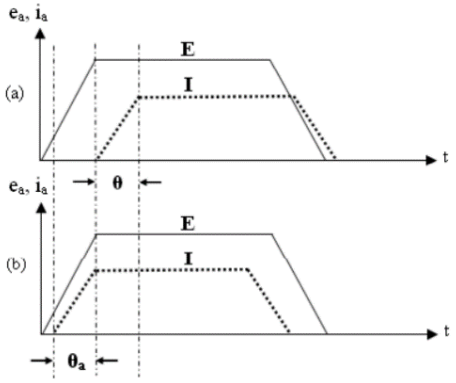
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۶-۷: توزیع چگالی شار در دندانه‌های استاتور

۷-۳-۶- دست‌یابی به توان طراحی با اعمال شیفت فاز

همانطور که در ابتدای فصل عنوان شد، یکی از اهداف این طراحی دست‌یابی به توان ۵۰۰ در حالت عملکرد با دو سرعت متفاوت است. طبق نتایج خروجی نرم‌افزار در سرعت ۱۶۰دور دردقیقه توان خروجی برابر با ۵۱۶ وات محاسبه شد. اما در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه که بیشتر از سرعت نامی است و در ناحیه تضعیف شار یا توان ثابت قرار دارد، مقدار توان خروجی کمتر از۵۰۰ وات محاسبه گردید. برای دست‌یابی به این هدف نیاز است که ناحیه تضعیف شار افزایش یابد. توسط درایو و با اعمال شیفت فاز جریان می‌توان به افزایش شیب و بهره‌برداری از حداکثر ظرفیت موتور دست یافت. اساس این روش بر مبنای پیشفاز نمودن جریان استاتور نسبت به ولتاژ ضدمحرکه است تا جریان استاتور در زمانی که ولتاژ ضدمحرکه وارد ناحیه تخت خود می شود، بیشترین مقدار خود را دارا باشد. پیش فاز نمودن جریان نسبت به ولتاژ ضدمحرکه سبب تغییر زاویه بین بردارهای mmf مغناطیسی روتور و استاتور شده و به دلیل عکس‌العمل آرمیچر، شار در فاصله هوایی کاهش می‌یابد. به عبارتی یک نیروی ضدمغناطیسی سبب مغناطیس‌زدایی از مغناطیس دائم روتور یا همان آهنرباها می‌شود.



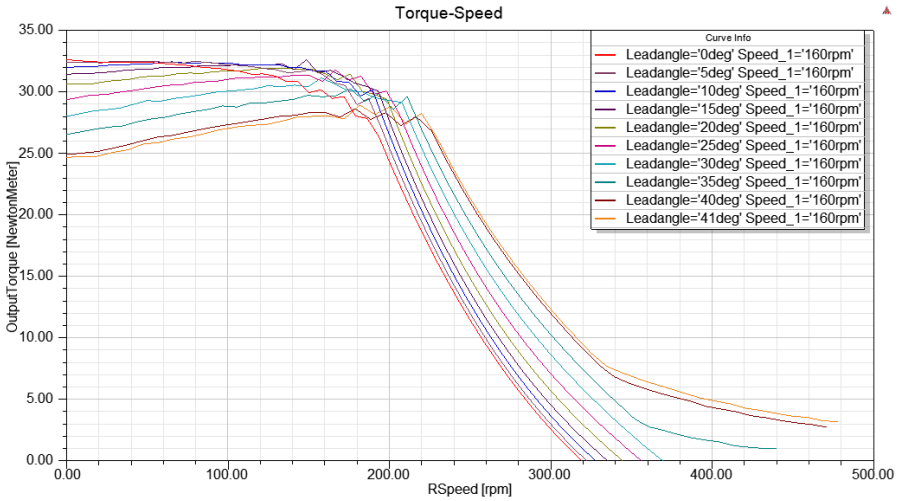
شکل ۲۷-۷: شکل موج جریان و ولتاژ ضدمحرکه در حالت بدون اعمال شیفت فاز و پس از اعمال آن [۱۰۳]

مزایای استفاده از شیف فاز در موتور عبارت است از [۱۰۳]:

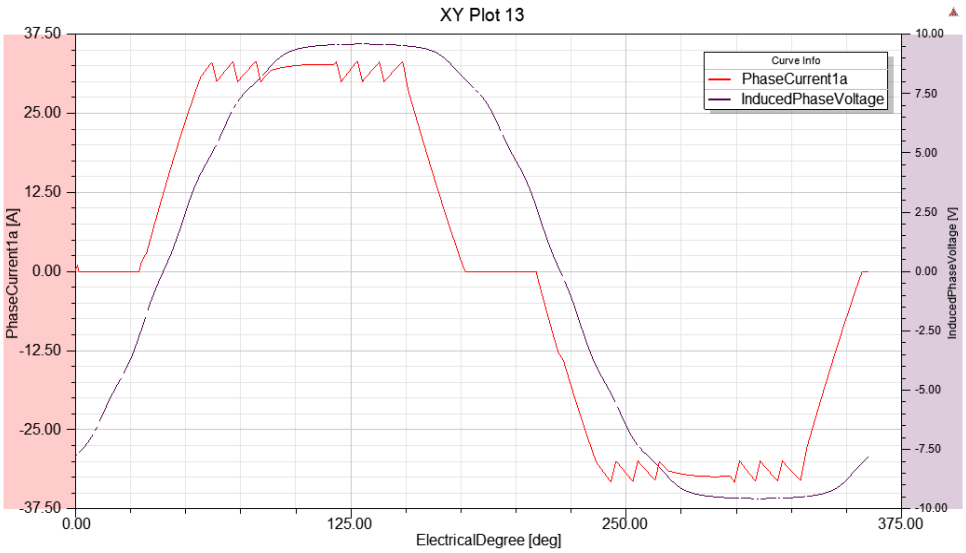
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

- افزایش ماکزیمم سرعت
- کاهش ماکزیمم گشتاور در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی

در شکل ۲۸-۷ منحنی گشتاور خروجی با شیفت فازهای مختلف از زاویه صفر تا ۴۱ درجه آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده است، شیفت فاز تا زاویه ۳۰ درجه امکان پذیر است و در شیفت فازهای بیشتر از ۳۰ درجه موتور به حالت ناپایدار درآمده است. دلیل این امر را میتوان درشکل ۲۹-۷ مشاهده نمود در این شکل، شکل موج ولتاژ و جریان با شیفت فاز ۴۰ درجه آورده شده است. با توجه به شکل میتوان دریافت که از زاویه ۳۰ درجه به بعد بازه‌ی مثبت جریان در ناحیه هدایت مثبت ولتاژ قرار نگرفته و باعث ایجاد گشتاور منفی (عملکرد ژنراتوری) و بروز ناپایداری در موتور شده است. شکل موج گشتاور-سرعت با شیفت فاز صفر تا ۳۰ درجه و منحنی اولیه با شیفت فاز صفر، در شکل ۳۰-۷ آورده شده است.

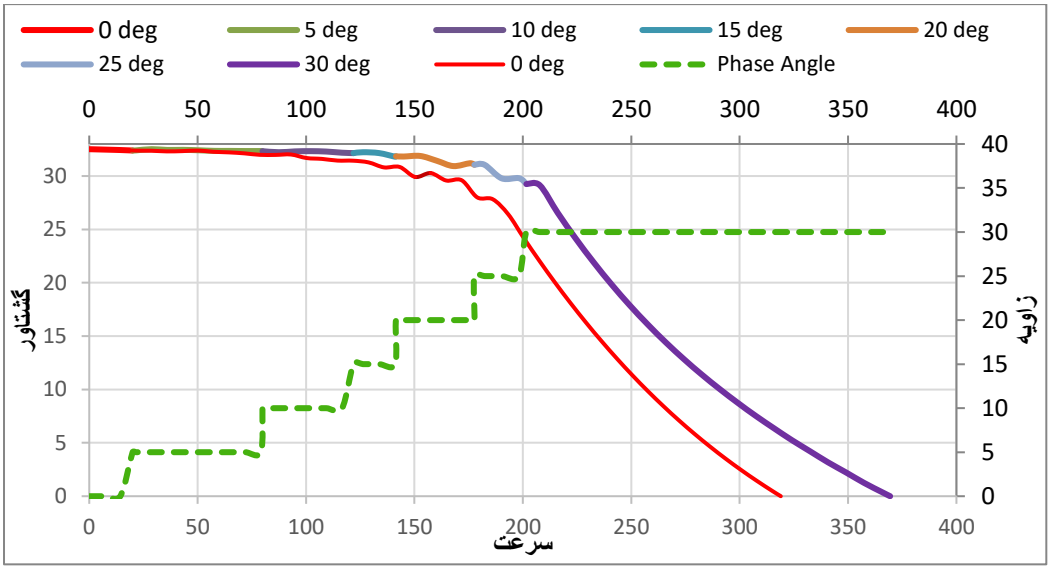


شکل ۲۸-۷: منحنی‌های گشتاور سرعت به ازای شیفت فازهای مختلف



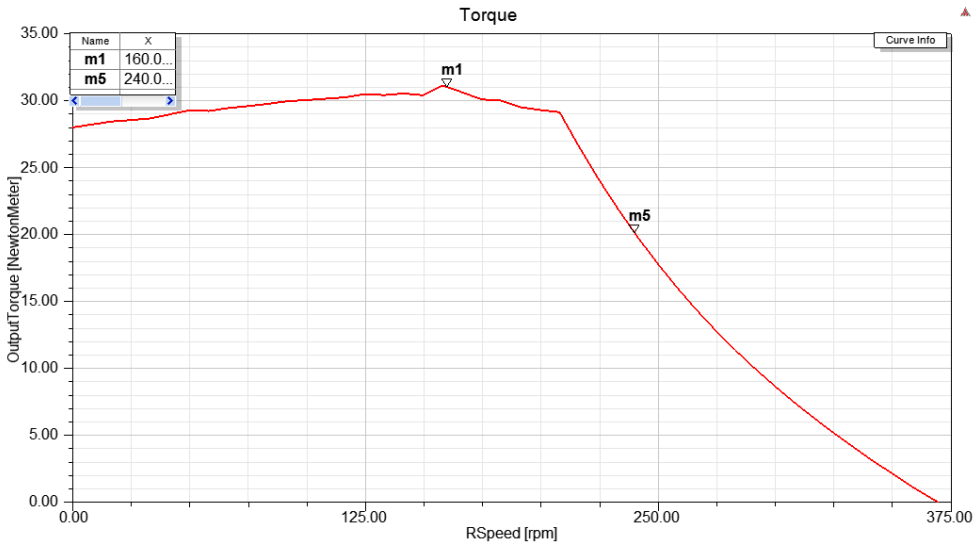
شکل ۲۹-۷: شکل موج جریان و ولتاژ در حالت شیفت فاز ۴۰ درجه

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



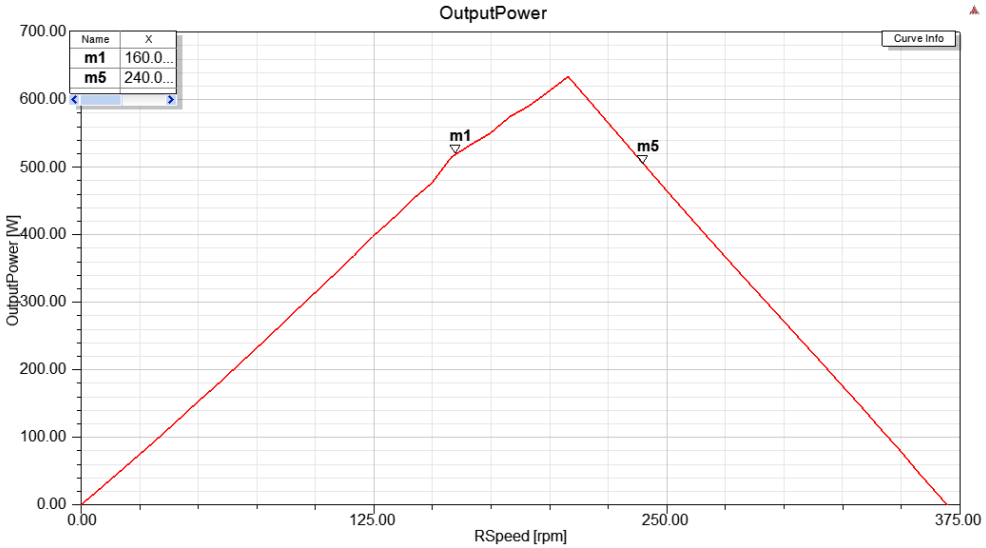
شکل ۳۰-۷: منحنی گشتاور سرعت با شیفت فاز صفر تا ۳۰ درجه

پس از اعمال شیفت فاز و مشخص شدن شیب منحنی در ناحیه تضعیف شار، می‌توان مشاهده کرد که با شیفت فاز ۳۰ درجه در سرعت ۲۴۰ دور دردقیقه، گشتاور خروجی برابر با ۲۰ نیوتون‌متر و گشتاور در سرعت ۱۶۰ دوردر دقیقه برابر با ۳۰٫۸۵ نیوتون‌متر محاسبه شده است. همچنین سرعت بی‌باری به سرعت ۳۶۹٫۴ دور دردقیقه افزایش یافته است. منحنی گشتاور-سرعت و توان خروجی با شیفت فاز ۳۰ درجه در شکل ۳۱-۷ و شکل ۳۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳۱-۷: مشخصه گشتاور-سرعت با شیفت فاز ۳۰ درجه

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۳۲-۷: منحنی توان خروجی موتور

۷-۳-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل سه طرح پیشنهادی طراحی، بهینه‌سازی و نتایج هرکدام ذکر شد. پس از آن نتایج خروجی هر سه طرح با یکدیگر مقایسه و بهترین طرح از لحاظ راندمان، هزینه، سهولت ساخت و مشخصات خروجی انتخاب شد. در نهایت جهت دست‌یابی به نقطه‌کار مورد نظر در ناحیه توان ثابت از شیفت فاز استفاده شد. مشخصات نهایی طرح در جدول ۸-۷ آورده شده است. دراین طراحی جهت جنس هسته استاتور و روتور از ورق خاص که مشخصات آن در فصول قبل ذکر شد، استفاده شده است. همچنین جهت جنس آهنربا از فریت استفاده شده و در جدول مشخصات آن آورده شده است.

جدول ۸-۷: مشخصات نهایی موتور

مشخصات خروجی موتور با شیفت فاز ۰ درجه					
توان خروجی	۴۹۵ w	گشتاور خروجی	۲۹٫۵ Nm	ریپل گشتاور	۷ Nm
گشتاور دندانه‌ای	۰٫۱۶۴ Nm	سرعت موتور	۱۶۰ rpm	سرعت بی‌باری	۳۲۲ rpm
تلفات مسی	۱۰۲ w	تلفات هسته	۳۳ w	حداکثر جریان هر فاز	۳۳ A
چگالی جریان	۴٫۷ A/mm^2	طول موتور	۲۸٫۵ mm	متوسط جریان ورودی از باتری	۱۸ A
راندمان	٪ ۷۷٫۳	جریان موثر هر فاز	۲۳٫۶ A		
مشخصات خروجی موتور با شیفت فاز ۳۰ درجه					
توان خروجی در سرعت ۱۶۰rpm	۵۰۷ w	گشتاور خروجی در سرعت ۱۶۰rpm	۳۰٫۲ Nm	راندمان در سرعت ۱۶۰rpm	٪ ۷۷٫۲

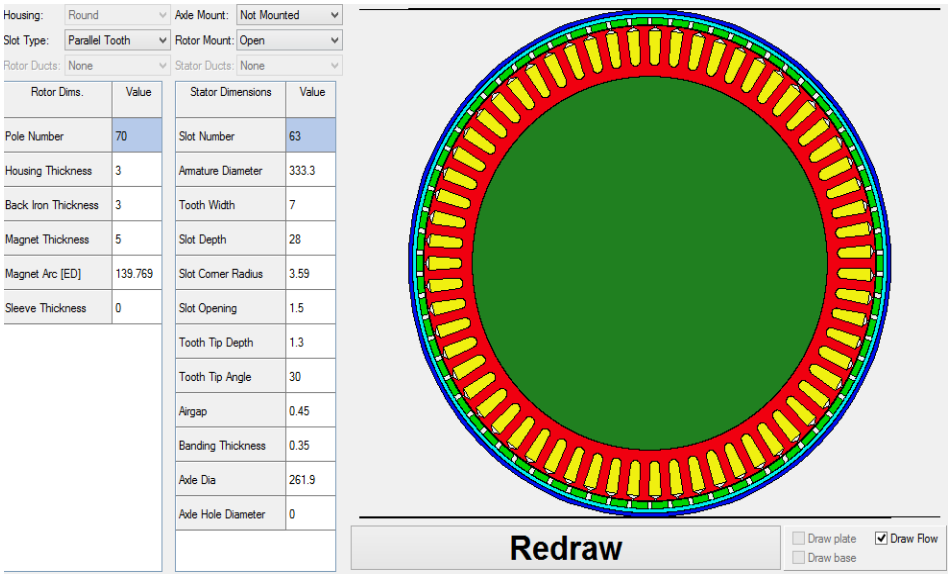
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

توان خروجی در سرعت ۲۴۰rpm	۵۰۳ w	گشتاور در سرعت ۲۴۰rpm	۲۰Nm	راندمان در سرعت ۲۴۰rpm	٪ ۸۱
سرعت بی‌باری	۳۷۴ rpm				
ابعاد شیار					
عمق شیار	۱۹ mm	دهانه شیار	۱٫۵ mm	قطر سیم	۰٫۹ mm
تعداد لایه‌ها در هر شیار	۲	ارتفاع دهانه شیار	۱٫۳ mm	پرشدگی شیار	٪۵۲
تعداد دور سیم در هر شیار	۱۶	تعداد رشته سیم موازی‌شده در هر دور	۸	پهنای شیار	۹ mm
عرض دندانه استاتور	۷ mm				
ابعاد آهنربا					
ارتفاع آهنربا	۵ mm	طول آهنربا	۲۸٫۵ mm		
Embrace	۰٫۸	عرض آهنربا	۱۲ mm		
چگالی شار باقی‌مانده	۰٫۴ T	شدت میدان ضدمغناطیسی	۲۸۰ kA/m		

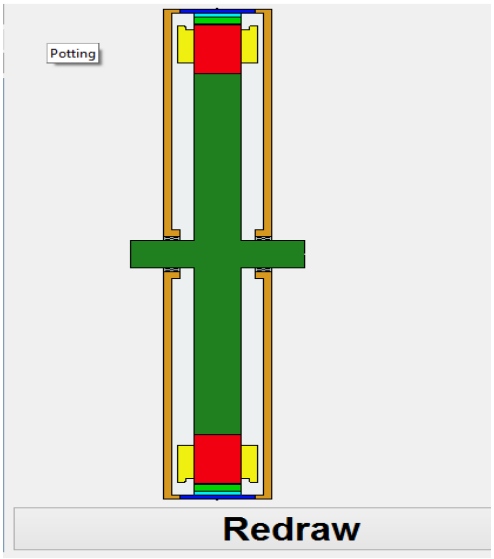
۴-۷- تحلیل حرارتی الکتروموتور طراحی‌شده

مدار حرارتی در حالت پایدار شامل مقاومتهای حرارتی و منابع گرمائی بین اجزا تشکیل‌دهنده موتور است. برای آنالیز گذرا، ظرفیت‌های حرارتی و گرمایی، با تغییر در میزان انرژی داخلی بدنه نسبت به زمان تغییر می‌کند. تحلیل حرارتی موتور با نرم‌افزار Motor-CAD انجام شده است. نرم‌افزر موتورکد یک نرم‌افزار جهت تحلیل رفتار حرارتی اجزاء مختلف موتور است. در این نرم‌افزار جهت تحلیل موتور ابتدا نوع و مدل موتور تعریف شده، سپس ابعاد موتور انتخاب شده و سیم‌پیچی موتور تعریف می‌شود و در انتها اطلاعات مورد نیاز جهت خنک کاری، تلفات و جنس مواد در نرم افزار وارد می‌شود. میزان مقاومت های حرارتی در این نرم افزار به صورت خودکار و بر اساس پارامترها و داده‌های مواد مصرفی محاسبه می‌شود. در شکل ۳۳-۷ نمای روبه‌رو و در شکل ۳۴-۷ نمای جانبی موتور در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۳۳-۷: نمای رو به روی الکتروموتور در نرم‌افزار **MotorCAD**

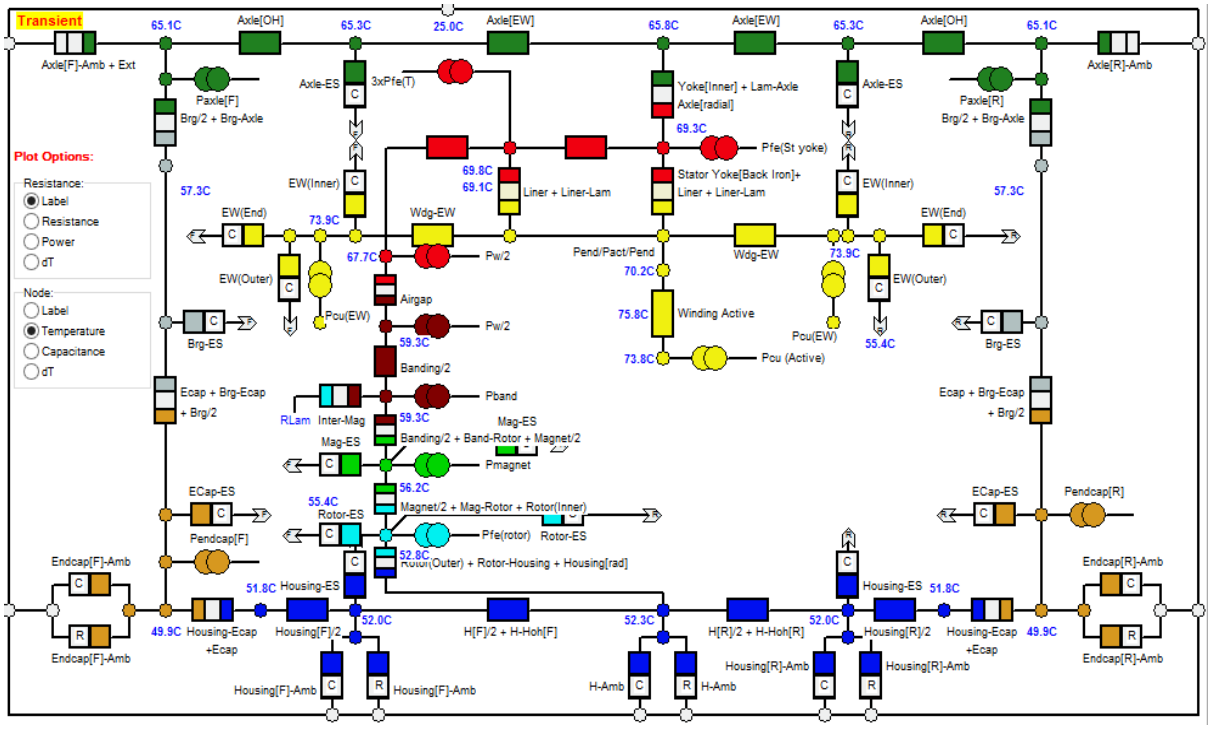


شکل ۳۴-۷: نمای جانبی الکتروموتور در نرم‌افزار **MotorCAD**

۷-٤-۱- حالت‌های عملکرد مختلف موتور

در تحلیل حرارتی موتور سه حالت عملکردی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این ۳ حالت شامل: حالت عملکرد پیوسته در زمان طولانی، حالت عملکرد پیوسته کوتاه‌مدت و حالت عملکرد کوتاه‌مدت به صورت متناوب است. در ادامه نتایج تحلیل هر یک از حالت‌های ذکرشده آورده شده است. مدار معادل کلی موتور برای تحلیل در حالت گذرا در شکل ۳۵-۷ نشان داده شده است. در تمامی حالت‌ها دمای محیط برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۳۵-۷: مدار معادل الکتروموتور

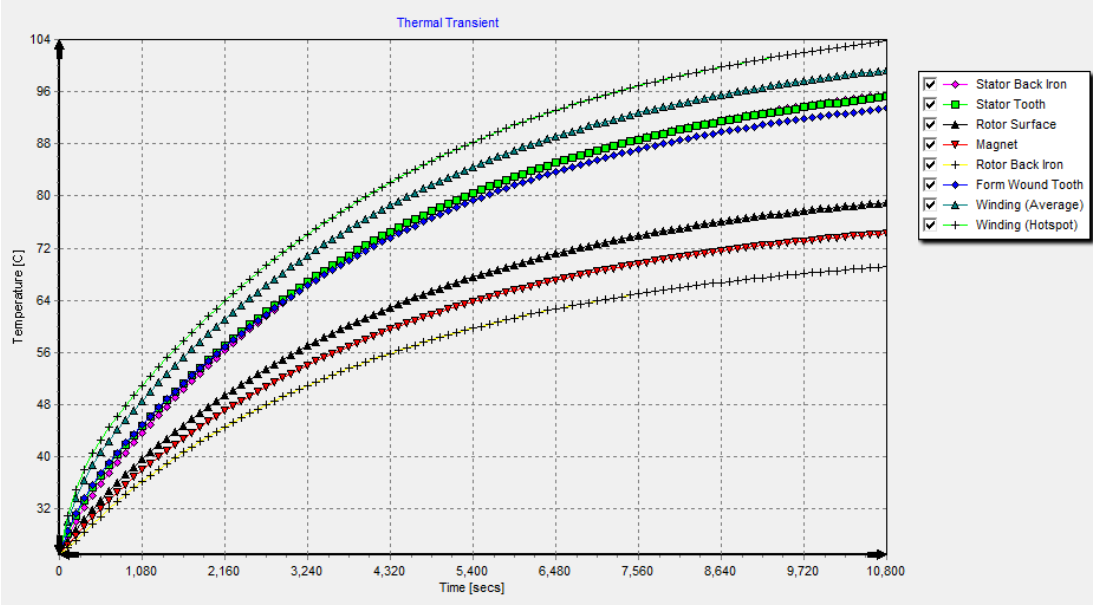
۲-۴-۷- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد پیوسته (مود S3)

در این حالت عملکرد حرارتی موتور در مدت زمان پیوسته و طولانی مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت فرض شده است که یک بار ثابت در مدت زمان طولانی به ماشین اعمال شود تا موتور به حالت تعادل حرارتی برسد. مدت زمان عملکرد موتور برابر با ۳ ساعت درنظر گرفته شده است. نمودار عددی تغییرات دمای اجزاء مختلف موتور بر حسب زمان در شکل ۳۶-۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش زمان، دمای قسمت‌های مختلف افزایش یافته است. بیشترین دما مربوط به قسمت سیم‌پیچی است و بعد از سیم‌پیچی بیشترین دما به‌ترتیب مربوط به دندانه‌های استاتور، یوغ استاتور، سطح روتور، آهنرباها و یوغ روتور است. بیشترین دمای قسمت های مختلف موتور در جدول ۹-۷ آورده شده است. طبق مطالب عنوان شده بیشترین دما مربوط به سیم‌پیچی و برابر با ۱۰۹٫۴۸ درجه سانتی‌گراد است.

جدول ۹-۷: دمای قسمت‌های مختلف الکتروموتور طی عملکرد پیوسته

یوغ روتور	**۷۲٫۶ c°**	**یوغ استاتور**	**۱۰۱ c°**	**ماکزیمم دمای سیم‌پیچی**	**۱۰۹٫۴۸ c°**	**آهنرباها**	**۷۸ c°**
سطح روتور	۸۳٫۲ c°	درپوش‌ها	۶۸ c°	متوسط دمای سیم‌پیچی	۱۰۴٫۸ c°		

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



S1شکل ۳۶-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی

۳-۴-۷- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد کوتاه‌مدت (مود S2)

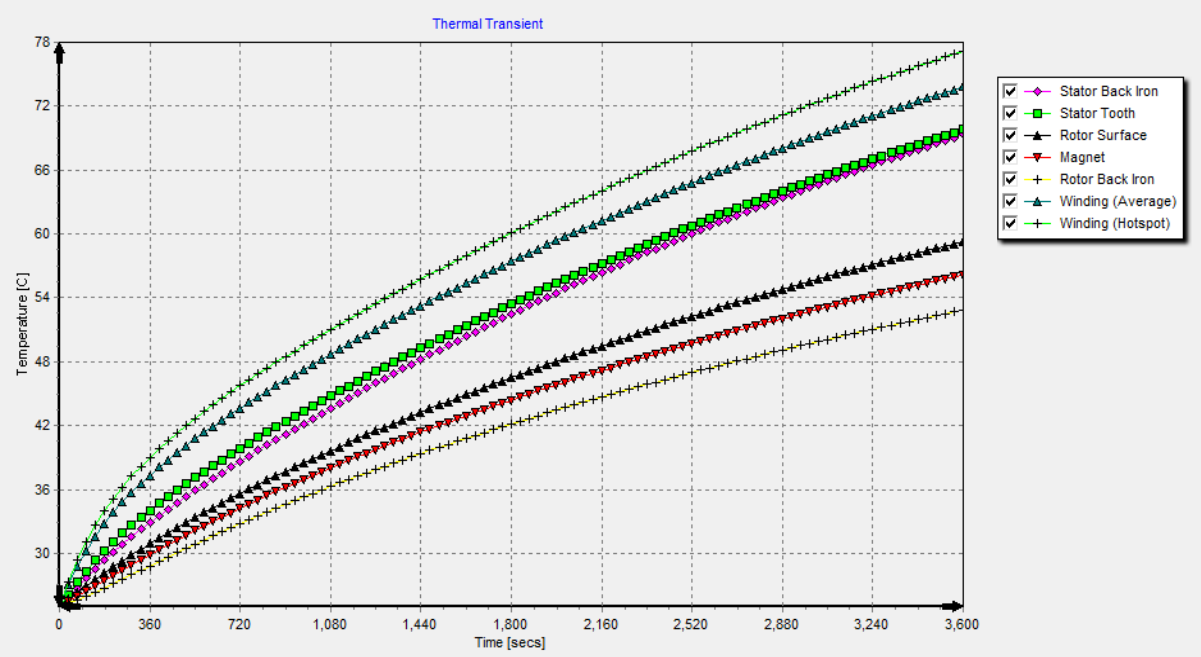
در این حالت موتور در مدت زمان معین و کوتاه تحت بار ثابت روشن بوده و پس از آن مدت زمانی جهت استراحت موتور و رسیدن به تعادل حرارتی درنظر گرفته شده است. در این حالت مدت زمان عملکرد موتور کوتاه‌تر از مدت زمان استراحت موتور است و موتور می‌تواند خنک شود. مدت زمان عملکرد کوتاه‌مدت موتور در اینجا ۶۰ دقیقه درنظر گرفته شده است. همانطور که در شکل مشخص است ماکزیمم دما مربوط به سیم‌پیچی و برابر با ۷۷٫۵ درجه سانتی‌گراد است. نتایج دماهای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در شکل ۳۷-۷ و همچنین دمای هر قسمت درجدول ۱۰-۷ نشان داده شده است. در دوچرخه‌های برقی متناسب با نوع باتری، توان و میزان شارژ آن مدت زمان روشن بودن و عملکرد پیوسته موتور در مود S2 وS3 قرار دارد.

جدول ۱۰-۷: دمای قسمت‌های مختلف موتور طی عملکرد کوتاه‌مدت

یوغ روتور	یوغ استاتور	ماکزیمم دمای سیم‌پیچی	آهنرباها
۵۲٫۸ c°	۶۹٫۳ c°	۷۷٫۵ c°	۵۶ c°

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

سطح روتور	۵۹٫۲ c°	درپوش‌ها	۴۹ c°	متوسط دمای سیم‌پیچی	۷۳٫۸ c°		

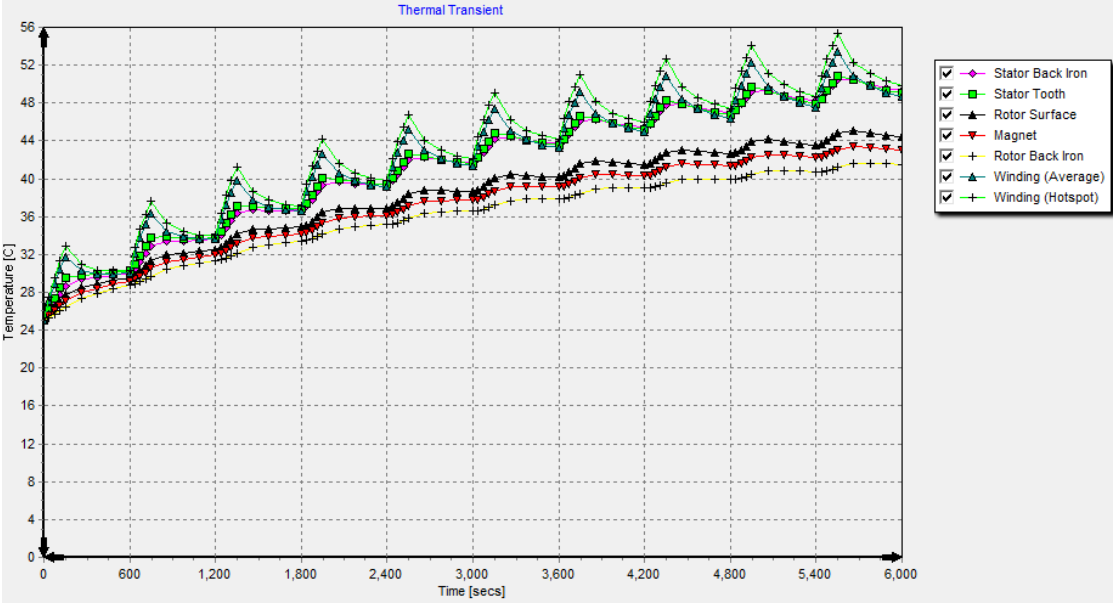


S2شکل ۳۷-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی

۴-۴-۷- تحلیل حرارتی در حالت عملکرد متناوب (مود S3)

در این حالت مدت زمانی که جهت عملکرد و استراحت کوتاه موتور در نظر گرفته شده است، متناوبا تکرار می‌شود. به عبارت دیگر بیانگر حالتی است که موتور طی مدت زمان کوتاهی روشن شده، سپس خاموش شود و پس از اینکه موتور به تعادل حرارتی رسید و مقداری خنک شد، دوباره روشن شود. مدت زمان عملکرد موتور در اینجا ۲۵ درصد مدت زمان دوره تناوب در نظر گرفته شده است. زمان دوره تناوب برابر با ۱۰ دقیقه، مدت زمان روشن بودن موتور، ۲٫۵ دقیقه و مدت زمان استراحت موتور، برابر با ۷٫۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. در طی زمان ۱۰۰ دقیقه، ۹ دوره تناوب تکرار شده و نتایج آن در شکل ۳۸-۷ قابل مشاهده است. در آخرین سیکل که دمای موتور در بیشترین مقدار خود قرار گرفته است دمای سیم‌پیچی‌ها برابر با ۵۵ درجه سانتی‌گراد است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



S3شکل ۳۸-۷: نمودار دمای قسمت‌های مختلف موتور بر حسب زمان در مود عملکردی

۷-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا فرآیند طراحی مفهومی یک الکتروموتور BLDC و بخش‌های مختلف آن از جمله ساختار کلی استاتور و روتور، ابعاد کلی، ابعاد بخش‌های مختلف مانند آهنربا، شکل و ابعاد شیار استاتور، تعداد دور و نوع سیم‌پیچی مورد بررسی قرار گرفت. سپس با توجه به مشخصات مد نظر پروژه برای الکتروموتور هدف، یک نمونه، با استفاده از الگوریتم فوق، طراحی اولیه و سپس مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. در فرآیند بهینه‌سازی، پارامترهای ابعادی از جمله فاصله هوایی، ابعاد یوغ و مگنت مورد بازبینی قرار گرفت تا میزان گشتاور دندانه به حداقل برسد. طرح نهایی توان خروجی ۴۹۵ وات را بدست می‌دهد که امکان تولید گشتاور ۲۹٫۵ نیوتن‌متر در سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه را دارد. راندمان این الکتروموتور حدود ۷۷ درصد است و تحلیل‌های حرارتی نشان داد که حداکثر دما الکتروموتور که در محل سیم‌پیچی‌ها اتفاق می‌افتد، در صورت کارکرد ۳ مداوم، ۱۰۹ درجه خواهد بود که با توجه به اینکه در محیط واقعی، در اثر برخورد هوا با سرعت بالا بدلیل حرکت دوچرخه و همچنین عدم امکان عملکرد پیوسته ۳ساعته (بدلیل محدودیت شارژ باتری)، این میزان افزایش دما مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل۸- شبیه‌سازی طرح بهینه الکتروموتور ۵۰۰ واتی در نرم افزار تحلیل مغناطیسی JMAG Designer

۸-۱- مقدمه

در گزارش مرحله اول و دوم پروژه طراحی الکتروموتور برای دوچرخه برقی، یک الکتروموتور BLDC با توان ۵۰۰ وات، با در نظر گرفتن امکان استحصال مواد اولیه در داخل کشور، با استفاده از آهن‌ربای فریتی و ورقه‌های کربنی طراحی و تحلیل شده است. برای بهینه‌سازی طراحی به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای و به دنبال آن ریپل گشتاور، چندین پارامتر از جمله ارتفاع و عرض دهانه شیار و نسبت کمان قطب به گام قطب خروجی در نظر گرفته شده است.

در این فصل به تحلیل موتور با طراحی بهینه در حالت‌های مختلف عملکردی پرداخته می‌شود. به منظور معتبر بودن نتایج در حالت واقعی، برای ماده هسته الکتروموتور اطلاعات با توجه به نتایج تست اپشتاین ورق هسته در نرم افزار وارد شده است و برای ماده آهن‌ربای فریتی با توجه به ناقص بودن اطلاعات در دماهای مختلف عملکردی، از آهن‌ربای AC-12 شرکت Arnold برای شبیه سازی استفاده شده است که مشخصه‌های آن تقریبا برابر آهن‌ربای فریتی مورد نظر است.

۸-۲- تحلیل موتور بهینه‌سازی شده در نرم افزار JMAG Designer

در این بخش از فصل به تحلیل موتور بهینه‌سازی شده منتخب در فصل قبل به کمک نرم‌افزار JMAG Designer پرداخته شده است.

۸-۲-۱- مشخصات موتور با طراحی بهینه

ابعاد نهایی و مشخصه‌های خروجی موتور بهینه سازی شده در گزارش مرحله دوم پروژه در جدول ۱-۸ آورده شده است.

جدول ۱-۸: مشخصات بهینه‌شده طرح با ۰/۸=**Embrace**

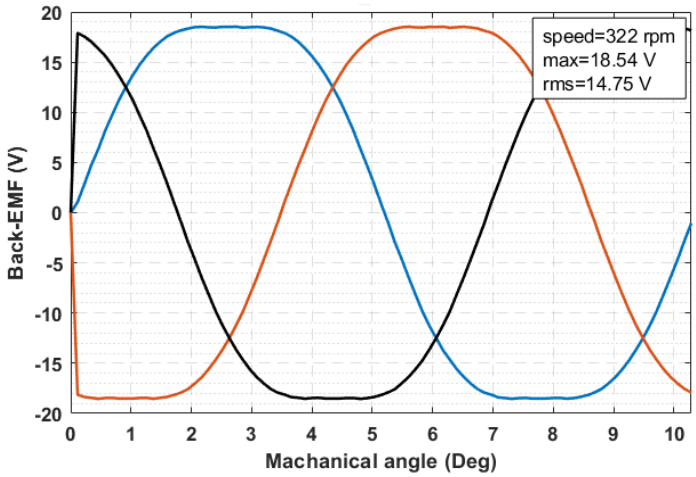
توان خروجی	۴۹۵ w	گشتاور خروجی	۲۹/۵Nm	ریپل گشتاور	۷Nm
گشتاور دندانه‌ای	۰/۱۶۴ Nm	سرعت موتور	۱۶۰ rpm	سرعت بی‌باری	۳۲۲ rpm
تلفات هسته و بادخوری	۴۴ w	تلفات مسی	۱۰۲W	راندمان	% ۷۷/۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

چگالی جریان	A/mm2 ۴/۷	متوسط‌جریان ورودی	۱۸ A	طول موتور	mm ۲۸/۵
حداکثر جریان ورودی	۳۳ A	جریان‌موثر هر فاز	۲۳/۶ A		
عمق شیار	۱۹ mm	دهانه شیار	۱/۵ mm	قطر سیم	۰/۹ mm
تعدادرشته سیم موازی‌شده در هر دور	۸	پهنای شیار	۹mm	ارتفاع دهانه شیار	۱/۳ mm
تعداد دور سیم در هر شیار	۱۶	عرض دندانه استاتور	۷ mm	پرشدگی شیار	٪ ۵۲
ارتفاع آهنربا	۵ mm	طول آهنربا	۲۸/۵ mm		
Embrace	۰/۸	عرض آهنربا	۱۲ mm		

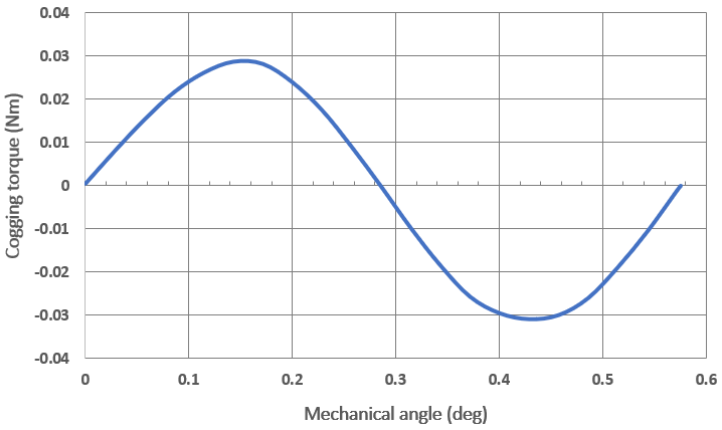
۲-۲-۸- شبیه سازی حالت بی باری

برای بررسی حالت بی‌باری، درحالی که ترمینال‌های موتور مدار باز است، روتور با سرعت بی‌باری ۳۲۲rpm چرخانده می‌شود. شکل موج ولتاژ القایی فاز در شکل ۱-۸ و گشتاور دندانه‌ای در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌اند. گشتاور دندانه‌ای ناشی از عکس‌العمل دندانه‌های استاتور و قطب‌های آهن‌ربایی است. این گشتاور پریودیک بوده و فرکانس آن برابر با کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و شیارها می‌باش. همچنین مقدار پیک-پیک گشتاور دندانه‌ای حدود ۰/۰۶ نیوتن- متر است.



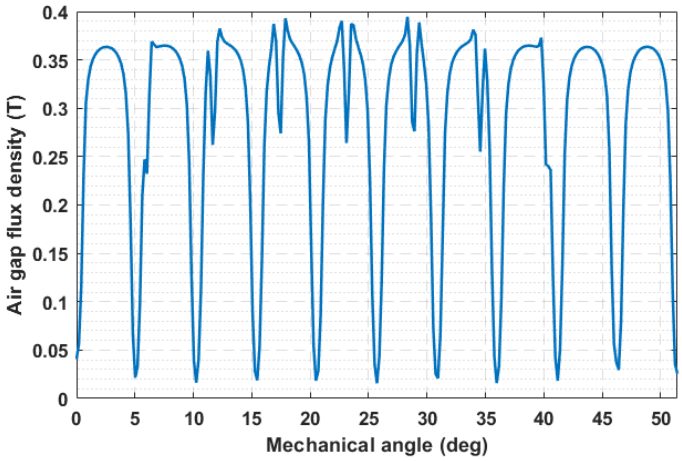
شکل ۱-۸: شکل موج ولتاژ القایی فازها در حالت بی باری

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

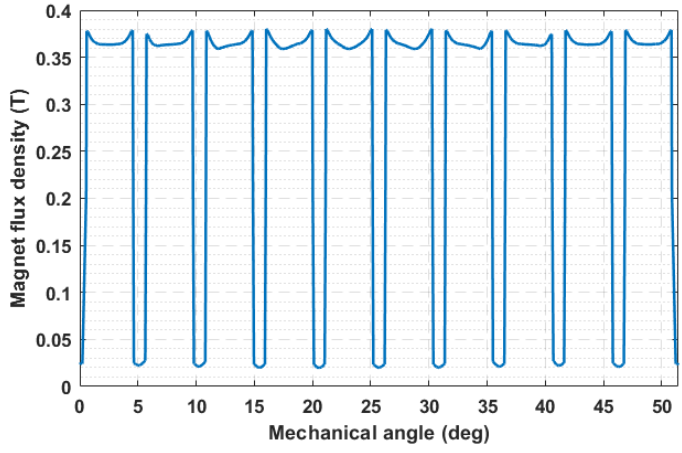


شکل ۲-۸: شکل موج گشتاور دندانه‌ای

شکل موج‌های چگالی شار فاصله هوایی و چگالی شار آهن‌ربا به ترتیب در شکل ۳-۸ و شکل ۴-۸ نشان داده شده‌اند. مقدار حداکثر چگالی شار آهن‌ربا با توجه به انتخاب آهن‌ربای فریتی با چگالی شار باقیمانده $B_r = 0.4T$ حدود ۰/۳۸ تسلا است.



شکل ۳-۸: شکل موج چگالی شار فاصله هوایی در حالت بی باری



شکل ۴-۸: شکل موج چگالی شار آهن‌ربا

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

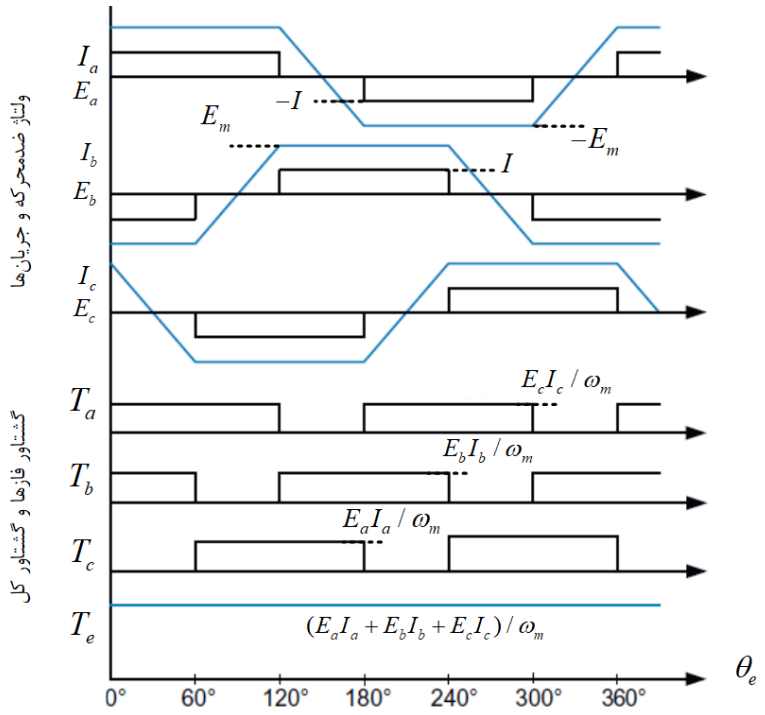
۸-۲-۳- شبیه سازی حالت دائمی تحت بار

در یک ماشین الکتریکی در اثر عکس‌العمل میدان مغناطیسی استاتور و روتور، گشتاوری ایجاد شده و باعث چرخش روتور می‌شود. در یک موتور BLDC میدان مغناطیسی روتور را قطب‌های آهن‌ربایی ایجاد می‌کنند و میدان مغناطیسی استاتور نیز در اثر عبور جریانی که از منبع تغذیه وارد سیم‌پیچ‌های استاتور شده ایجاد می‌شود.

برای بررسی بهتر عملکرد موتور، ابتدا موتور با جریان ایده‌آل مربعی شبیه‌سازی می‌شود و سپس با اتصال به منبع ولتاژ DC شکل موج‌های جریان و گشتاور خروجی تعیین می‌شوند. در این حالت با توجه به مشکلات ناشی از بالا بودن جریان در موتور، به منظور محدود کردن مقدار ماکزیمم جریان از کنترل هیسترزیس جریان استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی تحت بار الکتروموتور دمای آهن‌ربا ۸۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است.

۸-۲-۳-۱- شبیه‌سازی با جریان ورودی ایده‌آل

در حالت ایده‌آل مطابق شکل ۵-۸ اگر جریان بصورت مربعی و ولتاژ نیز بصورت ذوزنقه‌ای باشد، ریپل گشتاور (ناشی از ولتاژ و جریان) بوجود نمی‌آید. در این قسمت ابتدا برای بدست آوردن یک دید کلی از مقدار گشتاور تولیدی به ازای مقدارجریان معین، تغذیه موتور با منبع جریان مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه انجام می‌شود که در این حالت ریپل گشتاور تنها ناشی از اعوجاج ولتاژ خواهد بود.

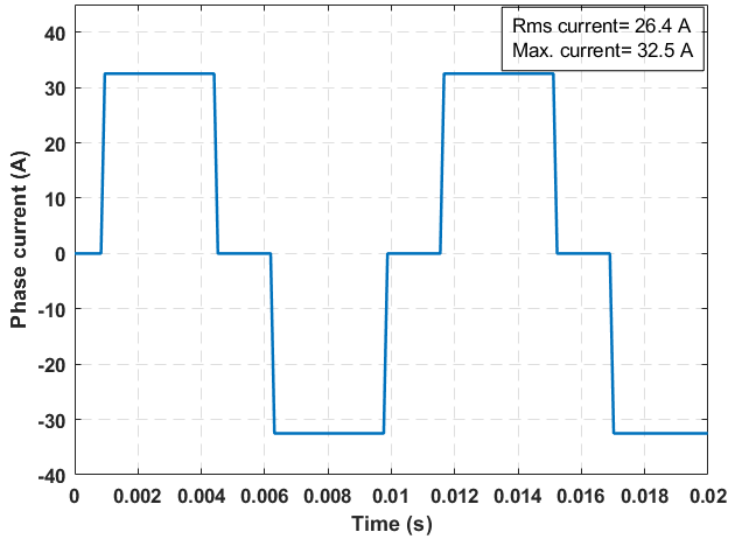


BLDCشکل ۵-۸: شکل موج‌های تئوری عملکرد الکتروموتور

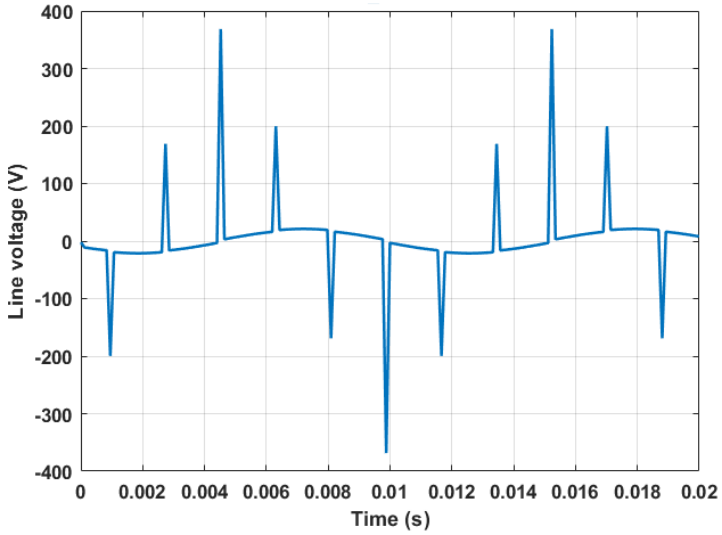
شکل ۶-۸ جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور را نشان می‌دهد که شکل موجی مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه هستند. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این قسمت، برای ایجاد گشتاور ۳۰ نیوتن-متر جریانی حدود ۳۳ آمپر از سیم‌پیچ‌های استاتور عبور می‌کند. شکل ۷-۸ ولتاژ خط سیم‌پیچ‌های استاتور را نشان می‌دهد. شکل موج ولتاژ تقریبا سینوسی با دامنه حدود ۲۲ ولت است و اضافه ولتاژهایی که در شکل موج مشخص است به علت کموتاسیون جریان فازها ایجاد شده است. شکل ۸-۸ گشتاور خروجی الکتروموتور را به ازای جریان مربعی با دامنه ۳۲/۵ آمپر

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

نشان می‌دهد. همانطور اشاره شد ریپل گشتاور ناشی از اعوجاج شکل موج ولتاژ سینوسی است و در صورتی که مطابق شکل ۵-۸ ولتاژ دارای شکل موجی ذوزنقه‌ای باشد ریپل گشتاور ایجاد نمی‌شود.

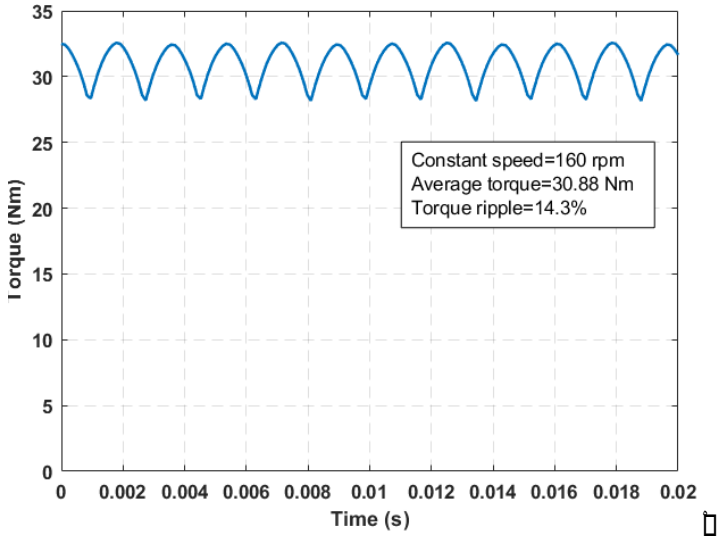


شکل ۶-۸: شکل موج ایده‌آل جریان ورودی استاتور



شکل ۷-۸: شکل موج ولتاژ خط در حالت جریان ایده‌آل ورودی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

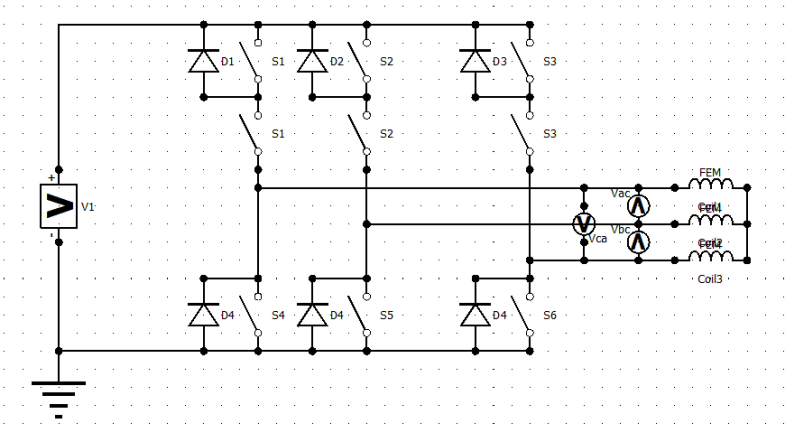


شکل ۸-۸: شکل موج گشتاور خروجی با جریان ایده‌ال ورودی

۸-۲-۳-۲- شبیه سازی با منبع ولتاژ DC

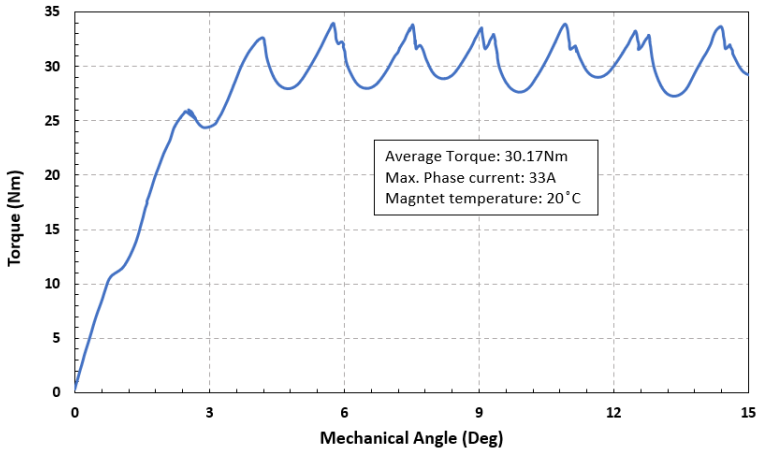
در این حالت ترمینال‌های موتور به‌وسیله درایو به منبع ولتاژ DC متصل می‌شوند. برای بررسی دقیق طرح بهینه تمامی پارامترهای ولتاژ، جریان و... در نرم افزار مشابه با طرح اصلی در نظر گرفته شده است. شکل ۹-۸ شماتیکی از مدار الکتریکی شامل الکتروموتور، بخش درایو و منبع تغذیه را نشان می‌دهد. به منظور محدود کردن حداکثر جریان به ۳۳ آمپر از سوئیچ‌های کنترل هیسترزیس جریان در مدار استفاده شده است. منبع ولتاژ ۳۶ ولتی و تعداد دور هر کلاف از سیم‌پیچ فاز ۸ دور در نظر گرفته شده است.

شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور، جریان فازهای استاتور و شکل موج ولتاژ خط ترمینال‌های الکتروموتور به ترتیب در شکل ۱۰-۸ تا شکل ۱۴-۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱-۸ مشخص است به دلیل کنترل هیسترزیس جریان، در صورت تجاوز جریان از ۳۳ آمپر، کلید کنترل هیسترزیس ورودی را قطع کرده و با افت جریان از مقدار ۳۱ آمپر کلید مجددا وصل می‌شود و جریان افزایش می‌یابد.

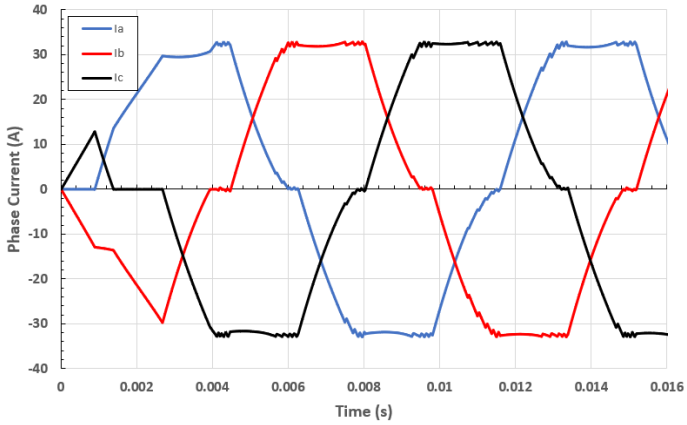


شکل ۹-۸: شماتیک مدار کنترلی الکتروموتور شبیه‌سازی شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۰-۸: شکل موج گشتاور خروجی در حالت تغذیه با منبع ولتاژ و کنترل جریان



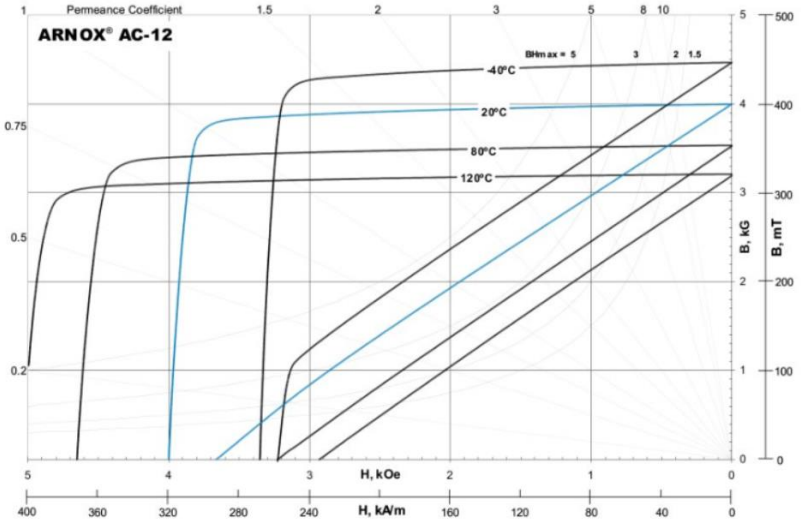
شکل ۱۱-۸: شکل موج جریان سیم‌پیچ‌های استاتور

از مقایسه نتایج شبیه سازی در این بخش و نتایج گزارش مرحله دوم می‌توان نتیجه گرفت که دو شبیه سازی تقریبا بر هم منطبق هستند. اما نکته ای که حائز اهمیت است عدم توجه به برخی مفروضات است:

یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر چگالی شار آهن‌ربا دمای کاری آن است که در شبیه سازی مغناطیسی انجام شده در گزارش مرحله دوم به آن اشاره نشده است. افزایش دمای کاری آهن‌ربا موجب کاهش چگالی شار آهن‌ربا و به تبع آن کاهش چگالی شار فاصله هوایی، گشتاور و توان خروجی می‌شود. شکل ۱۲-۸ منحنی عملکرد یک آهن‌ربای فریتی در دماهای مختلف کاری نشان می‌دهد.

تلفات آهن و گشتاور خروجی به طور جداگانه محاسبه شده اند، بدون در نظر گرفتن اثر تلفات آهن بر گشتاور خروجی. در یک جریان ثابت باید گشتاور معادل این تلفات از گشتاور خروجی نرم افزار کم شود.

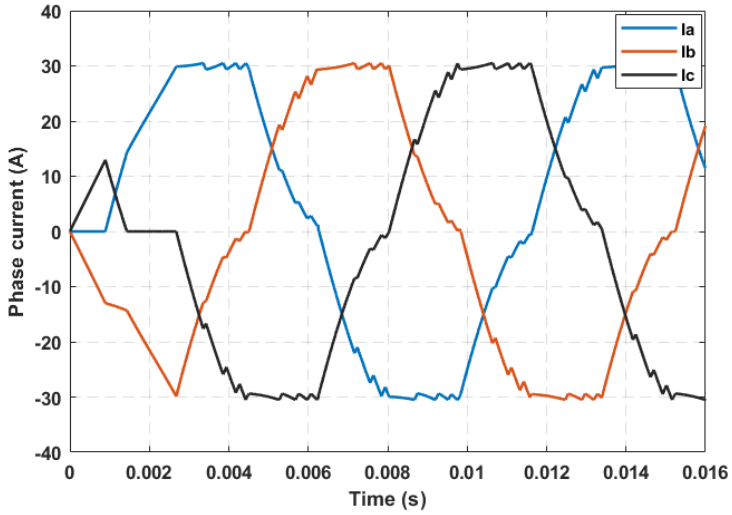
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۲-۸: منحنی مغناطیس زدایی آهن‌ربای فریتی در دماهای مختلف

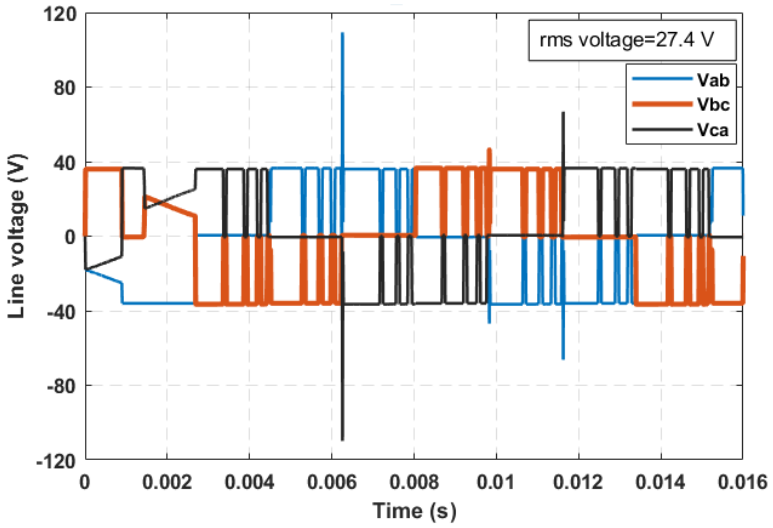
با توجه به شبیه‌سازی بخش قبل، الکتروموتور طراحی شده برای تولید گشتاور ۳۰ نیوتن-متری به جریان۳۳ آمپر نیاز دارد که با توجه به محدودیت حداکثر جریان فاز ۳۰ آمپری، در این بخش از شبیه سازی، ساختار بهینه با حداکثر جریان فاز ۳۱ آمپر شبیه سازی می‌شود. همچنین در تحلیل حرارتی که در گزارش پیشین ارائه شده است، دمای آهن‌ربا در حالت عملکرد پیوسته $78^{\circ}C$ محاسبه شده است. در نتیجه برای نزدیک شدن شبیه‌سازی به شرایط عملی باید دمای آهن‌رباها بیشتر از $20^{\circ}C$ در نظر گرفته شود.

در نتیجه محدود کردن جریان تا حداکثر ۳۱ آمپر، انتظار می‌رود که گشتاور خروجی از مقدار گشتاور مورد انتظار کمتر باشد. شکل ۱۳-۸ شکل موج جریان فازهای استاتور، شکل ۱۴-۸ گشتاور خروجی الکتروموتور را در حالت تغذیه با منبع ولتاژ و کنترل جریان و شکل ۱۵-۸ شکل موج گشتاور خروجی در دماهای عملکردی و جریان های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۸: شکل موج جریان فازهای استاتور با حداکثر **A**۳۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۴-۸: شکل موج ولتاژ ترمینال‌های استاتور

نتایج خروجی از شبیه سازی الکتروموتور در نرم افزار JMAG Designer در جدول ۲-۸ آورده شده است.

جدول ۲-۸: مشخصات خروجی الکتروموتور بهینه سازی شده از نرم افزار **JMAG Designer**

سرعت موتور	۱۶۰ rpm	گشتاور خروجی(بدون تلفات اهن)	۲۵/۱۶Nm	ریپل گشتاور	۳/۷۷Nm
تلفات مسی	۹۲/۸۷W	گشتاور خروجی	۲۲/۱۸Nm	حداکثر جریان فاز	۳۱ A
بازده	% ۷۲/۲۴	توان خروجی	۳۷۱/۶۲W	مقدار موثرجریان فاز	۲۲/۶ A
تلفات هسته	۴۹/۹۴ W				

گشتاور خروجی حدود ۷/۸ نیوتن-متر کمتر از مقدار مورد انتظار است که علت آن در زیر ذکر شده است:

با توجه به محدودیت ادوات درایو و همچنین باتری، دامنه جریان فاز الکتروموتور به حداکثر ۳۱ آمپر محدود شده است که ۲ آمپر کمتر از نتایج خروجی از نرم افزار Maxwell می‌باشد.

اگرچه آهن‌ربای فریتی نسبت به آهن‌ربای نئودمیوم حساسیت کمتری به دما نشان می‌دهد اما دمای عملکرد آهن‌ربا بر روی مشخصه‌های آهن‌ربا تاثیرگذار است. شکل ۱۵-۸ شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور(بدون محاسبه تلفات آهن) و جدول ۳-۸ مشخصات خروجی آن را در دماهای مختلف عملکرد آهن‌ربا و جریان‌های فاز استاتور مختلف نشان می‌دهند.

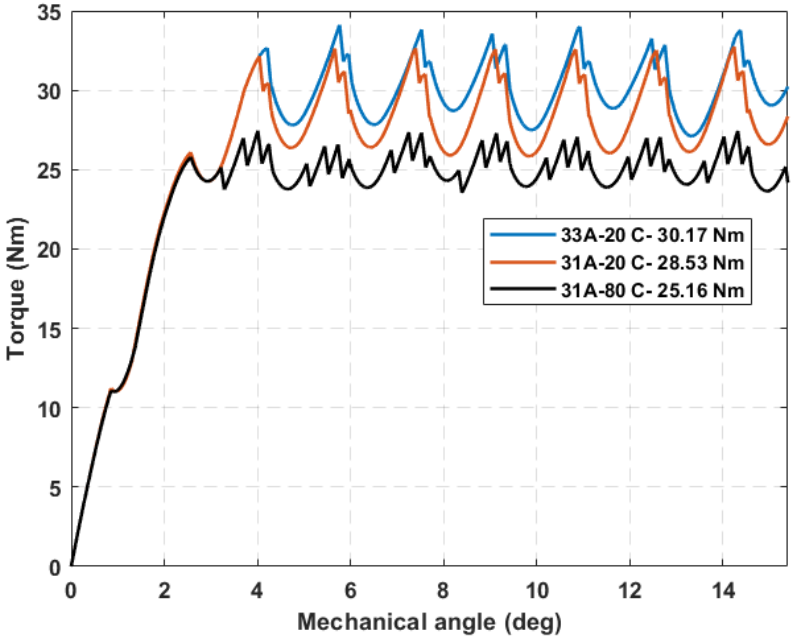
از آنجایی که نرم افزار JMAG Designer تلفات هسته را پس از اتمام فرایند تحلیل مغناطیسی محاسبه می‌کند، گشتاور و توان خروجی بدون در نظر گرفتن این تلفات محاسبه شده‌اند. پس برای محاسبه دقیق گشتاور خروجی باید تلفات هسته از توان خروجی کم شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$T_{av} = T_{av-c} - (\frac{P_c \times ۶۰}{۲\pi\omega}) \quad ۸-۱$$

$$P_o = (\frac{T_{av-o} \times ۲\pi\omega}{۶۰}) - P_c \quad ۸-۲$$

روابط ۸-۱و ۸-۲ نحوه اصلاح محاسبات نرم‌افزار را نشان می‌دهد که در آن T_{av-c} گشتاور محاسبه شده از نرم‌افزار، P_c تلفات هسته، ω سرعت روتور و P_O و T_{av} به ترتیب توان و گشتاور خروجی موتور است.



شکل ۸-۱۵: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور در دمای عملکرد و جریان‌های مختلف

جدول ۸-۳: مشخصات خروجی الکتروموتور در دمای عملکرد و جریان‌های مختلف

سرعت موتور (rpm)	**۱۶۰**	
جریان فاز استاتور (A)	۳۱	۳۳
دمای عملکرد آهن‌ربا (°C)	۸۰	۲۰
گشتاور خروجی(بدون تلفات آهن) (Nm)	۲۵/۱۶	۲۸/۵۳ ۳۰/۱۷
گشتاور خروجی (Nm)	۲۲/۱۸	۲۵/۳۹ ۲۶/۸۶
توان خروجی (W)	۳۷۱/۶۲	۴۲۵/۴۱ ۴۵۰/۱۰
تلفات هسته (W)	۴۹/۹۴	۵۲/۶۱ ۵۵/۴۰
تلفات مسی (W)	۹۲/۸۷	۹۰/۵۲ ۱۰۲/۳۹
بازده (%)	۷۲/۲۴	۷۴/۵۱ ۷۴/۰۴
ریپل گشتاور (Nm)	۳/۷۷	۶/۸۴ ۶/۹۳

۸-۳- شبیه‌سازی الکتروموتور طراحی شده با تغییر نوع آهن‌ربا

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

در بخش قبل ساختار بهینه الکتروموتور با آهن‌ربای گرید Y30 مشابه محصول دانشگاه مالک اشتر و ابعاد ۵×۱۲×۲۸/۵ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. علی رغم انتخاب ابعاد ۵×۱۲×۲۸/۵ میلی‌متر به عنوان ابعاد بهینه برای آهن‌ربا، با توجه به محدودیت ابعاد آهن‌رباهای موجود در بازار، آهن‌ربا با ابعاد ۵×۱۰×۳۰ میلی‌متر و برای افزایش چگالی شار آهن‌ربا و گشتاور خروجی با گرید Y35 برای الکتروموتور انتخاب شده است که مشخصات مغناطیسی آن در جدول ۴-۸ آورده شده است.

جدول ۴-۸: مشخصات مغناطیسی آهن‌ربای فریتی گرید **Y35**

Br		**Hcb (Hc)**		**Hcj (Hci)**		**(BH)max**	
mT	kG	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m^3	**MGOe**
۴۳۰-۴۵۰	۴.۳-۴.۵	۲۱۵-۲۳۹	۲.۷۰-۳.۰۰	۲۱۷-۲۴۱	۲.۷۳-۳.۰۳	۳۳.۱-۳۸.۲	**۴.۲-۴.۸**

در این فصل الکتروموتور بهینه‌سازی شده با آهن‌ربای اصلاح شده شبیه‌سازی می‌شود. مشابه بخش گذشته شبیه‌سازی‌ها برای عملکرد الکتروموتور در حالت‌های بی‌باری، تحت بار حالت دائمی و تحت بار گذرا انجام شده است.

۸-۳-۱- شبیه‌سازی حالت بی‌باری

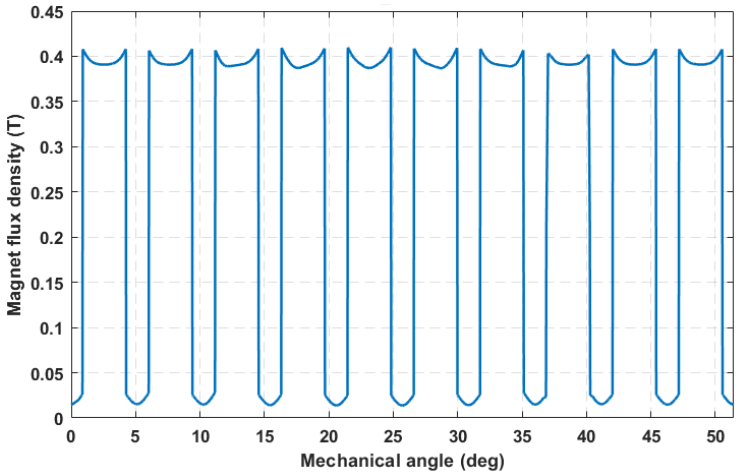
مشابه بخش قبل در حالت بی‌باری روتور با سرعت بی‌باری ۳۳۷ دور بر دقیقه چرخانده می‌شود. با توجه به تغییر گرید آهن‌ربا، نقطه‌کار و چگالی شار آهن‌ربا و همچین چگالی شار فاصله هوایی نسبت به حالت قبل تغییر می‌کنند. مطابق الگوریتم طراحی گزارش، اگر فرض شود که حداکثر چگالی شار فاصله هوایی موتور ٪۱۵ کمتر از پگالی شار پسماند آهن‌ربا باشد، در این صورت با در نظر گرفتن چگالی شار پسماند برابر ۰/۴۳ تسلا، حداکثر چگالی شار فاصله هوایی موتور برابر ۰/۳۶۵ تسلا است. چگالی شار نقطه کار آهن‌ربا از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$B_{pm} = B_r + \mu_0\mu_r H_{pm} \Rightarrow B_{pm} = B_r - \mu_0\mu_r \frac{L_{ag}}{L_{PM}} H_{ag} \xrightarrow{\mu_0 H_{ag} \simeq B_{ag}}$$

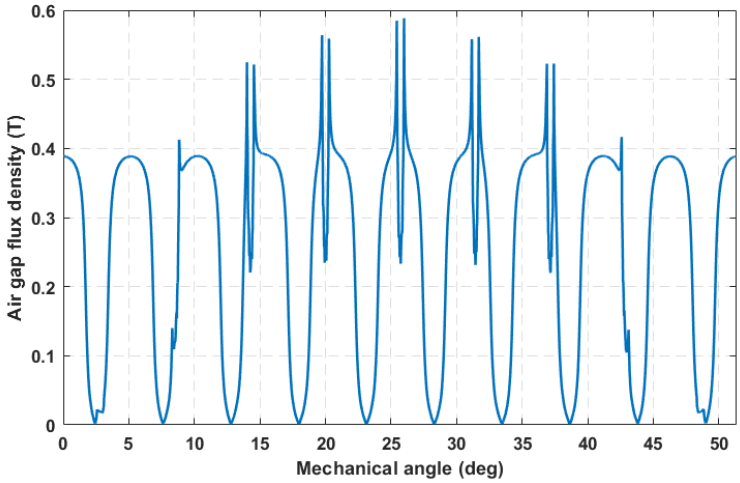
$$B_{pm} = B_r - \mu_r \frac{L_{ag}}{L_{PM}} B_{ag} = ۰.۴۳ - (۱.۰۴ \times \frac{۰.۴۵}{۵} \times ۰.۳۶۵) = ۰.۳۹۶T \qquad ۸\text{-}۳$$

شکل ۱۶-۸ و شکل ۱۷-۸ به ترتیب شکل موج‌های چگالی شار آهن‌ربا و چگالی شار فاصله هوایی موتور را در حالتی که از آهن‌ربای با گرید Y35 استفاده شده است، نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ها مشخص است، حداکثر چگالی شار نقطه کار آهن‌ربا تقریبا ۰/۴۱ تسلا و حداکثر چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۳۸ تسلا است که حدود ۰/۰۲ تسلا با مقادیر محاسبه شده در روابط اختلاف دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



در حالت بی باری **Y35**شکل ۱۶-۸: چگالی شار آهن‌ربا



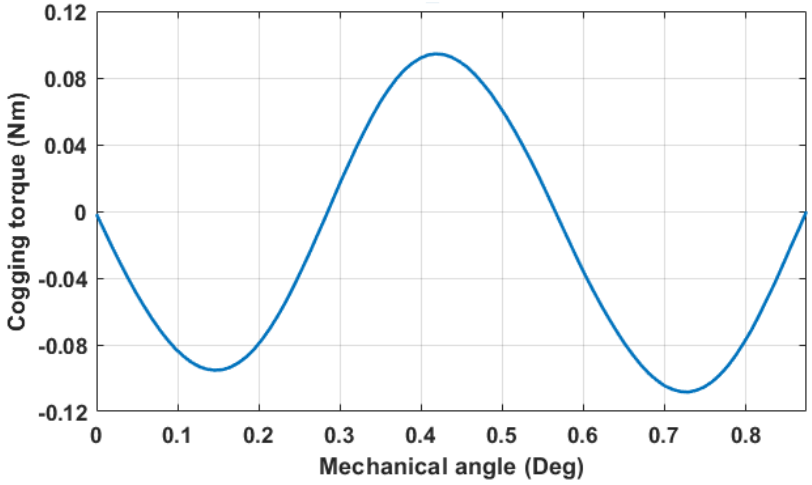
Y35شکل ۱۷-۸: شکل موج چگالی شار فاصله هوایی موتور در حالت بی باری با آهن‌ربای

شکل موج گشتاور دندانه‌ای در شکل ۱۸-۸ نشان داده شده است. همانطور که قبلا اشاره شده است، گشتاور دندانه‌ای شکل موجی پریودیک دارد که فرکانس آن برابر کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و شیارهاست. پس دوره تناوب این گشتاور برابر است با:

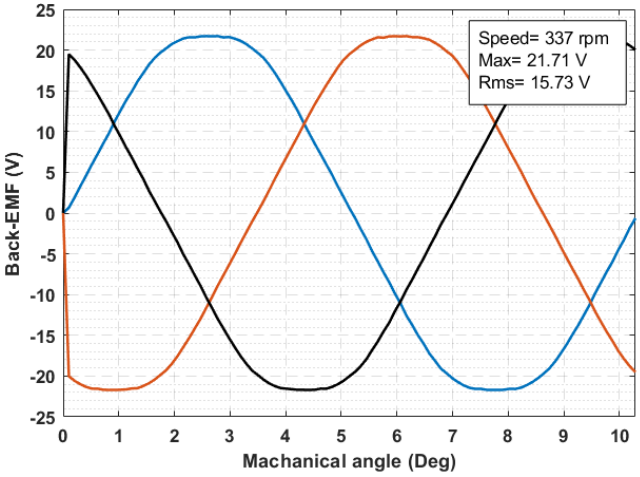
$$\frac{LCM(۷۰.۶۳)}{۳۶۰} = ۰.۵۷۱(mechanical \bullet angle) \qquad ۸-۴$$

دامنه پیک-پیک گشتاور دندانه‌ای حدود ۰/۱۹ نیوتن-متر است. شکل موج ولتاژ القایی سه فاز موتور در سرعت ۳۳۷ دور بر دقیقه در شکل ۱۹-۸ نشان داده شده است که مقدار موثر فاز آن ۱۵/۷۳ ولت است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۸-۸: شکل موج گشتاور دندانه‌ای



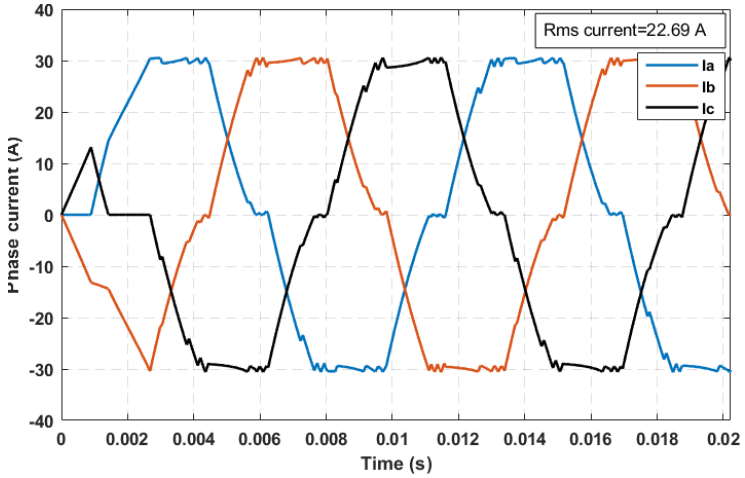
شکل ۱۹-۸: شکل موج ولتاژ القایی فازهای مختلف در سرعت بی‌باری ۳۳۷ **rpm**

۲-۳-۸- شبیه‌سازی تحت بار

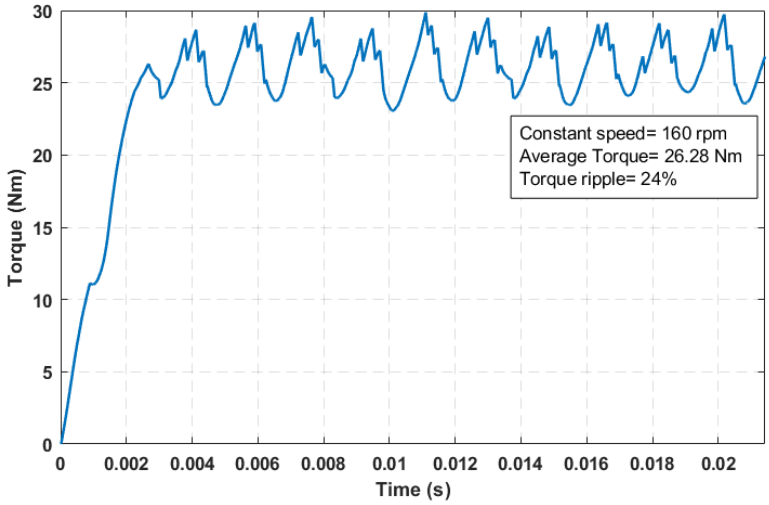
مشابه با بخش قبل برای شبیه‌سازی موتور در شرایط بار کامل و استخراج مشخصه‌های آن موتور از طریق یک مبدل سوئیچ زنی به منبع ولتاژ ۳۶ ولت متصل شده است. در هر لحظه از دو فاز سیم‌پیچی استاتور جریان عبور می‌کند که مقدار حداکثر آن به ۳۱ آمپر محدود شده است. شکل ۲۰-۸ شکل موج جریان فازهای استاتور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به علت بزرگ بودن اندوکتانس موتور، بازه کموتاسیون نسبتا زیاد است و شکل موج جریان حالتی تقریبا ذوزنقه‌ای به خود گرفته است.

شکل موج گشتاور خروجی نیز در شکل ۲۱-۸ نشان داده شده است. با مقایسه این شکل موج و شکل ۱۵-۸ می توان دریافت که با تغییر ابعاد آهن‌ربا ریپل گشتاور افزایش یافته است. همچنین علی‌رغم کاهش حجم آهن‌ربا (کاهش عرض آهن‌ربا از ۱۲ به ۱۰ میلیمتر) که منجر به کاهش گشتاور خروجی می‌شود، به دلیل استفاده از آهن‌ربای با گرید بالاتر که چگالی شار پسماند بالاتری نیز دارد، گشتاور خروجی نسبت به حالت قبل افزایش داشته است. با این حال ریپل گشتاور خروجی نسبت به قبل افزایش یافته‌است. توان خروجی و دیگر مشخصه‌های موتور در سرعت نامی برای این قسمت از شبیه‌سازی در جدول ۵-۸ آورده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۰-۸: شکل موج جریان فازهای استاتور در سرعت نامی

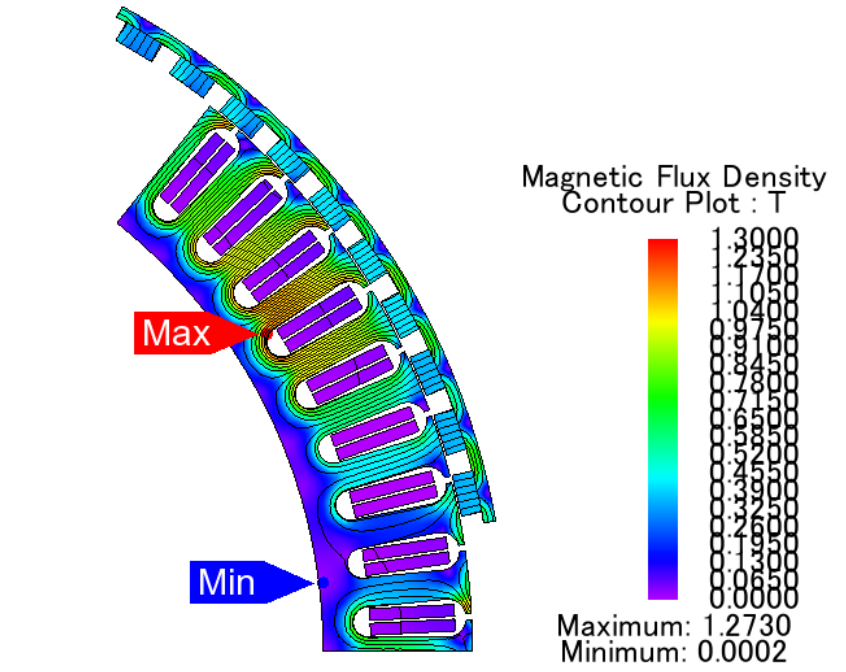


شکل ۲۱-۸: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور در سرعت نامی

جدول ۵-۸: مشخصه‌های خروجی الکتروموتور با آهن‌ربای تغییر یافته در سرعت نامی

سرعت موتور	۱۶۰ rpm	گشتاور خروجی(بدون تلفات اهن)	۲۶٫۲۸Nm	ریپل گشتاور	۶٫۳۰Nm
تلفات مسی	۱۰۲٫۴۶ W	گشتاور خروجی	۲۳٫۳۳Nm	حداکثر جریان فاز	۳۱ A
بازده	% ۷۲٫۰۲	توان خروجی	۳۹۰٫۸۹W	مقدار موثرجریان فاز	۲۲٫۶۹ A
تلفات هسته	۴۹٫۴۱ W				

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

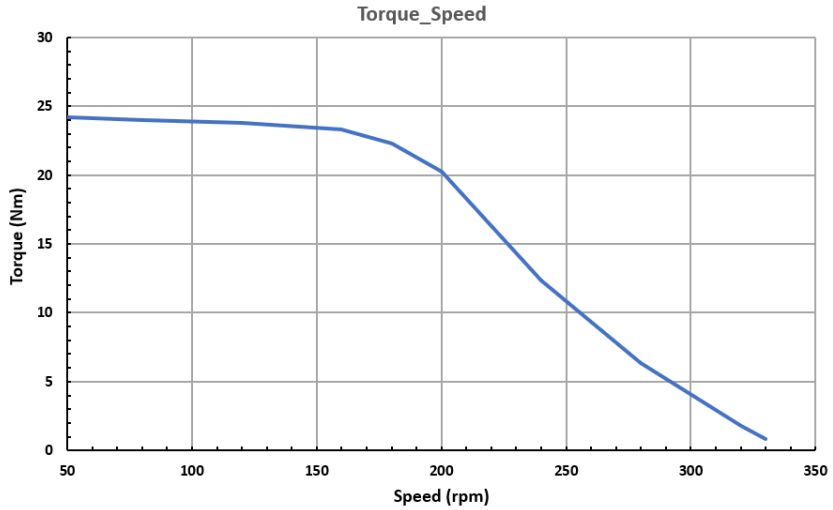


شکل ۲۲-۸:توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در هسته

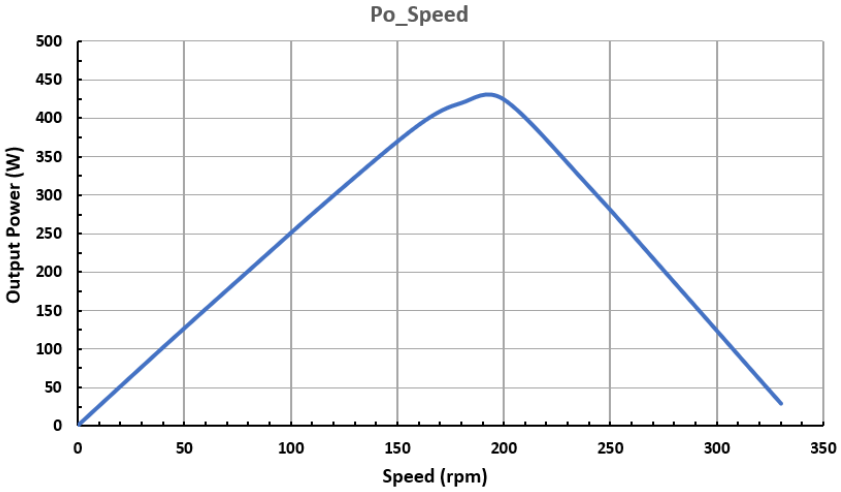
شکل ۲۲-۸ توزیع چگالی شار مغنازیسی در هسته و همچنین خطوط شار را نشان می‌دهد. اگرچه آهن‌ربای Y35 نسبت به Y30 چگالی شار پسماند و انرژی مغناطیسی بیشتری دارد اما عرض آهن‌ربا و همچنین جریان استاتور نسبت به حالت قبل کاهش یافته و در نهایت حداکثر چگالی شار هسته ۱/۳ تسلا است و حداکثر چگالی شار هسته که در محدودیت‌های طراحی قید شده بود، یعنی از ۱/۷ تسلا کمتر است.

مشخصه‌های گشتاور- سرعت و توان- سرعت الکتروموتور با آهن‌ربای تغییر یافته به ترتیب در شکل ۲۳-۸ و شکل ۲۴-۸ نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است در سرعت ۱۶۰rpm گشتاور خروجی حدود ۲۶ نیوتن-متر و توان خروجی حدود ۳۹۰ وات است که ۱۱۰ وات کمتر از توان خروجی مورد هدف می‌باشد. حداکثر توان خروجی در سرعت ۱۹۰rpm اتفاق می‌افتد. حداکثر جریان فاز محدود شده است و از راه اندازی تا سرعت نامی به دلیل تقریبا ثابت بودن جریان فاز، گشتاور خروجی نیز تقریبا ثابت است و اصطلاحا موتور در ناحیه گشتاور ثابت قرار دارد. با افزایش سرعت تا سرعت نامی مقدار موثر جریان فاز تقریبا ثابت بوده و جریان لینک افزایش می‌یابد و از سرعت نامی به بعد جریان فاز و لینک هر دو روندی کاهشی دارند. نمودار تغییرات مقدار موثر جریان فاز استاتور و متوسط جریان فاز لینک DC بر حسب سرعت روتور در شکل ۲۵-۸ نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

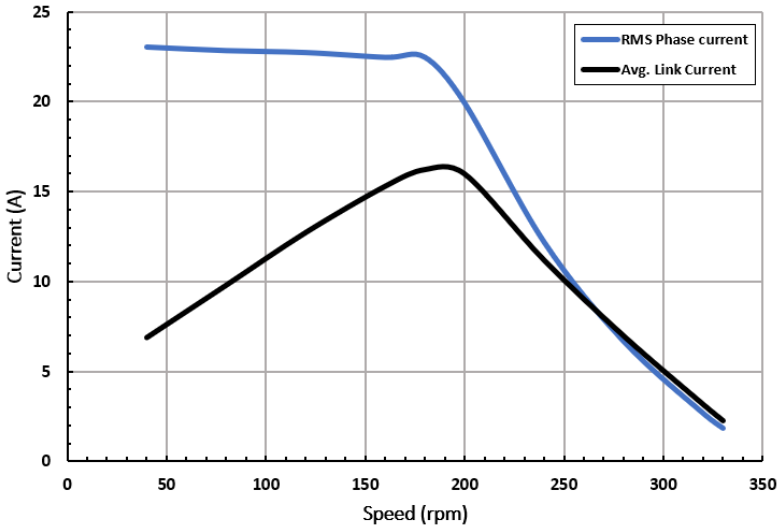


شکل ۲۳-۸: مشخصه گشتاور-سرعت الکتروموتور با آهن‌ربای تغییر یافته

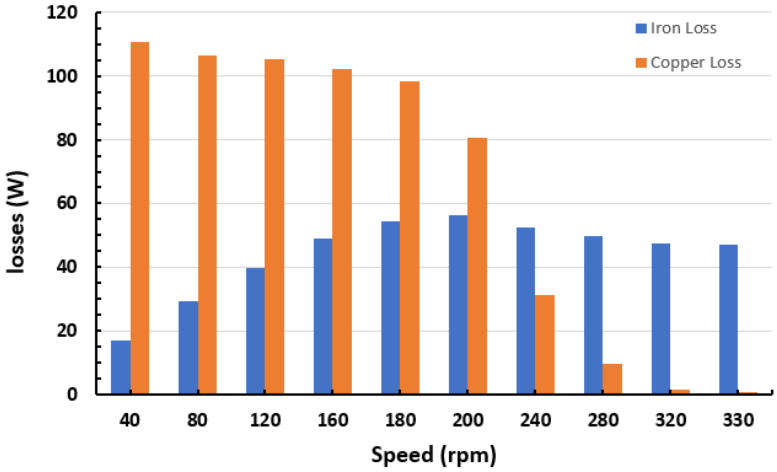


شکل ۲۴-۸: مشخصه توان-سرعت الکتروموتور با آهن‌ربای تغییر یافته

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۲۵-۸: نمودار تغییرات جریان فاز استاتور و جریان لینک بر حسب روتور**DC**



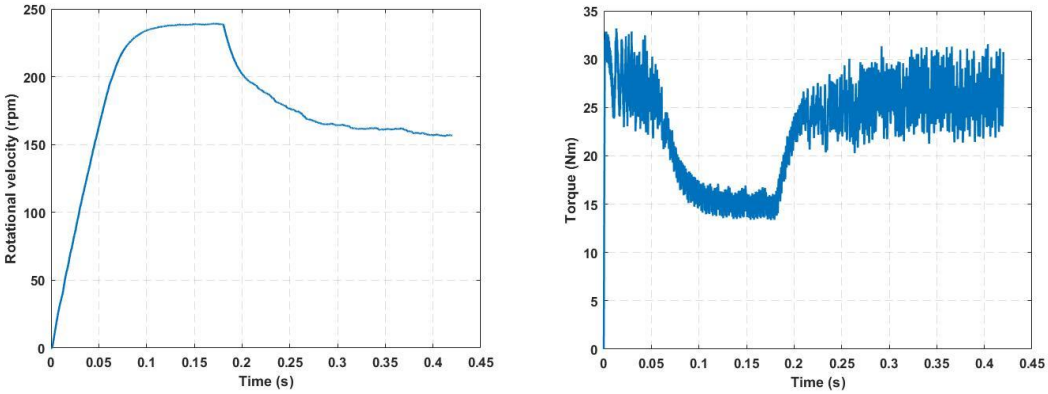
شکل ۲۶-۸: نمودار تغییرات تلفات هسته و تلفات مسی بر حسب سرعت

تغییرات تلفات مسی و تلفات هسته بر حسب سرعت چرخش روتور در نشان داده شده‌اند. نمودار تلفات مسی مشابه جریان فاز استاتور تا سرعت نامی تقریبا ثابت است. در حالی که تلفات هسته متناسب با سرعت چرخش و همچنین چگالی شار عبوری از ورق هسته است و معمولا حداکثر مقدار آن در سرعت نامی رخ می‌دهد.

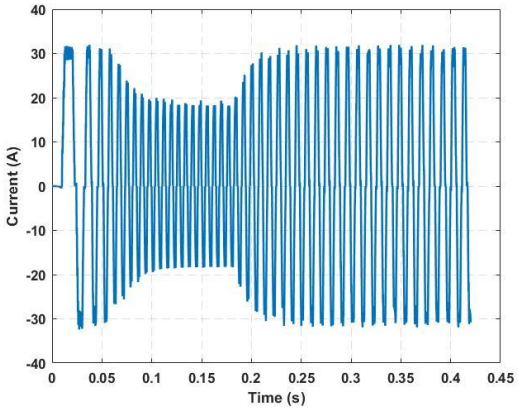
۸-۳-۳- شبیه‌سازی حالت گذرا

به منظور تحلیل حالت گذرا و پاسخ سیستم، موتور تحت گشتاور بار ۱۵ نیوتون-متر از سرعت صفر راه اندازی می‌شود و ۰/۱۸ ثانیه پس از راه‌اندازی گشتاور بار به مقدار ۲۶ نیوتن-متر افزایش می‌یابد. شکل ۲۷-۸ نتایج شبیه‌سازی موتور را در این حالت نشان می‌دهد. با افزایش گشتاور بار جریان فاز برای تامین گشتاور مورد نیاز افزایش می‌یابد و سرعت چرخش روتور کاهش می‌یابد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



(ب) (الف)



aشکل ۲۷-۸: الف) شکل موج گشتاور خروجی گذرا، ب) شکل موج سرعت زاویه‌ای روتور در حالت گذرا، ج) شکل موج جریان فاز استاتور در حالت گذرا

۴-۳-۸- نتیجه گیری

در قسمت اول طراحی انجام شده در مرحله دوم پروژه در نرم افزار JMAG Designer شبیه‌سازی شده و نتایج صحت سنجی شده است. پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی به نظر می‌رسد برخی مفروضات همچون دمای عملکرد آهن‌ربا و تلفات هسته در تایج خروجی در نظر گرفته نشده است و لذا در حالت کلی توان خروجی و بازده موتور کمتر از مقدار تعیین شده است. در این حالت با حداکثر جریان فاز استاتور ۳۱ آمپر توان و گشتاور خروجی در سرعت نامی ۱۶۰rpm به ترتیب ۳۷۱/۶۲ وات و ۲۲/۱۸ نیوتن-متر و بازده الکتروموتور نیز ۷۲/۲۴ درصد است.

در بخش دوم طرح بهینه‌ای که در قسمت قبل شبیه‌سازی شد با تغییراتی همچون گرید آهن‌ربا از Y30 به Y35 ، عرض آهن‌ربا از ۱۲ به ۱۰ میلیمتر و حداکثر جریان فاز استاتور ۳۱ آمپر شبیه‌سازی شد. علی‌رغم تغییر گرید آهن‌ربا و افزایش چگالی شار پسماند و انرژی مغناطیسی آن، باز هم توان خروجی و بازده الکتروموتور کمتر از مقادیر تعیین شده است. توان خروجی، گشتاور و بازده به ترتیب ۳۹۰/۸۹ وات، ۲۳/۳۳ نیوتن-متر و ۷۲/۰۲ درصد است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۹- پارامترها و مدل‌سازی ریاضی الکتروموتور BLDC جهت طراحی سیستم کنترل

۹-۱- مقدمه

موتور مورد استفاده برای دوچرخه‌های برقی در بازارهای جهانی از تنوع بسیار بالایی با توجه به خصوصیات ساختار خود دوچرخه برخوردار است. موتور می‌تواند بر روی پدال، چرخ عقب یا چرخ جلو نصب گردد، این درحالی است که نصب موتور بر روی چرخ توان را بطور مستقیم چرخ را به حرکت در می‌آورد. این امر موجب حذف هزینه‌های اضافی جعبه‌دنده، حذف تسمه و زنجیر و نیاز به تعمیر و نگهداری و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان می‌گردد. سیستم ذخیره انرژی در دوچرخه برقی از نوع جریان مستقیم است، بنابراین استفاده از موتورهای جریان مستقیم همچون BLDC در این صنعت رایج و پرکاربرد است.

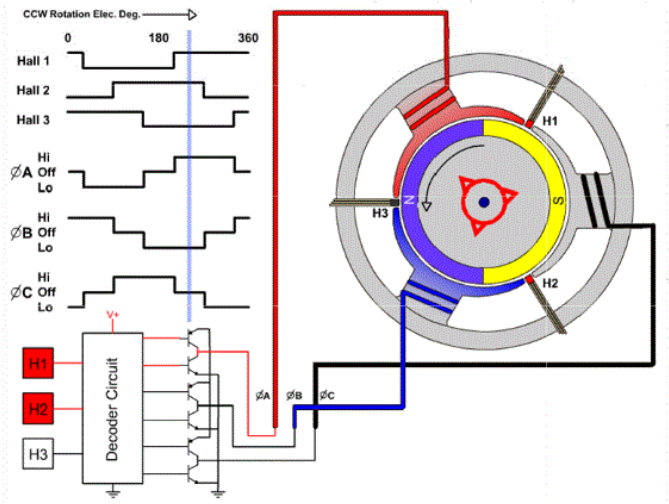
در این فصل ابتدا مختصری درباره نحوه عملکرد موتور BLDC و سپس پارامترها در دوچرخه برقی پرداخته می‌شود.

۹-۲- اصول عملکردی الکتروموتورهای BLDC

در ماشین‌های DC به منظور ثابت ماندن جهت گشتاور، پلاریته جریان در هادی‌ها باید با هربار عبور قطب‌های روتور از مقابل آن‌ها تغییر کند. این تغییر پلاریته در ماشین‌های DC عادی توسط سیستم کوموتاتور (شامل جاروبک و حلقه‌های لغزان) با کلیدزنی مکانیکی اتفاق می‌افتد؛ درحالیکه فرایند کلیدزنی در موتور BLDC به صورت الکترونیکی و با نمونه‌برداری پیوسته از موقعیت روتور به کمک حسگرهای هال انجام می‌گردد. حذف سیستم جاروبک مکانیکی و به تبع آن، حذف افت ولتاژ و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن مهم‌ترین تفاوت و مزیت برجسته موتور BLDC است. عمل کوموتاسیون[1] یا همان تبدیل مداوم جریان متناوب به مستقیم و بالعکس در ماشین‌های سنکرون عادی نیازمند اطلاع از موقعیت پیوسته روتور بوسیله ریزالور[2] یا سنسور موقعیت دیگر است، این درحالی است که در موتور BLDC گزارش موقعیت روتور تنها در شش نقطه کافی بوده که توسط سه حسگر اثر هال[3] انجام گرفته و جهت جریان توسط کلیدهای الکترونیک قدرت تعویض می‌گردد. از دیگر مزایای موتور BLDC می‌توان به انتقال حرارت ساده‌تر مدار آرمیچر به بیرون و ساختار ساده‌تر آن به دلیل عدم وجود نیروی گریز از مرکز و عدم نیاز به مهارکردن سیم‌پیچ‌ها است. شکل ۱-۹، عملکرد سنسورهای موتور BLDC را نمایش می‌دهد:

1- Commutation
2- Resolver
3- Hall sensor

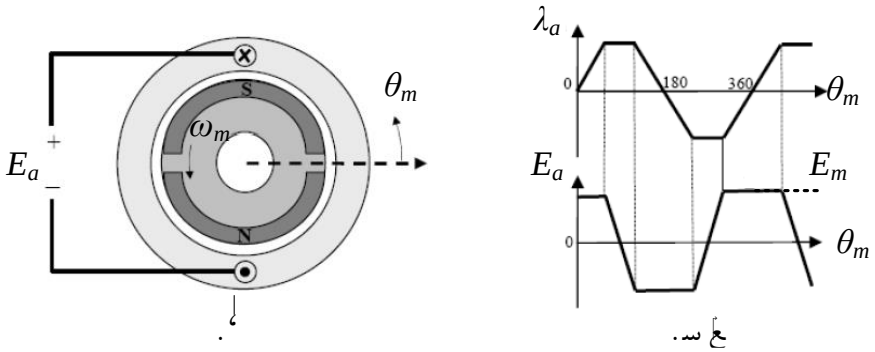
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱-۹: ترتیب عملکرد سنسورهای اثر هال برای عمل کموتاسیون در موتور **BLDC**[۷۸]

همانطور که از شکل ۱-۹ بالا پیداست، مابین هردو سیم‌پیچ، یک سنسور اثر هال قرار دارد که به نوبت با عبور هر قطب N از مقابل هر یک از سنسورها، مقدار خروجی آن یک و با عبور هر قطب S از مقال هر سنسور مقدار آن صفر می‌گردد (حالتی که خروجی هر سه سنسور همزمان صفر یا یک باشد، وجود ندارد؛ در واقع در هر زمان فقط دو فاز با هم فعال هستند). با گزارش موقعیت دیجیتال به مدار دیکدر عمل کموتاسیون بصورت الکترونیکی انجام می‌گیرد.

همان‌طور که بیان شد در موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، آرمیچر بر روی استاتور قرار دارد و میدان از دو یا چند آهنربا که بر روی روتور نصب می‌شوند، تشکیل می‌گردد. سیم‌پیچی استاتور این ماشین‌ها تقریباً شبیه سیم‌پیچی موتورهای القایی سه فاز است. تفاوت سیم‌پیچی استاتور یک موتور BLDC با موتورهای القایی و همچنین موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) آن است که در موتور BLDC سیم‌پیچی متمرکز بوده یا به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شود. درصورتی‌که در سایر موتورهای AC توزیع سیم‌پیچی حتی‌الامکان نزدیک به سینوسی است. در نتیجه ولتاژهای القاشده در سیم‌پیچ‌های استاتور (ولتاژهای ضدمحرکه) موتور BLDC به شکل ذوزنقه‌ای می‌باشند [۷۹]. شار پیوندی در N دور سیم‌پیچ استاتور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است، از رابطه **Error! Reference source not found.** به‌دست می‌آید:



ب) نمایش القای ولتاژ در سیم‌پیچی استاتور موتور **BLDC**شکل ۲-۹: الف) شکل موج شار پیوندی و ولتاژ القایی در سیم‌پیچی موتور **BLDC**) با چرخش روتور با فرض دو قطبی‌بودن ماشین ($\theta_e = \theta_m$ ←) [۸۰] $P = 1$

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

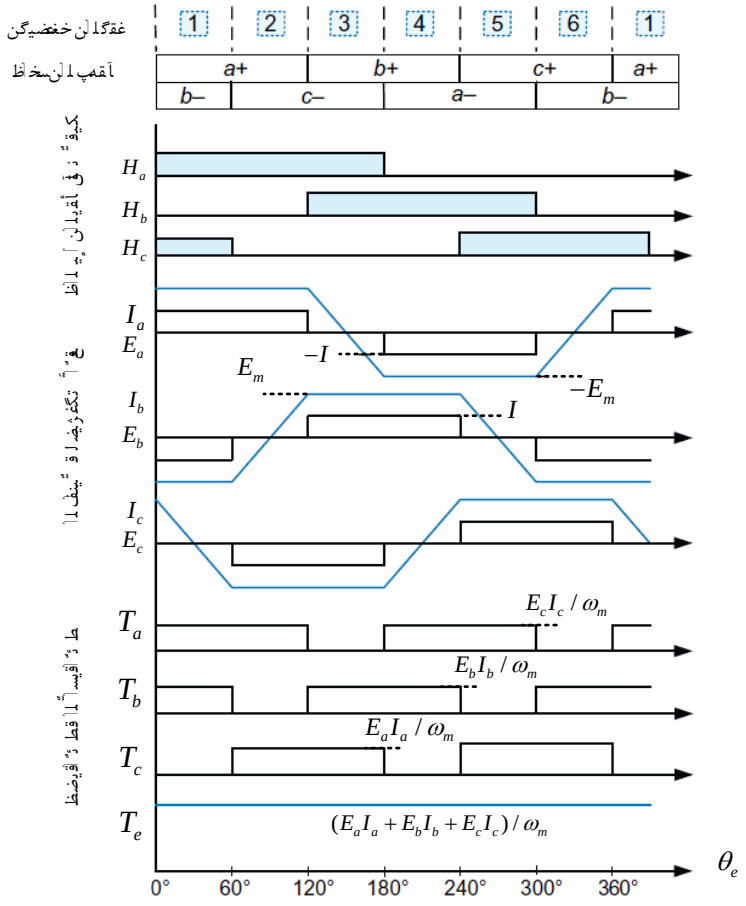
$$\lambda = \pi NrlB\theta_m / (\pi/2) \qquad (-\pi/2 \le \theta_m \le \pi/2) \qquad ۹-۱$$

دامنه‌ی ولتاژ القاشده در N دور سیم‌پیچ به کمک شار پیوندی و با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found.** حاصل خواهد شد.

$$E_a(\theta_m) = \frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{d\lambda_a}{d\theta_m}\cdot\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\pi NrlB\omega_m}{\pi/2} = 2NBlr\omega_m \qquad ۹-۲$$
$$(-\pi/2 \le \theta_m \le \pi/2) \rightarrow E_m = E_a(\theta_m) \rightarrow E_m = 2NBlr\omega_m$$

۹-۳- گشتاور ایجادشده در موتورهای BLDC و مشخصه گشتاور- سرعت آن

به‌منظور ایجاد گشتاور ثابت در موتور BLDC جریان در هر فاز موتور زمانی جاری می‌شود که ولتاژ ضدمحرکه‌ی آن فاز در حداکثر مقدار خود قرار داشته باشد(شکل ۳-۹). تشخیص این زمان توسط حسگرهای اثر هال انجام می‌شود. همچنین مطابق شکل ۳-۹ (نمودار خروجی سنسورهای اثر هال) در هر لحظه از زمان، جریان تنها در دو فاز جاری بوده و فاز سوم خاموش است. جریان ایجادشده در هر فاز در بازه‌های زمانی ۱۲۰ درجه مقدار ثابتی دارد و جریان هر فاز به شکل شبه‌مربعی است. در نتیجه گشتاور هر فاز در بازه‌های ۱۲۰ درجه‌ای که دارای مقدار ثابت بوده و گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای کل همانند موتور DC ثابت خواهد بود که در شکل ۳-۹ (نمودار گشتاور فازها و گشتاور کل) نشان داده شده است [۷۹].



شکل ۳-۹: شکل موج‌های تئوری عملکرد الکتروموتور BLDC[۸۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

بنابراین اگر جریان بصورت مربعی و ولتاژ نیز بصورت ذوزنقه‌ای باشد، ریپل گشتاور (ناشی از ولتاژ و جریان) بوجود نمی‌آید. اما به دلیل خاصیت سلفی سیم‌پیچ‌ها تولید جریان مربعی امکان‌پذیر نبوده و در نتیجه موتورهای BLDC همواره دارای ریپل گشتاور می‌باشند [۸۰].

لازم به ذکر است که مشخصه گشتاور- سرعت مهمترین مشخصه یک موتور، جهت سنجش قابلیت راه‌اندازی بار است. این مشخصه باید در نقطه مشخصی بسته به ویژگی‌های مورد انتظار با مشخصه گشتاور-سرعت بار در نقطه‌ای به نام نقطه کار برخورد نماید.

- روابط حاکم بر موتور BLDC

به دلیل نوع سیم‌پیچی استاتور الکتروموتور BLDC، شکل موج شار پیوندی مدار باز به گونه‌ای است که ولتاژ القایی در آن، ذوزنقه‌ای و مقدار آن در هر ۱۲۰ درجه ثابت است. مطابق رابطه **Error! Reference source not found.**، ولتاژ برگشتی برابر است با:

$$E_a = \frac{d\lambda_a}{dt} = \omega_m \frac{d\lambda_a}{d\theta_m} \qquad ۹-۳$$

درصورتی که I_a جریان یک فاز استاتور باشد، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط آن به صورت زیر خواهد بود:

$$T_a = \frac{E_a I_a}{\omega_m} \qquad ۹-۴$$

که در آن جریان و ولتاژ همواره هم علامت هستند تا گشتاور مثبت ایجاد گردد. چون مقدار $\frac{d\lambda_a}{d\theta_m}$ هر ۱۲۰ درجه مقدار ثابتی دارد، emf هر ۱۲۰ درجه نیز مقداری ثابت خواهد داشت:

$$E = K_E \omega_m \qquad ۹-۵$$

این فرمول رابطه مستقیم میان اندازه ولتاژ موتور و سرعت آن را بیان می‌دارد. رابطه کلی میان توان و گشتاور در موتورهای الکتریکی به صورت $EI = T\omega$ است، که از برآیند آن با **Error! Reference source not found.** م ی‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ای مستقیم میان گشتاور و جریان موتور BLDC به صورت زیر برقرار است. K_E یک ضریب ثابت است.

$$T_a = K_E I_a \qquad ۹-۶$$

درصورتی که V_s ولتاژ DC موتور، I جریان DC یا حداکثر جریان هر فاز و E_{ab} ولتاژ emf خط باشد، رابطه میان این سه پارامتر به صورت زیر است:

$$V_s = E_{ab} + 2RI \qquad ۹-۷$$

افت ولتاژ بر روی کلیدهای درایو، کوچک و قابل صرف نظر است. با جایگزینی E و **Error! Reference source not found.**، رابطه گشتاور سرعت موتور BLDC به صورت زیر و رابطه‌ای خطی خواهد بود:

$$\frac{\omega_m}{\omega_{NL}} = 1 - \frac{T}{T_{LR}} = 1 - \frac{I}{I_{LR}} \qquad ۹-۸$$

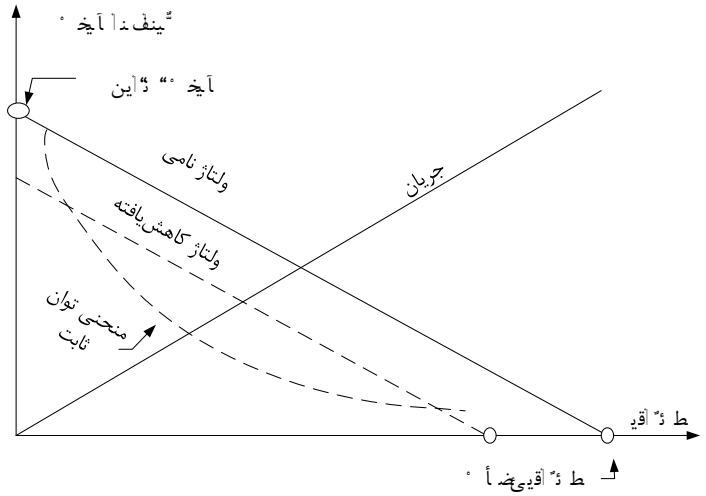
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

که در آن ω_{NL} سرعت زاویه بی باری و T_{LR} و I_{LR} به ترتیب گشتاور و جریان روتور قفل (شکست) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\omega_{NL} = \frac{V_s}{K_E} \qquad ۹-۹$$

$$T_{LR} = K_T I_{LR} = K_T \frac{V_s}{2R} \qquad ۹-۱۰$$

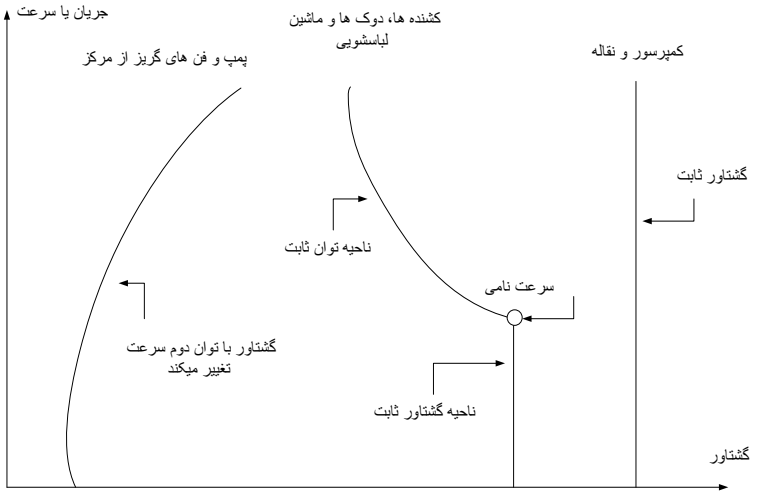
رابطه‌ی خطی گشتاور- سرعت موتور BLDC در شکل ۴-۹ نشان داده شده است:



شکل ۴-۹: نمودار گشتاور سرعت موتور **BLDC**[۸۱]

شکل ۵-۹ مشخصه گشتاور سرعت بارهای مختلفی که توسط موتور BLDC می‌توان تامین نمود را نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل می‌توان مشاهده نمود، مشخصه گشتاور سرعت برای کاربرد وسایل نقلیه با افزایش سرعت تا سرعت نامی ثابت و پس از آن با تضعیف گشتاور به صورت توان ثابت، کاهش می‌یابد. جهت بدست آوردن نقطه کار نامی بایستی نمودار گشتاور سرعت موتور BLDC طراحی‌شده را با نمودار گشتاور سرعت بار قطع داد. در ادامه با تعیین شدن نقطه کار موتور BLDC در این کاربرد خاص، به مشخصه توان ۵۰۰ وات و گشتاور ۳۰ نیوتون‌متر (مقدار گشتاور موتور با توجه به مطالعات انجام شده در فصل قبل انتخاب شده است)، به شرح و روند کلی طراحی موتور BLDC برای این کاربرد خاص پرداخته می‌شود.

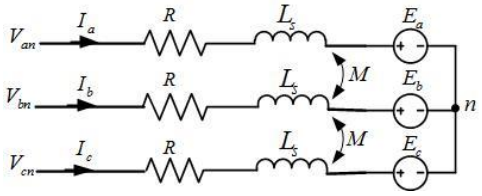
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



برای انواع بار [۸۱]**BLDC**شکل ۵-۹: مشخصه گشتاور سرعت موتور

۹-٤- مدار معادل و معادلات حاکم بر موتور BLDC

مدل مداری موتور BLDC سه‌فاز در شکل ۶-۹ نشان داده‌شده است. در این مدل فرض می‌شود که هر سه فاز کاملاً متعادل هستند. ازاین‌رو معادلات موتور به‌صورت زیر خواهند بود.



سه‌فاز**BLDC**شکل ۶-۹: مدار معادل موتور

$$V_{an} = R_a I_a + \frac{d}{dt}\left(L_{aa} I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c\right) + E_a$$

$$V_{bn} = R_b I_b + \frac{d}{dt}\left(L_{ba} I_a + L_{bb} I_b + L_{bc} I_c\right) + E_b \qquad ۹\text{-}۱۱$$

$$V_{cn} = R_c I_c + \frac{d}{dt}\left(L_{ca} I_a + L_{cb} I_b + L_{cc} I_c\right) + E_c$$

با فرض تعادل فازها:

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s \qquad ۹\text{-}۱۲$$

$$L_{ba} = L_{ab} = L_{ca} = L_{ac} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

در روابط فوق L_s و M به ترتیب اندوکتانس خودی و متقابل فازهای استاتور می‌باشند. با جایگذاری روابط، داشتن رابطه‌ی $I_a + I_b + I_c = 0$ ، $L = L_s - M$ و با ساده‌سازی، معادلات ولتاژ به‌صورت زیر خواهند بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad ۹-۱۳$$

در معادلات فوق V_{an}، V_{bn} و V_{cn} ولتاژهای ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، E_a، E_b و E_c ولتاژهای ضدمحرکه فازها می‌باشند. گشتاور الکترومغناطیسی روی محور روتور نیز از رابطه ۹-۱۴ قابل‌محاسبه است:

$$T_e = \frac{E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c}{\omega_m} \quad ۹-۱۴$$

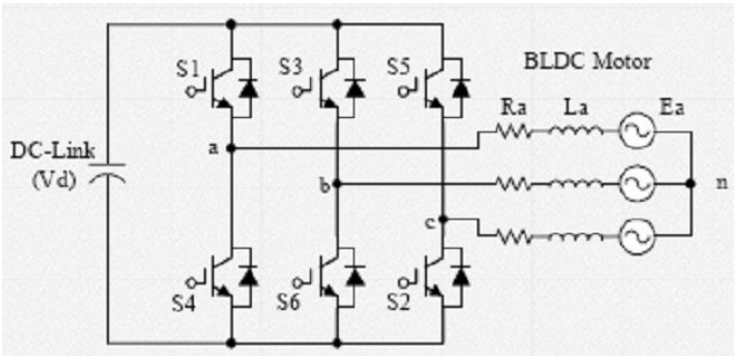
در رابطه‌ی فوق ω_m سرعت روتور بوده و از معادله‌ی حرکت دورانی نیوتن به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$T_e = T_L + J\frac{d\omega_m}{dt} + B_f \omega_m \quad ۹-۱۵$$

در رابطه ۹-۱۵، T_L گشتاور بار و B_f و J نیز به ترتیب ضریب اصطکاک بار و ممان اینرسی ارجاعی به محور روتور می‌باشند [۷۹].

۹-۵- اینورتر مورد استفاده در درایو موتور BLDC

در موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک به دلیل انجام عمل کموتاسیون جریان به‌صورت الکترونیکی، برخلاف موتورهای القایی و سنکرون، حتی در کاربردهای سرعت ثابت نیز به‌صورت دائمی به مبدل توان (اینورتر) نیاز است. با توجه به نوع کاربرد، قابلیت اطمینان، هزینه‌ی ساخت، رفتار دینامیکی و عوامل دیگر، اینورترهای مختلفی برای موتور BLDC پیشنهاد شده است. با کلیدزنی مناسب سوئیچ‌ها روی ولتاژ لینک DC، جریان‌های هر فاز در بازه‌های ۱۲۰ درجه ثابت باقی خواهد ماند. اینورترهای پیشنهادشده برای موتورهای BLDC به دو دسته‌ی کلی تمام‌موج و نیم‌موج تقسیم‌بندی می‌شوند. در اینورتر تمام موج که در شکل ۷-۹**شکل** ۷-۹ نمایش داده‌شده، جریان هر فاز دارای هر دو مقدار مثبت و منفی است. اما در اینورترهای نیم‌موج، جریان فازها فقط دارای مقدار مثبت می‌باشند [۷۹].



BLDC.[۸۰]شکل ۷-۹ اینورتر تمام موج برای موتور

اینورترهای نیم‌موج شامل انواع مختلفی بوده که عبارت‌اند از: نوع Split-Supply که حداقل تعداد کلید در هر فاز را داراست، نوع C-Dump که دارای چهار کلید است و نوع نیم‌موج با ولتاژ لینک dc متغیر. جهت جریان در اینورترهای نیم‌موج یک‌طرفه است، اما جهت توان در آن‌ها دوطرفه بوده و قابلیت عملکرد چهاربعی را هم دارند.

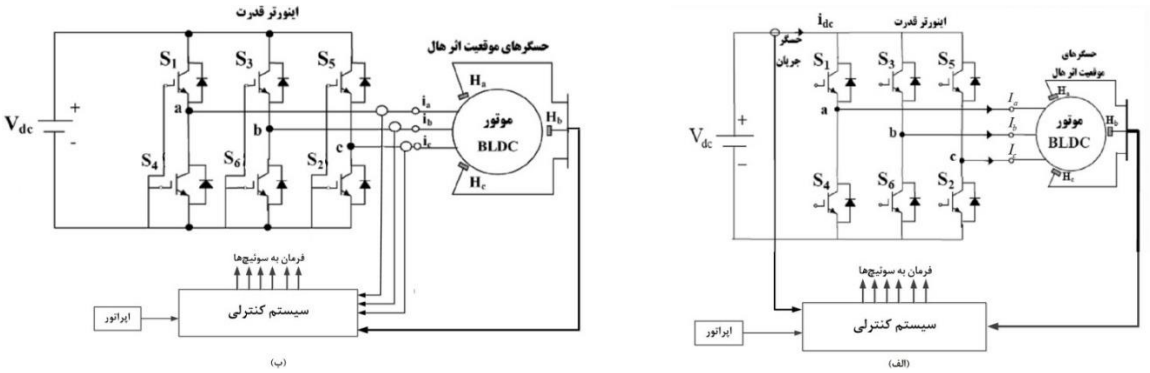
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

در اینورترهای نیم‌موج در یک دوره‌ی ۳۶۰ درجه، هرفاز تنها ۱۲۰ درجه هدایت کرده و همچنین در بعضی انواع آن تنها از نصف ولتاژ لینک dc استفاده می‌شود، از این‌رو این اینورترها دارای ساختار ساده‌تری می‌باشند. بااین‌حال این اینورترها دارای بهره‌وری پایینی بوده و از ظرفیت نامی موتور استفاده نمی‌کنند. لذا کاربرد آن‌ها به توان‌های در حد کسری از اسب بخار محدود شده است و امروزه اینورترهای تمام‌موج کاربرد وسیع‌تری دارند [۷۹]. در پروژه‌ی حاضر نیز از اینورتر تمام موج در درایو موتور BLDC دوچرخه برقی استفاده شده است.

۹-۵-۱- روش‌های کنترل موتور BLDC

مزیت عمده‌ی موتورهای BLDC قابلیت کنترل آسان سرعت/گشتاور در این موتورها است که همانند موتورهای dc تنها نیازمند تغییر دامنه‌ی جریان استاتور است. روش‌های مختلفی برای کنترل سرعت/گشتاور موتورهای BLDC پیشنهاد شده که عبارت‌اند از: کنترل مستقیم جریان لینک dc، کنترل مستقیم جریان فازها، کنترل مستقیم گشتاور.

در یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در هر لحظه از زمان، جریان تنها در دو فاز جاری بوده و فاز سوم خاموش است (به‌جز در لحظات کموتاسیون که جریان برای مدت کوتاهی در هر سه فاز جاری می‌شود). این جریان از منبع (با لینک dc) وارد موتور شده و سپس به آن برمی‌گردد. لذا برای کنترل جریان در موتور BLDC کافی است تا تنها جریان لینک dc که با فرض ثابت بودن بار، باید مقدار ثابتی داشته باشد، حول مقدار مرجع خود تنظیم شود. این روش متداول‌ترین روش کنترل این موتورها است. در شکل ۸-۹-الف بلوک دیاگرام درایو کنترل سرعت موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک dc نشان داده‌شده است [۷۹].

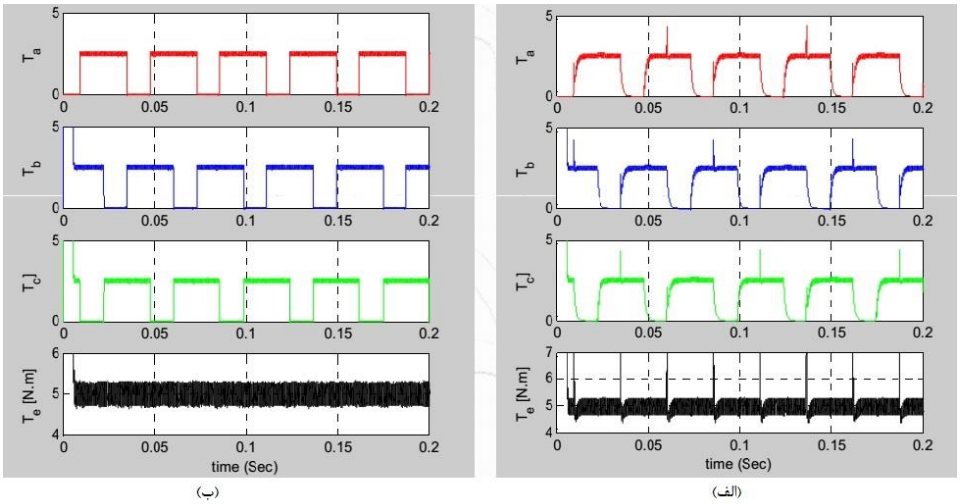


شکل ۸-۹ درایو موتور BLDC کنترل جریان لینک dc به روش الف) کنترل مستقیم جریان فازها ب)

تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه با استفاده از روش کنترل جریان لینک dc نیز در شکل ۹-۹-الف نشان داده‌شده است.

مشاهده می‌گردد که در لحظات کموتاسیون، به دلیل عملکرد دیودهای مکمل، جریان در هر سه‌فاز جاری می‌شود و درنتیجه، گشتاور در این لحظات دیگر ثابت نبوده و بسته به مقدار سرعت دچار اعوجاجاتی به‌صورت بالازدگی یا فرورفتگی می‌شود. این ضربان گشتاور که ناشی از کموتاسیون جریان بوده و به ضربان ناشی از کموتاسیون معروف است، یکی از مشکلات استفاده از محرکه موتور BLDC کنترل‌شده با این روش است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



ب) کنترل جریان فازها dc[۷۹]شکل ۹-۹ تغییرات گشتاور و جریان فازها در روش الف) کنترل جریان لینک

برای غلبه بر مشکل فوق، لازم است تا جریان فازها در تمامی زمان‌ها ازجمله در بازه کموتاسیون نیز کنترل گردد. ازاین‌رو روش دیگری که برای کنترل موتور BLDC استفاده می‌شود، کنترل مستقیم جریان فازها است. در این روش برای هرکدام از فازها یک کنترل‌کننده‌ی جریان جداگانه درنظر گرفته شده و بلوک دیاگرام این روش کنترلی در شکل ۸-۹-ب نشان داده‌شده است. شکل ۹-۹-ب نیز تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه را با استفاده از این روش کنترلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جریان فازها دستخوش هیچ‌گونه اعوجاجی در لحظات کموتاسیون نمی‌گردند و جریان و گشتاور فقط شامل ضربان مربوط به کنترل‌کننده‌های هیسترزیس هستند [۷۸].

روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC[1]) از روش‌های جدید کنترل موتورهای القایی و PMSM است که طی دو دهه‌ی اخیر توسعه داده‌شده و توسط شرکت‌هایی ازجمله ABB تجاری شده است. از مزایای روش DTC می‌توان به ساختار ساده‌تر، کنترل مستقیم شار و گشتاور و حذف حلقه‌های کنترل جریان، عملکرد دینامیکی بالا و پاسخ سریع، کلیدزنی به روش SVM اشاره کرد. اگرچه این روش در ابتدا برای موتورهای سینوسی بیان شد، بااین‌حال جذابیت‌ها و سادگی پیاده‌سازی این روش سبب شد که برای موتورهای BLDC نیز به‌کار رود [۷۹].

۹-۵-۲- کنترل موتور BLDC در کاربرد دوچرخه برقی

در سرعت نامی موتور BLDC، ولتاژ ترمینال، به حداکثر مقدار نامی خود می‌رسد. از آنجایی که ولتاژ ضد محرکه الکتروموتور با افزایش سرعت، افزایش پیدا می‌کند، گستره سرعت قابل دستیابی، فقط با کاهش شار فاصله هوایی امکان‌پذیر است که این امر، عملکرد با تضعیف شار خوانده می‌شود. جهت تشریح بهتر این فرآیند، در ادامه روابط مشخصه الکتروموتور BLDC در فضای dq مورد مطالعه قرار گرفته است. اما در عمل با توجه به ماهیت غیرسینوسی موتور BLDC، تبدیل پارک برای کنترل این الکتروموتور، کارآمد نخواهد بود و در این مطالعه صرفا جهت تشریح عملکرد تضعیف شار استفاده شده است.

بدین ترتیب روابط الکتروموتور پس از تبدیل پارک، بصورت زیر خواهد بود:

1- Direct Torque Drive

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

$$\begin{cases} V_d = RI_d + \dfrac{d\lambda_d}{dt} - \omega_m \lambda_q \\ V_q = RI_q + \dfrac{d\lambda_q}{dt} + \omega_m \lambda_d \end{cases} \qquad ۹-۱۶$$

که در آن ω_m سرعت الکتریکی، I_d و I_q، V_d و V_q مولفه‌های جریان و ولتاژ الکتروموتور در دو محور و λ_d و λ_q شار پیوندی استاتور در دور محور می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d I_d + \lambda_m \\ \lambda_q = L_q I_q \end{cases} \qquad ۹-۱۷$$

همان‌طور که از رابطه ۹-۱۷ مشاهده می‌گردد، با توجه به اینکه شار آهنربا (λ_m) در جهت محور d قرار دارد و با افزایش مولفه I_d جریان استاتور در جهت منفی، می‌توان شار برآیند یا شار فاصله هوایی را کاهش داد.

رابطه گشتاور موتور BLDC نیز در این مختصات بصورت زیر می‌باشد:

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q\right) \qquad ۹-۱۸$$

که در آن L_d و L_q اندوکتانس محورهای d و q الکتروموتور و P نشان‌دهنده تعداد قطب‌های ماشین است. با توجه به اینکه الکتروموتور مورد نظر پروژه حاضر، از نوع آهنربای سطحی است، اندوکتانس دو محور الکتروموتور برابر می‌باشد و ترم دوم گشتاور در رابطه فوق که به عنوان گشتاور رلوکتانسی شناخته می‌شود، صفر است و گشتاور خروجی فقط از برهم‌کنش شار میدان آهنربا (λ_m) و جریان محور q استاتور ایجاد می‌شود.

با توجه به اینکه در سرعت‌های بالا، ترم افت مقاومتی RI_d در برابر ترم $\omega_m \lambda_q$ و ترم RI_q در برابر ترم $\omega_m \lambda_d$ ناچیز می‌باشد، برای حالت ماندگار ($\frac{d\lambda_d}{dt}=0, \frac{d\lambda_q}{dt}=0$) رابطه ۹-۱۶ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} V_d = -\omega_m L_q I_q \\ V_q = \omega_m L_d I_d + \omega_m \lambda_m \end{cases} \qquad ۹-۱۹$$

با توجه به تغذیه الکتروموتور با ولتاژ ثابت و همچنین محدودیت ولتاژ الکتروموتور و اینورتر، می‌توان رابطه محدودیت ولتاژ الکتروموتور را بصورت زیر بیان کرد:

$$V_d^{\,2} + V_q^{\,2} \le V_s^{\,2} \qquad ۹-۲۰$$

با جایگذاری رابطه ۹-۱۹در رابطه ۹-۲۰ و همچنین برابر در نظر گرفتن اندوکتانس دو محور (L)، مکان هندسی نقاط کار مجاز الکتروموتور بصورت زیر بدست می‌آید:

$$I_q^{\,2} + \left(I_d + \frac{\lambda_m}{L}\right)^2 \le \left(\frac{V_s}{L.\omega_e}\right)^2 \qquad ۹-۲۱$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

رابطه فوق نشان‌دهنده دوایری به مرکز (0، $-\frac{\lambda_m}{L}$) و شعاع $\frac{V_s}{L.\omega_m}$ در فضای مختصات I_d-I_q می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که شعاع این دایره‌ها با افزایش سرعت الکتروموتور کاهش می‌یابد.

محدودیت دیگر الکتروموتور، جریان نامی آن و اینورتر می‌باشد که بصورت یک دایره با شعاع I_s بصورت زیر نشان داده می‌شود:

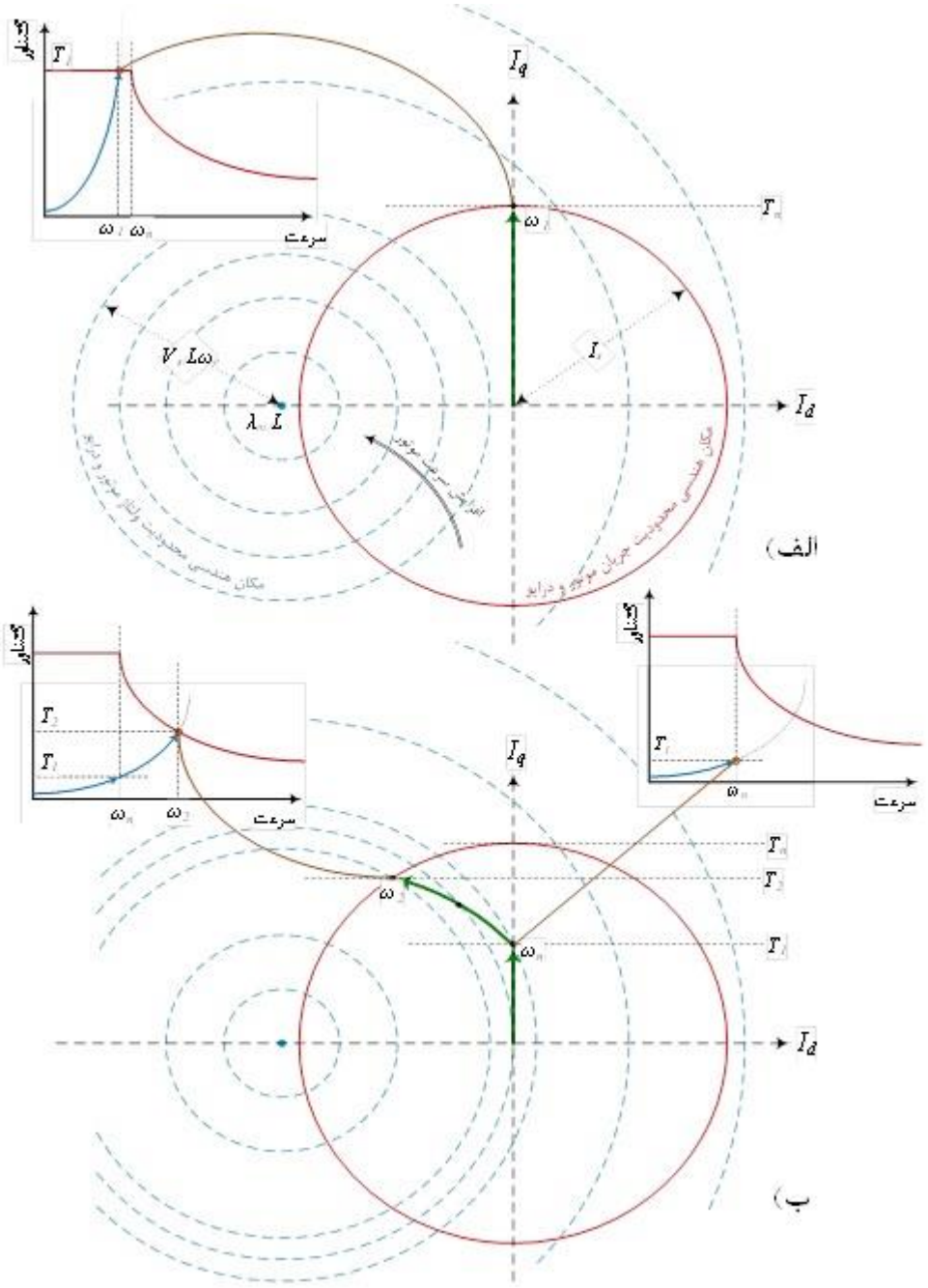
$$I_d^2 + I_q^2 \le I_s^2 \qquad ۹-۲۲$$

مکان هندسی محدودیت‌های جریانی در کنترل الکتروموتور BLDC، در شکل ۱۰-۹ نشان‌داده شده است. همانطور که قبلا ذکر گردید، با توجه به اینکه اندوکتانس دو محور d و q در الکتروموتور هدف پروژه، برابر می‌باشد، در رابطه ۹-۱۸، گشتاور خروجی تابعی از مولفه جریان I_d نمی‌باشد و با مولفه جریان I_q رابطه مستقیم و خطی دارد. بنابراین برای دریافت حداکثر گشتاور به ازای هر آمپر جریان الکتروموتور (MTPA[1])، بایستی جریان محور q را متناسب با گشتاور مورد نیاز بار افزایش داد.

بمنظور تشریح بهتر فرآیند کنترل MTPA در الکتروموتور BLDC دوچرخه، دو حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول زمانی است که مشخصه بار دوچرخه هرگز وارد ناحیه بالای سرعت نامی نمی‌شود و نیازی به تضعیف شار در فاصله هوایی وجود ندارد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که وزن دوچرخه سوار بالا بوده و یا اینکه شیب مسیر زیاد باشد. در این صورت با توجه به اینکه سرعت الکتروموتور حتی در حداکثر گاز (ω_1)، به سرعت نامی آن (ω_n) نمی‌رسد، نقاط کار آن، حاشیه امنیت خوبی از حداکثر ولتاژ مجاز خواهد داشت و می‌توان گشتاور آن را با افزایش جریان محور q تا جریان نامی (I_s) و گشتاور نامی (T_n) الکتروموتور افزایش داد. مکان هندسی نقاط کار MTPA الکتروموتور برای حالت اول در شکل ۱۰-۹- الف، با رنگ سبز نشان داده شده است.

1- Maximum Torque Per Ampere

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



با توجه به محدودیت‌های موتور و درایو و مشخصه باردوچرخه. الف) **BLDC** موتور **MTPA**شکل ۱۰-۹: نمایش برداری کنترل مشخصه بار با وارد ناحیه تضعیف شار نمی‌شود ب) مشخصه بار با وارد ناحیه تضعیف شار می‌شود

حالت دوم نیز زمانی اتفاق می‌افتد که وزن دوچرخه سوار کم بوده و یا دوچرخه در در مسیر با شیب کم و یا حتی منفی حرکت کند. در اینصورت مشخصه بار دوچرخه با افزایش گاز، قبل از اینکه گشتاور الکتروموتور (T_1) به سقف مجاز آن (T_n) برسد، وارد ناحیه سرعت بالای سرعت نامی آن می‌شود. در شکل ۱۰-۹-ب مشاهده می‌شود که با افزایش جریان محور q تا یک حد مشخصی (که کاملا به مشخصه بار دوچرخه بستگی دارد)، نقطه کار موتور به محدودیت ولتاژ خود می‌رسد. در این حالت با توجه به اینکه ولتاژ القایی الکتروموتور به ولتاژ تغذیه آن رسیده است و دیگر نمی‌توان سرعت را افزایش داد، می‌توان با تضعیف شار فاصله هوایی، ولتاژ القایی را با افزایش سرعت الکتروموتور،

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

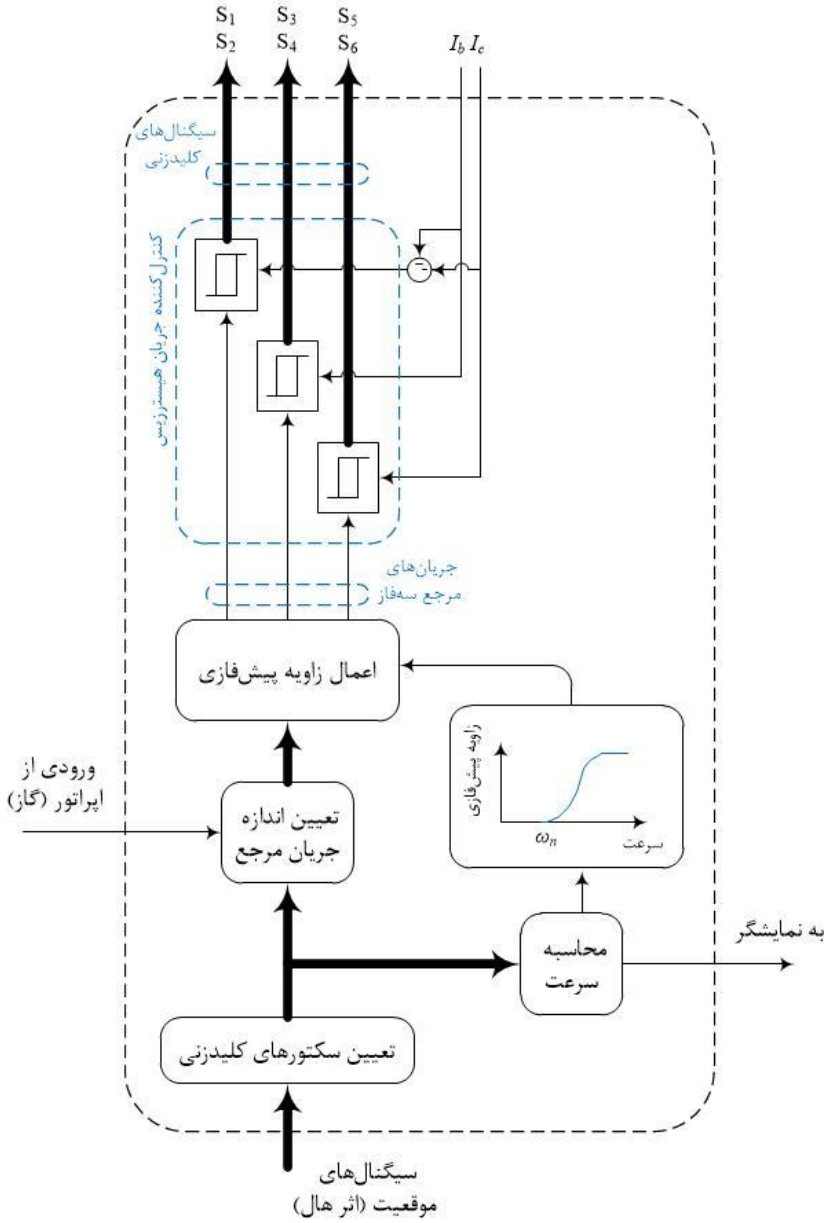
ثابت نگه داشت ($E \propto \varphi\downarrow \times \omega\uparrow$). بدین ترتیب همانطور که قبلا اشاره شد، در این مرحله بایستی جریان محور d را در جهت منفی افزایش داد که مکان هندسی این نقاط ظاهرا باید بر روی دایره آبی‌رنگ در شکل ۱۰-۹- ب که نشان‌دهنده محدودیت ولتاژ است، باشد. اما با توجه به اینکه با افزایش جریان محورهای d و q، سرعت الکتروموتور افزایش یافته و شعاع دایره کاهش می‌یابد، مکان هندسی نقاط کار الکتروموتور در ناحیه تضعیف شار، بر روی دوایر مختلف با کاهش شعاع به سمت مرکز آن‌ها قرار می‌گیرد. مکان هندسی این نقاط با رنگ سبز در شکل ۱۰-۹- ب نشان داده شده است. این نقاط تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جریان الکتروموتور به حداکثر مقدار مجاز خود (I_s) برسد که در این نقطه گشتاور و سرعت الکتروموتور به ترتیب برابر با T_2 و ω_2 خواهد بود.

- فرآیند کنترل موتور BLDC در دوچرخه برقی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، روش‌های کنترل موتور BLDC به دو روش عمده کنترل جریان لینک DC و کنترل جریان‌های سه‌فاز موتور تقسیم‌بندی می‌شود. در پروژه‌ی حاضر از روش کنترل جریان‌های سه‌فاز استفاده شده و دیاگرام کلی روش کنترلی موتور دوچرخه برقی در شکل ۱۱-۹ نشان داده شده است.

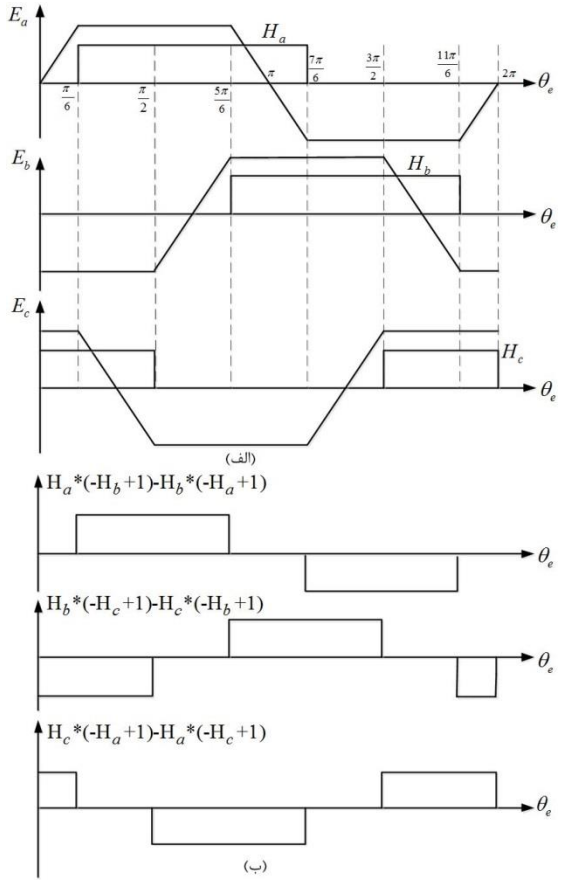
در گام اول، جهت تعیین سکتورهای کلیدزنی از خروجی سنسورهای اثر هال و همچنین شکل موج ولتاژهای ضدمحرکه موتور استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲-۹- الف نشان داده شده است، هنگامی که ولتاژ ضدمحرکه هرفاز به مقدار ماکزیمم مثبت خود می‌رسد، خروجی سنسور اثر هال مربوط به آن فاز دارای مقدار ۱ بوده وتا زمانی که ولتاژ ضدمحرکه به مقدار ماکزیمم منفی خود برسد این مقدار ۱ باقی خواهند ماند و پس از آن صفر می‌شود. بدین صورت خروجی سنسورهای اثر هال مطابق با شکل ۱۲-۹-الف خواهند بود. در گام بعدی برای ایجاد شکل موج‌های هم‌فاز با جریان‌های سه‌فاز موتور BLDC، از سیگنال‌های اثر هال بهره گرفته و با استفاده از این سیگنال‌ها، شکل موج‌هایی هم‌فاز با شکل موج‌های جریان‌های موتور که در شکل ۱۲-۹-ب نشان داده شده‌اند، بدست می‌آیند. در مرحله بعدی اندازه‌ی جریان مرجع بسته به حضور در ناحیه توان ثابت و یا تضعیف شار توسط اپراتور تعیین می‌شود. سپس این مقدار جریان مرجع در شکل موج‌های هم‌فاز با جریان‌های موتور ضرب شده و شکل موج جریان‌های مرجع برای هر سه‌فاز موتور به دست می‌آید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۱-۹: دیاگرام کلی روش کنترلی الکتروموتور **BLDC** دوچرخه برقی

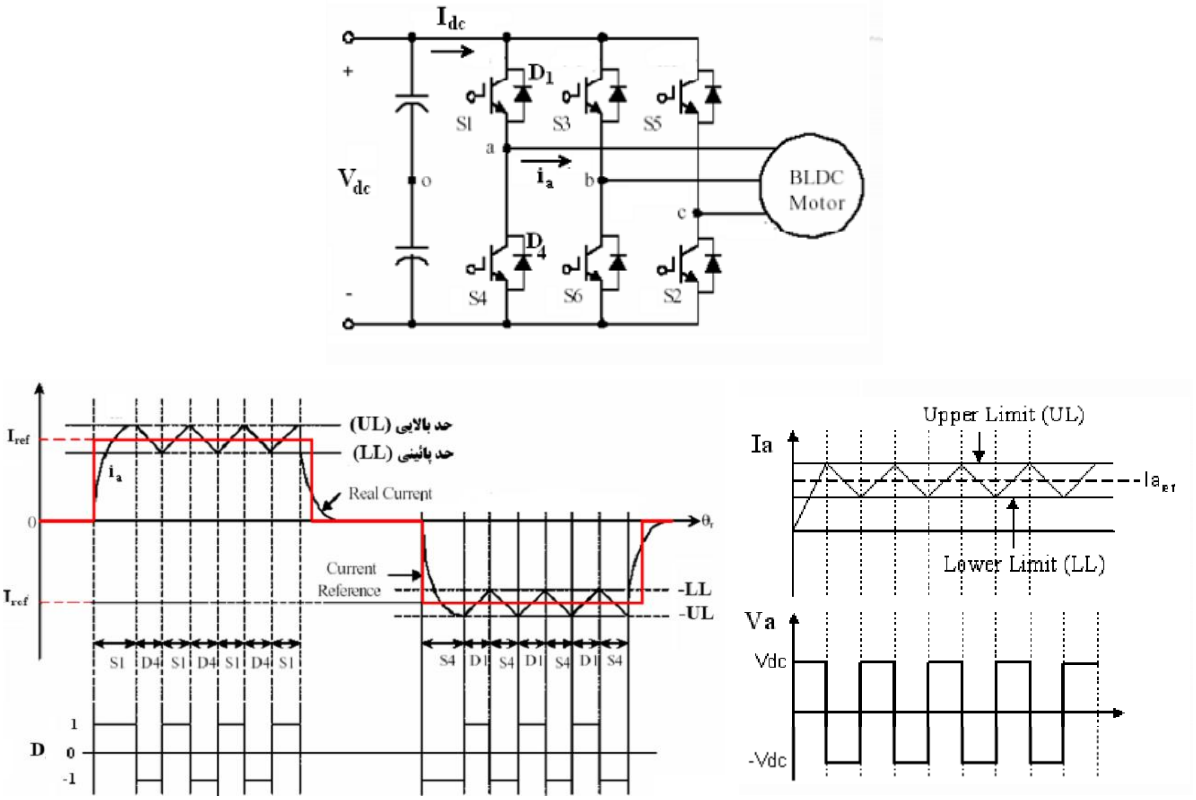
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۲-۹ : الف) ولتاژهای ضد محرکه و سیگنال‌های خروجی سنسورهای اثر هال سه فاز ب) شکل موج‌های هم‌فاز با جریان‌های سه فاز موتور **BLDC**

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این روش از کنترل‌کننده‌های جریان استفاده شده که این کنترل‌کننده‌ها از نوع هیسترزیس می‌باشند. در روش هیسترزیس یک حد بالا و یک حد پایین برای جریان تعریف می‌شود و در صورت خارج‌شدن جریان از این محدوده‌ها، کلیدها روشن یا خاموش خواهند شد. مطابق با شکل ۱۳-۹شکل ۱۳-۹ در نیم‌سیکل مثبت با روشن کردن کلید S1 و یکی از کلیدهای S2 یا S6، بر روی فاز a ولتاژ مثبت قرارگرفته و جریان آن افزایش می‌یابد. هنگامی‌که جریان از حد بالایی تعیین‌شده، بیشتر شود، کلید S1 خاموش خواهد شد. در این صورت با توجه به اینکه جریان سیم‌پیچ تمایل به باقی ماندن در همان جهت را دارد، دیود هرزگرد D4 (و یکی از دیودهای D3 و D5) روشن شده و مسیر جریان بسته می‌شود. با روشن شدن این دیودها ولتاژ منفی بر روی سیم‌پیچ افتاده و درنتیجه جریان آن کاهش می‌یابد. هنگامی‌که جریان از حد پایین تعیین‌شده برای آن کم‌تر شود، کلید S1 مجدداً روشن شده و جریان افزایش می‌یابد. به‌این‌ترتیب جریان در محدوده‌ی تعیین‌شده کنترل شده و پالس‌های موردنیاز برای کلید تولید می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۳-۹ کنترل‌کننده هیسترزیس جریان برای کنترل موتور **BLDC**

۹-۶- طراحی و ساخت درایو موتور BLDC در کاربرد دوچرخه الکتریکی

در این بخش به نحوه طراحی درایو موتور BLDC پرداخته می‌شود. اجزای تشکیل دهنده مدار درایو به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و جزییات مهم طراحی هر یک بیان می‌شود. به‌طور کلی، در طراحی و ساخت درایو موتور BLDC در کاربرد دوچرخه الکتریکی، نکات زیر درنظر گرفته شده‌است:

- باتوجه به این‌که برد درایو در داخل موتور BLDC تعبیه می‌شود، تلاش شده‌است ابعاد برد، در حد امکان کوچک طراحی شود.
- به منظور کاهش هزینه تمام‌شده دوچرخه الکتریکی، در طراحی از قطعاتی که در عین کارایی هزینه کمتری دارند، از جمله، نوع گیت‌درایور، سنسور جریان و میکروکنترلر استفاده شده‌است.
- در طراحی برد، امکان کنترل موتور با هر دو روش کنترل متداول و کنترل بدون‌سنسور موتور BLDC درنظر گرفته شده‌است.

در ادامه، بخش های مختلف طراحی برد درایور ارائه شده‌است.

۹-۶-۱- طراحی اینورتر

به طور معمول در درایو موتور BLDC، از یک مبدل منبع ولتاژی (VSI) استفاده می‌شود. این مبدل VSI ،

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

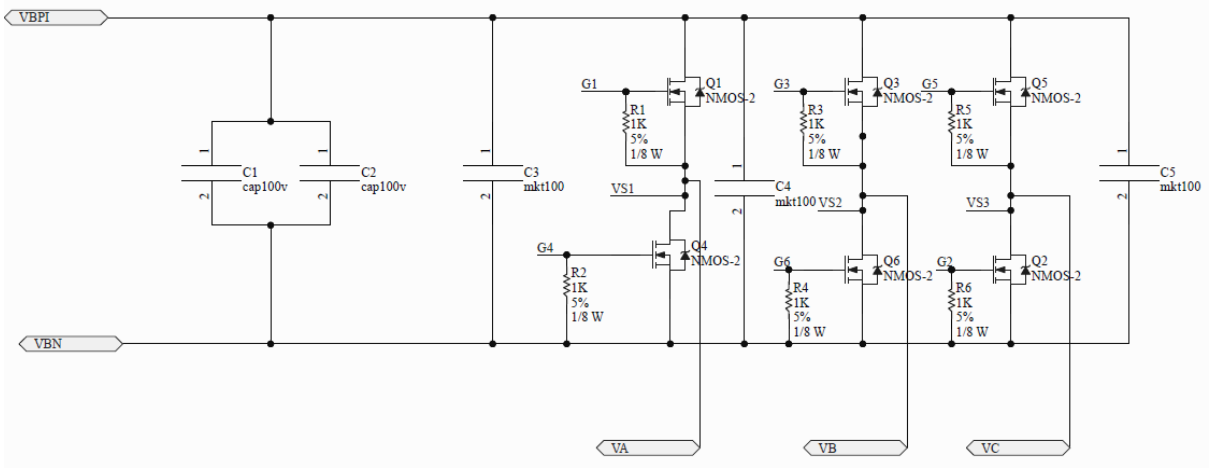
ساختاری مشابه مبدل سه‌فاز متداول دارد که هر یک از ساق‌های آن به یکی از سیم‌پیچی‌های موتور متصل می‌شود. عمل کموتاسیون در موتور BLDC با کلیدزنی ساق‌های مبدل انجام می‌گیرد.

عامل تعیین‌کننده در طراحی یک مبدل، توان نامی آن است. با توجه به این‌که توان موتور BLDC برابر ۱۰۰۰ وات انتخاب شده‌است، در طراحی مبدل نیز توان برابر ۱۰۰۰ وات درنظر گرفته‌می‌شود. همچنین، ولتاژ کاری مبدل، با توجه به ولتاژ باتری مورداستفاده در دوچرخه الکتریکی تعیین می‌شود. ولتاژ باتری در این پروژه متناسب با توان موتور، ۴۸ ولت درنظر گرفته‌شده‌است.

در انتخاب کلید مناسب برای یک مبدل، توجه به ولتاژ و جریان قابل‌تحمل کلید ضروری است. کلید انتخاب‌شده باید قابلیت تحمل ولتاژ ضربه که در هنگام کلیدزنی ایجاد می‌شود، را دارا باشد. برای این منظور، ولتاژ کلید حداقل باید دو برابر ولتاژ نامی مبدل باشد. درنتیجه، در طراحی مبدل موتور BLDC، از کلید ماسفت ۱۰۰ ولتی مدل IRF540 استفاده شده‌است.

شکل ۱۴-۹ مدار مبدل طراحی‌شده برای موتور BLDC را نشان می‌دهد. در این شکل:

- کلیدهای Q1 تا Q6 نشان‌دهنده ماسفت است که توسط سیگنال‌های G1 تا G6 فرمان داده می‌شوند.
- مقاومت‌های R1 تا R6 بین پایه‌های گیت و سورس هر کلید متصل شده‌است. وظیفه این مقاومت‌ها جلوگیری از روشن شدن ناخواسته کلیدها در اثر نویز است.
- خازن‌های ۱۰۰ ولت C1 و C2 از نوع الکترولیتی و مربوط به لینک DC هستند.
- خازن‌های C3 تا C5 خازن اسنابر از نوع MKT بوده و به منظور حفاظت در برابر ولتاژهای ضربه کلیدزنی قرار داده شده‌اند.
- VA,VB,VC خروجی‌های مبدل هستند که به سیم‌پیچی‌های موتور متصل می‌شوند.
- ورودی مبدل که با VBP و VBN مشخص شده‌اند، به‌ترتیب، به مثبت و منفی باتری متصل می‌شوند.



BLDCشکل ۱۴-۹: شماتیک مدار مبدل موتور

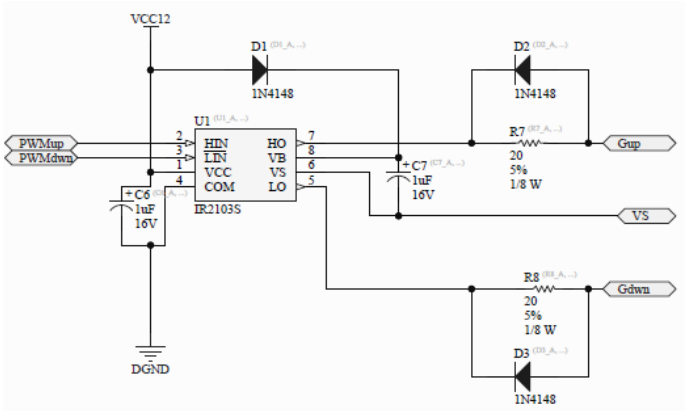
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۹-۶-۲- طراحی گیت‌درایور برای مبدل

مدار راه‌انداز گیت (Gate Driver Circuit) واسطی است که بین سیگنال‌های کلیدزنی ارسالی توسط میکروکنترلر و کلیدهای قدرت مبدل قرار می‌گیرد. ولتاژ خروجی میکروکنترل‌ها معمولا دارای سطح ۳.۳ ولت است، درحالی‌که برای روشن شدن کلیدهای قدرت، سطح ولتاژ سیگنال حداقل باید ۱۲ ولت باشد. وظیفه اصلی گیت‌درایور تبدیل سطح سیگنال‌های ارسالی میکروکنترلر به سطح ولتاژ موردنیاز برای راه‌اندازی کلید قدرت است. همچنین، مدار گیت‌درایور وظیفه تامین ولتاژ موردنیاز برای کلیدهای سمت‌بالا (High side) را به عهده دارد. شایان ذکر است که سورس کلید سمت‌بالا در هر ساق، در لحظه کلیدزنی دارای ولتاژ لینک DC است. بنابراین، تامین ولتاژ مناسب گیت-سورس توسط مدار گیت‌درایور انجام می‌گیرد. در شکل ۱۵-۹ مدار گیت‌درایور طراحی‌شده برای یک ساق مبدل نشان داده شده‌است.

در این طرح، از آی‌سی گیت‌درایور مدل IR2103 استفاده شده‌است. مزیت این نوع آی‌سی، تامین سیگنال کلیدزنی برای هر دو کلید در یک ساق مبدل، سادگی طراحی و هزینه کم آن است. اجزای مدار در شکل ۱۵-۹ به شرح زیر است:

- ولتاژ تغذیه ۱۲ ولت درنظر گرفته شده‌است که برای تامین سطح ولتاژ مورد نیاز کلیدزنی نیز استفاده می‌شود. خازن C6 برای تثبیت ولتاژ ورودی قرار گرفته‌است.
- دیود D1 و خازن C7 مدار بوت-استرپ (boot-strap) را تشکیل می‌دهند که وظیفه تامین ولتاژ کلیدزنی کلید سمت‌بالا (High side) را به عهده دارند.
- مقاومت‌های R7 و R8 نشان‌دهنده مقاومت گیت هستند. مقاومت گیت برای تنظیم سرعت خاموش‌شدن کلید استفاده می‌شود.
- دیودهای D2 و D3 از نوع دیود هرزگرد هستند که برای تامین مسیر جریان در لحظه کلیدزنی به کار می‌روند.
- ورودی سیگنال‌های کلیدزنی از میکروکنترلر توسط PWMup و PWMdwn نشان داده شده‌است.
- خروجی‌های مدار گیت‌درایور، سیگنال گیت کلید سمت‌بالا Gup ، سیگنال گیت کلید پایین Gdwn و VS که به سورس کلید سمت‌بالا وصل می‌شود، هستند.



DOI: 10.30503/nripress.2020.312

درایور برای یک ساق مبدل‌شکل ۱۵-۹: شماتیک مدار گیت

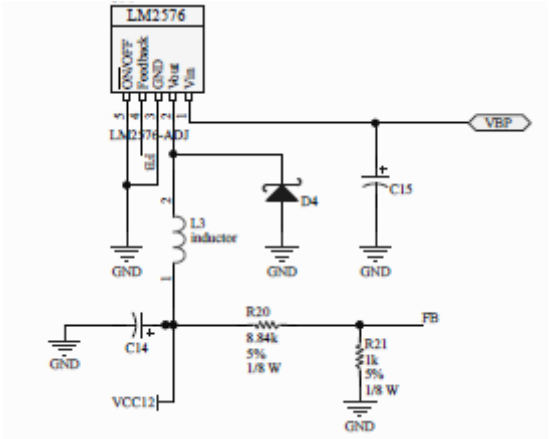
۳-۶-۹- طراحی مدار تغذیه

در یک مدار الکترونیکی، بخش‌های مختلف مدار به سطوح مختلف ولتاژی نیاز دارند. وظیفه مدار تغذیه، تبدیل دقیق سطوح ولتاژ به یکدیگر، و همچنین در صورت نیاز، ایزوله کردن آن‌ها نسبت به یکدیگر است.

در طراحی برد مبدل موتور BLDC چهار سطح مختلف ولتاژ در نظر گرفته شده‌است:

- سطح اول ولتاژ مورداستفاده، همان ولتاژ ۴۸ ولت باتری است که برای تغذیه لینک DC مبدل به کار رفته‌است.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در تغذیه مدار گیت‌درایور، سطح ولتاژ ۱۲ ولتی مورد نیاز است. در این طرح، از یک رگولاتور سویچینگ مدل LM2576 برای تبدیل ولتاژ باتری به ۱۲ ولت استفاده شده‌است. در شکل ۱۶-۹ مدار رگولاتور LM2576 که براساس برگه مشخصات (Datasheet) طراحی شده، نشان داده شده‌است.

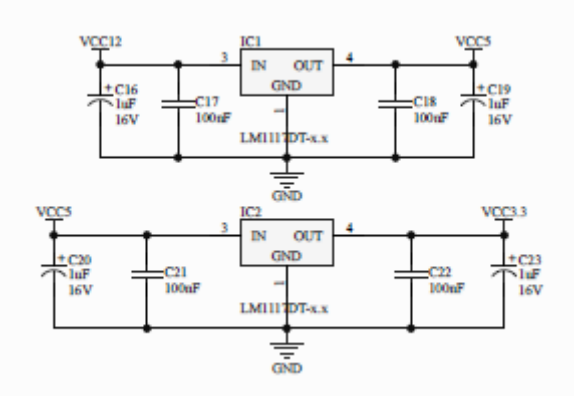


شکل ۱۶-۹: مدار رگولاتور **LM2576**

- سطح ولتاژ دیگری که در مدار مبدل مورد استفاده قرارمی‌گیرد، تغذیه ۵ ولت است که برای تغذیه حس‌گرهای جریان به کار می‌رود.
- سطح ولتاژ ۳.۳ ولت نیز به عنوان تغذیه میکروکنترلر در مدار قرار گرفته‌است.

برای این دو سطح ولتاژی، از رگولاتورهای کم‌تلفات مدل LM1117 بهره گرفته‌شده که شماتیک آن در شکل ۱۷-۹ قابل مشاهده‌است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

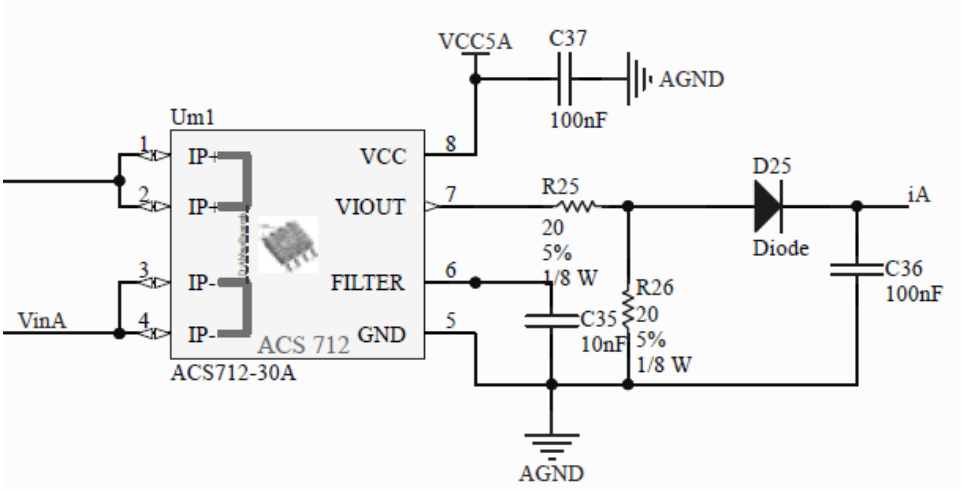


شکل ۱۷-۹: شماتیک مدار تغذیه برای ایجاد سطوح ولتاژ ۵ و ۳.۳ ولت

۹-۶-۴- طراحی مدار سنسور جریان

کنترل موتور BLDC بر اساس جریان سیم‌پیچی‌های آن انجام می‌گیرد. در این طرح، از سنسور جریان ACS712 برای اندازه‌گیری جریان سیم‌پیچی‌های موتور استفاده شده‌است. شماتیک مدار سنسور جریان برای یک فاز در **شکل** ۱۸-۹ نشان داده شده‌است. نکات ذیل در مورد مدار سنسور جریان قابل توجه‌است:

- سنسور ACS712 از نوع اثر هال است. درنتیجه، جریان فاز از پایه‌های ۱ و ۲ این سنسور وارد شده و از پایه‌های ۳ و ۴ خارج می‌شود.
- این سنسور با ولتاژ ۵ ولت تغذیه می‌شود. خازن C37 وظیفه تثبیت ولتاژ تغذیه سنسور را به عهده دارد.
- در پایه خروجی سنسور، از یک تقسیم مقاومتی برای تنظیم سطح ولتاژ خروجی متناسب با ولتاژ قابل‌تحمل میکروکنترلر استفاده شده‌است. همچنین، دیود D25 نیز که دارای افت ولتاژ هدایتی ۰/۷ ولت است، برای این منظور قرار گرفته است. انتخاب مقاومت‌های تقسیم مقاومتی براساس اطلاعات برگه مشخصات سنسور انجام می‌گیرد.
- خازن C35 به‌عنوان فیلتر خروجی به‌کار می‌رود.



شکل ۱۸-۹: مدار سنسور جریان

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۹-۶-۵- میکروکنترلر

در طراحی برد درایور موتور BLDC، از میکروکنترلر مدل STM32F103C8T6 استفاده شده‌است. خانواده STM32، میکروکنترلرهای ۳۲ بیتی شرکت STMicroelectronics هستند. از ویژگی‌های این میکروکنترلرها می‌توان به ولتاژ کاری پایین، پردازش سیگنال دیجیتال و سهولت در توسعه، و پشتیبانی از پروتکل‌های ارتباطی گسترده اشاره‌نمود. پروتکل‌های ارتباطی این نوع میکروکنترلر شامل I2C SPI،UART، USB است که باعث سهولت استفاده از آن در سیستم‌های مختلف می‌شود. میکروکنترلر های خانواده STM32 شامل زیرمجموعه‌های مختلفی است. سری STM32F1 از پردازنده‌های میان رده خانواده STM32 و اولین گروه از میکروکنترلرهای STM32 مبتنی بر هسته ARM Cortex-M3 است. سری F1 با افزایش سرعت پردازنده و اندازه حافظه داخلی با گذشت زمان تکامل یافته است.

میکروکنترلر STM32F103C8T6 که در این طرح به کار گرفته‌شده، از پرکاربردترین میکروکنترلرهای خانوده STM32F1 است که ویژگی‌های مهم آن به شرح ذیل است:

- حداکثر فرکانس کاری ۷۲ مگاهرتز
- ۶۴ کیلوبایت حافظه Flash و ۲۰ کیلوبایت حافظه SRAM
- ۷ کانال DMA Controller
- پشتیبانی از: Timer, ADC, SPI, I2C و USART
- دارای ۳۷ پورت GPIO

در شکل ۱۹-۹ تصویری از میکروکنترلر مورداستفاده نشان داده‌شده‌است.



BLDCشده در درایور موتور شکل ۱۹-۹: میکروکنترلر استفاده

۹-۷- جمع‌بندی

درادامه روند طراحی الکتروموتور BLDC و بعد از تعیین مشخصات فنی نهایی سیستم نیاز به شناخت پارامترها و مدلسازی ریاضی روابط الکتروموتور BLDC می‌باشد. به این منظور اصول عملکردی آن، مشخصه گشتاور-سرعت آن،

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مدار معادل و معادلات حاکم بر موتور، اینورتر مورد استفاده در درایو ، روش‌های کنترل موتور بخصوص در کاربرد دوچرخه برقی در این فصل معرفی و به تفصیل بررسی شده اند. همچنین در این فصل به روند طراحی و ساخت درایو موتور BLDC در کاربرد دوچرخه‌برقی از قبیل موضوعات طراحی اینورتر، طراحی گیت درایور برای مبدل، طراحی مدار تغذیه، طراحی مدار سنسور جریان و میکروکنترلر پرداخته شده‌است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۱۰- بررسی و طراحی مجدد چندین طرح الکتروموتور ۵۰۰ و ۲۵۰ واتی بر پایه الگوریتم طراحی پیشین

۱۰-۱- مقدمه

در فصل گذشته شبیه‌سازی طرح بهینه الکتروموتور در نرم افزار JMAG Designer انجام شد که به علت در نظر نگرفتن برخی عوامل توان خروجی الکتروموتور کمتر از مقدار تعیین شده یعنی ۵۰۰ وات بود. همچنین حداکثر جریان فاز استاتور باید کمتر از ۳۳ آمپر می‌بود. یکی از راه‌ها برای کاهش جریان ورودی در صورت ثابت بودن ساختار افزایش ولتاژ است که منجر به افزایش سرعت نامی می‌شود. اما برای ثابت نگه داشتن سرعت باید تعداد دور سیم‌پیچی افزایش یابد که با توجه به محدودیت فضای شیارها این امر امکان پذیر نیست.

همچنین برای افزایش توان خروجی لازم است که حجم الکتروموتور افزایش یابد. لذا در این بخش از پروژه بر اساس الگوریتم طراحی که در گزارش مرحله دوم استخراج شده‌است، چندین طرح جدید ۵۰۰ وات و یک طرح ۲۵۰واتی ارائه شده است. این طرح‌ها بر اساس مفروضات طرح اولیه یعنی بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی یکسان و تغییرات تعداد دور سیم‌پیچی و قطر خارجی روتور طراحی شده‌اند. به منظور جلوگیری از تکرار روابط مربوط به طراحی، تنها برای یک طرح الگوریتم طراحی و مشخصات دیگر طرح‌ها به صورت جدول ارائه می‌شود.

۱۰-۲- محدودیت‌ها و مفروضات طراحی

در طراحی یک الکتروموتور محدودیت‌هایی وجود دارد که معمولا با توجه به کاربرد آن از سوی مشتری تعیین می‌شوند. برخی از این محدودیت‌ها شامل موارد زیر هستند:

- محدودیت‌های ابعادی (قطر، طول و ...)
- شرایط عملکردی (دمای کاری، ولتاژ تغذیه و...)
- محدودیت‌های ساخت (طول فاصله هوایی، نحوه استک کردن هسته و...)
- قیمت و نوع مواد اولیه

در این بخش از پروژه نیز مشابه گزارش مرحله دوم از آهن‌رباهای مکعبی با توجه به موجودی بازار استفاده شده است. همچنین برای ورق هسته استاتور و روتور از ورق‌های فولاد کربنی تولیدی شرکت فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است و بر این اساس حداکثر چگالی شار مغناطیسی هسته ۱/۷ تسلا در نظر گرفته شده است.

برای کاهش جریان نسبت به طراحی گذشته، ولتاژ باتری ۴۸ ولت انتخاب شده است. همچنین قیود مربوط به ابعاد الکتروموتور بر اساس نظر مشتری افزایش یافته است. قیود مربوط به طراحی این بخش از پروژه در جدول ۱-۱۰ ذکر شده است.

جدول ۱-۱۰: قیود جدید طراحی الکتروموتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

قیود طراحی	مقدار
طول محوری	کمتر از ۳۵ میلی‌متر
قطر خارجی	کمتر از ۴۵۰ میلی‌متر
ولتاژ باتری	۴۸ ولت
فاصله هوایی	۰/۴ تا ۱/۵ میلی‌متر
چگالی شار در هسته	کمتر از ۱/۷ تسلا

با مشورت سرپرست پروژه ۵ طرح ۵۰۰ واتی جدید شامل سه طرح با طول محوری ۳۵ میلیمتر و با قطر خارجی روتور ۳۵۰،۴۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر، دو طرح با طول محوری ۳۰میلی‌متر و قطر خارجی ۴۰۰ و ۴۵۰میلی‌متر و یک طرح ۲۵۰واتی با طول محوری ۳۰ میلی‌متر ارائه می‌شود.

۱۰-۳- گشتاور و سرعت نامی

با توجه به مطالعات صورت گرفته در مرحله اول پروژه و همچنین اهداف طراحی که در گزارش مرحله دوم پروژه برای الکتروموتور ۵۰۰ واتی در نظر گرفته شده است، برای طرح‌های ۵۰۰ وات گشتاور و سرعت نامی مشابه طرح قبل، یعنی گشتاور نامی ۳۰ نیوتن-متر و سرعت نامی ۱۶۰rpm تعیین می‌شود. همچنین برای طرح ۲۵۰ وات با نظر سرپرست پروژه گشتاور نامی ۲۰ نیوتن-متر و سرعت نامی ۱۲۰rpm تعیین شده است.

$$P_O = \tau\omega \rightarrow \tau = \frac{۲۵۰}{\frac{۲\pi}{۶۰}\times ۱۲۰} = ۱۹.۸۹(N.m) \qquad ۱۰-۱$$

۱۰-٤- نوع سیم‌پیچی

استفاده از سیم‌پیچی متمرکز نسبت به توزیع شده انتهای کلاف۱ کوتاه‌تری دارد، در نتیجه هزینه سیم‌پیچی و تلفات مسی را کاهش داده و امکان استفاده از یک استاتور چند تیکه‌ای۲ را فراهم می‌کند. اگرچه سیم‌پیچی مترکز ضریب پرشدگی شیار بیشتری دارد با این حال برخی مقالات که هر دو نوع سیم‌پیچی را مورد بررسی قرار داده اند، معایبی از جمله تلفات هسته و آهن‌ربای بیشتر، لرزش و نویز بیشتر ناشی از هارمونیک‌های MMF را برای سیم‌پیچی متمرکز بر شمرده‌اند. در طراحی‌های صورت گرفته در این بخش از پروژه نیز مشابه طرح قبل سیم‌پیچی متمرکز دو لایه برای استاتور انتخاب شده است.

۱۰-۵- انتخاب تعداد قطب و شیار

با توجه به ساختار الکتروموتورکه از نوع روتور بیرونی است، انتخاب تعداد قطب بالا امکان استفاده از اهن‌رباهای

1- End Winding
2- Segmented or modular

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

مکعبی به جای آهن‌رباهای منحنی را فراهم می‌کند. علاوه بر این انتخاب مناسب نسبت تعداد قطب به تعداد شیار تاثیر قابل توجهی بر گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور دارد.

گشتاور دندانه‌ای مؤلفه‌ای از گشتاور ضربانی است که در اثر تغییر رلوکتانس بین شیارها و دندانه استاتور و آهن‌ربای قرار گرفته بر روی سطح روتور ایجاد می‌شود و تحریک استاتور هیچ تأثیری بر تولید گشتاور دندانه‌ای ندارد و این گشتاور مستقل از جریان بار می‌باشد. دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای یا به عبارت دیگر تعداد دوره‌ها در هر چرخش مکانیکی با کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها، $2p$ و تعداد شیارهای هر استاتور، N_s، بدست می‌آید:

$$N_c = LCM(N_s, ۲p) \qquad ۱۰-۲$$

فرکانس‌های بالاتر شکل موج گشتاور دندانه‌ای به معنی کاهش دامنه آن است و به همین علت به فرکانس اصلی و فرکانس‌های پایین‌تر ترجیح داده می‌شوند. در طرح‌های این بخشبا توجه به قطر خارجی و ابعاد آهن‌رباهای در دسترس، از ترکیب‌های متفاوت برای تعداد قطب و شیار استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در

جدول ۲-۱۰ ذکر شده است.

جدول ۲-۱۰: مشخصات تعداد قطب‌ها و شیارهای طرح‌های مختلف

شماره طرح	مشخصات	تعداد قطب	تعداد شیار	N_C
۱	۴۰۰-۳۰	۶۰	۵۴	۵۴۰
۲	۴۵۰-۳۰	۸۰	۷۵	۱۲۰۰
۳	۳۵۰-۳۵	۵۰	۴۵	۴۵۰
۴	۴۰۰-۳۵	۸۰	۷۲	۷۲۰
۵	۴۵۰-۳۵	۸۰	۷۵	۱۲۰۰
۶	۳۲۰-۳۰	۵۰	۴۵	۴۵۰

۱۰-۶- انتخاب ابعاد آهن‌ربا

یکی از محدودیت‌ها در این طراحی انتخاب آهن‌ربای مناسب است که در بازار نیز موجود باشد. لذا قبل از طراحی موجودی فروشگاه‌های اینترنتی مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات آن‌ها در جدول ۳-۱۰ ذکر شده است.

جدول ۳-۱۰: مشخصات برخی از آهن‌رباهای موجود در بازار

ضخامت	۵	۵	۵	۵	۵	۷	۷	۷	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
عرض	۸	۱۰	۱۰	۱۵	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲۰	۲۵	۲۰	۳۰
ارتفاع	۳۸	۳۰	۲۰	۳۵	۴۰	۲۵	۴۰	۱۲۵	۳۰	۴۰	۱۰۰	۱۰۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

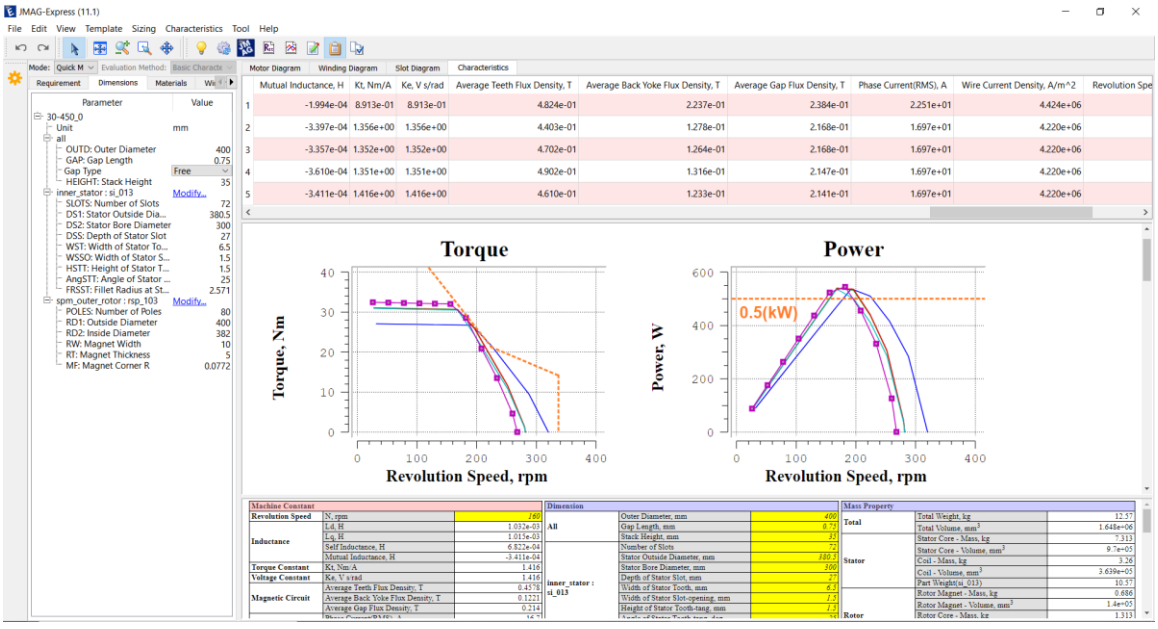
گرید	Y35-Y30	Y35-Y30	Y30	Y35	Y30	Y35	Y35	Y35-Y30	Y35	Y35-Y30	Y30	Y30

با توجه به ثابت بودن قطر خارجی روتور در این سری از طراحی‌ها، محدودیت در انتخاب ابعاد آهن‌ربا و این نکته که هر چه عرض آهن‌ربا کمتر و تعداد آن‌ها بیشتر باشد طول فاصله هوایی یکنواخت‌تر بوده و قسمت داخلی روتور حالت دایروی بیشتری خواهد داشت، آهن‌رباهای با ضخامت و عرض ۱۰x۵، ۱۵x۵و ۱۵x۷ مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه برای رسیدن به گشتاور خروجی و بازده بالاتر نسبت کمان قطب به گام قطب باید بیشتر از ۰/۶ باشد و همچنین با افزایش تعداد قطب‌ها فرکانس موتور و به دنبال آن تلفات هسته بیشتر می‌شود، در نهایت تعداد قطب‌ها انتخاب شده است.

۱۰-۷- طراحی اولیه

پس از انتخاب ساختار و مشخص بودن ابعاد و همچنین محدودیت‌ها طراحی اولیه در نرم افزار JMAG Express که یک نرم افزار در زمینه طراحی موتور است، انجام می‌گیرد و مشخصه‌های عملکردی و همچنین پارامترهای کلی طرح تعیین می‌شود. اما به دلیل اینکه مشخصه‌ها در این نرم افزار تنها به صورت تحلیلی استخراج می‌شود لازم است که طرح اولیه برای بررسی دقیق‌تر در نرم افزار اجزاء محدود و با محاسبات عددی شبیه‌سازی شود.

شکل ۱-۱۰ نمایی از محیط نرم‌افزار JMAG Express و مشخصه‌های خروجی طراحی را نشان می‌دهد. در این نرم افزار به راحتی می‌توان تاثیر پارامترهای مختلف ابعادی مثل عرض دندانه، ارتفاع دهانه شیار، طول و قطر موتور و همچنین دیگر پارامترها مثل تعداد دور، تعداد رشته‌ها را بر مشخصه‌های کلی ماشین یا برخی پرامترهای دیگر چون چگالی شار مغناطیسی در هسته، دندانه و فاصله هوایی، چگالی جریان اندوکتانس و ... بررسی کرد. پس از طراحی اولیه و حصول نتایج مورد نظر، مدل اولیه در نرم افزار JMAG Designer تحلیل می‌شود.



شکل ۱-۱۰: نمایی از نرم افزار طراحی ماشین **JMAG Express**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

ابعاد خارجی الکتروموتور از قبل مشخص شده است و لزوما بهینه نیست. اگر طرح بهینه در گزارش مرحله دوم پروژه به عنوان مرجع در نظر گرفته شود، با فرض ثابت بودن بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی و گشتاور خروجی ۲۳ نیوتن-متر برای طرح مرجع، حجم الکتروموتور با توان ۵۰۰ وات از رابطه ۴-۲ قابل محاسبه است:

$$T = \frac{\pi}{\sqrt{6}} B_{avg} ac D_{ag}^{2} L \qquad ۱۰-۳$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{D_{g2}^{2} L_2}{D_{g1}^{2} L_1} \rightarrow D_{g2}^{2} L_2 = \frac{30}{23} \times (0.333^{2} \times 0.03) = 0.00434 m^{3} \qquad ۱۰-۴$$

$$D_{g5}^{2} L_5 = 0.43^{2} \times 0.035 = 0.00647 m^{3} \qquad ۱۰-۵$$

پس برای مثال طبق رابطه ۵-۲، در طرح -۵ با قطر خارجی ۴۵۰ میلی‌متر و طول محوری ۳۵ میلی‌متر(با فرض ۱۰ میلی‌متر ضخامت روتور) حجم موتور بسیار بیشتر از حجم محاسبه شده در رابطه است. پس در طرح -۵ بارگذاری-های الکتریکی و مغناطیسی متفاوت با طرح مرجع و مقادیر کمتری خواهند بود.

با توجه به قیود طراحی، ابعاد، مواد آهن‌ربایی و ورق هسته با کمک نرم افزار طراحی الکتروموتور دیگر پارامترها و مشخصات ابعادی و الکتریکی مشخص می‌شوند. مشخصات اولیه طرح‌های مختلف در

جدول ۴-۱۰ آورده شده است.

جدول ۴-۱۰:مشخصات ابعاد اولیه طرح‌های مختلف

طرح / پارامتر	۵۰۰W-۱	۵۰۰W-۲	۵۰۰W-۳	۵۰۰W-۴	۵۰۰W-۵	۲۵۰W-۶
قطر خارجی روتور	۴۰۰	۴۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۳۲۰
قطر داخلی روتور	۳۷۱	۴۳۲	۳۳۰	۳۸۲	۴۳۲	۳۰۴
قطر خارجی استاتور	۳۷۰	۴۳۰/۵	۳۲۹	۳۸۰/۵	۴۳۰/۵	۳۰۳
قطر داخلی استاتور	۳۰۰	۳۵۰	۲۳۵	۳۰۰	۳۴۵	۲۳۰
طول محوری	۳۰	۳۰	۳۵	۳۵	۳۵	۳۰
طول فاصله هوایی	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵
تعداد قطب	۶۰	۸۰	۵۰	۸۰	۸۰	۵۰
تعداد شیار	۵۴	۷۵	۴۵	۷۲	۷۵	۴۵
ضخامت یوغ روتور	۷/۵	۴	۵	۴/۵	۴/۴	۴
ضخامت یوغ استاتور	۱۲	۱۱/۵۷	۱۱/۵	۱۱/۲۵	۱۱/۳۲	۹/۵
عرض دندانه استاتور	۸	۷	۱۰/۲	۶/۵	۷/۵	۶
عرض شیار	۱۱/۴۲	۸/۹۷	۸/۷۳	۸/۰۸	۸/۴۵	۱۱/۸۱
ارتفاع شیار	۲۷	۲۹	۳۳	۲۷	۲۹	۲۸
عرض آهن‌ربا	۱۵	۱۰	۱۵	۱۰	۱۰	۱۵
ارتفاع آهن‌ربا	۷	۵	۵	۵	۵	۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۵-۱۰: مشخصات الکتریکی اولیه طرح‌های مختلف

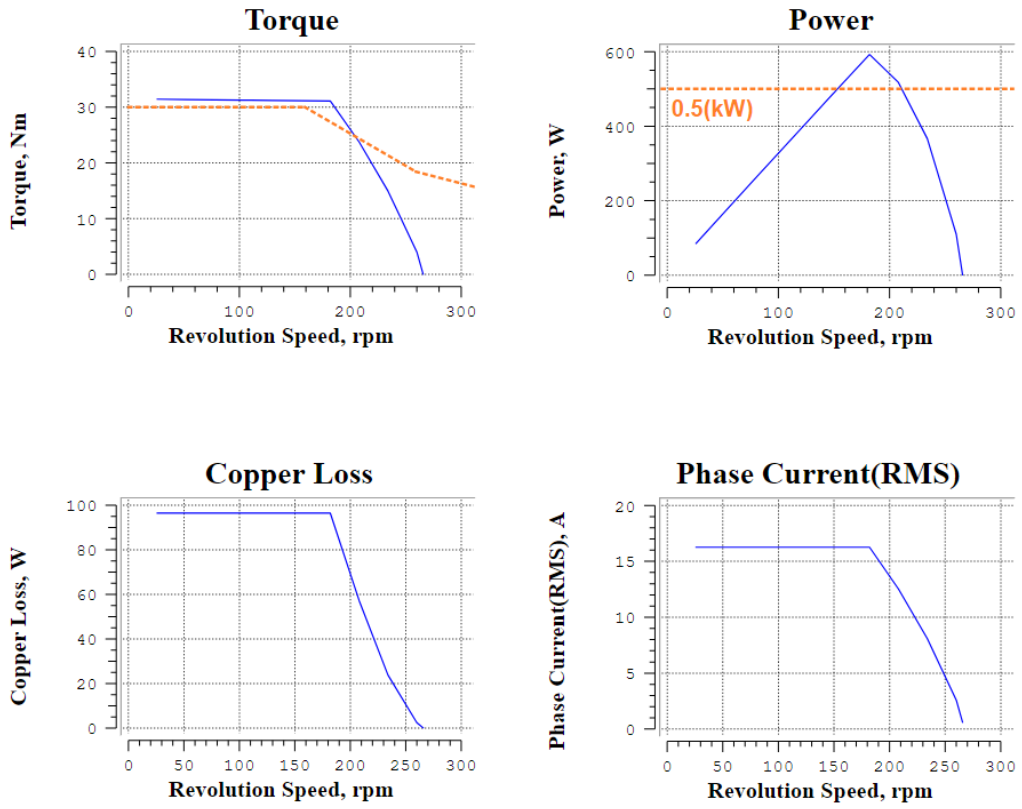
طرح / پارامتر	۵۰۰W-۱	۵۰۰W-۲	۵۰۰W-۳	۵۰۰W-۴	۵۰۰W-۵	۲۵۰W-۶
ولتاژ باتری	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۳۶
مقدار موثر جریان فاز	۱۵/۹۱	۱۶/۹۷	۱۷/۷	۱۶/۹۷	۱۶/۲۶	۱۰/۶۱
تعداد دور سیم پیچی فاز	۱۲	۹	۱۳	۹	۸	۱۸
تعداد رشته موازی	۱۱	۸	۸	۸	۹	۷
قطر سیم	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۷۵
چگالی جریان استاتور	۳/۷۵	۴/۲۲	۴/۴	۴/۲۲	۳/۵۹	۳/۴۳
بارگذاری الکتریکی	۱۷۹۰۰	۱۷۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۸۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۸۰۰۰
مقاومت فاز	۰/۱۱۶	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۹۵
چگالی شار فاصله هوایی	۰/۲۷۷	۰/۱۹۶	۰/۲۵۷	۰/۲۱۴	۰/۱۹۴	۰/۲۷۳
چگالی شار دندانه استاتور	۰/۵۱۵	۰/۴۴	۰/۴۸۷	۰/۴۶۱	۰/۳۷۴	۰/۷
Embrace	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۷۲	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۷۸
ضریب پرشدگی شیار	۴۰/۷	۳۵	۴۰/۶	۴۱	۳۶/۵	۴۲/۱۲

با طراحی در نرم افزار JMAG Express برخی مشخصه‌های تحلیلی قابل استخراج هستند اما چون بر پایه تحلیل عددی و المان محدود نیست ممکن است نسبت به تحلیل مغناطیسی دقیق اندکی اختلاف و خطا وجود داشته باشد. مشخصات مربوط به عملکرد طرح‌های مختلف در سرعت ۱۶۰rpm در جدول بیان شده و در ادامه برخی نمودار مشخصه‌های مربوط به هر طرح چون گشتاور-سرعت، توان-سرعت، تلفات مسی و جریان فاز آورده شده است.

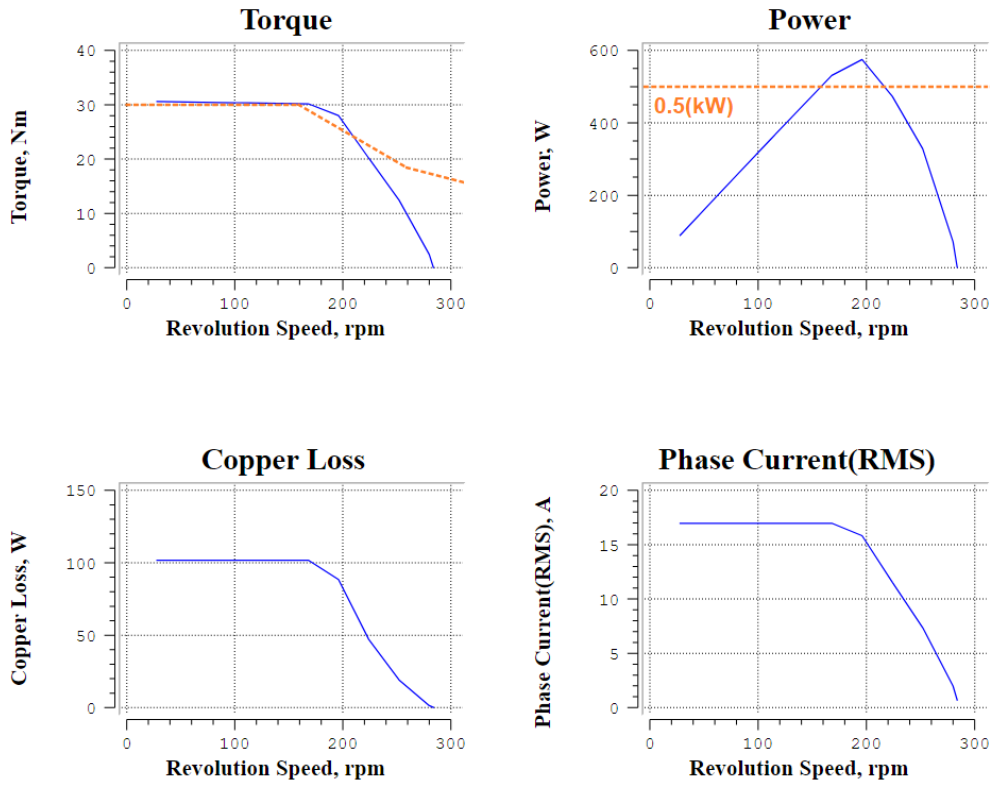
جدول ۶-۱۰:مشخصات اولیه عملکرد طرح‌های مختلف در سرعت **rpm160**

طرح / پارامتر	۵۰۰W-۱	۵۰۰W-۲	۵۰۰W-۳	۵۰۰W-۴	۵۰۰W-۵	۲۵۰W-۶
گشتاور خروجی	۳۱/۱۵	۳۰/۱۷	۲۹/۹۱	۳۱/۵۴	۲۹/۸۹	۲۰/۴۱
توان خروجی	۵۲۱/۹	۵۰۵/۵	۵۰۱/۱۴	۵۲۸/۴۵	۵۰۷/۱۵	۲۵۶/۴۷
بازده	۷۹/۵	۷۸/۳	۷۷/۱۲	۷۷/۲	۷۸/۳	۷۴/۶۴
مقدار موثر جریان فاز	۱۶/۲۶	۱۶/۹۷	۱۷/۶۷	۱۶/۹۷	۱۶/۲۶	۱۰/۸۱
تلفات مسی	۹۶/۴۴	۱۰۱/۸	۱۱۱/۹۴	۱۰۲/۶	۸۱/۰۴	۶۹/۲۶
تلفات هسته	۳۴/۶	۵۱/۵۷	۳۶/۷۲	۵۳/۴۲	۵۹/۱۶	۱۷/۸۷
سرعت بی‌باری	۲۶۵	۲۸۳	۳۰۳	۲۶۹	۲۷۵	۲۰۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

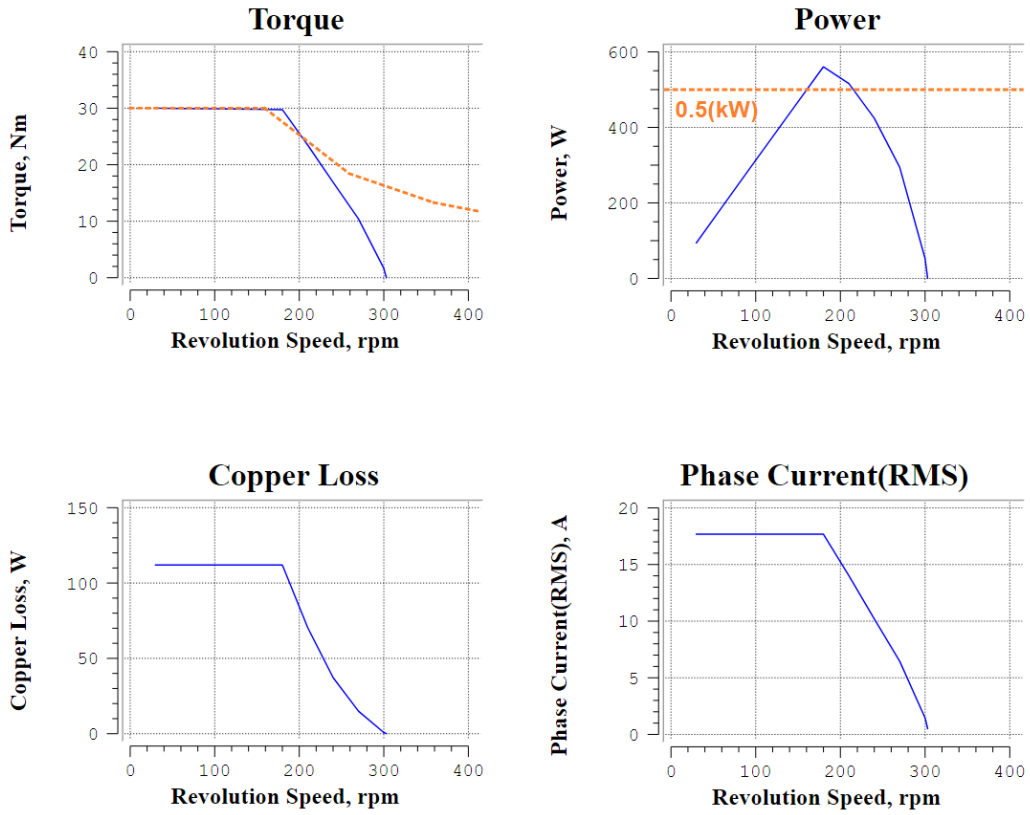


شکل ۲-۱۰: مشخصه‌های طراحی اولیه موتور طرح-۱

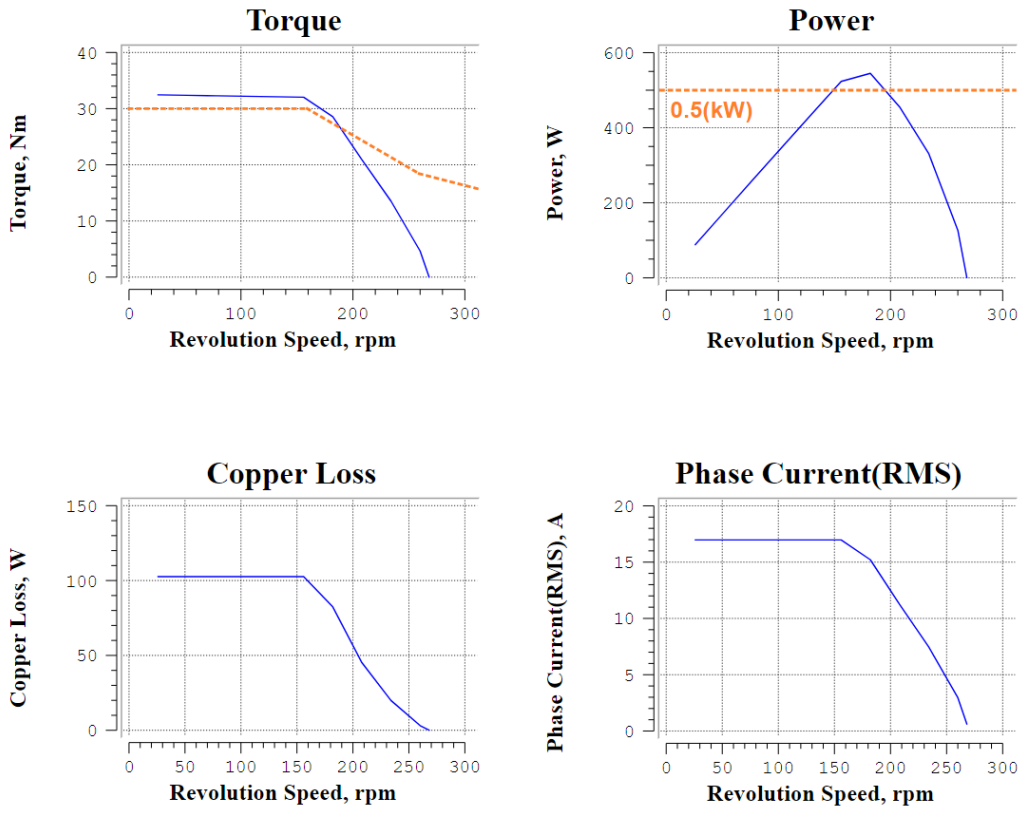


شکل ۳-۱۰:مشخصه‌های طراحی اولیه موتور طرح-۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

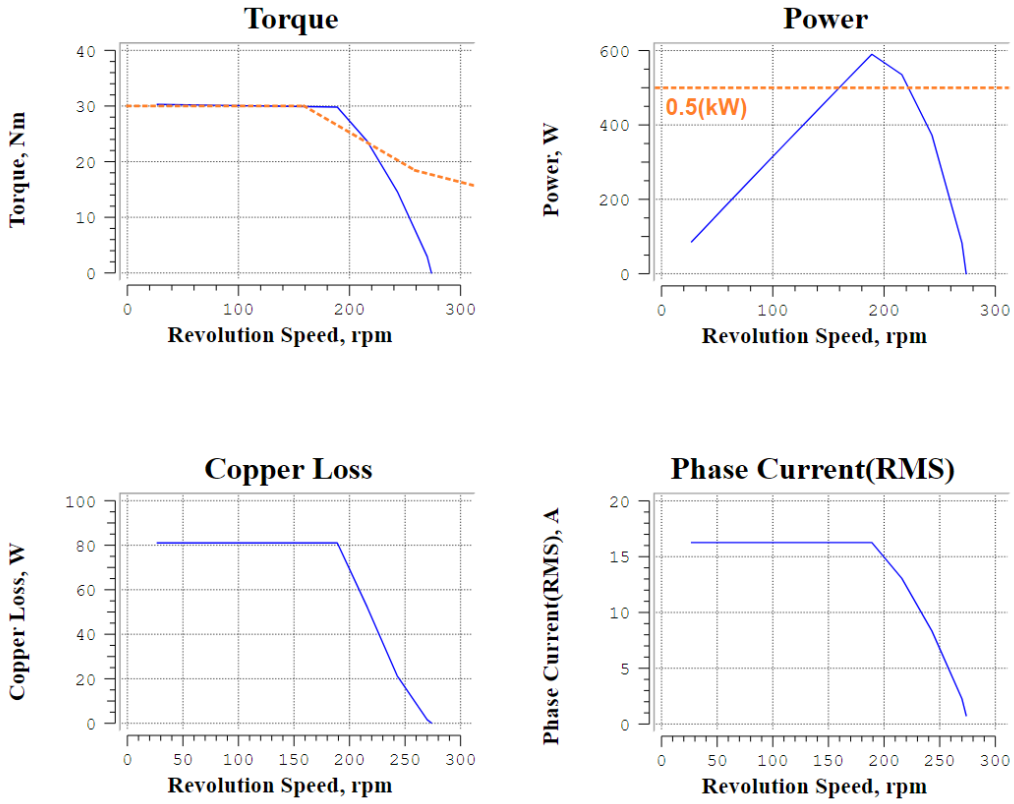


شکل ۴-۱۰:مشخصه‌های طراحی اولیه موتور طرح-۳

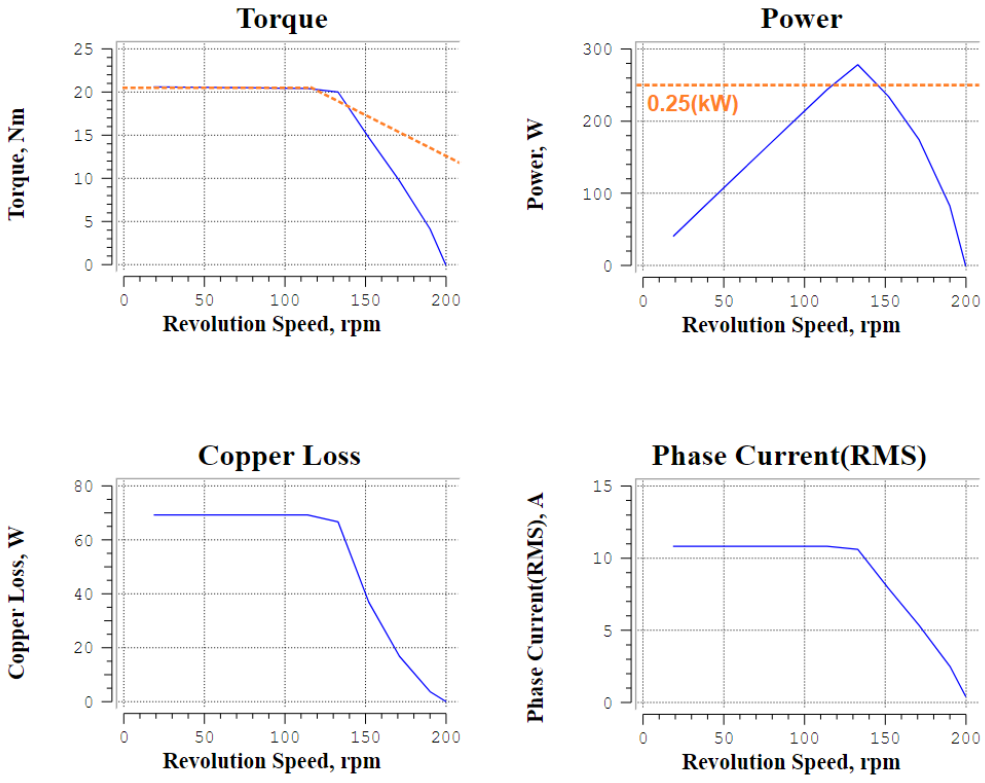


شکل ۵-۱۰:مشخصه‌های طراحی اولیه موتور طرح-۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۶-۱۰: مشخصه¬های طراحی اولیه موتور طرح-۵



شکل ۷-۱۰ : مشخصه‌های طراحی اولیه موتور طرح-۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

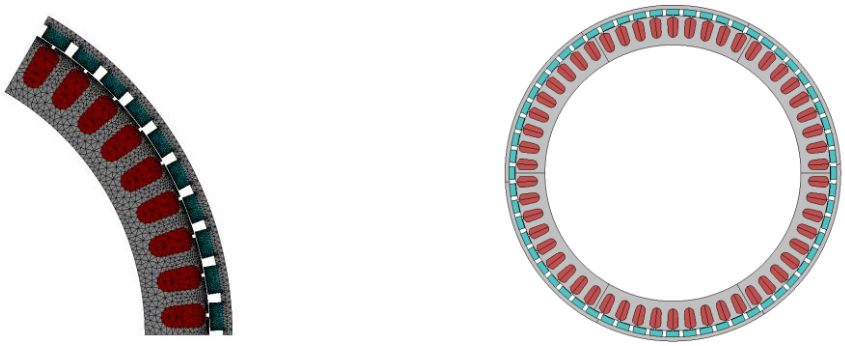
با توجه به مشخصه‌های اولیه طرح‌های ۵۰۰ واتی، به نظر می‌رسد که طرح -۱ از نظر بازده و توان خروجی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دیگر ساختارها دارد ضمن اینکه از نظر حجم الکتروموتور ابعاد قابل قبولی دارد. با این حال برای بررسی دقیق‌تر لازم است که طرح‌ها در محیط نرم افزار المان محدود شبیه‌سازی شوند.

۱۰-۸- طراحی تکمیلی

پس از طراحی اولیه در نرم افزار JMAG Express، مشخص شدن ابعاد اولیه و استخراج مشخصه‌های خروجی، برای بررسی دقیق‌تر، طرح اولیه در نرم افزار JMAG Designer پیاده‌سازی و تحلیل می‌شود. در این قسمت ابتدا هر طرح در حالت بی‌بار شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به گشتاور دندانه‌ای و دیگر پارامترها استخراج می‌شود. پس از آن در حالت بار کامل عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفته و برخی مشخصه‌های آن استخراج می‌شود. در نهایت با انتخاب و نهایی شدن طرح ۲۵۰ واتی برخی پارامترهای موتور برای عملکرد بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱۰-۸-۱- طرح-۱، ۵۰۰W

با توجه به طراحی اولیه، الکتروموتور طرح-۱ را می‌توان همانند شکل ۸-۱۰-الف به صورت دوبعدی مدل‌سازی کرد که مش‌بندی این طرح نیز در شکل ۸-۱۰-ب نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۸-۱۰: الف) نمای دو بعدی طرح-۱ با ۶۰ قطب و ۵۴ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۱

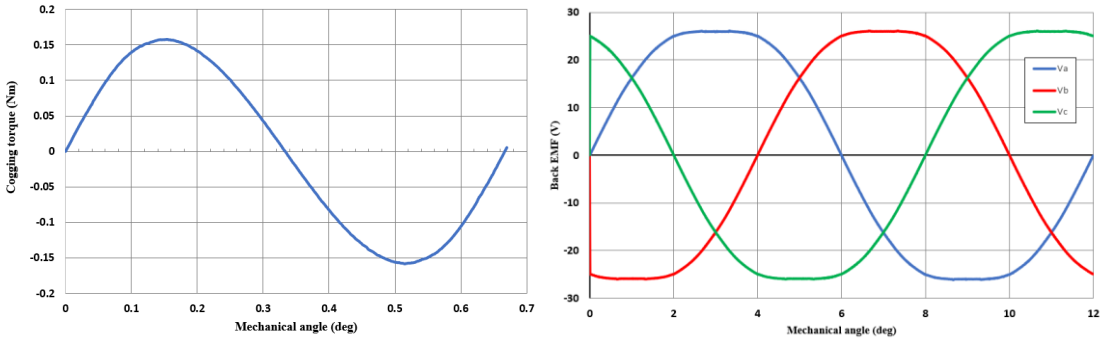
با تجه به مشخصه‌های خروجی شکل ۲-۱۰ و اطلاعات جدول ۶-۱۰ با استفاده از کنترل هیسترزیس جریان از راه‌اندازی تا سرعت نامی گشتاور ثابت و برابر ۳۱/۱۵ نیوتن-متر است و از سرعت نامی به بعد با افزایش سرعت ولتاژ القایی افزایش یافته و جریان استاتور و به دنبال آن گشتاور خروجی کاهش می‌یابد و در نهایت در سرعت بی‌باری ولتاژ القایی با ولتاژ ورودی برابر و جریان استاتور صفر می‌شود. در شبیه‌سازی هر طرح الکتروموتور در دو حالت بی‌بار و تحت بار شبیه‌سازی می‌شود.

۱۰-۸-۱-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۱

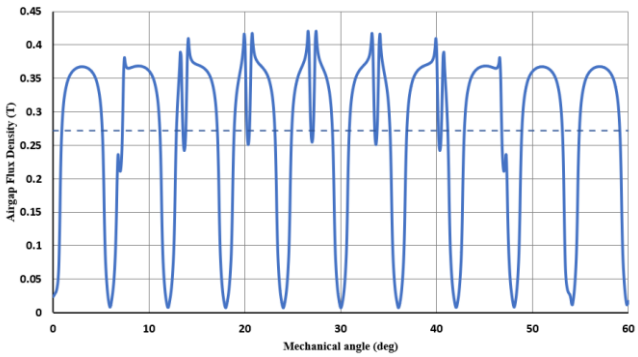
در این بخش از شبیه‌سازی روتور الکتروموتور طرح-۱ در حالت مدار باز با سرعت ۲۶۵rpm چرخانده می‌شود. شار آهن‌ربا با چرخش روتور موجب ایجاد ولتاژ در سیم‌پیچ‌ها می‌شود. در حالت بی‌بار گشتاور خروجی به علت صفر بودن جریان استاتور صفر است و تنها گشتاور دندانه‌ای وجود دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فرکانس گشتاور دندانه‌ای برابر کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و شیارها و مقدار متوسط آن صفر است. با در نظر گرفتن فرکانس ۵۴۰، بدین ترتیب دوره تناوب این گشتاور ۰/۶۶۶۷ درجه مکانیکی خواهد بود. شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌ها، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۹-۱۰-الف، شکل ۹-۱۰-ب و شکل ۹-۱۰-ج نشان داده شده است. مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۲۷۲ تسلا و بسیار نزدیک به مقدار آن در طراحی اولیه است.



(ب) (الف)



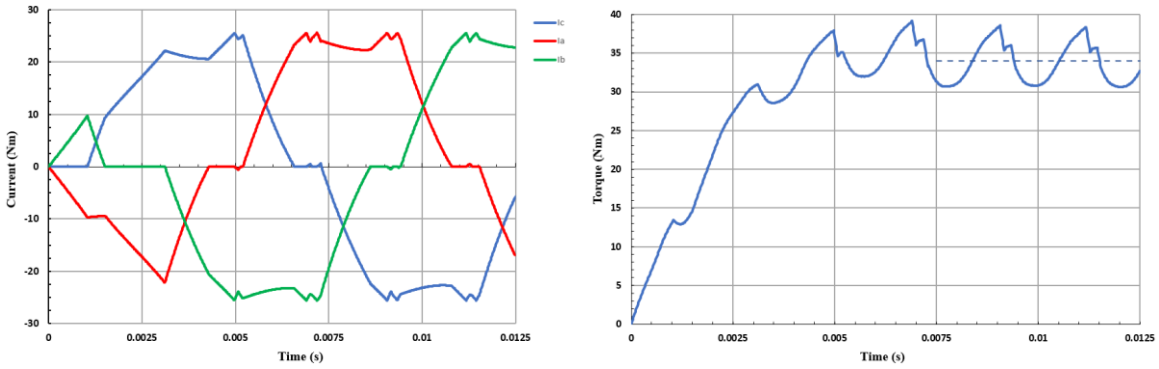
(ج)

شکل ۹-۱۰:شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی مربوط به طرح-۱

۱۰-۸-۱-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۱

در این قسمت از شبیه‌سازی الکتروموتور طرح-۱ در سرعت ۱۶۰rpm در حالت دائمی با منبع ولتاژ ۴۸ ولت و محدودیت جریان شبیه‌سازی و مشخصه‌های خروجی آن همچون گشتاور و توان خروجی و همچنین دیگر پارامترها از قبیل جریان استاتور، تلفات و بازده بررسی می‌شوند. شکل موج گشتاور خروجی و ریپل آن در شکل ۱۰-۱۰-الف و همچنین جریان‌های استاتور در شکل ۱۰-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



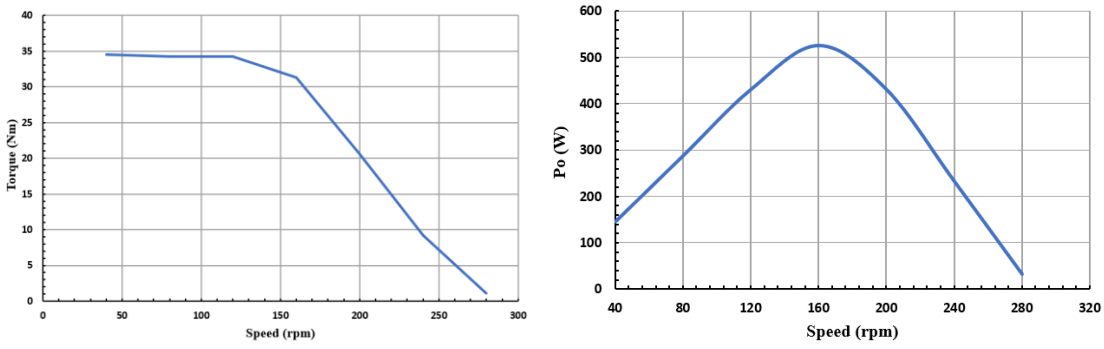
(ب) (الف)

شکل ۱۰-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریان‌های استاتور الکتورموتور طرح-۱ در سرعت **rpm**۱۶۰

همانطور که از شکل موج گشتاور خروجی مشخص است، ریپل گشتاور حدود ۸ نیوتن-متر و مقدار متوسط آن در حالت دائمی حدود ۳۴ نیوتن-متر(بدون محاسبه تلفات) است. دلیل افزایش گشتاور این است که جریان استاتور نسبت به طراحی اولیه بیشتر است. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۶۰rpm در جدول ۷-۱۰ ذکر شده است. همچنین مشخصه‌های گشتاور-سرعت و توان-سرعت که با تحلیل الکترومغناطیسی و روش المان محدود استخراج شده است به ترتیب در شکل ۱۱-۱۰- الف و شکل ۱۱-۱۰-ب نشان داده شده اند.

جدول ۷-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۱ در سرعت **۱۶۰rpm**

سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۶۰ rpm	۳۱/۳۲Nm	۵۲۴/۸۷W	٪۲۳/۵۲	۱۱۷/۴۹W	۴۴/۸۵ W
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			
۱۸/۵ A	۱۴/۴۳ A	% ۷۵/۷۷			

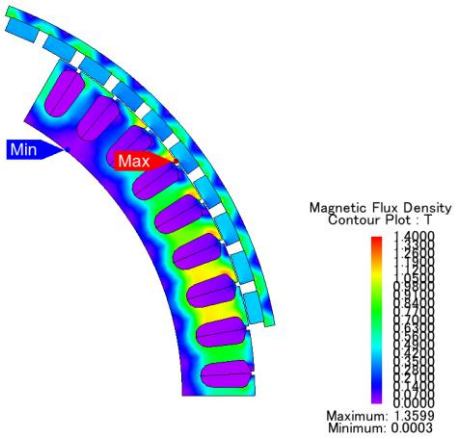


(ب) (الف)

الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۱ شکل ۱۱-۱۰: مشخصه‌های

توزیع چگالی شار مغناطیسی هسته الکتروموتور در شکل نشان داده شده است و همانطور که مشخص است، چگالی شار در دندانه استاتور حدود ۱/۱ تسلا است که کمتر از حداکثر مقدار مجاز، یعنی ۱/۷ تسلا است.

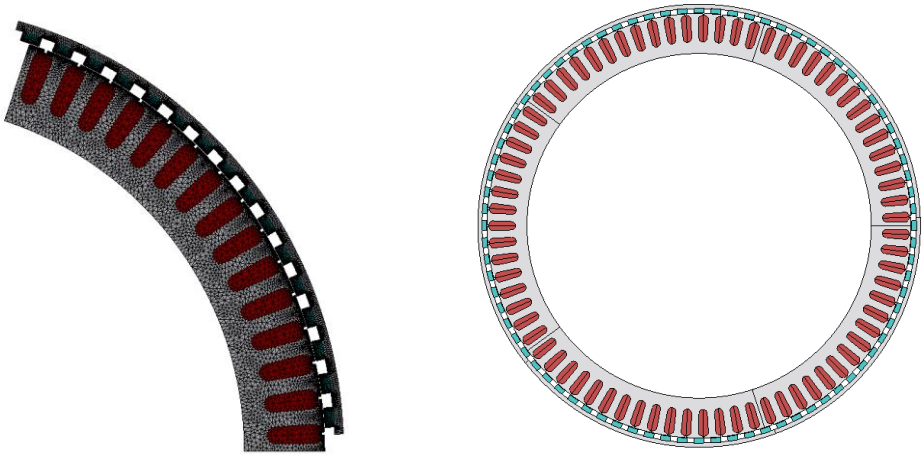
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۱

۱۰-۸-۲- طرح-۲، ۵۰۰W

بر اساس طراحی اولیه، الکتروموتور طرح-۲ مطابق شکل ۱۳-۱۰-الف به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است که مش‌بندی این طرحنیز در شکل ۱۳-۱۰-ب نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۳-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۲ با ۸۰ قطب و ۷۵ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۲

با توجه به افزایش حجم الکتروموتور در این طرح نسبت به طرح قبلی و همچنین افزایش تعداد قطب‌ها و به تبع آن افزایش فرکانس، انتظار می‌رود که تلفات هسته بسیار بیشتر از طرح قبل باشد. که در این صورت با ثابت بودن توان خروجی بازده نیز کمتر خواهد بود. در ادامه شبیه‌سازی برای دو حالت بی‌بار و تحت بار انجام می‌گیرد.

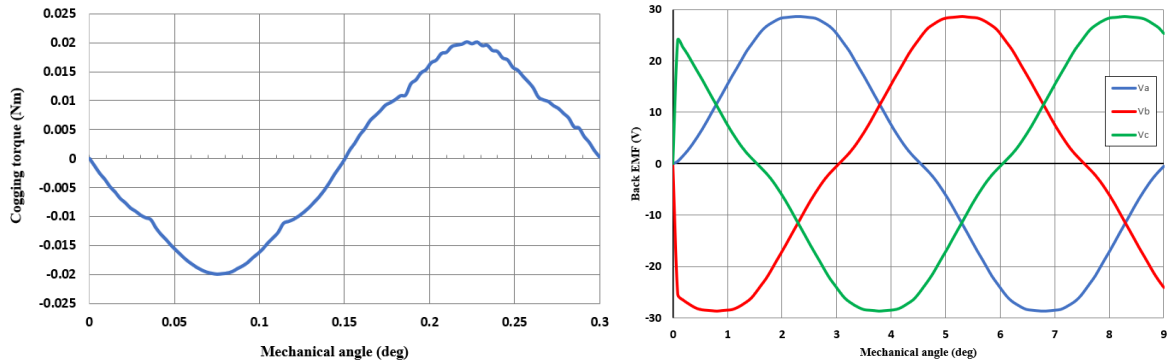
۱۰-۸-۲-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۲

با توجه به نتایج طراحی اولیه، سرعت بی باری این طرح حدود ۲۸۳rpm است. لذا روتور با سرعت بی‌باری چرخانده و مشخصه‌های بی‌باری آن استخراج می‌شود. در این طرح فرکانس گشتاور دندانه‌ای ۱۲۰۰ است که دوره تناوب آن ۰/۳ درجه مکانیکی است.

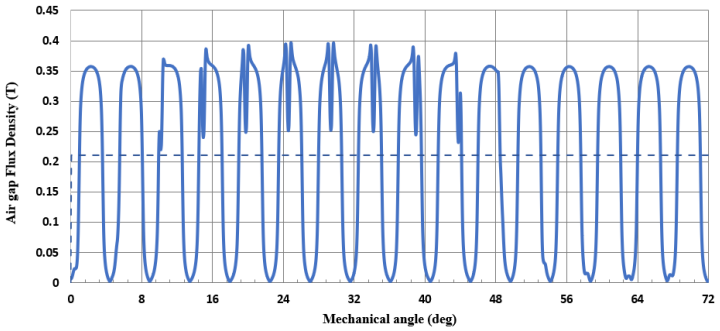
شکل موج‌های ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۱۴-۱۰-الف، شکل

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۱۴-۱۰-ب و شکل ۱۴-۱۰-ج نشان داده شده‌اند. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش فرکانس گشتاور دندانه‌ای در این طرح نسبت به طرح قبل، دامنه این گشتاور به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۲۱ تسلا و حدود ۰/۰۱۵ تسلا بیشتر از مقدار آن در طراحی اولیه است.



(الف) (ب)

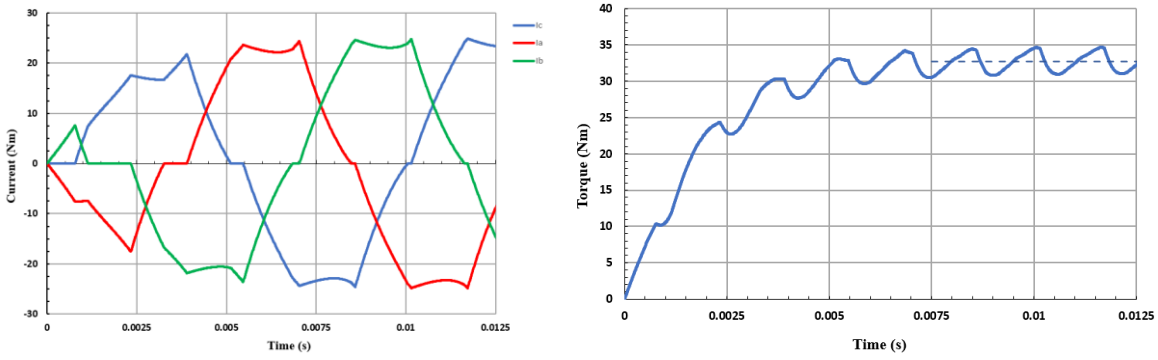


(ج)

شکل ۱۴-۱۰:شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۲

۱۰-۸-۲-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۲

در این قسمت نیز مشابه طرح قبل شبیه‌سازی الکتروموتور در سرعت ۱۶۰rpm در حالت دائمی و با منبع ولتاژ ۴۸ ولت و محدودیت جریان انجام و مشخصه‌های خروجی آن استخراج می‌شوند. شکل موج گشتاور خروجی و جریان-های استاتور به ترتیب در شکل ۱۵-۱۰-الف و شکل ۱۵-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.



(الف) (ب)

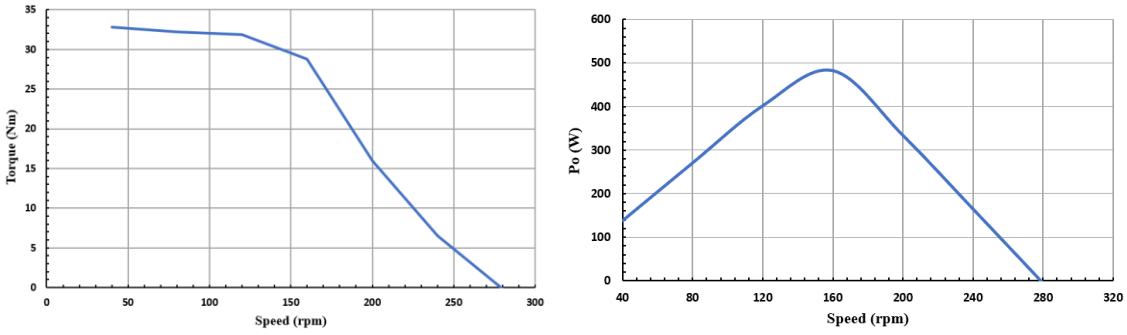
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۱۵-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریان‌های استاتور الکتورموتور طرح-۱ در سرعت **160rpm**

همانطور که انتظار می‌رفت و از شکل موج گشتاور خروجی نیز مشخص است، کم بودن مقدار گشتاور دندانه‌ای ریپل گشتاور را بسیار کاهش داده است و مقدار آن حدود ۴ نیوتن-متر است. مقدار متوسط گشتاور خروجی در حالت دائمی نیز حدود ۳۳ نیوتن-متر(بدون محاسبه تلفات) است. اما از آنجایی که این گشتاور بدون احتساب تلفات آهن محاسبه شده است و تلفات آهن در این طرح نسبت به طرح قبل بیشتر خواهد بود، گشتاور خروجی در نهایت مقدار کمتری نسبت به طرح-۱ خواهد داشت. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۶۰rpm در جدول ۸-۱۰ ذکر شده است. ضمن اینکه مشخصه‌های گشتاور-سرعت و توان-سرعت الکتروموتور که با تحلیل الکترومغناطیسی و روش المان محدود استخراج شده است به ترتیب در شکل ۱۶-۱۰- الف و شکل ۱۶-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.

جدول ۸-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۲ در سرعت **۱۶۰rpm**

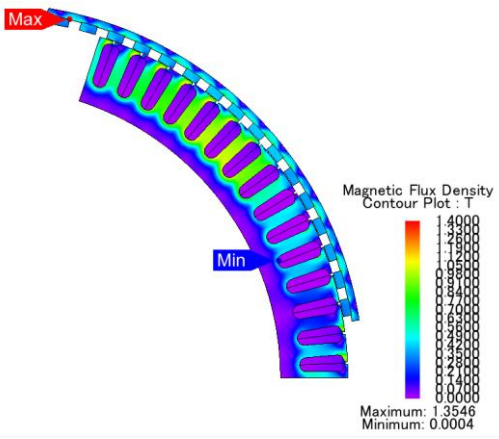
سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۶۰ rpm	۲۸/۷۴Nm	۴۸۱/۶۵W	٪۱۲/۱۲	۱۱۱/۶W	۶۷/۰۳ W
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			
۱۴/۶۸ A	۱۳/۹۶ A	% ۷۱/۸۶			



(ب) (الف)

شکل ۱۶-۱۰:مشخصه‌های: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۲

همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی هسته الکتروموتور درشکل ۱۷-۱۰ نشان داده شده است که در این طرح نیز چگالی شار در دندانه استاتور کمتر از مقدار ۱/۷ تسلا و حدود ۱ تسلا است .

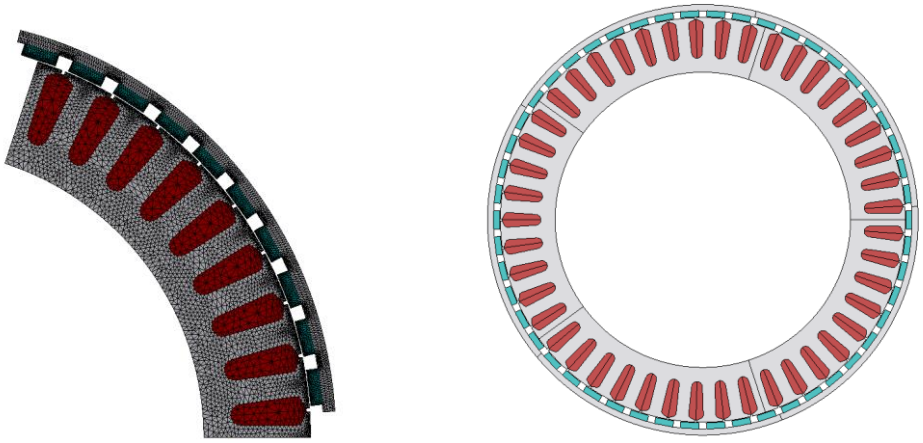


DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۱۷-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۲

۱۰-۸-۳- طرح-۳، ۵۰۰W

الکتروموتور طرح-۳ بر اساس طراحی اولیه، شامل ۵۰ قطب و ۴۵ شیار است که مطابق شکل ۱۸-۱۰-الف به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده و مش‌بندی آن در شکل ۱۸-۱۰-ب نشان داده شده است.



(ب) (الف)

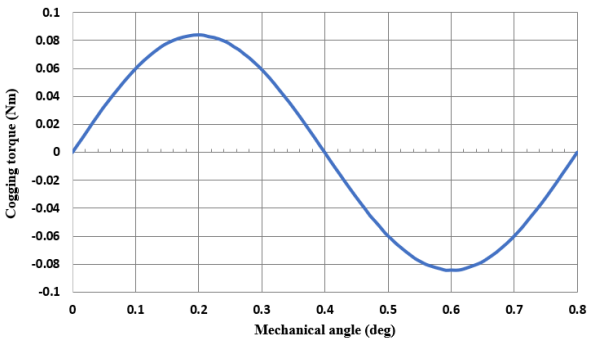
شکل ۱۸-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۳

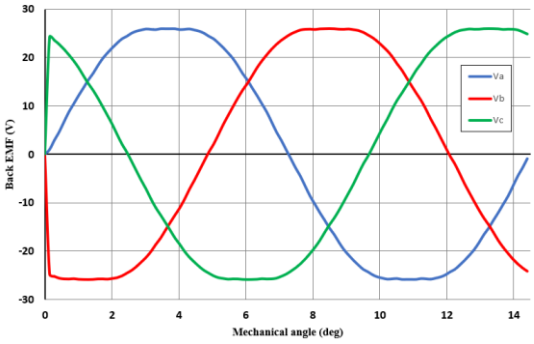
در این طرح نیز مشابه طرح-۱ تعداد قطب‌ها کمتر از ۸۰ است و همچنین حجم الکتروموتور نیز نسبت به طرح-۲ کمتر است و انتظار می‌رود تلفات هسته کمتر از طرح-۲ و تقریبا مشابه طرح-۱ باشد

۱۰-۸-۳-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۳

مطابق اطلاعات جدول ۶-۱۰ بی باری این طرح در سرعت حدود ۲۸۳rpm اتفاق می‌افتد و در ادامه مشخصه‌های بی‌باری این الکتروموتور استخراج می‌شود. در این طرح فرکانس گشتاور دندانه‌ای ۴۵۰ است که دوره تناوب آن ۰/۸ درجه مکانیکی است که نسبت به طرح-۲ بیشتر است. لذا این طرح گشتاور دندانه‌ای و همچنین ریپل گشتاور بالاتری خواهد داشت.

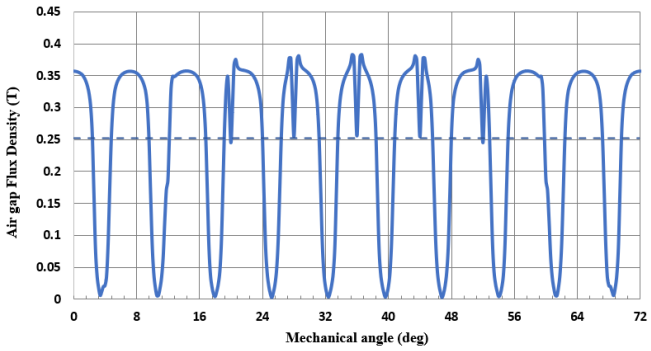
شکل موج‌های ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۱۹-۱۰-الف، شکل ۱۹-۱۰-ب و شکل ۱۴-۱۰-ج نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل موج چگالی شار فاصله هوایی، مقدار متوسط آن حدود ۰/۲۵۲ تسلا و بسیار نزدیک به مقدار آن در طراحی اولیه و حدود ۰/۰۰۵ تسلا کمتر است.





DOI: 10.30503/nripress.2020.312

(ب) (الف)

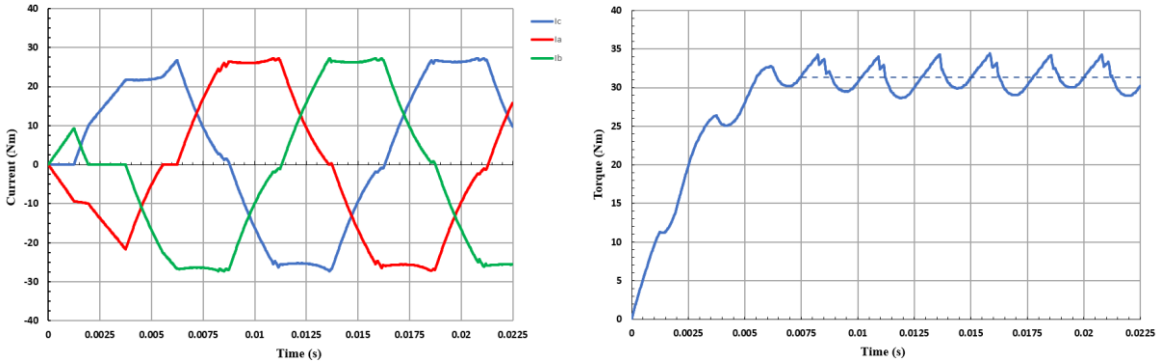


(ج)

شکل ۱۹-۱۰:شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۳

۱۰-۸-۳-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۳

منبع ولتاژ تغذیه در تمامی طرح‌های ۵۰۰ واتی ۴۸ ولت و سرعت نامی ۱۶۰rpm است. لذا مشابه طرح‌های قبل شبیه‌سازی الکتروموتور در در حالت دائمی با این مشخصات انجام و مشخصه‌های خروجی آن استخراج می‌شود. شکل موج گشتاور خروجی و جریان‌های استاتور به ترتیب درشکل ۲۰-۱۰-الف و شکل ۲۰-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.



(ب) (الف)

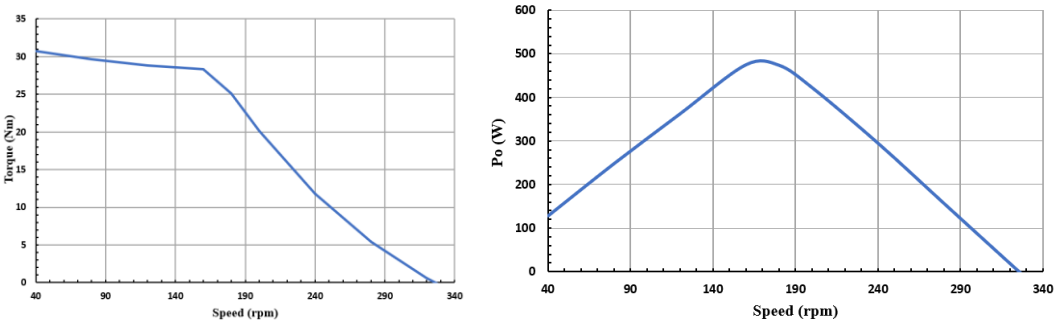
شکل ۲۰-۱۰: شکل موج: الف) گشتاور خروجی و ب)جریان‌های استاتور الکتورموتور طرح-۳ در سرعت **۱۶۰rpm**

از شکل موج گشتاور خروجی مشخص است که ریپل گشتاور حدود ۶ نیوتن-متر و بیشتر از طرح-۲ است که با توجه به افزایش گشتاور دندانه‌ای نتیجه قابل انتظاری است. مقدار متوسط گشتاور خروجی در حالت دائمی نیز حدود ۳۱/۳ نیوتن-متر(بدون محاسبه تلفات) است. مقدار گشتاور خروجی نسبت به حالت قبل حدود ۱/۷ نیوتن- متر کمتر است. اما از آنجایی که این گشتاور بدون دخالت تلفات آهن محاسبه شده است و تلفات آهن در این طرح نسبت به طرح قبل کمتر است، گشتاور و توان خروجی در طرح‌های ۲ و ۳ اختلاف کمی دارند. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۶۰rpm در جدول ۹-۱۰ ذکر شده است. ضمن اینکه مشخصه‌های گشتاور-سرعت و توان-سرعت به ترتیب درشکل ۲۱-۱۰- الف وشکل ۲۱-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.

جدول ۹-۱۰:اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۳ در سرعت **۱۶۰rpm**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

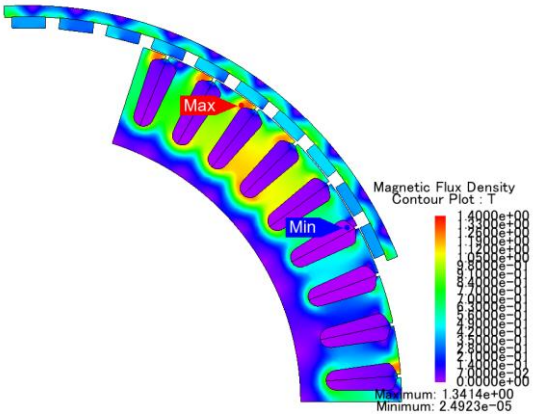
سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۶۰ rpm	۲۸/۳۲Nm	۴۷۴/۶W	٪۱۹/۱۷	۱۴۰/۷۸W	۴۹/۸۷ W
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			
۱۹/۸۶ A	۱۳/۹۵ A	% ۷۰/۸۶			



(ب) (الف)

شکل ۲۱-۱۰:مشخصه‌های: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۳

همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی هسته الکتروموتور در شکل ۲۲-۱۰شکل ۱۷-۱۰ نشان داده شده است که در این طرح نیز حداکثر چگالی شار در دندانه استاتور کمتر از مقدار ۱/۷ تسلا و حدود ۱/۲ تسلا است .

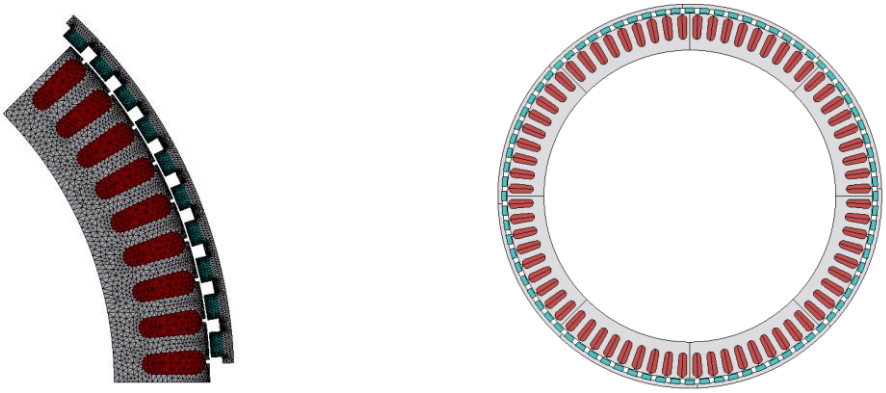


شکل ۲۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۳

۱۰-۸-٤- طرح-۴، ۵۰۰W

با افزایش قطر خارجی الکتروموتور با توجه به محدود بودن ابعاد آهن‌ربا و لزوم استفاده از اهن‌رباهای مستطیلی، تعداد قطب‌ها افزایش می‌یابد. الکتروموتور طرح-۴ با ۸۰ قطب و ۷۲ شیار مطابق شکل ۲۳-۱۰-الف به صورت دو بعدی مدل‌سازی می‌شود که با توجه به پریودیک بودن هندسه به صورت یک قطاع مشابه شکل ۲۳-۱۰-ب مش‌بندی و شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به تعداد قطب‌های زیاد و حجم بالا انتظار می‌رود که این طرح نیز مشابه طرح-۲ تلفات هسته بالایی داشته باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



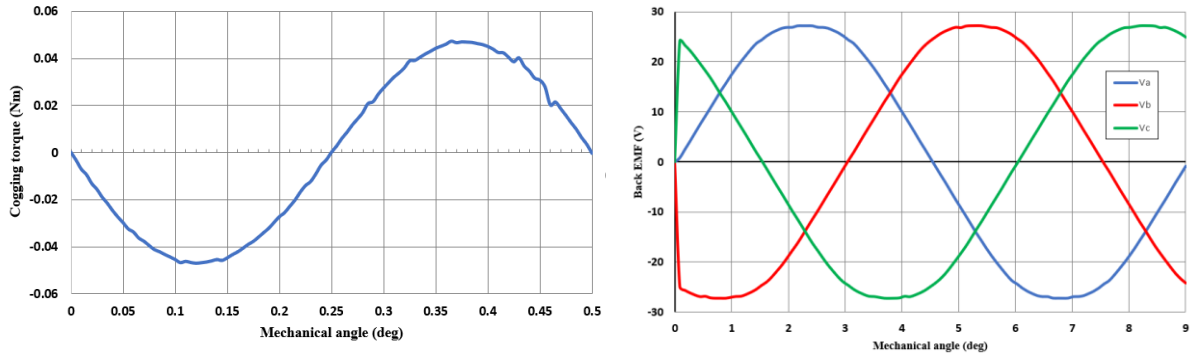
(ب) (الف)

شکل ۲۳-۱۰: الف) نمای دو بعدی طرح-۱ با ۶۰ قطب و ۵۴ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۱

۱۰-۸-٤-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۴

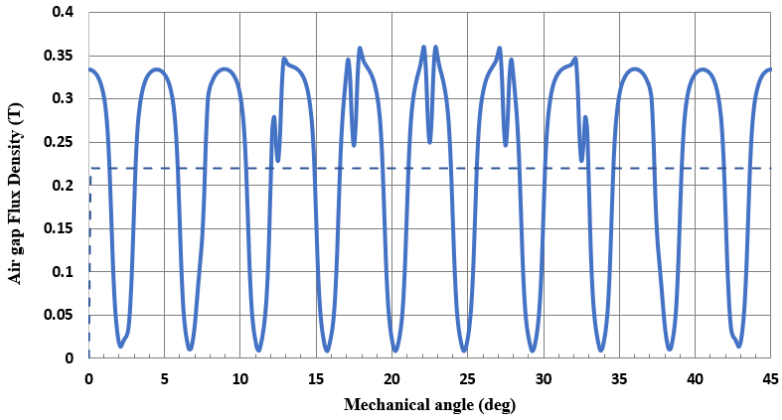
برای این طرح سرعت بی‌باری در طراحی اولیه حدود ۲۷۰rpm تعیین شده است. اگرچه تعداد قطب‌ها مشابه با طرح-۲ است اما به علت تفاوت در تعداد شیارها، کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب و شیار و به دنبال آن فرکانس و دامنه گشتاور دندانه‌ای در این دو طرح نیز متفاوت خواهد بود.

فرکانس گشتاور دندانه‌ای در این طرح ۷۲۰ است، بدین ترتیب دوره تناوب این گشتاور ۰/۵ درجه مکانیکی خواهد بود. شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌ها، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار در فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۹-۱۰-الف، شکل ۹-۱۰-ب و شکل ۹-۱۰-ج نشان داده شده است. مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۲۲ تسلا و بسیار نزدیک به مقدار آن در طراحی اولیه بوده و ۰/۰۰۶ تسلا کمتر از آن است.



(ب) (الف)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

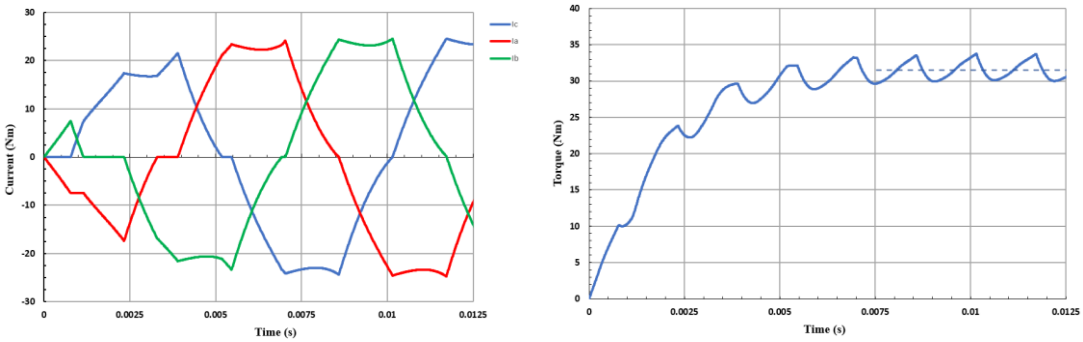


(ج)

شکل ۲۴-۱۰:شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی مربوط به طرح-۴

۱۰-۸-٤-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۴

در این قسمت نیز مشابه طرح قبل شبیه‌سازی الکتروموتور در سرعت ۱۶۰rpm در حالت دائمی و با منبع ولتاژ ۴۸ ولت و محدودیت حداکثر جریان ۲۵ آمپری انجام و مشخصه‌های خروجی آن استخراج می‌شوند. شکل موج گشتاور خروجی و جریان‌های استاتور به ترتیب در شکل ۲۵-۱۰-الف و شکل ۲۵-۱۰-ب نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل موج گشتاور خروجی مشخص است، ریپل گشتاور حدود ۴ نیوتن-متر و مقدار بسیار مناسبی است.



(ب) (الف)

شکل ۲۵-۱۰: شکل موج الف) گشتاور خروجی و ب)جریان‌های استاتور الکتروموتور طرح-۱ در سرعت **rpm160**

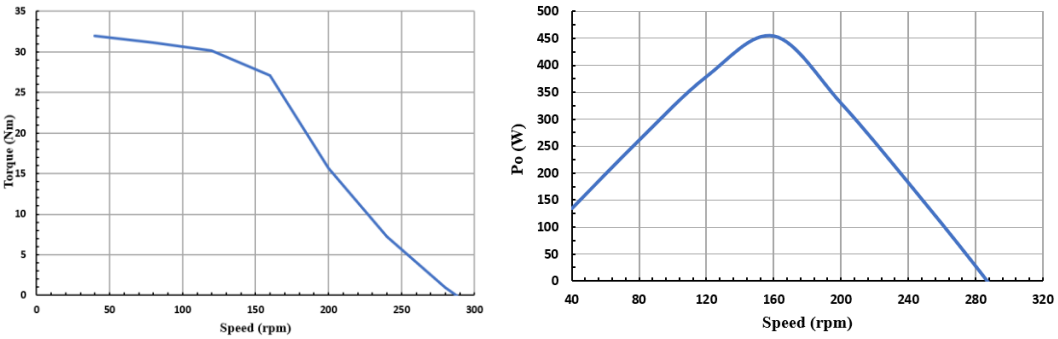
متوسط گشتاور خروجی در حالت دائمی حدود ۳۱/۵ نیوتن-متر(بدون محاسبه تلفات) است. اما از آنجایی که این گشتاور بدون احتساب تلفات آهن محاسبه شده است و تلفات آهن در این طرح نسبتا زیاد و حدود ۷۴ وات است، قطعا روی مقدار گشتاور خروجی بیشتر اثر گذار خواهد بود. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۶۰rpm در جدول ۱۰-۱۰ بیان شده است. ضمن اینکه مشخصه‌های گشتاور-سرعت و توان-سرعت الکتروموتور به ترتیب در شکل ۲۶-۱۰شکل ۱۶-۱۰- الف و شکل ۲۶-۱۰شکل ۱۶-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰-۱۰:اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۴ در سرعت **۱۶۰rpm**

سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۶۰ rpm	۲۷/۰۷Nm	۴۵۳/۵۱W	٪۱۱/۷۸	۱۱۲/۶۴W	۷۳/۷۵ W

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

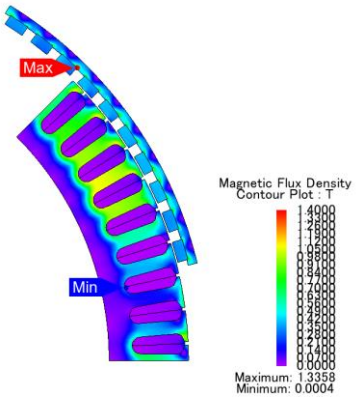
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			
۱۷/۸۲ A	۱۳/۴۸ A	% ۷۰/۰۵			



(ب) (الف)

شکل ۲۶-۱۰:مشخصه‌های: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۴

همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی هسته الکتروموتور در شکل ۲۷-۱۰شکل ۱۷-۱۰ نشان داده شده است که در این طرح نیز حداکثر چگالی شار در دندانه استاتور کمتر از مقدار ۱/۷ تسلا و حدود ۱/۱ تسلا است .

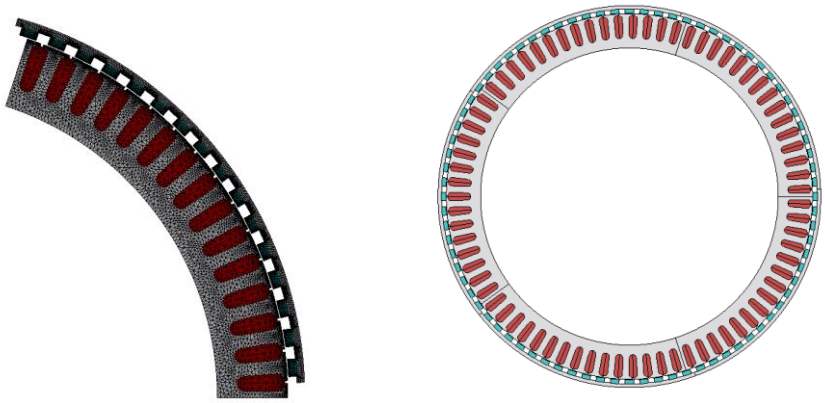


شکل ۲۷-۱۰:توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۴

۱۰-۸-۵- طرح-۵، ۵۰۰W

الکتروموتور طرح-۵ آخرین طرح ۵۰۰ واتی با بیشترین حجم است و بر اساس طراحی اولیه شامل ۸۰ قطب و ۷۵ شیار است که مطابق شکل ۲۸-۱۰-الف به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده و مش‌بندی آن در شکل ۲۸-۱۰-ب نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



(ب) (الف)

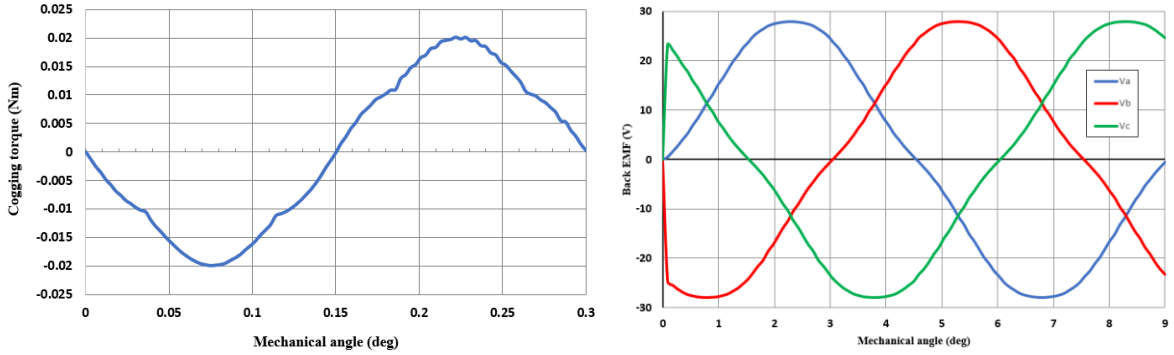
شکل ۲۸-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۵

این طرح نیز مشابه طرح-۲ و طرح-۴، ۸۰ قطب دارد و همچنین حجم الکتروموتور نیز نسبت به تمامی طرح‌ها کمتر است. انتظار می‌رود تلفات هسته مانند دو طرح یاد شده مقدار بالایی باشد.

۱۰-۸-۵-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۵

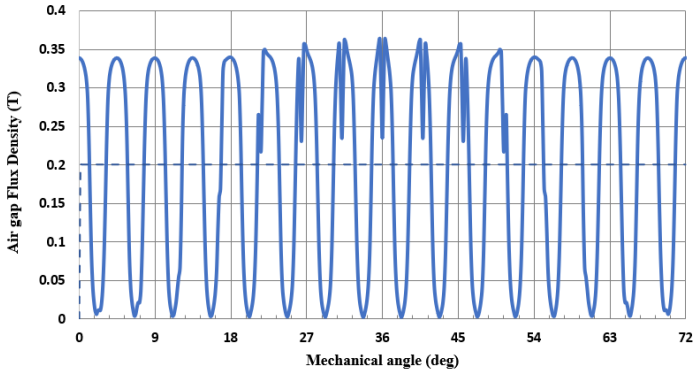
مطابق اطلاعات جدول ۶-۱۰ سرعت بی‌باری این طرح حدود ۲۷۵rpm است. مشخصه‌های بی‌باری این الکتروموتور در این سرعت استخراج می‌شود. در این طرح فرکانس گشتاور دندانه‌ای ۱۲۰۰ است که دوره تناوب آن ۰/۳ درجه مکانیکی است و مشابه طرح-۲ است. لذا این طرح نیز گشتاور دندانه‌ای و همچنین ریپل گشتاور بالایی خواهد داشت.

شکل موج‌های ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۲۹-۱۰شکل ۱۹-۱۰-الف، شکل ۲۹-۱۰-ب و شکل ۲۹-۱۰-ج نشان داده شده‌اند. با توجه به ترکیب تعداد قطب‌ها و شیار، نوع سیم‌پیچی و ابعاد آهن‌ربا که مشابه با طرح-۲ است، مشخصه‌های بی‌باری دو طرح تقریبا یکسان است. مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۱۹۹ تسلا و بسیار نزدیک به مقدار آن در طراحی اولیه و حدود ۰/۰۰۵ تسلا کمتر است.



(ب) (الف)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

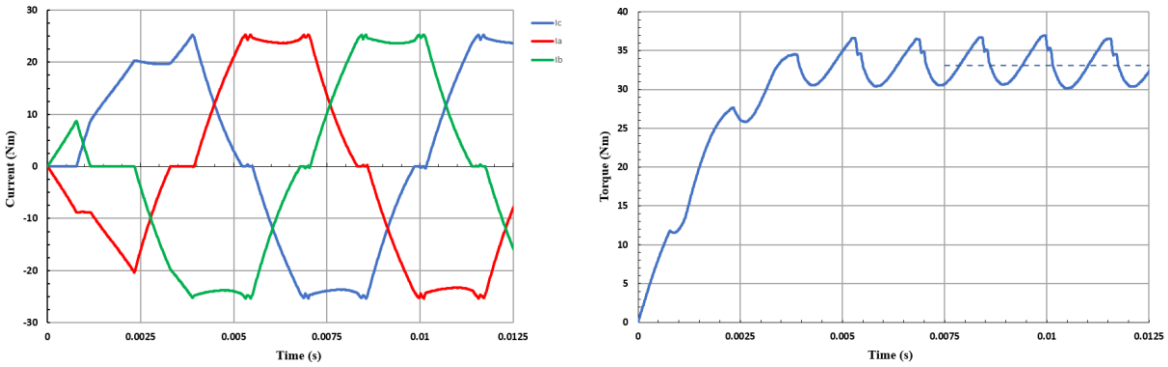


(ج)

شکل ۲۹-۱۰:شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۵

۱۰-۸-۵-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۵

مشخصه‌های خروجی این طرح در سرعت ۱۶۰rpm در حالت دائمی و با منبع ولتاژ ۴۸ ولت و محدودیت حداکثر جریان ۲۵ استخراج شده‌اند. شکل موج گشتاور خروجی و جریان‌های استاتور به ترتیب در شکل ۳۰-۱۰شکل ۱۵-۱۰-الف و شکل ۳۰-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.



(ب) (الف)

شکل ۳۰-۱۰: شکل موج: الف) گشتاور خروجی و ب)جریان‌های استاتور الکتورموتور طرح-۵ در سرعت **۱۶۰rpm**

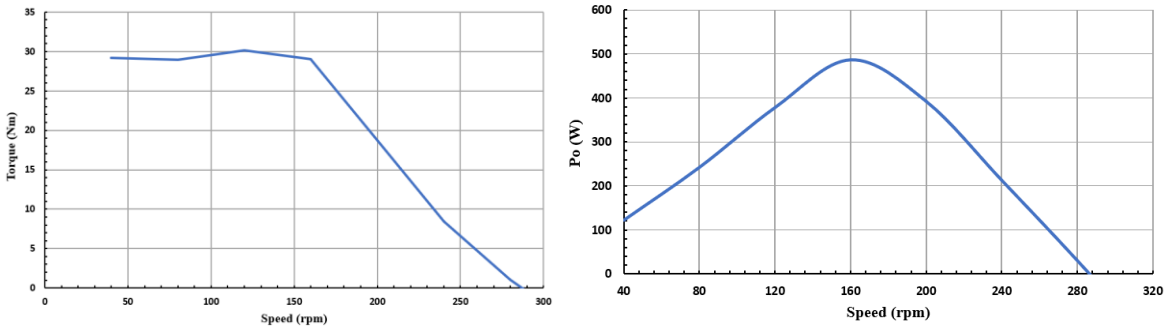
با آنکه دامنه گشتاور دندانه‌ای در این طرح مشابه طرح-۲ است اما گشتاور خروجی در این طرح ریپل بالاتری دارد. مقدار ریپل گشتاور حدود ۶/۵ نیوتن- متر و متوسط گشتاور خروجی(بدون احتساب تلفات آهن) ۳۳/۰۷ نیوتن- متر است. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۶۰rpm در جدول ۱۱-۱۰ ذکر شده است. ضمن اینکه مشخصه‌های گشتاور-سرعت و توان-سرعت الکتروموتور که با تحلیل الکترومغناطیسی و روش المان محدود استخراج شده است به ترتیب در شکل ۳۱-۱۰- الف و شکل ۳۱-۱۰-ب نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۱-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۵ در سرعت **۱۶۰rpm**

سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۶۰ rpm	۲۹/۰۴Nm	۴۸۶/۶۲W	٪۱۲/۱۲	۱۰۰/۸۴W	۶۷/۵۷ W
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

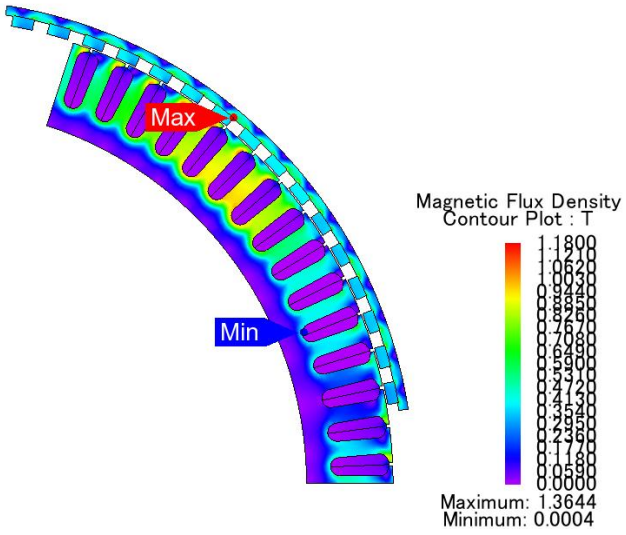
			% ۷۳/۳۲	۱۳/۸۲ A	۱۸/۰۴ A



(ب) (الف)

شکل ۳۱-۱۰:مشخصه‌های: الف) توان-سرعت و ب) گشتاور سرعت الکتروموتور طرح-۲

همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی هسته الکتروموتور در شکل ۳۲-۱۰ نشان داده شده است که در این طرح نیز حداکثر چگالی شار در دندانه استاتور کمتر از مقدار ۱/۷ تسلا و حدود ۰/۹۸ تسلا است .

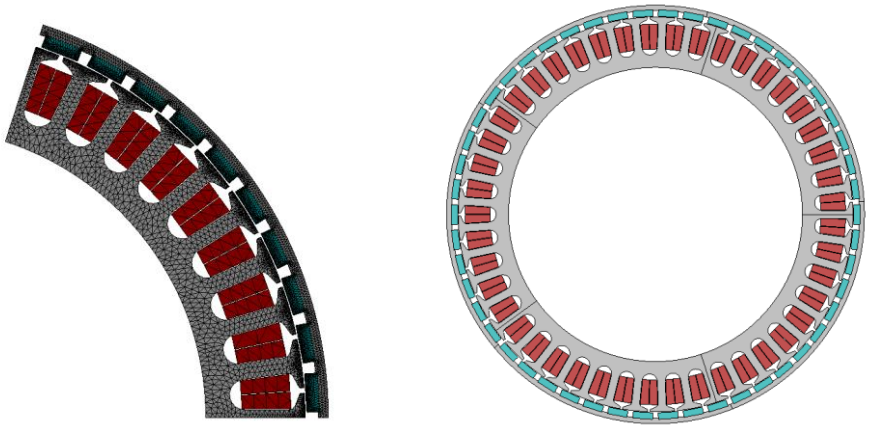


شکل ۳۲-۱۰: توزیع چگالی شار در الکتروموتور طرح-۵

۱۰-۸-۶- طرح-۶، ۲۵۰W

الکتروموتور طرح-۶ آخرین طرح از این پروژه است که با هدف کاهش عدم افزایش حجم الکتروموتور نسبت به طرح مرجع در مرحله دوم پروژه، با توان ۲۵۰ وات طراحی شده است. این طرح بر اساس طراحی اولیه شامل ۵۰ قطب و ۴۵ شیار است که مطابق شکل ۳۳-۱۰-الف به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده و مش‌بندی آن در شکل ۳۳-۱۰شکل ۲۸-۱۰شکل ۱۸-۱۰-ب نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



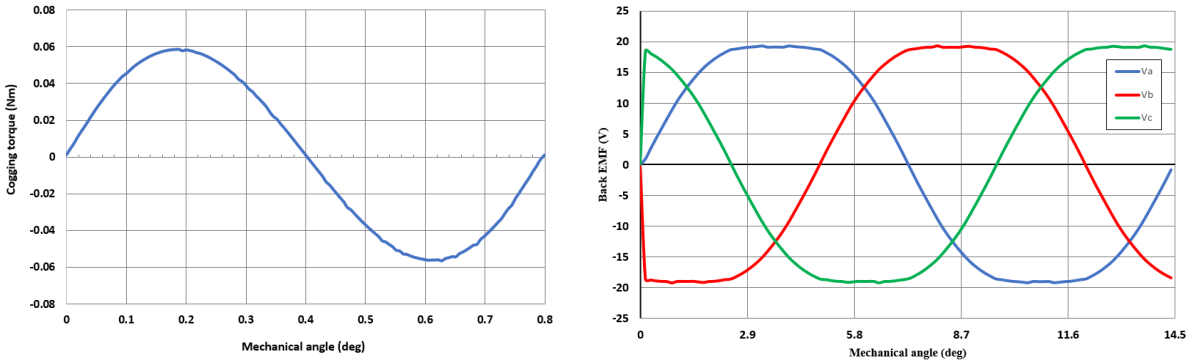
(ب) (الف)

شکل ۳۳-۱۰:الف) نمای دو بعدی طرح-۳ با ۵۰ قطب و ۴۵ شیار، ب) نمایی از مش‌بندی قطاعی از طرح-۶

۱۰-۸-۶-۱- شبیه‌سازی بی‌باری طرح-۶

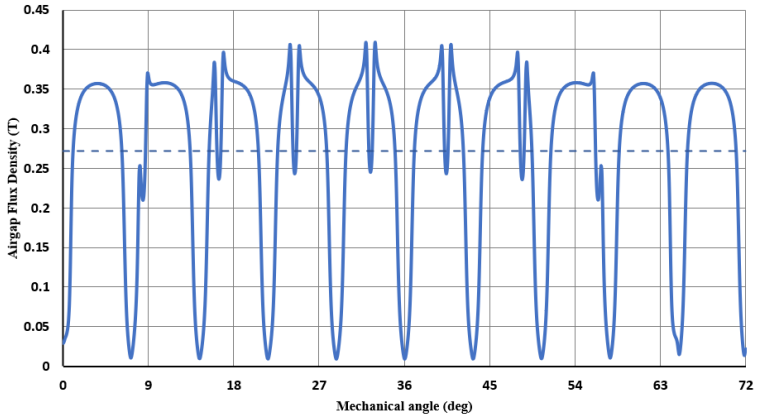
همانطور که در بخش طراحی اولیه اشاره شد، در این طرح با توجه به توان کمتر، سرعت نامی و سرعت بی‌باری نسبت به طرح‌های ۵۰۰ واتی کمتر است. مطابق اطلاعات جدول ۶-۱۰ سرعت بی‌باری این طرح حدود ۲۰۰rpm است. مطابق با طرح‌های گذشته برای استخراج مشخصه‌های بی‌باری، روتور با سرعت بی‌باری به صورت مدار باز چرخانده می‌شود.

شکل موج‌های ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب در شکل ۳۴-۱۰شکل ۱۹-۱۰-الف، شکل ۳۴-۱۰-ب و شکل ۳۴-۱۰-ج نشان داده شده‌اند. در این طرح فرکانس گشتاور دندانه‌ای ۴۵۰ است که دوره تناوب آن ۰/۸ درجه مکانیکی است و مقدار دامنه پیک-پیک آن حدود ۰/۱۲ نیوتن-متر است که اگر گشتاور نامی را ۲۰ نیوتن-متر در نظر بگیریم، دامنه گشتاور دندانه‌ای حدود ۰/۶ درصد آن است که مقدار مطلوبی است. مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی حدود ۰/۲۷۲ تسلا و تقریبا با مقدار آن در طراحی اولیه است.



(ب) (الف)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



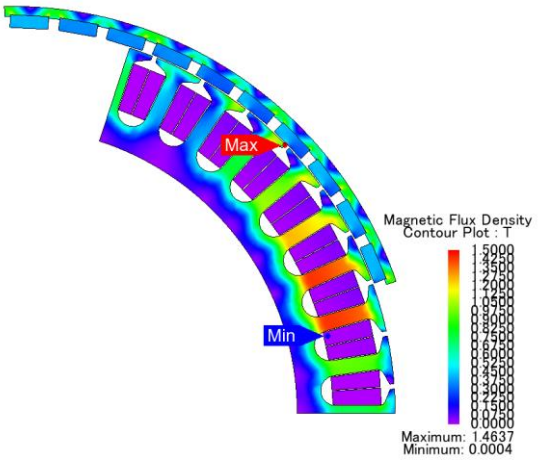
(ج)

شکل ۳۴-۱۰: شکل موج‌های: الف) ولتاژ القایی، ب) گشتاور دندانه‌ای، ج) چگالی شار فاصله هوایی طرح-۶

۱۰-۸-۶-۲- شبیه‌سازی تحت بار طرح-۶

برای استخراج مشخصه‌های تحت بار حالت دائمی، الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۰rpm با منبع ولتاژ ۳۶ ولت و محدودیت حداکثر جریان ۱۷ آمپری برای سیم‌پیچ‌های استاتور شبیه‌سازی می‌شود. مشخصات خروجی طرح همچون گشتاور و توان خروجی و همچنین دیگر پارامترها از قبیل جریان استاتور، تلفات و بازده بررسی می‌شوند.

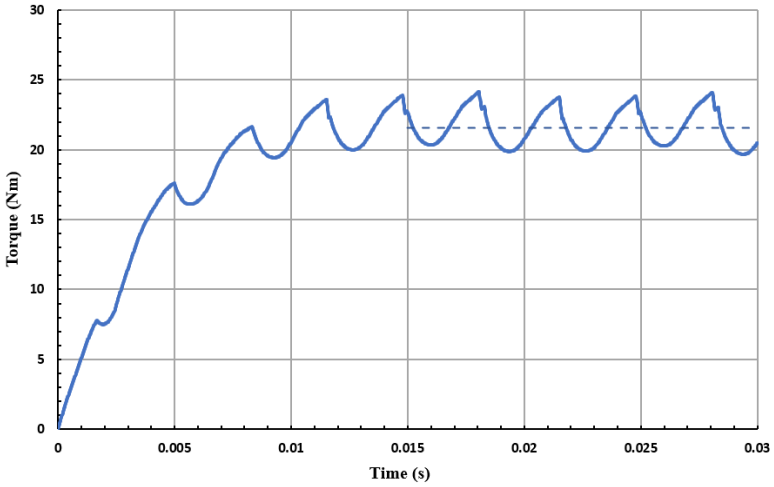
شکل ۳۵-۱۰ توزیع چگالی شار مغناطیسی را در هسته الکتروموتور طرح-۶ نشان می‌دهد. حداکثر چگالی شار مغناطیسی در دندانه استاتور حدود ۱/۴ تسلا است که از حداکثر مقدار مجاز یعنی ۱/۷ تسلا کمتر است. دلیل بالاتر بودن چگالی شار دندانه استاتور در این طرح نسبت به سایر طرح‌ها استفاده بهینه از هسته و همچنین ایجاد فضای کافی برای سیم‌پیچی در شیارها است. همچنین این طرح نسبت به سایر طرح‌ها تعداد قطب کمتری دارد، لذا فرکانس الکتریکی آن پایین‌تر است و حتی چگالی شار بالاتر تلفات هسته زیادی به الکتروموتور تحمیل نمی‌کند.



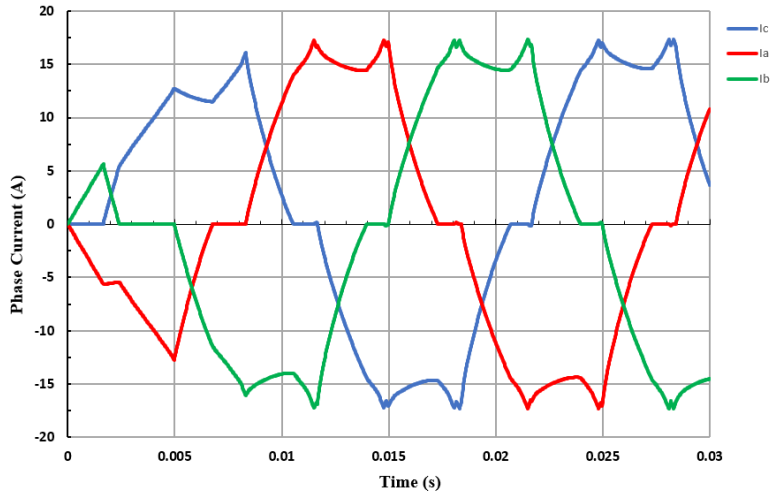
شکل ۳۵-۱۰: توزیع چگالی شار مغناطیسی در الکتروموتور طرح-۶

شکل موج گشتاور خروجی در شکل ۳۶-۱۰ و همچنین جریان سیم‌پیچ‌های استاتور در شکل ۳۷-۱۰ نشان داده شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۳۶-۱۰: شکل موج گشتاور خروجی الکتورموتور طرح-۱ در سرعت ۱۲۰**rpm**



شکل ۳۷-۱۰: شکل موج جریان فازهای استاتور الکتروموتور طرح-۶

همانطور که از شکل موج گشتاور خروجی مشخص است، مقدار متوسط گشتاور در حالت دائمی حدود ۲۱/۶ نیوتن-متر (بدون محاسبه تلفات) و ریپل آن حدود ۴ نیوتن-متر یعنی ۱۸/۵ درصد گشتاور خروجی است. اطلاعات تکمیلی مربوط به عملکرد موتور در سرعت ۱۲۰rpm در جدول ۱۲-۱۰ ذکر شده است.

مقدار گشتاور خروجی نسبت به طراحی اولیه حدود ۰/۸ نیوتن- متر کمتر است که می‌تواند ناشی از علت‌های مختلف همچون استفاده از آهن‌ربای مکعبی در طراحی تکمیلی، افزایش تلفات آهن نسبت به طراحی اولیه باشد. همچنین بازده طرح نسبت به طراحی اولیه حدود ۶ درصد کاهش یافته است که علت آن افزایش تلفات هسته به سبب محاسبه دقیق به روش المان محدود و همچنین افزایش تلفات مسی است.

جدول ۱۲-۱۰: اطلاعات تکمیلی عملکرد الکتروموتور طرح-۶ در سرعت ۱۲۰**rpm**

سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۲۰ rpm	۱۹/۶۲Nm	۲۴۶/۵۷W	٪۱۲/۱۲	۷۹/۹۱W	۲۴/۶۱ W
جریان فاز Rms	جریان لینک DC	بازده			
۱۱/۸۷ A	۹/۹۸ A	% ۶۸/۹			

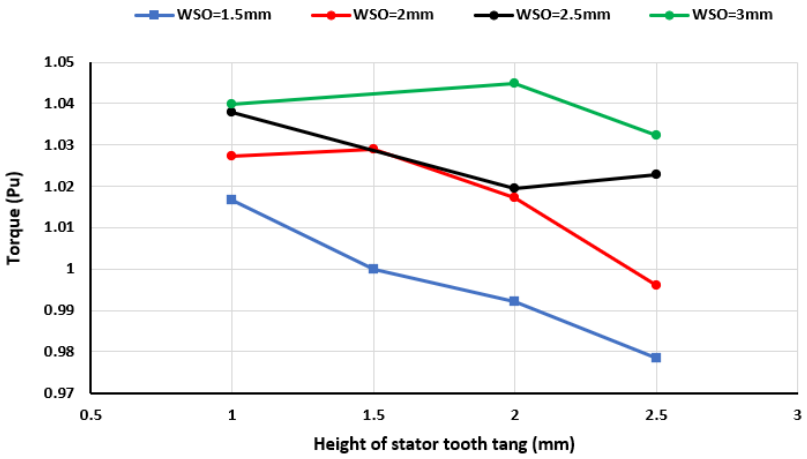
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۱۰-۸-۶-۳- بهینه‌سازی عرض و ارتفاع دهانه شیار

یکی از عوامل اثرگذار بر میزان گشتاور دندانه‌ای و در نتیجه ریپل گشتاور و همچنین شار نشتی که موجب کاهش گشتاور خروجی می‌شود، ابعاد شیار است. با توجه به اینکه یکی از اهداف بهینه‌سازی کاهش ریپل گشتاوراست، در این بخش دو پارامتر اثرگذار بر گشتاور دندانه‌ای یعنی عرض دهانه شیار و ارتفاع آن تحلیل شده و اثر آن‌ها بر ریپل گشتاور و مقدار گشتاور خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر عرض و ارتفاع دهانه شیار در طرح اولیه به ترتیب ۱/۵ و ۱ میلی‌متر است که گشتاور خروجی و ریپل آن به عنوان مرجع تعیین شده‌اند.

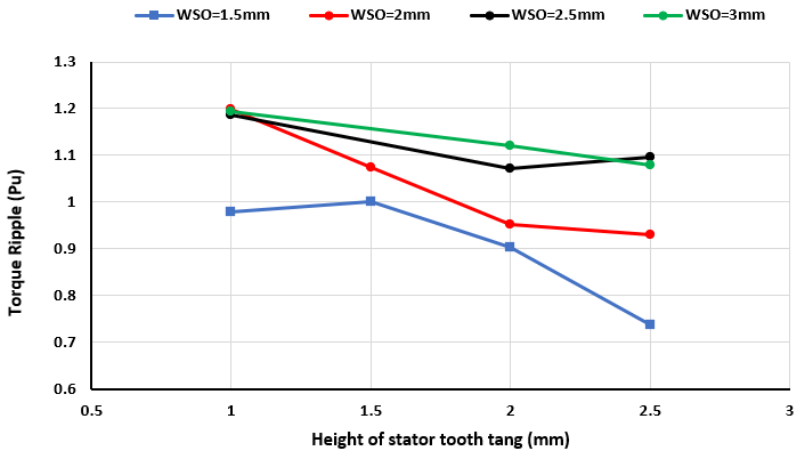
نتایج شبیه‌سازی حاصل از تغییرات عرض و ارتفاع دهانه شیار بر متوسط گشتاور خروجی و ریپل گشتاور به ترتیب در شکل ۳۸-۱۰ و شکل ۳۹-۱۰ نشان داده شده است. در شکل محور افقی مقادیر متغیر ارتفاع دهانه شیار برای ۴ مقدار از ۱ تا ۲/۵ میلی‌متر و محور عمودی ریپل گشتاور و میزان گشتاور خروجی را نسبت به مقادیر مرجع نشان می‌دهند. عرض دهانه شیار نیز از ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر متغیر است که در هر شکل با نمودارهای با رنگ‌های مختلف مشخص شده‌اند.

عرض دهانه شیار ۱/۵ میلیمتر به علت نشت بالا کمترین گشتاور خروجی را دارد. عرض دهانه شیار ۳ میلی‌متر بیشترین گشتاور و همچنین بیشترین ریپل گشتاور را به دنبال دارد. اما از آنجایی که عرض دهانه شیار ۲ و ۲/۵ میلی‌متر در دو نقطه گشتاور خروجی یکسانی دارند، اما ریپل گشتاور WSO=2.5 بیشتر است، WSO=2 برای عرض دهانه شیار انتخاب می‌شود و از آنجایی که با افزایش ارتفاع دهانه شیار هر دو پارامتر گشتاور خروجی و ریپل آن کاهش پیدا می‌کنند، به عنوان یک مقدار میانه، ارتفاع دهانه شیار ۱/۷ میلی‌متر انتخاب می‌شود.



شکل ۳۸-۱۰: تغییرات متوسط گشتاور خروجی بر حسب دو پارامتر عرض و ارتفاع دهانه شیار

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۳۹-۱۰: تغییرات ریپل گشتاور خروجی بر حسب دو پارامتر عرض و ارتفاع دهانه شیار

۱۰-۸-۶-٤- ابعاد، مشخصات و نمودارهای عملکردی طرح نهایی

پس از تحلیل اولیه طرح در نرم افزار المان محدود و سپس انتخاب بهینه دو پارامتر عرض و ارتفاع دهانه شیار، ابعاد نهایی الکتروموتور طرح-۶ در جدول مشخص شده است. پس از آن عملکرد موتور از سرعت‌های کمتر از سرعت نامی تا بی‌باری تحلیل شده و مشخصه‌های عملکردی برای طرح نهایی الکتروموتور استخراج شده است.

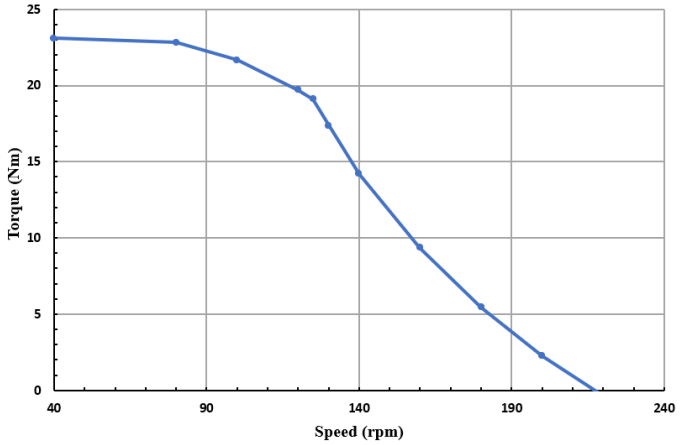
جدول ۱۳-۱۰: ابعاد و مشخصات نهایی الکتروموتور طرح-۶

تعداد قطب	۵۰	قطر خارجی روتور	۳۲۰	ضخامت یوغ روتور	۴
تعداد شیار	۴۵	قطر داخلی روتور	۳۰۳	ضخامت یوغ استاتور	۹/۵
تعداد فاز	۳	قطر خارجی استاتور	۳۰۲	تعداد لایه‌های سیم در هر شیار	۲
عمق شیار	۲۷/۲۹	قطر داخلی استاتور	۲۲۵	تعداد دور سیم در هر شیار	۱۸
عرض شیار	۱۱/۸۱	طول محوری موتور	۳۰	قطر سیم	۰/۷۵
ارتفاع دهانه شیار*	۱/۷	طول فاصله هوایی	۰/۵	تعداد رشته‌های موازی در هر دور	۷
عرض دهانه شیار	۲	عرض دندانه استاتور	۶	پرشدگی شیار (%)	۴۲/۱۲
طول آهن‌ربا	۳۰	ضخامت آهن‌ربا	۵	چگالی شار پسماند آهن‌ربا (T)	۰/۴۳
عرض آهن‌ربا	۱۵	Embrace	۰/۷۸	شدت میدان ضد مغناطیسی(kA/m)	۲۱۵

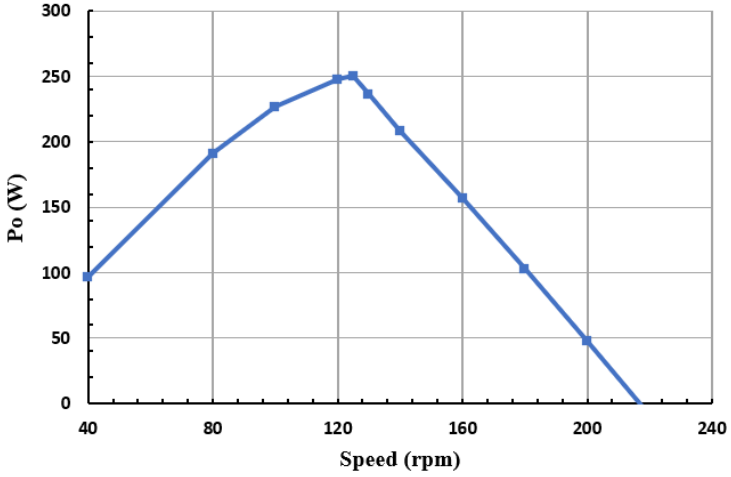
* تمامی طول‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

مشخصه گشتاور-سرعت و توان-سرعت طرح نهایی به ترتیب در شکل ۴۰-۱۰ و شکل ۴۱-۱۰ نشان داده شده است. با توجه به مشخصه توان-سرعت، توان بیشینه الکتروموتور در سرعت ۱۲۵rpm اتفاق می‌افتد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



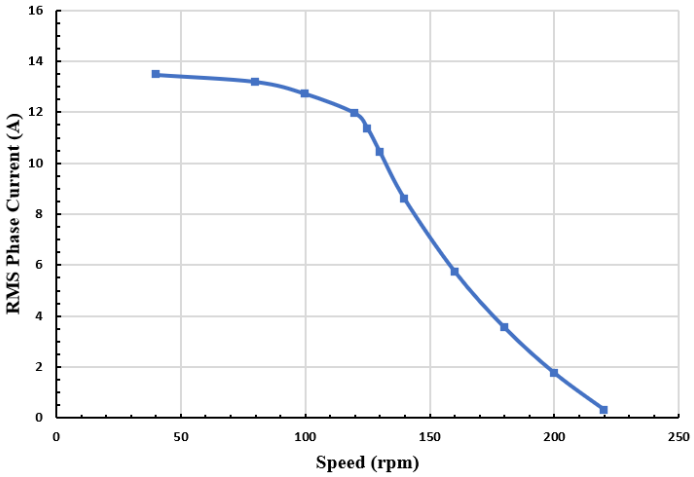
شکل ۴۰-۱۰: مشخصه نهایی گشتاور-سرعت الکتروموتور طرح-۶



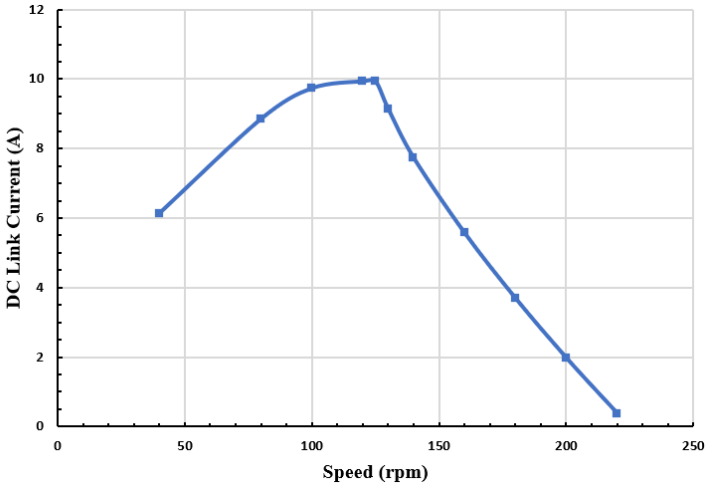
شکل ۴۱-۱۰: مشخصه نهایی توان-سرعت الکتروموتور طرح-۶

در سرعت نامی و سرعت‌های پس از آن متوسط جریان لینک DC و مقدار موثر جریان هر دو روندی کاهشی دارند. اما در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی با کاهش سرعت(افزایش بار) اختلاف دو جریان بیشتر می‌شود. برای مثال اگر حداکثر مقدار موثر جریان فاز در مقدار نامی محدود شده باشد، در سرعت خیلی پایین جریان کشیده شده از باتری با همان جریان لینک DC کمتر از جریان نامی خواهد بود و درصورتی که حداکثر جریان لینک در مقدار نامی محدود شده باشد، در سرعت پایین جریانی بیش از جریان نامی از سیم‌پیچ‌های استاتور عبور خواهد کرد که ممکن است موجب آسیب به عایق سیم‌پیچی شود. تغییرات جریان فاز استاتور و جریان لینک DC بر حسب سرعت به ترتیب در شکل ۴۲-۱۰ و شکل ۴۳-۱۰ نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

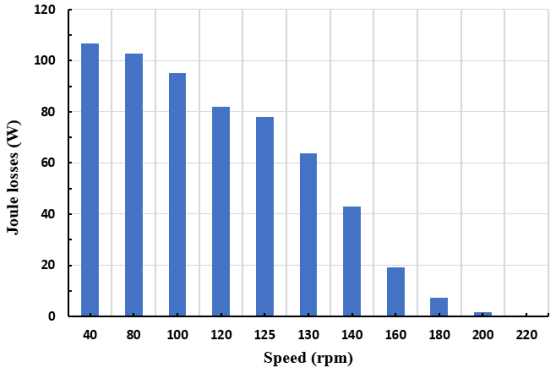


شکل ۴۲-۱۰: مشخصه تغییرات جریان فاز استاتور بر حسب سرعت الکتروموتور طرح -۶

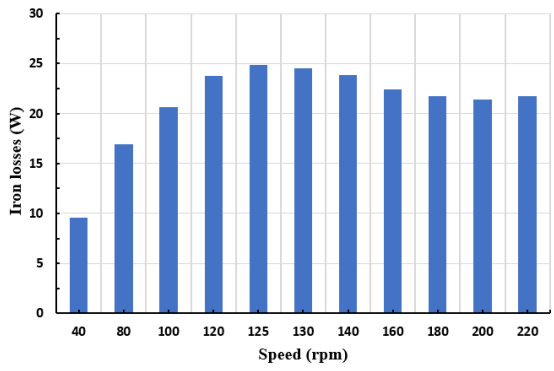


شکل ۴۳-۱۰: مشخصه تغییرات جریان لینک **DC**بر حسب سرعت الکتروموتور طرح -۶

در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی، به علت جریان بالای استاتور، تلفات مسی بالا اما توان خروجی پایین است. لذا بازده در این ناحیه کم است. مشخصه‌های مربوط به بازده، تلفات مسی و تلفات هسته به ترتیب در شکل ۴۴-۱۰-الف و شکل ۴۴-۱۰-ب نشان داده شده اند.



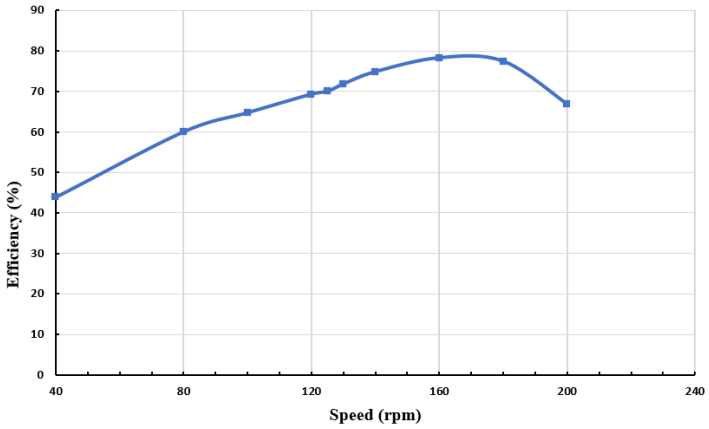
(الف)



(ب)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۴۴-۱۰: الف) تلفات مسی، ب) تلفات هسته الکتروموتور طرح-۶



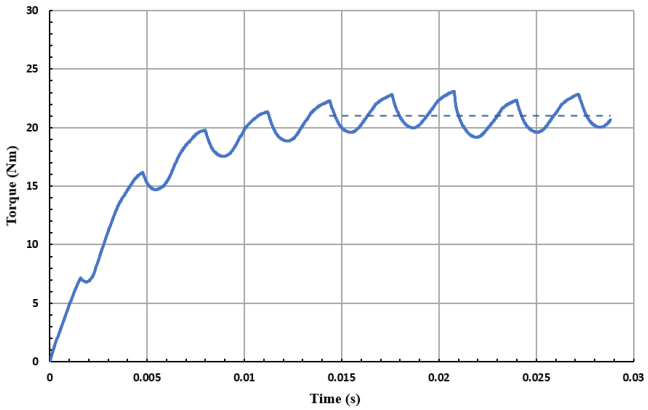
شکل ۴۵-۱۰: نمودار بازده بر حب سرعت الکتروموتور طرح-۶

حداکثر بازده الکتروموتور در سرعت۱۷۰rpm اتفاق می‌افتد. مشخصات نامی موتور در سرعت ۱۲۵rpmمطابق جدول ۱۴-۱۰ ارائه شده است. همچنین شکل موج گشتاور خروجی و جریان‌های استاتور در سرعت نامی به ترتیب در شکل ۴۶-۱۰ و شکل ۴۷-۱۰ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۴-۱۰: مشخصات عملکرد نامی الکتروموتور طرح-۶ در سرعت **۱۲۵rpm**

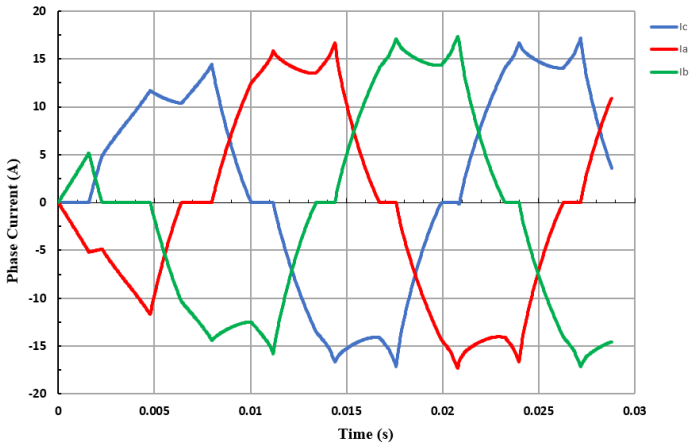
سرعت موتور	گشتاور خروجی	توان خروجی	ریپل گشتاور	تلفات مسی	تلفات هسته
۱۲۵ rpm	۱۹/۱۲Nm	۲۵۰/۲۳W	٪۱۴/۲۸	۷۷/۹۴W	۲۴/۸۸ W
Rms جریان فاز	جریان لینک DC	بازده			
۱۱/۳۶ A	۹/۹۳ A	% ۶۹/۹۷			

بازده الکتروموتور حدود ۷۰ درصد است. این بازده پایین در نتیجه استفاده از آهن‌ربای انرژی پایین فریتی است که منجر به استفاده از مس بیشتر و در نتیجه تلفات مسی بیشتر شده است. برای کاهش تلفات مسی باید مقاومت فاز را کاهش داد که برای این کار باید ارتفاع شیار را افزایش داده و از تعداد رشته‌های موازی بیشتر و یا سیم با مقطع بزرگتر استفاده کرد.



شکل ۴۶-۱۰: شکل موج گشتاور خروجی الکتروموتور طرح-۶ در سرعت **۱۲۵rpm**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۴۷-۱۰: شکل موج جریان فازهای استاتور الکتروموتور طرح-۶ در سرعت **rpm**۱۲۵

۱۰-۹- نتیجه‌گیری

طرح‌های مختلف ۵۰۰ و ۲۵۰ واتی در شرایط عملکرد بی‌بار و تحت بار شبیه‌سازی شده و مشخصه‌های خروجی آن‌ها استخراج شده است. از میان طرح‌های مختلف ۵۰۰ وات، طرح-۱ بیشترین بازده و توان خروجی را داراست. همچنین از نظر حجم الکتروموتور، با قطر خارجی ۴۰۰ میلیمتر و طول محوری ۳۰ میلی‌متر نسبت به دیگر ساختارها از ابعاد معقول‌تری برخوردار است.

همچنین طرح ۲۵۰ وات اگرچه ابعادی مشابه طرح مرجع (قطر خارجی ۳۵۰ میلی‌متر و طول محوری ۳۰ میلی‌متر) دارد اما به علت کاهش جریان ورودی، توان پایین‌تری دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

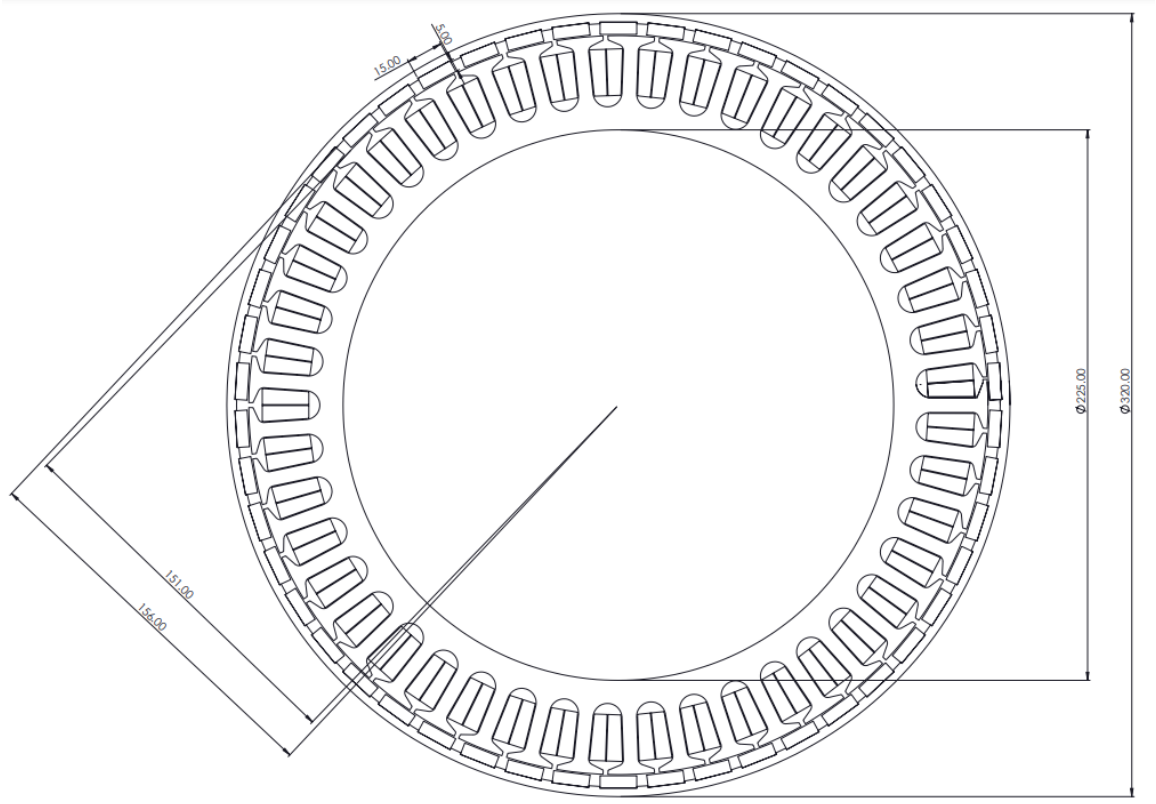
فصل ۱۱- نقشه‌های ساخت موتور BLDC و PCB درایو آن

۱۱-۱- مقدمه

در فصل های گذشته به نحوه طراحی موتور BLDC برای دوچرخه برقی و مدار دراوی آن پرداخته شده است. در این فصل تلاش بر ارائه نقشه‌های ساخت موتور BLDC پیشنهادی است. در ادامه به ابتده به طرح های ساخت موتور BLDC و در ادامه به مدار درایو آن پرداخته شده است.

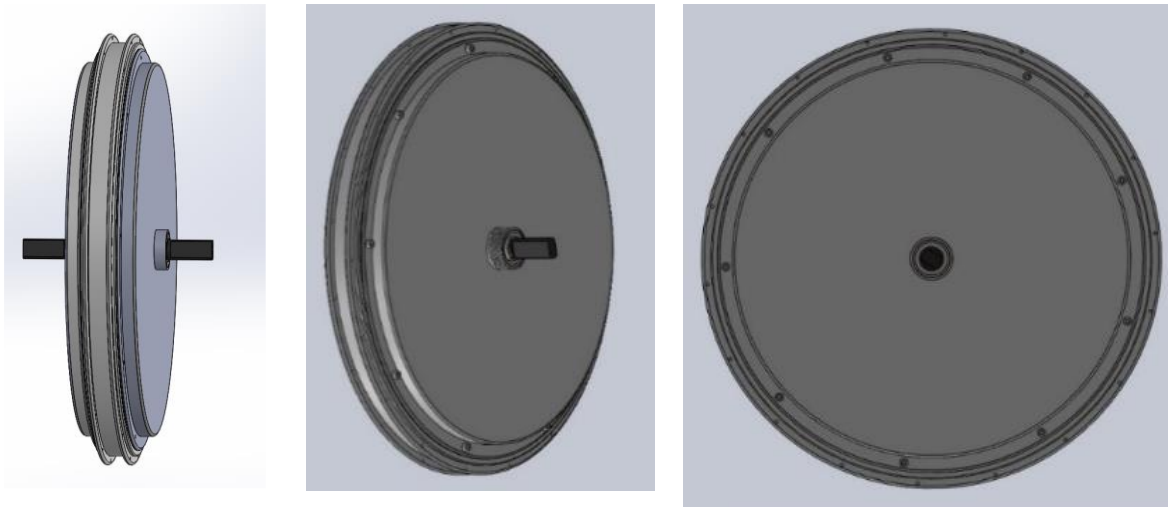
۱۱-۲- الکتروموتور

ساختار الکتروموتور BLDC از روتور، استاتور، حلقه میانی، شفت، بیرینگ های دو سوی شفت، محفظه راست و محفظه چپ تشکیل شده است. شکل ۲-۱۱ شماتیک دو بعدی و سه بعدی مجموعه الکتروموتور BLDC و شکل ۱-۱۱ فقط قسمت الکترومغناطیسی آن را نشان می‌دهند.



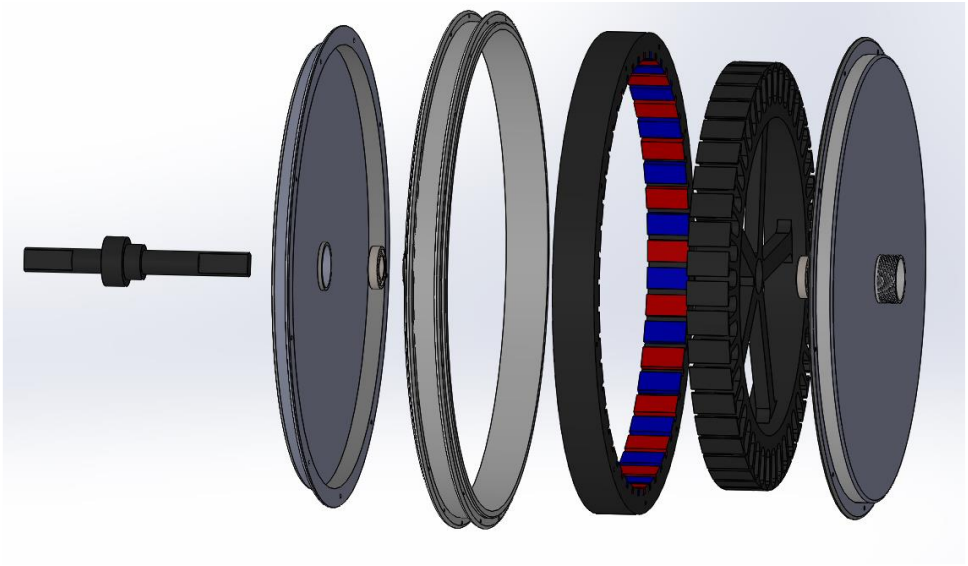
شکل ۱-۱۱: ابعاد قسمت الکترومغناطیسی موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



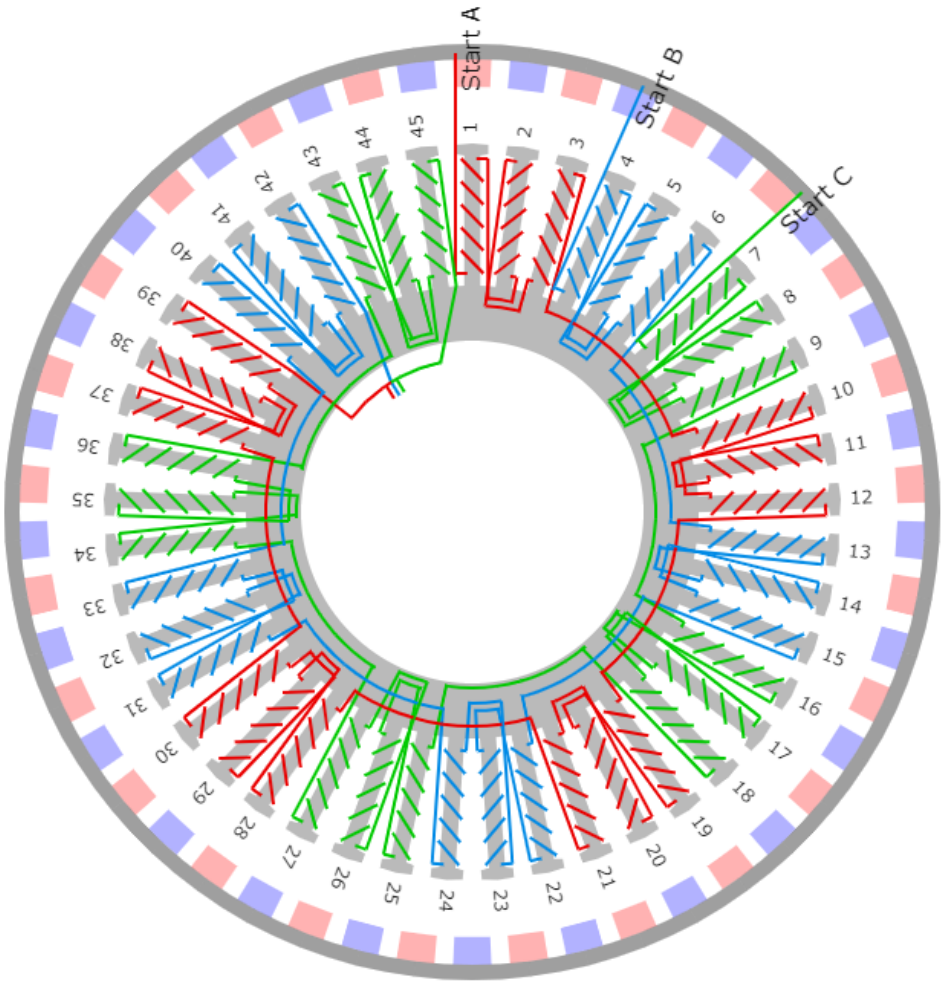
BLDCشکل ۲-۱۱: شماتیک دو بعدی و سه بعدی الکتروموتور

شکل ۳-۱۱ شماتیک انفجاری الکتروموتور BLDC مناسب برای کاربری دوچرخه برقی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱: شماتیک انفجاری موتور **BLDC**

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



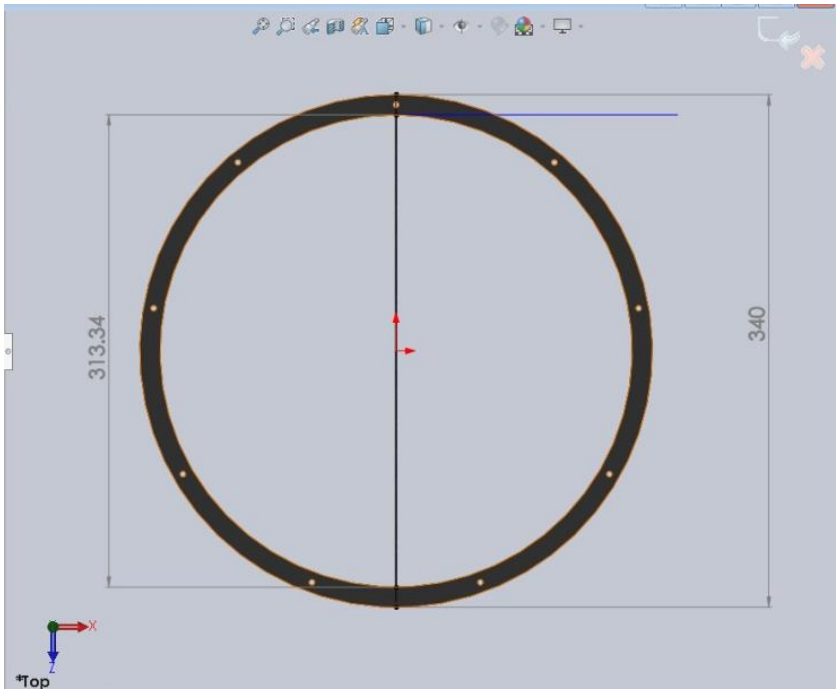
شکل ۴-۱۱: دیاگرام سیم‌پیچی الکتروموتور

در ادامه بخش تصویر هر یک از اجزا ارائه شده است.

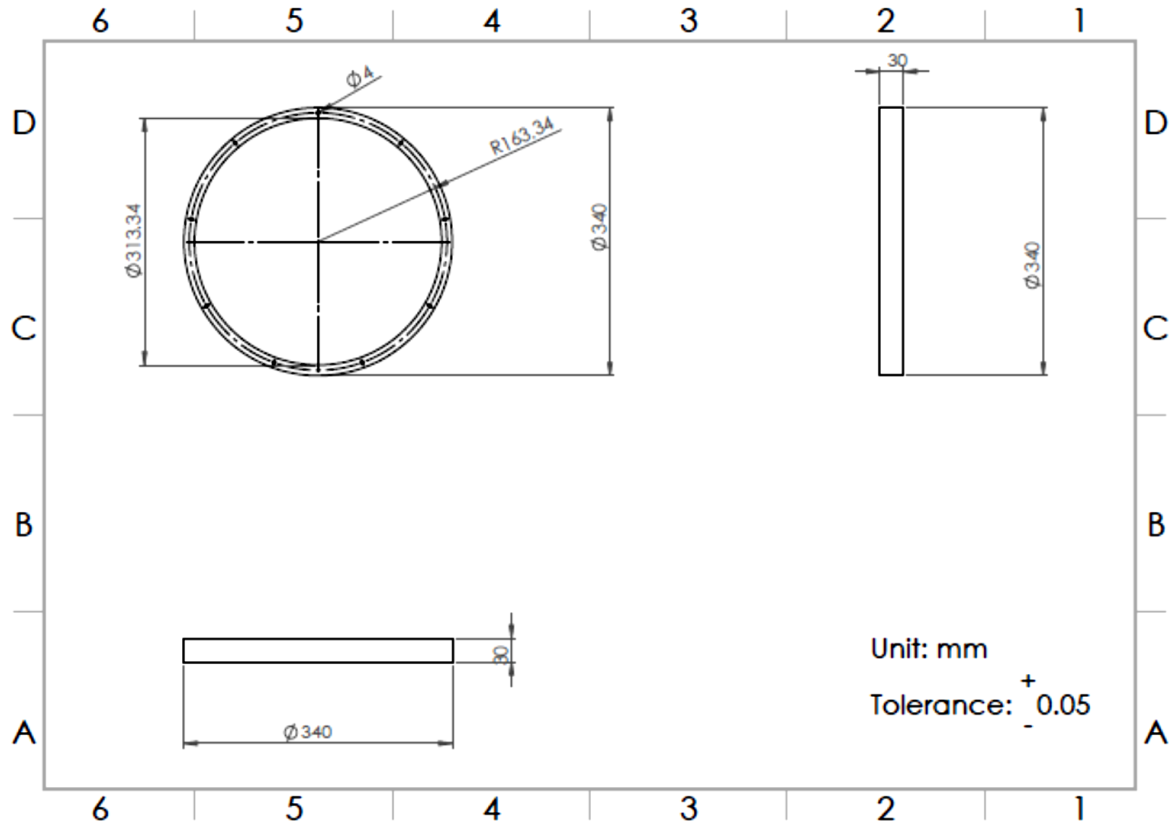
۱۱-۲-۱- یوغ روتور

ساختار الکتروموتور BLDC از نوع روتور بیرونی می‌باشد. به همین علت یوغ روتور به صورت شکل ۵-۱۱ برای این ساختار طراحی شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، یوغ روتور محل قرارگیری آهنرباهای الکتروموتور BLDC می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

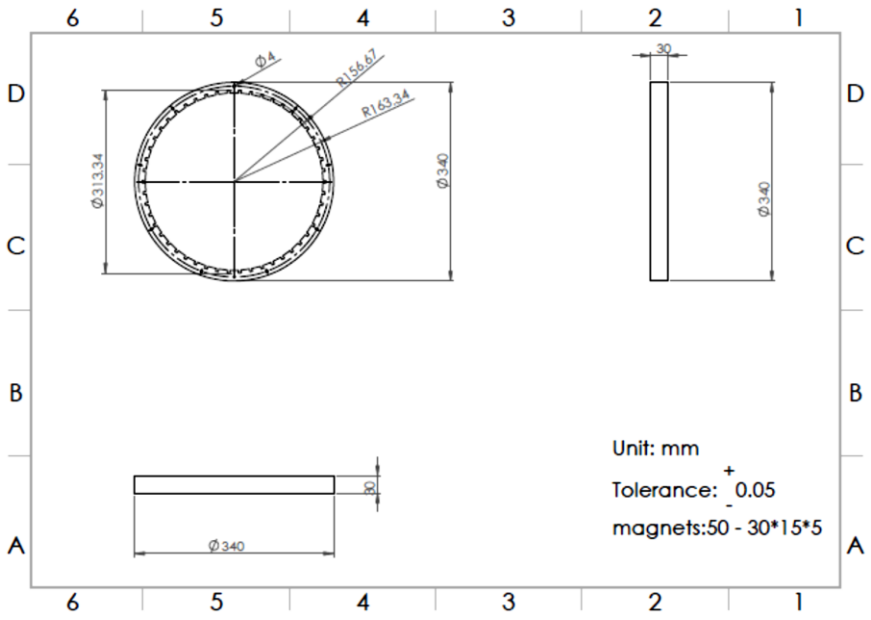


(الف)



(ب)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

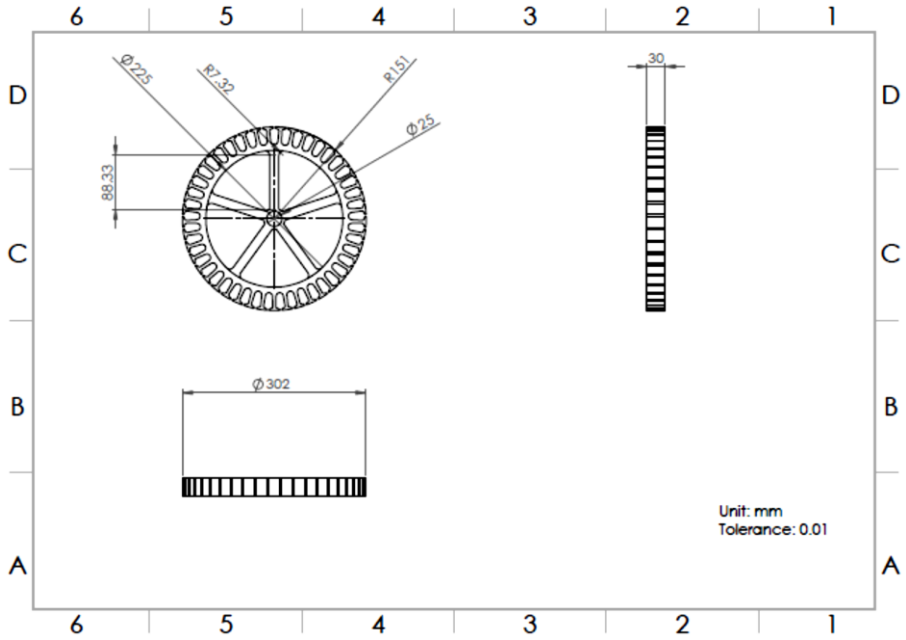


(ج)

شکل ۵-۱۱: یوغ روتور : الف) شماتیک در نرم افزار، ب) نقشه ساخت یوغ روتور و ج) یوغ روتور همراه با جایگزاری آهنرباها

۱۱-۲-۲- یوغ استاتور

همانطور که در بخش‌های ابتدایی پروژه بیان گردید نوع ساختار استاتور این نوع از الکتروموتورهای کاربردی در دوچرخه برقی از نوع استاتور درونی است که نقشه ساخت آن در شکل ۶-۱۱ به همراه اندازه‌های نشان داده شده است.

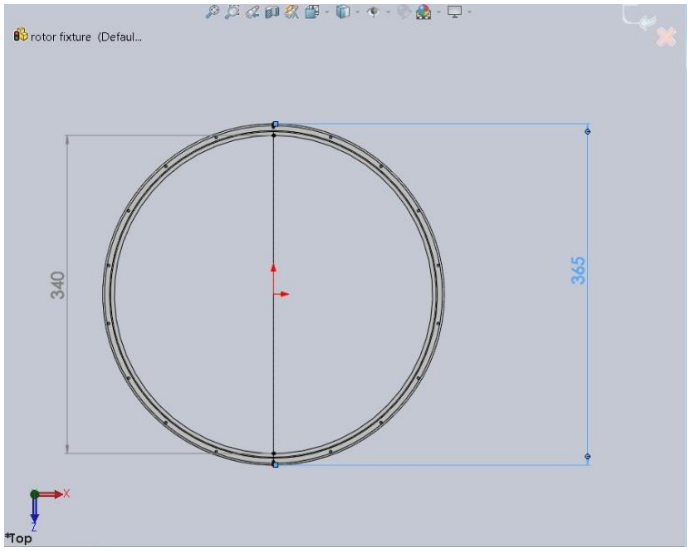


شکل ۶-۱۱: نقشه ساخت یوغ استاتور موتور **BLDC** طراحی شده

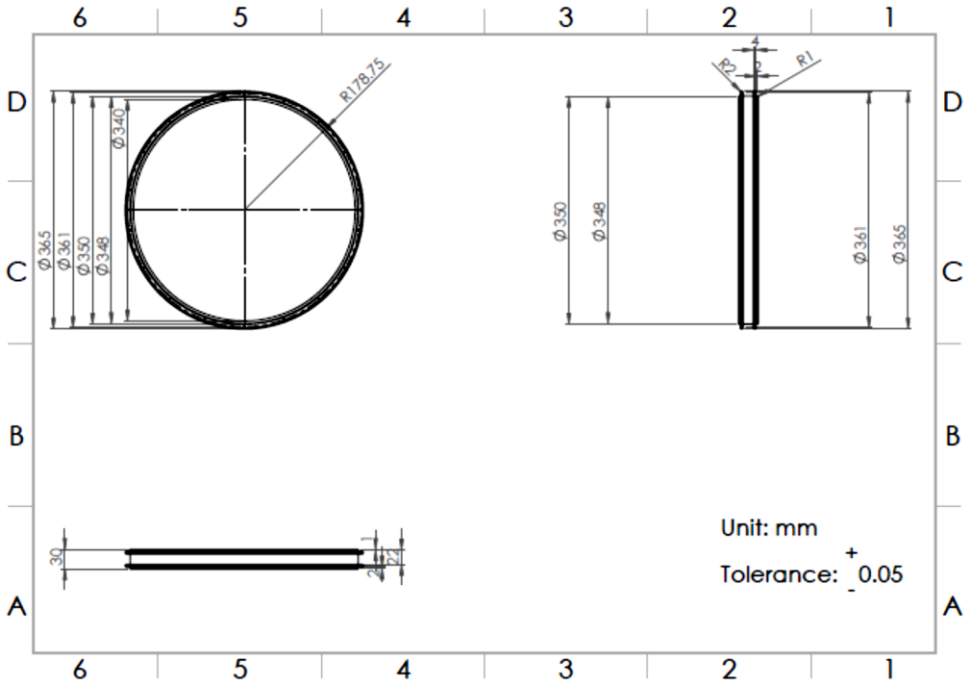
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۱۱-۲-۳- حلقه میانی

در ش حلقه میانی که یوغ روتور را در بر دارد نشان می‌دهد. این حلقه میانی دو محفظه راست و چپ موتور BLDC را بهم متصل می‌کند.



(الف)



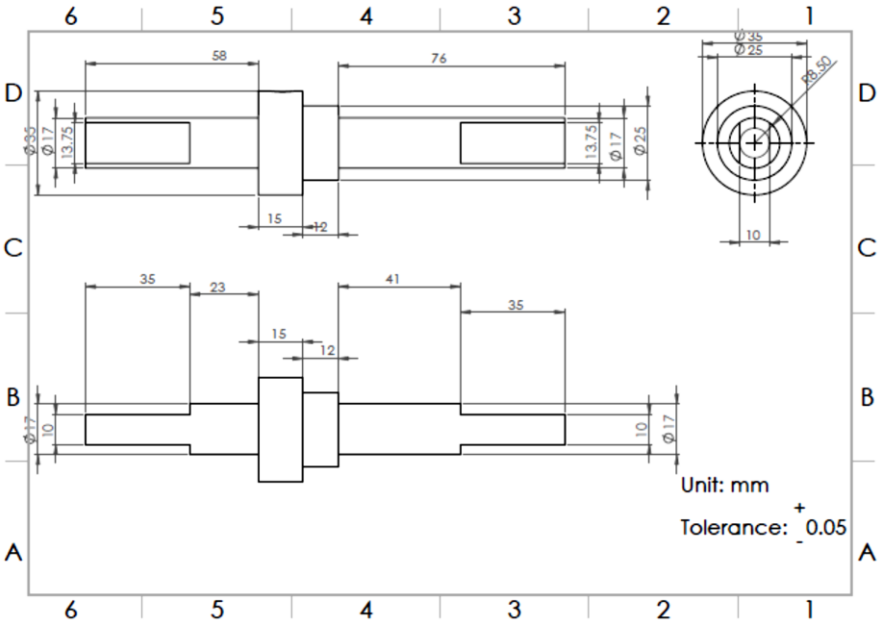
(ب)

شکل ۷-۱۱: الف) شماتیک و ب) نقشه ساخت حلقه میانی

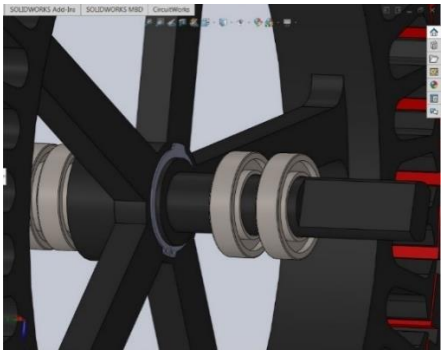
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

۱۱-۲-٤- شفت و متعلقات آن

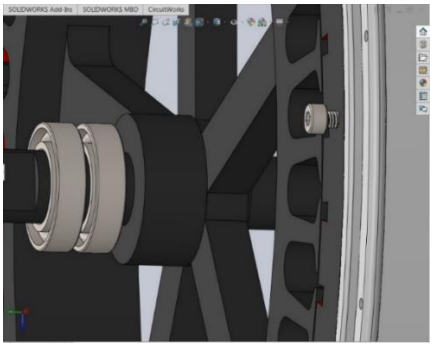
در این بخش به شماتیک شفت، محل قرارگیری بیرینگ ها بر روی شفت در دو سوی یوغ استاتور، مسیر کابل در داخل شفت و محل قرارگیری دنده بر روی شفت موتور پرداخته می‌شود.



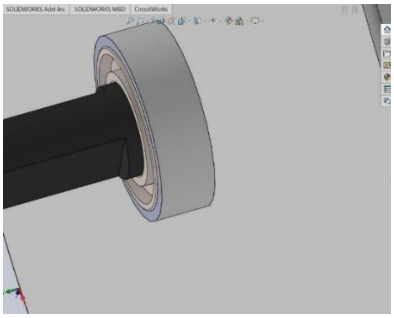
شکل ۸-۱۱: نقشه ساخت شفت الکتروموتور طراحی شده



(الف)



(ب)

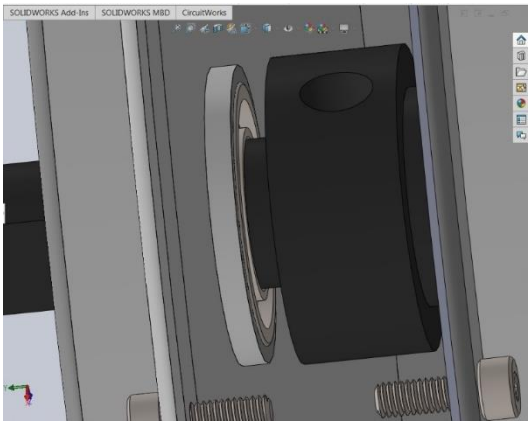


(ج)

شکل ۹-۱۱: شماتیک شفت و نحوه قرارگیری بیرینگ ها

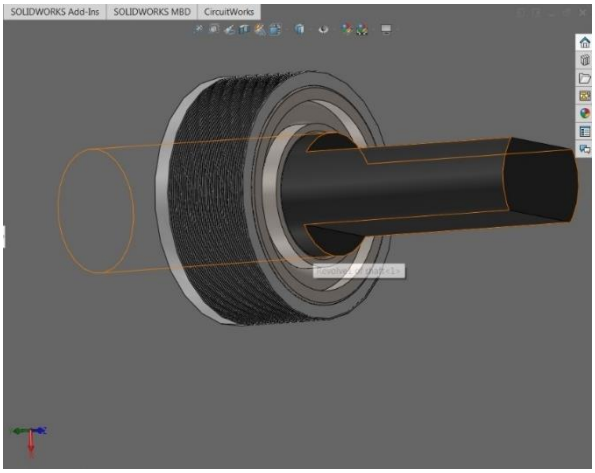
DOI: 10.30503/nripress.2020.312

شکل ۸-۱۱ نقشه ساخت شفت به همراه اندازه‌های آن را نشان می‌دهد. در ادامه شکل نحوه قرارگیری ۴ بیرینگ مورد استفاده در الکتروموتور BLDC را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹-۱۱ - الف و ب نشان داده شده است دو عدد بیرینگ در داخل الکتروموتور در دو طرف یوغ استاتور و و دو عدد بیرینگ در محل تلاقی شفت به محفظه های راست و چپ مطابق با شکل ۹-۱۱- ج قرار دارد. همچنین شکل ۱۰-۱۱ مسیر کابل در شفت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۱۱: مسیر کابل در شفت

شکل ۱۱-۱۱ نیز محل قرارگیری دنده بر روی شفت خروجی را نشان می‌دهد.

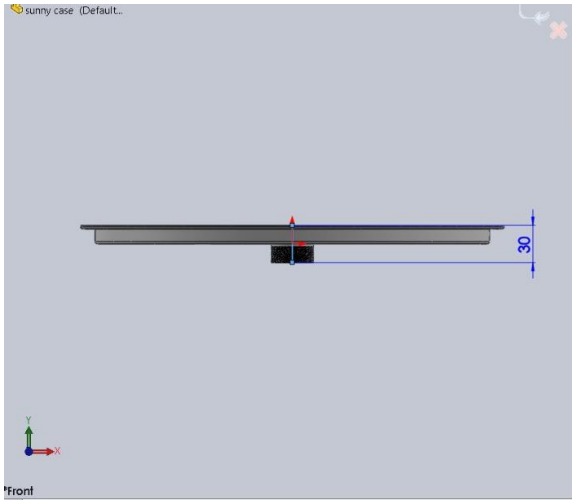


شکل ۱۱-۱۱: دنده بر روی شفت الکتروموتور **BLDC**

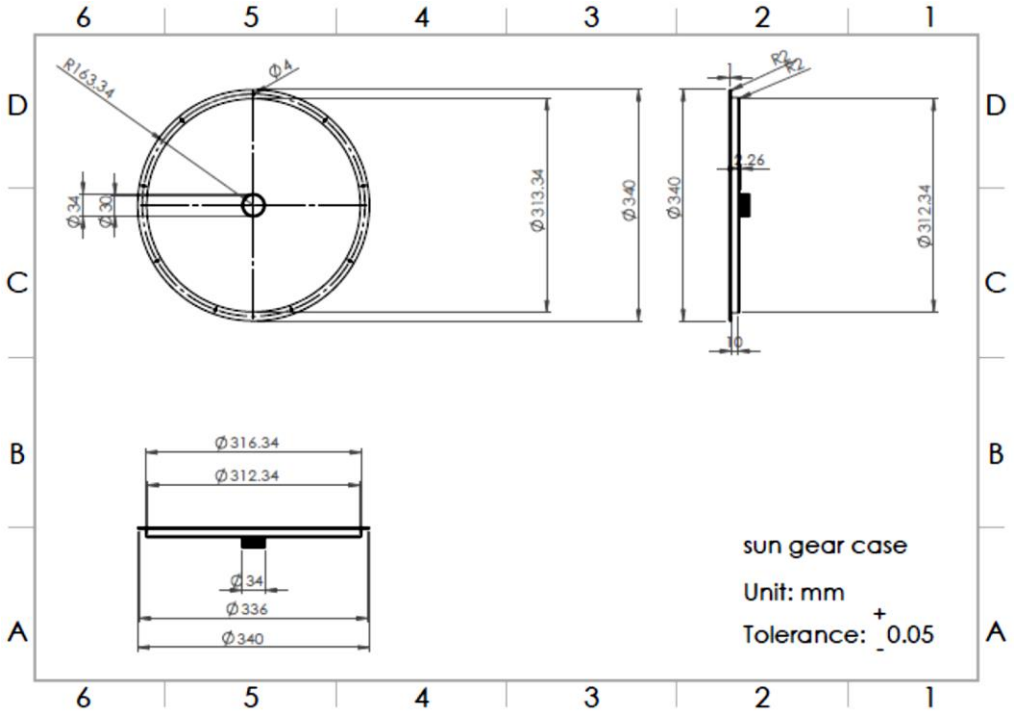
۵-۲-۱۱- محفظه نگهدارنده الکتروموتور BLDC

ساختار الکتروموتور BLDC از دو محفظه نگهدارنده راست و چپ تشکیل شده است که از دربرگیرنده روتور و استاتور و بیرینگ‌ها هستند. شکل ۱۲-۱۱ الف شماتیک و شکل ۱۲-۱۱- ب نقشه ساختار محفظه راست و شکل ۱۳-۱۱- الف شماتیک و شکل ۱۳-۱۱- ب نقشه ساختار محفظه چپ را نشان می‌دهند. اندازه های محفظه ها در نقشه‌های ساختار آن‌ها ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



(الف)



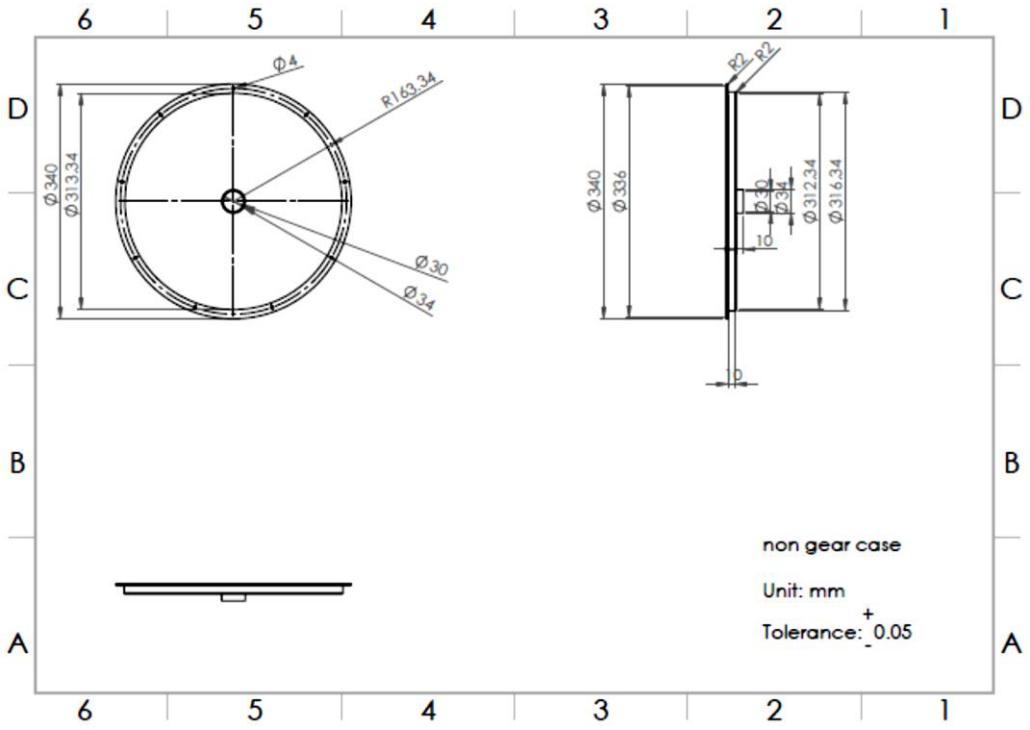
(ب)

شکل ۱۲-۱۱: الف)شماتیک و ب) نقشه ساخت محفظه راست

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



(الف)



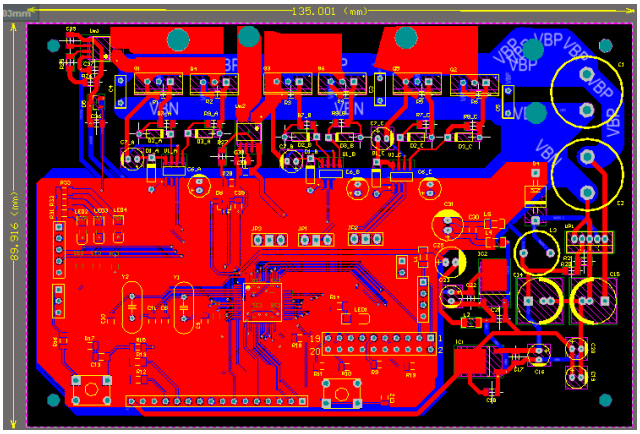
(ب)

شکل ۱۳-۱۱: الف)شماتیک و ب) نقشه ساخت محفظه چپ

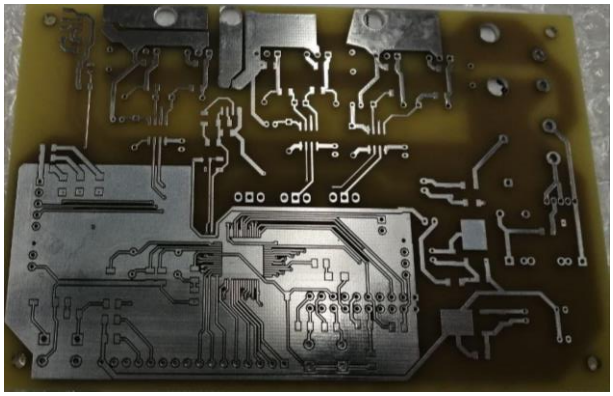
۳-۱۱- درایو

طراحی برد درایور موتور BLDC در ابعاد ۹۰×۱۳۵ میلی‌متر و به‌صورت دولایه انجام گرفته‌است. در شکل ۱۴-۱۱ تصویر PCB طراحی‌شده نشان داده شده‌است. همچنین، تصویر نمای رو و پشت برد PCB بعد از چاپ، به‌ترتیب در شکل ۱۵-۱۱ و شکل ۱۶-۱۱ قابل مشاهده‌است. درانتها، شکل ۱۷-۱۱ تصویر برد درایور موتور BLDC بعد از مونتاژ قطعات را را نشان می‌دهد

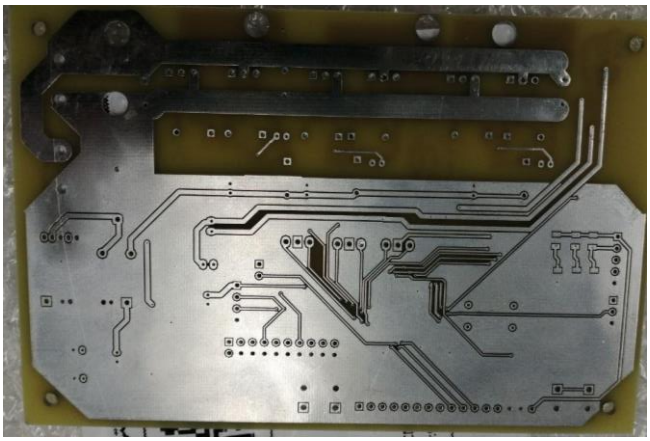
DOI: 10.30503/nripress.2020.312



شکل ۱۴-۱۱: شماتیک **PCB** طراحی شده برای مبدل موتور **BLDC**

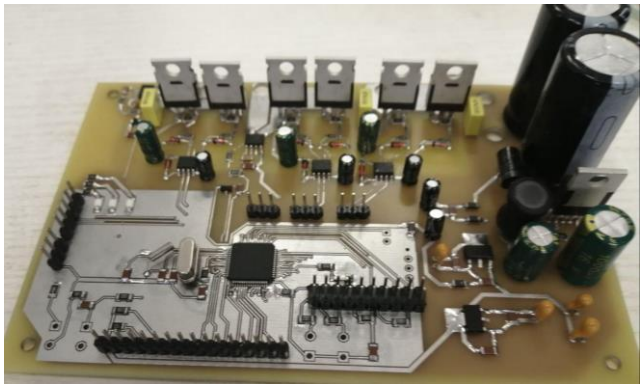


شکل ۱۵-۱۱: تصویر **PCB** چاپ شده برای مبدل موتور **BLDC** (روی برد)



شکل ۱۶-۱۱: تصویر **PCB** چاپ شده برای مبدل موتور **BLDC** (پشت برد)

DOI: 10.30503/nripress.2020.312



بعد از مونتاژ قطعات**BLDC**شکل ۱۷-۱۱: تصویر برد مبدل موتور

۱۱-٤- جمع‌بندی

در این فصل شماتیک‌ها، نقشه‌های ساخت الکتروموتور BLDC طراحی شده برای استفاده و نصب در هاب چرخ دوچرخه برقی ارائه شده است. همچنین به منظور درک بهتر از نحوه قرارگیری هر یک از اجزا این الکتروموتور نقشه انفجاری ساخت آن نیز قرار داده شده است. در ادامه نیز به طراحی برد درایو این الکتروموتور پرداخته شده و شماتیک PCB طراحی شده برای این منظور ارائه گردیده و محصول نهایی این درایو بعد از مونتاژ قطعات بر روی برد جهت بررسی آورده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مرحله اول و دوم پروژه طراحی الکتروموتور برای دوچرخه برقی، یک الکتروموتور BLDC با توان ۵۰۰ وات، با در نظر گرفتن امکان استحصال مواد اولیه در داخل کشور، با استفاده از آهنربای فریتی و ورقه‌های کربنی طراحی و تحلیل شده است. در فصل اول از این گزارش به انواع دوچرخه‌های برقی بر اساس سه معیار اساسی و مهم از قبیل کاربرد، سیستم کنترلی و موقعیت قرارگیری موتور در بدنه دوچرخه پرداخته شد و مروری بر روی تکنولوژی های موجود برای دوچرخه برقی صورت پذیرفت. در فصل دوم به معرفی اجزا الکتریکی استفاده شده در انواع دوچرخه‌های برقی با کاربردهای متفاوت و سیستم های کنترلی مختلف پرداخته شد و در ادامه آن مشخصات کلی الکتریکی لازم برای طراحی دوچرخه برقی توضیح داده شدند. علاوه بر این مشخصات، مباحث مورد نظر در طراحی از قبیل حداکثر شیب قابل پیمایش، وزن دوچرخه و مدلسازی بار دوچرخه شهری و بررسی اثر آن بر روی سرعت و شیب قابل پیمایش و در نهایت استخراج مشخصه گشتاور- سرعت دوچرخه برقی در این فصل مورد مطالعه قرار گرفتند. فصل سوم به قوانین، محدودیت‌ها، استانداردها و تست های عملکردی موتور BLDC و دوچرخه برقی در دنیا بر اساس مطالعات روز دنیا اختصاص یافته است. در ادامه روند مطالعات، فصل چهارم به امکان سنجی تامین مواد اولیه و قطعات ساخت موتور BLDC و درایو آن پرداخته شد. ابتدا ملاحضات مربوط به انتخاب هسته از جمله منحنی هیسترزیس ورق‌های فولادی لازم برای ساخت هسته الکتروموتور و تلفات کل هسته در فرکانس معین بررسی گردید و در این مطالعات آزمون‌های لازم برای بررسی ورق‌های فولاد از قبیل آزمون اپشتاین بر روی ورق های هسته توسط شرکت الکتروژن در فرکانس‌های ۵۰، ۹۰ و ۱۰۰ هرتز انجام شد که نتایج تست شامل حداکثر تلفات هسته، منحنی هیسترزیس و منحنی ضریب نفوذپذیری به ازای مقادیر مختلف چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی بوده است. در گام بعدی در این فصل به آهنرباهای موجود برای طراحی موتور BLDC دوچرخه برقی در داخل کشور یعنی آهنربای فریتی پرداخته شد. در این مطالعات انواع آهنرباهای فریتی، فرآیند ساخت آهنربای فریتی و مراکز تولید آهنربا در کشور بررسی گردیدند. همچنین به قطعات لازم جهت ساخت درایو الکتروموتور BLDC اشاره گردید و شرکت های فعال در حوزه های مختلف این ادوات معرفی گردیدند و در نهایت تست‌های دوچرخه برقی در محیط آزمایشگاه با بررسی آزمایشگاه دوچرخه برقی در پژوهشگاه نیرو ساخته شده بر اساس استاندارد EN 15149 بررسی گردید. با مطالعات موارد ذکر شده در فصل های اول تا چهارم، مشخصات فنی نهایی سیستم الکتروموتور BLDC و دوچرخه برقی تعیین گردید. بر اساس این بررسی‌ها و کاربری مد نظر و در نظر گرفتن محدودیت‌های داخل کشور برای تولید ادوات دوچرخه‌برقی مشخصات فنی نهایی به شرح زیر در فصل پنجم انتخاب گردید:

- کاربری رفت و آمد شهری
- نوع سیستم کنترلی: PDB با سنسور تراتل
- موتور Direct Drive و در هاب چرخ
- دارای آهنربا فریت در موتور BLDC
- توان ۵۰۰ وات و سرعت نامی ۲۰ کیلومتر بر ساعتو سرعت حداکثری ۳۰ کیلومتر بر ساعت
- حداکثر شیب قابل پیمایش ۴ درجه (۷ درصد) و تحمل وزن مجموع دوچرخه و بار ۱۲۰ کیلوگرم

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

فصل ششم نیز به مطالعه پارامترهای طراحی موتور BLDC به تفصیل اختصاص داده شده است. در این فصل تمرکز بر روی محدودیت‌های طراحی، تعیین ساختار به لحاظ محل قرارگیری روتور (روتور بیرونی)، بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی، الگوریتم طراحی روتور (تعیین آرایش و شکل آهنرباها بر روی روتور، تعیین تعداد قطب،تعیین ابعاد آهنربا،تعیین قطر روتور و یوغ آن)، طراحی استاتور (تعداد فاز استاتور، قطر بیرونی استاتور، محاسبه یوغ استاتور، شکل شیارهای استاتور،ابعاد شیارها، سیم پیچی استاتور) می‌باشد. به دنبال توضیح و تشریح الگوریتم طراحی الکتروموتور BLDC، بر اساس مفروضات اولیه و تعیین شده، در فصل هفتم روند و محاسبات طراحی اولیه الکتروموتور BLDC ارائه گردید و توسط شبیه‌سازی توسط نرم افزار Ansys Maxwell، از منظر ولتاژ القایی، بررسی چگالی شار در آهنربا و فاصله هوایی، بررسی گشتاور دندانه‌ای، شبیه‌سازی در حالت بار کامل بررسی گردید. با توجه به فرضیات و محدودیت‌های طراحی اولیه موتور، تنها تعداد محدودی از پارامترهای موتور از قبیل ابعاد شیار برای گشتاور دندانه‌ای، نسبت کمان قطب به گام قطب (۰.۶۶، ۰.۸ و ۰.۹۷) را می‌توان بهینه نمود و با استفاده از شیفت فاز مناسب می‌توان به توان مطلوب دست یافت. در نهایت یک طرح به عنوان طرح بهینه انتخاب شده است.

ابعاد موتور نهایی بهینه شده در جدول ۸-۷ آورده شده است. همچنین توسط نرم‌افزار Motor-CAD تحلیل رفتار حرارتی اجزا مختلف موتور در سه حالت عملکردی مختلف پیوسته، کوتاه مدت و متناوب مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرحله سوم به منظور بررسی و تایید صحت طرح بهینه، الکتروموتور طراحی شده در یک نرم افزار تحلیل مغناطیسی دیگر مدلسازی و تحلیل شده است. نرم افزار JMAG Designer برای این منظور استفاده شد ه است. از این نرم‌افزار برای بررسی و شبیه‌سازی عملکرد طرح بهینه در حالت های بی‌باری،تحت بار و حالت گذرا استفاده شده و هر یک به تفضیل در فصل هشتم شرح داده شده اند. در این تحلیل مشخص شده است که در طراحی اولیه برخی پارامترها همچون دمای آهنربا در نظر گرفته نشده است که این امر موجب کاهش گشتاور تولیدی و در نتیجه توان خروجی الکتروموتور می‌شود. با تغییراتی در آهنربا از قبیل گرید از Y30 به Y35، کاهش عرض آهنربا از ۱۲ به ۱۰ میلیمتر مجدد تمام شبیه‌سازی‌ها انجام شد تا تأثیر آن بر توان خروجی و بازده الکتروموتور بررسی شود و بهبود بخشد که علی رغم این تغییر همچنان کمتر از مقادیر تعیین شده است. همچنین با توجه به مقدار جریان حداکثر ۳۳ آمپر برای الکتروموتور، دستیابی به توان ۵۰۰ وات در جریان کمتر از این مقدار امکان پذیر نمی¬باشد. با تعیین مشخصات فنی کلی سیستم و دوچرخه‌برقی، در گام بعدی مدلسازی موتور BLDC و درایو آن جهت طراحی و بررسی مورد نیاز است. از این رو در فصل نهم به اصول عملکردی الکتروموتورهای BLDC، مشخصه های اصلی آن (گشتاور- سرعت)، روابط حاکم بر موتور BLDC، مدار معادل و معادلات حاکم بر موتور BLDC، اینورتر مورد استفاده در درایو و روش‌های کنترل موتور BLDC به خصوص در کاربرد دوچرخه برقی پرداخته شده است در ادامه فصل نیز به طراحی درایو موتور در کاربرد دوچرخه الکتریکی (طراحی اینورتر، گیت درایور برای مبدل، مدار تغذیه، مدار سنسور جریان و میکروکنترلر انتخابی برای این منظور) پرداخته شده است.

پیرو جلسات برگذار شده و مکاتبات صورت گرفته با مرکز خودرو برقی در نهایت با توجه به محدودیت درایو و جریان باتری، با افزایش قطر خارجی و طول محوری چندین طرح مختلف با توان ۵۰۰ وات و منبع ولتاژ ۴۸ ولت و یک طرح با توان ۲۵۰ وات، منبع ولتاژ ۳۶ ولت ارائه شده است. فصل دهم از این گزارش به این طراحی ها و رفتار هر یک در حالت بی باری و تحت بار اختصاص یافته و بررسی شده اند و در نهایت طرح شماره ۱ از بین این ۶ طراحی

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدید به عنوان طرح معقول و دارای بازده مناسب معرفی گردید. در نهایت در فصل یازدهم، نقشه‌های ساخت موتور BLDC طراحی شده و PCB درایو آن ارائه گردیده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

پیوست ۱

دوچرخه‌های موجود در بازار ایران

مشخصات کلی و فنی برخی از دوچرخه‌های خارجی موجود در ایران به شرح زیر است:

۱- دوچرخه برقی نسل سوم آگونا



شکل ۱-۱۲: دوچرخه برقی نسل سوم آگونا **AGONA Grizzly**[۱۰۴]

جدول ۱-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی نسل سوم آگونا

دوچرخه شارژی نسل سوم آگونا	– مناسب برای مسیرهای کوهستانی – دارای ترمز هیدرولیکی و دیسکی – باتری روی ستون وسط دوچرخه – موتور در هاب چرخ عقب – مجهز به تراتل، در صورت نیاز بدون رکاب زدن بتوان به مقصد رسید – قابلیت نمایش سرعت، مقدار باقیمانده توان باتری، حداکثر مسیر طی شده و کنترل توان موتور – سواری راحت در شیب تند، مسیر شنی – دارای باتری ۱۶٫۶ آمپر ساخت شرکت پاناسونیک ژاپن – قدرت موتور ۵۰۰ وات – تحمل وزن ۸۰ تا ۱۲۰ کیلوگرم – حداکثر سرعت ۳۴ کیلومتر بر ساعت – پیمایش حداقل ۶۰ کیلومتر با یک‌بار شارژ – حداقل زمان شارژ ۵ الی ۵ ساعت

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

	– جنس بدنه از آلومینیوم ۶۰۶۱ – سایز چرخ ۲۶-اینچ – دارای ۸ دنده

۲- دوچرخه برقی آگونا پاترول



شکل ۲-۱۲: دوچرخه برقی آگونا **AGONA Patrol**[۱۰۴]

جدول ۲-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی آگونا پاترول

دوچرخه شارژی آگونا پاترول	– مناسب برای مسیرهای کوهستانی و ناهموار و همچنین در مسیرهای شهری – دارای ترمز دیسکی و مکانیکی – سواری راحت در شیب – جنس بدنه از آلومینیوم ۶۰۶۱ – موتور در هاب چرخ عقب – قابلیت نمایش سرعت، مقدار باقیمانده توان باتری، حداکثر مسیر طی‌شده و کنترل توان موتور – دارای پورت usb که در صورت نیاز می‌توان از برق ذخیره شده در باتری دوچرخه استفاده کرد. – حداکثر سرعت ۳۴ کیلومتر بر ساعت – قدرت موتور ۳۵۰ وات

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

	– دارای باتری ۱۱٫۶ آمپرساعت، ساخت شرکت پاناسونیک ژاپن – پیمایش حداقل ۶۰ کیلومتر با یک‌بار شارژ – حداقل زمان شارژ ۴ الی ۵ ساعت – تحمل وزن ۸۰ الی ۱۲۰ کیلوگرم

۳- دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس (Flash Deluxe)



شکل ۳-۱۲: دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس [۱۰۵]

جدول ۳-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس

دوچرخه برقی ولتاسیتی فلش دی لوکس	– قدرت موتور ۳۵۰ وات توربو (BLDC)، معادل ۵۰۰ وات با کاربری بالا در سربالایی‌ها – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم- یونی پاناسونیک ۱۰ آمپرساعت، ولتاژ ۳۶ ولت – پیمایش ۵۵ تا ۸۰ کیلومتر با هر بار شارژ ۴-تا ۵ ساعته- بسته به شیب، وزن، نحوه‌ی مدیریت انرژی در حالت PAS و استفاده از نیروی ماهیچه‌ها – حداکثر سرعت ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

	– ترمز دیسکی – تایر ۲۶ اینچ عاج دار – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – وزن ۲۱ کیلوگرم – تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – مجهز به ۳ دنده در جلو و ۷ دنده در عقب – سیستم PAS ۵ حالته – سنسور پدال و سنسور تراتل – دارای نمایشگر – قفل ضد سرقت برای باتری

۴- دوچرخه برقی شهری سبک AMP2001



شکل ۴-۱۲: دوچرخه شهری سبک [۱۰۶]

جدول ۴-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری سبک **AMP2001**

دوچرخه برقی شهری سبک	– قدرت موتور ۲۰۰ وات

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

AMP2001	– موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم- یونی ۷٫۸ آمپرساعت، ۲۴ ولت سامسونگ – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LED با امکان نمایش میزان شارژ باتری و تنظیم سرعت – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – ۴۵ کیلومتر با یک‌بار شارژ – تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ با سایز ۲۸ اینچ – جنس بدنه از آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، لقمه‌ای/ لقمه‌ای – تک دنده

۵- دوچرخه برقی کلاسیک-AMP6006



شکل ۵-۱۲: دوچرخه برقی **AMP6006**[۱۰۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۵-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی کلاسیک-**AMP6006**

دوچرخه برقی کلاسیک-AMP6006	– قدرت موتور ۲۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۱٫۶ آمپرساعت، ۳۶ ولت پاناسونیک – مدت شارژ ۳ الی ۴ ساعت – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LCD با امکان نمایش سرعت و مقدار پیمایش و میزان شارژ – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – پیمایش حداکثر ۶۵ کیلومتر با یک‌بار شارژ – حداکثر تحمل وزن ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۸ اینچ – وزن دوچرخه ۲۴ کیلوگرم – بدنه آلومینیوم – ترمز جلو/عقب، دیسکی/لقمه‌ای – دنده جلو /عقب، تک/ هفت

۶- دوچرخه شهری مدرن- AMP5003



شکل ۶-۱۲: دوچرخه مدل **AMP5003**[۱۰۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۶-۱۲: مشخصات دوچرخه شهری مدرن- **AMP5003**

دوچرخه شهری مدرن- AMP5003	– قدرت موتور ۳۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۱٫۶ آمپرساعت، ۳۶ ولت پاناسونیک – مدت شارژ ۳ الی ۴ ساعت – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LCD با امکان نمایش سرعت و مقدار پیمایش و میزان شارژ – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – حداکثر پیمایش ۶۵ کیلومتر با یک‌بار شارژ – تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۶ اینچ – وزن دوچرخه ۲۴ کیلوگرم – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، دیسکی/دیسکی دنده جلو/عقب، تک/هفت

۷- دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5002



شکل ۷-۱۲: دوچرخه برقی **AMP5002**[۱۰۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۷-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری اسپورت – **AMP5002**

دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5002	– قدرت موتور ۳۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۱٫۶ آمپرساعت ۳۶ ولت پاناسونیک – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LCD با امکان نمایش سرعت و مقدار پیمایش و میزان شارژ – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – پیمایش حداکثر ۶۵ کیلومتر با یک‌بار شارژ – حداکثر تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۶ اینچ – وزن دوچرخه ۲۴ کیلوگرم – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، دیسکی/دیسکی – تعداد دنده جلو/عقب، تک/هفت

۸- دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5001



شکل ۸-۱۲: دوچرخه برقی **AMP5001**[۱۰۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۸-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری اسپورت – **AMP5001**

دوچرخه برقی شهری اسپورت – AMP5001	– قدرت موتور ۲۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۰٫۴ آمپرساعت، ۳۶ ولت سانیو – مدت شارژ ۳ الی ۴ ساعت – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LED با امکان نمایش میزان شارژ باتری و تنظیم سرعت – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – پیمایش حداکثر ۶۰ کیلومتر با یک‌بار شارژ – حداکثر تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۶ اینچ – وزن دوچرخه ۲۴ کیلوگرم – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، دیسکی/ دیسکی – تعداد دنده جلو/عقب، تک/هفت

۹- دوچرخه برقی شهری مدرن – AMP6004



شکل ۹-۱۲: دوچرخه برقی **AMP6004**[۱۰۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

جدول ۹-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری مدرن – **AMP6004**

دوچرخه برقی شهری مدرن – AMP6004	– قدرت موتور ۳۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۰٫۴ آمپرساعت، ۳۶ ولت سانیو – مدت شارژ ۳ الی ۴ ساعت – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LED با امکان نمایش میزان شارژ باتری و تنظیم سرعت – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – پیمایش ۶۰ کیلومتر با یک‌بار شارژ – تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۶ اینچ – وزن ۲۴ کیلوگرم – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، لقمه‌ای/ لقمه‌ای – تعداد دنده جلو/عقب، تک/هفت

۱۰- دوچرخه برقی شهری - AMP6001



DOI: 10.30503/nripress.2020.312

AMP6001[۱۰۶]شکل ۱۰-۱۲: دوچرخه برقی

جدول ۱۰-۱۲: مشخصات دوچرخه برقی شهری مدرن - **AMP6001**

دوچرخه برقی شهری مدرن - AMP6001	– قدرت موتور ۳۵۰ وات – موتور در هاب چرخ عقب – باتری لیتیوم یونی ۱۱٫۶ آمپرساعت، ۳۶ ولت پاناسونیک – مدت شارژ ۳ الی ۴ ساعت – کنترل‌کننده هوشمند با سیستم کنترل سرعت – نمایشگر LCD با امکان نمایش سرعت و مقدار پیمایش و میزان شارژ – حداکثر سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت – پیمایش حداکثر ۶۵ کیلومتر با یک‌بار شارژ – تحمل وزن تا ۱۲۰ کیلوگرم – چرخ ۲۶ اینچ – وزن دوچرخه ۲۴ کیلوگرم – جنس بدنه آلومینیوم ۶۰۶۱ – ترمز جلو/عقب، دیسکی/ دیسکی – تعداد دنده جلو/عقب، تک/ هفت

مراجع

[1] B. Upadhya, R. Altoumaimi, and T. Altoumaimi, "Characteristics and Control of the Motor System in E-bikes," ed, 2014.
[2] https://www.cyclist.co.uk/in-depth/2683/introduction-to-electric-bikes-everything-you-need-to-know. (accessed.
[3] https://www.rutlandcycling.com/pages/e-bike-buying-guide/types-of-e-bike.aspx.
[4] https://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycle-types.html. (accessed.
[5] https://electricbikeblog.com/types-electric-bikes/.
[6] https://www.electricbike.com/commuter/. (accessed.
[7] V. Francis, "Electric Bicycles : A Guide to the Market."
[8] https://turbobobbicycleblog.wordpress.com/2013/11/21/e-bike-control-systems-which-is-best-for-you/. (accessed.
[9] A. Matasyan, "Technical analysis and market study of electric bicycles," Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
[10] "Chair of Mechanosystem Components ELECTRIC BICYCLE FRAME DESIGN AND," 2015.
[11] B. Y. A. Muetze and Y. C. Tan, "ELECTRIC BICYCLES," 2007.
[12] https://en.wikipedia.org/wiki/Pedelec. (accessed.
[13] https://www.electric-bicycle-guide.com/pedelec.html. (accessed.
[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_bicycle_laws. (accessed.
[15] https://www.pedelecs.co.uk/guides/s-pedelec/. (accessed.
[16] https://support.juicedbikes.com/hc/en-us/articles/360019805091-What-are-the-Assist-Levels-. (accessed.
[17] https://electricbikereport.com/electric-bike-throttle-pedal-assist-pedelec/. (accessed.
[18] https://electrek.co/2018/06/07/electric-bicycle-hub-motors-vs-mid-drive/. (accessed.
[19] https://electricbikereport.com/electric-bike-direct-drive-geared-hub-motors/. (accessed.
[20] https://support.juicedbikes.com/hc/en-us/articles/360015540791. (accessed.
[21] https://www.pandaebikes.com/what-is-a-hall-sensor/.
[22] https://electricbike.com/forum/forum/kits/golden-motor-magic-pie/70584-guide-to-hall-sensor-throttle-operation-testing-and-modification. (accessed.
[23] https://blog.e-bikerig.com/2015/11/17/electric-bike-throttle-control-pedal-assist/. (accessed.
[24] http://www.ebikeschool.com/type-electric-bicycle-throttle-best/. (accessed.
[25] https://www.electric-bicycle-guide.com/ebike-controller.html. (accessed.
[26] https://www.electricbike.com/electricbikespeed/. (accessed.
[27] O. Trescases, S. O. Loughlin, and W. T. Ng, "A Smart Motor Controller for E-bike Applications 1.0," pp. 16-19, 2003.
[28] https://www.electricbike.com/regenerative-brakes/. (accessed.
[29] P. Benjamin, "“Should My E-Bike Have Regenerative Braking?”."
[30] https://ebikebc.com/faq-items/parameters-like-torque-nm-power-w-watt-vvolt-ah-ampere-hour-wh-watt-hour-mean-affect-performance-electric-bikes/. (accessed.
[31] https://electricbike-blog.com/2015/09/09/how-much-power-really-is-enough-for-your-build/. (accessed.
[32] I. Press, *Electric bicycles*.
[33] http://www.ebikeschool.com/myth-ebike-wattage/. (accessed.
[34] http://www.ebikeschool.com/much-power-electric-bicycle-need/. (accessed.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

[35] https://en.wikipedia.org/wiki/Slope. (accessed.
[36] https://www.alke.com/electric-vans-calculate-slope. (accessed.
[37] http://www.ebikedirect.com/x-treme-scooters-catalina-48v-500w-lithium-ion-beach-cruiser-electric-bike/. (accessed.
[38] https://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycle-weight.html. (accessed.
[39] T. Chan, L.-T. Yan, and S.-Y. Fang, "In-wheel permanent-magnet brushless DC motor drive for an electric bicycle," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 17, no. 2, pp. 229-233, 2002.
[40] Vincent Chabroux, Caroline Barelle, and D. Favier, "Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage," *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 28, pp. 317-323, 2012.
[41] Annette Muetze and Y. C.Tan. (2007) Electric bicycles, a performance evaluation. *IEEE Industry Applications Magazine*.
[42] E. Starschich and A. Muetze, "Comparison of the performances of different geared brushless-DC motor drives for electric bicycles," in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, vol. 1: IEEE, pp. 140-147.
[43] https://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycle-laws.html. (accessed.
[44] "Cycles — Electrically power assisted cycles — EPAC Bicycles," 2011.
[45] !!! INVALID CITATION !!! [65-68].
[46] B. S. En, "City and trekking bicycles — Safety requirements and test methods," vol. 3, no. 1, 2005.
[47] https://levaperformancestandards.wordpress.com/about-leva/. (accessed.
[48] https://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bike-performance-standardization.html. (accessed.
[49] https://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycles-testing-labs.html. (accessed.
[50] https://levaperformancestandards.wordpress.com/category/news/. (accessed.
[51] ب. م. ع. د. ف. د. بریمی, "تشریح تست‌های استاندارد برای ساخت و بهره‌برداری از موتورهای BLDC,"دومین کنفرانس ملی توسعه دانش بنیان صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و ششمین کنفرانس روز مهندسی پتروشیمی بندر امام, اسفند ۱۳۹۳.
[52] ن. خ. (ساپکو), "اصول و کاربردهای حسگر اثرهال," اردیبهشت ۱۳۹۶.
[53] *NEMA Standard Publication MG1*, N. MG1, 2009.
[54] *Test Procedures for Direct-Current Machines*, I. Guide.
[55] *SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR REFERENCE DESIGN, Rev. 0.2*, S. Laboratories, 2006.
[56] A. Muetze and Y. Tan, "Performance evaluation of electric bicycles," in *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, 2005, vol. 4: IEEE, pp. 2865-2872.
[57] *IEC 60404-2 Magnetic materials*, T. I. E. C. (IEC), 2008.
[58] P. E. E. i. c. William H. Yeadon, Alan W. Yeadon, P.E. Associate Editor, *HANDBOOK OF SMALL ELECTRIC MOTORS*.
[59] D. Patterson and R. Spee, "The design and development of an axial flux permanent magnet brushless DC motor for wheel drive in a solar powered vehicle," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1054-1061, 1995.
[60] B. S. Jae Gu Yoo, M.S., "Actuator Performance Envelope Through Nonlinear Test Bed," *The University of Texas at Austin*, 2004.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

[61] J. Konecny, M. Pies, and M. Latocha, "Developing of an E – Bike Testing Station and Measuring of Efficiency of E – Bikes," vol. I, pp. 23-25, 2013.
[62] "BS EN 15194 : 2017 BSI Standards Publication Cycles - Electrically power assisted cycles - EPAC Bicycles," 2017.
[63] http://www.fuji-ta.com/e-bike-electrical-system-laboratory-introductio. (accessed.
[64] P. By, "Automotive Vehicles - Starting Gradeability - Method of Measurement and Requirements ∝," no. 3, 2002.
[65] A. M. K. a. e. a. Ch.Chiang, "Effects of Annealing on Magnetic Properties of Electrical Steel and Performances of SRM After Punching," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 50, no. 11, November 2014.
[66] ح. ل. و. م. ص. راد, طراحی ماشین های الکتریکی. تهران: انتشارات دانش و فن, ۱۳۹۵.
[67] *Cold rolled electrical non-alloy and alloy steel sheet and strip delivered in the semi-processed state*, E. s. (EN), 2006.
[68] S. magnetics. "The flow chart of ferrite magnets." https://www.magnet-sdm.com/2017/06/23/1186/ (accessed.
[69] Prizzttech. "Magnetizing and Quality Control of Permanent Magnets." Prizztech. http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID183.pdf (accessed.
[70] https://www.nasicoelec.ir/store/parts-ecu/product/183-b59233. (accessed.
[71] https://www.sakhtafzarmag.com/%D9%BE%D8%B1%D8%AF%D8%A7%D8%B2%D9%86%D8%AF%D9%87-%D9%85%D8%B1%DA%A9%D8%B2%DB%8C/9869/ic-%DA%86%DB%8C%D8%B3%D8%AA%D8%9F. (accessed.
[72] http://www.karapcb.com/fa/products/pcb.html. (accessed.
[73] http://www.alfamadarsanat.com/fa/Menu/%D8%AA%D9%88%D8%A7%D9%86%D8%A7%DB%8C%DB%8C%20%D9%87%D8%A7. (accessed.
[74] https://www.jeciran.com/about. (accessed.
[75] http://www.karapcb.com/fa/products.html. (accessed.
[76] http://deltamadar.com/views/pages-view.php?id=1. (accessed.
[77] http://www.etagco.com/about-us. (accessed.
[78] ا. حلوایی-نیاسر. کنترل موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک. (۱۳۹۳). دانشگاه کاشان
[79] ا. حلوایی, "مروری بر روش‌های تحلیل، کنترل، پیاده‌سازی و ارزیابی محرکه‌های موتورهای DCبدون جاروبک," نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی, سال پنجم،شماره دوم،تابستان ۱۳۹۴.
[80] ا. حلوایی, "درایو موتورهای DC بدون جاروبک "(BLDC), دانشگاه کاشان.
[81] T. J. E. M. J.R Hendershot, *Design of brushless permanent-magnet machines*. Florida, USA: Motor design books LLC, 2010.
[82] C.-l. Xia, *Permanent magnet brushless DC motor Drives and controls*. Tianjin University, P.R. China: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2012.
[83] ح. ل. م. ص. راد, طراحی ماشین های الکتریکی. تهران: انتشارات دانش و فن, ۱۳۹۵.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

[84] N. Ç. AN, "Design of an outer-rotor brushless DC motor for control moment gyroscope applications," MSc., The graduate school of natural and applied sciences - Middle east technical university, Ankara, Turkey, 2015.
[85] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Lebanon,Ohio, US: Magna Physics publishing, 2006.
[86] T. A. L. B.Kim, "Operation and Design Principles of a PM Vernier Motor," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS,* vol. 50, no. 6, 2014.
[87] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Blacksburg, Virginia, U.S.A.: CRC press, Taylor & Francis Group, 2010.
[88] ح. ل. ع. ج. زالی, سیم پیچی ماشین های الکتریکی. تهران: انتشارات دانش و فن, ۱۳۹۳.
[89] K. T. Chau, *Electric vehicles machines and drives. Design, analysis and applications*

Singapore: John Wiley and Sons, 2015.
[90] D. L. T A. Lipo, R. Qu , et.al, "Design Procedure of Dual-Stator Spoke-Array Vernier Permanent-Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 51, no. 4, 2015.
[91] D. H. Z.Q.Zhu, E.Bolte, B.Ackermann "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 29, no. 1, 1993.
[92] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, and B. James, *Electric machinery*. McGraw-Hill New York, 2003.
[93] O. Ustun, G. Tanc, O. Kivanc, and G. Tosun, "In pursuit of proper BLDC motor design for electric bicycles," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016: IEEE, pp. 1808-1814.
[94] S. Bhat, S. P. Nikam, and B. Fernandes, "Design and analysis of ferrite based permanent magnet motor for electric assist bicycle," in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2014: IEEE, pp. 106-111.
[95] D. C. Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective, 2003.
[96] "Design of synchronous machines." VTU Learning (accessed.
[97] A. Hartman and W. Lorimer, "Cogging torque control in brushless dc motors," *Incremental Motion Control Syst. And Devies, 29Th Annu. Syrup. Proc,* pp. 237-243, 2000.
[98] M. Pourjafari and E. Fallah Choolabi, "Optimum Design of BrushLess DC Motor with Minimum Torque Pulsation using FEM & PSO," *AUT Journal of Electrical Engineering,* vol. 44, no. 2, pp. 59-70, 2012.
[99] K. Chau, *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*. John Wiley & Sons, 2015.
[100] R. Krishnan, *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC press, 2009.
[101] E. S. Hamdi, *Design of small electrical machines*. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
[102] J. Lee, J. Kim, and B. Woo, "Optimal design of in-wheel motor for an E-bike," in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2016: IEEE, pp. 441-443.
[103] M. S. Mohd and M. Karsiti, "Effect of phase advance on the brushless dc motor torque speed respond," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 100, no. 1: IOP Publishing, p. 012004.

DOI: 10.30503/nripress.2020.312

[104] https://piltanshop.com/72-%D8%AF%D9%88%DA%86%D8%B1%D8%AE%D9%87-%D8%A8%D8%B1%D9%82%DB%8C. (accessed.
[105] http://electricscooter.ir/shop/electric-bicycle/%D8%AF%D9%88%DA%86%D8%B1%D8%AE%D9%87-%D8%A8%D8%B1%D9%82%DB%8C-%D9%85%D8%AF%D9%84-%D9%81%D9%84%D8%B4-%D8%AF%DB%8C%D9%84%D9%88%DA%A9%D8%B3/. (accessed.
[106] http://arvandmotorpak.ir/cats/9048/%D8%AF%D9%88%DA%86%D8%B1%D8%AE%D9%87-%D8%A8%D8%B1%D9%82%DB%8C. (accessed.