





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی و طراحی موتور PM به‌عنوان جایگزین

موتور القایی تک‌فاز کم‌بهره کولر آبی

دانشجو:

میلاذ نظامی وطن‌دوست

استاد راهنما:

احمد دارابی

استاد مشاور:

احمد مددی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی برای من حامیان و
همراهان دلسوز و مهربانی بوده‌اند و با فداکاری ایشان مسیر زندگی را
برایم هموار ساخته‌اند.

تقدیر و سپاس

پس از حمد و سپاس خداوند مهربان بر خود لازم می دانم از تلاش های

بی دریغ و راهمائی ارزنده استاد ارجمند دکتر احمد دارابی سپاسگزاری

نمایم؛ همچنین از زحمات استاد مشاور محترم جناب مهندس احمد مددی

که بنده را در پیشبرد هر چه بهتر پایان نامه یاری کرده اند کمال تشکر را

دارم.

تعهد نامه

اینجانب میلاد نظامی وطن دوست دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت دانشکده مهندسی برق و ریاتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی و طراحی موتور PM به‌عنوان جایگزین موتور القایی تکفاز کم‌بهره کولر آبی تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود» و یا « Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور ایران استفاده از وسایل سرمازا امری اجتناب‌ناپذیر کرده است. بیش از ۵۰ درصد مصرف‌کنندگان خانگی از کولرهای آبی برای خنک‌سازی منازل خود استفاده می‌کنند. با توجه به بازده پایین موتور الکتریکی محرک این نوع کولرها و تعداد زیاد مصرف‌کنندگان آن، تغییر ساختار موتور الکتریکی و افزایش بازده آن امری حیاتی است. موتورهای AFPM به دلیل داشتن ویژگی عملکردی مناسب مانند بازده و چگالی توان بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای موتورهای القایی مورد استفاده در کولرهای آبی باشند. به دلیل استفاده از مواد مغناطیس دائم و ادوات الکترونیک قدرت در این نوع موتورها، هزینه ساخت کولرهای آبی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی در اجرایی بودن هر طرحی، هزینه اولیه و سود به‌دست‌آمده از آن می‌باشد، در این پایان‌نامه سعی شده است که روش‌های بازگشت سرمایه اولیه برای جایگزینی موتور AFPM با موتور القایی مورد استفاده در کولرهای آبی معرفی شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این زمینه چهار روش بازگشت سرمایه اولیه معرفی شده است که به شرح زیر می‌باشد:

۱- کاهش اوج بار ایجاد شده توسط هر خانوار، ۲- کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، ۳- کاهش کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار و ۴- افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان

سپس میزان افزایش هزینه اولیه ساخت کولر آبی به دلیل استفاده از موتورهای AFPM و میزان بازگشت سرمایه اولیه توسط هر یک از چهار روش معرفی شده محاسبه می‌گردد که تفاضل این دو، سود حاصل می‌باشد. حداکثرسازی سود به‌دست‌آمده به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در طراحی یک موتور AFPM لحاظ می‌شود تا بدین صورت سود به‌دست‌آمده از این جایگزینی به حداکثر مقدار خود برسد. با محاسبه سود به‌دست‌آمده از این چهار روش، ملاحظه می‌شود که در انتهای هر سال سود قابل توجهی برای خانوارهایی

که کولرهای آبی مرسوم خود را با کولرهای آبی بهبودیافته جایگزین کرده‌اند بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: کولر آبی، آهنربای دائم، موتور آهنربای دائم شار محوری، سود، بازده

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- پیکربندی پایان نامه	۲
۳-۱- کولرهای آبی	۳
۴-۱- ساختار موتورهای AFPM	۴
۲- فصل دوم: کولرهای آبی	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- کولر آبی	۱۰
۱-۲-۲- ساختمان کولرهای آبی	۱۱
۱-۱-۲-۲- موتور الکتریکی	۱۱
۲-۱-۲-۲- بدنه	۱۴
۳-۱-۲-۲- بادبزن	۱۴
۴-۱-۲-۲- پولی یا فلکه	۱۴
۵-۱-۲-۲- یاتاقان	۱۴
۶-۱-۲-۲- پمپ آب (واترپمپ)	۱۵
۷-۱-۲-۲- شناور	۱۵
۳-۲- بررسی شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارا می باشند	۱۵
۳- فصل سوم: موتور آهنربای دائم شار محوری	۲۳
۱-۳- مقدمه	۲۴

۲۴	ویژگی عملکردی موتور جایگزین.....	۲-۳
۲۶	موتورهای آهنربای دائم شار محوری.....	۳-۳
۲۷	معادلات اندازه ماشین AFPM.....	۴-۳
۲۷	معادلات اندازه ماشین AFPM بدون شیار.....	۱-۴-۳
۳۲	معادلات اندازه ماشین AFPM بدون هسته.....	۲-۴-۳
۳۲	معادلات اندازه ماشین AFPM شیار دار.....	۳-۴-۳
۳۵	الگوریتم بهینه‌سازی PSO.....	۵-۳
۳۸	تابع محک.....	۱-۵-۳
۴۰	طراحی موتور شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از معادلات اندازه.....	۶-۳
۴۴	شبیه‌سازی با استفاده روش اجزاء محدود (FEM).....	۷-۳
۴۵	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۱-۷-۳
۴۶	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۲-۷-۳
۴۸	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۳-۷-۳
۴۹	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۴-۷-۳
۵۱	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۵-۷-۳
۵۲	شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۶-۷-۳
۵۳	مقایسه موتورهای طراحی شده.....	۷-۷-۳
۵۵	فصل چهارم: مدار معادل حرارتی.....	۴-۴
۵۶	مقدمه.....	۱-۴
۵۶	محاسبه دما ماشین AFPM.....	۲-۴

انتقال حرارت همرفتی در سیستمهای دیسکی.....	۵۷	۱-۲-۴
دیسک چرخش آزاد.....	۵۸	۱-۱-۲-۴
لبه شعاع خارجی روتور و استاتور.....	۵۹	۲-۱-۲-۴
سیستم روتور - استاتور.....	۵۹	۳-۱-۲-۴
محاسبه مقاومت حرارتی همرفتی و هدایتی.....	۶۱	۲-۲-۴
مدار معادل حرارتی موتور (TEC) AFPM شیار دار.....	۶۲	۳-۲-۴
مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون شیار.....	۶۳	۴-۲-۴
مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون هسته.....	۶۴	۵-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۶۵	۶-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۶۶	۷-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۶۸	۸-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۶۹	۹-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه.....	۷۱	۱۰-۲-۴
شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه.....	۷۲	۱۱-۲-۴
مقایسه نتایج.....	۷۴	۱۲-۲-۴
۵- فصل پنجم: امکان‌سنجی استفاده از موتور AFPM در کولر آبی.....		
مقدمه.....	۷۸	۱-۵
موتور AFPM مورد استفاده در کولر آبی.....	۷۸	۲-۵
بازده.....	۷۹	۱-۲-۵
قیمت اولیه.....	۸۰	۲-۲-۵

- ۳-۲-۵ ساخت ۸۱
- ۳-۵ راه‌انداز اینورتری ۸۲
- ۴-۵ تلفات پولی‌ها یا فلکه ۸۳
- ۵-۵ بررسی اقتصادی استفاده از کولرآبی بهبودیافته با موتور مغناطیس دائم ۸۴
- ۱-۵-۵ افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان ۸۵
- ۲-۵-۵ کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی ۸۶
- ۳-۵-۵ کاهش میزان حداکثر بار مصرفی ۸۷
- ۴-۵-۵ کاهش میزان مصرف ماهانه خانوار ۸۹
- ۶-۵ طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته ۹۰
- ۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۵
- ۷- مراجع ۹۸

فهرست شکل

- شکل ۱-۱: ساختار ماشین‌های AFPM ۵
- شکل ۱-۲: تغییرات اوج بار و میانگین دما در ماه‌های مختلف شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارند ۱۹
- شکل ۲-۲: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) بیرجند و (b) بجنورد در ماه‌های مختلف ۱۹
- شکل ۳-۲: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) اصفهان و (b) مشهد در ماه‌های مختلف ۲۰
- شکل ۴-۲: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) تهران و (b) کرج در ماه‌های مختلف ۲۰
- شکل ۵-۲: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) کرمان و (b) اراک در ماه‌های مختلف ۲۰
- شکل ۱-۳: قسمتهای اصلی کولرهای آبی ۲۵
- شکل ۲-۳: ترسیم معادله ۳-۴۰ با استفاده از سه متغیر (Rastrigin) ۳۸
- شکل ۳-۳: ترسیم معادله ۳-۴۱ با استفاده از سه متغیر (Ackley) ۳۸
- شکل ۴-۳: مقایسه نتایج بهینه‌سازی تابع (a) Rastrigin (b) Ackley با استفاده از دو الگوریتم معرفی شده ۳۹
- شکل ۵-۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه ۴۵
- شکل ۶-۳: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه ۴۵
- شکل ۷-۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه ۴۶
- شکل ۸-۳: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه ۴۷
- شکل ۹-۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه ۴۸
- شکل ۱۰-۳: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه ۴۸
- شکل ۱۱-۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه ۴۸

دقیقه.....	۴۹
شکل ۳-۱۲: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه.....	۵۰
شکل ۳-۱۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه.....	۵۱
شکل ۳-۱۴: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه.....	۵۱
شکل ۳-۱۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه.....	۵۲
شکل ۳-۱۶: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه.....	۵۲
شکل ۴-۱: دیسک چرخش آزاد، (a) جریان آرام هوا، (b) جریان آرام و آشفته هوا.....	۵۸
شکل ۴-۲: مدار معادل حرارتی موتور AFPM شیار دار.....	۶۲
شکل ۴-۳: مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون شیار.....	۶۳
شکل ۴-۴: مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون هسته.....	۶۴
شکل ۴-۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC).....	۶۵
شکل ۴-۶: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC).....	۶۵
شکل ۴-۷: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC).....	۶۶
شکل ۴-۸: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC).....	۶۷
شکل ۴-۹: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه.....	

- دقیقه (TEC) ۶۸
- شکل ۴-۱۰: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه
-(TEC) ۶۸
- شکل ۴-۱۱: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه
- (TEC) ۶۹
- شکل ۴-۱۲: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه
-(TEC) ۷۰
- شکل ۴-۱۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه
- (TEC) ۷۱
- شکل ۴-۱۴: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه
-(TEC) ۷۱
- شکل ۴-۱۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه
- (TEC) ۷۲
- شکل ۴-۱۶: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه
-(TEC) ۷۳
- شکل ۵-۱: شماتیک (a) کولر آبی مرسوم و (b) کولر آبی بهبودیافته..... ۷۹
- شکل ۵-۲: میانگین چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب موتور (b) چگالی شار مغناطیسی سیم‌پیچ یک فاز زیر یک قطب موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه..... ۹۱
- شکل ۵-۳: (a) چگالی شار مغناطیسی دندان استاتور موتور (b) ولتاژ القایی در سیم‌پیچها AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه..... ۹۱
- شکل ۵-۴: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه..... ۹۲

فهرست جدول

- جدول ۱-۱: میزان کیلووات ساعت مصرفی کولر آبی ۴
- جدول ۱-۲: مشخصات موتور القایی مورد استفاده در کولرهای آبی ۱۲
- جدول ۲-۲: اوج بار مصرفی شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارند ۱۶
- جدول ۶-۲: مصرف ماهانه کولرهای آبی در ماههای گرم سال ۲۱
- جدول ۷-۲: میانگین کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار در شهرهایی که قابلیت استفاده از کولر آبی را دارند ۲۱
- جدول ۸-۲: میانگین کیلووات ساعت مصرفی هر کولر آبی در شهرهایی که قابلیت استفاده از کولر آبی را دارند ۲۱
- جدول ۱-۳: مشخصات الگوریتم PSO مورد استفاده برای بهینه‌سازی توابع محک معرفی شده ۳۹
- جدول ۲-۳: مشخصات الگوریتم PSO مورد استفاده برای بهینه‌سازی ماشینهای AFPM معرفی شده ۴۰
- جدول ۳-۳: مشخصات ماشین AFPM شیار دار طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه ۴۰
- جدول ۴-۳: مشخصات ماشین AFPM شیار دار طراحی شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۱
- جدول ۵-۳: مقایسه پارامترهای موتور AFPM طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۲
- جدول ۶-۳: مشخصات ماشین AFPM بدون شیار طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه ۴۲
- جدول ۷-۳: مشخصات ماشین AFPM بدون شیار طراحی شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۲
- جدول ۸-۳: مقایسه پارامترهای موتور AFPM بدون شیار طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۳
- جدول ۹-۳: مشخصات ماشین AFPM بدون هسته طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه ۴۳
- جدول ۱۰-۳: مشخصات ماشین AFPM بدون هسته طراحی شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۳
- جدول ۱۱-۳: مقایسه پارامترهای موتور AFPM بدون هسته طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ۴۴
- جدول ۱۲-۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه ۴۶
- جدول ۱۳-۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه ۴۷
- جدول ۱۴-۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM

- بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه..... ۴۹
- جدول ۳-۱۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه..... ۵۰
- جدول ۳-۱۶: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه..... ۵۲
- جدول ۳-۱۷: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه..... ۵۳
- جدول ۳-۱۸: مقایسه موتورهای طراحی شده..... ۵۳
- جدول ۴-۲: روابط استخراج شده در انتقال حرارت در روتور با توجه به نوع رژیم جریانی توسط بوتارفا و هارمند [۱۹] ۶۰
- جدول ۴-۳: مقادیر A و B برحسب سهم فاصله هوایی مربوط به انتقال حرارت همرفت از استاتور به فاصله هوایی در رژیم هوای آشفته..... ۶۰
- جدول ۴-۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۶
- جدول ۴-۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۶
- جدول ۴-۶: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۷
- جدول ۴-۷: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۷
- جدول ۴-۸: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۹
- جدول ۴-۹: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)..... ۶۹
- جدول ۴-۱۰: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM

- بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۰
- جدول ۴-۱۱: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM
- بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۰
- جدول ۴-۱۲: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM
- بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۲
- جدول ۴-۱۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM
- بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۲
- جدول ۴-۱۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM
- بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۳
- جدول ۴-۱۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM
- بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC) ۷۳
- جدول ۴-۱۶: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM شیار دار طراحی شده ۷۴
- جدول ۴-۱۷: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM بدون شیار طراحی شده ۷۴
- جدول ۴-۱۸: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM بدون هسته طراحی شده ۷۵
- جدول ۴-۱۹: مقایسه موتورهای طراحی شده ۷۵
- جدول ۵-۱: مقایسه بازده موتورهای AFPM ۸۰
- جدول ۵-۲: رتبه‌بندی موتورهای AFPM بر اساس حداکثر مقدار بازده در یک سرعت مشخص ۸۰
- جدول ۵-۳: مقایسه آهنربای مصرفی در موتورهای AFPM ۸۱
- جدول ۵-۴: رتبه‌بندی موتورهای AFPM بر اساس حداقل میزان آهنربای مصرفی در سرعت مشخص ۸۱
- جدول ۵-۵: میزان کیلووات ساعت مصرفی کولر آبی معمول برای هر خانوار ۸۴
- جدول ۵-۶: میزان اوج بار به وجود آمده به دلیل استفاده از کولر آبی معمول برای هر خانوار ۸۵
- جدول ۵-۸: هزینه زیست‌محیطی به ازای تولید هر کیلووات ساعت برای سه نوع نیروگاه ۸۶
- جدول ۵-۱۱: مقدار تولید هر نوع نیروگاه و درصد آن از کل تولید کشور ۸۷
- جدول ۵-۱۲: هزینه ساخت نیروگاههای مختلف برحسب \$/kW ۸۷

جدول ۵-۱۳: نوع انرژی تولید شده برای یک خانوار در اوج بار مصرفی.....۸۸

جدول ۵-۱۴: پارامترهای مختلف موتور الکتریکی طراحی شده به منظور حداکثرسازی سود بهدستآمده در یک سال...۹۰

جدول ۵-۱۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM

بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه.....۹۳

جدول ۵-۱۶: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM

بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه.....۹۳

فهرست نمودار

نمودار ۱-۲: مقایسه اوج بار ماه مرداد، میانگین سالانه و ماه آبان در شهرهای مختلف ۱۸

نمودار ۲-۲: مقایسه اوج بار ماه مرداد، میانگین سالانه و ماه آبان در شهرهای مختلف ۱۸

نمودار ۱-۵: FFT مربوط به ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های سه فاز موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

..... ۹۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

طراحی و ساخت ماشین‌های الکتریکی با ساختار و کاربردهای متفاوت همواره یکی از رایج‌ترین و چالش برانگیزترین امور در به‌کارگیری ماشین‌های الکتریکی در صنعت بوده است. انتخاب و طراحی یک ساختار برای یک کاربرد خاص، دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشد که به چند مورد از آنها به‌صورت خلاصه اشاره می‌شود:

۱- اقتصادی بودن طراحی و ساختار

۲- قابلیت اجرا

۳- حداکثرسازی ویژگی‌های عملکردی ماشین الکتریکی با توجه به تقاضای مصرف‌کننده

۴- در دسترس بودن امکانات فنی

۵- ...

با توجه به پیچیدگی بیان شده، باید سیستمی که موتور الکتریکی قرار است در آن استفاده شود بطور کامل شناسایی و بررسی گردد تا مناسب‌ترین ساختار انتخاب شده و براساس محدودیت‌ها و خواسته‌های کارفرما طراحی انجام شود.

۱-۲- پیکربندی پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه معرفی یک نوع موتور الکتریکی آهنربای دائم برای به‌کارگیری در کولرهای آبی به منظور کاهش کیلو وات ساعت مصرفی، اوج بار مصرفی، آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان خانگی می‌باشد. جزئیات مورد بحث در فصل آینده و ادامه این فصل به‌صورت زیر می‌باشد.

در ادامه فصل یک به بررسی وضعیت کلی استفاده از کولرهای آبی در کشور ایران پرداخته می‌شود و سپس موتورهای AFPM و ساختارهای رایج آن بطور کلی معرفی می‌شود.

در فصل دوم به بررسی نحوه عملکرد و محدودیت‌های موجود در کولرهای آبی پرداخته می‌شود. سپس شهرهایی که قادر به استفاده از این نوع کولر هستند شناسایی شده و مقدار توان مصرفی و اوج بار ایجاد شده به وسیله آنها استخراج می‌شود.

در فصل سوم موتورهای آهنربای دائم که امکان استفاده در کولر آبی را دارند معرفی شده و سپس با توجه به خواسته‌ها و محدودیت‌های موجود طراحی می‌شوند. در انتها با استفاده از نرم‌افزار JMAG designer طراحی انجام شده اعتبار سنجی می‌شود.

در فصل چهارم تأثیر حرارت قسمت‌های مختلف ماشین بر ابعاد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم با محاسبه هزینه اولیه و میزان بازگشت سرمایه از طریق چهار روش معرفی شده سعی شده است که سود به دست آمده از این جایگزینی استخراج شود. سپس سود به دست آمده به عنوان تابع هدف طراحی موتور AFPM در نظر گرفته می‌شود تا حداکثر میزان سود ممکن حاصل شود.

۱-۳- کولرهای آبی

کولرهای آبی جزو سیستم‌های سرمایش تبخیر مستقیم محسوب می‌شوند که خنک‌سازی محیط را همراه با افزایش رطوبت آن انجام می‌دهند. به همین دلیل این نوع سیستم سرمایشی در مناطقی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای دمای مرطوب پایین است. میزان کیلووات ساعت مصرفی کولرهای آبی در جدول ۱-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱-۱: میزان کیلووات ساعت مصرفی کولر آبی

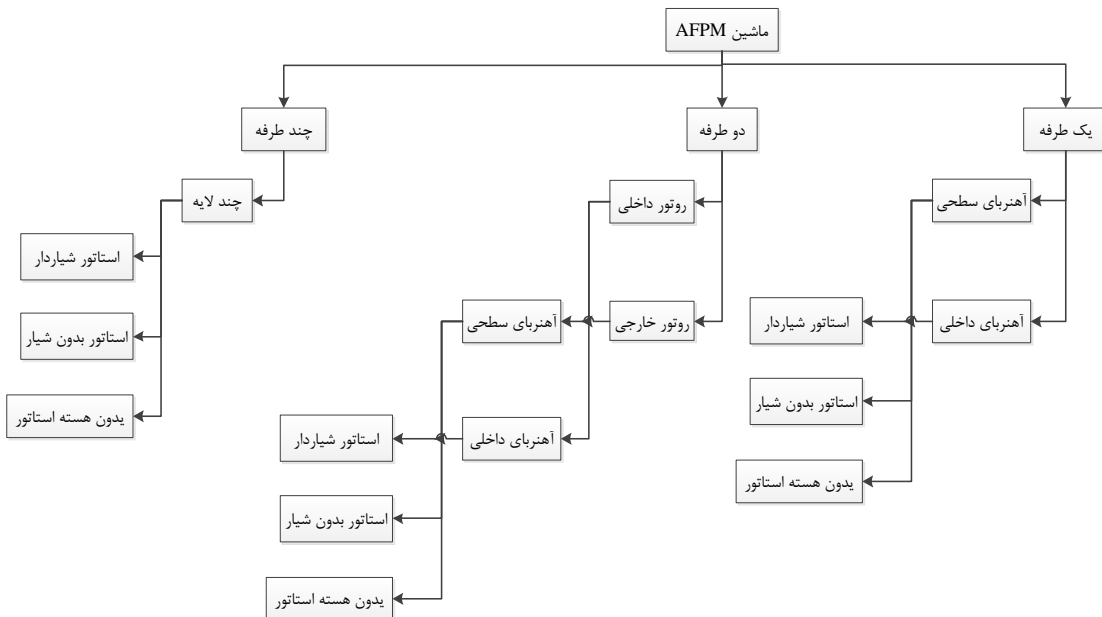
اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
۰	۰	۰	۰	۰	۱۹,۳	۳۶,۶	۵۴,۶	۴۳,۸	۳۷,۲	۵,۹	۰

میزان اوج بار به وجود آمده به دلیل استفاده از کولرهای آبی در هر خانوار بطور میانگین $378/0.17$ وات می‌باشد.

موتورهای مورد استفاده در کولرهای آبی از نوع موتور القایی تکفاز می‌باشد. بازده این نوع موتورها در بهترین حالت در حدود ۴۰ درصد است و سهم عمده انرژی الکتریکی ورودی کولرهای آبی در موتور محرک آن استفاده می‌شود؛ بنابراین افزایش بازده و یا تغییر موتور مورد استفاده در کولرهای آبی مرسوم امری ضروری برای کاهش اوج بار و کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار است.

۱-۴- ساختار موتورهای AFPM

ساختارها و کاربردهای ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم متنوع و گسترده است. ساختارهای مختلف ماشین‌های AFPM در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱: ساختار ماشین‌های AFPM

همانطور که در شکل ۱-۱ مشهود می‌باشد موتورهای AFPM دارای تنوع ساختاری بسیار فراوانی هستند که این ساختارها دارای ویژگی‌های عملکردی متفاوتی هستند. به همین دلیل در زمینه طراحی ماشین‌های AFPM تحقیقات فراوانی صورت گرفته است که به چند مورد از این تحقیقات گسترده به صورت خلاصه اشاره می‌شود.

در مرجع [۱] به طراحی بهینه ماشین AFPM شیاردار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA) و معادلات اندازه پرداخته شده است که تابع هدف بهینه‌سازی آن حداکثر سازی چگالی توان ماشین می‌باشد. به دلیل شیاردار بودن هسته استاتور، شار فاصله هوایی و Back EMF ایجاد شده از حالت سینوسی خارج می‌شوند یا به عبارت دیگر میزان THD آن افزایش می‌یابد. در این مقاله تأثیر میزان مورب کردن آهنربای دائم بر کاهش میزان THD شار فاصله هوایی و Back EMF ایجاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش میزان مورب بودن آهنربای دائم ابتدا باعث کاهش و سپس باعث افزایش میزان THD شار فاصله هوایی و Back EMF می‌شود.

در مرجع [۲] یک ماشین AFPM شیاردار خود راه‌انداز طراحی و ساخته شده است. موتورهای سنکرون به دلیل نداشتن گشتاور راه‌اندازی به یک راه‌انداز اولیه نیاز دارند. در این مقاله با ایجاد یک لبه در قطر داخلی و خارجی روتور که می‌تواند کله سیم‌های موجود در استاتور را پوشش دهد، یک موتور القایی ایجاد شده است. این موتور القایی ایجاد شده مانند یک راه‌انداز عمل می‌کند. طبق نتایج این مقاله، اگر گشتاور بار موتور از گشتاور نامی موتور بیشتر شود، موتور راه‌اندازی شده ولی به سرعت سنکرون همگرا نمی‌شود و با اختلاف زیادی در حدود آن نوسان می‌کند.

در مرجع [۳] به بررسی تأثیر اشکال مختلف آهنربای دائم بر نوسانات گشتاور خروجی پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار نوسانات گشتاور در اشکال مختلف آهنربای دائم به میزان مورب بودن آهنربای دائم و نسبت قوس آهنربای دائم به گام قطب بستگی دارد. اگر میزان مورب بودن آهنربای دائم ۹ درجه الکتریکی و میزان قوس آهنربای دائم به گام قطب $0/6868$ باشد حداقل نوسانات گشتاور در ماشین‌های الکتریکی با اشکال مختلف آهنربای دائم اتفاق می‌افتد.

در مرجع [۴] تأثیر سرعت بر تلفات بی‌باری و راه‌های کاهش نوسانات گشتاور بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، تلفات بی‌باری ماشین به شدت افزایش پیدا می‌کند که این پدیده به دلیل افزایش تلفات اصطکاک، هیستریزیس و فوکو می‌باشد. برای کاهش نوسانات گشتاور از دو روش مورب کردن آهنربای دائم و ایجاد اختلاف زاویه بین دو روتور استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، افزایش میزان مورب بودن آهنربای دائم ابتدا باعث کاهش نوسانات گشتاور و سپس باعث افزایش آن خواهد شد. این تغییرات تأثیری بر دامنه مؤلفه اصلی Back EMF ندارد. یکی دیگر از روش‌های کاهش میزان THD که در این مقاله معرفی شده ایجاد اختلاف زاویه‌ی الکتریکی بین دو روتور است که باعث کاهش میزان THD در Back EMF القایی می‌شود.

دما یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد ماشین‌های الکتریکی بخصوص بر بازده این نوع ماشین‌ها می‌باشد و

باید در الگوریتم طراحی مورد محاسبه قرار گیرد.

در این پایان نامه ملاحظات فنی و اقتصادی استفاده از انواع موتور AFPM دو روتور و یک استاتور در سیستم کولر مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ساختار مناسب برای این کاربرد خاص انتخاب شود. این مهم از طریق ارائه الگوریتم طراحی ساختارهای مختلف موتور AFPM دو روتور و یک استاتور و مقایسه نتایج حاصل از آنها صورت می‌پذیرد. از آنجایی که یکی از عوامل مؤثر بر قابل اجرا بودن استفاده از موتورهای AFPM در کولرهای آبی، قیمت تمام شده این نوع موتور می‌باشد، تابع بهینه‌سازی طراحی موتور AFPM حداکثر سازی سود به دست آمده در یک سال در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور افزایش دقت الگوریتم طراحی ارائه شده، جزئیاتی مانند محاسبه دمای قسمت‌های مختلف ماشین نیز در الگوریتم طراحی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد.

فصل دوم

کولرهای آبی

۱-۲- مقدمه

با گرم شدن هوا و نزدیک شدن به فصل تابستان انتخاب یک وسیله سرمایشی مناسب همواره یکی از دغدغه‌های مصرف‌کنندگان است. در کشور ایران معمولاً مردم از اواخر اردیبهشت یا اوایل خرداد اقدام به راه‌اندازی کولرهای منازل می‌کنند.

در شهرهای مختلف کشور ایران به علت تفاوت‌های آب و هوایی وسیله سرمایشی که مورد استفاده قرار می‌گیرد متفاوت است که می‌توان به چیلرها، کولرهای گازی پنجره‌ای، کولرهای گازی دوتکه و کولرهای آبی اشاره کرد. چیلرها، کولرهای گازی پنجره‌ای و کولرهای گازی دوتکه با توجه به نحوه عملکردشان برای انواع شرایط آب و هوایی مناسب می‌باشند. به دلیل توان مصرفی و قیمت تقریباً بالا از این نوع سیستم‌ها در مناطق مرطوب و بسیار گرم استفاده می‌شود. از طرف دیگر کولرهای آبی به دلیل افزایش رطوبت هوا در مناطقی که دارای آب و هوای خشک می‌باشند کارایی لازم را دارند. این سیستم سرمازا نسبت به سه سیستم دیگر از توان ورودی کمتری استفاده می‌کند و قیمت اولیه پایین‌تری نیز دارد. به همین دلیل در مناطقی که شرایط استفاده از کولرهای آبی وجود دارد استفاده از این نوع کولرها را ترجیح می‌دهند، چرا که هزینه‌های کمتری برای مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کند.

۲-۲- کولر آبی

اساس کار کولرهای آبی سرمایش تبخیری مستقیم است. در این فرآیند کاهش دمای محیط با افزایش میزان رطوبت هوا همراه می‌باشد [۵]. در کولرهای آبی آب توسط الکتروپمپ از تشتک به ناودان‌های قرار گرفته شده در بالای پوشال‌ها هدایت می‌شود و سپس بر روی پوشال‌ها می‌ریزد و آنها را خیس نگه می‌دارد. با کار توربین، هوا از روی پوشال‌های مرطوب عبور کرده و به طرف کانال و یا داخل سالن هدایت می‌شود. عبور هوا از روی پوشال‌های مرطوب موجب تبخیر آب پوشال‌ها شده و آب برای تبخیر شدن گرمای هوا را جذب می‌کند و در نتیجه موجب خنک شدن هوا می‌شود [۵]. این نوع کولرها در نقاطی که دارای آب

و هوای خشک هستند دارای کارایی قابل قبولی می‌باشند. عبارت کولر ۴۵۰۰ به معنی این است که ظرفیت هوادهی کولر ۴۵۰۰ فوت مکعب در دقیقه است [۵].

با توجه به تولید کولر آبی در داخل کشور ایران و نیز استفاده از این وسیله برای خنک کردن منازل، کولر آبی یک وسیله خنک کننده ملی شناخته شده است و بیش از ۷۰٪ اقلیم جغرافیایی کشور به آن نیاز دارد [۷].

۱-۲-۲- ساختمان کولرهای آبی

ساختمان کولرهای آبی دارای اجزای الکتریکی و مکانیکی مختلفی می‌باشد که یک هدف را دنبال می‌کنند. اجزای مورد استفاده در کولرهای آبی به شرح زیر است:

۱- موتور الکتریکی

۲- بدنه کولر آبی

۳- توربین

۴- فلکه یا پولی

۵- یاتاقان

۶- پمپ آب (واترپمپ)

۷- شناور

۱-۲-۲-۱- موتور الکتریکی

متداولترین نوع موتور مورد استفاده در کولرهای آبی از نوع روتور قفسی (قفس سنجابی) با راه‌انداز خازنی می‌باشد. قدرت معمول این نوع موتورها ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ اسب بخار و بالاتر می‌باشد که این توان

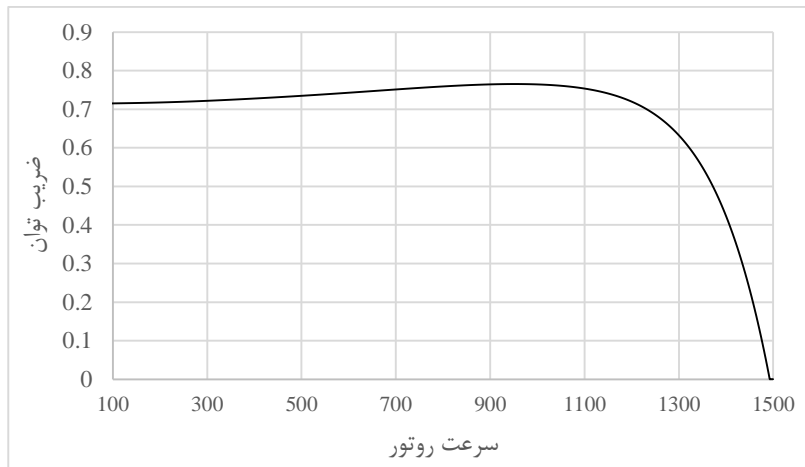
نسبت به حجم هوادهی کولر انتخاب می‌شود [۸]. این نوع موتورها به دلیل نداشتن کلکتور (روتور سیم‌پیچی شده) با صدا و حجم نسبتاً کم، قیمت کمتر و عمر طولانی‌تر نسبت به موتورهای دارای کلکتور کار کرده و از همین رو در کولرهای آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موتور کولرهای آبی دارای دو سرعت است. این دو سرعت در حدود سرعت سنکرون ۷۵۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه است که با استفاده از سربندی سیم‌پیچ‌های استاتور به دست می‌آید.

مشخصات یک نمونه موتور القایی مورد استفاده در کولرهای آبی در جدول ۱-۲ آورده شده است.

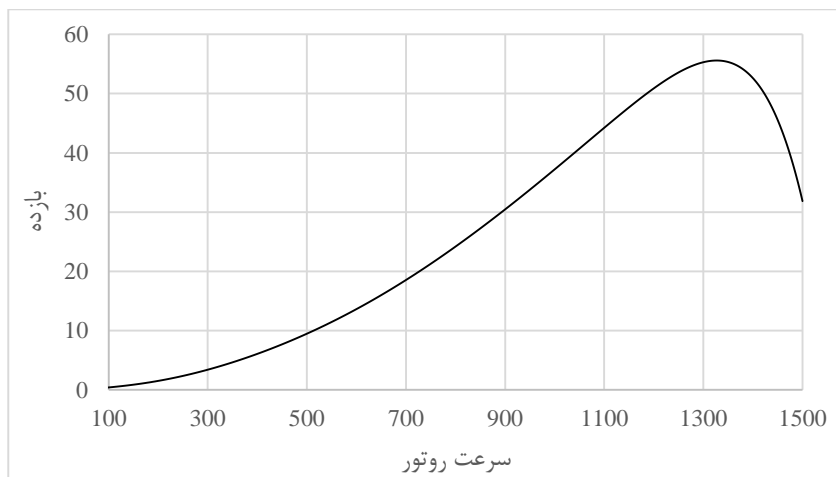
جدول ۱-۲: مشخصات موتور القایی مورد استفاده در کولرهای آبی

Parameter	Value	Unit
D_{os}	۱۳۰	mm
D_{is}	۷۴/۲	mm
D_{or}	۷۳/۸	mm
D_{ir}	۲۰	mm
L_{tot}	۷۴	mm
P	۴	-
$V_L(V)$	۲۲۰	Volt
f	۵۰	Hz
L_{cs}	۱۳,۱	mm
L_{cr}	۲۷,۲	mm
Z_s	۲۴	mm
Z_r	۲۸	-
n_r	۱۳۴۱	RPM
η	۰/۵۸	-
$\cos(\varphi)$	۰/۵۷	-
P_{den}	۱/۰۱۸	W/Cm^2

همانطور که از جدول بالا مشهود است این موتور دارای مشخصه عملکردی مطلوبی نمی‌باشد. موتورهای القایی به گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که در بار و سرعت نامی دارای بهترین عملکرد هستند. از آنجایی که سرعت موتورهای القایی تکفاز مورد استفاده در وسایل خانگی وابسته به توان خروجی ماشین می‌باشد اگر به هر دلیل در توان خروجی ماشین تغییراتی ایجاد شود عملکرد ماشین نسبت به حالت نامی به شدت تضعیف می‌شود. تغییرات ضریب توان و بازده موتور معرفی شده در جدول ۱-۲ در شکل‌های ۱-۲ و ۲-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲: منحنی ضریب توان بر حسب سرعت موتور القایی تکفاز یک کیلو وات



شکل ۲-۲: منحنی بازده بر حسب سرعت موتور القایی تکفاز یک کیلو وات

۲-۱-۲-۲ بدنه

اتاقک هوا از یک مکعب تشکیل شده است که کف، سقف و یک سطح جانبی آن ثابت می‌باشد و در داخل سه سطح جانبی دیگر آن پوشال‌ها جای داده می‌شوند که معمولاً متحرک هستند و می‌توان آنها را از اتاقک جدا ساخت. در مواقع تعویض پوشال‌ها و یا سرویس کولر این کار ضروری است. سطح جانبی ثابت از طریق یک دریچه لبه‌دار با یک قطعه برزنت به کانال اصلی متصل می‌گردد. بدین ترتیب از انتقال ضربه و لرزش کولر به کانال جلوگیری می‌شود.

۳-۱-۲-۲ بادبزن

قسمت اصلی کولر که هوای داخل اتاقک را به داخل کانال می‌دمد، بادبزن یا توربین نامیده می‌شود. توربین از طریق یک فلکه (پولی) بزرگ با یک تسمه به فلکه موتور متصل می‌گردد. توربین از تعدادی پره که با شکل و زاویه خاصی حول یک استوانه قرار دارند، تشکیل شده است.

۴-۱-۲-۲ پولی یا فلکه

پولی از آلومینیوم خشک تهیه شده و انتقال قدرت از الکتروموتور به فن یا پروانه از طریق آن انجام می‌شود. پولی کوچک روی محور موتور و پولی بزرگ روی محور پروانه نصب می‌شود. طرز قرار گرفتن آنها طوری است که هر دوی آنها دقیقاً روی یک صفحه فرضی قرار می‌گیرند. در غیر این صورت باعث خوردگی تسمه می‌شوند.

۵-۱-۲-۲ یاتاقان

یاتاقان یا بستر قسمتی است که یک سر محور فن در داخل آن قرار می‌گیرد. ساختمان یاتاقان طوری است که نیروی وزن ناشی از محور، فن و اصطکاک را به بدنه منتقل می‌سازد. بهترین یاتاقان‌ها از نوع گرافیتی و بلبرینگ هستند.

۲-۲-۱-۶ پمپ آب (واترپمپ)

واترپمپ یا پمپ آب کولر مانند همه پمپ‌ها از دو قسمت الکتریکی (موتور) و یک قسمت مکانیکی (پمپ) تشکیل می‌شود. پمپ آب عمل پمپاژ آب را به بدنه کولر انجام می‌دهد. قسمت‌های مختلف پمپ عبارتند از:

- ۱- پایه اصلی پمپ که در داخل آب قرار می‌گیرد.
- ۲- پروانه چهار یا سه پره که نقش توربین را داشته و آب را پمپاژ می‌کند.
- ۳- کفی یا پایه پمپ که در زیر پایه نصب می‌گردد و نقش آب‌بندی پمپ را دارد.
- ۴- چپقی پایه پمپ که محل قرار گرفتن شیلنگ است و آب را به سه راهی منتقل می‌کند.
- ۵- کلاهک پمپ که قسمت فوقانی الکتروپمپ است که به صورت چتری بالای الکتروپمپ قرار می‌گیرد تا از ورود آب به داخل آن جلوگیری کند.

۲-۲-۱-۷ شناور

شناور وسیله‌ای است که برای تنظیم مقدار و ارتفاع آب داخل مخزن کولر یا هر مخزن دیگری بکار می‌رود و از سرریز شدن آب جلوگیری می‌کند. این دستگاه که قابل تنظیم نیز است از یک شیر فشاری که توسط یک بازو به یک کره پلاستیکی توخالی متصل است تشکیل می‌شود.

۲-۳- بررسی شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارا می‌باشند

در کولرهای آبی کاهش دما با افزایش میزان رطوبت محیط همراه است به همین دلیل این دستگاه سرمازا در مناطق گرم و مرطوب دارای کارایی لازم نیست. دمای محیطی که کولر آبی در آن استفاده شده است از معادله (۲-۲-۱) قابل محاسبه می‌باشد [۵].

$$t_{off} = t_d - 0.8(t_d - t_w) \quad (1-2)$$

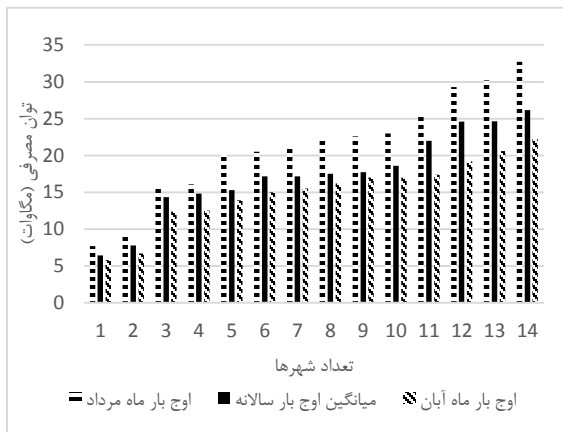
که در آن t_{off} دمای محیطی که کولر آبی در آن استفاده شده است، t_d دمای خشک محیط موردنظر و t_w دمای مرطوب محیط است. با استفاده از معادله ۱-۲ می‌توان مناطقی که دارای شرایط استفاده از کولر آبی هستند را شناسایی کرد. وضعیت شهرهای ایران از نظر استفاده از سیستم‌های سرمزای تبخیری مستقیم و غیرمستقیم در مرجع [۵] آورده شده است. با استفاده از این جدول می‌توان شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی دارند را شناسایی و اطلاعات مربوط به مصرف آن‌ها را استخراج کرد. اوج بار مصرفی ماه‌های مختلف شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارند در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲: اوج بار مصرفی شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارند [۹]

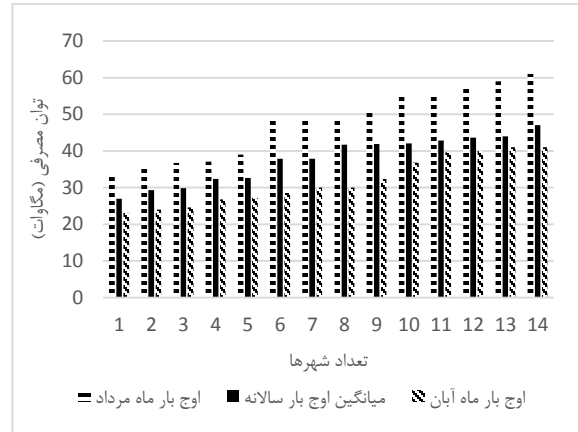
شهر	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
آباده	۳۰	۲۸	۲۸	۲۹	۳۰	۳۴	۳۷	۳۹	۳۸	۳۶	۳۴	۲۹
اراک	۱۹۳۰۶	۱۸۵۰۲	۱۸۷۰۹	۱۹۴۰۳	۱۹۸۰۷	۲۰۱۰۴	۲۲۳۰۲	۲۴۸۰۸	۲۴۷۰۵	۲۱۴	۲۱۱۰۳	۱۸۸۰۷
اردبیل	۱۲۰۰۸	۱۱۸۰۳	۱۱۹۰۶	۱۲۱۰۲	۱۲۱۰۸	۱۱۷۰۶	۹۷۰۲	۱۰۴	۱۰۶۰۱	۱۰۷۰۲	۱۱۱۰۶	۱۲۴۰۸
ارومیه	۲۷۴۰۵	۲۸۳۰۷	۲۹۲۰۵	۲۷۶۰۳	۲۸۵۰۷	۲۸۶۰۱	۲۷۷۰۵	۲۹۱۰۹	۲۷۲۰۳	۲۷۲۰۸	۲۴۱۰۳	۲۵۱۰۶
اسلام‌آباد	۳۰	۳۰	۳۳	۲۹۰۴	۳۲۰۴	۳۹	۴۵	۴۸۰۶	۴۸	۴۲	۳۹	۳۸۰۴
اصفهان	۸۱۷	۷۸۳	۷۷۶	۷۴۸	۷۸۸	۸۴۶	۹۷۱	۱۰۵۲	۱۰۳۷	۹۵۱	۸۳۰	۹۸۶
انار	۲۱۰۷	۲۱۰۵	۱۸۰۸	۱۹	۲۰۰۶	۲۳۰۴	۲۳۰۴	۲۵۰۴	۲۴۰۲	۲۳۰۴	۲۱۰۴	۲۱
اهر	۲۵۰۴	۲۶۰۳	۲۶۰۹	۲۶۰۵	۲۴۰۶	۲۷۰۵	۲۸۰۶	۲۷۰۹	۳۲۰۷	۲۶۰۲	۲۷۰۱	۲۳۰۸
بافت	۱۸	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰۰۵	۲۰	۱۹	۱۷	۱۶۰۸
بجنورد	۵۹۰۲	۵۵۰۳	۵۵۰۴	۵۶۰۱	۵۵۰۹	۵۹۰۱	۶۲۰۸	۷۱۰۴	۶۷۰۶	۵۹۰۷	۵۵۰۸	۵۴۰۹
بروجرد	۹۹۰۱	۹۹۰۶	۹۹۰۴	۱۰۵۰۹	۹۹۰۶	۹۲۰۹	۱۰۶	۱۱۹۰۳	۱۲۲۰۴	۱۰۸۰۲	۹۹۰۸	۹۷۰۷
بروجن	۳۱۰۴	۳۰۰۸	۳۰۰۹	۳۱۰۵	۳۶۰۸	۴۷۰۷	۵۳۰۷	۵۴۰۴	۵۴۰۷	۵۳۰۳	۴۴۰۸	۳۲۰۹
بیجار	۱۷	۲۲۰۶	۱۷۰۴	۱۷۰۲	۱۷۰۴	۱۷۰۸	۱۹	۲۰	۲۰	۱۹	۱۷	۱۸۰۸
بیرجند	۶۳۰۹	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳۰۳	۶۸۰۲	۶۵۰۶	۸۵۰۱	۸۳۰۶	۸۳	۷۶۰۱	۶۹۰۱
تبریز	۵۷۹	۵۶۱۰۳	۵۵۱۰۶	۵۵۰۰۱	۵۳۶۰۲	۵۱۴۰۵	۵۷۹	۵۵۷۰۹	۵۲۱۰۲	۵۲۰۰۶	۵۱۵۰۵	۴۴۵۰۵
تهران	۲۹۶۹	۳۳۱۰	۳۲۲۹	۳۰۹۹	۲۸۲۷	۳۴۷۰	۳۹۱۱	۴۵۰۶	۴۰۱۲۰۵	۴۰۷۶	۳۱۱۲	۲۶۰۶
تکاب	۱۳۰۵	۱۴۰۸	۱۵۰۲	۱۴۰۹	۱۵	۱۴۰۷	۱۵۰۱	۱۵۰۴	۱۵۰۶	۱۴۰۴	۱۴۰۴	۱۴۰۷
خرمدره	۴۸۰۲	۴۱۰۲	۲۸۰۵	۳۴۰۷	۴۱	۴۹۰۱	۵۹۰۷	۵۸۰۶	۶۱	۵۴۰۹	۵۴	۴۴۰۳
خلخال	۱۴۰۴	۱۳۰۱	۱۳۰۴	۱۳۰۵	۱۳۰۹	۱۳۰۹	۲۰۰۹	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۳۰۹	۱۳	۱۳۰۳
روانسر	۱۶۰۹	۱۲	۱۲	۱۷۰۲	۱۲۰۴	۱۳	۲۰	۲۱	۲۳	۲۰۰۶	۱۹۰۶	۱۸۰۴
ورزقان	۷۰۶	۸	۸۰۷	۸	۶۰۷	۷۰۹	۶۰۷	۶۰۷	۶۰۸	۸۰۲	۹۰۱	۹
زنجان	۴۶۲	۴۴۹۰۸	۴۴۶	۴۲۹۰۷	۴۴۰۲	۴۸۰	۵۱۶	۵۱۶۰۸	۵۲۶۰۴	۴۹۶۰۶	۴۹۵۰۳	۴۴۳۰۲
سراب	۲۶۰۳	۲۴۰۷	۲۵۰۴	۲۳۰۳	۲۸۰۵	۴۸۰۱	۴۷۰۲	۴۷	۵۰۰۴	۵۰۰۵	۵۰۰۱	۳۲۰۴
سردشت	۱۶۰۶	۱۷۰۴	۱۶۰۶	۱۶۰۴	۱۶۰۲	۱۶۰۴	۱۸۰۸	۲۰۰۲	۲۰	۱۸۰۴	۱۴۰۵	۱۴۰۶
سنندج	۹۵۰۳	۹۶۰۹	۹۸۰۹	۹۸۰۹	۹۵۰۵	۹۵۰۵	۱۰۸۰۴	۱۱۶	۱۱۵۰۷	۱۰۴	۹۰۰۹	۹۰۰۸
شهرباک	۲۴	۲۵۰۹	۲۱۰۸	۲۲۰۲	۲۶۰۸	۳۳۰۶	۳۳۰۶	۳۵۰۸	۳۵۰۲	۳۲۰۹	۳۲۰۴	۲۷۰۷
شهرکرد	۵۴۰۴	۵۳۰۸	۵۲۰۷	۵۹	۶۶۰۶	۸۰۰۳	۵۹۰۹	۹۵۰۱	۹۶۰۴	۸۸۰۱	۷۴۰۶	۵۹

۱۶	۱۷	۱۷	۲۲	۱۸	۲۲	۱۷	۱۷	۱۸	۱۷	۱۶	۱۶	فیروزکوه
۵۶۰۹	۶۱۰۴	۶۰۰۳	۶۰۰۳	۶۳۰۴	۴۴۰۵	۴۶۰۹	۱۲۰۵	۴۴۰۱	۳۷۰۴	۴۱	۴۳۰۴	قائن
۳۵	۵۶	۵۹	۵۹	۵۸	۵۶	۴۶	۴۰	۲۵	۲۷	۲۸	۲۵	قروه
۱۷۵۰۸	۱۹۳۰۴	۲۰۸۰۱	۲۳۲۰۹	۲۲۴۰۳	۲۱۵۰۹	۲۱۴۰۶	۱۹۲۰۴	۱۷۸۰۸	۱۸۵۰۵	۱۸۹	۱۸۷۰۶	قزوین
۳۰۰۶	۴۵	۴۴۰۶	۴۳۰۲	۴۹	۴۸۰۶	۲۹	۴۶۰۳	۴۶۰۹	۳۲۰۶	۴۶۰۴	۴۲۰۴	قوچان
۷۴۲	۸۳۰	۱۰۲۵	۱۱۱۷	۱۱۳۴	۹۹۰	۹۹۳	۸۵۵	۸۷۷	۸۶۱	۸۴۱	۸۷۱	مشهد
۵۶۶۰۶	۶۴۶۰۷	۸۰۰	۸۰۹۰۳	۸۶۰۰۷	۸۴۲۰۱	۸۲۴۰۷	۷۵۷	۷۶۶۰۵	۸۱۸۰۵	۸۲۰۰۸	۸۳۹۰۸	کرج
۲۱۱۰۱	۲۳۷۰۲	۲۷۳۰۱	۲۷۵	۲۸۲۰۴	۲۴۸۰۲	۲۴۴۰۶	۲۲۰۲	۲۲۳۰۹	۲۳۰۰۶	۲۱۹	۲۲۹۰۱	کرمان
۲۶۰۱	۲۸۰۱	۳۰۰۶	۳۳۰۳	۳۳۰۵	۳۲	۲۴۰۶	۱۹۰۲	۱۶۰۶	۱۷۰۲	۱۶۰۷	۱۷۰۲	کنگاور
۵۰۷	۶۰۴	۷۰۲	۷۰۷	۷۰۷	۷۰۷	۶۰۷	۵۰۸	۵۰۴	۵۰۶	۵۰۶	۵۰۷	کوهنگ
۴۸۰۷	۴۸۰۹	۵۴۰۷	۶۱۰۱	۵۹۰۷	۵۶۰۷	۵۴	۴۶۰۱	۳۸۰۱	۳۰۰۷	۳۰۰۷	۳۴۰۷	گلیایگان
۳۰۰۲	۲۷۰۹	۲۶۰۴	۳۳۰۴	۳۱۰۴	۳۲	۳۰۰۸	۲۷۰۲	۲۵	۲۴۰۲	۳۲۰۶	۳۷۰۱	گناباد
۱۳۰۸	۱۴۰۷	۱۴۰۵	۱۵۰۸	۱۵۰۴	۱۵۰۶	۱۴۰۸	۱۵۰۵	۱۵۰۶	۱۶۰۱	۱۵۰۹	۱۵۰۸	ماکو و بازرگان
۴۲۰۶	۴۶۰۳	۵۳۰۷	۵۵۰۷	۵۶	۶۱۰۴	۴۹۰۲	۴۴۰۹	۴۵۰۹	۴۵۰۹	۴۳۰۴	۴۵۰۷	مراغه
۸۲۰۹	۸۹۰۲	۱۰۰	۱۰۷۰۶	۱۰۸۰۳	۹۹۰۶	۸۸۰۵	۸۵۰۱	۷۷۰۴	۸۱۰۱	۸۰	۷۷	ملایر
۳۹۰۳	۳۹۰۶	۴۶۰۸	۵۴۰۹	۴۹۰۵	۴۸۰۶	۴۴۰۴	۴۱	۳۹۰۵	۳۹۰۶	۳۸۰۲	۴۲۰۳	میانه
۲۴۰۴	۲۲۰۹	۲۵۰۹	۲۹۰۱	۲۹۰۳	۲۶۰۳	۲۵۰۴	۲۴	۲۲۰۷	۲۶۰۹	۲۸۰۸	۲۸	نائین
۳۲۰۱	۳۲۰۳	۳۴	۳۶۰۷	۳۶۰۷	۳۵۰۳	۳۲۰۹	۳۰	۲۸۰۱	۲۹۰۵	۲۸۰۶	۳۲۰۶	نطنز
۱۱۵۰۲	۱۷۸۰۱	۱۹۵	۱۷۰۰۶	۲۰۰۰۷	۱۷۶۰۵	۱۹۲۰۲	۱۵۹۰۳	۱۵۴۰۱	۱۳۱۰۸	۱۴۸۰۶	۱۶۴۰۶	نیشابور
۱۶۱۰۹	۱۶۷۰۸	۱۸۲	۱۹۴۰۱	۱۹۴۰۳	۱۸۰۰۵	۱۶۸۰۸	۱۶۶۰۲	۱۶۱۰۶	۱۶۵	۱۶۲۰۴	۱۶۰۰۴	همدان

همانطور که از جدول ۲-۴ مشاهده می‌شود، در ماه‌های اردیبهشت تا مهر، به دلیل افزایش دما میزان اوج بار مصرفی ماهانه شهرهای مختلف افزایش پیدا کرده است که این افزایش را می‌توان غالباً به استفاده بیشتر از وسایل سرمازا نسبت داد بطوریکه با افزایش استفاده از وسایل سرمازا در ماه‌های گرم سال، اوج بار مصرفی ماهانه نیز در این ماه‌ها افزایش پیدا خواهد کرد. اگر بطور بدبینانه فرض شود که تمامی وسایل سرمازا در این شهرها از نوع کولرهای آبی هستند، میزان اوج بار به وجود آمده به وسیله کولرهای آبی را می‌توان از اختلاف مصرف انرژی بین ماه‌های مرداد و آبان بطور تقریبی محاسبه کرد. در نمودارهای میله‌ای ۱-۲ و ۲-۲ به وضوح می‌توان این اختلاف را مشاهده کرد.

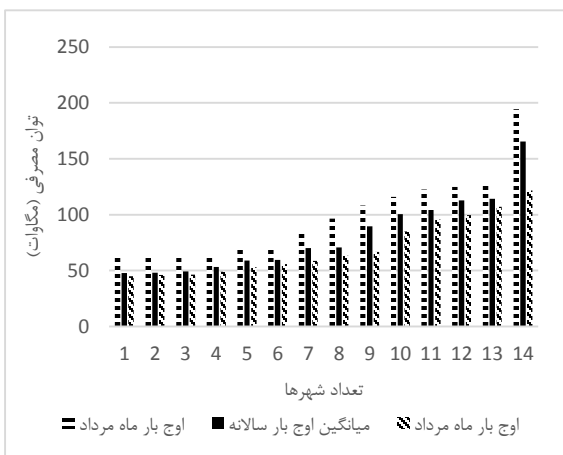


(b)

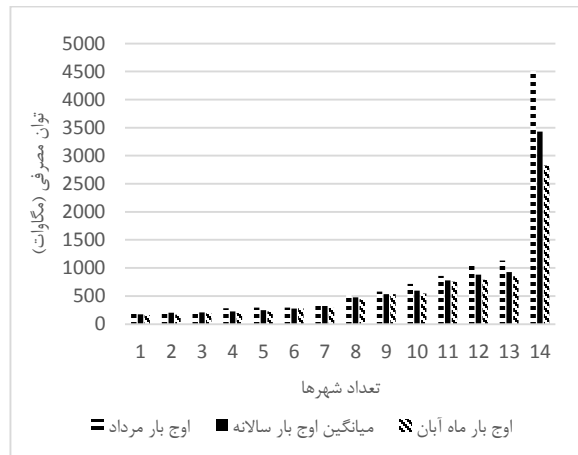


(a)

نمودار ۱-۲: مقایسه اوج بار ماه مرداد، میانگین اوج بار سالانه و ماه آبان در شهرهای مختلف [۹]

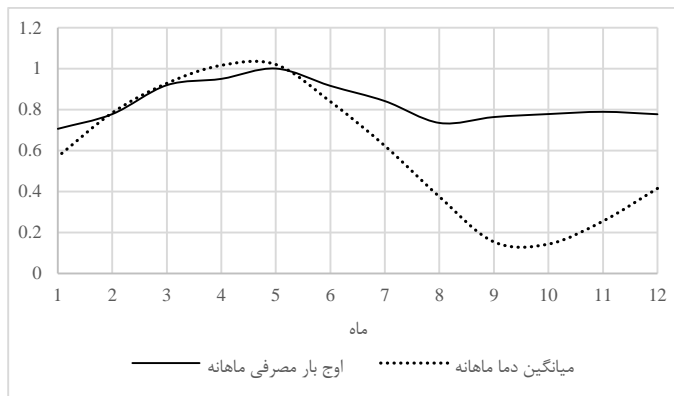


(b)



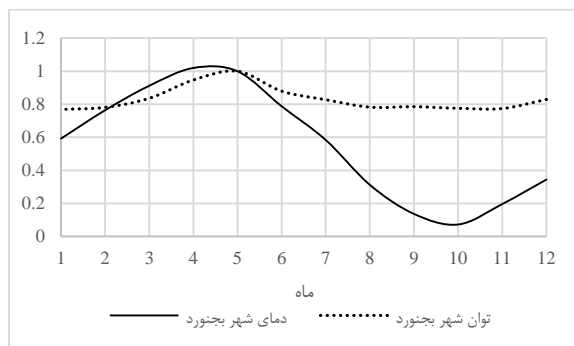
(a)

نمودار ۲-۲: مقایسه اوج بار ماه مرداد، میانگین اوج بار سالانه و ماه آبان در شهرهای مختلف [۹]

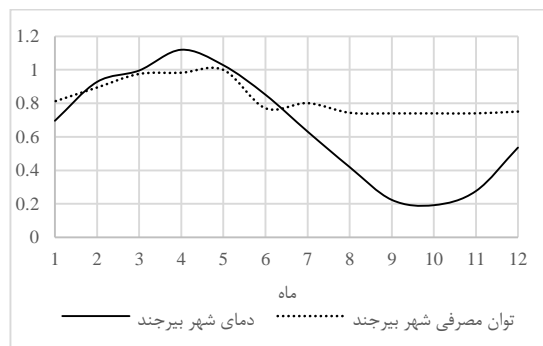


شکل ۲-۱: تغییرات اوج بار و میانگین دما در ماه‌های مختلف شهرهایی که قابلیت استفاده از کولرهای آبی را دارند [۷] و [۹]

استفاده از کولرهای آبی باعث افزایش کیلووات ساعت مصرفی ماهانه هر خانوار می‌شود. با به‌کارگیری روشی که در قسمت‌های قبل برای استخراج اوج بار مصرفی معرفی شده است می‌توان کیلووات ساعت مصرفی مربوط به کولرهای آبی را نیز بدست آورد. در شکل‌های ۲-۲ تا ۲-۵ کیلووات ساعت مصرفی و دمای هشت شهری که قادر به استفاده از کولر آبی می‌باشند بر حسب پرینیت آورده شده است.

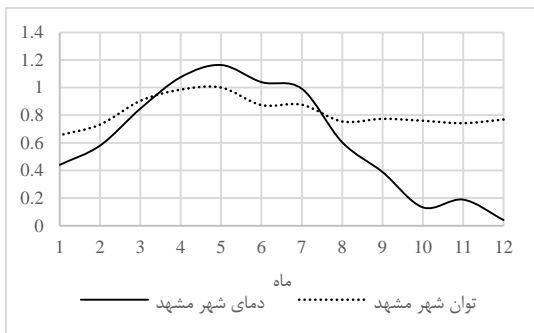


(b)

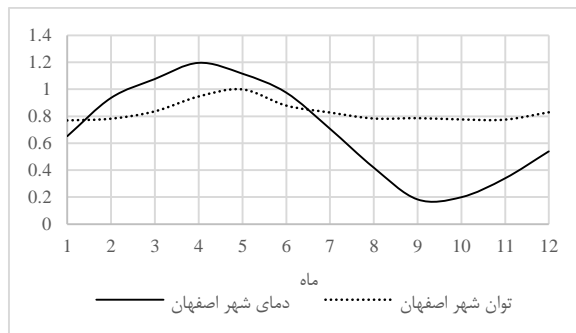


(a)

شکل ۲-۲: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) بیرجند و (b) بجنورد در ماه‌های مختلف [۷] و



(b)

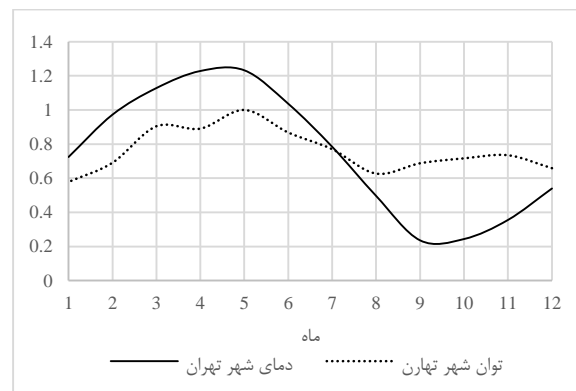


(a)

شکل ۲-۳: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) اصفهان و (b) مشهد در ماه‌های مختلف [۷] و [۹]

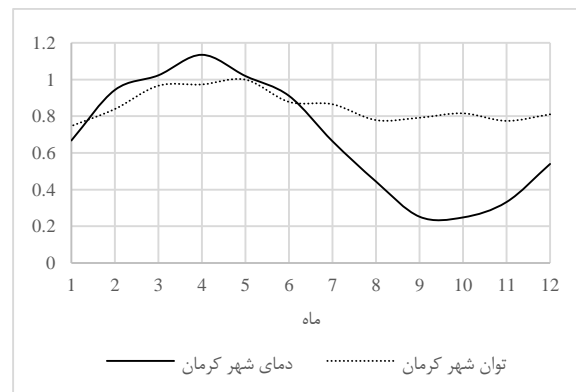
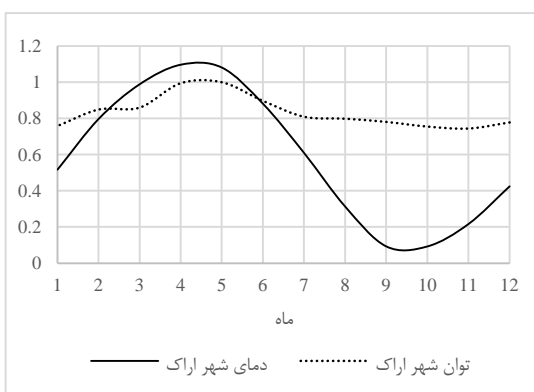


(b)



(a)

شکل ۲-۴: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) تهران و (b) کرج در ماه‌های مختلف [۷] و [۹]



شکل ۲-۵: میانگین دما و کیلووات ساعت مصرفی دو شهر (a) کرمان و (b) اراک در ماه‌های مختلف [۷] و [۹]

مصرف ماهانه کولرهای آبی هر خانوار ساکن این شهرها در جدول ۲-۶ آورده شده است.

جدول ۲-۳: مصرف ماهانه کولرهای آبی در ماه‌های گرم سال

شهر	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
اراک	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۵۰۹	۱۷۰۶۰۹	۳۵۰۳۴۲	۳۴۰۴۴۲	۱۱۰۲۳۷	۹۰۳۶۶۷	۰
اصفهان	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۳۵	۳۸۰۸۵	۵۶۰۰۲۲	۵۲۰۸۴۲	۳۴۰۶۱	۸۰۹۵۸۴	۰
بجنورد	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰۳۳۸۲	۱۴۰۶۸۴	۳۱۰۷۵۸	۲۴۰۲۱۴	۸۰۵۲۹۵	۰۰۷۸۶۳	۰
بیرجند	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰۵۰۰۱	۳۰۶۶۸۷	۳۲۰۴۰۴	۳۰۰۱۹۳	۲۹۰۳۰۹	۱۹۰۱۴۱	۰
تهران	۰	۰	۰	۰	۰	۳۸۰۴۹	۶۴۰۲۲۶	۹۸۰۹۴۸	۷۰۰۱۴۹	۷۳۰۸۵۵	۱۷۰۶۰۱	۰
کرج	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۰۴۱۷	۱۸۰۰۳۴	۲۱۰۹	۱۱۰۲۱۶	۹۰۲۸۳۵	۰	۰
کرمان	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۰۳۲۵	۱۹۰۷۸۸	۴۳۰۱۸۴	۲۸۰۱۲۱	۳۶۰۸۲۲	۱۲۰۲۶۳	۰
مشهد	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۰۹۶۵	۱۹۰۵۵۱	۳۹۰۴۱۳	۳۷۰۰۶۸	۲۴۰۲۷۹	۰	۰

اکنون می‌توان کیلووات ساعت مصرفی و اوج بار مصرفی نقاط مختلف کشور در ماه‌های مختلف را محاسبه کرد و با استفاده از آن توان مصرفی کولرهای آبی را استخراج نمود که نتایج در جدول ۲-۴ و جدول ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۲-۴: میانگین کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار در شهرهایی که قابلیت استفاده از کولر آبی را دارند

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
۱۶۳۰۴	۱۶۶۰۹	۱۶۴۰۳	۱۶۰۰۹	۱۵۷۰۲	۱۷۶۰۵	۱۹۳۰۸	۲۱۱۰۸	۲۰۱	۱۹۴۰۴	۱۶۳۰۱	۱۴۸۰۱

جدول ۲-۵: میانگین کیلووات ساعت مصرفی هر کولر آبی در شهرهایی که قابلیت استفاده از کولر آبی را

دارند

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۰۳	۳۶۰۶	۵۴۰۶	۴۳۰۸	۳۷۰۲	۵۰۹	۰

فصل سوم

موتورهای آهنربای دائم شار محوری

۱-۳- مقدمه

به دلیل شرایط آب و هوایی کشور ایران که در فصل پیش به آن پرداخته شده است بیش از ۶۵ درصد مصرف‌کنندگان خانگی از کولرهای آبی استفاده می‌کنند. موتورهای مورد استفاده در کولرهای آبی از نوع موتور القایی تکفاز می‌باشد که دارای بازده پایینی در حدود ۴۰ درصد می‌باشند. به دلیل تعداد زیاد و توان مصرفی قابل‌ملاحظه‌ای که کولرهای آبی دارند، افزایش بازده این نوع سیستم سرمازا که با افزایش بازده موتور مورد استفاده در آنها محقق می‌شود امری ضروری می‌باشد. با توجه به ساختمان کولر آبی و ویژگی‌های عملکردی که از موتور جایگزین انتظار می‌رود، موتور AFPM برای این جایگزینی پیشنهاد می‌شود.

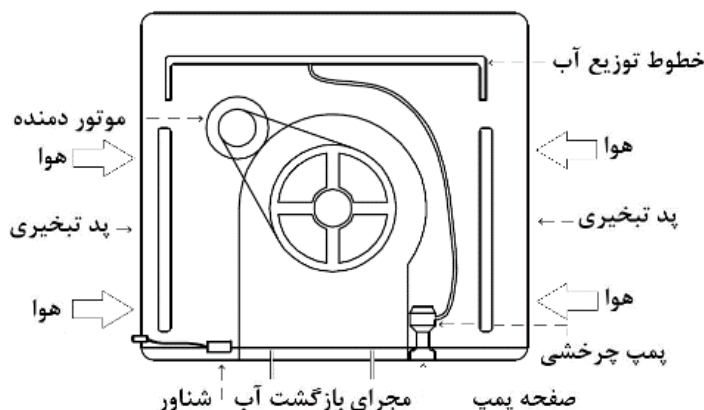
استفاده از موتورهای آهنربای دائم (PM^1) به دلیل دارا بودن مشخصه عملکرد خوب و نویز کم این نوع موتورها در حال افزایش است [۱۰]. کاهش قیمت مواد مغناطیس دائم و ادوات الکترونیک قدرت که بطور مستقیم بر قیمت تمام شده موتورها PM تأثیرگذار می‌باشد، باعث استفاده بیش از پیش این نوع موتورها در کاربردهای مختلف شده است [۱]. موتورهای PM از نظر جهت حرکت شار فاصله هوایی به دو دسته شار محوری (AF^2) و شار شعاعی (RF^3) تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار موتورهای $AFPM^4$ به دلیل حرکت محوری شار فاصله هوایی، به صورت دیسکی و موتورهای $RFPM^5$ به صورت استوانه‌ای می‌باشد.

۲-۳- ویژگی عملکردی موتور جایگزین

دستگاه‌های برودتی به دو نوع تبخیر مستقیم و غیرمستقیم تقسیم بندی می‌شوند [۵]. کولرهای آبی از جمله دستگاه‌های برودتی با تبخیر مستقیم هستند. در کولرهای آبی، مبرد (هوا) با تماس مستقیم با آب، دمای اولیه‌اش توأم با افزایش رطوبت کاهش یافته و سپس به محل مورد نظر هدایت می‌شود [۵]. به دلیل

1 - Permanent Magnet
2 - Axial Flux
3 - Radial Flux
4 - Axial Flux Permanent Magnet
5 - Radial Flux Permanent Magnet

افزایش بیش از حد رطوبت هوا، این دستگاه‌های سرمازا در مناطق گرم و مرطوب دارای کارایی لازم نیستند. کولر آبی دارای هفت قسمت اصلی است که در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳: قسمت‌های اصلی کولرهای آبی

فن کولر آبی باید در یک سرعت نسبتاً پایین به گردش درآید؛ اما طراحی و ساخت ماشین‌های القایی به دلیل محدودیت‌های طراحی معمولاً در سرعت‌های بالا قابل انجام می‌باشد؛ به عبارت دیگر طراحی موتورهای القایی برای کار در سرعت پایین باعث بزرگ شدن بیش از اندازه ابعاد ماشین می‌شود و این اندازه بزرگ خواسته‌ها و محدودیت‌های حجم و وزن کاربران را تأمین نمی‌کند. به همین دلیل ماشین‌های القایی تک فاز مورد استفاده در کولر آبی را دو سرعت طراحی می‌کنند که این دو سرعت در حدود ۱۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه است. به منظور حل مسئله سرعت از پولی یا فلکه و تسمه تبدیل سرعت استفاده می‌کنند. به دلیل وجود دو سرعت چرخش در کولرهای آبی، این نوع کولرها سطح آسایش پایینی را برای مصرف‌کنندگان خود فراهم می‌کنند. از طرف دیگر موتورهای مورد استفاده در کولرهای آبی از نوع القایی تک فاز می‌باشند که بازده تقریبی این موتورها در حدود ۴۰ درصد است. با توجه به بازده پایین موتورهای بکار رفته در کولرهای آبی و تعداد بسیار زیاد مصرف‌کنندگان خانگی که از این نوع سیستم سرمازا استفاده می‌کنند، بهبود و یا تغییر نوع موتور مورد استفاده در کولرهای آبی الزامی می‌باشد.

با توجه به مطالب گفته شده، جایگزینی که برای موتور تکفاز القایی انتخاب می‌شود باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱- بازده بالا و تقریباً ثابت با تغییر سرعت

۲- قابلیت تنظیم سرعت در یک محدوده وسیع

۳- قابلیت استفاده در کولر آبی

۴- قابلیت ایجاد اتصال مستقیم به فن کولر آبی در صورت نیاز (حذف سیستم تبدیل سرعت)

۳-۳- موتورهای آهنربای دائم شار محوری

به ماشین‌های الکتریکی که در آنها از آهنربای دائم به‌عنوان سیستم تحریک استفاده می‌شود، ماشین‌های آهنربای دائم گفته می‌شود. این نوع ماشین‌ها دارای ویژگی عملکردی مناسبی مانند بازده بالا و تقریباً ثابت در کسری از سرعت نامی، نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر، چگالی توان بالا (چگالی گشتاور بالا) می‌باشند. ساختار تخت باعث به وجود آمدن ویژگی‌های برجسته‌ای همچون چگالی گشتاور بالا و بازده بالا می‌شود. از طرف دیگر ماشین‌های AFPM از لحاظ تعداد روتور و استاتور و نحوه ساخت استاتور نیز دارای تنوع زیادی می‌باشند که این تنوع باعث افزایش کاربردهای آنها شده است. از جمله ساختارهای استاتور می‌توان به شیاردار بودن استاتور، عدم وجود شیار در استاتور و یا حذف هسته استاتور اشاره کرد. این ساختارهای متنوع مشخصه عملکردی تقریباً متفاوتی با یکدیگر دارند، به همین دلیل موتورهای AFPM برای کاربردهای مختلف مناسب می‌باشند. از جمله تفاوت عملکردی این نوع موتورها می‌توان به میزان نوسانات گشتاور، استحکام مکانیکی، بازده و چگالی گشتاور اشاره کرد. به عنوان مثال موتورهای AFPM شیاردار دارای گشتاور دندانه‌ای نسبتاً بزرگی هستند [۱۱]. موتورهای AFPM بدون هسته نیز استحکام مکانیکی پایینی دارند. ساختار AFPM بدون شیار نیز دارای سیم‌پیچی بسیار پیچیده و پرهزینه‌ای است. با توجه به مطالب

بیان شده برای یک کاربرد خاص باید تمامی جوانب سنجیده شده و با توجه به نیاز نوع ساختار استاتور موتور انتخاب شود. موتورهای AFPM از لحاظ تعداد روتور و استاتور نیز دارای تنوع زیادی می‌باشند که با توجه به نوع نیاز این تعداد انتخاب می‌شوند. به دلایل متفاوت ساختارهای دوطرفه گسترش بیشتری داشته- اند [۱]. این ساختار به دو صورت یک روتور و دو استاتور (AFIR^۱) و دو روتور و یک استاتور (TORUS) ساخته می‌شود [۲]. به دلیل پیچیده بودن فرآیند ساخت و سیم‌پیچی استاتور، استفاده بهینه از سیم‌پیچ‌ها و هسته استاتور، موتورهای AFPM با ساختار TORUS گسترش بیشتری پیدا کرده‌اند.

۳-۴- معادلات اندازه ماشین AFPM

معادلات اندازه ماشین‌های الکتریکی به روابطی گفته می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان اندازه قسمت- های مختلف ماشین را تعیین کرد. این معادلات از بررسی مسیر حرکت شار در ماشین بدست می‌آیند.

۳-۴-۱- معادلات اندازه ماشین AFPM بدون شیار

با صرف نظر از شار نشتی در ماشین‌های الکتریکی AFPM بدون شیار توان خروجی ماشین از معادله ۳-۱ قابل محاسبه می‌باشد [۱۲].

$$P_{out} = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e_{(t)} i_{(t)} dt = m K_p \eta E_{pk} I_{pk} \quad (۱-۳)$$

η بازده، m تعداد فازها، $e_{(t)}$ ولتاژ القایی ناشی از شار فاصله هوایی، $i(t)$ جریان یک فاز، K_p ضریب شکل موج توان الکتریکی، E_{pk} حداکثر مقدار Back EMF^۲ و I_{pk} حداکثر مقدار جریان یک فاز می‌باشد. مقدار K_p از معادله ۳-۲ قابل محاسبه می‌باشد.

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e_{(t)} i_{(t)}}{E_{pk} I_{pk}} dt \quad (۲-۳)$$

1 - Axial Flux Internal Rotor
1 - Electromotive force

با فرض اینکه شار فاصله هوایی و ولتاژ القایی ناشی از آن کاملاً سینوسی باشند، مقدار مؤثر Back EMF برای تمامی ماشین‌های الکتریکی از معادله ۳-۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$E_{ph-rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{ph} B_g A_g f K_w \quad (3-3)$$

که در آن E_{ph-rms} ولتاژ مؤثر فاز، K_w ضریب سیم‌پیچی، N_{ph} تعداد دور یک فاز، B_g چگالی شار میانگین فاصله هوایی، A_g سطح مقطع عبور شار و f فرکانس منبع تغذیه می‌باشد.

به دلیل رفتار غیرخطی آهن مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی، نحوه توزیع سیم‌پیچ‌ها و یا شکل شار ایجاد شده به وسیله آهنربای دائم، شار فاصله هوایی و Back EMF از حالت سینوسی خارج شده و معادله ۳-۳)۳-۳ دیگر برقرار نمی‌باشد. برای محاسبه دقیق میزان Back EMF از معادله ۳-۴ استفاده می‌شود.

$$E_p = V \times l B_{gp} K_w \quad (4-3)$$

که V سرعت حرکت هادی و یا سرعت تغییرات چگالی شار، l طول هادی، B_{gp} حداکثر چگالی شار و K_w ضریب سیم‌پیچی می‌باشد. با استفاده از معادله ۳-۴ در موتور شار محوری مغناطیس دائم TORUS می‌توان ولتاژ القایی را محاسبه کرد.

$$V = \frac{D_o(1 + \lambda)\pi}{4p} f \quad (5-3)$$

$$l = 4N_{ph} \frac{D_o(1 - \lambda)}{2} \quad (6-3)$$

$$E_p = K_e N_{ph} B_{gp} \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2 \quad (7-3)$$

که K_e شامل ضریب سیم‌پیچی و یک ضریب ثابت، p تعداد جفت قطب ماشین، D_o قطر خارجی ماشین، λ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی ماشین الکتریکی می‌باشد. جریان یک فاز ماشین با استفاده از معادله ۳-۸ قابل محاسبه است.

$$I_{ph} = \frac{\Delta \pi D_{ave}}{2m N_{ph}} \quad (8-3)$$

$$D_{ave} = D_o \frac{(1+\lambda)}{2} \quad (9-3)$$

$$I_{pk} = \frac{A\pi}{2mN_{ph}} D_o \frac{(1+\lambda)}{2} K_i \quad (10-3)$$

K_i ضریب شکل موج جریان می‌باشد که با استفاده از معادله ۱۱-۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$K_i = \frac{I_{pk}}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i(t)}{I_{pk}}\right)^2 dt}} \quad (11-3)$$

که I_{rms} مقدار جریان مؤثر یک فاز می‌باشد.

با استفاده از معادله ۷-۳ و ۱۰-۳ می‌توان معادله اساسی توان ماشین‌های AFPM را بدست آورد.

$$P_{out} = \eta m E_{pk} I_{pk} K_p \cos(\varphi) \quad (12-3)$$

$$P_{out} = \frac{\pi}{2} \eta K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \frac{(1+\lambda)}{2} \cos(\varphi) D_o^3 \quad (13-3)$$

حال می‌توان با استفاده از معادله ۱۳-۳ قطر خارجی ماشین را طبق معادله ۱۴-۳ محاسبه کرد.

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{P_{out}}{\frac{\pi}{2} \eta m K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \frac{(1+\lambda)}{2} \cos(\varphi)}} \quad (14-3)$$

باتوجه به اینکه رابطه بین شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی خطی نمی‌باشد، چگالی

شار مغناطیسی در نقاط مختلف باید بگونه‌ای انتخاب شود که هسته استاتور و رتور وارد اشباع مغناطیسی

نشود. با توجه به این موضوع می‌توان طول هسته استاتور را از معادله ۱۵-۳ محاسبه کرد.

$$L_{cs} = \frac{B_{gp} K_a t_p}{2B_{cs}} \quad (15-3)$$

که L_{cs} طول هسته استاتور، t_p گام قطب، B_{cs} حداکثر مقدار چگالی شار در استاتور و K_a نسبت متوسط

چگالی شار به حداکثر مقدار چگالی شار در فاصله هوایی می‌باشد.

$$t_p = \frac{\pi D_o}{4p} (1 + \lambda) \quad (۱۶-۳)$$

$$K_a = \frac{B_g}{B_{gp}} \cong \frac{2}{\pi} \quad (۱۷-۳)$$

با استفاده از معادله ۱۵-۳ الی ۱۷-۳ داریم:

$$L_{cs} = \frac{B_{gp} K_a \pi D_o (1 + \lambda)}{8p B_{cs}} \quad (۱۸-۳)$$

به دلیل ساختار دوطرفه، شار فاصله هوایی از دو سمت وارد استاتور می‌شود، به همین دلیل ضخامت استاتور دو برابر مقدار محاسبه‌شده در معادله ۱۸-۳ در نظر گرفته می‌شود. حال با روش مشابه می‌توان طول هسته روتور را نیز بدست آورد.

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{8p B_{cr}} \quad (۱۹-۳)$$

$$B_u = \frac{B_g}{K_d} \quad (۲۰-۳)$$

که B_u نسبت چگالی شار فاصله هوایی به ضریب نشتی می‌باشد. تمامی شار به وجود آمده به وسیله آهنربای دائم از هسته استاتور عبور نمی‌کند و یا آن را بطور کامل دور نمی‌زند به عبارت دیگر شار ایجاد شده به وسیله آهنربای دائم دارای نشتی می‌باشد. در ماشین‌های بدون شیار این نشتی به دو صورت نشتی زیگزاگ و نشتی بین آهنربای دائم با آهن روتور اتفاق می‌افتد. این دو نشتی از معادله ۲۱-۳ قابل محاسبه می‌باشند [۱۳].

$$K_d = \frac{1}{1 + (\mu_r \frac{g w_{pm}}{L_{pm} (w_{pm} + 2g)}) (\frac{2L_{pm}}{\pi \mu_r w_{pm}} \ln(1 + \frac{\pi g}{L_{pm}}) + \frac{4L_{pm}}{\pi \mu_r w_{pm}} \ln(1 + \frac{\pi g}{t_p - w_{pm}}))} \quad (۲۱-۳)$$

که L_{pm} ضخامت، μ_r ضریب نفوذپذیری نسبی و w_{pm} عرض متوسط آهنربای دائم می‌باشد. برای محاسبه طول آهنربای دائم از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود اما از معادله ۲۵-۳ به عنوان یک شیوه متداول برای محاسبه ضخامت آهنربا استفاده می‌شود. در این رابطه از تأثیر بسزای عرض آهنربا بر ضخامت

آهنربا صرف نظر شده است که این امر باعث کاهش دقت طراحی می شود [۱].

$$L_{pm} = \frac{\mu_r B_g}{B_r - \frac{B_{gp}}{K_d}} K_c (g + W_{cu}) \quad (22-3)$$

برای محاسبه دقیق ضخامت آهنربای دائم می توان از معادله ۲۳-۳ استفاده کرد:

$$L_{pm} = \frac{t_p \cdot \log \left(\frac{e^{-\frac{2\pi g}{t_p}} - \frac{16 * B_r * e^{-\frac{\pi g}{t_p}} * \sin\left(\frac{\pi * \alpha}{2}\right) + 1}{B_g * \pi^2}}{U_r * \left(e^{-\frac{2\pi g}{t_p}} - 1 \right)} + 1 \right)}{2 * \pi} \quad (23-3)$$

ضخامت آهنربای دائم به دست آمده از معادله ۲۳-۳ را می توان با استفاده از معادله ۲۴-۳ اعتبار سنجی

کرد [۱۳].

$$B_{pm} = - \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\frac{8B_r}{n\pi} \sin\left(\frac{\alpha n \pi}{2}\right) e^{-\frac{n\pi(g+W_{cu})}{t_p}} \cos\left(\frac{n\pi x}{t_p}\right)}{\left(e^{-\frac{2n\pi(g+W_{cu})}{t_p}} + 1 \right) + \frac{\mu_r \left(-e^{-\frac{2n\pi(g+W_{cu})}{t_p}} + 1 \right) \left(e^{\frac{2n\pi L_{pm}}{t_p}} + 1 \right)}{\left(e^{\frac{2n\pi L_{pm}}{t_p}} - 1 \right)}} \quad (24-3)$$

ضخامت لایه سیم پیچی یکی از عوامل تأثیرگذار بر ضخامت آهنربای دائم می باشد. در سیم پیچی

ماشین های AFPM قطر داخلی ماشین الکتریکی محدودکننده تعداد دورهای قرار گرفته شده در کنار

یکدیگر می‌باشد. به همین دلیل ضخامت لایه سیم‌پیچی به قطر داخلی ماشین الکتریکی وابسته می‌باشد. ضخامت لایه سیم‌پیچی از معادله ۳-۲۵ قابل محاسبه می‌باشد.

$$W_{cu} = \frac{D_o \lambda - \sqrt{(D_o \lambda)^2 - \frac{12}{\pi K_{cu}} N_{ph} A_{cu}}}{2} \quad (۳-۲۵)$$

که A_{cu} سطح مقطع سیم، N_{ph} تعداد دور هر فاز و K_{cu} ضریب پرکنندگی سیم‌پیچ‌ها می‌باشد.

چگالی توان ماشین نسبت توان خروجی ماشین الکتریکی به حجم اشغال‌شده به وسیله آن می‌باشد که با استفاده از معادله ۳-۲۶ قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{\frac{\pi}{4} D_o^2 L_{tot}} \quad (۳-۲۶)$$

که L_{tot} طول محوری ماشین الکتریکی است که از معادله ۳-۲۷ قابل محاسبه می‌باشد.

$$L_{tot} = L_{cs} + 2L_{cr} + 2W_{cu} + 2g + 2L_{pm} \quad (۳-۲۷)$$

۳-۴-۲- معادلات اندازه ماشین AFPM بدون هسته

معادلات اندازه حاکم بر ماشین‌های الکتریکی AFPM بدون هسته تا حدود زیادی همانند ماشین‌های الکتریکی AFPM بدون شیار می‌باشد. تفاوت عمده بین این دو ماشین، عدم وجود هسته استاتور در ماشین AFPM بدون هسته است. بنابراین می‌توان معادلات اندازه ماشین‌های AFPM بدون شیار را برای ماشین‌های AFPM بدون هسته مورد استفاده قرار داد با این تفاوت که در معادلات اندازه باید مقدار ضخامت هسته استاتور را برابر با صفر ($L_{cs} = 0$) قرار داد.

۳-۴-۳- معادلات اندازه ماشین AFPM شیار دار

معادلات اندازه ماشین AFPM شیار دار نیز تا حدود بسیار زیادی مشابه ماشین AFPM بدون شیار

می‌باشد. عاملی که باعث ایجاد تفاوت این دو ماشین با یکدیگر می‌شود وجود شیار در هسته استاتور می‌باشد. دو پارامتر اصلی تشکیل دهنده شیار، عرض و عمق آن است. عرض و عمق شیار باید بگونه‌ای انتخاب شود که دندانه‌های استاتور وارد اشباع مغناطیسی نشوند و شیار فضای کافی برای جا دادن سیم‌پیچ‌ها داشته باشد. برای محاسبه ابعاد شیار در ابتدا به محاسبه میزان شار در فاصله هوایی پرداخته می‌شود. میزان شار فاصله هوایی از معادله ۲۸-۳ قابل محاسبه است.

$$\varphi_g = \frac{B_g L D_{ave} \pi}{2p} \quad (28-3)$$

$$D_{ave} = \frac{D_o(1 + \lambda)}{2} \quad (29-3)$$

$$L = \frac{D_o(1 - \lambda)}{2} \quad (30-3)$$

که D_{ave} قطر متوسط ماشین و L تفاضل شعاع خارجی از شعاع داخلی موتور می‌باشد. حال می‌توان عرض دندانه را بگونه‌ای تعیین کرد که دندانه‌های استاتور وارد اشباع نشود. عرض دندانه استاتور از معادله ۳۱-۳ قابل محاسبه است.

$$t_s = \frac{2p\varphi_g}{LzB_{ts}} \quad (31-3)$$

$$z = 2pm \quad (32-3)$$

که t_s عرض دندانه، B_{ts} حداکثر چگالی شار دندانه و z تعداد شیار استاتور می‌باشد. حال به سادگی می‌توان عرض شیار استاتور را نیز محاسبه کرد. عرض شیار استاتور از معادله ۳۳-۳ قابل محاسبه است.

$$w_s = \frac{D_o \lambda \pi}{z} - t_s \quad (33-3)$$

که w_s عرض شیار استاتور می‌باشد. حال با محاسبه حجم اشغال شده به وسیله سیم‌پیچ‌ها می‌توان عمق شیار استاتور را نیز محاسبه نمود.

$$h_s = \frac{A_s}{K_{cu} w_s} 10^{-6} \quad (34-3)$$

$$A_s = \frac{2N_{ph} A_{cu}}{z} 10^{-6} \quad (35-3)$$

که A_s حجم اشغال شده در یک شیار توسط سیم‌پیچ‌ها و h_s عمق شیار استاتور است. طول محوری این نوع ماشین با استفاده از معادله ۳-۳۶ قابل محاسبه می‌باشد.

$$L_{tot} = L_{cs} + 2L_{cr} + 2h_s + 2g + 2L_{pm} \quad (36-3)$$

به دلیل وجود شیارها، فاصله هوایی مؤثر بیشتر از مقدار فاصله هوایی فیزیکی می‌باشد. برای بدست آوردن فاصله هوایی مؤثر از معادله ۳-۳۷ استفاده می‌شود [۱۴].

$$g' = g * K_c \quad (37-3)$$

$$K_c = \frac{y_s}{\left(\frac{w_s}{g}\right)^2 g} \quad (38-3)$$

$$y_s = \frac{5 + \frac{w_s}{g}}{5 + \frac{w_s}{g}}$$

$$y_s = \frac{D_o * \lambda * \pi}{z} \quad (39-3)$$

که g' طول فاصله هوایی مؤثر، K_c ضریب کارتر، y_s گام شیار استاتور و z تعداد شیار استاتور می‌باشد.

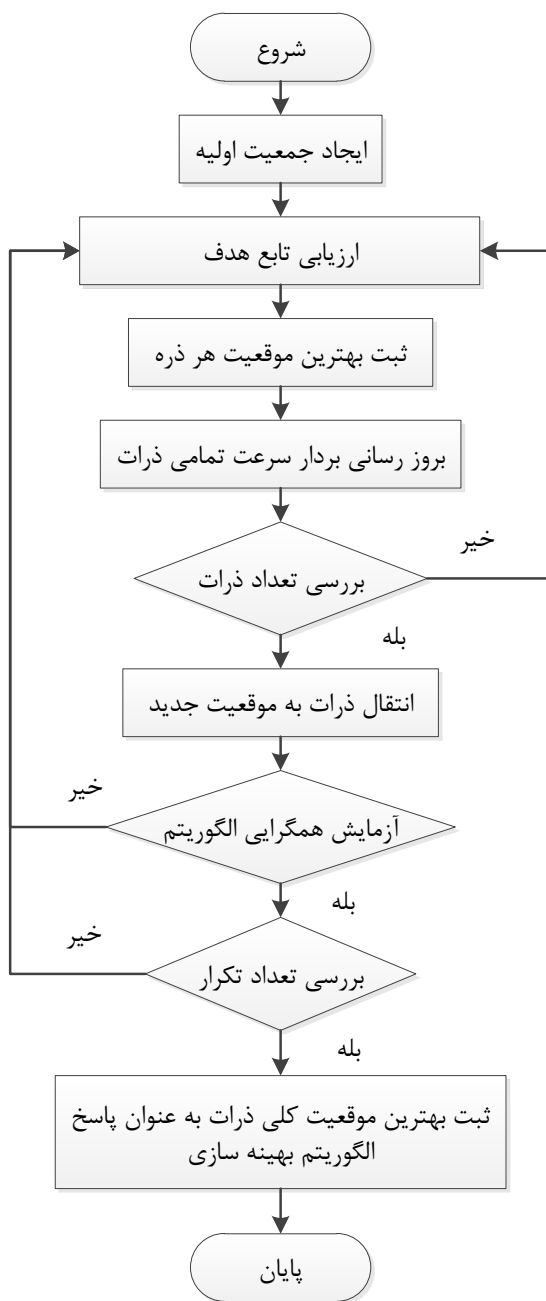
به دلیل وجود شیار در هسته استاتور شار فاصله هوایی و در نتیجه Back EMF ایجاد شده دارای THD تقریباً بالایی می‌باشد. به منظور کاهش میزان THD از روش مورب کردن آهنربای دائم استفاده می‌شود. این روش در مرجع [۱] بطور کامل تشریح شده است.

۳-۵ الگوریتم بهینه‌سازی PSO

در ماشین‌های PM بر خلاف ماشین‌های القایی از آهنربای دائم به‌عنوان سیستم تحریک استفاده می‌شود. با توجه به قیمت بالای مواد مغناطیس دائم، استفاده از این مواد باعث افزایش قیمت تمام شده ماشین‌های PM می‌شود. برای عملی بودن استفاده از موتور AFPM در کولرهای آبی باید قیمت تمام شده این نوع موتور تا حد امکان کاهش پیدا کند تا هزینه اولیه به سرعت قابل بازگشت باشد. از همین رو حداقل‌سازی آهنربای دائم مصرفی امری ضروری می‌باشد. بدین منظور باید از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم PSO برای حداقل‌سازی آهنربای دائم استفاده شود.

طراحی ماشین‌های الکتریکی با هدف حداقل‌سازی آهنربای دائم مصرفی، یک تابع بهینه‌سازی چند منظوره با پیچیدگی زیاد بین روابط طراحی می‌باشد. این پیچیدگی باعث افزایش زمان اجرا برنامه نیز می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم برای کاهش مدت زمان اجرا برنامه‌های متفاوت نوشتن برنامه به صورت موازی است. به دلیل ساختار PSO نوشتن این الگوریتم به صورت موازی امکان پذیر نمی‌باشد.

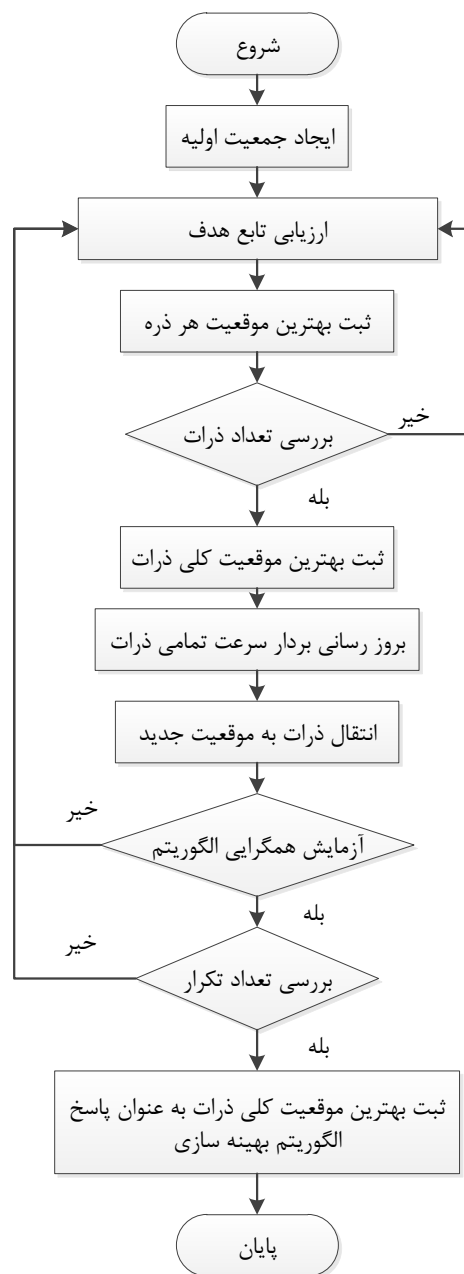
فلوچارت PSO مرسوم در فلوچارت ۳-۱ آورده شده است [۱۵] که به دلیل وابستگی موقعیت ذرات به نقاط بهینه محلی و سراسری در حلقه داخلی الگوریتم، قابلیت اجرا بصورت موازی را ندارد.



فلوچارت ۱-۳: الگوریتم PSO مرسوم

با اعمال تغییرات جزئی در ساختار PSO مرسوم می‌توان این الگوریتم بهینه‌سازی را به صورت موازی

نوشت و اجرا نمود. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی تغییر یافته در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.



فلوچارت ۲-۳: الگوریتم PSO تغییر یافته

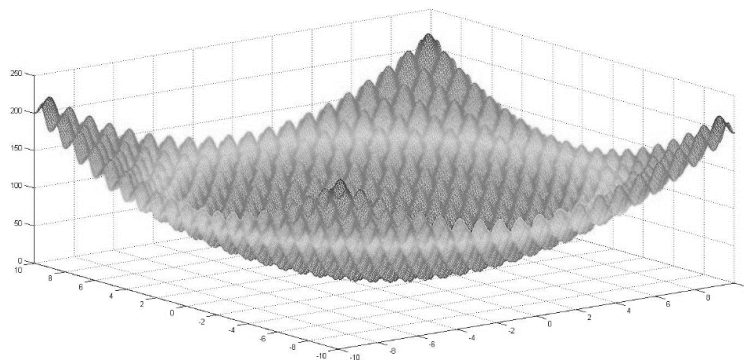
الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیازمند متغیرهایی هستند که با تغییر آنها بین بازه‌های تعیین‌شده به پاسخ بهینه دست پیدا کنند. متغیرهای مورد استفاده در تابع بهینه‌سازی موتور مورد نظر شامل تعداد جفت قطب، ولتاژ ورودی، چگالی جریان، بارگذاری الکتریکی، نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، چگالی شار فاصله هوایی، نسبت عرض آهنربای دائم به گام قطب و طول فاصله هوایی می‌باشد.

۳-۱-۵- تابع محک

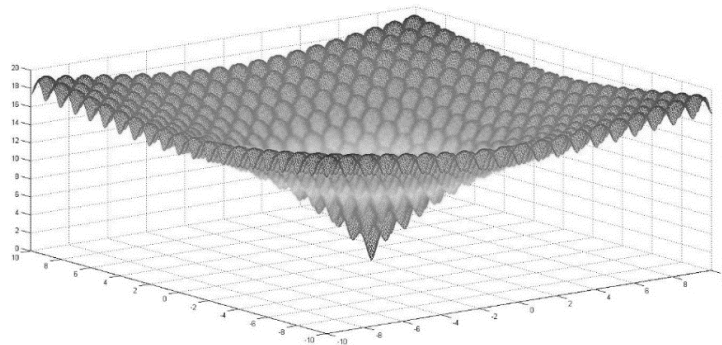
توابع محک برای بررسی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود. برای مقایسه عملکرد الگوریتم PSO مرسوم با الگوریتم PSO تغییر یافته از تابع محک استفاده می‌شود. معادله این دو تابع محک در معادلات ۳-۴۰ و ۳-۴۱ نشان داده شد.

$$F_{\text{Rastrigin}} = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad (3-40)$$

$$F_{\text{Ackley}} = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + \exp(1) \quad (3-41)$$



شکل ۳-۲: ترسیم معادله ۳-۴۰ با استفاده از سه متغیر (Rastrigin)

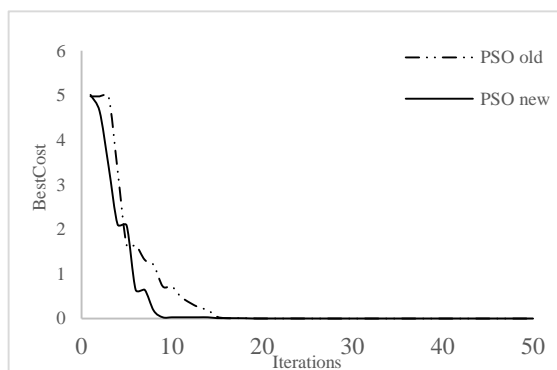


شکل ۳-۳: ترسیم معادله ۳-۴۱ با استفاده از سه متغیر (Ackley)

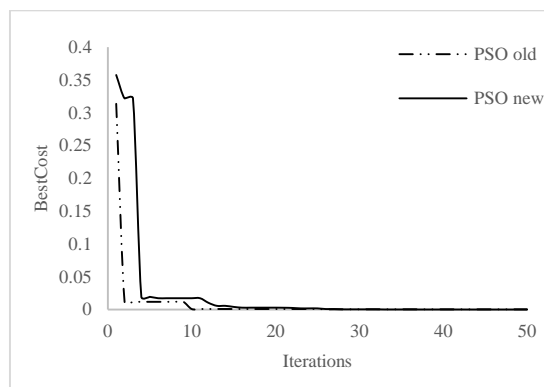
جدول ۳-۱: مشخصات الگوریتم PSO مورد استفاده برای بهینه‌سازی توابع محک معرفی شده

$C_1 = 1.49$	ضریب آموزش شخصی
$C_2 = 1.49$	ضریب آموزش سراسری
$N_{pop} = 1000$	تعداد جمعیت
$MaxIt = 50$	حداکثر تعداد چرخش
$VelMax = 10$	حداکثر سرعت ذرات
$VelMin = -10$	حداقل سرعت ذرات

نتایج حاصل از الگوریتم PSO مرسوم و تغییر یافته به صورت زیر می‌باشد.



(b)



(a)

شکل ۳-۴: مقایسه نتایج بهینه‌سازی تابع (a) Rastrigin (b) Ackley با استفاده از دو الگوریتم معرفی شده

همانطور که از شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، PSO تغییر یافته نیز دارای عملکرد مناسبی است.

پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی برای کردن موتور AFPM در جدول ۳-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۲: مشخصات الگوریتم PSO مورد استفاده برای بهینه‌سازی ماشین‌های AFPM معرفی شده

$C_1 = 1.49$	ضریب آموزش شخصی
$C_2 = 1.49$	ضریب آموزش سراسری
$N_{pop} = 1000$	تعداد جمعیت
$MaxIt = 30$	حداکثر تعداد چرخش
$VelMax = 0.1(VarMax - Varmin)$	حداکثر سرعت ذرات
$VelMin = -0.1(VarMax - Varmin)$	حداقل سرعت ذرات

۳-۶- طراحی موتور شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از معادلات اندازه

در این قسمت با استفاده از معادلات اندازه ماشین‌های AFPM بیان شده در قسمت ۳-۴-۳، الگوریتم PSO تغییر یافته بیان شده در قسمت ۳-۵-۳ و به‌کارگیری نرم‌افزار Matlab 2014a 32Bit سه نوع موتور الکتریکی AFPM دو رتور و یک استاتور طراحی شده و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه می‌شود. نتایج طراحی موتورهای مختلف به منظور به‌کارگیری در کولر آبی به‌صورت خلاصه در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۳: مشخصات ماشین AFPM شیار دار طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه

λ	α	$B_g(T)$	$g(mm)$	P	$V_L(V)$	$J_s(I/mm^2)$	A
۰,۷	۰,۶۴۱۲	۰,۳۵	۲	۵	۹۷,۸۸	۴	۱۹۷۳۱
N_{ph}	$h_s(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$	$D_o(mm)$	$L_{cs}(mm)$	$L_{cr}(mm)$	$L_{pm}(mm)$
۱۲۱۰	۴,۵۸۲۴	۰,۹۰۰۳	۰,۳۰۰۳	۲۰۴,۳۸	۱۲,۷۸۸۱	۶,۸۹۲۴	۲,۹۸۷۷

مشخصات موتور طراحی شده برای یک کولر آبی با میزان هوادهی ۴۶۰۰ مترمکعب بر فوت در جدول

۳-۳ نمایش داده شده است. آهنربای دائم استفاده شده در موتور طراحی شده از نوع NdFeB^1 با چگالی پسماند $1/3$ تسلا ($B_r = 1.3 \text{ T}$)، چگالی جرمی $7000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ و قیمت برای هر کیلوگرم برابر $5,000,000$ ریال است. به دلیل اینکه در موتورهای القایی مورد استفاده در کولرهای آبی معمول از آهنربای دائم استفاده نمی‌شود، وجود این آهنربای دائم باعث افزایش قیمت اولیه کولر آبی بهبود یافته نسبت به کولرهای آبی معمول می‌شود. با توجه به مشخصات آهنربای دائم استفاده شده در موتور AFPM طراحی شده، قیمت آهنربای مصرفی در این موتور از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قابل محاسبه است.

$$w = \pi(1 - \lambda^2) \frac{D_o^2}{4} L_{pm} \rho \quad (42-3)$$

$$m_{pm} = wp \quad (43-3)$$

که w وزن آهنربای دائم مصرفی، m_{pm} قیمت آهنربای دائم مصرفی و p قیمت آهنربای دائم به ازای هر کیلوگرم است. هزینه آهنربای مصرفی در موتور طراحی شده برابر $1,295/526$ ریال است.

جدول ۳-۴: مشخصات ماشین AFPM شیار دار طراحی شده در سرعت 1500 دور بر دقیقه

λ	α	$B_g(\text{T})$	$g(\text{mm})$	P	$V_L(\text{V})$	$J_s(\text{I}/\text{mm}^2)$	A
۰,۷	۰,۵۹۵۴	۰,۳۵	۲	۴	۱۰۵,۹۲	۴,۷۵	۳۰۰۰
N_{ph}	$h_s(\text{mm})$	n	$P_{den}(\text{w}/\text{mm}^2)$	$D_o(\text{mm})$	$L_{cs}(\text{mm})$	$L_{cr}(\text{mm})$	$L_{pm}(\text{mm})$
۹۳۳	۴,۵۵	۰,۹۳۷۴	۱,۰۸۱	۱۱۸,۶۴	۸,۵۱۵۸	۵,۱۸۹۳	۲,۸۲۶۷

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قیمت آهنربای دائم مصرفی $372/437$ ریال بدست می‌آید.

جدول ۳-۵: مقایسه پارامترهای موتور AFPM طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

قیمت آهنربای مصرفی (ریال)	$L_{pm}(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$	
۱,۲۹۵,۰۰۰	۲,۹۸۷۷	۰,۹۰۰۳	۰,۳۰۰۳	۳۰۰ دور بر دقیقه
۳۷۲,۰۰۰	۲,۸۲۶۷	۰,۹۳۷۴	۱,۰۸۱	۱۵۰۰ دور بر دقیقه

جدول ۳-۶: مشخصات ماشین AFPM بدون شیار طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه

λ	α	$B_g(T)$	g(mm)	P	$V_L(V)$	$J_s(I/mm^2)$	A
۰,۶۴۶۱	۰,۶۹۹۴	۰,۴۲۶۵	۱,۰۰۰۲۵	۵	۷۲	۴	۱۹۷۳,۳
N_{ph}	$w_{cu}(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$	$D_o(mm)$	$L_{cs}(mm)$	$L_{cr}(mm)$	$L_{pm}(mm)$
۷۱۰	۳,۶۷۵۳	۰,۹۰۰۲	۰,۲۴۹۲	۲۱۱,۳۰۱۶	۱۵,۵۳۵۴	۸,۷۷۶۹	۴,۵۲۳۶

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قیمت آهنربای دائم مصرفی ۲,۵۲۲/۸۰۸ ریال بدست می‌آید.

جدول ۳-۷: مشخصات ماشین AFPM بدون شیار طراحی شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

λ	α	$B_g(T)$	g(mm)	P	$V_L(V)$	$J_s(I/mm^2)$	A
۰,۷	۰,۶۹۵۷	۰,۳۵۰۲	۱,۰۰۰۴	۴	۱۸۹,۸۷	۶	۲۰۱۷۸
N_{ph}	$w_{cu}(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$	$D_o(mm)$	$L_{cs}(mm)$	$L_{cr}(mm)$	$L_{pm}(mm)$
۱۳۴۷	۲,۵۰۲	۰,۹۲۳۴	۱,۰۰۶۹۶	۱۳۴,۲۱۶	۸,۳۶۳۸	۸,۳۶۳۸	۲,۲۸۶۱

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قیمت آهنربای دائم مصرفی ۴۵۱/۶۱۹ ریال بدست می‌آید.

جدول ۳-۸: مقایسه پارامترهای موتور AFPM بدون شیار طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر

دقیقه

قیمت آهنربای مصرفی (ریال)	L_{pm} (mm)	n	P_{den} (w/mm ²)	
۲,۵۲۲,۰۰۰	۴,۴۲۳۶	۰,۹۰۰۲	۰,۲۴۹۲	۳۰۰ دور بر دقیقه
۴۵۱,۰۰۰	۲,۲۸۶۱	۰,۹۲۳۴	۱,۰۶۹۶	۱۵۰۰ دور بر دقیقه

جدول ۳-۹: مشخصات ماشین AFPM بدون هسته طراحی شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه

λ	α	B_g (T)	g(mm)	P	V_L (V)	J_s (I/mm ²)	A
۰,۷	۰,۶۹۵۷	۰,۳۴۹	۱,۰۰۰۴۸	۵	۱۶۱,۵۰۹۶	۵,۰۳۶	۲۸۳۱۰
N_{ph}	w_{cu} (mm)	n	P_{den} (w/mm ²)	D_o (mm)	L_{cs} (mm)	L_{cr} (mm)	L_{pm} (mm)
۲۳۱۷	۸,۰۳۸۳	۰,۹۰۰۳	۰,۳۲۹۲۹	۲۰۷,۲۹۷۹	۰	۷,۴۱۵۷	۳,۰۷۸۶۷

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قیمت آهنربای دائم مصرفی ۱,۶۳۷/۰۷۹ ریال بدست می آید.

جدول ۳-۱۰: مشخصات ماشین AFPM بدون هسته طراحی شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

λ	α	B_g (T)	g(mm)	P	V_L (V)	J_s (I/mm ²)	A
۰,۷	۰,۶۹۹۷	۰,۳۵	۱,۰۰۰۱۸	۴	۱۵۰,۴۸۴	۶	۲۴۵۴۵
N_{ph}	w_{cu} (mm)	n	P_{den} (w/mm ²)	D_o (mm)	L_{cs} (mm)	L_{cr} (mm)	L_{pm} (mm)
۱۳۱۴	۶,۴۹۶۴	۰,۹۴۵۳	۱,۴۸۴۲	۱۲۴,۸۹۶۹	۰	۵,۷۰۷۸	۲,۰۹۸۹۱

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۳ قیمت آهنربای دائم مصرفی ۴۷۰/۰۹۹ ریال بدست می آید.

جدول ۳-۱۱: مقایسه پارامترهای موتور AFPM بدون هسته طراحی شده در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

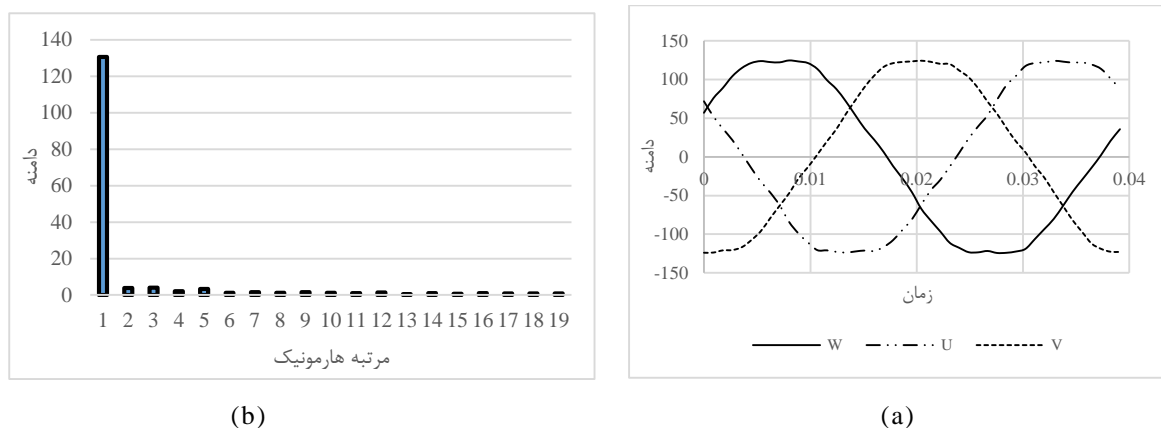
قیمت آهنربای مصرفی (ریال)	L_{pm} (mm)	n	P_{den} (w/mm ²)	
۱,۶۳۷,۰۷۹	۳,۷۸۶۷	۰,۹۰۰۲	۰,۳۲۹۲۹	۳۰۰ دور بر دقیقه
۴۷۰,۰۰۰	۲,۹۸۹۱	۰,۹۴۵۳	۱,۱۳۴	۱۵۰۰ دور بر دقیقه

۳-۷- شبیه‌سازی با استفاده روش اجزاء محدود (FEM^۱)

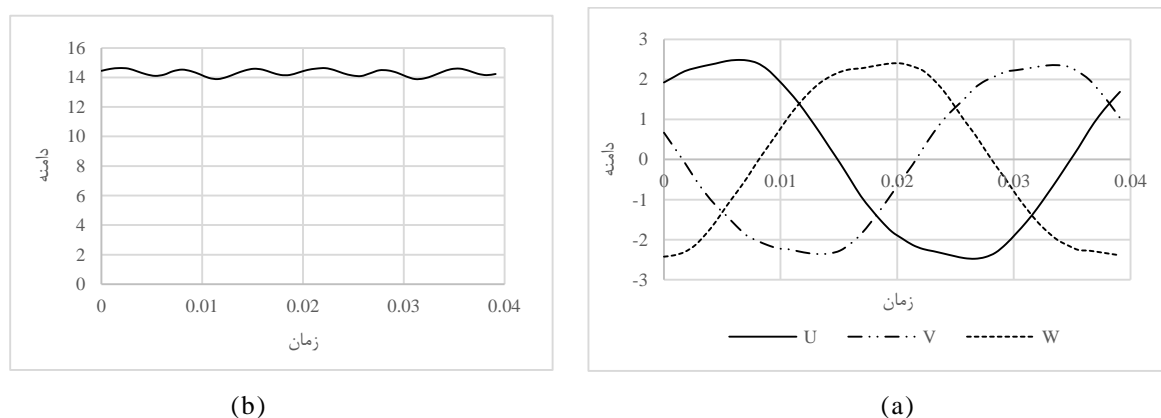
به منظور اعتبارسنجی طراحی انجام‌شده به وسیله معادلات اندازه و الگوریتم PSO از روش اجزاء محدود استفاده می‌شود. در انتها نتایج به‌دست‌آمده به وسیله معادلات اندازه و شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا دقت معادلات اندازه معرفی شده اعتبار سنجی شود. به دلیل تعداد موتورهای شبیه‌سازی شده در این پایان‌نامه، سعی بر این است که به نتایج مهم و قابل بحث پرداخته شود. در همین راستا شکل موج Back EMF و تبدیل فوریه سریع (FFT^۲) آن، جریان ورودی و گشتاور خروجی موتور نمایش داده می‌شود.

1 - Finite Element Method
2 - Fast Fourier Transformer

۳-۷-۱- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۳-۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه



شکل ۳-۶: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

همانطور که در شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ مشهود می‌باشد، شکل موج Back EMF به مقدار سینوسی بسیار نزدیک می‌باشد که این امر موجب کاهش THD جریان ورودی موتور و در نتیجه کاهش نوسانات گشتاور می‌شود. با توجه به این مطالب، اگر شکل موج Back EMF موتور الکتریکی به مقدار سینوسی نزدیک باشد،

گشتاور خروجی موتور نیز دارای نوسانات کمی است.

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۲ آورده شده است.

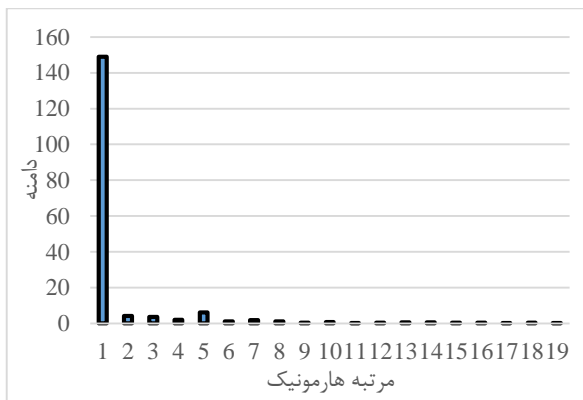
جدول ۳-۱۲: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM شیپار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

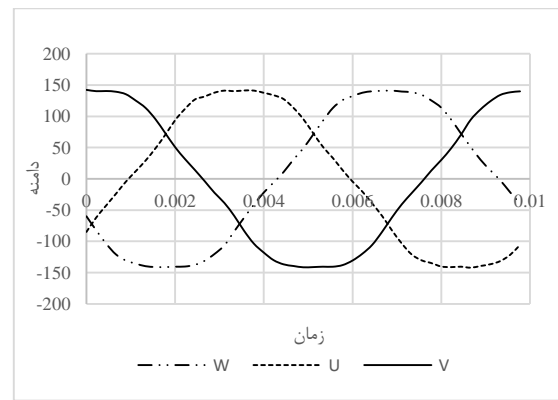
	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۳۵۱	۱,۴۶۸۹	۱,۲۸۶۷	۱,۴۰۷۲	۰,۸۸۵	۰,۹۶۵۹	۹۱,۳۹۵۲	۱,۷۱۲۳
معادلات اندازه	۰,۳۵۰۴	۱,۰۵	۱,۰۵	۱,۴۱	۰,۹	۰,۹۸	۹۰,۰۴۶	۱,۷۰۸۶

۳-۷-۲- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیپاردار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر

دقیقه



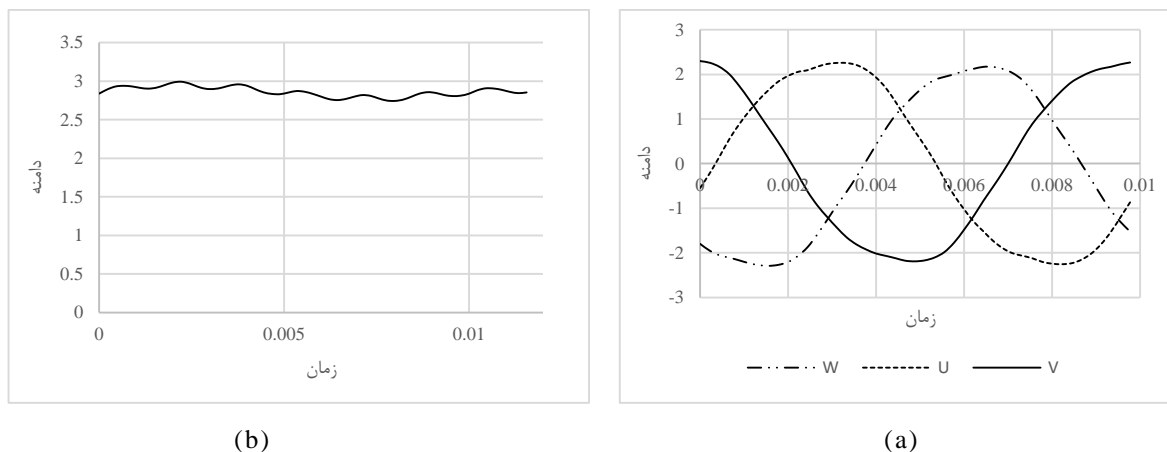
(b)



(a)

شکل ۳-۷: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیپار دار با سرعت

۱۵۰۰ بر دقیقه



شکل ۳-۸: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

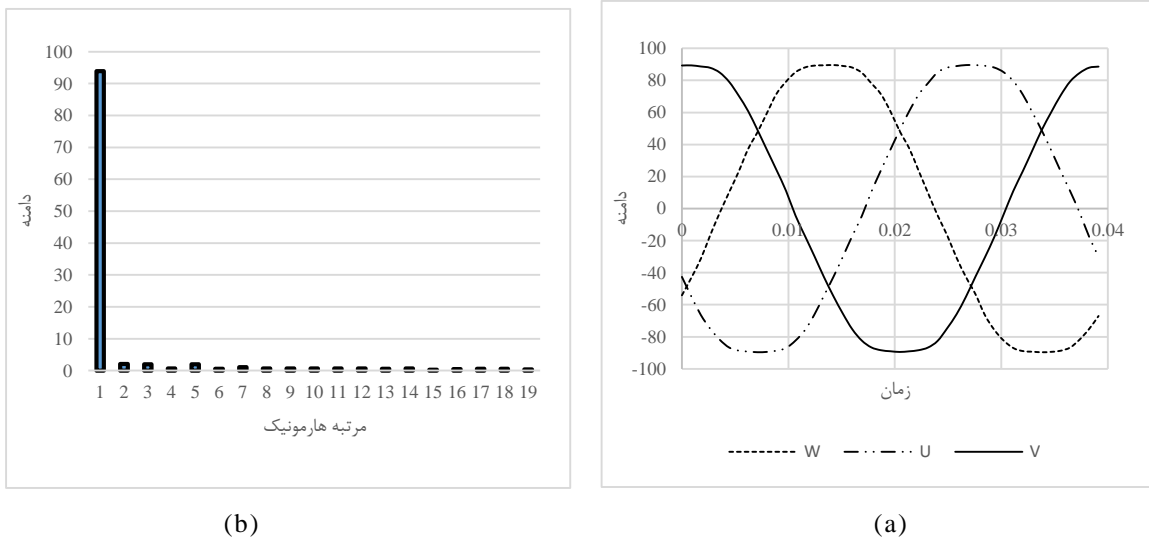
مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۳ آورده شده است.

جدول ۳-۱۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

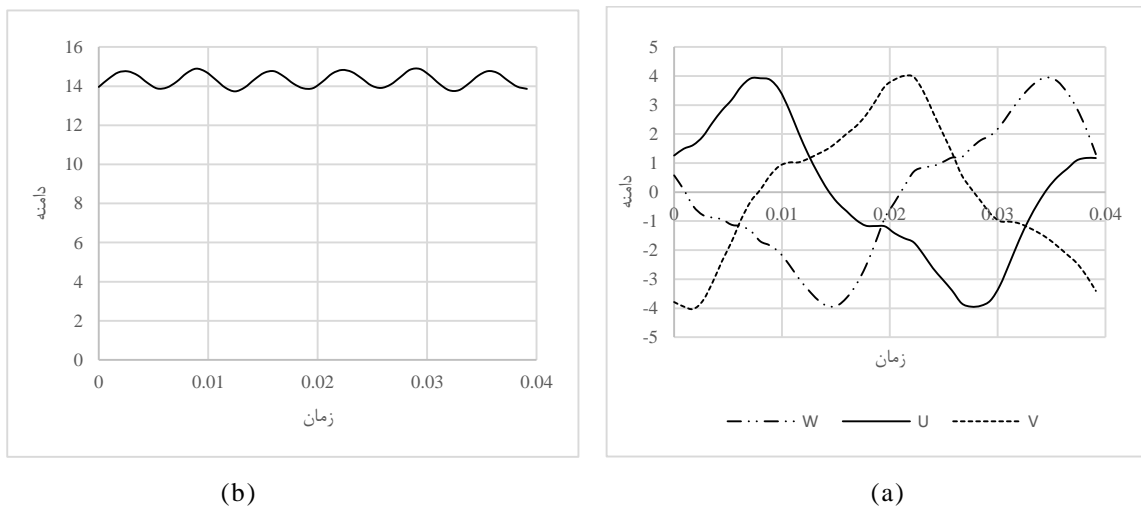
	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۴۰۲	۱,۳۵۱	۱,۵۰۳	۱,۳۵۱۷	۰,۹۲۳۴	۰,۹۶۵۹	۱۰۴,۵	۱,۵۱۹۳
معادلات اندازه	۰,۳۵	۱,۵	۱,۵	۱,۴۱	۰,۹۳۷۴	۰,۹۸	۱۰۲,۴۱	۱,۵۱۸۵

۳-۷-۳- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۳۰۰ دور بر

دقیقه



شکل ۳-۹: (a) شکل موج Back EMF (b) تمذیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه



شکل ۳-۱۰: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۴ آورده شده است.

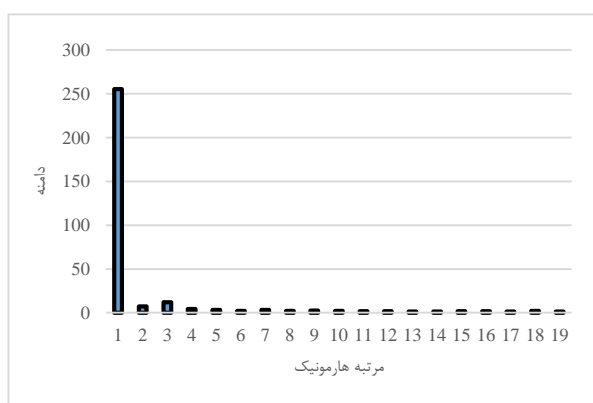
جدول ۳-۱۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

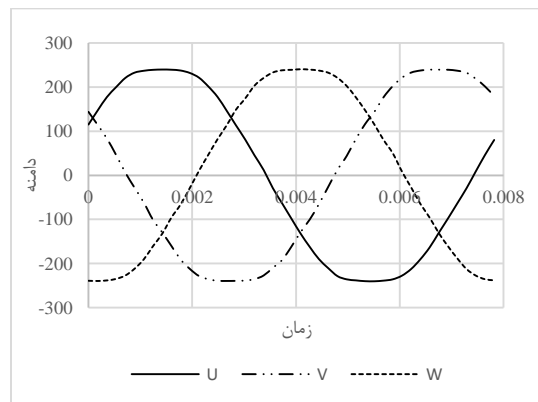
	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۴۳۵۶	۱,۴۰۲۸	۱,۵۰۸۸	۱,۳۳۵۲	۰,۹۰۵	۰,۹۹۶۱	۶۷,۰۰۵۷	۲,۳۳۴۱
معادلات اندازه	۰,۴۲	۱,۵	۱,۵	۱,۴۱	۰,۹۰۰۲	۰,۹۸	۶۶,۱۴۴۲	۲,۳۲۸۱

۳-۷-۴- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

دقیقه



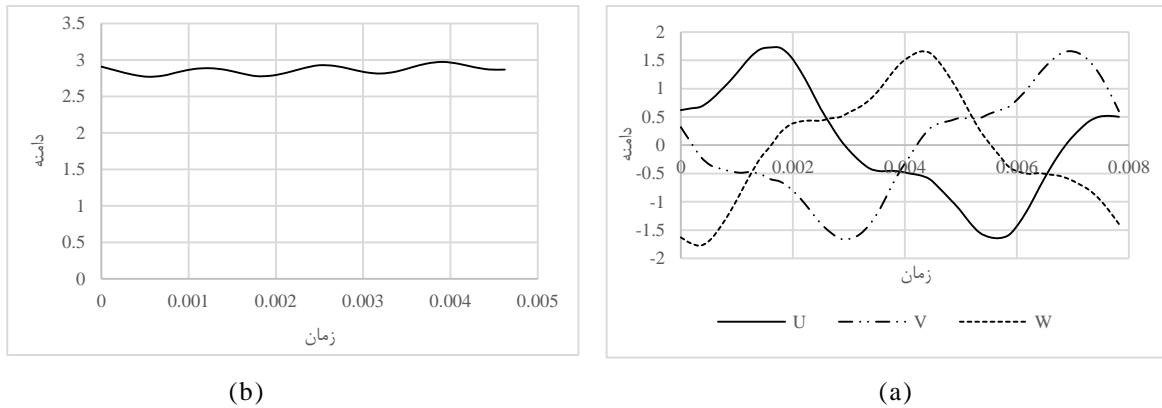
(b)



(a)

شکل ۳-۱۱: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت

۱۵۰۰ بر دقیقه



شکل ۳-۱۲: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

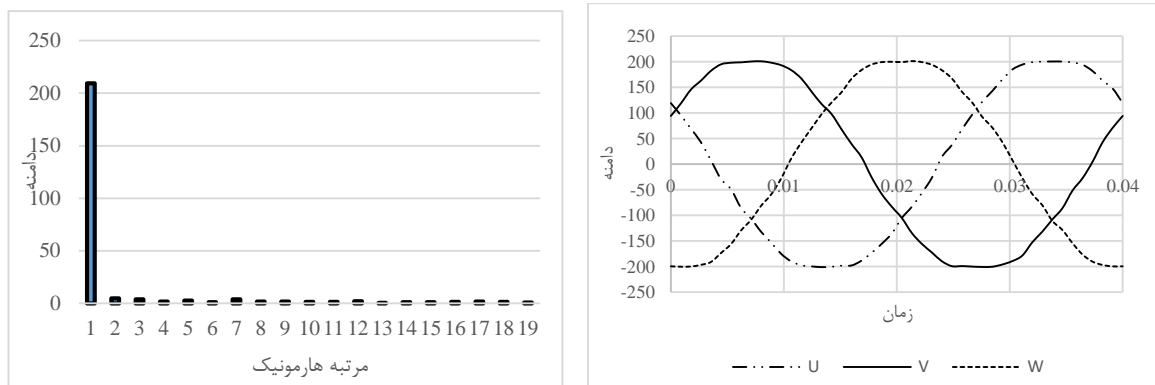
مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۵ آورده شده است.

جدول ۳-۱۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۴۹۵	۱,۴۶۶۴	۱,۳۲۹۱	۱,۳۴۰۱۴	۰,۹۳۰۴	۰,۹۹۶۱	۱۷۹,۰۵۳	۰,۸۶۷۳
معادلات اندازه	۰,۳۵	۱,۵	۱,۵	۱,۳۵۱۸	۰,۹۲۳۴۱	۰,۹۸	۱۸۲,۴۸۸۳	۰,۸۵۹۸

۳-۷-۵ شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۳۰۰ دور بر

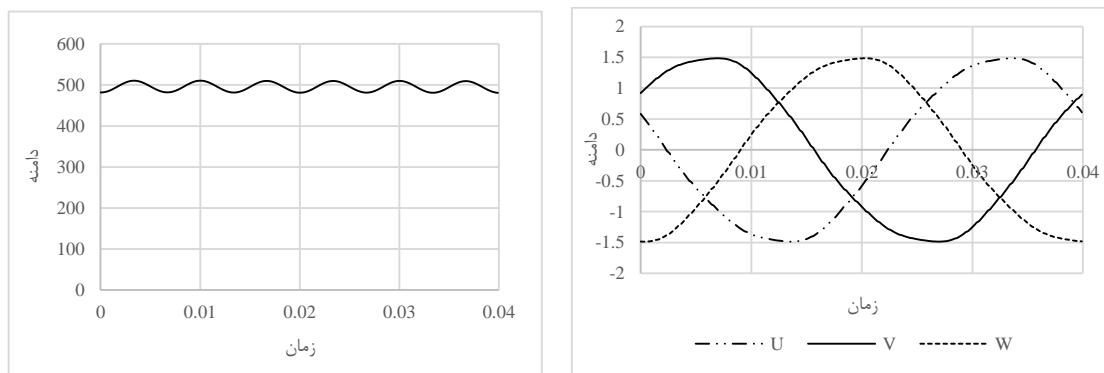
دقیقه



(b)

(a)

شکل ۳-۱۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه



(b)

(a)

شکل ۳-۱۴: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۶ آورده شده است.

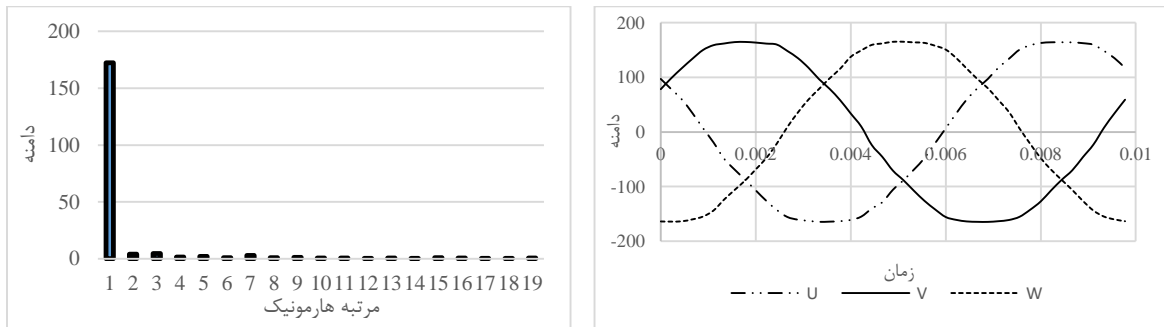
جدول ۳-۱۶: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۴۹۵	-	۱,۴۶۰۹	۱,۳۴۰۱۴	۰,۸۹۰۶	۰,۹۷	۱۴۸,۷۵۷۷	۱,۰۴۲۲
معادلات اندازه	۰,۳۵	-	۱,۵	۱,۳۵۱۸	۰,۹	۰,۹۸	۱۴۹,۳۳۸۶	۱,۰۴۲

۳-۷-۶- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ دور بر

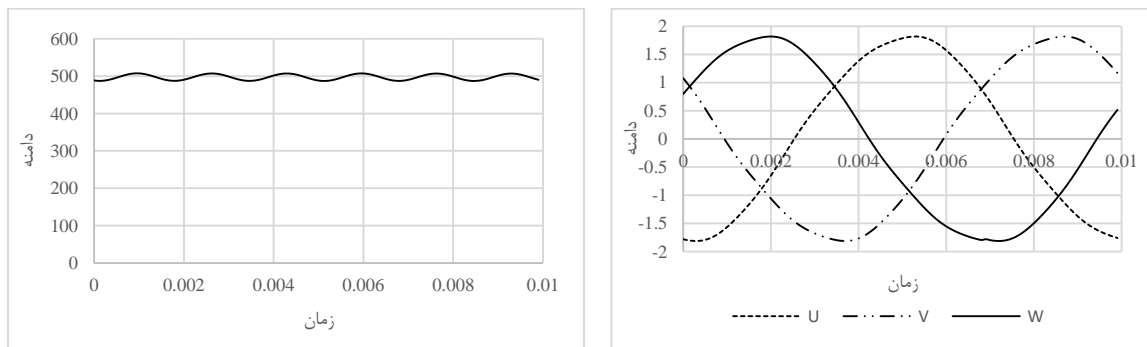
دقیقه



(b)

(a)

شکل ۳-۱۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه



(b)

(a)

شکل ۳-۱۶: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۳-۱۷ آورده شده است.

جدول ۳-۱۷: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰.۳۵۰۵	-	۱.۴۴۱۸	۱.۳۴۸۲	۰.۹۴۶۱	۰.۹۷	۱۲۱.۸۴۲	۱.۲۱۹۵
معادلات اندازه	۰.۳۵	-	۱.۵	۱.۳۴۹۱۲	۰.۹۴۷۲	۰.۹۷	۱۲۷.۴۳۲	۱.۲۱۸۸

۳-۷-۷- مقایسه موتورهای طراحی شده

موتور مورد استفاده در کولر آبی باید دارای بازده بالا و قیمت تقریباً پایین باشد، به همین دلیل میزان

بازده و حجم آهنربای دائم در دو سرعت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بایکدیگر مقایسه می‌شود.

جدول ۳-۱۸: مقایسه موتورهای طراحی شده

PM Volume (mm^2)	n (%)	Speed (RPM)	
32052	88.5	300	شیار دار AFPM
44986	90.58	300	بدون شیار AFPM
64631	89.06	300	بدون هسته AFPM
9488	92.34	1500	شیار دار AFPM
13068	93.04	1500	بدون شیار AFPM
11475	94.61	1500	بدون هسته AFPM

همانطور که از جدول ۳-۱۸ مشهود می‌باشد، بازده موتورهای طراحی شده در یک سرعت مشخص تقریباً

باهم برابر می‌باشد ولی حجم آهنربا مصرفی در آنها تفاوت زیادی با یکدیگر دارد. از طرف دیگر بازده

موتورهای طراحی شده با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بیشتر از بازده موتورهای طراحی با سرعت ۳۰۰ دور

بر دقیقه می‌باشد و همچنین حجم آهنربای مصرفی در این موتور نیز بسیار کمتر است.

فصل چهارم

مدار معادل حرارتی

۴-۱- مقدمه

یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد ماشین‌های الکتریکی دمای قسمت‌های مختلف آن است. افزایش دمای قسمت‌های مختلف می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در عملکرد ماشین‌های الکتریکی شود. این مشکلات در ماشین‌های AFPM به صورت زیر است:

۱ - افزایش مقاومت سیم‌پیچ‌ها و در نتیجه کاهش بازده

۲ - تغییر خصوصیت مغناطیسی هسته ماشین و در نتیجه به اشباع رفتن هسته

۳ - غیر مغناطیس شدن آهنربای دائم

در الگوریتم طراحی ماشین‌های الکتریکی که در مراجع مختلف ارائه شده است، دمای قسمت‌های مختلف را یک عدد ثابت فرض کرده‌اند که این اعداد از گراف‌ها و روابط تجربی استخراج می‌شود. به دلیل ثابت گرفتن دمای قسمت‌های مختلف ماشین، دقت الگوریتم طراحی کاهش پیدا می‌کند. الگوریتم طراحی موتور مورد استفاده در کولرهای آبی باید از دقت بالایی برخوردار باشد تا نقطه بهینه طراحی به درستی انتخاب شود و نتایج محاسبات انجام‌شده در زمینه مدت‌زمان بازگشت سرمایه اولیه تا حد امکان دقیق باشد. به همین دلیل باید دمای قسمت‌های مختلف ماشین در الگوریتم طراحی محاسبه شود تا دقت آن به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کند.

۴-۲- محاسبه دما ماشین AFPM

تعیین دمای ماشین‌های الکتریکی با استفاده از دو روش زیر امکان‌پذیر می‌باشد:

۱- تجزیه و تحلیل حجم محدود (FVM)^۱

۲- مدار معادل حرارتی

تجزیه و تحلیل حجم محدود از دقت بالایی برخوردار است؛ اما به دلیل پیچیدگی زیاد این نوع روش استفاده از آن در الگوریتم طراحی باعث افزایش مدت زمان اجرای الگوریتم طراحی می‌شود. از طرف دیگر مدار معادل حرارتی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد و حجم محاسباتی بسیار کمتری نسبت به روش حجم محدود دارد. با توجه به مطالب بیان شده از روش مدار معادل حرارتی به منظور محاسبه دمای قسمت-های مختلف استفاده می‌شود.

۴-۲-۱- انتقال حرارت همرفتی در سیستم‌های دیسکی

داده‌های مورد استفاده در محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفت از جمله عدد رینالد و ناسلت بطور معمول بدون واحد می‌باشند؛ بنابراین نتایج را می‌توان برای ماشین‌ها با سایزهای مختلف بطور عمومی بسط داد. عدد رینالد و ناسلت با مشخصات طولی گوناگونی نشان داده می‌شوند و به‌عنوان مثال برای Re_θ و Nu_θ از شعاع روتور در محاسبات استفاده می‌شود و در Re_g و Nu_g از طول فاصله هوایی استفاده می‌شود. این دو عدد از معادلات ۴-۴ تا ۷-۴ قابل محاسبه هستند [۱۷].

$$Re_g = \frac{\Omega g R}{\nu} \quad (۱-۴)$$

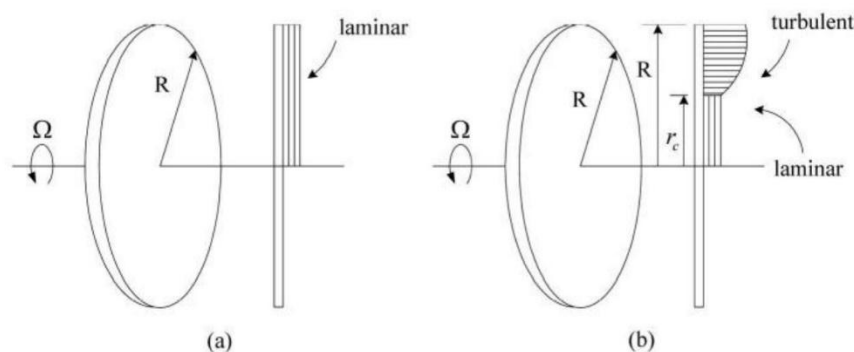
$$Re_\theta = \frac{\Omega R^2}{\nu} \quad (۲-۴)$$

$$Nu_u = \frac{hR}{k} \quad (۳-۴)$$

$$G = \frac{g}{R} \quad (۴-۴)$$

که R شعاع روتور برحسب متر، Ω سرعت برحسب رادیان بر ثانیه، ν ویسکوزیته کنیلماتیک سیال برحسب m^2/s ، h ضریب انتقال حرارت همرفتی برحسب $W/m^2 \cdot C$ ، k رسانایی سیال برحسب $W/m \cdot C$ و g فاصله هوایی بین روتور و استاتور برحسب متر می‌باشد.

سیستم دیسک چرخشی دارای نقش اصلی در خنک‌سازی و تهویه ماشین‌های AFPM است. اندازه‌گیری دقیق ضریب انتقال حرارت همرفتی به خاطر پیچیدگی رژیم‌های جریان نیاز به بررسی کامل تحلیلی و تجربه دارد.



شکل ۴-۱: دیسک چرخش آزاد، (a) جریان آرام هوا، (b) جریان آرام و آشفته هوا [۱۸]

۴-۱-۱-۲-۴ دیسک چرخش آزاد

ضریب انتقال حرارتی همرفتی در سطح بیرونی دیسک چرخان از معادله ۴-۸ قابل محاسبه می‌باشد.

$$h = \frac{K}{R} N_u \quad (۵-۴)$$

عدد ناسلت برای جریان آرام هوا ($Re < 5.19 * 10^5$) از معادله ۴-۹ محاسبه می‌شود [۱۶].

$$N_u = 0.4(R_e^2 + G_r)^{1/4} \quad (۶-۴)$$

$$R_e = \rho \frac{\Omega D_{out}}{4\mu} \quad (۷-۴)$$

$$G_r = \frac{9.8\beta R^3 \pi^{3/2} \Delta\theta}{\nu^2} \quad (۸-۴)$$

عدد ناسلت برای جریان آشفته هوا ($Re > 5.19 * 10^5$) از معادله ۴-۱۲ قابل محاسبه می‌باشد [۱۷].

$$N_u = 0.015 R_e^{4/5} - 100 \left(\frac{2r_c}{D_{out}} \right)^2 \quad (۹-۴)$$

$$r_c = \sqrt{\frac{2.5 * 10^5 * \nu}{\Omega}} \quad (10-4)$$

۲-۱-۲-۴- لبه شعاع خارجی روتور و استاتور

محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی در لبه خارجی روتور از معادله ۴-۱۴ محاسبه می‌شود [۱۶].

$$h = \frac{K}{D_{out}} N_u \quad (11-4)$$

$$N_u = 0.133 * R_e^{\frac{2}{3}} * P_r^{\frac{1}{3}} \quad (12-4)$$

$$R_e = \rho \frac{\Omega D_{out}}{4\mu} \quad (13-4)$$

که P_r عدد پرائتل بدون واحد است و به دما وابسته می‌باشد.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی در لبه خارجی استاتور از معادله ۴-۱۷ استفاده می‌شود [۱۶].

$$h = \frac{K}{D_{out}} N_u \quad (14-4)$$

$$N_u = 0.125 * (G_r * P_r)^{\frac{1}{3}} \quad (15-4)$$

$$G_r = \frac{9.8 * \beta R^3 \pi^{\frac{3}{2}} \Delta\theta}{\nu^2} \quad (16-4)$$

۳-۱-۲-۴- سیستم روتور - استاتور

ضریب انتقال حرارت همرفتی دیسک روتور با فاصله هوایی با معادله ۴-۲۰ قابل محاسبه می‌باشد.

$$h = \frac{K}{R} N_u \quad (17-4)$$

$$R_e = \rho \frac{\Omega D_{out}}{4\mu} \quad (18-4)$$

جدول ۴-۱: روابط استخراج شده در انتقال حرارت در روتور با توجه به نوع رژیم جریانی توسط بوتارفا و

هارمند [۱۹]

رابطه	رژیم هوا	سهم فاصله هوایی
$N_u = 7.46 * R_{e\theta}^{0.32}$	آرام	۰,۰۱
$N_u = 0.5(1 + 5.47 * 10^{-4}e^{112G})R_{e\theta}^{0.5}$	آرام	۰,۰۶-۰,۰۲
$N_u = 0.044 * R_{e\theta}^{0.75}$	آشفته	۰,۰۱
$N_u = 0.033(12.57e^{-33.18G})R_{e\theta}^{0.6+25G\frac{12}{7}}$	آشفته	۰,۰۶-۰,۰۲

ضریب انتقال حرارت همرفتی دیسک استاتور با فاصله هوایی با معادله ۴-۲۲ قابل محاسبه می‌باشد.

$$h = \frac{K}{R} N_u \quad \text{معادله ۴-۱۹}$$

$$N_u = A R_{e\theta}^B \quad \text{معادله ۴-۲۰}$$

جدول ۴-۲: مقادیر A و B برحسب سهم فاصله هوایی مربوط به انتقال حرارت همرفت از استاتور به فاصله

هوایی در رژیم هوای آشفته [۱۹]

B	A	G
۰,۶۴	۰,۰۷۹	۰,۰۱۰۶
۰,۶۳۳	۰,۰۸۸۸	۰,۰۱۲۷
۰,۶۸۲	۰,۰۴۰۶	۰,۰۱۷
۰,۶۹۱	۰,۰۳۱۵	۰,۰۲۱۲
۰,۶۷۹	۰,۰۳۴۷	۰,۰۲۹۷
۰,۷۱۲	۰,۰۲۳۴	۰,۰۴۶۷

اعداد ثابت استفاده شده در محاسبه ضریب انتقال همرفتی به صورت زیر است:

$$\rho = 1.0287 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 2.0507 * 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

$$\nu = 1.9935 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$C_p = 1.0087 * 10^3 \frac{J}{kg * k}$$

$$k = 0.029223 \frac{W}{m * k}$$

$$Pr = 0.71787$$

۲-۲-۴ محاسبه مقاومت حرارتی همرفتی و هدایتی

به دلیل کوچک بودن اثر انتقال حرارت تابشی، از این شیوه انتقال حرارت صرف نظر می شود. مقاومت حرارتی همرفتی و هدایتی از معادله ۲۴-۴ و ۲۵-۴ قابل محاسبه می باشد.

$$R_d = \frac{1}{kA_d} L \quad (۲۱-۴)$$

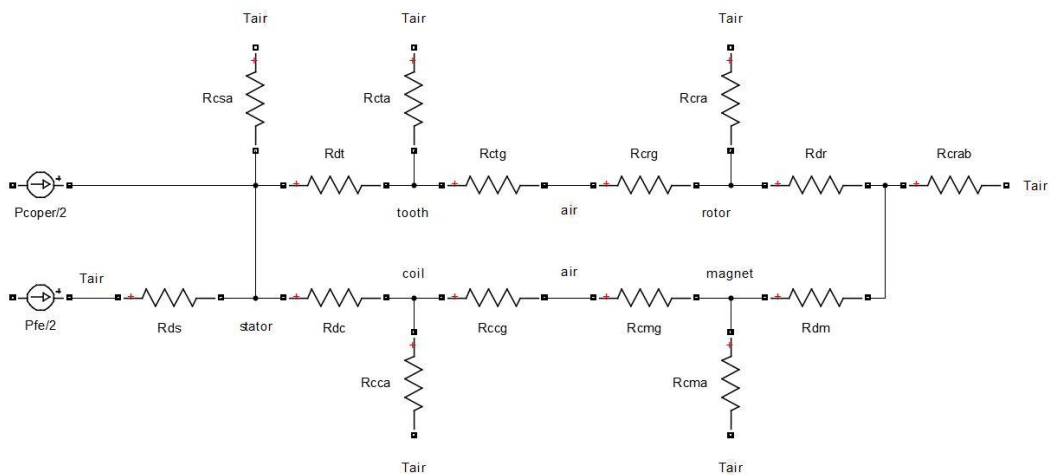
$$R_c = \frac{1}{hA_c} \quad (۲۲-۴)$$

که R_d مقاومت هدایتی، R_c مقاومت همرفتی، A_d سطح مقطع ماده مورد نظر، L طول ماده و A_c سطح

مقطع ماده با سیال اطراف آن ماده می باشد.

۳-۲-۴ مدار معادل حرارتی موتور (TEC^۱) AFPM شیپار دار

مدار معادل حرارتی موتور AFPM شیپار دار در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است.

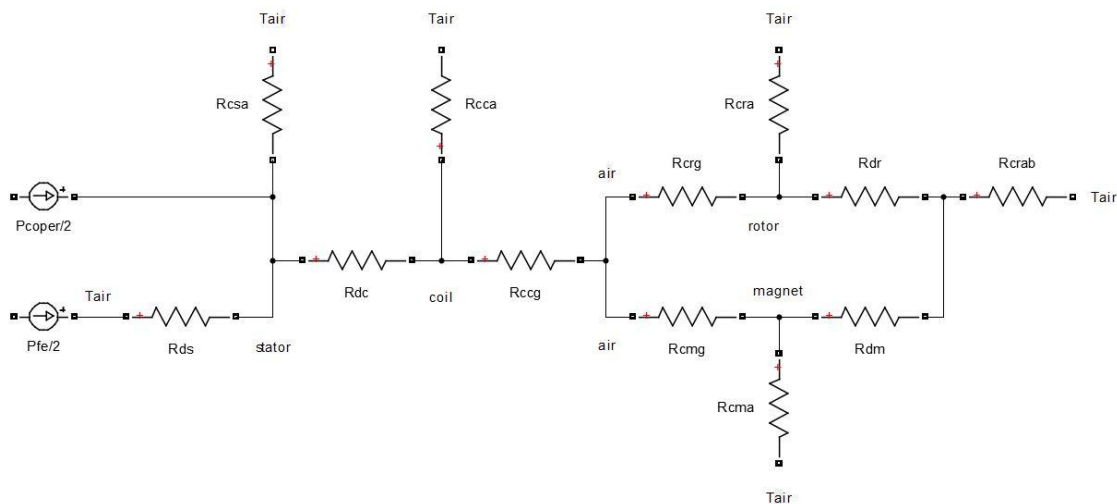


شکل ۲-۴: مدار معادل حرارتی موتور AFPM شیپار دار

که R_{ds} مقاومت هدایتی استاتور، R_{dc} مقاومت هدایتی سیم‌پیچ‌ها، R_{dt} مقاومت هدایتی دندانه‌های استاتور، R_{dr} مقاومت هدایتی روتور، R_{dm} مقاومت هدایتی آهنربای دائم، R_{csa} مقاومت همرفتی استاتور با هوای اطراف موتور، R_{cca} مقاومت همرفتی سیم‌پیچ‌ها با هوای اطراف موتور، R_{cta} مقاومت همرفتی دندانه‌های استاتور با هوای اطراف موتور، R_{ctg} مقاومت همرفتی دندانه با فاصله هوایی موتور، R_{ccg} مقاومت همرفتی سیم‌پیچ‌ها با فاصله هوایی موتور، R_{cmg} مقاومت همرفتی روتور با فاصله هوایی موتور، R_{cra} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با فاصله هوایی موتور، R_{cma} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با هوای اطراف ماشین، R_{crab} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با هوای پشت روتور، T_{air} دمای هوا اطراف موتور، P_{Fe} تلفات هسته و P_{coper} تلفات مسی می‌باشد.

۴-۲-۴ مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون شیار

مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون شیار در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.

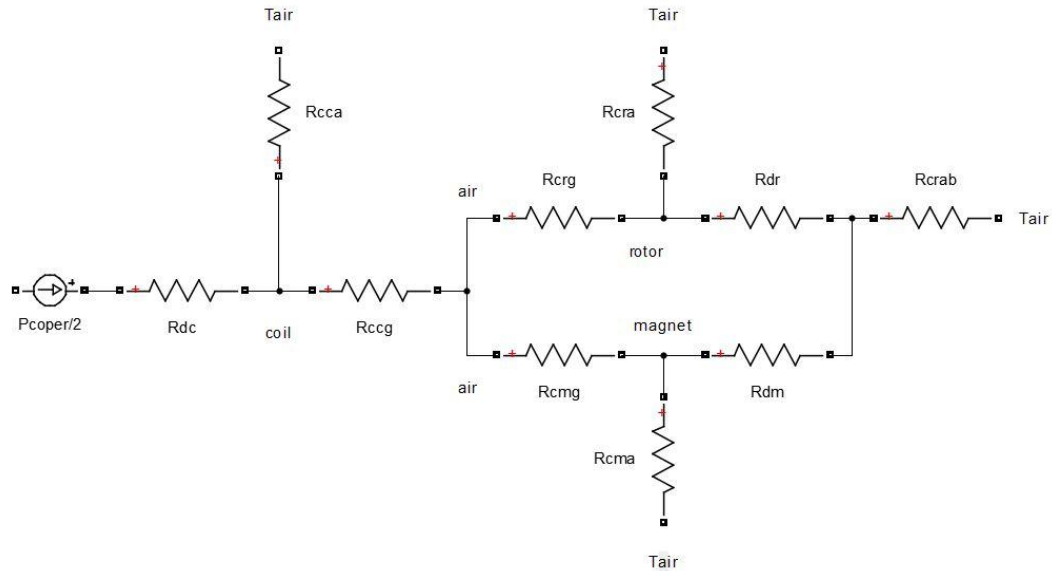


شکل ۳-۴: مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون شیار

که R_{ds} مقاومت هدایتی استاتور، R_{dc} مقاومت هدایتی سیم پیچ ها، R_{dr} مقاومت هدایتی روتور، R_{dm} مقاومت هدایتی آهنربای دائم، R_{csa} مقاومت همرفتی استاتور با هوای اطراف موتور، R_{cca} مقاومت همرفتی سیم پیچ ها با هوای اطراف موتور، R_{ctg} مقاومت همرفتی دندانها با فاصله هوایی موتور، R_{ccg} مقاومت همرفتی سیم پیچ ها با فاصله هوایی موتور، R_{crg} مقاومت همرفتی روتور با فاصله هوایی موتور، R_{cmg} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با فاصله هوایی موتور، R_{cra} مقاومت همرفتی روتور با هوای اطراف ماشین، R_{cma} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با هوای اطراف ماشین، R_{crab} مقاومت همرفتی روتور با هوای پشت روتور، T_{air} دمای هوای اطراف موتور، P_{Fe} تلفات هسته و P_{coper} تلفات مسی می باشد.

۵-۲-۴ مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون هسته

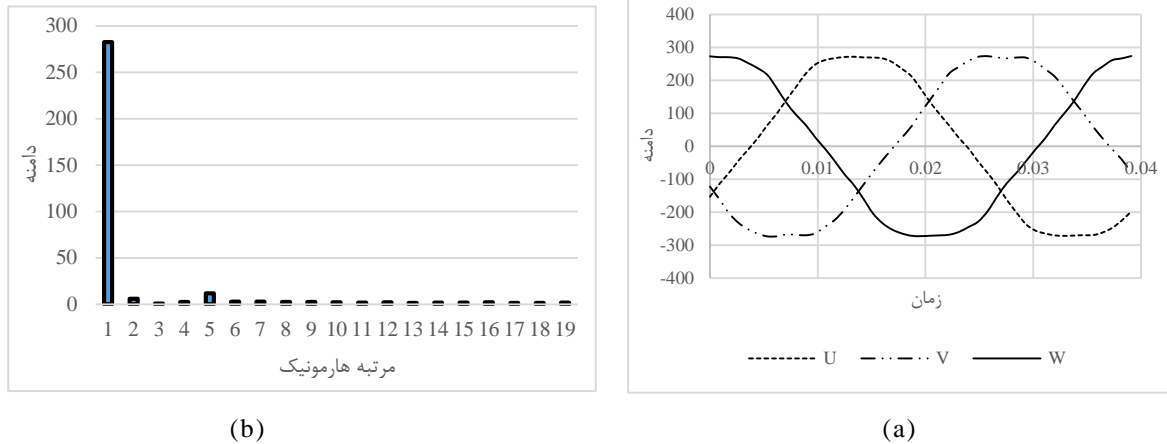
مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون هسته در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است.



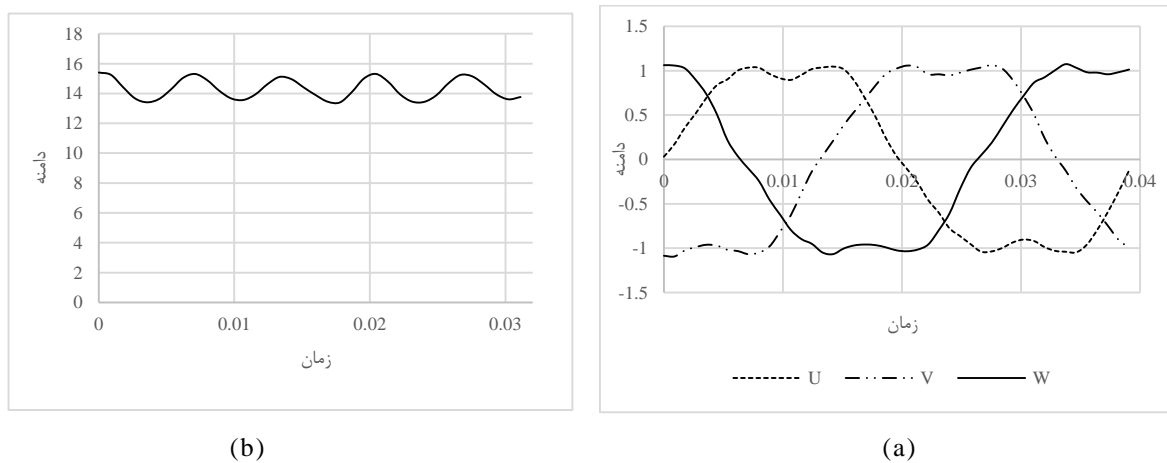
شکل ۴-۴: مدار معادل حرارتی موتور AFPM بدون هسته

که R_{dc} مقاومت هدایتی سیم‌پیچ‌ها، R_{dr} مقاومت هدایتی روتور، R_{dm} مقاومت هدایتی آهنربای دائم، R_{cca} مقاومت همرفتی سیم‌پیچ‌ها با هوای اطراف موتور، R_{ccg} مقاومت همرفتی سیم‌پیچ‌ها با فاصله هوایی موتور، R_{crg} مقاومت همرفتی روتور با فاصله هوایی موتور، R_{cmg} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با فاصله هوایی موتور، R_{cra} مقاومت همرفتی روتور با هوای اطراف ماشین، R_{cma} مقاومت همرفتی آهنربای دائم با هوای اطراف ماشین، R_{crab} مقاومت همرفتی روتور با هوای پشت روتور، T_{air} دمای هوا اطراف موتور و P_{coper} تلفات مسی می‌باشد.

۴-۲-۶- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیاردار با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۴-۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)



شکل ۴-۶: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM شیپار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۳۵۱	۱,۴۶۸۹	۱,۲۸۶۷	۱,۴۰۷۲	۰,۸۸۳۲	۰,۹۶۵۹	۹۱,۳۹۵۲	۱,۷۱۵۴
معادلات اندازه	۰,۳۵۰۴	۱,۰۵	۱,۰۵	۱,۴۱	۰,۹	۰,۹۸	۹۰,۰۰۴۶	۱,۷۰۸۶

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۴-۵ آورده شده است.

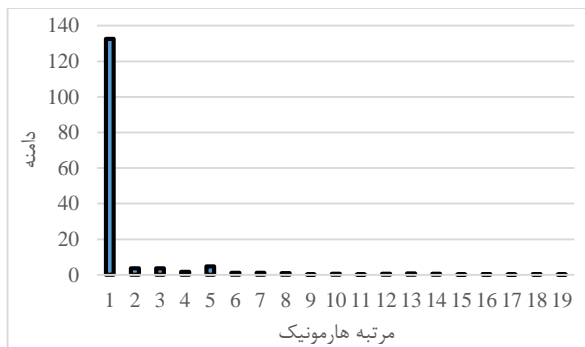
جدول ۴-۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور

موتور AFPM شیپار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

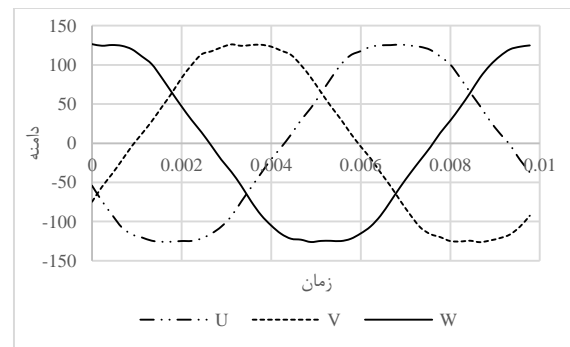
	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۹۶,۹۸۸۵	۱۳۱,۱۳۶	۶۲,۶۵	۱۳۱,۱۲۷	۶۲,۸۴۱
مدار معادل حرارتی	۸۷,۰۰۵۸	۱۲۶,۱۲۵۵	۶۷,۵۰۸۶	۱۲۶,۱۲۸۷	۶۷,۴۴۴۳

۴-۲-۷- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم شیپاردار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر

دقیقه



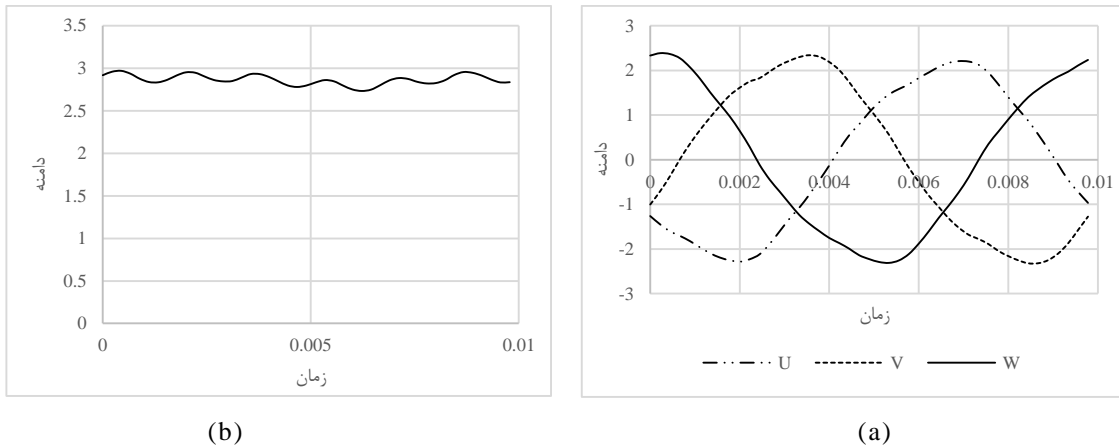
(b)



(a)

شکل ۴-۷: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM شیپار دار با سرعت

۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)



شکل ۴-۸: (a) جریان ورودی موتور (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM شیپار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۵: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور

AFPM شیپار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۴۷۸	۱,۳۵۵۱	۱,۲۹۱	۱,۳۵۱۷	۰,۹۱۰۱	۰,۹۶۱۶	۹۳,۰۵۲۷	۱,۶۴۰۲
معادلات اندازه	۰,۳۵	۱,۵	۱,۵	۱,۴۱	۰,۹۳۷۴	۰,۹۸	۹۵,۴۵۰۱	۱,۶۳۱۶

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۴-۷ آورده شده است.

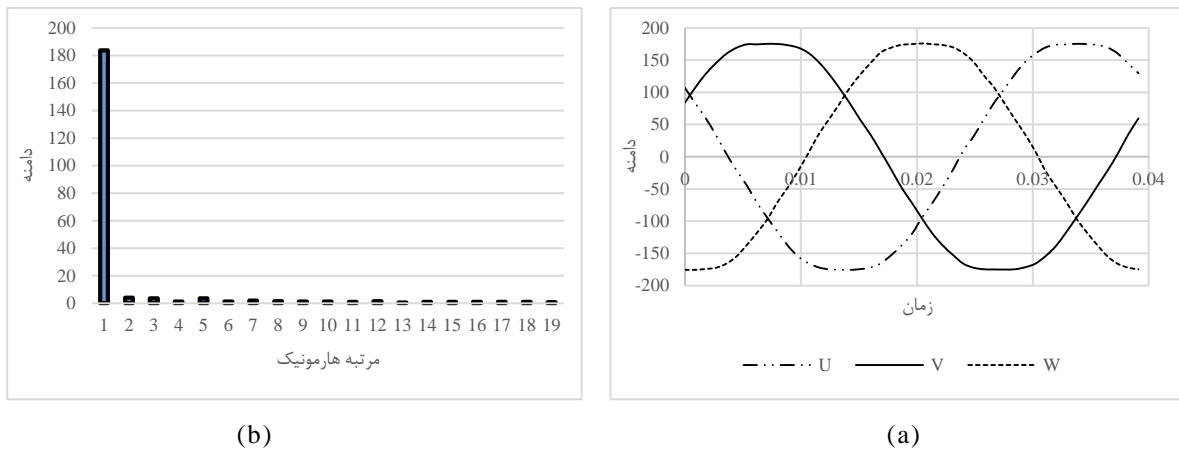
جدول ۴-۶: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور

AFPM شیپار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

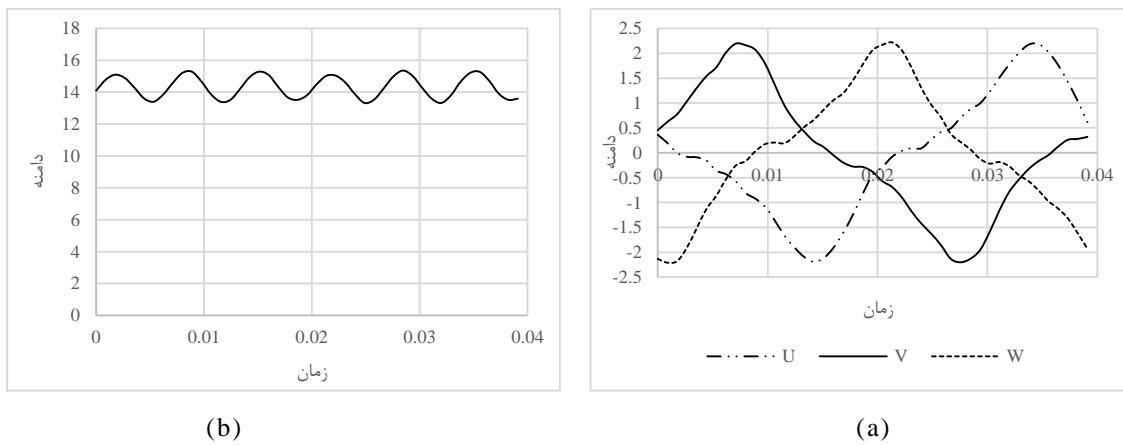
	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۹۶,۹۸۸۵	۱۵۷,۳۷۸	۶۷,۰۴۶۲	۱۵۸,۳۷۱	۶۷,۴۶
مدار معادل حرارتی	۹۷,۹۵۹۶	۱۵۱,۳۳۲۹	۷۱,۳۰۹۲	۱۵۱,۳۳۴۵	۷۱,۲۷۲۱

۸-۲-۴- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۳۰۰ دور بر

دقیقه



شکل ۹-۴: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)



شکل ۱۰-۴: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۸ آورده شده است.

جدول ۴-۷: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{CS}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۶۱۶۴	۱,۴۶۸۸	۱,۴۵۲۷	۱,۳۴۴۶	۰,۹۱۰۸	۰,۹۹۶۱	۱۳۰,۵۷۰۲	۱,۲۳۱۱
معادلات اندازه	۰,۶۳۱۱	۱,۵	۱,۵	۱,۴۱	۰,۸۹۰۵	۰,۹۸۶۱	۱۳۰,۵۵۱۵	۱,۲۳۸۳

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۹ آورده شده است.

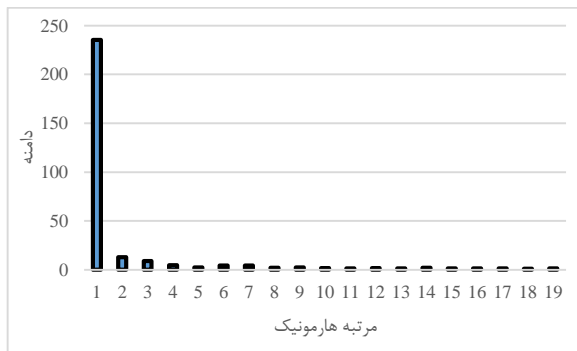
جدول ۴-۸: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور

موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

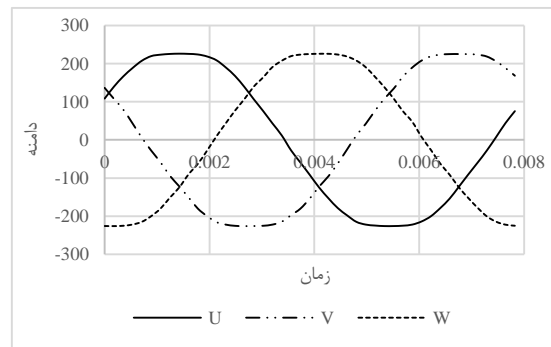
	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۹۵,۳۶۲	۱۵۷,۳۸۹	۶۵,۰۴۵۷	۱۵۷,۳۸۰۱	۶۵,۵۲۳
مدار معادل حرارتی	۸۴,۲۶۵۱	۱۳۲,۷۸۵۹	۵۹,۹۹۳۸	۱۳۲,۸۰۳۹	۵۹,۹۹۵۶

۴-۲-۹- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ دور بر

دقیقه



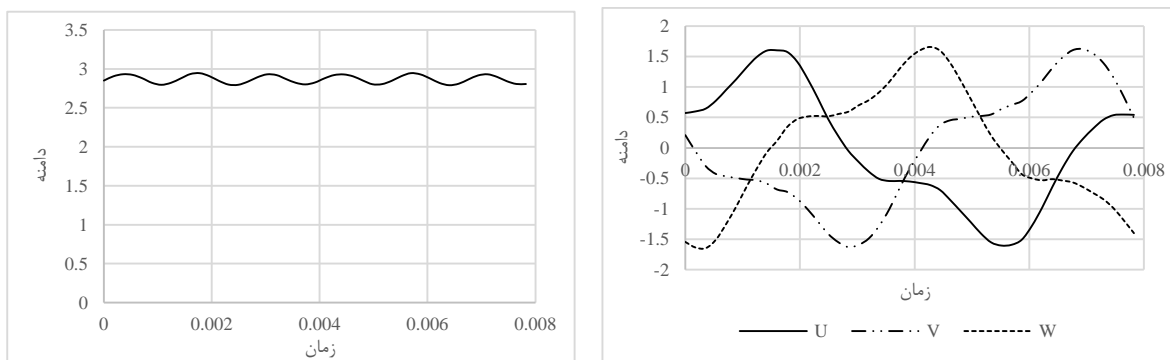
(b)



(a)

شکل ۴-۱۱: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون شیار با سرعت

۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)



(b)

(a)

شکل ۴-۱۲: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۱۰ آورده شده است.

جدول ۴-۹: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۵۱	۱,۳۲۰۱	۱,۴۷۲۲	۱,۳۴۰۲	۰,۹۰۵	۰,۹۸۷۶	۱۶۸,۵۱۲۳	۰,۹۳۱۷
معادلات اندازه	۰,۳۵	۱,۵	۱,۵	۱,۳۵۱۸	۰,۹۰۹۶	۰,۹۹	۱۶۸,۸۹۲	۰,۹۳۰۵

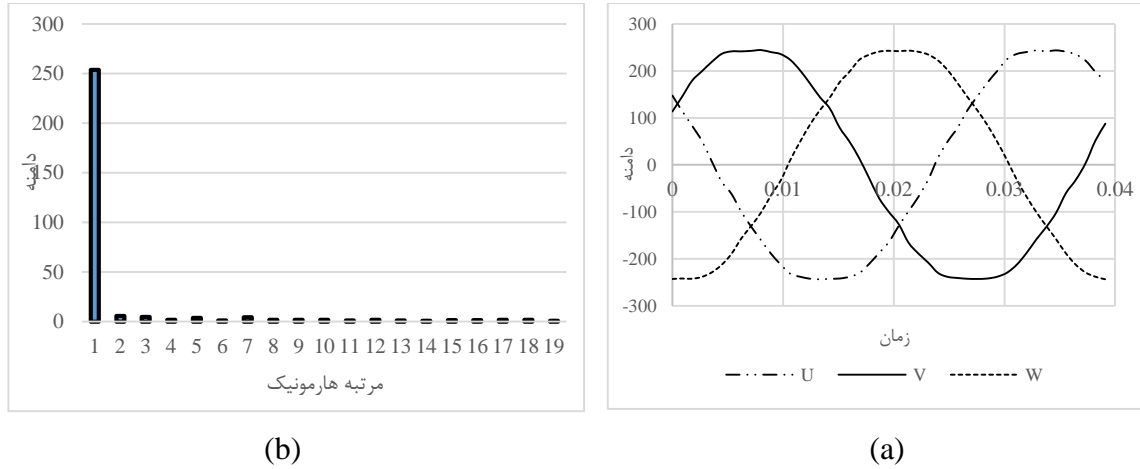
مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۴-۱۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱۰: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

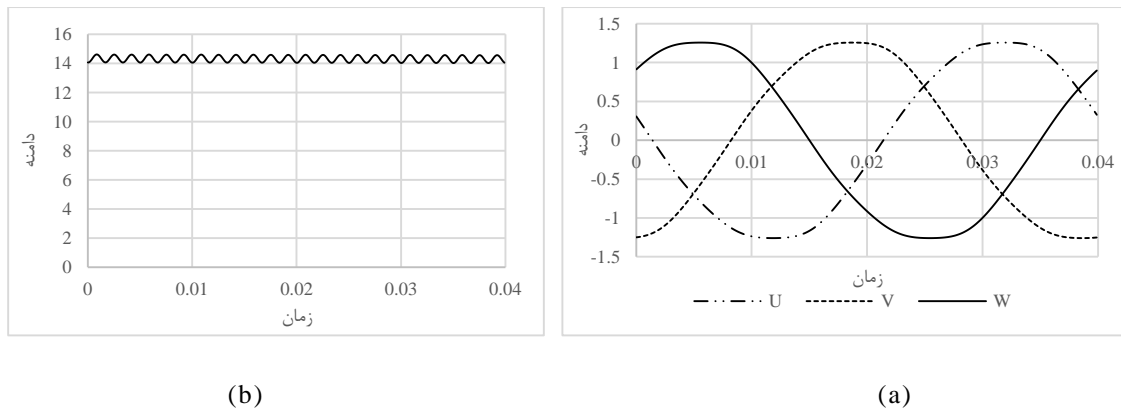
	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۱۱۸,۲۰۳۶	۱۸۸,۲۰۷۳	۷۹,۴۷۹۷	۱۸۸,۲۰۱۵	۷۹,۸۷۱
مدار معادل حرارتی	۱۱۹,۴۰۸۱	۱۸۲,۳۰۶۶	۸۸,۰۹۱۴	۱۸۲,۳۱۰۱	۸۷,۹۵۷

۱۰-۲-۴ شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۳۰۰ دور بر

دقیقه



شکل ۴-۱۳: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)



شکل ۴-۱۴: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۱۲ آورده شده است.

جدول ۴-۱۱: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۵۶۹	-	۱,۴۷۲۹	۱,۳۵۳۶	۰,۸۹۷۳	۰,۹۶۸۱	۱۸۰,۳۹۵	۰,۸۸۰۷
معادلات اندازه	۰,۳۴۹۲	-	۱,۵	۱,۳۵۶۶	۰,۹۰۰۴	۰,۹۹	۱۷۳,۸۷۹۶	۰,۸۸۹۳

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۴-۱۳ آورده شده است.

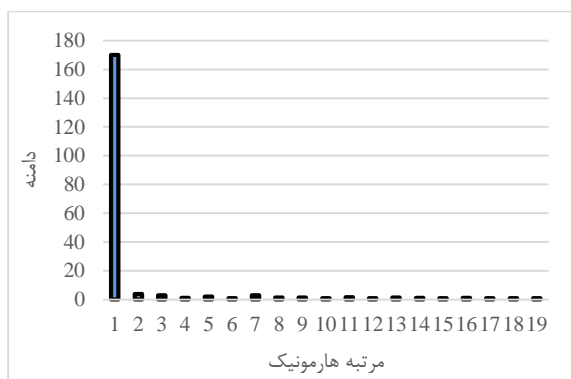
جدول ۴-۱۲: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور

موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)

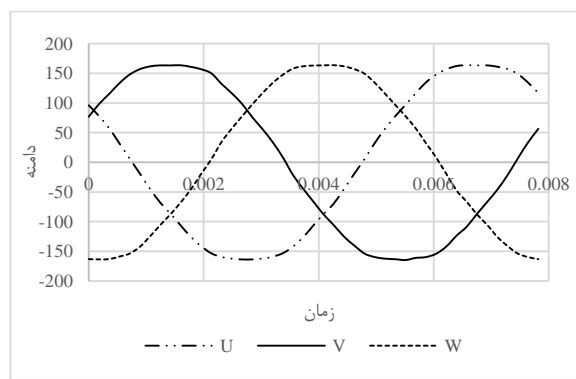
	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۸۷,۰۳۵۲	-	۶۸,۶۴۸	۱۸۵,۱۲۴	۶۸,۹۸۲۵
مدار معادل حرارتی	۸۸,۱۲۱۳	-	۷۶,۴۶۶	۱۸۵,۲۴۴۲	۷۶,۳۰۱۳

۴-۱۱-۲- شبیه‌سازی موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ دور بر

دقیقه



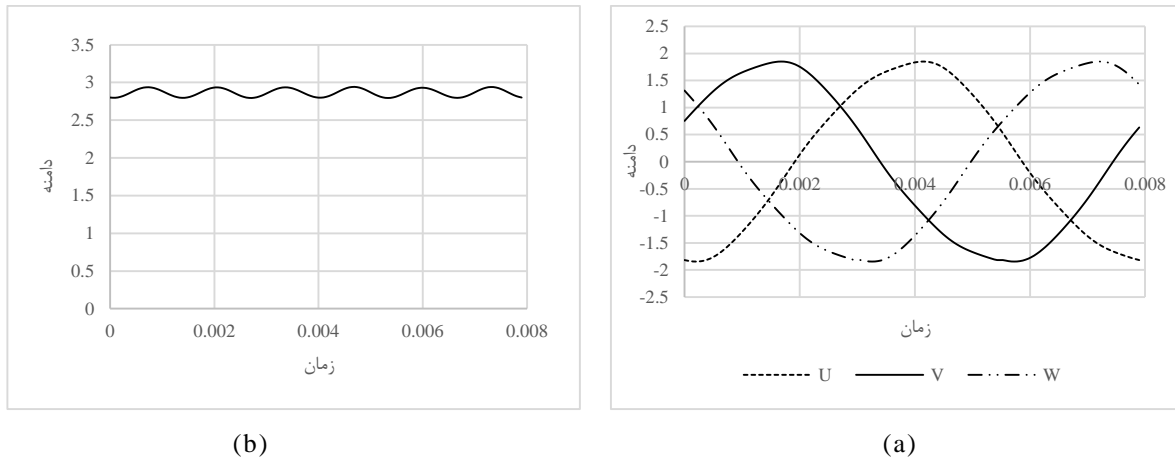
(b)



(a)

شکل ۴-۱۵: (a) شکل موج Back EMF (b) تبدیل فوریه سریع Back EMF موتور AFPM بدون هسته با

سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)



شکل ۴-۱۶: (a) جریان ورودی (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۴-۱۴ آورده شده است.

جدول ۴-۱۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۴۰۴	-	۱,۴۲۵۲	۱,۳۵۵۶	۰,۹۴۳	۰,۹۷	۱۲۰,۷۶۹۱	۱,۲۶۰۳
معادلات اندازه	۰,۳۵	-	۱,۰۵	۱,۳۴۹۳	۰,۹۳۹۲	۰,۹۸	۱۲۳,۰۰۸۶۷	۱,۲۵۶۷

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۴-۱۵ آورده شده است.

جدول ۴-۱۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)

	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۷۱,۰۲۳	-	۵۴,۶۶۹	۱۳۵,۷۶۹	۵۴,۸۶۸۴
مدار معادل حرارتی	۷۴,۱۲۰۵	-	۶۱,۴۷۹۴	۱۳۶,۱۲۰۵	۶۱,۳۸۵

۱۲-۲-۴- مقایسه نتایج

در این قسمت موتورهای طراحی شده به منظور استفاده در کولرهای آبی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این مقایسه باعث می‌شود تا قدرت انتخاب موتور مناسب برای کولر آبی افزایش پیدا کند. نتایج مقایسه در جدول‌های ۱۶-۴ تا ۱۷-۴ نمایش داده شده است.

جدول ۱۵-۴: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM شیار دار طراحی شده

AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM شیار دار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه	AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM شیار دار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه	
121.25	118.64	268.83	204.38	D_o
0.7	0.7	0.7	0.7	λ
38.54	37.65	50.69	45.67	L_{tot}
2.5135	2.8267	3.2376	2.9877	L_{pm}
0.6009	0.5954	0.6983	0.7	α
0.93	0.9374	0.9003	0.9003	n

جدول ۱۶-۴: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM بدون شیار طراحی شده

AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM بدون شیار با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه	AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM بدون شیار با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه	
134.69	134.2160	208.7606	211.30	D_o
0.7	0.7	0.6577	0.6461	λ
29.9301	29.7379	73.3571	51.4920	L_{tot}
2.3071	2.2861	9.1910	4.536	L_{pm}
0.6928	0.6960	0.6983	0.6994	α
0.9096	0.92341	0.9	0.9	n

جدول ۴-۱۷: مقایسه ابعاد و عملکرد موتورهای AFPM بدون هسته طراحی شده

AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه	AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه (TEC)	AFPM بدون هسته با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه	
125.6470	133.7597	217.0177	207.2979	D_o
0.7	0.7	0.7	0.7	λ
25.3899	21.6970	34.4317	32.4527	L_{tot}
2.9093	2.4833	4.0043	3.7867	L_{pm}
0.6940	0.6989	0.6918	0.6964	α
0.9382	0.9472	0.905	0.905	n

با توجه به مقایسه انجام شده می‌توان گفت که محاسبه دما در الگوریتم طراحی باعث افزایش ابعاد فیزیکی موتور شده است که این امر به دلیل تبادل حرارتی بهتر موتور با محیط اطراف و کاهش دما اتفاق می‌افتد.

در جدول ۴-۱۹ موتورهای طراحی شده با استفاده از مدار معادل حرارتی با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

جدول ۴-۱۸: مقایسه موتورهای طراحی شده

PM Volume (mm^2)	n (%)	Speed (RPM)	
65445	88.03	300	AFPM شیار دار
124652	91.088	300	AFPM بدون شیار
52202	0.8973	300	AFPM بدون هسته
8880	91.017	1500	AFPM شیار دار
11614	90.50	1500	AFPM بدون شیار
12767	92.256	1500	AFPM بدون هسته

اکنون طراحی انجام‌شده تقریباً کامل بوده و باید با استفاده از آن موتور مورد استفاده در کولرهای آبی را انتخاب کرد.

فصل پنجم

امکان‌سنجی استفاده از موتور

AFPM در کولر آبی

۵-۱- مقدمه

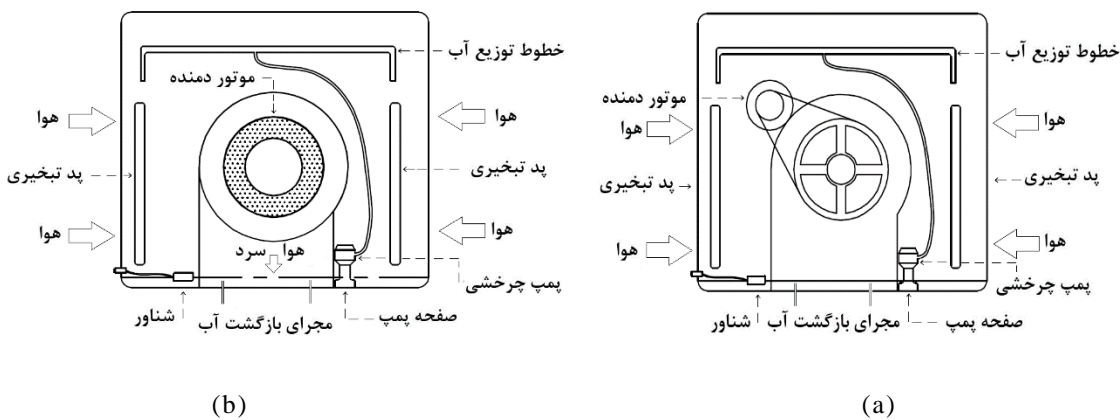
کشور ایران از نظر جغرافیایی جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک است [۲]. به دلیل شرایط آب و هوایی کشور ایران، مصرف‌کنندگان در فصول گرم از دستگاه‌های سرمازا استفاده می‌کنند. دستگاه‌های سرمازا رایج در کشور ایران را می‌توان به دو دسته کولرهای آبی و کولرهای گازی پنجره‌ای و دوتکه تقسیم بندی کرد. با توجه به نحوه عملکرد کولرهای آبی، این دستگاه سرمازا فقط در مناطق گرم و خشک دارای کارایی لازم می‌باشد. دو دلیل اصلی برای استفاده از کولرهای آبی را می‌توان هزینه پایین ساخت و توان نسبتاً پایین آنها دانست. هرچند توان مصرفی کولرهای آبی نسبت به کولرهای گازی کمتر است، اما محرکه الکتریکی این وسیله سرمازا از بازده قابل قبولی برخوردار نیست [۳]. قسمت اعظم توان ورودی در کولرهای آبی در موتور الکتریکی مورد استفاده در آن مصرف می‌شود. با توجه به گزارش‌های غیر رسمی ارائه‌شده توسط سازندگان کولرهای آبی، موتورهای القایی تک فاز مورد استفاده در کولرهای آبی در سرعت اسمی دارای حداکثر بازده در حدود ۴۰ درصد هستند [۳] که این مقدار با تغییر سرعت موتور کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

به دلیل استفاده بیش از ۱۵ میلیون خانوار ایرانی از کولرهای آبی [۵]، ارتقاء بازده و قابلیت‌های عملکردی این نوع کولرها امری ضروری است. هرگونه افزایش بازده کلی این نوع کولرها که وابستگی شدید به افزایش بازده موتور الکتریکی مورد استفاده در آن دارد، باعث کاهش چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی و آب می‌شود.

۵-۲- موتور AFPM مورد استفاده در کولر آبی

با توجه به قابلیت طراحی موتورهای AFPM در سرعت پایین، می‌توان این موتور را در سرعت نامی فن کولر آبی طراحی کرد که این عمل منجر به حذف دستگاه مبدل سرعت (پولی یا فلکه) موجود در کولرهای آبی معمول و تجهیزات جانبی آن می‌شود. با ایجاد اتصال مستقیم بین فن کولر آبی و موتور AFPM، تلفات ناشی از اصطکاک و لغزش در دستگاه مبدل سرعت حذف خواهد شد و بازده کلی دستگاه افزایش پیدا

خواهد کرد. به دلیل ساختار دیسکی موتور AFPM (طول محوری موتور طراحی شده در حدود ۱۰۰ میلی‌متر است)، این موتور به راحتی می‌تواند در سطح جانبی فن کولر آبی قرار گرفته و با آن اتصال مستقیم برقرار کند. شمای یک کولر آبی بهبودیافته و کولر آبی مرسوم در شکل ۵-۱ قابل مشاهده است.



شکل ۵-۱: شماتیک (a) کولر آبی مرسوم و (b) کولر آبی بهبودیافته

ساختارهای موتور AFPM که در فصل ۳ معرفی شده‌اند دارای ویژگی عملکردی منحصر هستند. با توجه به محدودیت‌ها و شرایط موجود باید یکی از این ساختارها در کولر آبی مورد استفاده قرار گیرد. این موتورها از سه دیدگاه مورد مقایسه قرار می‌گیرند:

۱- بازده

۲- قیمت اولیه

۳- هزینه ساخت

۵-۲-۱- بازده

یکی از دلایل اصلی معرفی موتورهای مغناطیس دائم برای استفاده در کولرهای آبی، بازده بالای این نوع موتورها می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار کاهش توان مصرفی با بازده وسیله مورد استفاده رابطه مستقیم

دارد، افزایش بازده سیستم باعث کاهش توان مصرفی و در نهایت باعث کاهش هزینه‌های جاری می‌شود. مقایسه موتورهای معرفی شده از نظر بازده در جدول ۵-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱: مقایسه بازده موتورهای AFPM

n (%)	Speed (RPM)	
88.03	300	AFPM شیار دار
91.088	300	AFPM بدون شیار
0.8973	300	AFPM بدون هسته
91.017	1500	AFPM شیار دار
90.50	1500	AFPM بدون شیار
92.256	1500	AFPM بدون هسته

جدول ۵-۲: رتبه‌بندی موتورهای AFPM بر اساس حداکثر مقدار بازده در یک سرعت مشخص

AFPM شیار دار	AFPM بدون هسته	AFPM بدون شیار	با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه
AFPM بدون شیار	AFPM شیار دار	AFPM بدون هسته	با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

۵-۲-۲- قیمت اولیه

یکی از مهمترین عواملی که مانع اجراء عملی بسیاری از تحقیقات علمی می‌شود، میزان سرمایه اولیه برای انجام آن است. با توجه به این موضوع، باید هزینه تولید و ساخت را با رعایت محدودیت‌های موجود به حداقل مقدار خود رساند. اگر از موتور AFPM در یک کولر آبی استفاده شود باید قیمت تولید این وسیله به حداقل مقدار ممکن کاهش داده شود. از آنجایی که قیمت موتورهای مغناطیس دائم با میزان آهنربای

دائم مورد استفاده در آنها متناسب است، باید میزان آهنربای دائم مورد استفاده در این نوع موتورها را تا حد امکان کاهش داد. حجم آهنربای دائم مورد استفاده در موتورهای AFPM در جدول ۳-۵ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۵: مقایسه آهنربای مصرفی در موتورهای AFPM

PM Volume (mm^2)	Speed (RPM)	
65445	300	AFPM شیار دار
124652	300	AFPM بدون شیار
52202	300	AFPM بدون هسته
8880	1500	AFPM شیار دار
11614	1500	AFPM بدون شیار
12767	1500	AFPM بدون هسته

جدول ۴-۵: رتبه‌بندی موتورهای AFPM بر اساس حداقل میزان آهنربای مصرفی در سرعت مشخص

AFPM بدون شیار	AFPM شیار دار	AFPM بدون هسته	با سرعت ۳۰۰ بر دقیقه
AFPM بدون هسته	AFPM بدون شیار	AFPM شیار دار	با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

۳-۲-۵ ساخت

در فرآیند ساخت هر محصول فناوری و مشکلات ساخت تأثیر بسزایی بر قیمت نهایی محصول دارد. به‌همین دلیل در انتخاب نوع موتور AFPM نیز باید به این نکته مهم توجه شود.

هسته موتورهای الکتریکی به نحوی ساخته می‌شوند که کمترین ولتاژ در آنها القا شود یا به عبارت دیگر میزان تلفات جریان‌های گردابی در آنها به حداقل مقدار خود برسد. به‌همین دلیل هسته استاتور موتورهای

RF به صورت ورقه‌های بر روی هم گذاشته شده و موتورهای AF به صورت ورقه‌های رول شده ساخته می‌شوند. با توجه به این مطلب، برای ایجاد شیار در هسته استاتور موتورهای AF نمی‌توان از اتصال صفحات پانچ شده بر روی یکدیگر استفاده کرد. شیارهای موجود در هسته استاتور موتورهای AF را با استفاده از برش وایرکات و یا ایجاد گشودگی و سپس رول کردن ورقه ایجاد می‌کنند. این دو روش دارای پیچیدگی فراوانی است که باعث افزایش قیمت تمام شده موتور AF می‌شود. به منظور حذف یا کاهش این مشکل باید موتورهای AFPM بدون شیار مورد استفاده قرار گیرد. در این نوع موتورها به دلیل عدم وجود شیار در هسته استاتور مشکلاتی مانند نوسانات شار در فاصله هوایی وجود ندارد؛ اما از طرف دیگر در این نوع موتورها نمی‌توان سیم‌پیچ‌ها را به صورت جداگانه پیچید و سپس در جای خود قرار داد. با توجه به این نکته، سیم‌پیچی این نوع موتور دارای پیچیدگی خاصی می‌باشد که این پیچیدگی باعث افزایش هزینه اولیه می‌شود. به دلیل مشکلات ایجاد شده به وسیله هسته استاتور باید از موتور AFPM فاقد هسته استاتور و پیچیدگی‌های حاصل از آن استفاده کرد. سیم‌پیچ‌های این نوع موتورها با استفاده از چسب مخصوصی به یکدیگر متصل می‌شوند و حالت یک دیسک را به خود می‌گیرند و با قرار دادن میله‌هایی درون سیم‌پیچ‌ها اتصالات مورد نیاز برای ثابت نگهداشتن استاتور فراهم می‌شود.

با توجه به مطالب گفته شده در سر فصل‌های ۱-۲-۵، ۲-۲-۵ و ۳-۲-۵ مناسب‌ترین نوع موتور برای استفاده در کولرهای آبی موتور AFPM بدون هسته می‌باشد. این موتور دارای بازده بالا، میزان مصرف آهنربای تقریباً کم و مشکلات ساخت کم است.

۳-۵- راه‌انداز اینورتری

موتورهای سنکرون به دلیل عدم وجود گشتاور در زمان راه‌اندازی، برای رسیدن به سرعت سنکرون و ایجاد گشتاور، نیازمند راه‌انداز هستند. به دلیل خود راه‌انداز بودن موتورهای القایی مورد استفاده در کولرهای آبی مرسوم این نوع کولرها نیاز به دستگاه راه‌انداز ندارند که این امر باعث افزایش هزینه اولیه کولر آبی

بهبودیافته نسبت به کولرهای آبی مرسوم می‌شود. قیمت یک عدد راه‌انداز موتور سنکرون با مدل PMD 2420E ساخت کشور ایران در حدود ۲/۴۹۸/۰۰۰ ریال است. این راه‌انداز دارای توان خروجی ۷۲۰ وات با ولتاژ ۱۰ الی ۳۶ ولت و دارای فرکانس کلید زنی ۶۰ کیلوهرتز می‌باشد. این منبع تغذیه اینورتری برای راه‌اندازی موتورهای آهنربای دائم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۵- تلفات پولی‌ها یا فلکه

در کولرهای آبی مرسوم با استفاده از سیستم تبدیل سرعت پولی و تسمه، قدرت از موتور الکتریکی به پره‌های کولر آبی منتقل می‌شود که این عمل با تلفات همراه می‌باشد. محاسبه این تلفات امری ضروری می‌باشد. در این سیستم تبدیل سرعت تلفات به دو صورت زیر اتفاق می‌افتد:

۱- تلفات ناشی از اصطکاک تسمه با پولی‌ها

۲- تلفات ناشی از لغزش تسمه بر روی پولی‌ها

محاسبه این دو تلفات نیازمند اطلاعات دقیقی از سیستم تبدیل سرعت است؛ که این اطلاعات به شرح

زیر است:

۱- ضریب اصطکاک تسمه

۲- ضریب اصطکاک پولی‌ها

۳- میزان کشیده شدن تسمه در بین دو پولی

۴- ابعاد دقیق ساختار پولی‌ها

۵- ساختار پولی

بدست آوردن این اطلاعات نیاز به آزمایش‌های عملی و دقیق بر روی تسمه و پولی دارد، به‌همین دلیل

این اطلاعات باید توسط سازندگان در اختیار مصرف‌کنندگان قرار بگیرد. به دلایل خاص این اطلاعات در دسترس مصرف‌کنندگان نمی‌باشد؛ بنابراین به دلیل عدم وجود این اطلاعات باید از تقریبی برای محاسبه تلفات پولی استفاده شود. تولیدکنندگان کولرهای آبی میزان بازده این سیستم تبدیل سرعت در شرایط کار نامی حدود ۹۵ درصد بیان کرده‌اند. از آنجایی که میزان این تلفات با سرعت موتور الکتریکی متناسب است و با فرض خطی بودن میزان بازده سیستم تبدیل سرعت با تغییر سرعت موتور الکتریکی می‌توان بازده این سیستم تبدیل سرعت را از معادله ۵-۱ محاسبه کرد.

$$\eta = -\frac{1}{24000}(n_s - 300) + 1 \quad (۱-۵)$$

۵-۵ بررسی اقتصادی استفاده از کولر آبی بهبودیافته با موتور مغناطیس دائم

با استناد به گزارش‌های تولیدکنندگان انواع کولرهای آبی، بازده موتور الکتریکی مورد استفاده در کولرهای آبی در بهترین حالت ۴۰ درصد است. همچنین این کولرها دارای دو سرعت برای پرتاب باد خروجی هستند که سطح آسایش نسبتاً کمی را برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌کند. با استفاده از کولر آبی بهبودیافته می‌توان سطح آسایش مصرف‌کنندگان و بازده موتور الکتریکی مورد استفاده در کولر آبی را افزایش داد. کیلووات مصرفی و اوج بار به وجود آمده به دلیل استفاده از کولرهای آبی در هر خانوار در جداول ۵-۵ و ۵-۶ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۵: میزان کیلووات ساعت مصرفی کولر آبی معمول برای هر خانوار

ماه	فرودین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد
کیلو وات ساعت	۰	۵,۹	۳۷,۲	۴۳,۸	۵۴,۶
ماه	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی
کیلو وات ساعت	۳۶,۶	۱۹,۳	۰	۰	۰

جدول ۵-۶: میزان اوج بار به وجود آمده به دلیل استفاده از کولر آبی معمول برای هر خانوار

ماه	فرودین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد
وات	۰	۴۳,۰۱۱	۲۵۵,۷۵۰	۳۰۲,۰۶۹	۳۷۸,۰۰۱
ماه	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی
وات	۲۵۰,۷۷۵۸	۱۳۸,۴۷۲۵	۰	۰	۰

به دلیل بازده بالای موتورهای مغناطیس دائم و استفاده از راه‌اندازه در کولر بهبود یافته، مصرف انرژی کاهش می‌یابد و سطح آسایش مصرف‌کنندگان افزایش پیدا می‌کند. روش‌های بازگشت سرمایه اولیه به صورت زیر است:

۱- افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان

۲- کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی

۳- کاهش میزان اوج بار مصرفی

۴- کاهش میزان مصرف ماهانه خانوار

۵-۱- افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان

در شهرهایی که قادر به استفاده از کولرهای آبی هستند، گاه دیده می‌شود که از کولرهای گازی پنجره‌ای و دوتکه (اسپلیت) استفاده می‌شود که این پدیده به دلیل سطح آسایشی است که این نوع کولرها در اختیار مصرف‌کنندگان خود قرار می‌دهند. کولرهای آبی بهبودیافته به دلیل استفاده از راه‌اندازه، از یک دستگاه تقریباً غیرهوشمند به یک دستگاه کاملاً هوشمند تبدیل می‌شوند که این امر باعث افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان می‌شود. با توجه به اینکه هزینه اولیه و مقدار برق مصرفی کولرهای آبی بهبودیافته از کولرهای گازی پنجره‌ای و دوتکه کمتر است، مصرف‌کنندگان به استفاده از کولرهای بهبودیافته ترغیب می‌شوند. به دلیل اینکه کولر آبی بهبودیافته باعث افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان خود می‌شود،

مقداری از هزینه اولیه را می‌توان برای این افزایش سطح آسایش در نظر گرفت. از آنجایی که محاسبه مقدار هزینه پرداخت شده برای افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان دارای پیچیدگی فراوانی می‌باشد و نیازمند تحقیقات و بررسی‌های علمی دقیق دارد، از یک نمونه موجود برای بدست آوردن این مقدار استفاده می‌شود. شرکت آبسال که یکی از تولیدکننده‌های مطرح کولرهای آبی در سطح کشور ایران می‌باشد به تولید کولر آبی معروف به 'کولر آبی کم‌مصرف' که به گفته این شرکت موتور مورد استفاده در آن دارای بازده ۷۰ درصد می‌باشد اقدام نموده است. این نوع کولر نسبت به نمونه‌های مشابه خود ۴,۰۰۰,۰۰۰ ریال گرانتر است. با توجه به اینکه بازده موتور AFPM بدون هسته پیشنهاد شده در این پایان‌نامه بیشتر از موتور مورد استفاده در 'کولر آبی کم‌مصرف' است، می‌توان بطور بدبینانه میزان هزینه برای افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان را ۲,۰۰۰,۰۰۰ ریال در نظر گرفت.

۵-۲- کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی

تولید برق دارای هزینه‌های خارجی است که عمدتاً این نوع هزینه‌ها بر افرادی تحمیل می‌گردد که نقشی در تولید برق ندارند. هزینه‌های بیرونی و یا خارجی زمانی شکل می‌گیرد که فعالیت‌های اقتصادی یک یا چند گروه بر دیگر گروه‌ها اثر منفی بگذارد. ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های حرارتی موجب انتشار دی‌اکسید کربن و اکسیدهای سولفور و نیتروژن می‌شود که می‌تواند بر بناها و سلامت انسان‌ها تأثیر منفی بگذارد [۲۰]. تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌های برق در مرجع [۲۱] آورده شده است.

هزینه تولید آلاینده برای سه نوع نیروگاه پرکاربرد در کشور ایران در جدول ۵-۸ آورده شده است.

جدول ۵-۷: هزینه زیست‌محیطی به ازای تولید هر کیلووات ساعت برای سه نوع نیروگاه [۲۰].

نوع نیروگاه	نیروگاه گازی	نیروگاه بخار	نیروگاه سیکل ترکیبی
هزینه تولید (\$/kWh)	۰,۰۵۵۰۱۸۸	۰,۰۵۴۷۲۷۶	۰,۴۹۰۶۶۸

حال با توجه به اطلاعاتی که در مراحل قبلی به‌دست‌آمده است می‌توان کاهش هزینه‌ها به دلیل کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی را محاسبه نمود.

۳-۵-۵ کاهش میزان حداکثر بار مصرفی

حداکثر برق تولید شده به‌وسیله‌ی نیروگاه‌های برق با حداکثر بار مصرفی باید تطابق داشته باشد تا در زمان اوج بار هیچ مشترکی به دلیل کمبود تولید برق دچار خاموشی نشود. اگر حداکثر توان مصرفی کاهش داده شود همانند این است که به میزان همان کاهش، نیروگاه برق احداث شده است. هزینه احداث نیروگاه-های برق در مرجع [۲۱] آورده شده است.

نیروگاه‌های موجود در کشور ایران از نظر توان و نوع عملکرد که آماده بهره‌برداری هستند در مرجع [۹] آورده شده است.

جدول ۵-۸: مقدار تولید هر نوع نیروگاه و درصد آن از کل تولید کشور

نوع نیروگاه	هسته‌ای	نیروگاه آبی	سیکل ترکیبی	بخار	گازی
توان کل (مگاوات)	۱۴۰۰	۱۶۶۴۵,۳۳	۵۰۱۶۶,۴	۱۱۲۵۷,۵	۹۸۵۸,۹
در صد از کل تولید	۱,۵۶۷۲	۱۸,۶۳۳۹	۵۶,۱۵۹۶	۱۲,۶۰۲۴	۱۱,۰۳۶۷

هزینه ساخت نیروگاه‌های موجود در کشور ایران در جدول ۵-۱۲ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۹: هزینه ساخت نیروگاه‌های مختلف برحسب \$/kW [۲۱].

نوع نیروگاه	هسته‌ای	نیروگاه آبی	سیکل ترکیبی	بخار	گازی
هزینه احداث (\$/kW)	۵۵۳۰	۲۹۳۶	۱۰۲۳	۱۱۹۶,۵	۶۷۶

اولویت استفاده از نیروگاه‌های برق برای تولید توان به صورت زیر می‌باشد:

۱- نیروگاه‌های هسته‌ای

۲- نیروگاه‌های آبی

۳- نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

۴- نیروگاه‌های بخار

۵- نیروگاه‌های حرارتی

با توجه به مطالب ذکر شده، باید به این نکته توجه کرد که کاهش اوج بار به وسیله کولر آبی بهبودیافته برابر با ساخت کدام یک از نیروگاه‌ها می‌باشد. در زمان اوج بار مصرفی، نیروگاه‌های مختلف به صورت جدول ۱۳-۵ میزان توان مورد نیاز هر خانوار را تولید می‌کنند.

جدول ۱۰-۵: نوع انرژی تولید شده برای یک خانوار در اوج بار مصرفی

نوع نیروگاه	هسته‌ای	نیروگاه آبی	سیکل ترکیبی	بخار	گازی
مقدار توان (W)	۳۰,۱۰۳۹	۳۵۷,۹۳۳	۱۰۷۸,۷۵۴	۲۴۲,۰۷۶	۲۱۲,۰۰۹

با توجه به جدول ۱۳-۵ کاهش اوج بار مصرفی همانند ساخت نیروگاه گازی و بخار است. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان میزان سود به دست آمده به دلیل کاهش اوج بار مصرفی را از معادله ۲-۵ محاسبه کرد.

$$C_{LP} = Lo \left(P_{CT} * \frac{CaCo_{CT}}{1000} + (P_d - P_{CT}) * \frac{CaCo_{ST}}{1000} \right) * dollar \quad (2-5)$$

که C_{LP} هزینه کاهش یافته به دلیل کاهش اوج بار بر حسب ریال، Lo نسبت طول عمر کولر آبی بهبودیافته

به نیروگاه برق می‌باشد که در اینجا $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شده است، P_{CT} مقدار توان تولید شده به وسیله نیروگاه گازی برای هر خانوار، $CaCo_{CT}$ هزینه ساخت نیروگاه گازی به ازای هر کیلو وات، dollar ارزش ریالی هر دلار آمریکا، P_d اوج بار کاهش یافته شد به دلیل استفاده از کولر آبی بهبود یافته و $CaCo_{ST}$ هزینه ساخت نیروگاه بخار به ازای هر کیلو وات می‌باشد.

۴-۵-۵ - کاهش میزان مصرف ماهانه خانوار

قیمت برق در اروپا به صورت میانگین برای هر کیلو وات ساعت در حدود ۲۰ سنت (در حدود ۷,۰۰۰ ریال) می‌باشد. به دلیل پرداخت یارانه، مصرف‌کنندگان خانگی فقط ۳۵۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت پرداخت می‌کنند. با کاهش کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار میزان سود به دست آمده به ازای هر کیلووات ساعت برابر با تفاضل قیمت واقعی برق با قیمت پرداخت شده به وسیله هر خانوار می‌باشد.

برای محاسبه میزان سود به دست آمده به دلیل کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و کیلووات ساعت مصرفی هر خانوار باید به ضریب کاهش ارزش پول در هر سال نیز دقت کرد که این مقدار در کشور ایران در حدود ۰/۸ است

با توجه به روش‌های بازگشت سرمایه اولیه، میزان سود به دست آمده در سال اول از معادله ۳-۵ محاسبه می‌شود.

$$C_y = -C_{inv} - C_{pm} + C_{Lp} + C_r + C_{sc} + C_{kw} \quad (۳-۵)$$

که C_y سود به دست آمده در سال اول، C_{inv} هزینه راه‌انداز اینورتری، C_{pm} هزینه ناشی از آهنربای دائم، C_{Lp} صرفه‌جویی به دلیل کاهش اوج بار، C_r هزینه در نظر گرفته شده برای افزایش سطح آسایش، C_{sc} صرفه‌جویی به دلیل کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و C_{kw} صرفه‌جویی به دلیل کاهش کیلووات ساعت مصرفی در طول یک سال می‌باشد.

۵-۶ طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته

با اطلاعات به‌دست‌آمده در بخش ۵-۵-۵-۵ تابع هدف بهینه‌سازی طراحی موتور الکتریکی مورد نظر از کاهش آهنربای دائم مصرفی به حداکثر سازی سود به‌دست‌آمده در یک سال تغییر داده می‌شود. با توجه به معادله تقریبی معرفی شده برای محاسبه تلفات سیستم تبدیل سرعت در این طراحی متغیر دیگری برای انتخاب سرعت موتور مورد نظر اضافه خواهد شد تا سرعت بهینه برای موتور نیز محاسبه شود. بازه راه‌انداز اینورتری نیز ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج طراحی انجام شده در جدول ۵-۱۴ نمایش داده شده است.

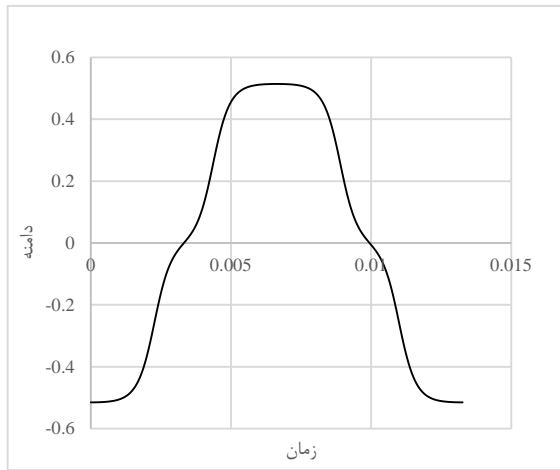
جدول ۵-۱۱: پارامترهای مختلف موتور الکتریکی طراحی شده به منظور حداکثرسازی سود به‌دست‌آمده در

یک سال

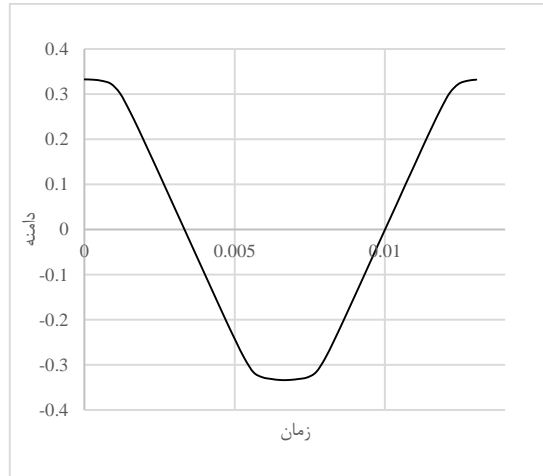
λ	α	$B_g(T)$	$g(mm)$	P	$V_L(V)$	$J_s(I/mm^2)$	A
۰,۶۸۵۹	۰,۶۸۴۲	۰,۳۴۹۳	۱,۰۰۰۶	۳	۲۸,۸۵۵۱	۵,۹۴۹۵	۳۰۰۰۰
N_{ph}	$W_{Cu}(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$	$D_o(mm)$	$L_{CS}(mm)$	$L_{CR}(mm)$	$L_{PM}(mm)$
۲۷۰	۸,۰۵۶۶	۰,۸۸۶۴	۱,۰۳۹۷	۱۱۷,۸۱۹۴	۰	۷,۰۵۸۵	۳,۷۳۳۹

نتایج شبیه‌سازی موتور AFPM بدون هسته طراحی شده به منظور حداکثرسازی سود به‌دست‌آمده در سال اول در شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ و نمودار ۵-۱ نمایش داده شده است.

توزیع شار مغناطیسی در نقاط مختلف ماشین در حالت بی‌باری در شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ نشان داده شده است.

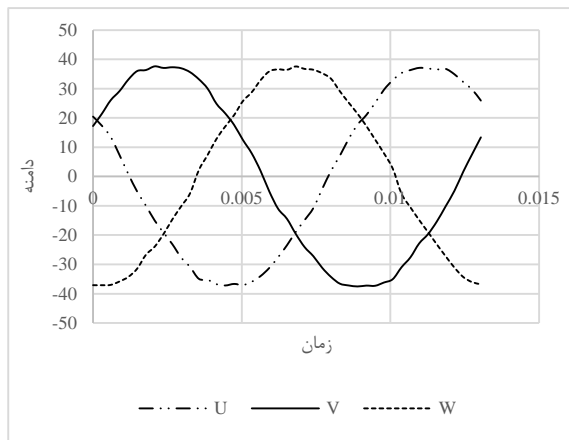


(b)

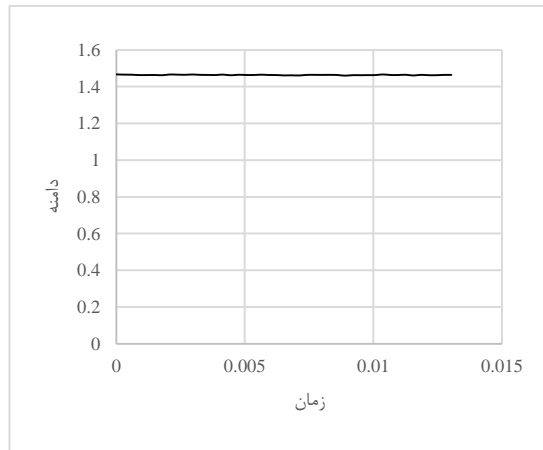


(a)

شکل ۲-۵: میانگین چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب موتور (b) چگالی شار مغناطیسی سیم پیچ یک فاز زیر یک قطب موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

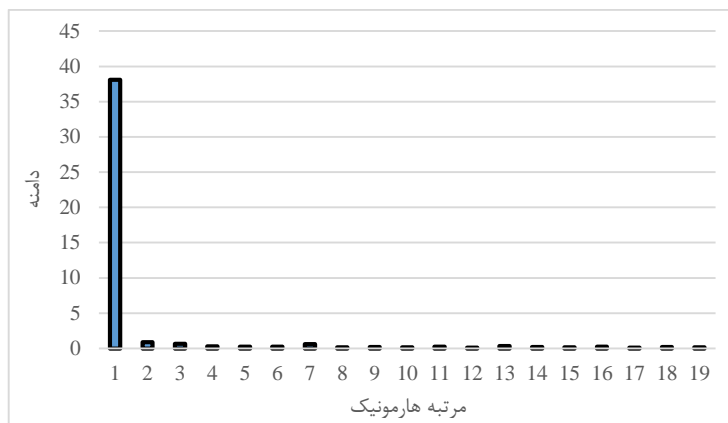


(b)



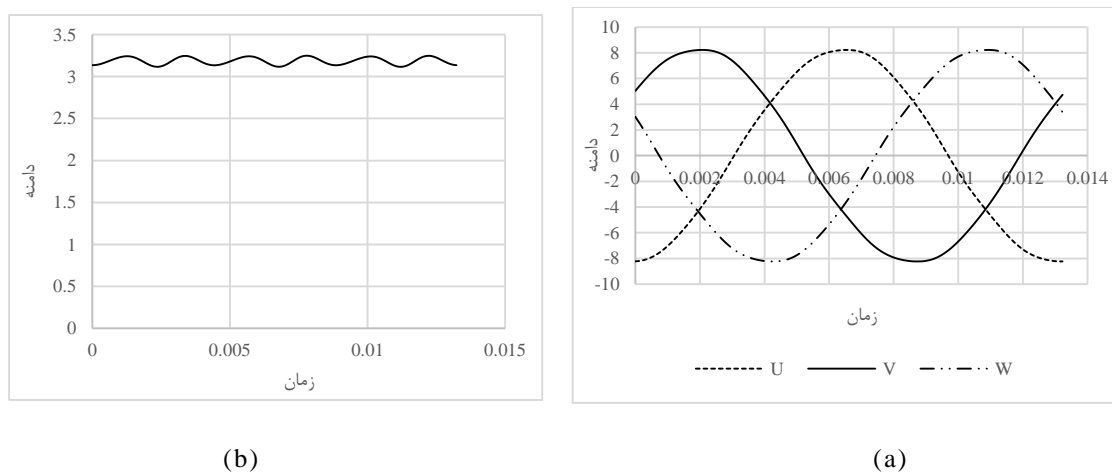
(a)

شکل ۳-۵: (a) چگالی شار مغناطیسی دندان استاتور موتور (b) ولتاژ القایی در سیم پیچ‌ها AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه



نمودار ۱-۵: FFT مربوط به ولتاژ القایی در سیم پیچ‌های سه فاز موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

جریان ورودی و گشتاور خروجی در حالت باردار در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵: (a) جریان ورودی و (b) گشتاور خروجی موتور در بار نامی موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

مقایسه نتایج حاصل از معادلات اندازه و روش اجزاء محدود در جدول ۵-۱۵ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از معادلات اندازه و تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

موتور AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

	B_g	B_{cs}	B_{cr}	K_i	n	$\cos(\varphi)$	E_{ph}	I_{ph}
FEM	۰,۳۳۲۸	-	۱,۴۶۶۸	۱,۳۷۷۳	۰,۹۱۷۳	۰,۹۶۱۲	۲۶,۹۴۱۵	۵,۸۷۰۵
معادلات اندازه	۰,۳۴۳۹	-	۱,۵	۱,۳۶۵۶	۰,۹۳۳	۰,۹۸	۲۸,۰۵۳۱	۵,۸۷۷۴

مقایسه نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی و روش حجم محدود در جدول ۵-۱۶ آورده شده است.

جدول ۵-۱۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی با استفاده از مدار معادل و تجزیه و تحلیل حجم محدود موتور

AFPM بدون هسته با سرعت ۱۵۰۰ بر دقیقه

	T_g	T_{stator}	T_{rotor}	T_{coil}	T_{magnet}
FVM	۵۶,۸۵۶	-	۵۰,۷۴۰۳	۱۶۲,۹۷۸	۵۰,۸۸۹
مدار معادل حرارتی	۵۷,۸۷۲۸	-	۵۱,۸۱۵	۱۶۳,۳۱۴۵	۵۱,۷۷۶۵

میزان سود به‌دست‌آمده به دلیل استفاده از این نوع موتور در کولرهای آبی در زیر محاسبه شده است.

$$C_y = -C_{inv} - C_{pm} + C_{Lp} + C_r + C_{sc} + C_{kw}$$

$$C_y = -2498000 - 516223 + 1023735 + 2000000 + 676695 + 13996$$

$$C_y = 826174$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، سود قابل توجهی به ازای هر خانوار بدست می‌آید. اگر فرض شود که تمامی

مصرف‌کنندگانی که از کولر آبی مرسوم استفاده می‌کنند، موتور القایی تکفاز خود را با موتور معرفی شده

جایگزین کنند در سال اول ۱۲۳۹ میلیارد تومان سود بدست می‌آید.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پایان‌نامه به بررسی استفاده از موتورهای الکتریکی بازده بالا در کولرهای آبی پرداخته شده است. با توجه به بررسی و تحقیقات انجام‌شده موتور AFPM دوطرفه با یک استاتور و دو رتور به منظور این کاربرد انتخاب شده است. هسته استاتور موتورهای AFPM دارای سه نوع شیاردار، بدون شیار و بدون هسته است که در این پایان‌نامه هر سه نوع هسته مورد بررسی قرار گرفته شد است. به منظور انتخاب ساختار مناسب ابتدا موتورهای معرفی شده با استفاده از معادلات اندازه طراحی شده و سپس نتایج به‌دست‌آمده در نرم‌افزار اجزاء محدود و حجم محدود اعتبار سنجی می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزاء محدود بیانگر دقت بالای معادلات اندازه معرفی شده است.

دما یکی از پارامترهای مهم در طراحی ماشین الکتریکی است. به دلیل وجود تلفات در ماشین‌های الکتریکی دمای قسمت‌های مختلف ماشین شروع افزایش می‌کند. به دلایل متعدد در مقالات مختلف دمای ماشین‌های مختلف یک عدد ثابت فرض شده است که این امر باعث کاهش دقت روند طراحی می‌شود. در این پایان‌نامه از مدار معادل حرارتی برای محاسبه دمای ماشین استفاده شده است که این امر باعث افزایش دقت الگوریتم طراحی می‌شود. با طراحی و مقایسه موتورهای انتخاب‌شده و بررسی محدودیت‌های موجود، موتور AFPM بدون هسته برای استفاده در کولرهای آبی انتخاب شده است.

در این پایان‌نامه چهار روش برای بازگشت سرمایه اولیه معرفی شد. روش‌های بازگشت سرمایه اولیه به صورت یک معادله درآورده می‌شوند تا بتوان با استفاده از آن موتور مورد نظر را برای بدست آوردن حداکثر سود بهینه‌سازی کرد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که با استفاده از موتور معرفی شده در کولرهای آبی در انتهای هر سال به ازای هر خانوار سود قابل توجهی بدست می‌آید که باعث معقول و قابل‌اجرا بودن این طرح می‌شود.

با توجه به مطلب بیان‌شده می‌توان پیشنهادهای زیر را برای ادامه این کار داد.

- ۱- با توجه به عوامل محدودیت ساز مانند ارتعاشات، صوت و . . . می‌توان مدار معادل و یا روش محاسبه‌ی آنها را نیز وارد الگوریتم طراحی کرد.
- ۲- با محاسبه دما در الگوریتم طراحی می‌توان تغییرات خصوصیات مواد استفاده شده در موتور طراحی شده به دلیل تغییرات دما را نیز در نظر گرفت.
- ۳- استفاده از موتورهای مختلف مانند موتورهای القایی سه فازه و هیستریزیس در کولرهای آبی مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار گیرد و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شود.
- ۴- میزان هزینه برای افزایش سطح آسایش مصرف‌کنندگان کولرهای آبی به صورت دقیق محاسبه شود.

مراجع

- [1] A.Mahmoudi, S.Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, and Wooi Ping Hew, "Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 49, no. 4, pp. 1479-1492, 2013.
- [2] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, and H. W. Ping, "Improvement to performance of solid-rotor-ringed line-start axial-flux permanent-magnet motor," Progr. Electromagn. Res, vol. 124, pp. 383-404, 2012.
- [3] M.Aydin, and M.Gulec, "Reduction of Cogging Torque in Double-Rotor Axial Flux Permanent Magnet Disc Motors: A Review of Cost Effective Magnet Skewing Techniques with Experimental Verification," pp. 1-9, 2013.
- [4] F.Caricchi, F.G.Capponi, F.Crescimbin, and L.Solero, "Experimental Study on Reducing Cogging Torque and No-Load Power Loss in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines With Slotted Winding," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, vol. 40, no. 4, pp. 1066-1075, 2004.
- [۵] ق. حیدری نژاد، ش. دلفانی و م. حیدری نژاد، اصول و کاربرد خنک کننده‌های تبخیری، تهران- ایران: انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۷.
- [۶] ا. عابدی و ک. خسرویان، "مقایسه فنی و اقتصادی چیلرهای جذبی و تراکمی"، در نخستین همایش بین المللی چیلر و برج خنک کن ایران، تهران، ۱۳۸۹.
- [۷] "هواشناسی کشور ایران"، دسترسی: <http://www.havairan.com> [دستیابی در ۱۳۹۳/۱۲/۲۰].
- [۸] "شرکت آبسال"، دسترسی: <http://www.aabsalco.com> [دستیابی در ۱۳۹۳/۱۱/۲۰].

- [۹] “مرکز آمار شرکت توانیر،” دسترسی: <http://amar.tavanir.org.ir>. [دستیابی در ۱۰/۱۲/۱۳۹۳].
- [10] R, Cao; C, Mi; M, Cheng, "Quantitative comparison of flux-switching permanent magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 48, no. 8, pp. 2374-2384, 2012.
- [11] C. C. Hwang, P. L. Li, F. C. Chuang, C. T. Liu, and K. H. Huang, "Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine," IEEE Trans. Magn, vol. 45, no. 3, pp. 1760-1763, 2009.
- [12] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, "A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines," IEEE Trans Ind Appl, vol. 34, no. 1, pp. 92-97, 1998.
- [13] A. Parviainen, "Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines," Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
- [۱۴] م. سلطانی، طراحی ماشین‌های آسنکرون، تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۷۴.
- [15] Kenya Jin, and Takuya Shindo, "Analysis of Dynamical Characteristic of Canonical Deterministic PSO," 2010.
- [۱۶] ف. پ. اینکروپرا و د. پ. دویت، مقدمه ای بر انتقال گرما، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۶.
- [۱۷] ک. صرافان، ا. دارابی، “محاسبه تلفات و توزیع دمای ماشین شار محوری آهنربای دائم،” شاهرود، ۱۳۹۱.
- [18] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang and Maarten J. Kamper , Axial Flux PermanentMagnet Brushless Machines, Springer,Second edition, 2008.
- [19] D.A Howey, P.R.N. Childs, and A.S. Holmes, "Air-gap Convection in Rotating Electrical Machines," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, p. 1367–1375, 2012.

[۲۰] ن. رحیمی, ن. کارگر, ص. حسن و ن. م. محمد, "تعیین هزینه‌های اجتماعی (خارجی) انتشار SO₂, NO_x و CO₂ در بخش انرژی کشور (نیروگاه‌ها)", در علوم و تکنولوژی محیط زیست, تهران, ۱۳۹۲.

[21] U.S. Department of Energy, "Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants," U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.

[۲۲] "مرکز آمار کشور ایران, "دسترسی: <http://www.amar.org.ir>. [دستیابی در ۱۳۹۳/۱۲/۲].

[23] B.Dallas; L.Joshua; P.Karen; D.Burtraw, J.Linn, K.Palmer, and Ant", "The Costs and Consequences of Clean Air Act Regulation of CO₂ from Power Plants", American Economic Review, Washington, DC, 2014.

Abstract

Arid and semi-arid of Iran country have made the use of cooling devices inevitable. More than 50 percent of domestic consumers use evaporative coolers to cool their house. Due to the low efficiency of the driving electric motor of these types of coolers and a large number of consumers, the structure change of the electric motor and increase of its efficiency are vital. AFPM motors can be a suitable alternative for induction motors used in evaporative coolers due to appropriate performance characteristics such as high efficiency and power density. Because of the use of permanent magnet materials and power electronic devices in these types of motors, the manufacturing costs of evaporative coolers increase. Considering that one of the main factors in executable of any plan is its initial cost and profit, in this thesis it is tried to introduce the methods of returning primary capital to replace the induction motor used in evaporative coolers with AFPM motor. According to the conducted surveys in this field, four methods for returning primary capital have been introduced as follows:

1- Reduction of peak load caused by each household, 2- Reduction of environmental pollution, 3- Reduction of consumed kWh of each household and 4- Increasing the comfort level of consumers

Then the amount of increasing initial cost of evaporative cooler manufacturing due to the use of AFPM motors and the amounts of returning initial capital by each of four introduced methods are calculated that the difference between these two is the obtained profit. Maximizing the obtained profit as the optimization objective function is considered in the design of an AFPM motor to maximize the obtained profit from this replacement. By calculating the profit obtained from these four methods, it is observed that at the end of each year a significant profit obtained for households that have replaced their common evaporative coolers with improved evaporative coolers.

Keywords: evaporative cooler, permanent magnet, axial flux permanent magnet motor, profit, efficiency



Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Department of Power Electrical

**Technical and economical feasibility studies and design of a PM
motor as an alternative for low efficiency single phase induction
motor of a evaporative coolers**

Student:

Milad Nezami Vatan Doost

Supervisor:

Ahmad Darabi

Advisor:

Ahmad Madadi

**A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science in Electrical Engineering**

February 2016