

# طراحی بهینه موتور آهنربای دایم با هدف افزایش چگالی گشتاور در کاربرد فلاپویل: طراحی، تحلیل المان محدود و ساخت

امید صفدرزاده، حسین ترکمن و محمد مهدوی فخر

فلاپویل‌ها<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱] و [۲]. در این بین، تکنولوژی فلاپویل نسبت به سایرین مزایایی چون طول عمر بالا، قابلیت تحویل توان بالا و سازگاری با محیط زیست را دارد [۳]. فلاپویل‌ها ممان‌های اینرسی قابل توجهی هستند که انرژی الکتریکی را به صورت انرژی مکانیکی (جنبشی) در خود ذخیره می‌کنند. برای تزریق یا برداشت انرژی از فلاپویل نیاز به رابط مکانیکی-الکتریکی می‌باشد که این رابط موتورها/ژنراتورهای الکتریکی هستند.

از انواع مختلفی از موتورها همچون رلوکتانس سویچی [۴]، القایی و آهنربای دایم می‌توان در فلاپویل‌ها بهره گرفت [۵] که هر یک با مزایا و معایبی همراه هستند. در این بین موتورهای آهنربای دایم با توجه به تسهیلاتی که در حالت ژنراتوری فراهم می‌کنند بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند [۶] و [۷]. با توجه به محدودیت‌هایی که برای فضای موتور در سیستم‌های ذخیره انرژی فلاپویل وجود دارد موتورهای با چگالی گشتاور بالا می‌توانند عمل شارژ و دشارژ ممان اینرسی را در زمان کوتاه‌تری انجام دهند و این بدین معنی است که توان فلاپویل بالاتر خواهد بود. به عبارتی میزان ظرفیت انرژی فلاپویل توسط اندازه ممان اینرسی و محدودیت سرعت چرخش آن تعیین می‌شود در حالی که توان فلاپویل توسط توان موتور متصل به آن مشخص می‌گردد.

در زمینه طراحی بهینه موتورهای آهنربای دایم بدون جاروبک تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. بهینه‌سازی با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای یکی از موضوعات داغی بوده که توسط روش‌های مختلفی از جمله الگوریتم‌های جستجوی منطقی، ژنتیک و تکامل انجام گرفته است [۸] تا [۱۰]. استفاده از توابع چندهدفه برای طراحی بهینه موتور آهنربای دایم در [۱۱] صورت گرفته است. به منظور کاهش تلفات سیم‌پیچی موتور آهنربای دایم مینیاتوری و پایین آوردن دمای موتور در [۱۲] و [۱۳] طراحی بهینه‌ای بر روی بارگذاری الکتریکی موتور انجام شده است. بالا بردن چگالی گشتاور موتورهای آهنربای دایم یکی دیگر از موضوعات مورد توجهی بوده که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴] تا [۱۶]. ولی علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در این زمینه، طراحی بهینه چگالی گشتاور موتور آهنربای دایم برای بازه سرعتی محدود (سرعت نامی) انجام گرفته است [۱۷] در حالی که در کاربرد اتصال مستقیم این موتور به ممان اینرسی می‌بایست بازه سرعتی بسیار وسیع‌تری را برای طراحی در نظر گرفت و اصلاحات لازم را به الگوریتم بهینه‌سازی اعمال کرد.

در این مقاله طراحی بهینه برای موتور آهنربای دایم برای کاربرد در فلاپویل با هدف افزایش چگالی توان موتور صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا روابط طراحی حاکم بر موتور بیان شده و با توجه به این روابط تابع بهینه‌سازی برای چگالی توان موتور تشکیل شده است. این تابع با

چکیده: طراحی بهینه موتورهای الکتریکی به دلیل وجود پارامترهای طراحی مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی یک مسأله پیچیده بهینه‌سازی تلقی می‌شود، اگرچه اخیراً به واسطه به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی هوشمند قابل حصول شده است. در این مقاله طراحی بهینه موتور آهنربای دایم بدون جاروبک رتور خارجی برای کاربرد در ذخیره‌ساز فلاپویل با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به منظور دستیابی به چگالی گشتاور بیشینه در یک بازه سرعت انجام گرفته است. ابتدا معادلات طراحی موتور که مورد استفاده توابع ارزیابی الگوریتم می‌باشند ارائه شده‌اند و سپس روند پیاده‌سازی الگوریتم برای بهینه‌سازی موتور با تابع هدف چگالی گشتاور تشریح شده است. روند بهینه‌سازی تابع به همراه تعریف محدودیت‌های طراحی و مقادیر اولیه پارامترهای موتور به طراحی بهینه ابعاد آن منجر شده است. نتایج طراحی و بهینه‌سازی با استفاده از روش آنالیز المان محدود (FEA) مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای عملکردی ماشین محاسبه و تحلیل شده‌اند. در نهایت مدل ساخته شده موتور به همراه نتایج عملی ارائه شده که نشان‌دهنده کاربردی بودن الگوریتم پیشنهاد شده می‌باشد.

کلیدواژه: طراحی موتور آهنربای دایم، بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات، تحلیل المان محدود، چگالی گشتاور بیشینه.

## ۱- مقدمه

ذخیره انرژی الکتریکی به عنوان یک چالش در صنعت برق مطرح است. با توجه به این که منابع مختلف تولید انرژی از نیروگاه‌های بزرگ آبی و گازی گرفته تا منابع خانگی چون صفحات خورشیدی و یا توربین‌های بادی به صورت گسترده مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، نیاز به کنترل و مدیریت بر میزان تولید و مصرف به طور جدی احساس می‌شود. بسیاری از منابع توانایی تولید توان بالا را ندارند ولی می‌توانند انرژی زیادی را در مدت زمان طولانی‌تر تأمین کنند. برای مثال صفحات خورشیدی توانایی تأمین جریان بالا را به طور لحظه‌ای ندارند ولی در طول روز می‌توانند مقدار قابل توجهی انرژی الکتریکی تولید کنند. از این رو محققان به فکر ذخیره این انرژی در منابع ذخیره‌ساز افتادند تا بتوانند تحویل آنی این انرژی به منابع مصرف را مهیا کرد.

برای این منابع ذخیره‌ساز تکنولوژی‌های مختلفی از جمله بانک‌های خازنی، باتری‌ها، ابررساناهای مغناطیسی، سدهای تلمبه ذخیره‌ای و

این مقاله در تاریخ ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۲۳ مرداد ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

امید صفدرزاده، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: o.safdarzadeh@mail.sbu.ac.ir)

حسین ترکمن، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: h\_torkaman@sbu.ac.ir)

محمد مهدوی فخر، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: m.mahdavyfakhr@mail.sbu.ac.ir)

جدول ۱: پارامترهای عملکرد مورد نیاز طراحی.

مقدار	نام پارامتر
۶۰ W	توان خروجی
۵۰۰۰ r/min	سرعت نامی
۲۴ V	ولتاژ تغذیه
۱۵۰۰۰ A/m	بارگذاری الکتریکی ویژه
۰/۵ T	بارگذاری مغناطیسی ویژه

جدول ۲: مشخصات مواد استفاده شده در ساختار موتور آهنربای دائم.

مشخصات اصلی	نام تجاری	مشخصات
۲۰۰ A/m for ۱/۲۴ T	Non-oriented AISI	هسته
۱/۴۵ W/kg @ ۶۰ Hz	silicon steel (M ۲۷ ۲۹ Ga)	مغناطیسی
Br: ۰/۴ T @ ۲۰ °C	Ceramic Strontium	آهنربا
Cr: ۲۹۷ kA/m @ ۲۰ °C	Iron oxide (Ceramic ۱۰)	
E: ۲۹۶۷ kJ/m <sup>۳</sup>		

موتورهای آهنربای دائم نسبت به سایر موتورها دارای چگالی توانی بالاتری هستند و به همین جهت در بسیاری از کاربردهایی که محدودیت فضا برای موتور وجود دارد از این موتورها استفاده می‌شود. میزان گشتاور تولیدشده در موتور آهنربای دائم از (۱) قابل محاسبه است [۲۳]

$$T_e = \frac{3}{2} (DL)(B_m \sin \beta) \left( \frac{4}{\pi} k_w T_{ph} I_m \right) \sin \delta \quad (1)$$

که در آن  $D$  قطر فاصله هوایی،  $L$  طول پشته،  $B_m$  دامنه چگالی شار تولیدشده توسط آهنربا در فاصله هوایی،  $\beta$  نصف طول زاویه‌ای آهنربای رتور،  $k_w$  ضریب سیم‌پیچی،  $T_{ph}$  تعداد دور سیم‌پیچ فاز،  $I_m$  دامنه جریان فازها و  $\delta$  زاویه توان موتور می‌باشد. میزان ولتاژ برگشتی تولیدشده در فاز از (۲) قابل محاسبه است [۲۳]

$$E_m = \frac{4}{\pi} k_w T_{ph} DL B_m \omega \sin \beta \quad (2)$$

که در این رابطه  $\omega$  سرعت چرخش رتور می‌باشد و حجم موتور از (۳) استخراج می‌گردد

$$V_m = \pi L (R + L_g + L_m + L_{ry})^2 \quad (3)$$

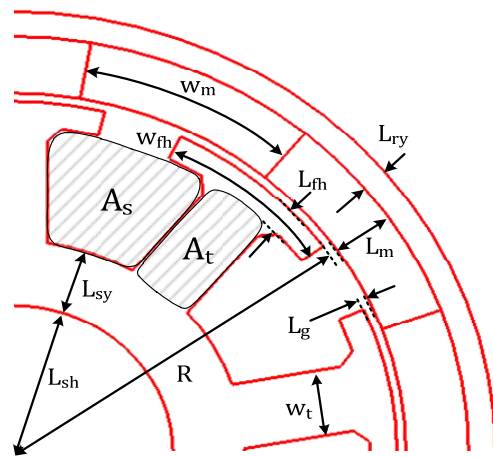
که  $R$  شعاع فاصله هوایی و  $L_g$ ،  $L_m$ ،  $L_{ry}$  به ترتیب ضخامت فاصله هوایی، طول شعاعی آهنرباها و یوغ رتور می‌باشد که در شکل ۱ آمده‌اند. پروسه کلاسیک برای طراحی موتور که با به کارگیری معادله خروجی موتور و ضرایب تجربی همراه است که با توجه به [۲۴] انجام گردیده و نتایج طراحی در جدول ۳ لیست شده‌اند.

البته طراحی کلاسیک موتور فرایندی با پارامترهای انتخابی در اختیار طراح بوده و می‌تواند توسط طراحان مختلف به طرق مختلف انجام گردد. در طراحی کلاسیک انجام گرفته در این مقاله از روش ارائه شده توسط آقای هانسلمن در [۲۴] استفاده شده است.

با توجه به (۱) تا (۳)، تابع بهینه‌سازی با توجه به حجم و گشتاور تولیدی موتور برای چگالی گشتاور بیشینه در بازه سرعتی مورد نظر مطابق (۴) محاسبه می‌شود

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{T_e(\omega_i)}{V_m(\omega_i)} - Violation(\omega_i) \quad (4)$$

جدول ۳: ابعاد به دست آمده برای موتور در طراحی کلاسیک.



شکل ۱: ابعاد موتور آهنربای دائم رتور خارجی.

توجه به محدودیت‌هایی که برایش تعریف گردیده است به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه شده است. با توجه به ابعاد بهینه، مدل موتور برای تحلیل المان محدود پیاده‌سازی شده و نتایج تحلیل المان محدود ارائه شده است. در پایان نمونه ساخته شده موتور مورد آزمایش قرار گرفته و پارامترهای اندازه‌گیری شده ارائه شده‌اند.

## ۲- طراحی بهینه موتور آهنربای دائم

مسئله طراحی موتور به مفهوم مشخص کردن ابعاد فیزیکی موتور و مواد به کار رفته برای ساخت آن می‌باشد. بهینه‌سازی طرح منجر به یافتن بهترین انتخاب برای ابعاد و مواد برای رسیدن به هدف یا اهداف ترکیبی خواهد شد. بدین ترتیب برای بیان مسئله می‌بایست ابعاد مورد نظر و تابع هدف را مشخص کرد. در این مقاله یک موتور آهنربای دائم رتور خارجی برای طرح فلابویل انتخاب شده است. موتورهای رتور خارجی نسبت به انواع رتور داخلی دارای قطر فاصله هوایی بزرگتر می‌باشند و در نتیجه امکان تولید گشتاور بیشتری میسر است [۱۸] و [۱۹]. پارامترهایی انتخابی که در طراحی موتور مورد توجه هستند در جدول ۱ لیست شده‌اند.

مقادیر ارائه شده در جدول ۱ به عنوان پارامترهای ورودی در طراحی کلاسیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بهینه‌سازی انجام شده هدف بالابردن چگالی گشتاور موتور با حفظ ابعاد فیزیکی در محدوده‌های مشخص است که در ادامه بحث خواهد شد. در شکل ۱ ابعاد فیزیکی موتور نشان داده شده است. با توجه به این که هدف از طراحی بهینه موتور دستیابی به چگالی گشتاور بیشینه است، برخی جزئیات ابعاد فیزیکی کم‌اهمیت‌تر شامل اثر گوشه‌ها و انحنای مورد بررسی قرار نگرفته‌اند چرا که تأثیر این مشخصات فیزیکی در بحث گشتاور پله‌ای، نوسانات گشتاور و یا اشباع محلی هسته بروز می‌کند و بدین ترتیب می‌توان از اثر آنها در گشتاور مؤثر تولیدشده صرف نظر کرد [۲۰] و [۲۱].

در انتخاب جنس هسته توجه به بحث اشباع مغناطیسی، تلفات هیستریزیس و گردابی نقش عمده را ایفا می‌کنند ولی در یک انتخاب متعادل مشخصات هسته‌های متداول در یک بازه محدود قرار می‌گیرند. هسته انتخاب شده و مشخصات اصلی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

آنچه که در انتخاب نوع آهنربا تأثیر غالب را دارد میزان انرژی آهنربا و قیمت آن است. انتخاب متداول آهنرباهای مورد استفاده در موتورهای آهنربای دائم، آهنربای نئودیم-آهن-برم و آهنربای سرامیکی می‌باشند که مشخصات خانواده آنها در [۲۲] قابل دسترسی است. در این طراحی با توجه به بحث قیمت و دستیابی، آهنربای سرامیکی با خلاصه مشخصات ارائه شده در جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفته است.

۶) پایان بهینه‌سازی و ارائه نتایج خروجی.

محدودیت‌هایی که برای انتخاب موقعیت ذره‌ها گذاشته می‌شود جواب بهینه‌سازی را به سمت یک خروجی معقول راهنمایی خواهد کرد. محدودیت‌های وضع شده این طراحی برای ابعاد فیزیکی به طور منطقی در (۷) لیست شده‌اند

$$L_g = 0.5 \text{ mm}$$

$$R + L_g + L_m + L_{ry} = 30 \text{ mm}$$

$$A_s + A_t = 71 \text{ mm}^2$$

$$L_{ry} = 1 \text{ mm}, L_{sy} = 3 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} < L_m < 10 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} < w_t < 10 \text{ mm}$$

$$25 \text{ mm}^2 < A_s < 144 \text{ mm}^2$$

(۷)

بازه‌های وضع شده برای پارامترهای فیزیکی در (۷) بر اساس نتایج به دست آمده از طراحی کلاسیک و تجربیات حاصل شده در طراحی‌های موجود در مراجع است. به این نکته باید توجه شود که مرز این بازه‌ها تعیین کننده نقطه بهینه جامع نیست و به عبارتی این بازه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بهترین موقعیت ذرات روی مرز بازه قرار نگیرد.

همان طور که گفته شد، ابعاد فیزیکی نشان داده شده در شکل ۱ که به عنوان عناصر تشکیل دهنده هر ذره (پاسخ) شناخته می‌شوند با مقادیر اولیه موقعیت و سرعت بارگذاری می‌شوند و سپس با استفاده از تابع هدف (چگالی گشتاور) ارزیابی‌ها طبق فرایند توصیف شده صورت می‌گیرد. همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات با توجه به محدودیت‌های وضع شده در این طراحی به ازای دو شاخص در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. همان طور که دیده می‌شود موقعیت‌های ذرات بر اساس فضای  $L_m/R$  و  $A_t/A_s$  نشان داده شده است. علت انتخاب این دو شاخص به تصویر کشیدن همگرایی ذرات با توجه به مصالحه بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی بوده است. نسبت  $L_m/R$  مصالحه بین بارگذاری مغناطیسی و الکتریکی را در راستای شعاعی و نسبت  $A_t/A_s$  مصالحه بین بارگذاری مغناطیسی و الکتریکی ماشین را در راستای زاویه‌ای تصویر می‌کند. در مرحله تکاملی اول همان طور که در شکل ۲-الف مشخص است موقعیت پاسخ‌ها با یک توزیع یکنواخت پخش شده است. با ادامه فرایند بهینه‌سازی موقعیت پاسخ‌ها با توجه به موقعیت‌های کسب شده به سمت نواحی بهینه محلی نزدیک می‌شوند و همان طور که در شکل ۲-ب مشخص است بعد از مرحله ۱۰۰ام تکامل پاسخ‌ها به صورت مشهود در دو ناحیه در حال نزدیک شدن به هم می‌باشند که ناحیه بالایی یک نقطه بهینه محلی و ناحیه پایینی نقطه بهینه جامع می‌باشد. سرانجام بعد از مرحله ۵۰۰ام تکامل جواب‌ها همگی به نقطه بهینه جامع همگرا می‌شوند که در شکل ۲-ج قابل مشاهده است. هر چند موقعیت رسیدن به موقعیت نقطه جامع بهینه و سرعت رسیدن به آن در الگوریتم‌های تکاملی وابستگی بالایی به انتخابات اولیه و ضرایب انتخاب شده برای سرعت تکامل دارد ولی نتایج حاصل شده از این تحلیل نشان می‌دهد که همگرایی به موقعیت جامع بهینه در شرایط مختلف اولیه اتفاق می‌افتد و تنها تعداد مراحل تکامل تغییر پیدا می‌کند.

با استفاده از نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات خروجی‌های طراحی موتور استخراج گردیده که در جدول ۴ ارائه شده است. برای حصول این نتایج از روابط و محدودیت‌های وضع شده برای ابعاد موتور و همچنین موقعیت نقطه جامع بهینه استفاده شده است.

مقدار	مشخصه فیزیکی	مقدار	مشخصه فیزیکی
۸ mm	$W_{ph}$	۳/۱ mm	$L_m$
۱/۱ mm	$L_{ph}$	۲۶ mm	$R$
۱۰ mm	$L_{sh}$	۰/۵ mm	$L_g$
۳۲/۳ mm <sup>۲</sup>	$A_s$	۲ mm	$L_{ry}$
۵۱/۱ mm <sup>۲</sup>	$A_t$	۳/۸ mm	$L_{sy}$
۳/۹ mm	$W_t$	۳۶ turns	$T_{ph}$

که در آن  $\omega_i$  سرعت موتور در بازه سرعتی ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ دور بر دقیقه تقسیم شده است. محاسبه پارامترهای ابعادی همچون  $D$  و  $L$  مطابق با [۲۴]، تابع سرعت موتور می‌باشد که مستقیماً در تعیین مقدار گشتاور و حجم موتور اثرگذار است. تابع تنبیه که قسمت دوم (۴) را تشکیل می‌دهد حاصل تجاوز از محدودیت‌ها می‌باشد که در پیاده‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات تشریح شده است [۲۵].

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات همانند روش‌های بهینه‌سازی دیگر دارای پاسخ‌های ورودی (ذرات) و قوانین (محدودیت‌ها) و استراتژی حرکت (تکامل) می‌باشد. این الگوریتم بهینه‌سازی دارای حافظه می‌باشد و این بدان معنی است که تکامل پیش روی هر ذره متأثر از سرعت حرکت کنونی ذره، بهترین موقعیت حاصل شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت حاصل شده توسط کل ذرات است. هر چند که میزان تأثیر موقعیت‌های محلی و جامع برتر بر روند تکامل ذرات می‌تواند به طرق مختلف تعریف شود ولی این تغییرات غالباً تأثیری در رسیدن به پاسخ نهایی ندارند و تنها دینامیک تکامل و زمان رسیدن به پاسخ را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲۵] تا [۲۷]. در این طراحی مراحل پیاده‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات به ترتیب زیر اعمال شده است:

- ۱) مشخص کردن ذرات اولیه به همراه اختصاص مقادیر موقعیت و سرعت به آنها که بر اساس یک توزیع احتمالی یکنواخت به دست آمده است. قراردادن مقدار صفر در شمارنده تکامل  $t = 0$ .
- ۲) ارزیابی موقعیت ذره‌ها و ذخیره‌سازی بهترین موقعیت شخصی برای هر ذره و بهترین موقعیت جامع برای کل ذرات.
- ۳) محاسبه سرعت جدید هر ذره با توجه به موقعیت کنونی ذره و موقعیت‌های برتر شخصی و جامع مطابق (۵) و سپس محاسبه موقعیت‌های جدید هر ذره مطابق (۶)

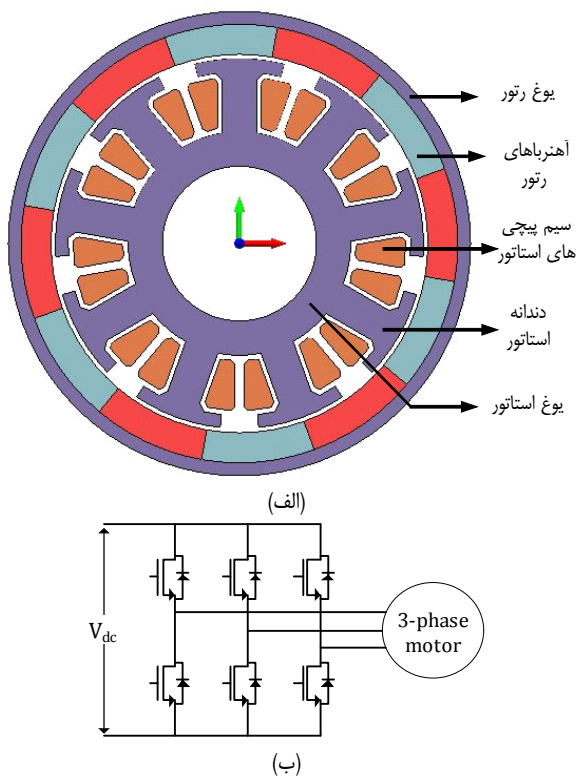
$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1c_d[p_i(t) - x_i(t)] + c_2C_d[p_g(t) - x_i(t)] \quad (5)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \Delta t v_i(t+1) \quad (6)$$

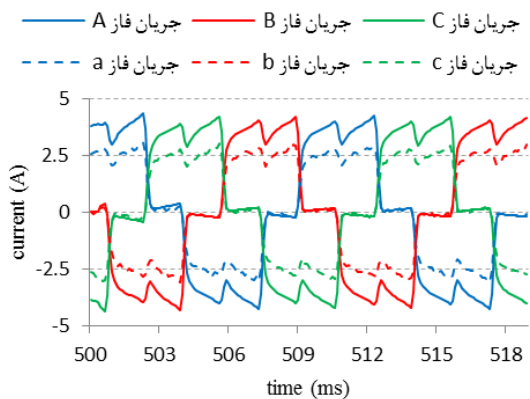
که  $\Delta t = 1$ ،  $w$  ضریب وزنی اینرسی،  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]$  معرف بردار سرعت ذرات،  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$  معرف بردار موقعیت ذرات،  $p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}]$  معرف برترین موقعیت شخصی پاسخ‌ها در طی تکامل و  $p_g$  برترین موقعیت جامع می‌باشد. مقادیر مثبت  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب ضریب وزنی تکامل شخصی و تکامل جامع هستند که باعث تسریع نزدیک شدن موقعیت ذرات به بهترین موقعیت به ترتیب شخصی و جامع می‌شوند. فاکتورهای  $C_d$  و  $c_d$  دو عدد احتمالی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  می‌باشند.

۴) افزایش شمارنده تکامل  $t = t + 1$ .

۵) بررسی شرط خاتمه. تا زمانی که شرایط خاتمه برآورده شوند بازگشت به مرحله ۲ و انجام دوباره فرایند.



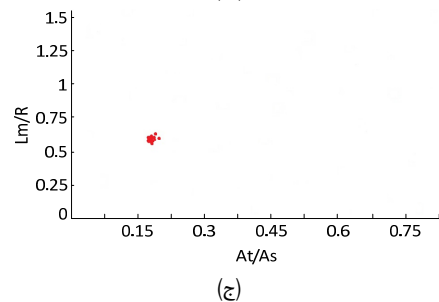
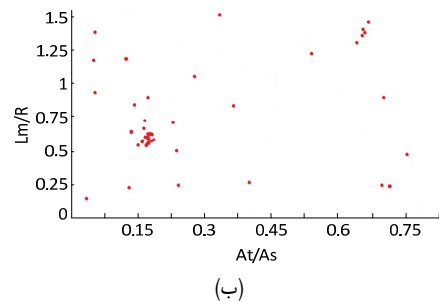
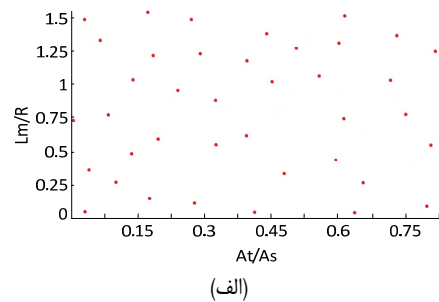
شکل ۳: (الف) مدل دوبعدی موتور پیاده‌سازی شده به کمک ابزار CAD و (ب) شماتیک اتصالات درایور موتور.



شکل ۴: مقایسه جریان فازهای موتور آهن‌ربای دائم در شرایط کارکرد نامی برای طراحی بهینه (A, B, C) و کلاسیک (a, b, c).

می‌شود مدل دوبعدی ارائه‌شده برای موتور دارای ۹ دندانه استاتور و ۱۲ قطب آهن‌ربای دائم بر روی رتور است که این ترکیب انتخاب‌شده تأییراتی بر روی گشتاور پله‌ای خواهد گذاشت [۲۸]. سیم‌پیچ‌های استاتور دارای سه‌فاز می‌باشند که به صورت متقارن و متمرکز روی دندانه‌های استاتور پراکنده شده‌اند و به این ترتیب هر فاز دارای سه سیم‌پیچ روی دندانه‌های استاتور می‌باشد. فازهای استاتور با اتصال ستاره به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۳-ب اتصالات اینورتر درایور موتور را نشان می‌دهد که توسط یک منبع تغذیه با ولتاژ  $V_{dc}$  تغذیه شده است.

بعد از تعریف‌شدن سیم‌پیچ‌ها درون ابزار مجهز به تحلیل المان محدود و مشخص‌کردن مسیرهای عبور جریان، آنالیز بررسی شکل موج‌های جریان و گشتاور تولیدی موتور انجام گرفته است. با اعمال ولتاژ ۲۴ ولت به  $V_{dc}$ ، سرعت موتور در بار نامی به حداکثر ۵۰۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد که می‌توان مقدار سرعت را با اعمال سیگنال‌های مدوله‌شده به گیت‌ها کاهش داد و کنترل نمود. در بار نامی دامنه جریان موتور در طراحی بهینه و کلاسیک در شکل ۴ به نمایش درآمده است.



شکل ۲: موقعیت پاسخ‌های الگوریتم ازدحام ذرات در سه وضعیت تکاملی، (الف) مرحله تکاملی اول، (ب) مرحله تکاملی صدم و (ج) مرحله تکاملی پانصدم.

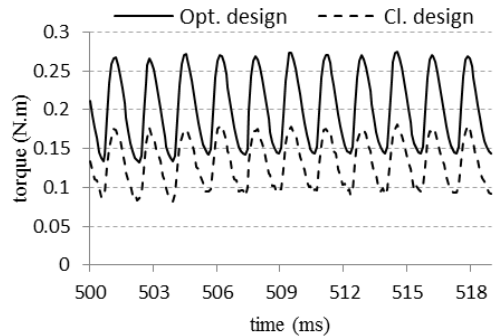
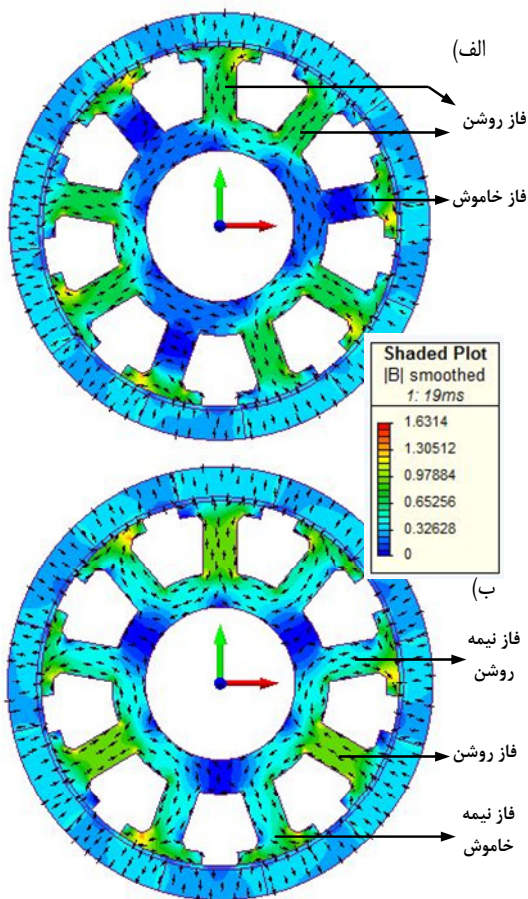
جدول ۴: ابعاد بهینه به دست آمده برای موتور با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.

مقدار	مشخصه فیزیکی	مقدار	مشخصه فیزیکی
$L_m$	۳٫۵ mm	$W_{ph}$	۱۰٫۶ mm
$R$	۲۲ mm	$L_{ph}$	۱٫۴ mm
$L_g$	۰٫۵ mm	$L_{sh}$	۱۰ mm
$L_{ry}$	۲ mm	$A_s$	۲۵٫۵ mm <sup>۲</sup>
$L_{sy}$	۴ mm	$A_r$	۴۷٫۱ mm <sup>۲</sup>
$T_{ph}$	۳۰ turns	$W_l$	۴ mm

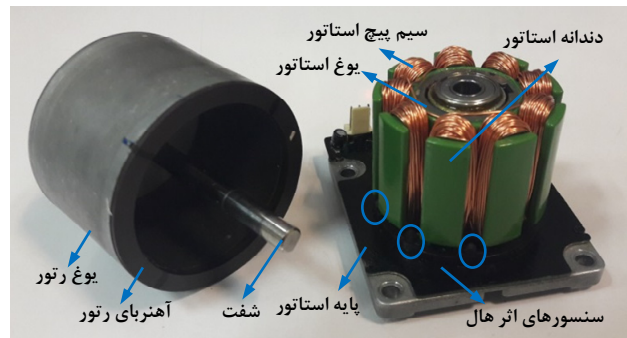
ابعاد ارائه‌شده در جدول ۴ در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. انتخاب ضخامت شعاعی یوغ‌های رتور و استاتور تابع ملاحظات اشباع مغناطیسی و استقامت مکانیکی می‌باشد. با توجه به این که مقدار چگالی شار آهن‌ربای سرامیکی در این طراحی در حدود ۰٫۴ تسلا می‌باشد، موضوع تحمل تنش‌های مکانیکی به اندازه عبور شار و اشباع مغناطیسی در یوغ‌ها اهمیت دارد. به همین جهت در این طراحی با توجه به مسایل مکانیکی و طراحی‌های صورت‌گرفته در [۱۰] حداقل‌هایی برای ضخامت یوغ در نظر گرفته شده است. در بخش بعد مقادیر ابعاد بهینه برای شبیه‌سازی موتور مورد استفاده قرار گرفته و تحلیل المان محدود انجام خواهد شد.

### ۳- شبیه‌سازی موتور بهینه به وسیله روش المان محدود

با استفاده از مواد و ابعاد بهینه ارائه‌شده در جداول ۲ و ۴، مدل دوبعدی موتور آهن‌ربای دائم در محیط پیاده‌سازی شده و آنالیز المان محدود بر روی آن اعمال گردیده است. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده



شکل ۵: مقایسه گشتاور تولیدی موتور آهن‌ربای دائم در شرایط کارکرد نامی برای طراحی بهینه و کلاسیک.



شکل ۷: موتور آهن‌ربای دائم ساخته‌شده.

شکل ۶: دامنه و نحوه توزیع شار در موتور بهینه آهن‌ربای دائم در دو لحظه مختلف از کارکرد موتور در شرایط نامی، (الف) دو فاز کامل روشن و یک فاز کامل خاموش و (ب) یک فاز کامل روشن و دو فاز دیگر در حال انتقال حالت.

شکل ۶ توزیع شار مغناطیسی در دو لحظه متفاوت از کارکرد موتور در شرایط بار نامی را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود تحلیل دینامیکی موتور نشان می‌دهد که میزان چگالی شار عبوری از دندانه‌های استاتور در سرعت نامی موتور در حدود ۱/۲ تسلا می‌باشد که با توجه به نوع آهن‌ربای استفاده‌شده مقداری معقول به نظر می‌رسد. کمان‌های جهت‌دار مشکی در شکل مسیر عبور شار را نشان می‌دهند و رنگ‌های استفاده‌شده در قسمت‌های مختلف، با توجه به راهنمای رنگ جدول، میزان چگالی شار را در نقاط مختلف موتور به تصویر می‌کشند. در این موتور نیز به مانند بیشتر موتورهای آهن‌ربای دائم بدون جاروبک سه‌فاز، از یک اینورتر سه‌فاز با بازه‌های تحریک ۶۰ درجه (تحریک شش پله‌ای) استفاده شده است. در این نوع تحریک همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در هر لحظه از زمان دو فاز روشن بوده و جریان را هدایت می‌کنند.

همان طور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود دو فاز روشن بوده و جهت سیم‌پیچی به گونه‌ای است که یکی از فازها شار مغناطیسی را به درون استاتور کشیده و فاز دیگر آن را از استاتور خارج و وارد رتور می‌کند. در شکل ۶-ب لحظه خاموش شدن یکی از فازها و روشن شدن فاز دیگر به تصویر کشیده شده است. نحوه تحریک به گونه‌ای می‌باشد که شار به صورت گردان با سرعت سنکرون در استاتور می‌چرخد.

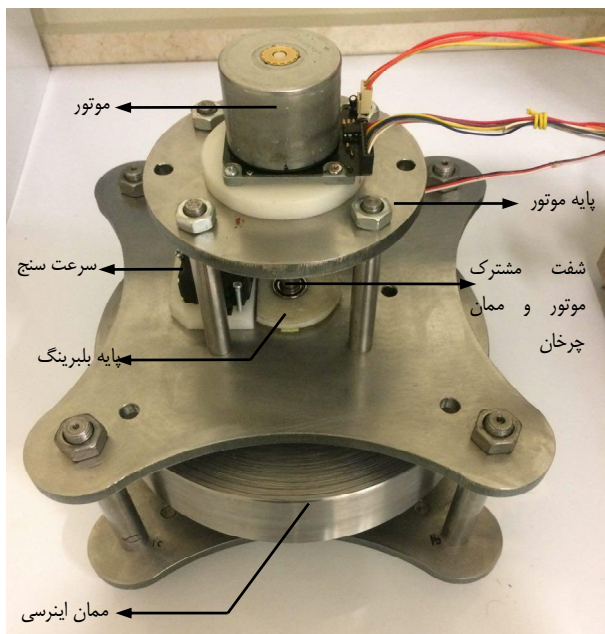
#### ۴- ساخت و نتایج عملی

ساخت موتور منطبق بر مواد و ابعاد منتشرشده در جداول ۲ و ۴ صورت گرفته است. همان طور که در شکل ۷ آمده است استاتور داخلی موتور بر

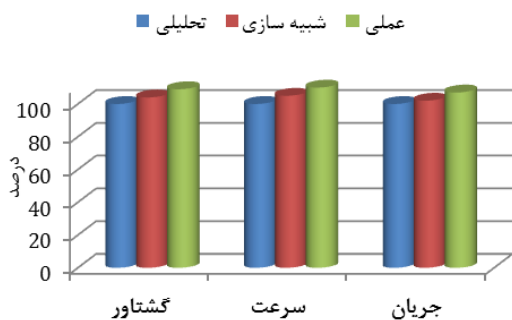
همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود دامنه جریان فازهای موتور بهینه ۳/۲۶ آمپر و دارای فرکانس ۵۰۰ هرتز می‌باشد و این در حالی است که در طراحی کلاسیک دامنه این جریان به ۲/۵ آمپر می‌رسد. علت این امر را می‌توان در بالا بودن تعداد دور سیم‌پیچ استاتور در طراحی کلاسیک نسبت به طراحی بهینه دانست چرا که موجب بالا رفتن اندوکتانس سیم می‌شود. موضوعی که در شکل موج جریان از اهمیت برخوردار است آن است که جریان موتور هارمونیک‌های کوچک‌تری را از منبع دریافت کند و جریان به گونه‌ای کنترل شود که ریپل گشتاور موتور کاهش یابد. شکل ۵ گشتاور تولیدی موتور بهینه و کلاسیک را در شرایط کارکرد نامی نشان می‌دهد. هرچه مقدار میانگین گشتاور موتور، مقدار بزرگ‌تر و دامنه ریپل گشتاور، مقدار کوچک‌تری داشته باشد طراحی موفق‌تری صورت گرفته است. در موتورهای آهن‌ربای دائم قطب برجسته به علت وجود گشتاورهای پله‌ای مزاحم که می‌توانند مقدار قابل توجهی نسبت میانگین گشتاور داشته باشند توجه به ساختار قطب و دندانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. موضوعی که در این مقاله مورد توجه بوده است مقدار متوسط گشتاور موتور می‌باشد.

مقدار گشتاور تولیدشده موتور بهینه در سرعت نامی همان طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است دارای میانگین ۰/۲ نیوتن بر متر و مقدار دامنه تغییرات ۰/۰۶۲ نیوتن بر متر می‌باشد. همان طور که در (۳) بیان شد حجم موتور برابر  $6.4 \times 10^{-3}$  متر مکعب به دست می‌آید که با توجه به آن مقدار چگالی گشتاور موتور  $3.1 \times 10^7$  نیوتن متر بر متر مکعب و چگالی توان موتور برابر  $1.6 \times 10^6$  وات بر متر مکعب می‌باشد. این در حالی است که موتور طراحی‌شده به روش کلاسیک دارای چگالی گشتاور  $2 \times 10^7$  نیوتن متر بر متر مکعب و چگالی توان  $1 \times 10^6$  وات بر متر مکعب می‌باشد. این ارقام نشان می‌دهند که بهینه‌سازی به طور مؤثر توانسته است چگالی گشتاور موتور را بهبود ببخشد.

تحلیل دینامیکی موتور با استفاده از روش المان محدود از حالت ساکن تا وضعیت کارکرد دائمی موتور تحت بار ثابت ۰/۱ نیوتن متر انجام شد.



شکل ۱۰: موتور نصب شده بر روی سیستم فلاپویل.



شکل ۱۱: مقایسه پارامترهای عملکرد نتایج تحلیلی، شبیه سازی و عملی.

همان طور که از شکل ۹ مشخص است تطابق بین شکل موج جریان حاصل از شبیه سازی در شکل ۴ با شکل موج جریان اندازه گیری شده عملی مشهود است.

در سیستم فلاپویل مورد نظر شفت موتور به طور مستقیم با شفت ممان اینرسی کوپل شده است. فلاپویل ساخته شده متشکل از موتور و ممان اینرسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به علت دینامیک کند مکانیکی ممان اینرسی و همچنین محدود بودن توان برای شارژ آن، موتور می بایست گشتاور مطلوب را در سرعت های مختلف تحویل دهد.

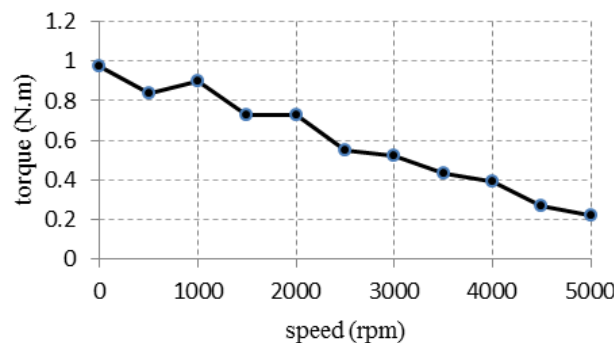
همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، محور چرخش ممان اینرسی توسط شفت در داخل بلبرینگ ها تثبیت می شود و به علاوه وزن آن توسط نیروی دافعه دو قطعه آهن ربایی که در پایین آن قرار گرفته تحمل می گردد. به این ترتیب مشکل اصلی اصطکاک که ناشی از وزن ممان اینرسی می باشد برطرف شده است.

بر خلاف طرح هایی از فلاپویل که موتور/ ژنراتور با خود ممان اینرسی یکپارچه سازی می شود در طرح ارائه شده از سیستمی ماژولار استفاده شده است چرا که در یک سیستم ماژولار امکان تغییر مشخصات سیستم هم از نظر توان و هم از نظر ظرفیت ذخیره سازی وجود خواهد داشت. علاوه بر آن در پروسه تولید و تعمیرات تسهیلات قابل توجه از بابت هزینه و دسترسی به وجود می آید.

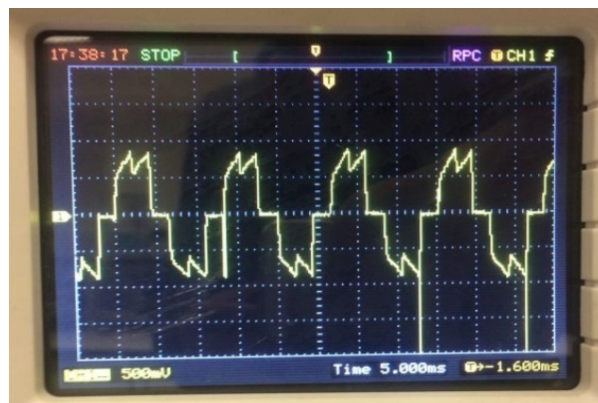
مقایسه بین نتایج تحلیلی، شبیه سازی و عملی در شکل ۱۱ ارائه شده است. سه پارامتر عملکرد موتور، سرعت، گشتاور و دامنه جریان موتور به



شکل ۷: موتور آهن ربای دایم ساخته شده.



شکل ۸: مشخصه سرعت- گشتاور موتور بهینه.



شکل ۹: شکل موج جریان فاز A موتور.

روی یک پایه ثابت استوار شده است. برای کنترل موتور از سیگنال های پسخوردی که از موقعیت موتور توسط سنسورهای اثر هال گرفته می شود استفاده می شود که این سنسورها بر روی پایه استاتور ثابت شده اند. محل قرارگیری آنها به گونه ای است که می توان لحظه های تحریک ۶۰ درجه ای را از خروجی آنها استخراج کرد.

برای اندازه گیری گشتاور تولیدی موتور بهینه در سرعت های مختلف شفت آن را به یک ژنراتور متصل کرده ایم. با اندازه گیری تلفات بار متصل به ژنراتور گشتاور تولیدی موتور در سرعت های مختلف محاسبه شده است. شکل ۸ مشخصه سرعت- گشتاور موتور را نشان می دهد.

در این آزمایش با تأمین ولتاژ ۲۴ ولت برای  $V_{dc}$  مقدار دامنه جریان فازها در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه به ۴ آمپر می رسد. علت اختلاف حاصل شده در نتایج عملی و نتایج شبیه سازی تلفاتی است که در حالت شبیه سازی در نظر گرفته نمی شوند. شکل ۹ جریان فاز A موتور را نشان می دهد. سایر فازها نیز شکل موج جریان مشابه با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه الکتریکی دارند. مقدار جریان بر روی یک مقاومت اندازه گیری شده که با توجه به قانون اهم، دامنه جریان ۴ آمپر به دست می آید.

جدول پ-۱: تعریف و واحد پارامترهای موتور.

نام و واحد پارامتر	توضیحات	نام و واحد پارامتر	توضیحات
$L_m$ (mm)	طول شعاعی آهن‌ربا	$W_{rh}$ (mm)	عرض جلوی دندانه استاتور
$R$ (mm)	شعاع فاصله هوایی	$L_{rh}$ (mm)	طول جلوی دندانه استاتور
$L_g$ (mm)	ضخامت فاصله هوایی	$L_{sh}$ (mm)	شعاع داخلی استاتور
$L_{ry}$ (mm)	ضخامت یوغ رتور	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	مساحت داخل شیار استاتور
$L_{sy}$ (mm)	ضخامت یوغ استاتور	$A_r$ (mm <sup>2</sup> )	مساحت داخل دندانه استاتور
$T_{ph}$ (-)	تعداد دور سیم‌پیچ استاتور	$W_r$ (mm)	عرض دندانه استاتور

- [5] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, "Flywheel energy and power storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 2, pp. 235-258, Feb. 2007.
- [6] H. Kan, K. Chau, and M. Cheng, "Development of doubly salient permanent magnet motor flywheel energy storage for building integrated photovoltaic system," in *proc. 16th Annual IEEE on Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'01*, vol. 1, pp. 314-320, Aug. 2001.
- [۷] م. اره پناهی و. و. سنایی تراب، "طراحی بهینه موتور مغناطیس دایم داخلی برای افزایش محدوده تضعیف شار و کاهش حجم آهن‌ربای مصرفی،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال ۱۴، شماره ۱- الف، صص. ۶۱-۶۶ بهار ۱۳۹۵.

- [8] M. Lukaniszyn, M. Jagiela, and R. Wrobel, "Optimization of permanent magnet shape for minimum cogging torque using a genetic algorithm," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 1228-1231, Mar. 2004.
- [9] T. K. Chung, S. K. Kim, and S. Y. Hahn, "Optimal pole shape design for the reduction of cogging torque of brushless DC motor using evolution strategy," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 2, pp. 1908-1911, Mar. 1997.
- [10] K. Abbaszadeh, F. R. Alam, and S. Saied, "Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 10, pp. 3075-3082, Sept. 2011.
- [11] U. Nagalingam, B. Mahadevan, K. Vijayarajan, and A. P. Loganathan, "Design optimization for cogging torque mitigation in brushless DC motor using multi-objective particle swarm optimization algorithm," *International J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 1302-1318, Jul. 2015.
- [12] Q. Li, M. Dou, B. Tan, H. Zhang, and D. Zhao, "Electromagnetic-thermal integrated design optimization for hypersonic vehicle short-time duty PM brushless DC motor," *International J. of Aerospace Engineering*, vol. 9, no. 4, 9 pp., Aug. 2016.
- [13] X. Ding, G. Liu, M. Du, H. Guo, H. Qiao, and C. Gerada, "Development of an axial flux MEMS BLDC micromotor with increased efficiency and power density," *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 6608-6626, Jun. 2015.
- [14] R. Nasiri-Zarandi, M. Mirsalim, and A. Cavagnino, "Analysis, optimization, and prototyping of a brushless DC limited-angle torque-motor with segmented rotor pole tip structure," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 4985-4993, Aug. 2015.
- [15] S. Sadeghi, A. Mohammadpour, and L. Parsa, "Design optimization of a high performance five-phase slotless PMSM," in *Proc. Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM14*, pp. 6-11, Ischia, Italy, 18-20 Jun. 2014.
- [16] H. W. Kim, K. T. Kim, Y. S. Jo, and J. Hur, "Optimization methods of torque density for developing the neodymium free SPOKE-type BLDC motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 2173-2176, May 2013.

[۱۷] ح. حاتمی، م. ب. بناء شریفیان و م. ر. فیضی، "ارائه روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین‌های مغناطیس دایم شارمجموری سرعت‌پایین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۲، صص. ۶۴-۵۱ تابستان ۱۳۹۴.

- [18] G. Heinzlmann, G. Liebhard, and H. Roskamp, "Energy efficient drive train for a high-performance battery chain saw," in *Proc. 1st Int. Conf. on Electric Drives Production, EDPC'11*, pp. 101-106, Sept. 2011.
- [۱۹] م. حق‌پرست، ص. تقی‌پور بروجنی و ع. کارگر، "بهبود ساختار هندسی رتور ماشین سنکرون رلوکتانسی با استفاده ترکیبی از شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و روش

ازای تأمین ولتاژ ۲۴ ولت برای تغذیه اینورتر به تصویر شده است. مقادیر ارائه‌شده در شکل بر حسب درصد نسبت به نتایج تحلیلی بیان شده‌اند. همان طور در شکل ۱۱ دیده می‌شود نتایج پارامترهای خروجی در هر سه تحلیل دارای تطبیق نسبتاً مناسبی با یکدیگر هستند. به علت آن که چگالی شار فاصله هوایی در عمل مقداری کمتر از حالت‌های تحلیل و شبیه‌سازی می‌باشد مقدار ولتاژ القایی تولیدشده کمتر و سرعت موتور بیشتر می‌شود و به همین خاطر در این حالت موتور جریان بیشتری را نیز از منبع دریافت می‌کند.

## ۵- نتیجه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از الگوریتم‌های مدرن خودآموزنده به حساب می‌آید که به طور مؤثر در بهینه‌سازی مسایل غیر خطی و پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این الگوریتم در بهینه‌سازی تک‌هدفه موتور آهن‌ربای دایم رتور خارجی در این مقاله به طور مؤثر مورد استفاده قرار گرفت و توانست ابعاد بهینه‌ای از موتور را برای حصول چگالی گشتاور بیشینه در بازه سرعتی مطلوب ارائه دهد. نتایج استخراج‌شده از الگوریتم با کمک روش المان محدود مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج به دست آمده بر خروجی‌های الگوریتم صحه می‌گذاشت. به علاوه نتایج بهینه‌سازی نسبت به روش طراحی کلاسیک مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید که طراحی بهینه ۲۴/۵٪ چگالی گشتاور موتور را بهبود می‌بخشد. در نهایت ساخت موتور منظور نشان داد که امکان پیاده‌سازی نتایج تئوری به صورت عملی قابل تحقق است و می‌توان از خروجی‌های این الگوریتم به طور کاربردی استفاده کرد.

## پیوست

پارامترهای فیزیکی موتور به همراه توضیح آنها و واحد اندازه‌گیری در جدول پ-۱ آورده شده است.

## مراجع

- [1] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: a critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, Mar. 2009.
- [2] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6, pp. 1513-1522, Aug. 2009.
- [3] R. Pena-Alzola, R. Sebastian, J. Quesada, and A. Colmenar, "Review of flywheel based energy storage systems," in *Proc. Int. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG'11*, 6 pp., Malaga, Spain, 11-13 May 2011.
- [۴] ح. خان‌بابایی گردشی و ح. ترکمن، "کنترل بهبودیافته سرعت موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی با استفاده از هدایت پیوسته جریان در سرعت بالا،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صص. ۶۹-۷۹، بهار ۱۳۹۵.

- [27] Y. Duan and D. M. Ionel, "A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1268-1275, May 2013.
- [28] Z. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, Dec. 2000.
- امید صفدرزاده** مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ از دانشگاه شهید بهشتی اخذ نمود. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه وی ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت می‌باشد. هم‌اکنون وی بر روی چندین پروژه عملیاتی در زمینه پیاده‌سازی ماشین‌های الکتریکی کار می‌کند.
- حسین ترکمن** عضو هیأت علمی و دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی همچون ماشین‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.
- محمد مهدوی فخر** مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ از دانشگاه شهید بهشتی اخذ نمود. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه وی شبکه‌های محلی برق، انرژی‌های نو و الکترونیک قدرت می‌باشد. هم‌اکنون وی بر روی چندین پروژه عملیاتی در زمینه الکترونیک قدرت کار می‌کند.
- اجزای محدود، "نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۱، شماره ۱- الف، صص. ۲۸-۳۴، بهار ۱۳۹۲.
- [20] J. Seo, J. Yoo, and T. Jung, "Design on notch structure of stator tooth to reduce of cogging torque of single-phase BLDC motor," in *Proc. 18th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, ICEMS'15*, pp. 1475-1478, Oct. 2015.
- [21] Y. Li, J. Xing, T. Wang, and Y. Lu, "Programmable design of magnet shape for permanent-magnet synchronous motors with sinusoidal back EMF waveforms," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 9, pp. 2163-2167, Sept. 2008.
- [22] R. McCallum, L. Lewis, R. Skomski, M. Kramer, and I. Anderson, "Practical aspects of modern and future permanent magnets," *Annual Review of Materials Research*, vol. 44, no. 3, pp. 451-477, Jul. 2014.
- [23] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2009.
- [24] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, 1994.
- [25] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171-195, Apr. 2008.
- [26] Y. Duan, R. Harley, and T. Habetler, "Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm in the design of permanent magnet motors," in *Proc. 6th IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Motion Control, IPEMC'09*, pp. 822-825, May 2009.