طراحی موتور سری کموتاتوری AC یونیورسال با استفاده از یک روش بهینه سازی هوشمند مبتنی بر الگوریتم PSO

سید حمید شاه عالمی[1] سمانه فتحی ساسانسرا[2]

۱- استادیار- دانشکده فنی- دانشگاه گیلان-رشت- ایران

shahalami@guilan.ac.ir

۲- دانش‌آموخته- کارشناسی ارشد- دانشکده فنی- دانشگاه گیلان-رشت- ایران

samane867@gmail.com

چکیده: شمار زیادی از موتورهای الکتریکی که همه ساله در جهان ساخته می‌شوند، موتورهای سری کوچک کموتاتوری AC هستند. از اینرو طراحی بهینه این نوع ماشین‌ها منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های ساخت نسبت به روش‌های سنتی طراحی از طریق آزمون و خطا می‌شود. در این مقاله، از یک روش هوشمند مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO برای طراحی بهینه موتور سری کموتاتوری AC یونیورسال، استفاده شده است. از دیدگاه تولید کننده بهینه‌ترین طراحی، ارزان‌ترین و کم‌هزینه‌ترین موتور تولید شده‌است، یک تابع هدف به منظور کاهش هزینه ساخت موتور و یافتن ابعاد بهینه با قید توان خروجی ثابت موتور به کار رفته است. ترکیبی از پارامترهای هندسی و نقطه کار موتور، به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن عملکرد بالای روش ارائه شده، نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم PSO با الگوریتم Firefly مقایسه شده‌اند. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در بخش طراحی، با به کارگیری نرم‌افزار ماکسول و با استفاده از روش آنالیز اجزای محدود، موتور یونیورسال نمونه در فضای دوبعدی نرم‌افزار ماکسول پیاده‌سازی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، استحکام ، انعطاف-پذیری بالا و کارآمدی روش ارائه شده برای طراحی بهینه موتور یونیورسال را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: طراحی بهینه، موتور سری کموتاتوری AC، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، PSO، روش اجزای محدود.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۶/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۵/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر سید حمید شاه عالمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – رشت – بزرگراه خلیج فارس – دانشگاه گیلان– دانشکده‌ی فنی و مهندسی- گروه برق

فهرست علائم اختصاری

تعریف	واحد	پارامتر
درصد قیمت مس روتور	cent	C_{cur}
درصد قیمت مس استاتور	cent	C_{cus}
درصد قیمت ورقه‌های آهن مورد نیاز	cent	C_{Fe}
درصد قیمت هزینه قالب زدن ورقه‌ها	cent	C_{stamp}
مجموع هزینه های ثابت	cent	C_{out}
طول پشته لایه‌های روتور	mm	l_r
قطر ظاهری روتور	mm	d
قطر روتور	mm	d_r
قطر محور روتور	mm	d_{shaft}
قطر مجازی محور روتور	mm	$d_{\text{shaft fic}}$
قطر کلاف استاتور	mm	d_{coils}
ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی	T	B_{peak}
عرض نسبی هدایت کنندگی فلوی روتور	mm	β
بردار متغیرهای تصمیم‌گیری	-	x
طول فاصله هوایی	mm	δ
ارتفاع کل استاتور	mm	h_0
طول پشته لایه‌های استاتور	mm	l_s
عرض کل هسته استاتور	mm	b_0
عرض یوغ استاتور	mm	b_{y1}
عرض ستون استاتور	mm	b_{y2}
فاصله خالی بین کلاف در شیار و سطح جانبی روتور	mm	b_{top}
عرض تیزی کناره قطب استاتور	mm	b_{tsp}
فاصله بین سقف شیار روتور از سطح خارجی قطب استاتور	mm	b_{pt}
فاکتور کارتر	-	k_{car}
ضریب نسبی کمان متقابل قطب استاتور با روتور	-	k_{pole}
ضریب کاهش ولتاژ آرمیچر ناشی از اتصال کوتاه شدن جند تیغه کموتاتور توسط زغالکها	-	k_E
ضریب کاهش مقاومت آرمیچر ناشی از اتصال کوتاه شدن چند حلقه از سیم پیچی روتور توسط زغالکها	-	k_R
ضریب فضایی کاهشی به منظور حذف عایق لاکی از سیم پیچی روتور	-	k_{cur}
ضریب فضایی کاهشی به منظور حذف عایق لاکی از سیم پیچی استاتور	-	k_{cus}
ضریب فضایی کاهشی ورقه های فولادی	-	k_{Fe}
مقدار ماکزیمم شار	Wb	φ_{peak}
مقدارماکزیمم ولتاژ چرخشی	V	e_{peak}
سرعت روتور	$rad/\sec$	ω
طول یک حلقه از کلاف سیم پیچی روتور	mm	s_{nr}
چگالی جرمی ورقه فولادی	$kg.m^{-3}$	g_{Fe}
قطرسیم پیچی رتور	mm	d_{cur}
طول یک حلقه از کلاف سیم پیچی استاتور	mm	s_{ns}
طول متوسط سر و ته کلاف روتور	mm	S_{headr}
ضخامت عایق ابتدا و انتهای پشته رتور	mm	$b_{ins\,r}$
ضخامت عایق ابتدا و انتهای پشته استاتور	mm	$b_{ins\,s}$
طول عایق ابتدا و انتهای پشته رتور	mm	$l_{ins\,r}$
طول عایق ابتدا و انتهای پشته استاتور	mm	$l_{ins\,s}$
مقاومت سیم پیچی آرمیچر	Ω	R_r
مقاومت سیم پیچی استاتور	Ω	R_s
سطح مقطع سیم پیچی رتور	mm^2	A_{coilr}
عرض هدایت کنندگی فلوی روتور	mm	b_{Fer}
عرض هدایت کنندگی فلوی دندانه روتور	mm	$b_{Fe\,teeth}$
عرض هدایت کنندگی فلوی هسته روتور	mm	$b_{Fe\,core}$
گام شیار	mm	b_{pitch}
عرض دهانه شیار	mm	$b_{aperture}$
عرض لبه شیار	mm	b_{tip}
تعداد شیارهای روتور	-	z
ارتفاع دندانه رتور	mm	h_{tooth}
عرض دندانه رتور	mm	b_{tooth}
فاکتور اعوجاج گشتاور در فاصله هوایی	-	C_{mech}
فاکتور اعوجاج جریان در فاصله هوایی	-	C_e
قدرت ورودی به شکاف هوایی	W	P_δ
قدرت خروجی	W	P_{out}
تلفات مخصوص آهنی روتور	W	P_{Fer}
تلفات مسی سیم پیچی آرمیجر	W	P_{Cur}
مقدار پیک جریان موتور	A	I_{peak}
تعداد دور سیم پیچی استاتور	Turns	n_s
تعداد دور سیم پیچی رتور	Turns	n_r
	mm	r
پرمئانس دو شکاف فاصله هوایی	H	$A_{m\,2\delta}$
پرمئانس مدار مغناطیسی کل	H	A_{mo}
ضریب نفوذ مفناطیسی هوا $4\pi\times10^{-7}$	Hm^{-1}	μ_0
ضریب نفوذ مفناطیسی نسبی هسته موتور	-	μ_r
زاویه جابجایی زغالکها برای کاهش ولتاژ القایی در سیم پیچهای اتصال کوتاه شده	$Deg\,°$	α_{brush}
حداکثر اندوکسیون مغناطیسی متناسب با جریان تحریک	Tesla	B_{prop}
جرم مس سیم پیچی روتور	kg	G_{cur}
جرم حجمی مس روتور	$kg.m^{-3}$	g_{cur}
جرم مس سیم پیچی استاتور	kg	G_{cus}
جرم حجمی مس استاتور	$kg.m^{-3}$	g_{cus}
جرم هسته فولادی	kg	G_{Fe}
قطر سیم پیچی استاتور	mm	d_{cus}
سرعت مکانیکی موتور	rpm	N_m

بردار پتانسیل مغناطیسی	-	$\bar{A}$
چگالی جریان کل	Am^{-2}	$\bar{J}$
پتانسیل اسکالر الکتریکی	V	V
هدایت الکتریکی	Ω^{-1}	σ

۱- مقدمه

با پیشرفت صنعت تعداد ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در منازل، ادارات و کارگاه‌های صنعتی افزایش یافته است. استفاده روزافزون ماشینهای الکتریکی در تجهیزات خانگی رجوع به آن دسته از موتورهای الکتریکی با قابلیت تغذیه منبع AC تک فاز، رشد چشمگیری یافته است. در راستای این نیاز استفاده از موتورهای AC سری با قدرت‌های کمتر از یک اسب می‌تواند راهگشای این نیاز باشد. در میان این موتورها، معمولاً موتورهای یونیورسال با قدرت زیر ۳۰۰ وات در ابعاد کوچک ساخته شده و به صورت AC یا DC به کار گرفته می‌شوند.

ساخت موتوریونیورسال کوچک هزینه زیادی در بر ندارد. از ویژگی‌های بارز موتور یونیورسال می‌توان به سرعت چرخش بالا، هزینه کم و گشتاور راه‌اندازی بالای آن اشاره کرد. این خصوصیات دلیل بزرگی برای استفاده آنها در صنعت و لوازم‌خانگی به شمار می‌رود. به گونه‌ای که اغلب موتورهای‌یونیورسال استفاده شده در جاروهای برقی دارای سرعت بالا، ظرفیت بزرگ به انضمام مزایایی از جمله ابعاد کوچک، توان خروجی و راندمان بالا هستند.

غالبا موتور مورد استفاده در کاربردهایی با گشتاور راه‌اندازی و سرعت بالا و هزینه کم، به ویژه در مصارف خانگی، موتور یونیورسال است. موتورهای‌یونیورسال در لوازم خانگی مانند جاروب برقی، چرخ خیاطی، ابزارهای دستی، مخلوط کن، تمیزکننده کفش و غیره که نیاز به سرعت ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه دارند، به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شوند. علت استفاده گسترده این موتور، هزینه موثر موتور و نسبت کم حجم بر قدرت مورد تقاضای آن است که در این شرایط پاسخ گشتاور خوبی را ارائه می‌دهد [۴,۱].

از آنجا که موتور کموتاتوری در سرعتی بالاتر از سرعت یک موتور القایی عمل می‌کند، این موتور توان خروجی بیشتری را نسبت به یک موتور القایی مشابه تولید می کند. با این حال، موتورهای کموتاتوری بر خلاف موتورهای القایی به علت استفاده از جاروبک و کموتاتور احتیاج به تعمیر و نگهداری زیادی هستند. موتورهای کموتاتوری مرسوم شامل انواع مختلفی از جمله موتورهای سری، موتورهای یونیورسال، موتورهای ریپالسیونی و موتورهای القایی ریپالسیونی به همراه مشخصات و ترکیبات متنوعی هستند. با توجه به جایگاه موتور یونیورسال در میان تجهیزات خانگی و صنعتی، طراحی بهینه و محاسبات این موتور به دلیل کاربرد گسترده‌ای که دارد مورد توجه بسیاری از محققین در دنیا قرار گرفته است [۵].

تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی و بهینه‌سازی موتورهای سری کموتاتوری AC در جدول (۱) بیان شده است. بهینه‌سازی یک موتور سری کموتاتوری AC یونیورسال،یک مسئله بهینه‌سازی با ترکیب مجموعه‌ای از پارامترهای ثابت، متغیرها و قیدها است. مطابق با فرآیندهای بهینه‌سازی لازم است که ابتدا متغیرهای بهینه‌سازی و پارامترهای هندسی موتور که شامل اندازه ابعاد و نواحی مختلف آن هستند تعریف شوند. سپس تابع هدف و قیود مربوطه معین شده و در نهایت یک روش بهینه-سازی هوشمند جهت یافتن مقادیر بهینه متغیرها اعمال می شود [۶,۵].

در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله بهینه‌سازی و یافتن پارامترهای هندسی بهینه و نقطه کار موتور مفروض استفاده شده است [۲۲,۲۱,۲۰].

از دیدگاه تولید کننده بهینه‌ترین طراحی، ارزان‌ترین و کم‌هزینه-ترین موتور تولید شده است، یک تابع هدف به منظور کاهش هزینه ساخت موتور و یافتن ابعاد بهینه با قید توان خروجی ثابت موتور به کار رفته است. ترکیبی از پارامترهای هندسی و نقطه کار موتور، به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، برای موتور یونیورسال نمونه، با مشخصات موتور سری کموتاتوری AC با ولتاژ ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز، سرعت ۱۹۲۰۰ دور در دقیقه و توان خروجی ۲۵۰ وات، با کاربرد در جاروب برقی، از الگوریتم PSO استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، کارآمدی روش ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین برای نشان دادن عملکرد مطلوب الگوریتم PSO، طرح بهینه موتور مذکور با الگوریتم Firefly نیز مقایسه شده است. بررسی نتایج شبیه سازی ها همگرایی نسبی پاسخ-های هر دو الگوریتم و موفقیت روند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. در نهایت پس از اتمام فرایند بهینه‌سازی، طرح بهینه موتور یونیورسال نمونه، با استفاده از نرم افزار Maxwell که مبتنی بر آنالیز المان محدود است پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از این طراحی، اعتبار سنجی شده است[۳].

جدول (۱): تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی و بهینه‌سازی موتورهای سری کموتاتوری AC

شماره مرجع	نوع تحقیق انجام شده
[5]	بهینه‌سازی راندمان موتور یونیورسال با استفاده از الگوریتم ژنتیک و اعتبارسنجی نتایج با روش المان محدود.
[6]	ارزیابی آبشاری بهینه‌سازی چند هدفه[1] با تلفیقی از روش پارتو[2] جهت کاهش زمان محاسبات.
[7]	ارائه مدل تحلیلی موتور یونیورسال با شیفت‌پذیری جاروبک از موقعیت خنثی برای بهبود کموتاسیون.
[8]	ارائه نسل جدیدی از درایوهای موتور یونیورسال با حذف خازن الکترونیکی موجود در DC-link اینورتر.
[9]	ارائه مدار معادل برای موتور یونیورسال تک فاز و اعتبارسنجی با نرم‌افزار ماکسول.
[10]	ارائه کنترل کننده‌ای برای موتور یونیورسال DC با بازدهی بالا در صنعت رباتیک.
[4]	بررسی ماشین‌های الکتریکی گردان بطور خاص موتور یونیورسال AC و DC از لحاظ عملکرد الکتریکی، مغناطیسی و کموتاسیون
[11]	طراحی میکروپروسسور برای کنترل و حفاظت موتور یونیورسال.
[12]	مدلسازی موتور یونیورسال با استفاده از توابع فضای حالت با مد نظر قرار دادن پدیده جرقه کموتاسیون[3].
[13]	بررسی مدل گذرای موتور یونیورسال با لحاظ کردن اثرات اشباع و تلفات هسته.
[14]	طراحی موتور یونیورسال با استفاده از مدار معادل مغناطیسی، پس از توزیع نیرو محرکه مغناطیسی در فاصله هوایی.
[15]	طراحی بهینه با هدف کاهش تلفات و هزینه مواد بکار گرفته شده در ساخت موتور یونیورسال.
[16]	تحلیل موتور یونیورسال با استفاده از مدلسازی ریاضی و بررسی عملکرد آن به همراه سه نوع منبع تغذیه.
[17]	ارائه موتور کموتاتوری AC یونیورسال با استفاده از خواص مغناطیسی ایزوتروپیک کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم.
[18]	یک مدل کامپیوتری برای شبیه‌سازی عملکرد موتور یونیورسال و انجام عمل کموتاسیون.
[19]	بررسی دلایل ایجاد لرزش در موتور یونیورسال.
[20]	بررسی مقایسه‌ای میان موتور سنکرون مغناطیس دائم و موتور یونیورسال در ماشین لباسشویی.

کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO برای طراحی بهینه موتور سری کموتاتوری AC یونیورسال و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در بخش طراحی، با به کارگیری نرم‌افزار ماکسول و با استفاده از روش آنالیز اجزای محدود برای اولین بار در این مقاله پیاده سازی شده است.

۲- ارائه روش پیشنهادی و فرمول‌بندی موتور سری کموتاتوری AC

در این مقاله، از روشی برای طراحی بهینه موتور مذکور، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO بهره برده شده است. تعاریف متعددی برای یک موتور بهینه وجود دارد. اما از دید تولیدکننده‌گان، بهینه‌ترین موتور، ارزان‌ترین و کم‌هزینه‌ترین موتوری است که تمامی مشخصات مورد نیاز یک موتور مطلوب را داشته باشد. بنابراین تابع هدف برای کاهش هزینه ساخت موتور و یافتن ابعاد بهینه، به کار رفته است و با رابطه (۱) تعریف می‌شود:

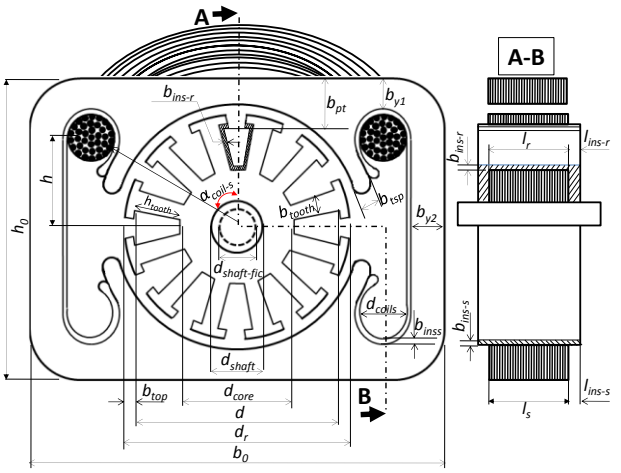
$$F_0 = C_{out} + |250 - P_{out}| \quad (۱)$$

$$C_{out} = C_{cur} + C_{cus} + C_{Fe} + C_{stamp} \quad (۲)$$

در این روابط C_{cur}، C_{cus}، C_{Fe} و C_{stamp} به ترتیب درصد قیمت مس روتور، مس استاتور، ورقه‌های آهن مورد نیاز و هزینه قالب زدن ورقه‌ها هستند. مجموع این متغیرها، به طور مجزا با C_{out} نشان داده می‌شوند و تابع هدف بهینه‌سازی با رابطه (۱) تعریف می شود. برای تنظیم توان خروجی موتور نمونه در مقدار ۲۵۰ وات قیدی در این رابطه وارد شده است. تابع هدف پیشنهاد شده، توسط مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی که توصیف کننده سطح مقطعی از یک موتور سری کموتاتوری AC در شکل (۱) است تشکیل می‌شود.

این پارامترها شامل قطر ظاهری روتور (d)، طول پشته لایه‌های روتور (l_r)، ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی (B_{peak}) و عرض نسبی هدایت کنندگی فلوی روتور (β) هستند. بنابراین، پارامترهای مذکور، تحت عنوان بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، با رابطه (۳) تعریف می شوند:

$$x = [d \quad l_r \quad B_{peak} \quad \beta] \quad (۳)$$



شکل (۱): سطح مقطع یک موتور سری کموتاتوری AC

روابط ریاضی (۴) تا (۴۹) از مرجع [۲۳] استفاده شده است. ارتفاع کل استاتور طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$h_0 = d + 2b_{pt} \quad (۴)$$

پارامترهای h و r با رابطه (۵) و (۶) بیان می شوند:

$$h = 0.5d + b_{pt} - b_{inss} - 0.5d_{coils} - b_{y1} \quad (۵)$$

$$r = 0.5d + b_{top} + \delta + b_{tsp} + b_{inss} + 0.5d_{coils} \quad (۶)$$

در این روابط پارامترهای b_{pt}، b_{inss}، d_{coils}، b_{top} و پارامتر b_{tsp}، با توجه به شکل (۱)، به ترتیب فاصله بین سقف شیار روتور از سطح خارجی قطب استاتور، ضخامت عایق استاتور، قطر کلاف استاتور، فاصله بین سقف شیار روتور از سطح جانبی روتور و عرض تیزی کناره قطب استاتور هستند. پارامتر δ بیانگر طول فاصله هوایی است. پارامتر b_{y1} عرض یوغ استاتور بوده و باید به گونه‌ای انتخاب شود که اندوکسیون مغناطیسی در سطح مقطع یوغ‌های متناظر از $B_{\max}$ تجاوز نکند. b_{top} مستقل از قطر روتور و شکل و ابعاد شیارها است. شیارهای روتور به دلایل مکانیکی و الکتریکی تا سقف شیار با سیم‌پیچ پر نمی شوند و از سطح جانبی روتور به اندازه b_{top} فاصله دارند. مقدار b_{y1} طبق رابطه (۷) تعیین می شود:

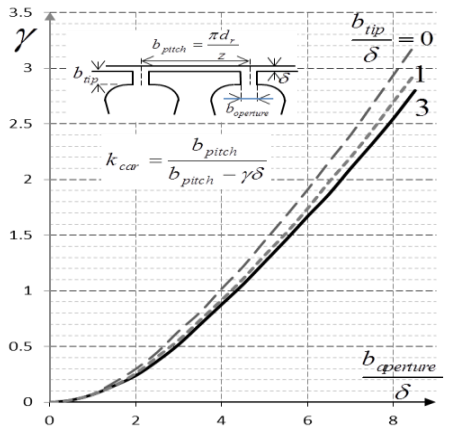
$$b_{y1} = 0.5k_{y1}\beta d \simeq 0.55\beta d \quad (۷)$$

همچنین در اینجا، پارامتر k_{y1} ضریب ثابتی است که به نوع ماده مغناطیسی هسته بستگی داشته و اینجا مقدار آن تقریبا ۱.۱ در نظر گرفته می شود. پارامتر b_{tsp} عرض تیزی کناره قطب استاتور است که باید در معادله (۸) صدق کند:

$$b_{tsp} \geq 0.5\beta d k_{car}\left(1 - \frac{2k_{pole}\alpha_{coils}}{\pi}\right)$$
$$k_{pole} = \frac{\pi}{arc\,of\ stator\ pole(radian)} \quad (۸)$$

اثر دهانه شیار روی رلکتانس مغنا طیسی فاصله هوایی با فاکتور کارتر k_{car} بیان می شود که با استفاده از شکل (۲) بدست می آید. از آنجایی که در موتورهای کوچک، b_{tsp} به دست آمده از رابطه فوق بسیار کوچک‌تر از مقدار مینیمم b_{tsp} است و همچنین به علت ایجاد استقامت لازم ورقه های استاتور، در محاسبات بهینه‌سازی مقدار آن ثابت و برابر با ۲ میلی‌متر فرض می‌شود. با توجه به شکل (۱) مقدار α_{coils} با رابطه (۹) تعیین می‌شود:

$$\alpha_{coils} = \cos\left(\frac{h}{r}\right) \quad (۹)$$



شکل (۲): تعیین ضریب کارتر [1]

مقدار ماکزیمم شار طبق رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\varphi_{peak} = \beta d l_r B_{peak} \quad (۱۰)$$

e_{peak} برابر با مقدارماکزیمم ولتاژ چرخشی در ماشین کموتاتوری است که از رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

$$e_{peak} = 2k_E n_r \omega \varphi_{peak} \quad (۱۱)$$

پارامتر k_E ضریب کاهش ولتاژ آرمیچر ناشی از اتصال کوتاه شدن جند تیغه کموتاتور توسط زغالکها، n_r تعداد دور سیم پیچی روتور و ω سرعت روتور بر حسب رادیان بر ثانیه است. طول یک حلقه از کلاف سیم پیچی روتور S_{nr} طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$S_{nr} = 2(l_r + 2l_{insr} + S_{headr}) \quad (۱۲)$$

در این رابطه S_{headr} طول متوسط سر و ته کلاف روتور و l_{insr} ضخامت عایق ابتدا و انتهای پشته رتور است. پارامتر R_r مقاومت سیم پیچی آرمیچر طبق رابطه (۱۳) بدست می آید:

$$R_r = \frac{1}{8}\frac{P_{cur}}{k_{cur}B_{peak}^2}\frac{k_R}{k_E^2}\frac{S_{nr}}{A_{coilr}b_{Fer}^2 l_r^2}\left(\frac{e_{peak}}{\omega}\right)^2 \quad (۱۳)$$

در این رابطه $b_{Fer} = b_{Fe\,teeth} = b_{Fe\,core} = \beta d$ عرض هدایت کنندگی فلوی روتور، $b_{Fe\,teeth} = z b_{tooth} / (2k_{pole})$ عرض هدایت کنندگی فلوی دندانه های روتور، $b_{Fe\,core} = d_{core} - d_{shaft\,fic}$ عرض هدایت کنندگی فلوی هسته روتور، k_R ضریب کاهش مقاومت فعال آرمیچر ناشی از اتصال کوتاه شدن چند حلقه از سیم پیچی روتور توسط زغالکها و k_{cur} ضریب فضایی کاهشی به منظور حذف عایق لاکی از سیم پیچی روتور تعریف می شوند. در این رابطه پارامتر A_{coilr} سطح مقطع سیم پیچی رتور طبق رابطه (۱۴) بدست می‌آید:

$$A_{coilr} = \frac{\pi}{4}d^2 - \frac{\pi}{4}d_{core}^2 - zh_{tooth}b_{tooth} + \\ -(\pi d_{core} - zb_{tooth})b_{insr} - zh_{tooth}b_{insr} = \\ = \frac{\pi}{4}d^2 - \frac{\pi}{4}(b_{Fer} - d_{shaft\,fic})^2 + \\ -b_{Fer}k_{pole}(d - b_{Fer} - d_{shaft\,fic}) + \\ -(\pi b_{Fer} + \pi d_{shaft\,fic} - 2b_{Fer}k_{pole})b_{insr} + \\ -(d - b_{Fer} - d_{shaft\,fic})zb_{insr} \quad (۱۴)$$

کمیات h_{tooth}، b_{tooth} و z به ترتیب عرض دندانه روتور، ارتفاع دندانه روتور و تعداد شیارهای روتور هستند. فاکتور اعوجاج جریان در فاصله هوایی با رابطه (۱۵) بیان می شود:

$$C_e = \sqrt{2}\,C_{mech} \quad (۱۵)$$

پارامتر C_{mech}، فاکتور اعوجاج گشتاور در فاصله هوایی بوده که دارای یک مقدار تقریبی به میزان ۰٫۵ است. قدرت داخلی در شکاف هوایی P_δ طبق رابطه (۱۶) حاصل می‌شود:

$$P_\delta = 2k_E C_{mech}\omega n_r \varphi_{peak} I_{peak} \quad (۱۶)$$

$$P_{out} = P_\delta - P_{Fer} \quad (۱۷)$$

در این روابط I_{peak}، P_{out} به ترتیب جریان ماکزیمم آرمیچر، توان خروجی و هستند. تلفات مسی سیم پیچی آرمیجر P_{Cur} و تلفات آهنی روتور P_{Fer} طبق روابط (۱۸) و (۱۹) تعیین می‌شوند:

$$P_{Fer} = P_{Fe}\beta d^2 l_r B_{peak}^2 \quad (۱۸)$$

$$P_{Cur} = P_{CuFer-req} - P_{Fer} \quad (۱۹)$$

مقدار پیک جریان با رابطه (۲۰) تعیین می شود:

$$I_{peak} = \sqrt{\frac{P_{cur}}{C_e R_r^2}} \quad (۲۰)$$

R_S به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شود:

$$R_s = \frac{P_{cusreq}}{C_e^2 I_{peak}^2} \quad (۲۱)$$

پرمئانس هر دو شکاف فاصله هوایی به صورت سری با در نظر گرفتن اشباع طبق رابطه (۲۲) بدست می آید:

$$A_{m2\delta} = \frac{\pi\mu_0 l_r d_r}{4\delta k_{pole}k_{car}} \quad (۲۲)$$

در محاسبات بهینه‌سازی با شیارهای نیمه بسته رتور و با شرط $b_{tip} \geq 3\delta$، پارامتر k_{car} که بیانگر مقدار ضریب کارتر است ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود. نسبت پرمئانس کل مدار مغناطیسی به پرمئانس شکاف هوایی به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود:

$$C_{mo} = \frac{4\delta k_{pole}k_{car}\beta\mu_r}{4\delta k_{pole}k_{car}\beta\mu_r + 3\pi d_r} \quad (۲۳)$$

پرمئانس مدار مغناطیسی کل نیز طبق رابطه (۲۴) بیان می شود:

$$A_{mo} = C_{mo}A_{m2\delta} \quad (۲۴)$$

رابطه تعداد دور سیم‌پیچی استاتور به صورت رابطه (۲۵) است:

$$n_s = \frac{n_r\alpha_{brush}}{\pi} + \frac{1.5\beta d l_r B_{prop} j_{peak}}{I_{peak}A_{mo}} \quad (۲۵)$$

در این رابطه α_{brush} زاویه جابجایی زغالکها برای کاهش ولتاژ القایی در سیم پیچهای اتصال کوتاه شده تحت کموتاسیون جریان و B_{prop} حداکثر اندوکسیون مغناطیسی متناسب با جریان تحریک است. طول یک حلقه از کلاف سیم پیچی استاتور از طریق رابطه (۲۶) تعیین می‌شود:

$$S_{ns} = 2l_s + 4l_{inss} + 4r\alpha_{coils} \quad (۲۶)$$

رابطه پارامتر α_{cus} به صورت رابطه (۲۷) است:

$$\alpha_{cus} = \frac{P_{cus}S_{ns}n_s}{R_s} \quad (۲۷)$$

پارامتر d_{coils}، بیانگر قطر سطح مقطع دایره‌ای از کلاف سیم پیچی استاتور است که طبق رابطه (۲۸) به دست می‌آید:

$$d_{coils} = \sqrt{\frac{2n_s a_{cus}}{\pi k_{cus}}} \quad (۲۸)$$

در این رابطه k_{cus} ضریب فضایی کاهشی به منظور حذف عایق لاکی از سیم پیچی استاتور تعریف می شود. روابط لازم برای به دست آوردن جرم مس مورد نیاز روتور و استاتور به ترتیب (۲۹) و (۳۰) هستند:

$$G_{cur} = g_{cur}n_r S_{nr}a_{cur} \quad (۲۹)$$

$$G_{cus} = g_{cus}n_s S_{ns}a_{cus} \quad (۳۰)$$

پارامترهای g_{cur} و g_{cus} بیانگر چگالی حجمی مس در روتور و استاتور هستند. همچنین جملات $n_r S_{nr}a_{cur}$ و $n_s S_{ns}a_{cus}$ در روابط فوق نشان دهنده حجم کل مس در روتور و استاتور هستند. a_{cur} و a_{cus} با (۳۱) و (۳۲) تعیین می‌شوند:

$$a_{cur} = \frac{k_{cur}A_{coilr}}{2n_r} \quad (۳۱)$$

$$a_{cus} = \frac{\pi k_{cus}d_{coilr}^2}{2n_s} \quad (۳۲)$$

مقدار پارامترهای d_{cur} و d_{cus} به ترتیب قطرسیم پیچی رتور و قطر سیم پیچی استاتور طبق روابط (۳۳) و (۳۴) به دست می‌آیند:

$$d_{cur} = \sqrt{\frac{4a_{cur}}{\pi}} \quad (۳۳)$$

$$d_{cus} = \sqrt{\frac{4a_{cus}}{\pi}} \quad (۳۴)$$

پارامتر b_0 عرض کل هسته استاتور طبق فرمول (۳۵) محاسبه می-شود:

$$b_0 = 2\sqrt{r^2 - h^2} + d_{coils} + 2b_{inss} + 2b_{y2} \quad (۳۵)$$

d_{coils} و b_{inss} به ترتیب نشان دهنده قطر سیم‌پیچ استاتور و ضخامت عایق شیار استاتور است. پارامتر b_{y2} موجود در رابطه فوق به صورت (۳۶) فرمول بندی می‌شود:

$$b_{y2} = 0.5k_{y2}\beta d \simeq 0.55\beta d \quad (۳۶)$$

جرم هسته فولادی مورد نیاز از رابطه (۳۷) حاصل می‌شود:

$$G_{Fe} = g_{Fe}k_{Fe}l_s(h_0 + b_{32})(b_0 + 2b_{31}) \quad (۳۷)$$

در این رابطه، g_{Fe} بیانگر چگالی جرمی ورقه فولادی است. در یک پشته کامل از لایه‌های روتور یا استاتور، لایه نازکی از کاغذهای عایق، هوا یا بعضی مواد مناسب دیگر بین لایه‌های فولادی وجود دارد. تاثیر این لایه‌های عایقی بر روی حجم کل پشته با پارامتر فضای k_{Fe} به مقدار حدوداً ۰/۹۵ بیان می‌شود. l_s طول محوری استاتور است. جملات $h_0 + b_{32}$ و $b_0 + 2b_{31}$ به ترتیب نشان دهنده طول مورد نیاز برای یک لایه روتور به اضافه یک لایه استاتور و عرض کل نوار فولادی است. مقادیر ثابت b_{31} و b_{32} حداقل عرض ضایعات و دور ریز نوار فولادی در فرایند ماشین کاری ورقه های رتور و استاتور هستند. حاصلضرب جمله های k_{Fe}، l_s، $h_0 + b_{32}$ و $b_0 + 2b_{31}$ در یکدیگر، مقدار حجم ورقه فولادی مورد نظر را تعیین می‌نماید.

مقدار میانگین تخمینی قطر سیم روتور $d_{cur} = d_{22}$ و مقدار میانگین تخمینی قطر سیم استاتور $d_{cus} = d_{32}$ نامیده می‌شوند. در یک بازه محدود از قطر سیم مسی، می‌توان قیمت مخصوص مس روتور و استاتور را به طور ریاضی بر حسب قطر سیم روتور d_{cur} و استاتور d_{cus} با معادله های (۳۸) و (۳۹) تخمین زد:

$$c_{cur} = c_{24} - c_{25}d_{cur} + c_{26}d_{cur}^2 \quad (۳۸)$$

$$c_{cus} = c_{34} - c_{35}d_{cus} + c_{36}d_{cus}^2 \quad (۳۹)$$

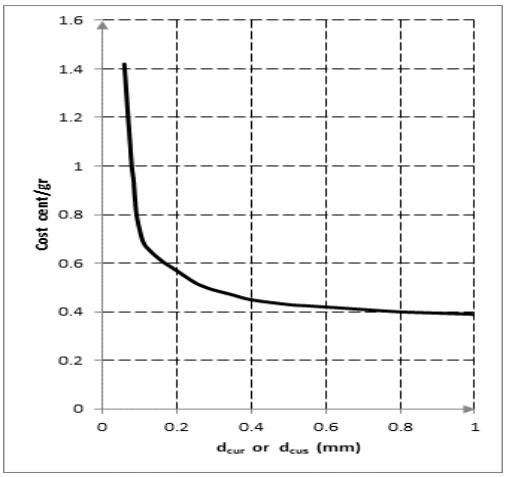
ضرایب مجهول c_{24}، c_{25} و c_{26} در معادله (۳۸) و ضرایب مجهول c_{34}، c_{35} و c_{36} در معادله (۳۹) با روابط (۴۰) تا (۴۵) بدست می آیند. قطرهای d_{21} و d_{23} در همسایگی d_{22} به گونه‌ای انتخاب می-شوند که $d_{23} - d_{22} = d_{22} - d_{21}$ باشد و همچنین c_{21}، c_{22} و c_{23} مقادیر قیمت مخصوص متناسب با d_{21}، d_{22} و d_{23} هستند که با استفاده از شکل (۳) تعیین می شوند.

به طور مشابه برای تخمین قطر سیم استاتور c_{31}، c_{32} و c_{33} مقادیر قیمت مخصوص متناظر با قطرهای d_{31}، d_{32} و d_{33} هستند که با استفاده از شکل (۳) تعیین می شوند.

$$c_{24} = c_{21} - \frac{d_{21}(c_{22} - c_{21})}{d_{22} - d_{21}} + \frac{d_{21}d_{22}(c_{23} - 2c_{22} + c_{21})}{2(d_{22} - d_{21})^2} \quad (۴۰)$$

$$c_{25} = \frac{(d_{21} + d_{22})(c_{23} - 2c_{22} + c_{21})}{2(d_{22} - d_{21})^2} - \frac{(c_{22} - c_{21})}{(d_{22} - d_{21})} \quad (۴۱)$$

$$c_{26} = \frac{c_{23} - 2c_{22} + c_{21}}{2(d_{22} - d_{21})^2} \quad (۴۲)$$



شکل (۳): قیمت سیم مسی با روکش لاکی بر حسب قطر آن[1]

$$c_{34} = c_{31} - \frac{d_{31}(c_{32} - c_{31})}{d_{32} - d_{31}} + \frac{d_{31}d_{32}(c_{33} - 2c_{32} + c_{31})}{2(d_{32} - d_{31})^2} \quad (۴۳)$$

$$c_{35} = \frac{(d_{31} + d_{32})(c_{33} - 2c_{32} + c_{31})}{2(d_{32} - d_{31})^2} - \frac{(c_{32} - c_{31})}{(d_{32} - d_{31})} \quad (۴۴)$$

$$c_{36} = \frac{c_{33} - 2c_{32} + c_{31}}{2(d_{32} - d_{31})^2} \quad (۴۵)$$

سرانجام محاسبه قیمت مخصوص مس رتور c_{cur} و استاتور c_{cus} با استفاده از معادله (۳۸) و (۳۹) و مقایسه مقدار آنها با دقت قابل قبول با استفاده از شکل (۳) بدست می آیند. اگر دقت مورد نظر تامین نشود مقادیر جدیدی برای d_{21}، d_{22} و d_{23} و همچنین برای d_{31}، d_{32} و

d_{33} در نظر گرفته شده و فرایند سعی و خطا تا حصول دقت قابل قبول ادامه خواهد داشت. مقدار مربوط به محاسبه قیمت کل مس رتور و استاتور با روابط (۴۶) و (۴۷) تعریف می‌شوند:

$$C_{cur} = c_{cur} G_{cur} \quad (۴۶)$$

$$C_{cus} = c_{cus} G_{cus} \quad (۴۷)$$

G_{cur} و G_{cus} به ترتیب بیانگر جرم مس مورد نیاز در روتور و استاتور هستند. مقادیر پارامترهای c_{cur} و c_{cus} نشان دهنده قیمت مخصوص مس هستند به عبارت دیگر قیمت مقدار یک کیلوگرم سیم-پیچ مسی است.

C_{Fe}، قیمت ورقه فولادی مورد نیاز برای روتور و استاتور است که با رابطه (۴۸) محاسبه می‌شود:

$$C_{Fe} = c_{Fe} G_{Fe} \quad (۴۸)$$

هزینه واحد طول قالب زدن لایه‌های روتور و استاتور از رابطه (۴۹) محاسبه می شود:

$$C_{stamp} = c_{stamp} l_s \quad (۴۹)$$

c_{stamp} هزینه قالب زدن لایه‌ها برای یک موتور است که متناسب با طول پشته‌های استاتور و روتور است و C_{stamp} هزینه قالب زدن واحد طول پشته لایه است.

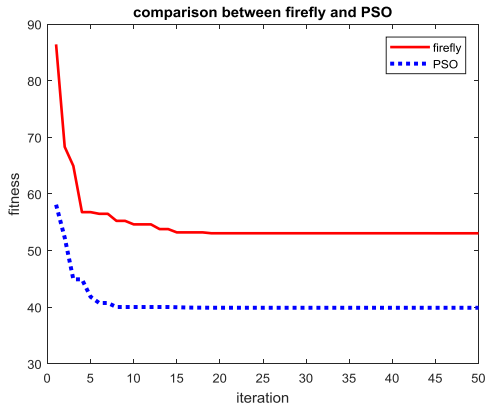
۳- ارائه نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- نتایج بهینه‌سازی

به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، موتور یونیورسال یا موتور سری کموتاتوری AC با کاربرد در جاروب برقی با مشخصات ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز، سرعت ۱۹۲۰۰ دور در دقیقه و توان خروجی ۲۵۰ وات در نظر گرفته شده است. پارامترهای ثابت موتور و پارمترهای مورد نیاز مربوط به روش بهینه‌سازی ، در جدول (۲) نشان داده شده-اند. حدود بالا و پایین متغیرهای بهینه‌سازی و مقادیر بهینه آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده اند. سایر مقادیر مربوط به مشخصات موتور بهینه شده، در جدول (۴) نشان داده شده و با مقادیر مربوط به موتور بهینه با الگوریتم Firefly مقایسه شده است. مرور جداول (۳) و (۴) و همگرایی نسبی پاسخ‌های هر دو الگوریتم، موفقیت در روند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین برای مقایسه بیشتر بین دو الگوریتم کرم شب‌تاب و PSO، نمودار فرایند بهینه‌سازی این دو الگوریتم در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲): لیست پارامترهای ثابت موتور و مقادیر آنها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
V	۲۲۰ $[V]$	g_{cu}	۸۹۵۰ $[kg/m^3]$
f	۵۰ $[Hz]$	g_{fe}	۷۸۰۰ $[kg/m^3]$
P_{out}	۲۵۰ $[W]$	C_{21}	۲۱۳/۳ $[cent/kg]$
$P_{cu_{fer}}$	۳۰ $[W]$	C_{22}	۱۸۳/۳ $[cent/kg]$
P_{cus}	۳۰ $[W]$	C_{23}	۱۷۰ $[cent/kg]$
$d_{shaft_{fic}}$	۱۰ $[mm]$	C_{stamp}	۵۱۷ $[cent/m]$
z	۱۲	C_{fe}	۲۹ $[cent/kg]$
k_{pole}	۱/۳	d_{21}	۰/۲۵ $[mm]$
k_R	۰/۹	d_{22}	۰/۴ $[mm]$
k_E	۰/۹۵	d_{23}	۰/۵۵ $[mm]$
k_{cur}	۱/۱۲	n_r	۴۳ $[turns]$
b_{top}	۲ $[mm]$	d_{coils}	۶ $[mm]$
b_{tsp}	۲ $[mm]$	k_{headr}	۱
b_{pt}	۷ $[mm]$	k_{y1}	۱/۱
ρ	$[\Omega.m]$ ۲۳×۱۰$^{-۹}$	k_{y2}	۱/۱
k_{cus}	۰/۵۵	k_{fe}	۰/۹۵
k_{cur}	۰/۳۵	b_{insr}	۰/۱۵ $[mm]$
B_{prop}	۱/۳۵ $[T]$	b_{inss}	۰/۲ $[mm]$
μ_r	۳۰۰۰	l_{insr}	۲ $[mm]$
P_{fer}	۰/۳۲ $[W/wb^2.m]$	l_{inss}	۴ $[mm]$



شکل (۴): مقایسه روند بهینه‌سازی الگوریتم کرم شب‌تاب با الگوریتم PSO

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود؛ با تعداد تکرارهای یکسان، الگوریتم PSO با سرعت بیشتری به مقادیر بهینه‌تر همگرا شده است. زمان شبیه‌سازی در الگوریتم PSO، ۱/۵۳۱ ثانیه و در بهینه‌سازی با الگوریتم Firefly، ۲/۴۴۶ ثانیه است.

جدول (۳): مقایسه مقادیر بهینه توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی

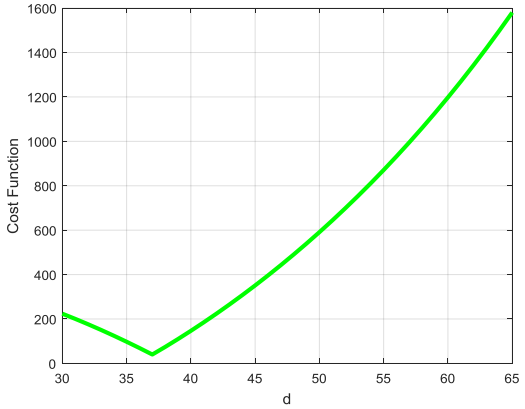
متغیرهای ورودی	واحد	حد پایین	حد بالا	مقدار بهینه با الگوریتم PSO	مقدار بهینه با الگوریتم Firefly
d	mm	۳۰	۶۵	۳۷	۴۰
l_r	mm	۱۰	۲۵	۱۵	۲۰
B_{peak}	T	۰/۵	۲	۱/۹	۱/۸۹۴
β	-	۰/۲	۰/۷	۰/۶۲۵	۰/۶۷۸

جدول (۴): مقایسه مشخصات خروجی موتور یونیورسال طراحی‌شده

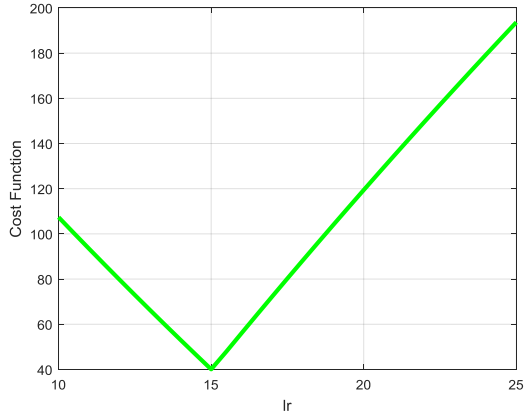
	نتایج الگوریتم PSO	نتایج الگوریتم Firefly
C_{cur} (cent)	۷/۲۷۴	۵/۸۶۶
C_{cus} (cent)	۷/۲۲۱	۸/۱۷۵
C_{fe} (cent)	۱۷/۶۴۶	۲۸/۷۱۸
C_{stamp} (cent)	۷/۷۷۵	۱۰/۳۴۲
C_{out} (cent)	۳۹/۸۹۶	۵۳/۰۵۶
P_{out} (w)	۲۵۰	۲۵۲/۶۱۱
I_{peak} (A)	۲۹/۷۳۴	۱۹/۴۴
n_s (Turns)	۲۲۸	۲۴۳
n_r (Turns)	۴۳	۴۳
d_r (mm)	۴۱	۴۴
r (mm)	۲۶/۱	۲۹/۱
h_0 (mm)	۶۲/۵۳۴	۶۹/۸۰۸
b_0 (mm)	۸۰/۳۰۹	۸۸/۳۹
d_{shaft} (mm)	۱۰	۱۱
d_{coils} (mm)	۶	۶

۳-۲- بررسی تاثیر هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی در روند طراحی

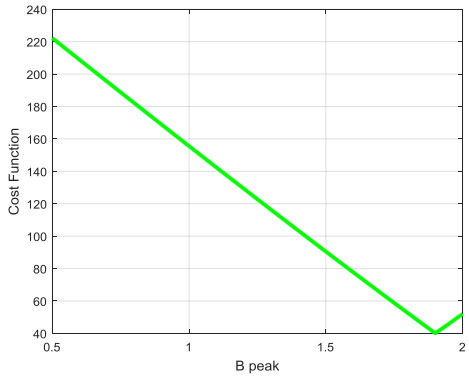
در این بخش، تاثیر هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی d، l_r، B_{peak} و β در روند طراحی دیده می‌شود. برای این منظور تغییرات تابع هدف نهایی، با تغییر هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی، در حالی‌که دیگر متغیرها در مقدار بهینه خود قرار دارند؛ در شکل‌های (۵) تا (۸) نشان داده می‌شود. در هر یک از این شکل‌ها، محور افقی محدوده مجاز متغیر بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که همان حد بالا و پایین متغیر مورد نظر است. محور عمودی، تغییرات تابع هدف نهایی را نشان می‌دهد؛ که همان هزینه کلی موتور مفروض درمقاله است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود؛ تابع هدف زمانی مینیمم مقدار خود را خواهد داشت که متغیر مورد نظر در مقدار بهینه خود قرار گرفته باشد و این مقدار بهینه در توافق کامل با نتایج بهینه‌سازی به دست آمده در بخش (۳-۱) است.



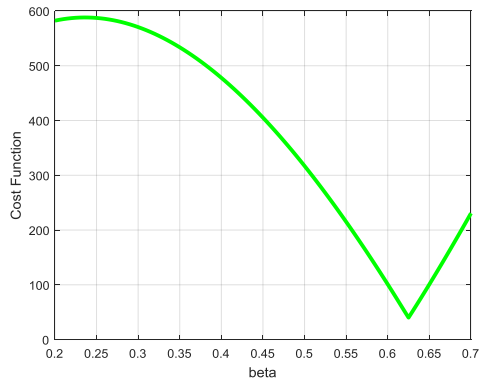
شکل (۵): تاثیر متغیر بهینه‌سازی d در روند طراحی موتور نمونه



شکل (۶): تاثیر متغیر بهینه‌سازی l_r در روند طراحی موتور نمونه



شکل (۷): تاثیر متغیر بهینه‌سازی B_{peak} در روند طراحی موتور نمونه



شکل (۸): تاثیر متغیر بهینه‌سازی β در روند طراحی موتور نمونه

۳-۳- پیاده‌سازی موتور نمونه با استفاده از نرم‌افزار ماکسول

دو روش مختلف برای بررسی نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی، در طراحی پارامترهای هندسی موتور یونیورسال وجود دارد: روش آنالیز اجزای محدود[۴] (FEA) و روش‌های تحلیلی. هر دو روش، دقت و صحت روش بهینه‌سازی و طراحی موتور را نشان می‌دهند. در حال حاضر، روش اجزای محدود یک ابزار بسیار کارآمد است و به طور قطع، روش تحلیل و بررسی عددی غالب، برای شبیه‌سازی توزیع میدان‌های فیزیکی در طراحی ماشین‌های الکتریکی است بدون آنکه با هر روش عددی دیگر موازی باشد.

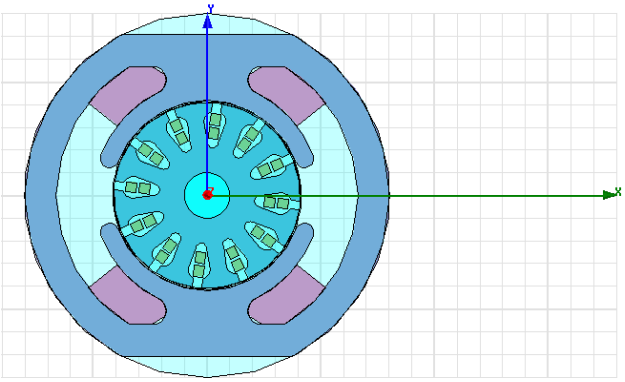
در این مقاله، از نرم‌افزار Ansoft-MAXWELLv.13 استفاده می‌شود که یک نرم‌افزار مبتنی بر FEM، برای اجرای شبیه‌سازی موتور یونیورسال طراحی‌شده است. میدان مغناطیسی داخل موتور با معادلات غیرخطی دیفرانسیل جزئی[۵] (PDE) زیر نشان داده می‌شود:

$$\nabla \times \bar{A} = \bar{B} \qquad (۵۰)$$

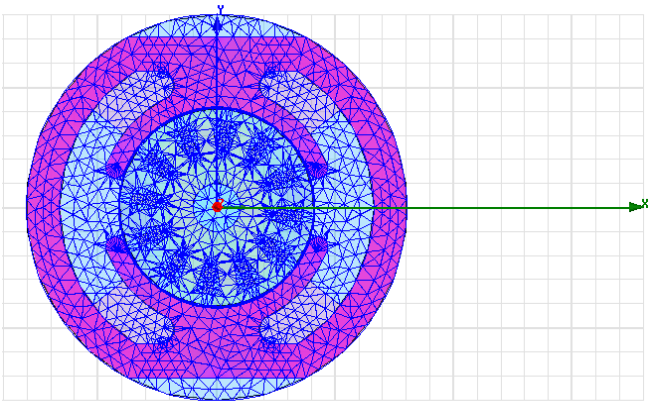
$$\nabla \times (\nu \nabla \times \bar{A}) = \bar{J} \qquad (۵۱)$$

$$\nabla . \sigma (\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla V) = 0 \qquad (۵۲)$$

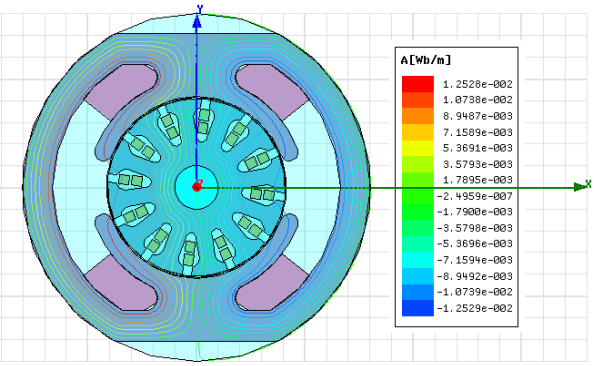
در معادلات فوق، $\bar{A}$ بردار پتانسیل مغناطیسی، $\bar{J}$ چگالی جریان کل، ν عکس نفوذپذیری مغناطیسی، V پتانسیل اسکالر الکتریکی و σ هدایت الکتریکی است.



شکل (۹): برش عرضی دوبعدی موتور نمونه با ساختار بهینه

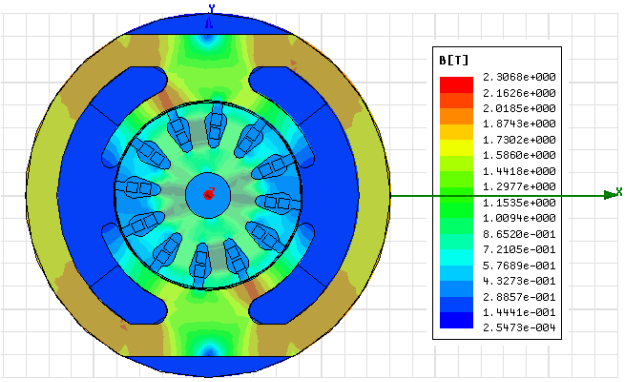


شکل (۱۰): طرح مش‌بندی دوبعدی موتور نمونه با ساختار بهینه



شکل (۱۱): خطوط شار در هسته مغناطیسی موتور یونیورسال طراحی شده با ساختار بهینه

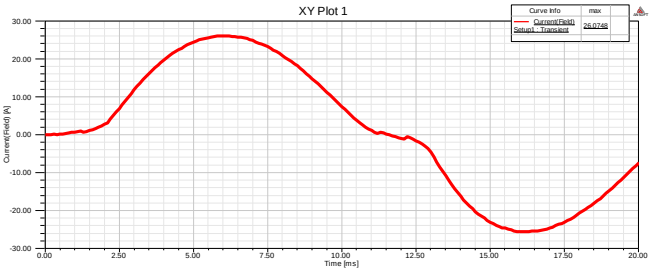
در این بخش از مقاله، از نتایج الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای پیاده‌سازی طرح بهینه موتور نمونه در ماکسول، استفاده می‌شود. برش عرضی دو بعدی موتور نمونه با ساختار بهینه در شکل (۹) و طرح مش‌بندی آن در فضای دو بعدی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): چگالی شار مغناطیسی موتور یونیورسال طراحی شده با ساختار بهینه

پس از مراحل شبیه‌سازی، توزیع خطوط شار و چگالی شار مغناطیسی به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده اند.

با توجه به نتایج جدول‌های (۳) و (۴) و به ازای مقادیر بهینه به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO، مقدار I_{peak} ، ۲۹/۷۳ آمپر محاسبه شده است. اما با استفاده از نرم افزار ماکسول، جریان در قطب‌های استاتور موتور یونیورسال نمونه به دست آمده و در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مقدار ماکزیمم جریان در قطب‌های استاتور ۲۶/۰۷ آمپر است.



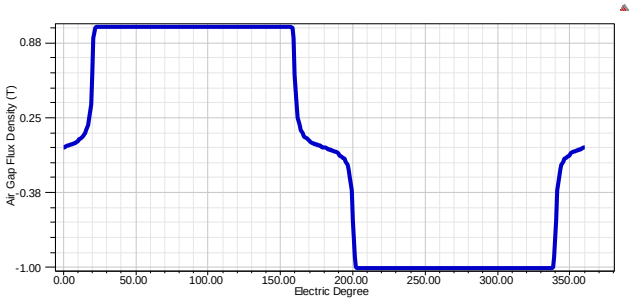
شکل (۱۳): شکل موج جریان موتور یونیورسال طراحی شده با ساختار بهینه

۳-۴- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

تغییرات چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور یونیورسال طراحی شده، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ماکزیمم مقدار چگالی شار حدود ۱ تسلا است و این مقدار باید در توافق کامل با مقدار ماکزیمم چگالی شاری باشد که از معادله (۵۳) به دست می‌آید.

در رابطه (۵۳)، A سطح کل کمان استاتور مقابل رتور است. مقدار آمپردور مورد نیاز استاتور برای عرض شکاف هوایی δ متناسب با B_δ است [23].

$$B_\delta = \frac{\varphi}{A/k_{car}} = \frac{2\beta k_{pole} k_{car} B_{\max}}{\pi d_r} \qquad (۵۳)$$



شکل (۱۴): تغییرات چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

با جایگذاری مقادیر بهینه به دست آمده در رابطه (۵۷)، مقدار B_δ در جدول (۵) مشخص شده است. همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود، بعد از پیاده‌سازی طرح بهینه موتور نمونه در نرم‌افزار ماکسول، ماکزیمم مقدار چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی، در توافق با مقادیر به دست آمده در قسمت طراحی موتور یونیورسال نمونه است.

جدول (۵): مقدار ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی برای موتور یونیورسال نمونه

	مقدار رابطه (۵۳) با مقادیر بهینه الگوریتم PSO	مقدار رابطه (۵۳) با مقادیر بهینه الگوریتم Firefly	مقدار به دست آمده از ماکسول
B_δ	۰/۹۹۳	۰/۹۸۹	۱

۳-۵- اعتبارسنجی طرح بهینه ارائه شده، با استفاده ازگشتاور خروجی موتور نمونه

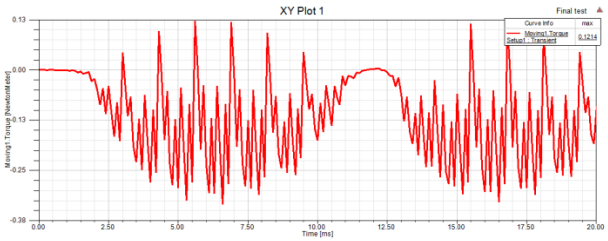
می‌توان گشتاور خروجی را معیار دیگری برای اعتبارسنجی مدل طراحی شده قرار داد. برای این منظور، گشتاور خروجی بدست آمده در حالت تئوری با گشتاور به دست آمده توسط نرم‌افزار ماکسول مقایسه می‌شود. با توجه به نتایج بهینه‌سازی موتور نمونه با استفاده از الگوریتم PSO، توان خروجی موتور ۲۵۰ وات و سرعت محور مکانیکی آن، $N_m = 19200\,rpm$ دور در دقیقه است. بنابراین با توجه به رابطه (۵۵)، گشتاور خروجی به دست آمده در حالت تئوری ۰/۱۲۴ نیوتون-متر خواهد بود.

$$\omega_m = \frac{2\pi}{60} N_m \qquad (۵۴)$$

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \qquad (۵۵)$$

همچنین می‌توان در حوزه تحلیل گذرا Transient، با امکان تعریف قطعه متحرک با سرعت چرخش مورد نظر، شبیه‌سازی را دقیق‌تر نمود. برای این منظور قسمت‌های متحرک موتور نمونه درون دایره‌ای با نام باند قرار می‌گیرند. با کلیک راست روی باند مورد نظر و انتخاب گزینه Motion setup و سپس assign band پنجره‌ای برای

انجام تنظیمات مورد نظر، در زمینه نوع حرکت و سرعت چرخش موتور باز می‌شود. نوع حرکت دورانی و سرعت چرخش ۱۹۲۰۰ دور در دقیقه انتخاب می‌شوند. با چرخش قطعه متحرک با سرعت تنظیم شده، نمودار تغییرات گشتاور با زمان در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): نمودار تغییرات گشتاور با زمان

همان‌طور که در شکل (۱۵) دیده می‌شود ماکزیمم گشتاور ۰/۱۲۱۴ نیوتون- متر است. این مقدار در مقایسه با گشتاور خروجی پیش‌بینی-شده با روابط طراحی (۰/۱۲۴ نیوتون- متر)، اندکی کمتر است. از آنجایی که، پیاده‌سازی موتور نمونه در نرم‌افزار ماکسول به حالت کار واقعی موتور نزدیک است، نتایج برگرفته از آن، قابل قبول و مطمئن‌تر از نتایج روابط تحلیلی و تئوری است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی PSO و Firefly طراحی بهینه موتور سری کموتاتوری AC (موتور یونیورسال) انجام شده است. با انتخاب تابع هدف مناسب و نیز به کمک روابط طراحی موتور مفروض، تابع هزینه کلی موتور، که ترکیبی از درصد قیمت مس رتور و استاتور، ورقه‌های آهن مورد نیاز و هزینه قالب زدن ورقه‌ها در نظر گرفته شده کمینه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، موفقیت در رسیدن به طرح بهینه موتور نمونه را نشان دادند. همچنین دیده شد که در تعداد تکرارهای یکسان، الگوریتم PSO، در زمان کمتری به پاسخ‌های بهینه‌تر همگرا شده است و عملکرد بسیار مناسبی داشته است. بنابراین، از نتایج مربوط به بهینه‌سازی با الگوریتم PSO برای بررسی عملکرد موتور نمونه و پیاده‌سازی آن در نرم افزار ماکسول، استفاده شد. در ادامه، دقت و صحت روش بهینه‌سازی و طراحی، برای موتور یونیورسال نمونه، بررسی شد. روش بررسی و تجزیه و تحلیل با استفاده از نرم‌افزار MAXWELL که مبتنی بر روش اجزای محدود است؛ صورت گرفت. نتایج بررسی‌ها، کارآمدی روش ارائه شده برای طراحی بهینه موتور مذکور را نشان دادند.

مراجع

[۱] سیدحمید شاه‌عالمی، طراحی موتور سری کموتاتوری یونیورسال، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۵۰، اسفند ۱۳۷۰.

[۲] دکتر مهران تقی پور گرجی کلایی، دکتر محسن فرشاد، دکتر سیّد محمّد رضوی، " ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی قفسه سنجابی "، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۴ شماره ۱ صفحات ۹۳-۱۰۱، سال ۱۳۹۶.

[۳] مسعود خسروی، محمود حسینی علی آبادی، شهرام جوادی، "بهینه‌سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه توسط روش اجزای محدود جهت بهبود عملکرد توربین بادی سرعت متغیر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۵ شماره ۱ صفحات ۱۰۳-۱۱۲، سال ۱۳۹۷.

[4] C. Massimo and P. Davide, "DC Machines and Drives and Universal Motors," in Fundamentals of Electric Power Engineering From Electromagnetics to Power Systems, ed. Wiley-IEEE Press, p. 552, 2014.

[5] G. Papa, B. Korousic-Seljak, B. Benedicic, and T. Kmecl, "Universal motor efficiency improvement using evolutionary optimization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, pp. 602-611, 2003.

[6] T. Friedrich and S. Menzel, "A cascaded evolutionary multi-objective optimization for solving the unbiased universal electric motor family problem," in 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp. 3184-3191, 2014.

[7] D. Lin, P. Zhou, and S. Stanton, "An analytical model and parameter computation for universal motors," in 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 119-124, 2011.

[8] A. Dianov, N. Kim, Y. Kim, and S. Lim, "Substitution of the Universal Motor drives with electrolytic capacitor-less PMSM drives in home appliances," in 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), pp. 1631-1637, 2015.

[9] M. Willig, C. Cossar, and I. Corral, "A circuit model for the analysis of single phase universal motors using constant arc voltage drop," in 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 455-460, 2013.

[10] S. A. Goll, V. E. Korneev, S. M. Karabanov, D. V. Suvorov, G. P. Gololobov and D. Y. Tarabrin, "Optionally filling scalable complex of universal DC motor controllers and multisensory converters for mobile robotics," in 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 392-398, 2015.

[11] E. B. Turner and H. M. Willey, "Microprocessor-Based Universal Motor Protection System," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-17, pp. 58-62, 1981.

[12] Y. Niwa and Y. Akiyama, "Propositions for the analysis of commutation phenomenon and the modeling of universal motors based on introducing the state function method into FEM electromagnetic field analysis," in 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 226-233, 2009.

[13] A. D. Gerlando and R. Perini, "Modelling and test validation of high speed universal motors fed via a Triac," in IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp. 6 pp.-1178, 2005.

[14] A. D .Gerlando, R. Perini, and G. Rapi, "Equivalent circuit for the performance analysis of universal motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, pp. 18-27, 2004.

[15] A. D. Gerlando and R. Perini, "The universal motor: A classic machine with evergreen challenges in design and modeling," in 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013, pp. 85-94, 2013.

[16] I. E. Davidson, "Performance analysis of a solar-powered fractional HP universal motor," in 2004 IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590), pp. 1179-1184 Vol.2, 2004.

[17] J. Cros, P. Viarouge, Y. Chalifour, and J. Figueroa, "A new structure of universal motor using soft magnetic composites," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 550-557, 2004.

[18] R. H. Wang and R. T. Walter, "Modeling of universal motor performance and brush commutation using finite element computed inductance and resistance matrices," IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 257-263, vol. 15, 2000.

[19] C. Ozturk, B. Gok, H. Acikgoz, and A. Balikcioglu, "Noise emission of universal motor drives," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, pp. 49-66, 1998.

[20] L. Xheladini, A. Tap, T. Aşan, M. Yılmaz, and L. T. Ergene, "Permanent Magnet Synchronous Motor and Universal Motor comparison for washing machine application," in 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), pp. 381-386, 2017.

[21] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 58-73, 2002.

[22] A. Hoorfar, "Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization: A Review," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, pp. 523-537, 2007.

[23] R.H. Dijken, Optimization of small AC series Commutator motor, Netherland, Philips Res. Repts 1971, No.6.

زیرنویس‌ها

[1] Cascaded evolutionary multi objective optimization
[2] Pareto method
[3] Commutation scintillation phenomenon
[4] Finite Element Analysis
[5] Partial Differential Equations (PDE)