

# طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل اجزای محدود موتور سنکرون آهن‌ربای دایم نوع دیسکی

سیدعلی سیدی سعادت و ابوالفضل حلوائی نیاسر

مختلفی از موتورهای سرعت بالا برای مقاصد گوناگون ساخته شده‌اند که از جمله می‌توان به موتورهای القایی، رلوکنانس سنکرون، موتورهای پسماندی (موتور هیستریزس) و سنکرون آهن‌ربای دایم اشاره کرد [۱] و [۲].

موتورهای آهن‌ربای دایم با توجه به ویژگی‌های خاص خود همچون ضریب توان بالا، چگالی گشتاور به حجم زیاد، عملکرد دینامیکی سریع، بهره بالا و حجم و وزن کم، دارای کاربری وسیعی در بسیاری از صنایع هستند [۳]. یکی از این انواع موتورها، موتور سنکرون آهن‌ربای دایم (PMSM) می‌باشد که دارای ولتاژ ضدمحرکه، ولتاژ تغذیه و جریان با شکل موج سینوسی است. با توسعه روش‌های کنترلی پیشرفته نظیر کنترل برداری، استفاده از این موتور در بسیاری از کاربردهای سرعت متغیر با عملکرد بالا نظیر خودروهای برقی و هیبریدی، رباتیک و سیستم‌های سرو متداول شده است [۴]. همچنین این موتور در صنایع با کاربرد سرعت بالا و تنظیم سرعت دقیق نظیر صنایع نظامی، هسته‌ای و پزشکی کاربرد وسیعی یافته است. با توجه به مسیر حرکت شار در فاصله هوایی، این موتورها به دو دسته اصلی شار شعاعی<sup>۱</sup> (RFPM) و شارمحور<sup>۲</sup> (AFPM) تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]. در ساختار شارمحور، شار در راستای محور ماشین حرکت می‌کند. چگالی حجمی و گشتاور بالا، بازده بالا و ساختار مستحکم از جمله ویژگی‌های موتور AFPM است [۶].

در طراحی ماشین‌های AFPM مطالعات و اقدامات چندی صورت گرفته است. در اکثر این پژوهش‌ها از این ساختار موتور جهت استفاده در توان‌های متوسط و بالا (بیش از ۱ کیلووات) و سرعت‌های معمولی (کمتر از ۳۰۰۰ rpm) به کار رفته است. در [۷] یک موتور AFPM با توان ۲/۲ کیلووات و ۱۲۸۵ rpm جهت استفاده در خودروی هیبریدی طراحی و تحلیل حرارتی سه‌بعدی شده است. در [۸] از این ساختار در صندلی چرخ‌دار استفاده شده که موتور AFPM طراحی شده در سرعت‌های مختلف، دارای توان و گشتاورهای متفاوتی است اما مقدار توان نامی این موتور ۴/۱ کیلووات و سرعت آن ۱۸۵ rpm است. در [۹] یک ژنراتور AFPM با سرعت نامی ۳۰۰۰ rpm، توان ۴۶۰ وات و ولتاژ فاز خروجی ۵۶/۶۸ ولت طراحی و نمونه‌سازی شده است اما تحقیقات گزارش شده در مورد طراحی موتور AFPM با سرعت بالا اندک هستند.

با توجه به وابستگی بسیار زیاد مشخصه‌های خروجی موتور به یکدیگر و تأثیر چشم‌گیر تغییر پارامترهای طراحی بر روی مشخصه‌ها و این که روابط طراحی کاملاً غیر خطی بوده و محدودیت‌های طراحی زیادی نیز وجود دارند، استفاده از روش‌های هوشمند جهت طراحی یا بهینه‌سازی طراحی تحلیلی موتورهای الکتریکی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در [۱۰] طراحی و تست یک موتور AFPM با مشخصات ۳۰ کیلووات و

چگالده: این مقاله به طراحی تحلیلی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی به روش اجزای محدود یک موتور سنکرون آهن‌ربای دایم از نوع شارمحور با سرعت بسیار بالا می‌پردازد. این موتور دارای توان نامی تقریبی نیم اسب بخار و سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه بوده که در برخی از کاربردهای صنعتی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر حسب مشخصات نامی مورد نظر برای موتور با استفاده از روابط تحلیلی طراحی موتورهای سنکرون آهن‌ربای دایم، محاسبات اجزای مختلف موتور شامل مشخصات ابعادی، مغناطیسی و جنس مواد با جزئیات کامل تشریح می‌شوند. در ادامه و با توجه به کاربرد خاص این موتور که در آن دست‌یابی به گشتاور مورد نیاز با حداقل جریان و تلفات مسی مورد نظر است، ابعاد و مشخصات موتور به روش بهینه‌سازی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با تابع هدف نسبت گشتاور به جریان تعیین می‌گردند. الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیر بهینه فاصله هوایی، چگالی شار آهن‌ربای دایم، چگالی جریان خطی و تعداد دورهای سیم‌پیچ استاتور را تعیین می‌کند. جهت صحت‌گذاری طراحی‌های تحلیلی و بهینه‌سازی انجام‌شده، مدل اجزای محدود سه‌بعدی موتور در نرم‌افزار ماکسول ایجاد می‌گردد و عملکرد موتور تحت شبیه‌سازی‌های مگنتواستاتیک و گذرا بررسی می‌گردد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود بر نتایج طراحی تحلیلی صحت می‌گذارند. همچنین این نتایج بر مؤثر بودن روش بهینه‌سازی ارائه‌شده بر کاهش تلفات اهمی دلالت دارند و تطابق بسیار مناسبی بین نتایج هر دو روش تحلیل برای مقادیر به دست آمده گشتاور، بهره موتور و چگالی شار وجود دارد.

کلیدواژه: موتور سنکرون آهن‌ربای دایم، سرعت بالا، موتور شار محور (دیسکی)، طراحی تحلیلی، تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی.

## ۱- مقدمه

امروزه موتورهای سرعت بالا، کاربردهای متنوعی در صنعت و به ویژه در صنایع خاص همچون صنایع نظامی، هسته‌ای، پزشکی و تولید توان الکتریکی دارند. جداسازهای گازی مورد استفاده در پزشکی و غنی‌سازی هسته‌ای، میکروتوربین‌های گازی توان پایین و توان بالا، کمپرسورهای سرعت بالا از نمونه این کاربردها هستند. معمولاً موتورهای با سرعت دورانی بین ۶۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه، موتورهای سرعت بالا محسوب می‌گردند، در حالی که محدوده بین ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه به موتورهای با سرعت بسیار بالا اطلاق می‌شود. بالاتر از آن تا سرعت‌های مگا دور بر دقیقه را موتورهای فوق سرعت بالا گویند. انواع

این مقاله در تاریخ ۳۰ تیر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۰ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

سیدعلی سیدی سعادت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، (email: s\_ali\_seyedi@yahoo.com).

ابوالفضل حلوائی نیاسر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، (email: halvaei@kashanu.ac.ir).

1. Radial-Flux Permanent Magnet

2. Axial-Flux Permanent Magnet

جدول ۱: مشخصات موتور AFPM مورد نظر و فرضیات طراحی.

واحد	مقدار	نماد	کمیت
-	۳	$m$	تعداد فاز
-	۱	$p$	تعداد زوج قطب
N.m	۰٫۰۵	$T$	گشتاور نامی
rpm	۶۰۰۰	$n_s$	سرعت سنکرون
Hz	۱۰۰۰	$f$	فرکانس تغذیه
V	۳۸۰	$V_s$	ولتاژ خط تغذیه
-	۲۴	$S$	تعداد شیار استاتور
T	۰٫۶۵	$B_m$	چگالی شار فاصله هوایی
A/m	۱۰۰۰۰	$A_m$	چگالی جریان خطی
A/mm	۶	$J$	چگالی جریان هادی‌ها
-	۰٫۹۵	$\varepsilon$	نسبت EMF به ولتاژ فاز
-	۰٫۸	$K_d$	نسبت شعاع داخلی به خارجی
mm	$20 < R_{out} < 30$	$R_{out}$	محدوده شعاع خارجی

(یا استوانه‌ای) ساده‌تر می‌نماید. جهت به دست آوردن حداقل ریپل گشتاور خروجی، موتور مورد نظر دارای سیم‌پیچی توزیع شده و با تعداد زیادی شیار در استاتور بوده و روتور آن به صورت یک دیسک با فاصله هوایی اندکی بر روی آن قرار دارد. ساختار موتور مورد استفاده در مقاله در شکل ۱- الف آورده شده است.

با توجه به کاربرد ویژه موتور مورد نظر در این پژوهش، مشخصات مورد انتظار و همچنین پارامترهای مجهولی که در روند طراحی به دست خواهند آمد در جدول ۱ آورده شده‌اند. این موتور باید بتواند گشتاور ۰٫۰۵ N.m را در سرعت ۶۰۰۰ rpm ایجاد نماید. یاتاقان‌های موتور از نوع پسیو مغناطیسی در نظر گرفته شده است و جهت حداقل‌سازی تلفات، کل مجموعه دورانی در خلأ نسبی می‌چرخد. با توجه به کاربرد مورد نظر برخی محدودیت‌های ابعادی برای استاتور شامل شعاع‌های داخلی و خارجی در جدول ۱ ذکر گردیده‌اند.

### ۳- طراحی تحلیلی موتور AFPM

در این بخش، روابط مورد استفاده در محاسبه مقادیر اجزای مختلف موتور شامل استاتور و روتور بر حسب مشخصات طراحی و قیود مربوطه به تفصیل آورده می‌شوند [۱۳] و [۱۴]. پارامترهای مورد انتظار از طراحی موتور در جدول ۲ آورده شده‌اند. مهم‌ترین پارامتر موتور AFPM، قطر (شعاع) خارجی هسته استاتور است.

گشتاور و ولتاژ ضد محرکه القاشده در استاتور موتور AFPM از روابط زیر به دست می‌آیند

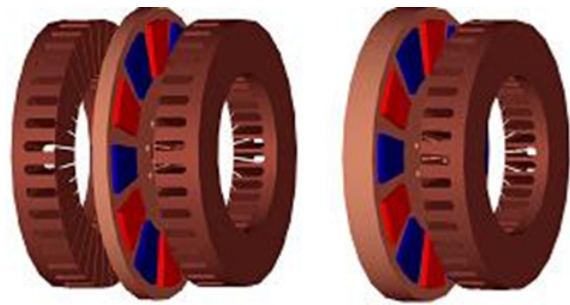
$$T_{rms} = \frac{1}{4\sqrt{2}} m N_s K_w B_m D_s^2 (1 - k_d^2) I_a \quad (1)$$

$$E = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} N_s K_w B_m D_s^2 (1 - k_d^2) n_s \quad (2)$$

پارامترهای مورد استفاده در معادلات فوق از روابط زیر قابل محاسبه هستند و نمادهای مورد استفاده در این روابط در جدول ۲ تعریف گردیده‌اند

$$K_w = k_p k_d \quad (3)$$

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha_s}{2}}{q \sin \frac{\alpha_s}{2}} \quad (4)$$



شکل ۱: ساختارهای متداول در طراحی موتورهای سنکرون آهن‌ربای دایم شارمحور سرعت بالا.

سرعت ۱۶۰۰۰ rpm برای کاربرد در خودروی هیبریدی مورد مطالعه قرار گرفته است. تابع هدف، بهره موتور بوده است که جهت افزایش آن سعی در کاهش تلفات با استفاده از مدل تخمینی از تلفات بخش‌های مختلف شده است. در اغلب طراحی‌های گزارش شده افزایش بهره مد نظر طراح بوده است. با توجه به این که بیشترین تلفات در موتورهای PMSM سرعت بالا مربوط به تلفات مسی است لذا باید سعی گردد تا این تلفات، حداقل شده و در نتیجه توان خروجی و بهره به مقدار مطلوب برسند [۱۱] تا [۱۳]. در برخی کاربردهای خاص با توجه به شرایط ویژه بار و فرایند مربوط به آن و همچنین محدودیت‌های ابعادی موتور مورد نظر، کاهش تلفات مسی و حرارت تا حد ممکن از اهمیت خاصی برخوردار است و در کنار آن باید گشتاور نیز دارای مقدار مطلوب باشد. دستیابی به این دو هدف در کنار محدودیت‌های ابعادی طراحی نیازمند حل یک مسأله بهینه‌سازی و به عبارتی طراحی بهینه موتور بوده که موضوع این تحقیق می‌باشد.

در ادامه بحث و در بخش ۲ ساختار استاتور و روتور و مشخصات موتور مورد نظر در طراحی بیان می‌گردند. در بخش ۳ بر مبنای روابط تحلیلی، یک موتور سرعت بالا AFPM با مشخصات مورد انتظار طراحی شده و پارامترهای ابعادی موتور محاسبه خواهند گردید. در بخش ۴، مقدار تلفات موتور در بخش‌های مختلف و همچنین بهره موتور محاسبه می‌گردد. جهت صحت‌گذاری طراحی تحلیلی انجام شده در بخش ۵ موتور طراحی شده در نرم‌افزار ماکسول مدل‌سازی می‌شود و به روش تحلیل المان محدود (FEA) سه‌بعدی، رفتار آن صحت‌گذاری می‌گردد. در بخش ۶ طراحی تحلیلی انجام شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک مجدداً بازطراحی می‌گردد تا ضمن حفظ گشتاور مورد نیاز بار، جریان استاتور و تلفات مسی به حداقل مقدار ممکن برسد. نتایج طراحی بهینه مجدداً در نرم‌افزار اجزای محدود ماکسول شبیه‌سازی می‌گردد. در بخش آخر نیز به تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج طراحی تحلیلی و بهینه پرداخته می‌شود.

### ۲- مشخصات و ساختار موتور سنکرون AFPM

ساختار موتورهای آهن‌ربای دایم شارمحور می‌تواند به صورت یک‌طرفه، دوطرفه و یا حتی ساختار چندصفحه‌ای طراحی شوند. شکل ۱ دو نوع ساختار پرکاربرد را نشان می‌دهد. در کاربردهای گشتاور پایین، ساختار یک‌طرفه به دلیل آسانی و ارزانی ساخت، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت افزایش گشتاور بیشتر و رفع مشکلات نزدیکی یاتاقان‌ها، ساختارهای دوطرفه مورد توجه قرار می‌گیرند. از طرف دیگر در طراحی موتورهای آهن‌ربای دایم سرعت بالا، محافظت از آهن‌ربا در مقابل نیروهای گریز از مرکز اهمیت زیادی دارد که البته استفاده از ساختار شارمحور، پروسه ساخت آهن‌ربا و مونتاژ آن را نسبت به نوع شار شعاعی

جدول ۲: پارامترهای مورد انتظار از طراحی موتور AFPM.

نماد	پارامتر
$q$	تعداد شیار بر قطب بر فاز
$K_w$	ضریب سیم‌پیچی
$I_a$	جریان آرمیچر
$N_1$	تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز
$N_c$	تعداد دور سیم‌پیچی در شیار
$D_{out}$	قطر خارجی استاتور
$D_{in}$	قطر داخلی استاتور
$\tau_p$	گام قطبی
$\tau_s$	گام شیار
$P_{out}$	توان خروجی
$g$	فاصله هوایی
$S_w$	سطح مقطع هادی‌ها
$h_s$	ارتفاع شیار
$h_{ys}$	ارتفاع یوغ استاتور
$h_{PM}$	ارتفاع قطعات PM
$h_{tot}$	ارتفاع کل موتور
$\Delta P_{tot}$	تلفات کل موتور
$\eta$	بهره
$\cos \phi$	ضریب توان

در روابط فوق  $D_{in}$  قطر داخلی،  $D_{ave}$  قطر متوسط،  $l_i$  طول شعاعی هسته استاتور ماشین،  $\tau_p$  گام قطبی،  $b_p$  طول قطب و  $\tau_s$  گام شیار هستند. در این طراحی عرض شیار و دندان برابر فرض شده‌اند و لذا

$$b_s = 0.5\tau_s \rightarrow b_s = 2.945 \text{ mm} \quad (13)$$

$$b_{s,min} = 0.5\tau_{s,min} \rightarrow b_{s,min} = 2.617 \text{ mm}$$

توان خروجی موتور ( $P_{out}$ ) با استفاده از مقادیر داده شده گشتاور و سرعت برابر با  $314.2$  وات بوده و طول فاصله هوایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]

$$g \geq \gamma \tau_p \frac{A_m}{B_m} \rightarrow g \geq 0.45 \text{ mm} \rightarrow g = 0.5 \text{ mm} \quad (14)$$

جهت انتخاب سیم برای سیم‌پیچ‌ها، ابتدا با استفاده از مقدار و چگالی جریان، سطح مقطع هر سیم محاسبه و سپس طبق جدول استاندارد AWG، قطر مناسب سیم تعیین می‌گردد

$$S_w = \frac{I_a}{J} \rightarrow S_w = 0.84 \text{ mm}^2 \rightarrow AWG27 \rightarrow$$

$$S_w = 0.102 \text{ mm}^2, D_w = 0.361 \text{ mm}, \quad (15)$$

$$S_{w,tot} = 6.94 \text{ mm}^2, h_{min,s} = 2.65 \text{ mm}$$

سیم انتخاب شده AWG27 با قطر  $0.36$  میلی‌متر می‌باشد که نهایتاً جهت جاسازی سیم‌پیچ هر شیار (با توجه به عرض شیار) به ارتفاع حداقل  $2.65$  میلی‌متر نیاز است. برای سهولت در امر سیم‌پیچی، ضریب پرشدگی ( $K_f$ ) باید بین  $0.4$  تا  $0.6$  باشد و لذا ارتفاع شیار،  $0.5$  میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. ضریب کارتر ( $K_c$ ) با توجه به گام و عرض شیار و طول فاصله هوایی برابر با  $1.185$  محاسبه شده که در نتیجه طول فاصله هوایی ( $g'$ ) به صورت زیر اصلاح می‌گردد

$$g = K_c g \rightarrow g' = 0.593 \text{ mm} \quad (16)$$

از آنجا که فرکانس کاری ماشین بسیار بالاست برای کاهش تلفات هسته، جنس آن از مواد مغناطیسی نرم بسیار نازک انتخاب می‌شود. برای این منظور از نوار آلایژی SA۱ ۲۶۰۵ Amorphous [۶] استفاده می‌گردد که مخصوص عملکرد در فرکانس‌های بالا است. مشخصات این ورق به صورت زیر است

$$B_r = 1.59 \text{ T}, \Delta P_{/s} = 0.125 \text{ W/kg}, \quad (17)$$

$$\rho = 7200 \text{ Kg/m}^3, \delta = 7.69 \times 10^{-5} \text{ s/m}$$

با انتخاب ضریب پشته‌سازی  $K_{fe}$  برابر  $0.75$  و چگالی شار کاری  $1.5$  تسلا برای هسته استاتور، ارتفاع یوغ آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]

$$h_{ys} = \frac{\phi_f}{2B_{ys}l_iK_{fe}} \rightarrow h_{ys} = 13.5 \text{ mm} \quad (18)$$

روتور دوقطبی مورد استفاده در این طراحی به صورت قطب برجسته و نصب‌شده بر سطح بوده که  $D_o$ ،  $D_i$  و  $l_i$  آن قبل‌تر محاسبه شدند. برای قطعه‌های آهن‌ربای دایم از آلایژ ساماریوم-کبالت و برای دیسک نگهدارنده آن از یک ماده مستحکم مانند استیل ۱۰۱۰ استفاده می‌شود که مشخصات این دو ماده به صورت زیر هستند

$$Smco: B_r = 1 \text{ T}, H_c = 756 \text{ KA/m}, \quad (19)$$

$$\mu_r = 1.063, \delta = 1.11 \times 10^{-6} \text{ s/m}$$

$$q = \frac{S}{\tau mp} \quad (5)$$

$$A_m = \frac{\epsilon m \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi D_c (1 + k_d)} \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{\pi D_{avg}}{2p} \quad (7)$$

$$b_p = \alpha_i \tau_p \quad (8)$$

$$\tau_s = \frac{\pi D_{avg}}{S} \quad (9)$$

$$\tau_{s,min} = \frac{\pi D_i}{S}$$

$$P = T \times \omega \quad (10)$$

سیم‌پیچی استاتور به صورت گام کامل در نظر گرفته شده است و لذا در (۱) ضریب گام سیم‌پیچی ( $k_p$ ) برابر واحد می‌باشد. همچنین بر مبنای پارامترهای طراحی جدول ۱ و استفاده از (۵) مقدار  $q = 4$  به دست می‌آید. لذا از به کارگیری روابط فوق نتیجه می‌شود

$$I_a = 0.502 \text{ A} \quad (11)$$

$$N_1 = 332 \rightarrow N_c = 83 \rightarrow D_c = 50 \text{ mm}$$

لذا تعداد دور سیم‌پیچ‌ها در هر شیار ( $N_c$ ) برابر  $83$  دور، در هر فاز ( $N_1$ )  $332$  دور و اندازه قطر خارجی ( $D_o$ ) به دست آمده در محدوده قابل قبولی هستند. سایر پارامترهای ابعادی با استفاده از قطر خارجی به دست می‌آیند

$$D_{in} = 40 \text{ mm}, D_{ave} = 45 \text{ mm}, l_i = 5 \text{ mm}$$

$$\tau_p = 70.685 \text{ mm}, b_p = 45 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\tau_s = 5.89 \text{ mm}, \tau_{s,min} = 5.235 \text{ mm}$$

$$R_{ac} = K_R R_{dc} \rightarrow R_{ac} = 30.6 \Omega \rightarrow \quad (26)$$

$$\Delta P_{cu} = 3 R_{ac} I_a^2 \rightarrow \Delta P_{cu} = 23.13 \text{ W}$$

همچنین تلفات آهنربای دایم روتور، تلفات دیسک روتور و تلفات چرخشی به ترتیب برابرند با [۲]

$$\begin{aligned} \Delta P_{PM} &= 6.7 \text{ W} \\ \Delta P_{r-r} &= 11.93 \text{ W} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Delta P_{rot} = 1.12 \text{ W}$$

در نهایت تلفات کل موتور عبارتست از

$$\begin{aligned} \Delta P_{tot} &= \Delta P_c + \Delta P_{cu} + \Delta P_{PM} + \Delta P_{r-r} + \Delta P_{rot} \rightarrow \\ \Delta P_{tot} &= 42.88 \text{ W} \end{aligned} \quad (28)$$

حال می‌توان مقدار توان ورودی و بازده را محاسبه نمود

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P_{tot} \rightarrow \Delta P_{in} = 357.08 \text{ W} \quad (29)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 0.88 \quad (30)$$

مقدار ضریب توان موتور برابر خواهد بود با

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow \eta = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} V_L I_a \cos \varphi} \rightarrow \quad (31)$$

$$\eta \cos \varphi = 0.8555 \rightarrow \cos \varphi = 0.97$$

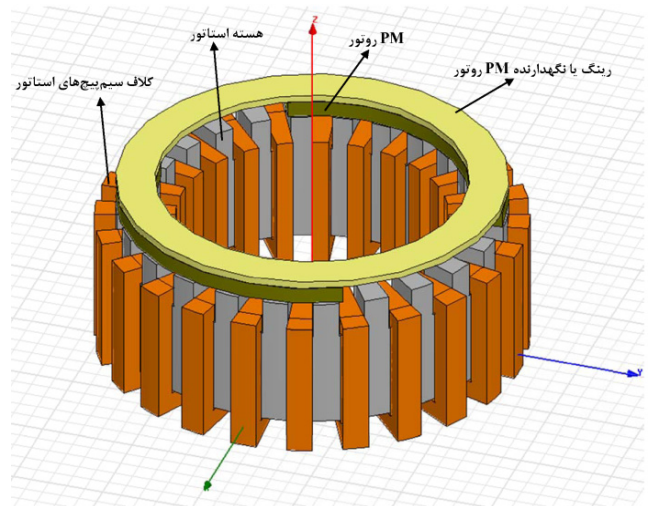
در نهایت ارتفاع کل موتور عبارت است از

$$h_{tot} = h_{ys} + h_s + g + h_{PM} + h_r \rightarrow h_{tot} = 23.235 \text{ mm} \quad (32)$$

## ۵- شبیه‌سازی موتور به روش اجزای محدود

جهت صحت‌گذاری نتایج طراحی تحلیلی به دست آمده در بخش‌های قبل، در این بخش موتور طراحی شده در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ماکسول مدل‌سازی شده و عملکرد موتور در دو حالت سکون و دوران با انجام تحلیل‌های مگنتوستاتیک<sup>۴</sup> و گذرا<sup>۵</sup> بررسی می‌شود. شکل ۲ شماتیک سه‌بعدی موتور شارمحرور ایجاد شده در نرم‌افزار ماکسول را نشان می‌دهد. جهت ایجاد این مدل از داده‌های اولیه و نتایج طراحی تحلیلی استفاده گردیده است.

جهت به دست آوردن پارامترهای برداری همچون شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی، ابتدا شبیه‌سازی در حالت مگنتوستاتیک اجرا شده که نتایج حاصل در شکل‌های ۳ تا ۶ آورده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، شدت میدان در دیسک روتور بسیار کم و میانگین آن در قسمت آهنربای دایم،  $4.6 \times 10^{-5}$  آمپر دور بر متر بوده و حداکثر به  $7.3 \times 10^{-5}$  آمپر دور بر متر می‌رسد. شدت میدان در یوغ استاتور نیز مشابه دیسک روتور و در دندان‌های زیر قطب، میانگین  $4.6 \times 10^{-5}$  آمپر دور بر متر را دارد. توزیع میدان، مطابق انتظار در راستای محور به یک قطب وارد و از قطب دیگر خارج و در رینگ روتور به دو قسمت تقسیم می‌شود. همچنین جهت میدان از دندان‌های زیر یک قطب (در راستای محور) خارج و به دندان‌های قطب دیگر وارد شده و مسیر آن در یوغ و از قطبی به قطب دیگر، به دو قسمت تقسیم می‌شود. در مورد چگالی شار، همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، این کمیت در رینگ روتور به صورت متوسط ۱/۵ تسلا و در کناره‌های قطب (با



شکل ۲: مدل سه‌بعدی موتور AFPM طراحی شده در محیط ماکسول.

$$\begin{aligned} Steel 1010: B_r &= 2.4 \text{ T}, H_c = 320 \text{ KA/m}, \\ \mu_r &= 1.01, \delta = 2 \times 10^{-2} \text{ s/m}, \rho = 7872 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned} \quad (20)$$

برای یافتن ارتفاع قطعات آهنربای دایم و طول فاصله هوایی معادل از روابط زیر استفاده می‌گردد

$$h_{PM} = \mu_r \frac{\delta_{vm} B_m}{B_r - \delta_{vm} B_m} g' \rightarrow h_{PM} = 2.235 \text{ mm} \quad (21)$$

$$g_{eq} = g + \frac{h_m}{\mu_r} \rightarrow g_{eq} = 2.235 \text{ mm} \quad (22)$$

## ۴- محاسبه تلفات و بهره موتور

تلفات موتور طراحی شده شامل ۵ بخش تلفات هسته استاتور، تلفات مسی استاتور، تلفات آهنربای دایم، تلفات دیسک روتور و تلفات چرخشی می‌باشد. ابتدا مقادیر تلفات هسته استاتور که شامل تلفات جریان گردابی<sup>۱</sup> و هیستریزیس<sup>۲</sup> است محاسبه می‌گردد. تلفات جریان گردابی هسته استاتور از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]

$$\Delta P_e = \frac{\pi^2}{6} \frac{\delta_s}{\rho_s} f^2 d^2 m_s B_s^2 \quad (23)$$

با توجه به ابعاد موتور،  $m_s = 74.47 \text{ g}$  و در نتیجه  $\Delta P_e = 594 \text{ mW}$  می‌باشد. تلفات هیستریزیس نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]

$$\Delta P_h = \varepsilon \frac{f}{100} m_s B_s^2 \quad (24)$$

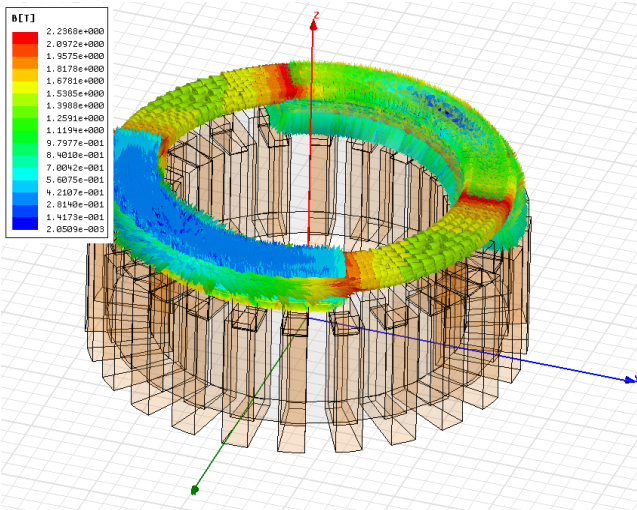
در این رابطه،  $\varepsilon$  ضریبی است که با توجه به جنس هسته برابر  $0.335$  می‌باشد و لذا

$$\Delta P_h = 562 \text{ mW} \rightarrow \Delta P_c = \Delta P_e + \Delta P_h \rightarrow \Delta P_c = 1.156 \text{ W} \quad (25)$$

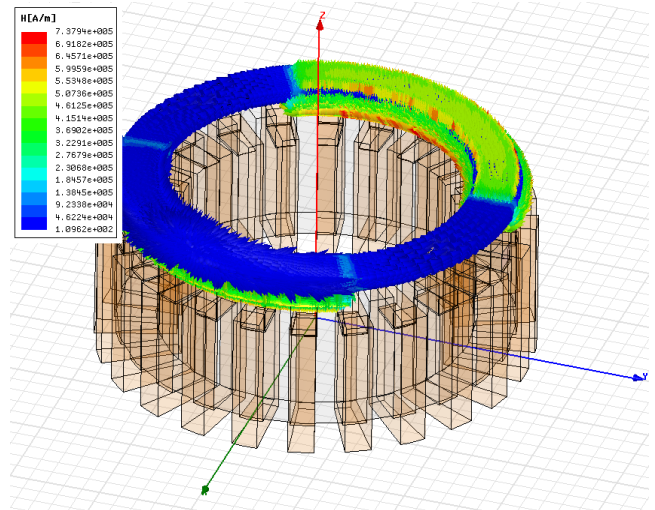
تلفات مسی ناشی از عبور جریان از هادی‌های استاتور با توجه به مقاومت هادی‌ها و ضریب اثر پوستی<sup>۳</sup> تعیین می‌گردد. مقاومت dc هر فاز استاتور برابر  $R_{dc} = 5.85 \Omega$  و ضریب پوستی بر اساس روابط [۴] برابر با  $k_R = 5.23$  بوده و لذا

4. Magnetostatic  
5. Transient

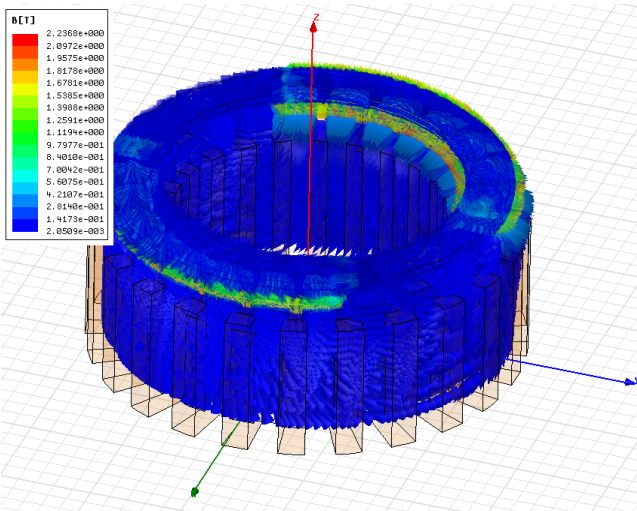
1. Eddy Current Losses  
2. Hysteresis Losses  
3. Skin Effect



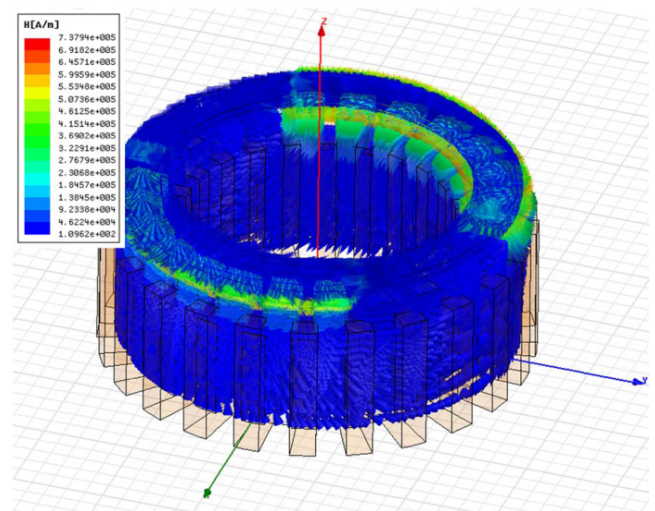
شکل ۵: چگالی شار مغناطیسی روتور در تحلیل مگنتوستاتیک.



شکل ۳: شدت میدان داخل روتور در تحلیل مگنتوستاتیک.



شکل ۶: چگالی شار مغناطیسی استاتور در تحلیل مگنتوستاتیک.



شکل ۴: شدت میدان داخل استاتور در تحلیل مگنتوستاتیک.

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات سرعت و موقعیت روتور را در مدت حرکت روتور به مدت ۱۰ میلی‌ثانیه نمایش می‌دهند. بازه تغییرات سرعت بسیار محدود و با دامنه ۲۰ rpm (۵۹۹۵۸ الی ۶۰۰۰۵ دور بر دقیقه) بوده و لذا تغییرات سرعت، ۰٫۳۳٪ سرعت نامی است که می‌توان آن را ثابت دانست. موقعیت روتور نیز در هر دور گردش (هر میلی‌ثانیه) از صفر تا ۳۶۰ درجه تغییر می‌کند. شکل ۹ تغییرات لحظه‌ای گشتاور مؤثر وارد بر دیسک که همان گشتاور خروجی می‌باشد را نشان می‌دهد. مقدار متوسط گشتاور به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود برابر با ۴۶٫۸ میلی‌نیوتن بر متر است. تغییرات گشتاور ناشی از عوامل مختلفی همچون اثر دندانه‌ها، هارمونیک‌های مکانی نیروی محرکه مغناطیسی استاتور است که قابل تحلیل هستند. شکل ۱۰ نیز تغییرات ولتاژ ضد‌محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور را نشان می‌دهد که به صورت کاملاً سینوسی هستند. مقدار این ولتاژ در شبیه‌سازی اجزای محدود برابر ۱۷۲٫۷ ولت بوده و لذا نسبت ولتاژ (E) برابر با ۰٫۸ خواهد بود. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات جریان‌های سه‌فاز و توان تلفاتی مسی استاتور را نشان می‌دهند. با مقدار جریان مؤثر ۰٫۷ آمپر در سیم‌پیچ‌ها در شکل ۱۱، مجموع تلفات مسی معادل ۲۳٫۶ وات در شکل ۱۲ بوده که منطبق با مقدار محاسبه‌شده ۲۳٫۱۳ وات با استفاده از روابط تحلیلی و نشان داده شده در (۲۶) است. شکل ۱۳ ولتاژ سه‌فاز اعمالی به استاتور را نمایش می‌دهد.

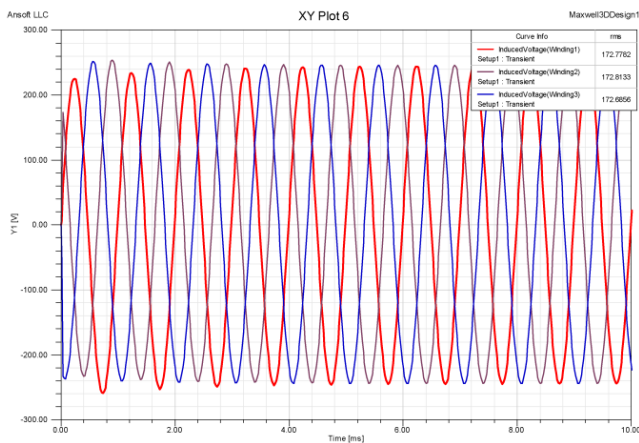
جدول ۳: پارامترهای تنظیم‌شده در شبیه‌سازی تحلیل TRANSIENT.

مقدار	کمیت
۶۰۰۰۰ rpm	سرعت اولیه
۱۰ <sup>-۳</sup>	ممان اینرسی
۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	ضریب دمپینگ
۰٫۴۵ N.m	گشتاور بار

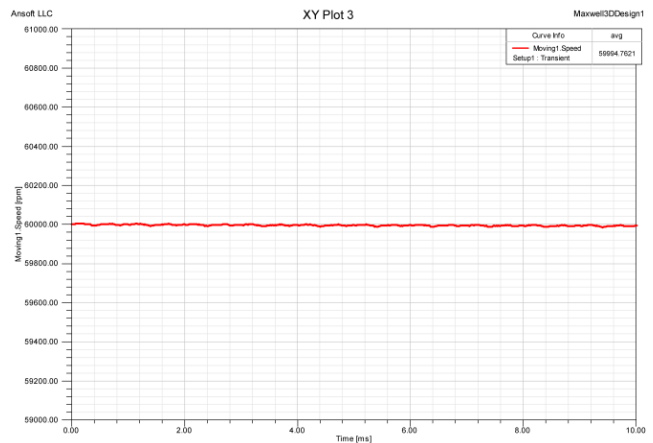
کاهش سطح مقطع) به حداکثر مقدار خود یعنی ۲ تسلا و در آهن‌ربای دایم، میانگین ۰٫۷ تسلا را دارد. چگالی شار در یوغ استاتور کمترین مقدار خود و در حدود ۰٫۱ تسلا و در دندانه‌های زیر قطب، ۰٫۶ تسلاست. توزیع آن مشابه شدت میدان بوده و از یک قطب وارد شده و در یوغ به دو قسمت تقسیم و از قطب دیگر خارج می‌شود.

پس از بررسی رفتار موتور در حالت سکون، عملکرد موتور در حرکت دورانی با انتخاب حالت تحلیل گذرا در نرم‌افزار ماکسول بررسی می‌شود. برای این منظور، تنظیم‌های باند<sup>۱</sup> و حرکت<sup>۲</sup> به مدل سه‌بعدی ایجادشده اضافه گردیده و پارامترهای مکانیکی مطابق با جدول ۳ مقداردهی شده و موتور با منبع ولتاژ سینوسی تحریک می‌گردد. نتایج اجرای برنامه شبیه‌سازی با تحلیل گذرا در نرم‌افزار ماکسول در ادامه آورده شده‌اند.

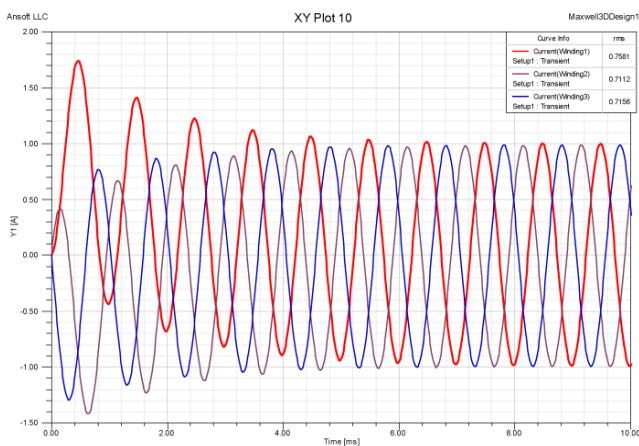
1. Band
2. Motion



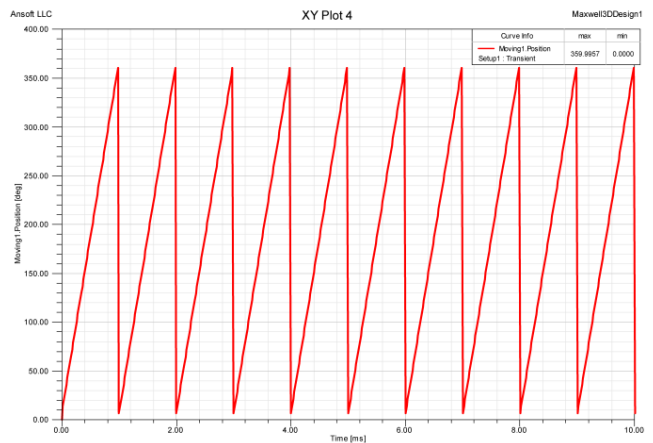
شکل ۱۰: تغییرات ولتاژهای ضدمحرکه فاز القاشده در سیم‌پیچ‌های استاتور در تحلیل Transient.



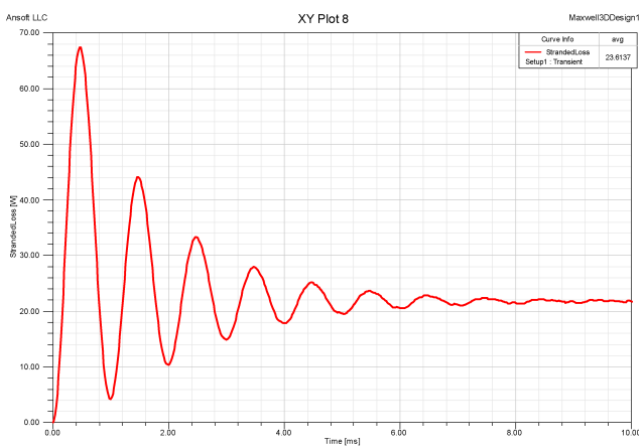
شکل ۷: تغییرات سرعت روتور در تحلیل Transient.



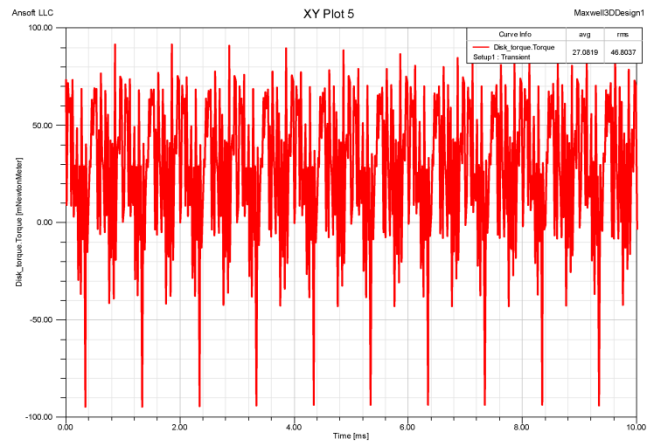
شکل ۱۱: تغییرات جریان‌های سیم‌پیچ‌های استاتور در تحلیل Transient.



شکل ۸: تغییرات موقعیت روتور در تحلیل Transient.



شکل ۱۲: تغییرات توان تلفات مسی استاتور در تحلیل Transient.



شکل ۹: تغییرات لحظه‌ای گشتاور وارد بر دیسک روتور در تحلیل Transient.

شده‌اند [۱۲] و [۱۵]. از این میان استفاده از الگوریتم ژنتیک به دلیل مزایای آن مورد توجه خاصی است که در این مقاله نیز از آن استفاده می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت جان‌دار است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها، آن را به عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی معرفی کرد. این الگوریتم، مبتنی بر تکرار بوده و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده که به طور مؤثری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند تا حل‌های جدید و بهبودیافته را ایجاد نماید. جهت رعایت اختصار مطلب از پرداختن به جزئیات الگوریتم ژنتیک صرف نظر شده و خواننده به منابع مربوط ارجاع

## ۶- طراحی بهینه موتور AFPM

طراحی یک موتور الکتریکی در واقع تعیین مقادیر تعداد زیادی از پارامترهای ابعادی و مشخصات مغناطیسی آنها می‌باشد. این پارامترها بسیار به یکدیگر وابسته بوده و تغییر هر یک بر مقادیر سایر پارامترها و مشخصه‌های موتور تأثیرگذار است. بنابراین به کارگیری الگوریتم‌های هوشمند بهترین راه حل جهت انتخاب بهینه پارامترهای طراحی موتور است. استفاده از روش‌های هوشمند در طراحی سیستم‌های پیچیده نظیر سیستم‌های الکتریکی و طراحی ماشین‌ها مقبولیت خاصی دارد و الگوریتم‌های متفاوتی نظیر ژنتیک، تکاملی، زنبور عسل و ... به کار گرفته

جدول ۴: مقادیر ثابت در محاسبه تابع هدف بهینه‌سازی.

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
۱٫۲	$\sigma_{im}$	۱٫۲	$K_c$
۰٫۸	$K_r$	۰٫۰۵	$T_{rms}$
۱	$P$	۰٫۰۵	$D_o$
۰٫۹۵	$\varepsilon$	۰٫۹۶	$K_w$

بهینه‌سازی فرض می‌شوند

$$N_1 = X_1, A_m = X_2, B_m = X_3, g = X_4 \quad (36)$$

لذا تابع هدف بهینه‌سازی پس از ساده‌سازی و بر حسب متغیرهای مسئله، به صورت زیر مطرح می‌شود

$$I = \frac{1.0912}{X_1 X_2} \quad (37)$$

$$I = \frac{1.6661 X_2}{1.00 X_1} \quad (38)$$

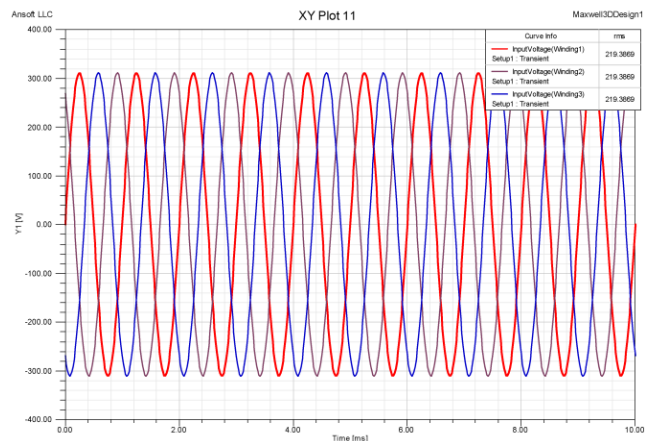
$$I = \frac{1.84 \times 10^{-6} X_2 X_3}{X_1} \quad (39)$$

همچنین با توجه به روابط فوق و مقادیر ثابت داده‌شده در جدول ۴، مقدار مؤثر ولتاژ ورودی را به صورت ذیل به عنوان یک تابع از متغیرهای مفروض لحاظ کرده که پس از بهینه‌سازی، تنظیم می‌شود

$$V_{rms} = X_1 X_2 \quad (40)$$

برای تعیین محدوده متغیرها، باید قیود طراحی و ساخت در نظر گرفته شوند و متغیرها در محدوده منطقی و قابل اجرا، تغییر داده شوند. بر این اساس، بازه تغییرات تعداد دور ( $N_1$ ) را بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور در نظر گرفته که در نتیجه در هر شیار، ۵۰ تا ۱۰۰ دور فرض می‌شود (در طراحی اولیه، تعداد دور سیم‌پیچی در هر شیار، ۸۳ دور به دست آمد). بازه تغییرات چگالی جریان خطی استاتور ( $A_m$ ) را بین ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ آمپر بر متر لحاظ کرده که در طراحی‌ها، محدوده‌ای منطقی و قابل پذیرش برای این پارامتر است. حداکثر چگالی شار فاصله هوایی ( $B_m$ )، با توجه به چگالی شار پسماند ماده آهن‌ربای دایم به کار رفته در موتور ( $B_r$ ) بین ۰٫۵ تا ۱ تسلا متغیر در نظر گرفته شده‌اند و همچنین بازه تغییرات فاصله هوایی ( $g$ ) با توجه به محدودیت‌های ساخت، بین ۰٫۴ تا ۲ میلی‌متر لحاظ می‌شود. بهینه‌سازی با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب انجام شده است. از آنجا که الگوریتم بر اساس مقادیر تصادفی در جمعیت اولیه عمل می‌کند لذا جهت اطمینان از نتایج حاصل و بدون تغییر در تنظیم‌های برنامه، اجرای آن را چندین مرتبه (۱۰ مرتبه) تکرار کرده و هر بار نتایج را ذخیره نموده و در پایان میانگین آنها محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده در هر تکرار در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی، قابل پیش‌بینی است زیرا با افزایش تعداد دور سیم‌پیچ‌ها ( $N_1$ )، گشتاور افزایش می‌یابد و از آنجا که در مفروضات مسئله، گشتاور، عدد ثابت لحاظ شده است لذا در این حالت، گشتاور با جریان کمتری حاصل می‌شود. بر اساس روابط ذکرشده و با توجه به رابطه چگالی شار فاصله هوایی ( $B_m$ ) با کاهش فاصله هوایی ( $g$ )، باید چگالی شار نیز افزایش یابد و در صورت کاهش هم‌زمان چگالی شار، پارامتر جریان ( $I_a$ ) به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته که این موضوع اصلی بهینه‌سازی، یعنی کمینه‌شدن تابع هدف که همان مقدار جریان است می‌باشد. همچنین با کاهش هم‌زمان  $g$  و  $B_m$ ، ارتفاع



شکل ۱۳: ولتاژ ورودی سه فاز اعمالی به استاتور در تحلیل Transient.

داده می‌شود [۱۶].

### ۶-۱ تعیین تابع هدف و بهینه‌سازی طراحی موتور

جهت بهینه‌سازی موتور طراحی‌شده به روش تحلیلی، ابتدا باید تابع هدف و سپس متغیرهای مسئله را که برگرفته از پارامترهای طراحی هستند، انتخاب نمود. در طراحی ماشین‌های الکتریکی، معمولاً حداکثر چگالی گشتاور و حداقل تلفات، مطلوب نظر طراحان است. با توجه به کاربرد خاص موتور مورد نظر این مقاله و این که بیشترین تلفات در طراحی موتور AFPM دور بالا، مربوط به تلفات مسی است لذا نسبت جریان به گشتاور ( $I/T$ ) به عنوان تابع هدف انتخاب می‌گردد. با کمینه‌نمودن این تابع، در حقیقت به ازای جریان کمتر، گشتاور بیشتر و یا همان گشتاور مورد نظر را استحصال نموده و علاوه بر آن با کاهش جریان، تلفات مسی نیز با نسبت توان دوم کاهش می‌یابد. در انتخاب متغیرها باید دقت شود تا پارامترهای مستقل در طراحی، اثرگذار بر تابع هدف و همچنین قابل تغییر را شناسایی و از انتخاب پارامترهایی که وابسته به سایر پارامترها بوده و یا عملاً تغییر در آنها ناممکن است، پرهیز شود [۸].

با توجه به این موضوع که گشتاور مطلوب در طراحی انجام‌شده، ثابت ( $0.105$  نیوتن‌متر) فرض شده است لذا در تابع هدف نیز می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت و تنها به کمینه‌کردن جریان بسنده نمود. از روابط طراحی، روابطی را که بیانگر پارامتر جریان هستند انتخاب نموده و عوامل مؤثر در آنها برای انتخاب متغیر، بررسی می‌شوند. با بازنگری روابط موجود، پارامترهای مستقل و مؤثر در مقدار جریان و همچنین روابط نشان‌دهنده جریان (تابع هدف) به صورت زیر مشخص می‌گردند

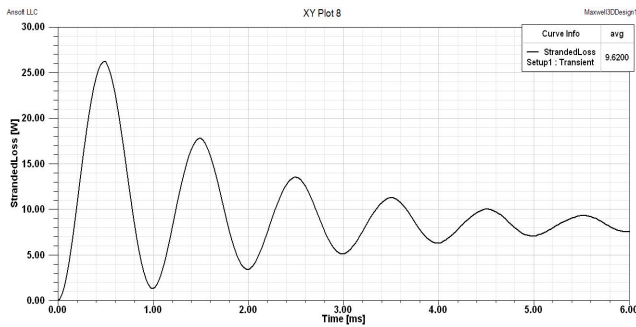
$$I = \frac{4\sqrt{2}T}{3N_1 k_w B_m D_o^2 (1 - k_r)} \quad (33)$$

$$I = \frac{\pi D_o (1 + k_r) A_m}{12\sqrt{2} N_1} \quad (34)$$

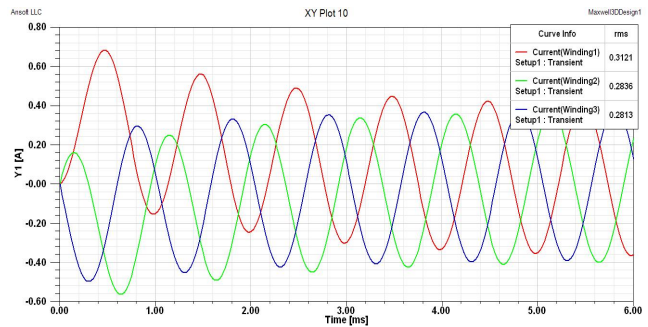
$$I = \frac{\sigma_m K_c B_m^2 g}{3\sqrt{2} N_1 \mu k_w} \quad (35)$$

بر اساس مقادیر محاسبه‌شده، برخی پارامترها نیز به عنوان عدد ثابت فرض شده‌اند که مقادیر آنها در جدول ۴ ذکر شده‌اند.

بنا به بررسی‌های انجام گرفته و با در نظر گرفتن (۳۳) تا (۳۵)، مطابق ذیل، پارامترهای تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز، چگالی جریان خطی، چگالی شار در فاصله هوایی و فاصله هوایی به عنوان متغیرهای مسئله



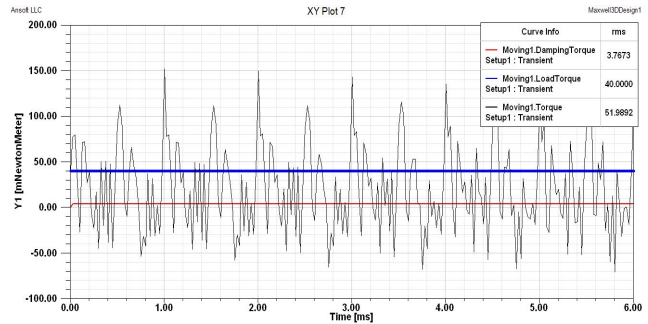
شکل ۱۶: تغییرات توان تلفات مسی استاتور برای موتور با طراحی بهینه.



شکل ۱۴: تغییرات جریان‌های سیم‌پیچ‌های استاتور برای موتور با طراحی بهینه.

جدول ۵: نتایج حاصل از ده مرتبه تکرار بهینه‌سازی.

تکرار	$X_1$ ( $N_1$ )	$X_2$ ( $A_m$ )	$X_3$ ( $B_m$ )	$X_4$ ( $g$ )	$F$ ( $I$ )
اول	۴۰۰	۱۲۷۰۳	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۲
دوم	۴۰۰	۱۰۱۴۷	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۲۳
سوم	۴۰۰	۱۳۳۰۸	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱
چهارم	۴۰۰	۱۱۰۶۸	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۱
پنجم	۴۰۰	۱۴۴۱۹	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۲
ششم	۴۰۰	۸۰۵۲	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۷
هفتم	۴۰۰	۱۰۱۵۳	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱
هشتم	۴۰۰	۱۰۶۸۱	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱
نهم	۴۰۰	۹۵۵۰	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۶
دهم	۴۰۰	۸۳۸۳	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۲۱۲



شکل ۱۵: تغییرات گشتاور دمپینگ، بار و چرخشی برای موتور با طراحی بهینه.

حرارت اضافی ایجاد شده توسط استاتور بر فرایند شیمیایی مرتبط با بار بسیار تأثیر سوء می‌گذارد و عملکرد یاتاقان را مختل می‌کند و لذا کاهش آن بسیار اساسی است. جهت اختصار از آوردن سایر نتایج شبیه‌سازی نظیر شکل موج ولتاژ ضدمحرکه، سرعت و شار صرف نظر می‌شود.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی یک موتور شارمحرور از نوع سنکرون آهن‌ربای دایم (AFPM) سرعت بالا با کاربری خاص صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی طراحی موتورهای AFPM، مقادیر پارامترها و اجزای موتور به دست آورده شد. نتایج طراحی نشان می‌دهد که تلفات مسی استاتور عمده‌ترین منبع ایجاد حرارت و افزایش دما در این موتور می‌باشد و با توجه به کاربری خاص این موتور، تلفات مسی باید کاهش یابد. برای این منظور و با حفظ قابلیت ایجاد گشتاور موتور در سرعت سنکرون، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی پارامترهای اصلی طراحی شامل تعداد دور استاتور، چگالی شار فاصله هوایی، چگالی جریان خطی و مقدار فاصله هوایی استفاده گردید و تابع هدف نیز نسبت جریان به گشتاور در نظر گرفته شد. پس از آن مدل بهینه‌شده به روش اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار ماکسول شبیه‌سازی گردید. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با کاهش ۱۰٪ ولتاژ ورودی و ثابت‌ماندن تقریبی گشتاور خروجی، جریان به مقدار ۱۳۰٪ و تلفات مسی ۱۴۵٪ کاهش یافته‌اند. در پایان مقادیر پارامترهای موتور در طراحی تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود اولیه با مقادیر متناظر آنها پس از انجام بهینه‌سازی در جدول ۶ مقایسه گردیده‌اند. علاوه بر بهبود نتایج حاصل از بهینه‌سازی، تطابق مطلوبی بین نتایج تحلیل اجزای محدود و نتایج حاصل از طراحی تحلیلی و بهینه‌سازی وجود دارد.

(ضخامت) ماده مغناطیس دایم ( $h_{PM}$ ) نیز باید کاهش یابد، لذا از حجم ماده آهن‌ربای دایم نیز کاسته شده که باعث صرفه‌جویی در مصرف مواد اولیه و در نتیجه کاهش قیمت تمام‌شده موتور می‌شود.

### ۶- شبیه‌سازی به روش اجزای محدود موتور بهینه‌شده

با استفاده از مقادیر به دست آمده از بهینه‌سازی، پارامترهای طراحی را در مدل سه‌بعدی تغییر داده و مجدداً موتور بهینه‌شده به روش اجزای محدود و در نرم‌افزار ماکسول شبیه‌سازی می‌شود. تغییرات اعمال شده از قرار زیر هستند

$$\begin{aligned}
 g &= 0.5 \text{ mm} \rightarrow g = 0.4 \text{ mm} \\
 B_m &= 0.65 \text{ T} \rightarrow B_m = 0.5 \text{ T} \\
 N_1 &= 332 \rightarrow N_1 = 400 \\
 h_{PM} &= 2.235 \text{ mm} \rightarrow h_{PM} = 0.98 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{۴۱}$$

همچنین طبق (۴۰)، ولتاژ ورودی برابر است با

$$V_{rms} = X_1 X_2 = 400 \times 0.5 = 200 \text{ V}
 \tag{۴۲}$$

بر این اساس، دامنه ولتاژ ورودی برای سیم‌پیچ‌ها برابر ۲۸۲٫۸۴ ولت تنظیم می‌شود. پس از انجام تغییرات فوق، نرم‌افزار با همان تنظیم‌های قبلی (حالت قبل از بهینه‌سازی) مجدداً اجرا می‌گردد که نتایج در ادامه آورده شده‌اند. شکل ۱۴ تغییرات جریان استاتور را نشان می‌دهد. جریان استاتور از مقدار ۰٫۷ آمپر به ۰٫۳ آمپر تقلیل یافته است و به تبع آن، مقدار تلفات مسی استاتور نیز کاهش چشم‌گیری پیدا کرده و از ۲۳٫۶ وات به ۹٫۶ وات (۱۴۵٪ کاهش) رسیده است و تلفات کل نیز ۳۳٪ کاهش داشته است. شکل ۱۵ نیز تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی موتور را برای موتور بهینه‌شده نمایش می‌دهد. شکل ۱۶ تغییرات تلفات مسی استاتور را نشان می‌دهد. با توجه به کاهش تلفات، بهره موتور ۳٫۶٪ افزایش یافته و به ۹۱٫۶٪ رسیده است. شاید افزایش اندک بهره به دست آمده قابل توجه به نظر نرسد اما نکته مهم کاهش چشم‌گیر تلفات مسی استاتور است. ذکر این نکته لازم است که موتور طراحی شده در کاربردی استفاده می‌شود که



- [9] S. M. Hosseini, M. A. Mirsalim, and M. Mirzaei, "Design, prototyping and analysis of a low cost axial-flux coreless permanent-magnet generator," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 44, no. 1, pp. 75-80, Jan. 2008.
- [10] F. Sahin, A. M. Tuckey, and A. J. A. Vandenput, "Design, development and testing of a high-speed axial-flux permanent-magnet machine," in *Proc. IEEE Industry Applications Conf.*, vol. 3, pp. 1640-1647, 30 Sept.-4 Oct. 2001.
- [11] S. Lin, T. X. Wu, L. Zhou, F. Moslehy, J. Kapat, and L. Chow, "Modeling and design of super high speed permanent magnet synchronous motor (PMSM)," in *Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf.*, vol. 3, pp. 41-44, 16-18 July 2008.
- [12] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, and W. P. Hew, "Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 4, pp. 1479-1492, Apr. 2013.
- [13] W. Z. Fei and P. C. K. Luk, "Design of a 1 kW high speed axial flux permanent-magnet machine," in *Proc. IET Conf. on Power Electronics, Machines, and Drives*, pp. 230-234, 2-4 Apr. 2008.
- [14] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 2nd Ed., Magna Physics Publishing, 2006.
- [15] N. Bianchi and S. Bolognani, "Design optimization of electric motors by genetic algorithms," in *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol. 145, no. 5, pp. 475-483, Sept. 1998.
- [16] R. Perryman, G. Sooriyakumar, and S. J. Dodds, "Design optimisation for permanent magnet synchronous motors using genetic algorithm," in *Proc. 45th Int. Universities Power Engineering Conf., UPEC'11*, 6 pp. 1-6, 31 Aug.-3 Sept. 2010. 2010.

**سیدعلی سیدی سعادتی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت بترتیب در سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۹۲ از دانشگاه‌های علم و صنعت ایران و کاشان به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و تحلیل موتورهای الکتریکی دور بالا و موتورهای پسماندی.

**ابوالفضل حلوائی نیاسر** در سال ۱۳۷۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشکده فنی دانشگاه تهران دریافت نمود. پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۷ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق - قدرت از دانشگاه مذکور گردید. دکتر حلوائی از سال ۱۳۸۷ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان در کاشان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده عبارتند از: درایوهای الکتریکی، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت و خودروهای برقی و هیبرید برقی.

جدول ۶: مقایسه نتایج طراحی تحلیلی و بهینه‌سازی موتور AFPM سرعت بالا.

حالت	طراحی تحلیلی		طراحی بهینه	
	تحلیل	شبیه‌سازی	تحلیل	شبیه‌سازی
قطر خارجی (mm)	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
فاصله هوایی (mm)	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۴
دور سیم در هر شیار	۸۳	۸۳	۱۰۰	۱۰۰
ضخامت آهن‌ربای دایم (mm)	۲٫۲۳۵	۲٫۲۳۵	۰٫۹۸	۰٫۹۸
چگالی شار (T)	۰٫۶۵	۰٫۷	۰٫۵	۰٫۶
جریان آرمیچر (A)	۰٫۵	۰٫۷	۰٫۲۲۱	۰٫۳
ولتاژ فاز ورودی (V)	۲۱۹٫۴	۲۱۹٫۴	۲۰۰	۲۰۰
ولتاژ القایی فاز (V)	۲۰٫۸۴	۱۷۲٫۸	-	۱۷۱٫۵
گشتاور (N.m)	۵۰	۴۶٫۸	۵۰	۵۲
تلفات مسی (W)	۲۳٫۱۳	۲۳٫۶	-	۹٫۶
بهره (%)	۸۸	-	۹۱٫۶	-

## مراجع

- [1] M. A. Rahman, A. Chiba, and T. Fukao, "Super high speed electrical machines-summary," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1272-1275, 6-10 Jun. 2004.
- [2] N. Bianchi, S. Bolognani, and F. Luise, "Potentials and limits of high-speed PM motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 1570-1578, Nov./Dec. 2004.
- [3] P. D. Pfister and Y. Perriard, "Very-high-speed slotless permanent-magnet motors: analytical modeling, optimization, design, and torque measurement methods," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 296-303, Jan. 2010.
- [4] J. F. Gieras and M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications*, 2nd Ed., Marcel Dekker, New York, 2002.
- [5] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi, "A comparison between the axial-flux and the radial flux structures for PM synchronous motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1517-1524, Nov./Dec. 2002.
- [6] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial-Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer, 2008.
- [7] F. Marignetti, V. Delli Colli, and Y. Coia, "Design of AFSPMM through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 55, no. 10, pp. 3591-3601, Sept. 2008.
- [8] Y. P. Yang and D. S. Chuang, "Optimal design and control of a wheel motor for electric passenger cars," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 43, no. 1, pp. 51-61, Jan. 2007.