مجله تحقیق در عملیات و کاربردهای آن، سال نهم، شماره سوم (پیاپی ۳٤)، پاییز ۹۱، ص ص ٦۲-٤۹
شاپا ۷۲۸٦-۲۲۵۱

ارایه روشی موثر برای طراحی بهینه موتورDC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزاء محدود

محمد جواد سلیمانی کشایه*[۱]، سید اصغر غلامیان[۲]، پریسا معصومی [۳]، رضا ایلکا[٤]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲ - استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

رسید مقاله: ۲۹ فروردین ۱۳۹۱

پذیرش مقاله: ۶ شهریور ۱۳۹۱

چکیده

در این مقاله، طراحی بهینه یک موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزای محدود ارایه می‌گردد. معادلات مربوط به طراحی و ابعاد موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس طراحی بهینه بر اساس الگوریتم ژنتیک با هدف افزایش چگالی توان و بازده ارایه می‌شود. در نهایت نتایج به دست آمده از بهینه سازی با استفاده از تحلیل اجزای محدود (FEA) ارزیابی می‌شودکه نتایج حاصل نشان دهنده دقت و کارایی قابل ملاحظه فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد.

کلمات کلیدی: چگالی توان، بازده، موتور PM بدون جاروبک، الگوریتم ژنتیک (GA) و تحلیل اجزای محدود (FEA).

۱ مقدمه

موتور DC بدون جاروبک (BLDC) موتوری است که رابطه‌ای خطی بین جریان و گشتاور و همچنین ولتاژ و سرعت آن وجود دارد. موتورهای DC بدون جاروبک شبیه به موتورهای سنکرون AC می‌باشند، با این تفاوت که موتورهای سنکرون نیروی ضد محرکه الکتریکی سینوسی و موتورهای DC بدون جاروبک نیروی ضد محرکه الکتریکی مستطیلی یا ذوزنقه‌ای تولید می‌کنند. هر دو نوع این موتورها دارای میدان‌های مغناطیسی گردان استاتور بوده که باعث تولید گشتاور در رتور می‌گردد [۵-۱]. موتورهای DC مغناطیس دایم بدون جاروبک به طورگسترده‌ای به عنوان درایو دمنده‌ها و فن‌ها به کار می‌رود که دارای کاربردهایی در تجهیزات مخابراتی،

* عهده دار مکاتبات

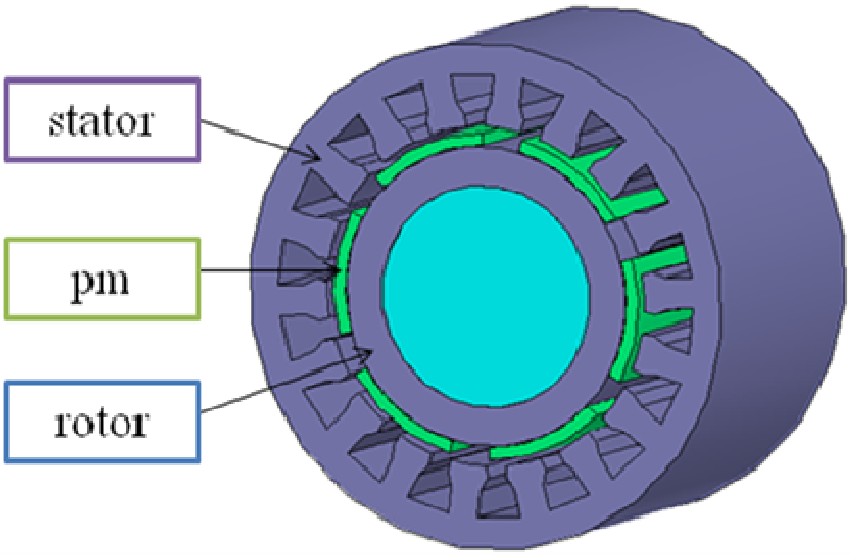
آدرس الکترونیکی: soleimani@stu.nit.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

الکترونیکی و صنعتی می‌باشند [۳]. شکل ۱ ساختار موتور DC بدون جاروبک سه فاز را نشان می‌دهد، سیم پیچی‌های استاتور شبیه به موتور AC چند فاز بوده و آهنرباها بر روی رتور قرار می‌گیرند [۳]. طراحی موتورهای DC مغناطیس دایم بدون جاروبک با چگالی توان بالا موضوع مهمی است که توجه محققان را به سمت خود جلب کرده است [۳-۷].

در این مقاله روشی جدید برای طراحی موتور مغناطیس دایم بدون جاروبک ارایه می‌شود. در این روش چگالی توان و بازده به صورت ترکیبی بهینه می‌گردد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک که روش بهینه‌سازی موثری است استفاده می‌نماییم. در ضمن به منظور تأیید ابعاد بهینه شده موتور، از تحلیل اجزای محدود استفاده می‌شود که به کارگیری آن، کارایی روش بهینه‌سازی را مشخص می‌کند. بخش‌های دیگر این مقاله به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

بخش ۲ معادلات طراحی را توضیح می‌دهد. در بخش ۳ به ارایه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک پرداخته می‌شود و بخش ۴ نتایج بهینه‌سازی را ارایه می‌کند. تحلیل اجزای محدود در بخش ۵ ارایه شده و در بخش ۶ مقاله نهایتاً با نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.



شکل ۱. ساختار موتور DC بدون جاروبک سه فاز

۲ معادلات طراحی

۲-۱ توصیف پارامترها

پارامترهای اصلی موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. گام مهم در طراحی، محدودیت‌های هندسی موتور و مدل مغناطیسی توصیف کننده شار مغناطیسی می‌باشد. شکل ۲ ساختار دندانه و شیار این نوع توپولوژی موتور را نشان می‌دهد.

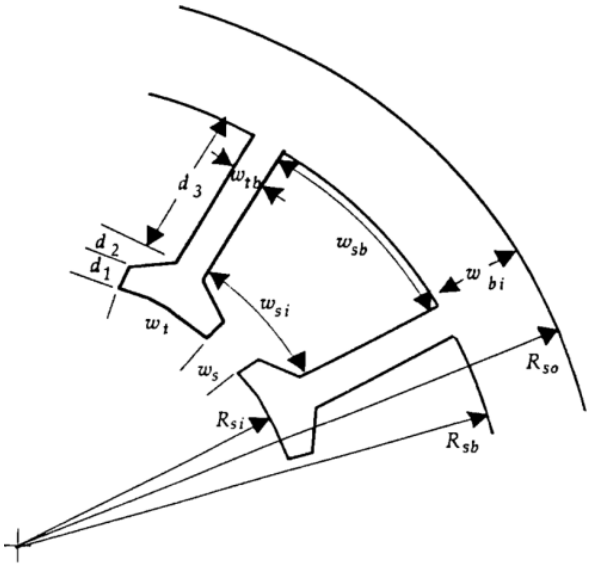
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

جدول ۱. توصیف پارامترها

پارامتر	سمبل	واحد
توان	P	Hp
گشتاور نامی	T	N.m
سرعت نامی	Sr	rpm
ماکزیمم نیرو محرکه القایی اندازه گیری شده	Emax	V
ماکزیمم چگالی جریان شیار	Jmax	A/m2
تعداد فاز ها	Nph	
تعداد قطب های آهنربا	Nm	
طول شکاف هوایی	g	m
طول آهنربا	Lpm	m
حداکثر شعاع استاتور	Rso	m
حداکثر شعاع روتور	Rro	m
طول محوری موتور	L	
ضریب تورق پشته	Kst	
ضریب انباشتگی هادی	Kcp	
پسماند مغناطیسی	Br	T
نفوذپذیری نسبی آهنربا	µr	
ماکزیمم چگالی شار الکتریکی فولاد	Bmax	T

۲-۲ پارامترهای هندسی

با متغیرهای نشان داده شده در شکل ۲ می‌توان پارامترهای هندسی مهم را تعیین نمود.



شکل ۲. هندسه شیار برای توپولوژی موتور [۲]

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

شعاع موتور در بخش‌های مختلف به صورت زیر به دست می‌آیند [۲]:

$$\begin{aligned} R_{sb} &= R_{so} - w_{sy} \\ R_{si} &= R_{sb} - d_s = R_{ro} + g \\ R_{ri} &= R_{ro} - L_{pm} - w_{ry} \end{aligned} \qquad (۱)$$

گام قطب در سطح داخلی استاتور مربوط به گام قطب زاویه‌ای می‌باشد.

$$\tau_p = R_{si}\,\theta_p \qquad (۲)$$

که در آن $\theta p=2\pi/Nm$ گام قطب زاویه‌ای به رادیان مکانیکی می‌باشد و گام پیچک در شعاع داخلی رتور برابر است با:

$$\tau_c = \alpha_{cp}\,\tau_p \qquad (۳)$$

که در آن αcp به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha_{cp} = \frac{\mathrm{int}(N_{spp})}{N_{spp}} \qquad (۴)$$

Nspp تعداد شیار بر قطب بر فاز می‌باشد. گام شیار در شعاع داخلی رتور برابر است با:

$$\tau_s = R_{si}\,\theta_s \qquad (۵)$$

که $\theta s=2\pi/Ns$ می‌باشد. θs گام شیار زاویه‌ای به درجه مکانیکی است. با دانستن مقدار دهانه شیار، عرض دندانه در سطح استاتور به دست می‌آید.

$$w_t = \tau_S - w_S \qquad (۶)$$

پهنای ته شیار به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$wsb = Rsb\,\theta s - wtb \qquad (۷)$$

با داشتن $d_s = d_1 + d_2 + d_3$ و

$$d_۱ + d_۲ = w_{tb} \;.\; \alpha_{sd} \qquad (۸)$$

عمق شیار هادی برابر است با $d_3=ds-\alpha sdwtb$ و عرض شیار در بالای کفشک‌ها از معادله زیر به دست می‌آید:

$$w_{si} = (R_{si} + \alpha_{sd}\,w_{tb})\,\theta_s - w_{tb} \qquad (۹)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

مطابق شکل ۱ دندانه استاتور به صورت موازی می‌باشد در حالی که شیارها این طور نیستند (البته وضعیتی که شیارها موازی و دندانه‌ها غیر موازی‌اند هم معتبر می‌باشد). ناحیه شیار با شکل ذوزنقه‌ای باعث حداکثر شدن فضای در دسترس سیم‌پیچی می‌شود [۲]. از طرف دیگر شیار موازی بدون کفشک‌ها برای حالتی که سیم‌پیچی کاملاً قبل از قرارگیری در شیار شکل گرفته باشد به کار می‌رود. در معادلات زیر، عرض یوغ رتور و استاتور Wbi نامشخص می‌باشد، با داشتن این دو بعد دیگر تمام ابعاد ماشین قابل محاسبه است. در حالت خاص عمق کامل شیار از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$d_s = R_{sb} - R_{ro} - g \qquad (۱۰)$$

۳-۲ پارامترهای مغناطیسی

شار هر مغناطیس دایم به طور مساوی در یوغ رتور و استاتور پخش شده و با مغناطیس‌های دایم مجاور کوپل می‌گردد، بنابراین یوغ باید نصف شار فاصله هوایی را تأمین کند، یعنی شار یوغ برابر است با:

$$\phi_{bi} = \frac{\phi_g}{۲} \qquad (۱۱)$$

اگر چگالی شار مجاز در یوغ از جدول مقادیر ثابت برابر Bmax باشد آن گاه معادله زیر بیانگر عرض یوغ می‌باشد

$$w_{bi} = \varphi_g / ۲ B_{\max} K_{st} L \qquad (۱۲)$$

که در آن Kst ضریب تورق می‌باشد، از آن جایی که در هر گام مغناطیس دایم تعداد Nsm =Nspp /Nph شیار و دندانه داریم، شار فاصله هوایی هر مغناطیس دایم از Nsm دندانه عبور می‌کند، بنابر این هر دندانه باید حاوی ۱/Nsm شار فاصله هوایی باشد. اگر چگالی شار مجاز در دندانه هم Bmax باشد، عرض دندانه مورد نیاز برابر است با:

$$w_{tb} = (۲/N_{sm})\ w_{bi} \qquad (۱۳)$$

با استفاده از معادلات ۱۲ و ۱۳ تمام پارامترهای هندسی تعیین می‌گردد.

طول PM ، Lpm به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$L_{PM} = (\mu_r B_g / (B_r - ((K_f / K_d) B_g)))K_c g \qquad (۱۴)$$

که در آن μr نفوذپذیری نسبی، Br چگالی شار باقیمانده ماده PM ، kd ضریب نشتی شار، Kc ضریب کارتر، Kf=Bgpk/Bg مقدار ماکزیمم ضریب تصحیح شده چگالی شار فاصله هوایی در موتور می‌باشد که این ضرایب با استفاده از تحلیل FEM به دست می‌آیند. این ضرایب (Kf، Kd و Kc) ابتدا مقادیر ثابتی فرض شده و در روند طراحی محاسبه و با مقدار اولیه مقایسه می‌گردند [۸-۶].

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

۲-٤ پارامترهای الکتریکی

برای یافتن پارامترهای الکتریکی باید ارتباط بین گشتاور و دیگر پارامترهای موتور مشخص شود، در حالتی که Nspp=1 است گشتاور یک فاز برابر است با:

$$T = ۲N_{ph} B_g L I R_{ro} \quad (۱۵)$$

که حاصل‌ضرب نیروی ناشی از تقابل Nm قطب‌های مغناطیسی تأمین کننده چگالی شار فاصله هوایی Bg می‌باشد و هر قطب که ns هادی دارد، شامل جریان Bg در طول L می‌باشد. در این وضعیت که ممکن است بیش از یک شیار در قطب و فاز وجود داشته باشد ns باید با تعداد دور بر قطب و فاز Ntpp= Nspp ns جایگزین گردد که به رابطه زیر برای گشتاور منتهی می‌شود:

$$T = N_m B_g L I R_{ro} N_{spp} n_s \quad (۱۶)$$

اگر Nspp >1 باشد چگالی شار فاصله هوایی باید با ضریب توزیع و ضریب گام اصلاح گردد، علاوه بر این اگر مغناطیس‌های دایم به صورت مورب باشند ضریب انحراف داده شده در معادله ۱۷ هم باید لحاظ گردد.

$$K_s = ۱ - \frac{\theta_{se}}{۲\pi} \quad (۱۷)$$

در نظر گرفتن این سه عبارت، به معادله نهایی گشتاور به صورت زیر می‌رسیم:

$$T = N_m K_w K_s B_g L I R_{ro} N_{spp} n_s \quad (۱۸)$$

حال با استفاده از معادله ۱۸ و ارتباط توان ورودی و خروجی T.ω = eb .i نیروی ضد محرکه الکتریکی در سرعت نامی ωm برابر رابطه زیر به دست می‌آید

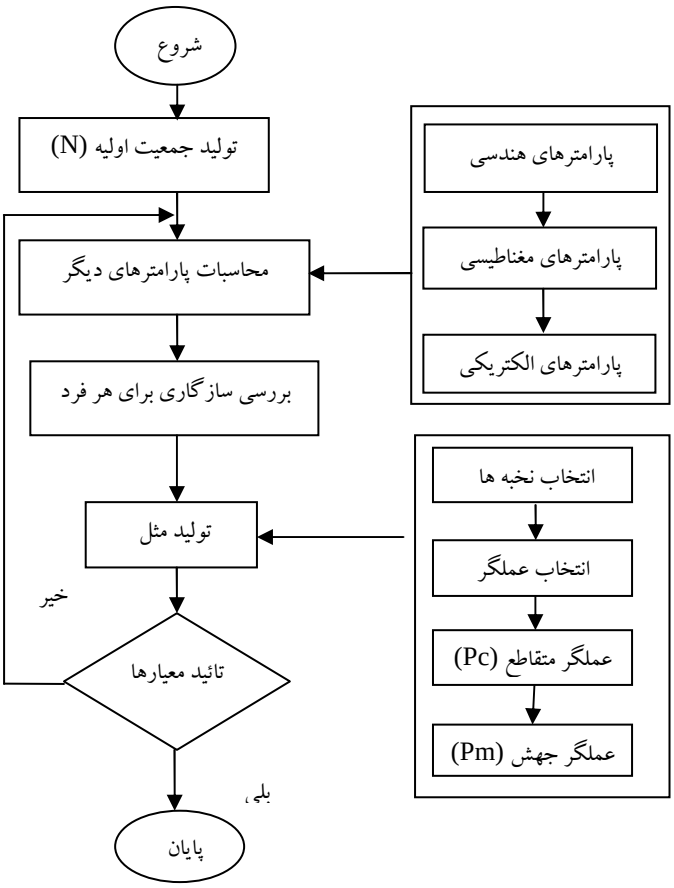
$$e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = T_e w_m \quad (۱۹)$$

۳ الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم‌های تکاملی، بر اساس تکامل طبیعت توسعه یافته است، که برتری آن‌ها نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک در حل مسایل بهینه‌سازی به خوبی نشان داده شده است. الگوریتم ژنتیک (GA)، توسط جان هالند در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد شده است [۹]. الگوریتم ژنتیک قادر به پید ا کردن راه حل‌های بهینه برای توابع هدف مختلط چند منظوره می‌باشد. الگوریتم ژنتیک در این مقاله به منظور بهینه‌سازی چگالی توان موتور مغناطیس دایم بدون جاروبک که یک تابع چند متغیره است، اعمال می‌شود. در این الگوریتم ابتدا ورودی‌ها و محدوده تغییرات آن‌ها مشخص می‌شوند که هر کدام از آن‌ها به عنوان یک ژن برای الگوریتم ژنتیک عمل خواهد کرد. این ژن‌ها در کنار هم تشکیل یک کروموزوم را داده و چندین کروموزوم در کنار هم تشکیل جمعیت را می‌دهند [۸]. هدف از اجرای الگوریتم ژنتیک در مسایل بهینه‌سازی، یافتن نقطه بهینه آن مساله با توجه به تابع هدف مربوطه می‌باشد

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

که مقدار این تابع برای هر کروموزوم با توجه به مقادیر اختصاص یافته به ژن‌های آن کروموزوم قابل محاسبه است. برای راه اندازی یک الگوریتم ژنتیک، در ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد شده و به الگوریتم داده می‌شود و در ادامه کار، جمعیت هر نسل جدید با توجه به نسل قبل تولید می‌شود. این کار با انجام عملیات باز تولید (Reproduction)، تزویج (Cross Over) و جهش (Mutation) بر روی کروموزوم‌های نسل قبل صورت می‌گیرد. روند حرکت در این الگوریتم به نحوی است که جمعیت جدید را با هدف تولید نسل بهتر (تابع هدف بزرگ‌تر) و حذف کروموزوم‌های ضعیف تر تولید نماید [۱۰]. فلوچارت روش ارایه شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده

٤ نتایج بهینه‌سازی

در این بخش، نتایج بهینه‌سازی موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم GA ارایه شده است. پارامترهای نامی طراحی موتور و محدودیت‌های مربوطه در جدول ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

جدول ۲. پارامترهای نامی طراحی موتور

پارامترهای طراحی	مقادیر
ولتاژ	۲۲۰V
توان خروجی	۱ KW
تعداد قطب ها	۶
تعداد فازها	۳
تعداد شیار ها	۱۸
ضریب انباشتگی شیار	۰/۷
چگالی شار استاتور	۱/۵ T
چگالی شار روتور	۱/۵ T
چگالی شار پسماند مغناطیس دائم	۱/۱ T
چگالی شار پسماند مغناطیس دائم	۱/۱ T

بنابراین، الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی سه تابع هدف اعمال می‌شود: چگالی توان یعنی توان خروجی بر واحد حجم (F۱)، راندمان، که از تقسیم توان خروجی به توان ورودی حساب می‌شود (F۲) و همچنین (F۳) که مجموع نرمال F۱ و F۲ می‌باشد. حداکثر F۱ و F۲ به عنوان مقدار نرمال استفاده شده است. مقدار بهینه برای هر تابع هدف، پس از تنظیم پارامترهای GA ارایه شده است. در این کار، هر کروموزم شامل چهار ژن می‌باشد. هر ژن نشان دهنده یکی از متغیرهای چگالی شار فاصله هوایی (Bg)، طول فاصله هوایی (g)، طول محوری موتور (L) و شعاع داخلی رتور (Rri) می باشد. در این الگوریتم، جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود. اندازه جمعیت اولیه با N نشان داده می‌شود و احتمال جهش (Pm) متغیرمی‌باشد، در حالی که احتمال متقاطع (Pc) ثابت فرض شده است. همچنین، روش چرخ رولت برای انتخاب کروموزوم تصادفی در این الگوریتم استفاده می‌شود. مجموعه تکرارها ۱۰۰و تغییر SN و PM به مقدار بهینه می‌رسد. پس از تکرارهای متوالی، مشاهده می‌گردد که بهینه‌ترین مقادیر پارامترها از نظر مقادیر بهینه توابع هدف، همگرایی فرآیند بهینه سازی و هموار نمودار خروجی مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. پارامترهای کنترل الگوریتم GA

پارامترهای GA	مقدار
SN	81
PM	۰/۱۵
تکرار	100

اندازه جمعیت باید برای اطمینان از همگرایی و هموار بودن طرح خروجی به اندازه کافی بزرگ باشد در حالی که اندازه بیش از حد آن نامطلوب می‌باشد. تعداد تکرار (ITERATION) باید به اندازه کافی جهت اطمینان از

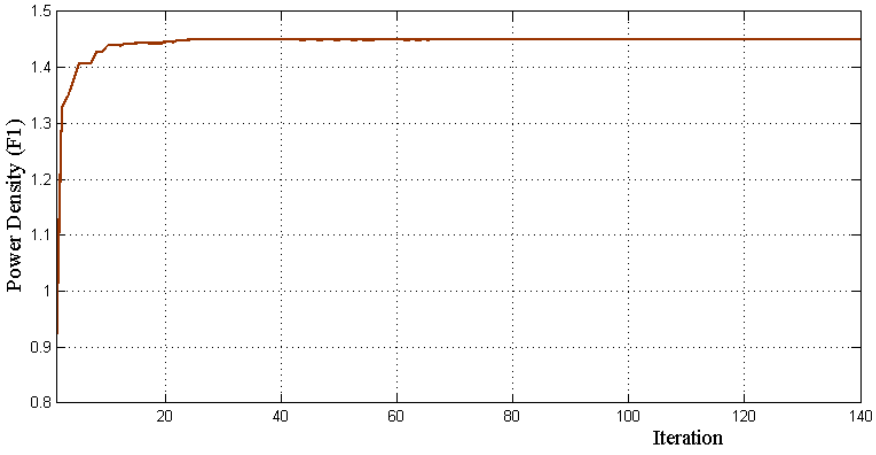
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

همگرایی بزرگ باشد در حالی که اندازه بزرگ آن مناسب نمی‌باشد. مقدار بهینه چگالی توان، بازده و پارامترهای موتور در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ٤. ابعاد، بازده و چگالی توان بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک

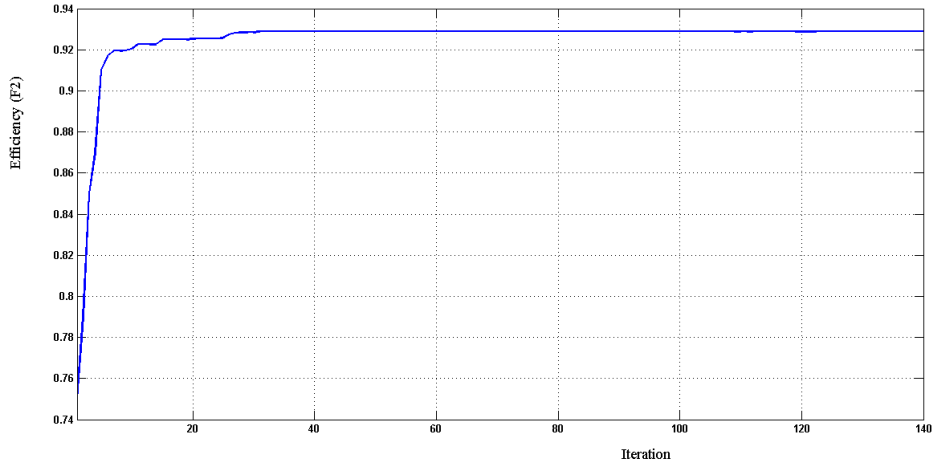
پارامترهای طراحی	مقدار
Bg	۰/۷۷۱
Rri	۲۷/۳ mm
g	۲/۲ mm
L	۱۵۵/۸ mm
LPM	۲/۷ mm
Rro	۴۲/۸ mm
Nph	۲۱۰
Wry	۱۲/۸ mm
Rso	۶۶ mm
ds	۸/۲ mm
Ws	۵/۳ mm
Rsi	۴۵ mm
Rsb	۵۳/۲ mm
Wtb	۷/۱ mm
چگالی توان	۰/۵۸ W/cm3
بازده	۹۲ ٪

شکل ۴ چگالی توان (F۱) در برابر تکرار را نشان می‌دهد. مقدار بهینه چگالی توان ۰/۵۸ (W/cm3) می‌باشد. شکل ۵ راندمان (F۲) در برابر تکرار را نشان داده که مقدار بهینه راندمان ۹۲ درصد است. همچنین، شکل ۶ نشان دهنده ترکیبی از بازده و چگالی توان (F) در برابر تکرار می‌باشد.

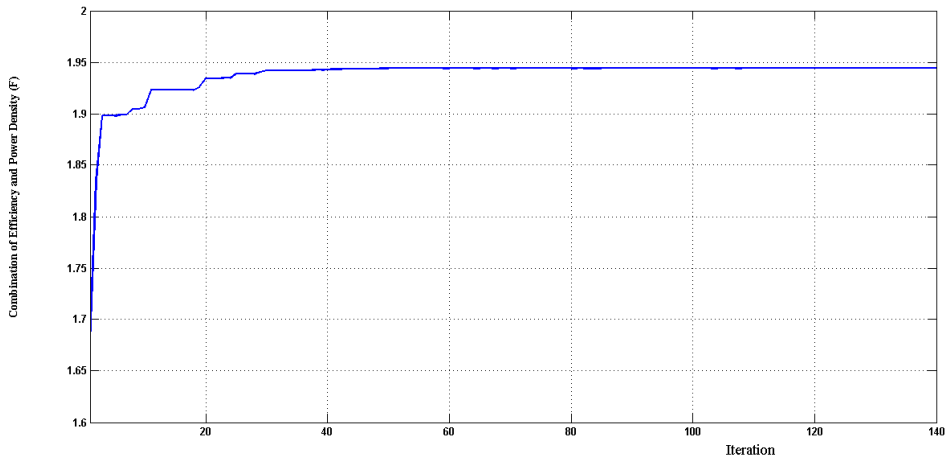


شکل ٤. نمودار چگالی توان (F۱) در برابر تکرار

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]



شکل ۵. نمودار راندمان (F۲) در برابر تکرار

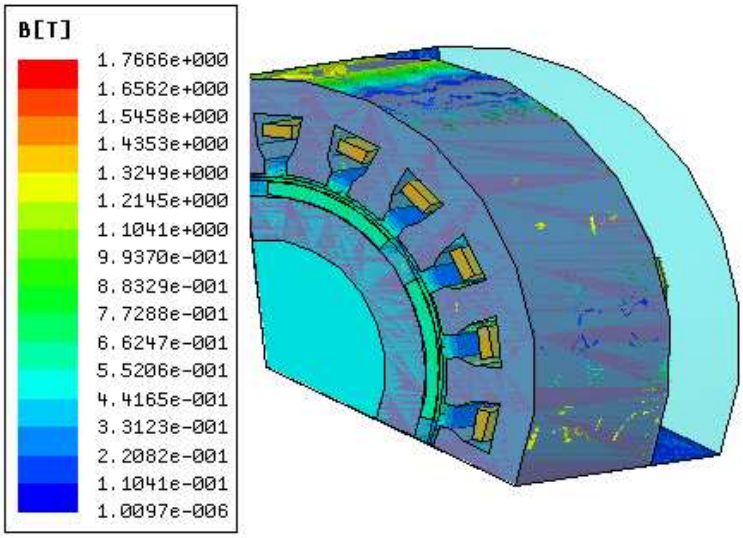


شکل ٦. ترکیبی از بازده و چگالی توان (F)

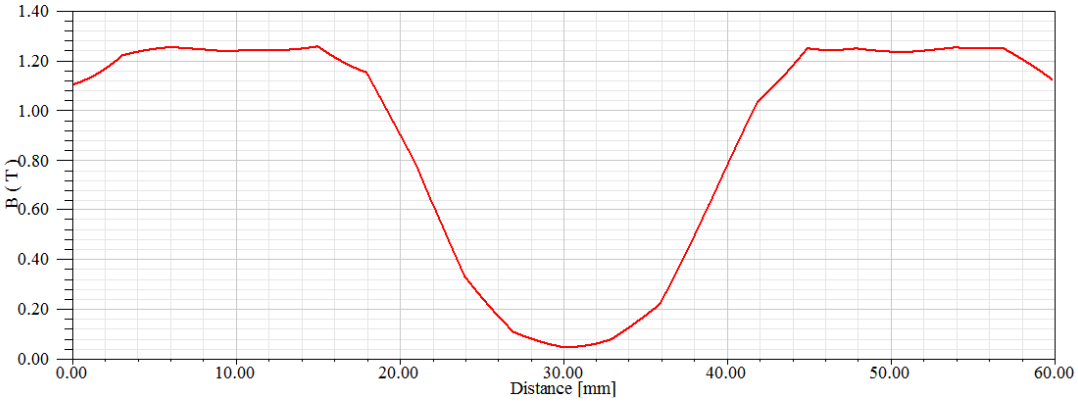
۵ تحلیل اجزای محدود

در این مقاله، به منظور آنالیز الکترومغناطیسی طراحی بهینه حاصل شده از نرم افزار Maxwell3D استفاده شده که عملکرد آن بر اساس تحلیل اجزای محدود است. برای استاتور و رتور این موتورجنس Steel 1008 به کار رفته است. مغناطیس های دائم از جنس NdFe35 با چگالی شار پسماند ۱/۱ تسلا می‌باشند. در شکل ۷ توزیع چگالی شار موتور طراحی شده، نشان داده شده است. تحلیل مغناطیسی به دست آمده توسط Maxwell3D نشان می‌دهد که چگالی شار مغناطیسی در رتور و استاتور در حدود ۱/۸۹-۱/۴۲ تسلا و در آهنربا بین ۱/۲-۰/۸۶ تسلا می‌باشد. که نشان می‌دهد موتور در نقطه اشباع خوب کار می کند، بنابراین حداکثر گشتاور را تولید می کند. در شکل‌های ۸، ۹، و ۱۰ نمودار چگالی شار به ترتیب در یوغ استاتور، دندانه‌ها و فاصله هوایی موتور طراحی شده نشان داده شده است.

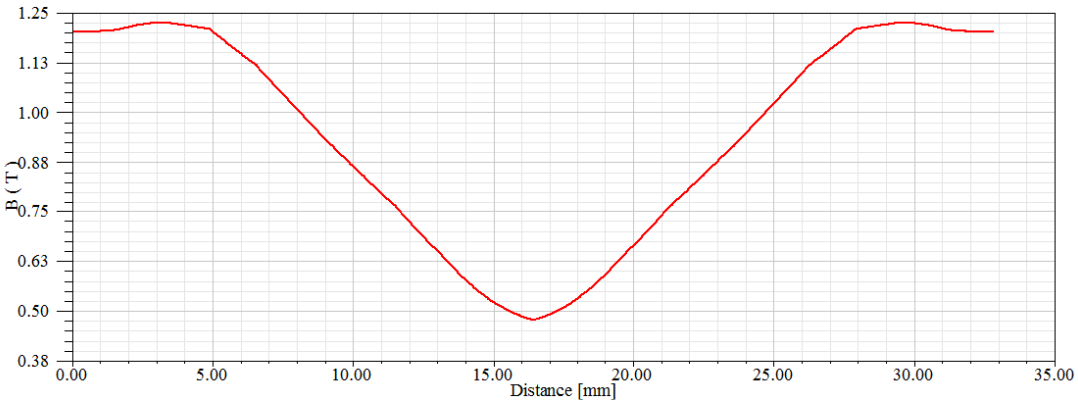
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]



شکل ۷. توزیع چگالی شار موتور طراحی شده

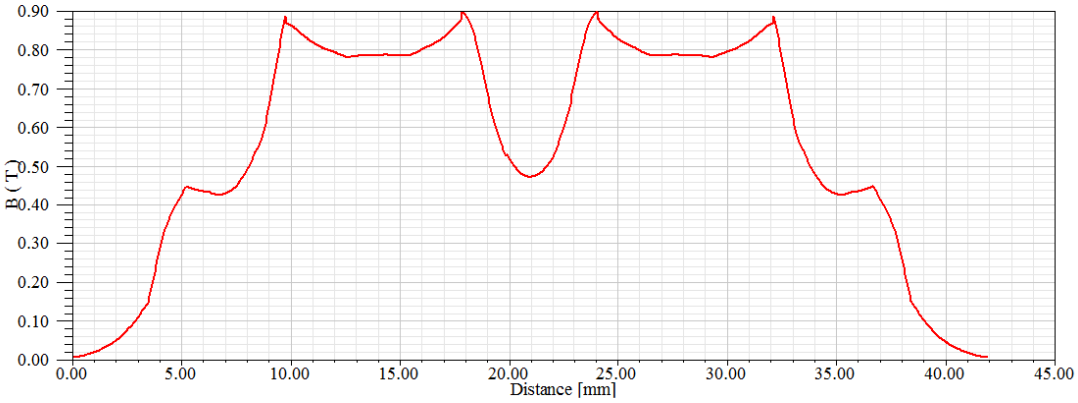


شکل ۸. نمودار چگالی شار یوغ استاتور



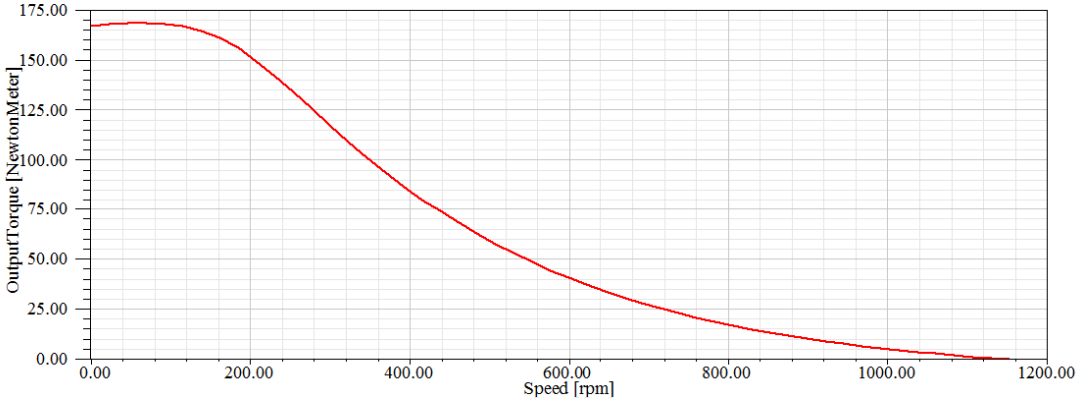
شکل ۹. نمودار چگالی شار یوغ رتور

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

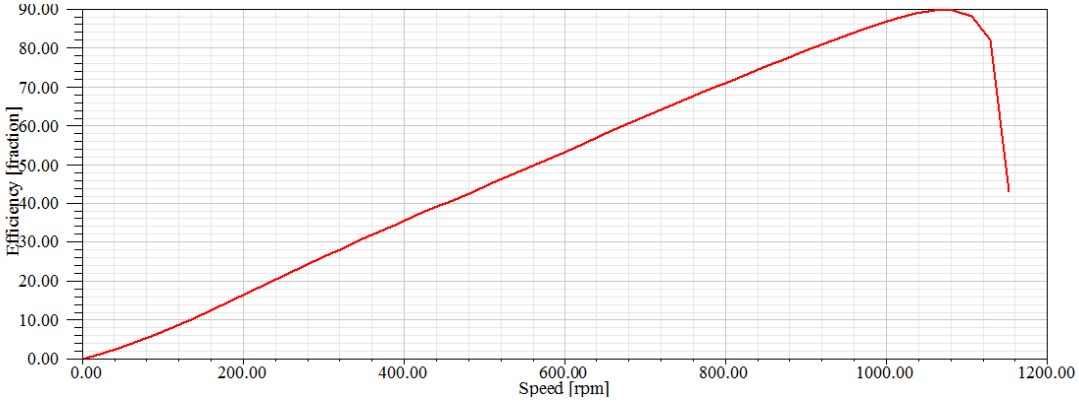


شکل ۱۰. نمودار چگالی شار فاصله هوایی در یک گام قطب

در شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمودار گشتاور بر سرعت و راندمان بر سرعت نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار گشتاور بر سرعت موتور



شکل ۱۲. نمودار راندمان بر سرعت موتور

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

همان طور که در شکل‌ها مشخص است، تحلیل اجزای محدود با دقت قابل قبولی ابعاد بهینه را تأیید می‌نماید. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج حاصل از بهینه‌سازی تحلیلی در جدول ۵ با هم مقایسه شده‌اند. در این جدول، چگالی شار در استاتور و رتور مقدار ماکزیمم و در فاصله هوایی مقدار متوسط خود را دارا می‌باشند.

جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیلی و عددی

	Bcs	Bcr	Bag
نتایج تحلیلی (T)	۱/۵	۱/۵	۰/۷۷
نتایج عددی (T)	۱/۴۸۴	۱/۴۲۹	۰/۷۰۶
خطا ٪	۱/۰۶	۴/۷۳	۸/۴

٦ نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی بهینه موتور مغناطیس دایم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) ارایه شده است. سه تابع هدف چگالی توان (F۱)، بازده (F۲) و مجموع نرمال F۱ و F۲ (F۳) بهینه‌سازی شده است. تغییرات پارامترهای GA از قبیل اندازه جمعیت (SN) و احتمال جهش (PM) و بهترین نتایج نشان داده شده است. بهترین تنظیمات از نظر مقادیر بهینه توابع هدف، همگرایی فرآیند بهینه‌سازی، و همواری نمودار خروجی انتخاب شده است. در نهایت، با استفاده از نرم افزار Maxwell 3D کارایی این الگوریتم تأیید شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این مطلب است که خطای بین نتایج تحلیلی و عددی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.

منابع

[1] Krishnan, R., (2009). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press, 1 edition.

[2] Yeadon, W., Yeadon, A., (2001). Handbook of Small Electric Motors. McGraw-Hill Professional; 1 edition.

[3] Hendershot, J. R., Miller, T. J. E., (2010). Design of Brushless Permanent-Magnet Machines. Publisher: Motor Design Books LLC, Second Edition.

[4] Gholamian, S. A., Ardebili, M., Abbaszadeh, K., (2008). Analytic and FEM Evaluation of Power Density for Various Types of Double-Sided Axial Flux Slotted PM Motors. International Journal of Applied Engineering Research, 3(6), 749–762.

[5] Aydin, M., Huang, S., Lipo, T. A., (2001). Optimum design and 3D finite element analysis of nonslotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc Machines. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE (3), 1409 - 1416.

[6] Uler, G. F., Mohammed, O. A., Koh, C. S., (1994). Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices. IEEE Transactions on Magnetics, 30 (6), 4296–4298.

[7] Rahim, N. A., Ping, H. W., Tadjuddin, M., (2007). Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle. PES2007, IEEE.

[8] Zhao, J., Zhang, W., Fang, J., Yang, Z., Zheng, T. Q., Liu, Y., (2010). Design of HTS Linear Induction Motor Using GA and the Finite Element Method, IEEE conference on Industrial electronics and applications (ICIEA), pp. 527-531.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[9] Bakare, G. A., Aliyu, U. O., Venayagamoorthy, G. K., Shu'aibu, Y. K., (2005). Genetic Algorithms Based Economic Dispatch with Application to Coordination of Nigerian Thermal Power Plants. Power engineering society gerenal meeting, 1, 551-556.
[10] Bandyopadhyay, S., Pal, S. K. (2007). Classification and Learning Using Genetic Algorithms, Applications in Bioinformatics and Web Intelligence springer.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]