

## **Cogging Torque Reduction Using Axial Pole Shaping in the IPM Coaxial Magnetic Gear**

**S. A. Afsari Kashani\***

\* Assistant Professor, Kashan University, Kashan, Iran

(Received: 25/03/2021; Accepted: 03/08/2021)

### **Abstract**

*In this paper, the axial pole skew technique is used to improve the cogging torque in the radial flux magnetic gear with an integer gear ratio. This design reduces the cogging torque by shaping the distribution of the magnetic field in the air gap of inner rotor in the axial and radial directions. In order to compare the proposed method, the optimal design of radial shaping in the high speed inner rotor is also investigated. The introduced methods have been optimized using the genetic algorithm in order to obtain the maximum torque density and the minimum cogging torque. The results are compared using the 3-D finite element method and the superiority of the axial shaping method is demonstrated.*

**Keywords:** Magnetic Gear, Axial Pole Shaping, Radial Pole Shaping, Cogging Torque, Torque Density, Finite Element Method.

---

\* Corresponding author E-mail: Afsari@kashanu.ac.ir

## کاهش نوسانات گشتاور با استفاده از شکل دهی محوری قطب در چرخ دنده مغناطیسی هم محور آهنربای دلفی

سید احمد رضا افسری کاشانی\*

۱- استادیار، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶)

### چکیده

در این مقاله به منظور بهبود نوسانات گشتاور در چرخ دنده مغناطیسی شار شعاعی با نسبت تبدیل عدد صحیح، از روش مورب سازی قطب روتور داخلی سرعت بالا استفاده شده است. این طراحی با شکل دهی به توزیع میدان مغناطیسی در فاصله هوایی مقابل روتور داخلی در راستای محوری و شعاعی، موجب کاهش نوسانات گشتاور می گردد. به منظور مقایسه روش پیشنهادی، طراحی بهینه شکل دهی شعاعی نیز در روتور مذکور بررسی می گردد. روش های ارائه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور به دست آوردن بیشینه چگالی گشتاور و کمترین نوسانات گشتاور مورد بهینه سازی قرار می گیرند. نتایج با استفاده از نرم افزار المان محدود سه بعدی مورد مقایسه قرار گرفته و برتری روش شکل دهی محوری در آن نشان داده شده است.

**کلیدواژه ها:** چرخ دنده مغناطیسی، شکل دهی محوری قطب، شکل دهی شعاعی قطب، نوسانات گشتاور، چگالی گشتاور، المان محدود

### ۱- مقدمه

صرفه جویی و نیز بهینه سازی گشتاور تولیدی از اهداف اصلی اکثر مطالعات در این ساختارها می باشد. چرخ دنده های مغناطیسی با نسبت تبدیل صحیح از مشکلات نوسانات شدید گشتاور رنج برده و مطالعاتی در خصوص کاهش آن تاکنون انجام شده است [۴-۶] علاوه بر این مطالعاتی برای شکل دهی رخ قطب روتور برای بهبود توزیع میدان و گشتاور انتقالی در چرخ دنده های مغناطیسی انجام شده است. در مرجع [۷] با استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس و نیز استفاده از رابطه سوپر فرمول، رخ قطب روتور داخلی به گونه ای شکل دهی گردیده تا چگالی شار میدان مغناطیسی در فاصله هوایی به شکل سینوسی نزدیک تر و چگالی گشتاور تقویت گردد. در مرجع [۸] با استفاده از شکل دهی سینوسی، شکل رخ قطب روتور موتور سنکرون آهنربای دائم شار محور با به کارگیری آهنربای دلفی و سطح قطب سینوسی به گونه ای اصلاح گردیده تا هارمونیک های میدان مغناطیسی در فاصله هوایی تضعیف گردند. در مرجع [۴] روتور داخلی یک چرخ دنده مغناطیسی رلوکتانسی با روتور قطب برجسته و قطب صاف به گونه ای شکل دهی گردیده تا چگالی گشتاور، بیشینه و نوسانات گشتاور کمینه گردد. در مرجع [۹] با شکل دهی روتور یک ماشین سنکرون آهنربای دائم دلفی به صورت شعاعی و محوری سعی گردیده تا با کمترین کاهش در گشتاور متوسط، نوسانات گشتاور تا حد امکان کمینه گردد.

امروزه در کمتر وسیله ای از کاربردهای روزمره گرفته تا کاربردهای صنعتی و صنایع، می توان تجهیزاتی پیدا کرد که در آن از چرخ دنده استفاده نشده باشد. چرخ دنده وسیله ای است که به کمک آن می توان سرعت، گشتاور و یا محور و جهت چرخش را تغییر داد. تمامی چرخ دنده های مکانیکی به دلیل ذات مکانیکی خود با اصطکاک، سایش، سر و صدا و نیاز به روغن کاری متناوب روبه رو می باشند. مجموعه عوامل فوق امکان قابلیت اطمینان طولانی مدت را به ویژه در شرایط اضافه بار به شدت کاهش می دهند. امروزه جایگزین مناسبی تحت عنوان چرخ دنده های مغناطیسی، برای انواع متداول مکانیکی معرفی گردیده است که به دلیل ماهیت غیر تماسی خود از نیاز به روغن کاری و یا سایش آزاد بوده و در شرایط اضافه بار نیز حفاظت ذاتی از خود نشان می دهند. این نوع چرخ دنده ها به دلیل رقابت با انواع مکانیکی خود نیاز به ارائه چگالی گشتاور مناسب، نوسانات گشتاور پایین و صرفه اقتصادی دارند. این موضوعات راستا و عناوین تحقیقات مرتبط با این فناوری را به خود اختصاص داده است [۱-۳]. اصلی ترین چالش در چرخ دنده های مغناطیسی استفاده بهینه از آهنرباهای خاک کمیاب به عنوان عنصری با قیمت قابل توجه می باشد.

تابع توزیع پرمانس مغناطیسی مدولاتورها را می توان طبق رابطه (۲) به تفکیک مؤلفه شعاعی ( $A_r$ ) و مماسی ( $A_\theta$ ) بیان نمود:

$$A_r = \lambda_{r0} + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s(\theta - \omega_s t))$$

$$A_\theta = \lambda_{\theta 0} + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \sin(jn_s(\theta - \omega_s t)) \quad (2)$$

که در آن،  $\omega_s$  سرعت دوران مدولاتورها،  $n_s$  تعداد مدولاتورها و  $\lambda_{rj}$  و  $\lambda_{\theta j}$  ضرایب فوریه تابع مدولاتور در راستای شعاعی و مماسی می باشند. برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی حاصل از آهنرباهای دائم داخلی با در نظر گرفتن اثر مدولاتورها، می توان حاصل ضرب هدایت مغناطیسی مطرح شده در رابطه (۲) و میدان مغناطیسی تعریف شده در رابطه (۱) را به صورت رابطه (۳) بیان نمود.

آن چه که از رابطه (۳) می توان استخراج نمود، این است که تعداد زوج قطب های میدان در فاصله هوایی خارجی که به موجب آهنرباهای داخلی و مدولاتورها تشکیل می شود، به صورت رابطه (۴) می باشد.

$$B_{ipm_r} = \lambda_{r0} \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mp_i \theta_{i0} + mp_i(\theta - \omega_i t))$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cos \left( (mp_i + jn_s) \left( \theta + mp_i \theta_{i0} - \frac{mp_i \omega_i + jn_s \omega_s}{mp_i + jn_s} t \right) \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cos \left( (mp_i - jn_s) \left( \theta + mp_i \theta_{i0} - \frac{mp_i \omega_i - jn_s \omega_s}{mp_i - jn_s} t \right) \right)$$

$$(3)$$

$$B_{ipm_\theta} = \lambda_{\theta 0} \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mp_i \theta_{i0} + mp_i(\theta - \omega_i t))$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) b_{\theta m}(r) \sin \left( (mp_i + jn_s) \left( \theta + mp_i \theta_{i0} - \frac{mp_i \omega_i + jn_s \omega_s}{mp_i + jn_s} t \right) \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) b_{\theta m}(r) \sin \left( (mp_i - jn_s) \left( \theta + mp_i \theta_{i0} - \frac{mp_i \omega_i - jn_s \omega_s}{mp_i - jn_s} t \right) \right)$$

$$P_{m,k} = |mp_i + kn_s|$$

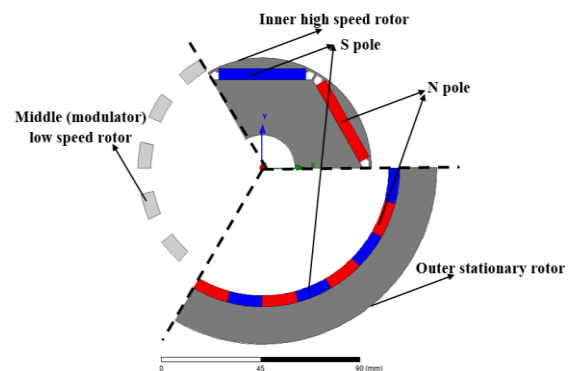
$$m=1,3,\dots,\infty; k=0,\pm 1,\pm 2,\pm 3,\dots,\pm\infty \quad (4)$$

در این مقاله روشی جدید برای بهبود نوسانات گشتاور به وسیله شکل دهی قطب روتور داخلی در راستای محوری معرفی گردیده و به منظور بررسی توانمندی ساختار پیشنهادی، با مدل پایه آهنربای دینی و نیز شکل دهی شعاعی قطب روتور داخلی، مقایسه گردیده است. روش شکل دهی محوری با توجه به محدودیت ها و امکان پذیری ساخت آن معرفی شده و هدف از بهینه سازی ساختار، بهبود نوسانات گشتاور و بیشینه سازی چگالی گشتاور انتقالی در نظر گرفته شده است.

## ۲- مدل سازی و روابط حاکم بر چرخ دنده مغناطیسی

چرخ دنده مغناطیسی به طور اساسی شامل سه روتور داخلی، میانی و خارجی می باشد که در اصلی ترین حالت، روتورهای داخلی و خارجی شامل آهنربا (یا سیم پیچی) بوده و روتور میانی از تعدادی مشخص قطعات فرومغناطیس نرم تشکیل می یابد. میدان های مغناطیسی ناشی از روتورهای آهنربای دائم پس از عبور از روتور میانی دارای طیف هارمونیک متفاوتی می شوند که هر یک از هارمونیک های ایجاد شده ضمن دربر داشتن تعداد قطب مجازی متفاوت، سرعت دوران متفاوتی را نیز دارا می باشد. به این صورت می توان با کوپل نمودن روتور سوم با قوی ترین هارمونیک تولید شده، اثر گیربکسی مورد نظر را استخراج نمود.

به منظور تعیین توزیع میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دائم روتور داخلی در غیاب مدولاتورها، می توان از رابطه (۱) استفاده نمود. در این رابطه مؤلفه شعاعی ( $B_{ipm_r}$ ) و مماسی ( $B_{ipm_\theta}$ ) میدان به صورت توابع بسط فوریه از شعاع  $r$  و زاویه  $\theta$  بیان گردیده است [۱۰ و ۱۱].



شکل (۱): ساختار چرخ دنده مغناطیسی با روتور داخلی آهنربای دینی

$$B_{ipm_r} = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos \left( mp_i \theta_{i0} + mp_i(\theta - \omega_i t) \right)$$

$$B_{ipm_\theta} = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin \left( mp_i \theta_{i0} + mp_i(\theta - \omega_i t) \right) \quad (1)$$

که در آن، متغیر  $p_i$  بیانگر تعداد زوج قطب های روتور داخلی،  $\omega_i$  نشانگر سرعت روتور داخلی،  $\theta_{i0}$  زاویه اولیه روتور داخلی،  $b_{rm}$  و  $b_{\theta m}$  نیز ضرایب فوریه توزیع میدان شعاعی و مماسی هستند.

$$\omega_o = \frac{p_i}{p_i - n_s} \omega_i - \frac{n_s}{p_i - n_s} \omega_s \quad (7)$$

با ثابت فرض نمودن روتور خارجی ( $\omega_o = 0$ )، از رابطه فوق می‌توان نسبت تبدیل چرخ دنده ( $G_r$ ) را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$0 = \frac{p_i}{p_i - n_s} \omega_i - \frac{n_s}{p_i - n_s} \omega_s \rightarrow G_r = \frac{\omega_i}{\omega_s} = \frac{-n_s}{p_o - n_s} = \frac{n_s}{p_i} \quad (8)$$

### ۳- معرفی مدل پیشنهادی

طرح چرخ دنده مغناطیسی مورد مطالعه بر اساس شکل (۱) در جدول (۱) ارائه گردیده است. به دلیل تمرکز مقاله حاضر بر روی ساختار روتور پیشنهادی، ابعاد روتور میانی مدولاتورها و نیز روتور خارجی ثابت فرض شده و نسبت تبدیل چرخ دنده (که با توجه به روابط (۵) و (۷) به نسبت ۱:۵ در نظر گرفته شده است) و شعاع روتور داخلی در مطالعات مختلف برای مقایسه عادلانه، یکسان در نظر گرفته شده است.

به علاوه، سرعت دوران قطب‌های حاصل از هارمونیک‌های فضایی مذکور، از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\omega_{m,k} = \frac{mp_i}{mp_i + kn_s} \omega_i + \frac{kn_s}{mp_i + kn_s} \omega_s \quad (5)$$

برای درگیر شدن هم‌زمان روتور خارجی با قوی‌ترین دامنه هارمونیک تولیدی، ترکیب ( $m=1, k=-1$ ) را می‌بایست انتخاب نمود. بدین ترتیب، ارتباط میان تعداد زوج قطب‌های روتور خارجی ( $p_o$ ) و روتور داخلی ( $p_i$ ) با تعداد مدولاتورها ( $n_s$ ) به صورت رابطه (۶) به دست خواهد آمد.

$$n_s = p_i + p_o \quad (6)$$

در نهایت، با عنایت به روابط فوق، رابطه میان سرعت دوران روتور داخلی ( $\omega_i$ )، روتور میانی ( $\omega_s$ ) و روتور خارجی ( $\omega_o$ ) به صورت رابطه (۷) بیان خواهد گردید.

جدول (۱): ابعاد و مشخصات چرخ دنده مغناطیسی مورد مطالعه

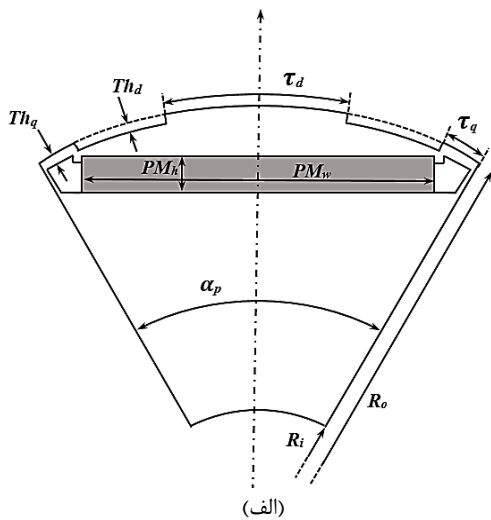
متغیر	متغیر	ابعاد/تعداد	جنس
تعداد جفت قطب روتور داخلی	$P_h$	۳	NdFeB-N40
تعداد جفت قطب روتور خارجی	$P_i$	۱۲	NdFeB-N40
تعداد مدولاتور	$n_s$	۱۵	M6
شعاع داخلی روتور داخلی	$R_i$	۱۵ mm	M400-50A
شعاع خارجی روتور داخلی	$R_o$	۵۰ mm	M400-50A
طول فاصله هوایی	$l_g$	۱ mm	-
ضخامت شعاعی مدولاتور	$Th_m$	۶ mm	-
ضخامت شعاعی آهنربای خارجی	$Th_{opm}$	۵ mm	-
ضخامت شعاعی هسته خارجی	$Th_{oc}$	۱۵ mm	M400-50A
نسبت کمان به گام مدولاتور	$m/\tau_M \tau$	۱	-
چگالی شار پسماند آهنربا	$B_r$	T/۲۲	-
مقاومت الکتریکی ویژه	$\rho_s$	$\mu\Omega cm^45$	-
طول محوری چرخ دنده	$L$	mm۵۰	-
حداقل ضخامت پل‌های واسط	$Th_q$	mm۱	-
گام قطب روتور داخلی	$p\alpha$	°۶۰	-
طول آهنربای روتور داخلی	$PM_w$	mm۴۰	-
عرض آهنربای روتور داخلی	$PM_h$	mm۶	-

یکی از عوامل تأثیرگذار بر گشتاور دندانه‌ای، نسبت تعداد جفت قطب‌ها و تعداد مدولاتورها با توجه به روابط (۴) و (۶) است. با معرفی شاخصی به نام ضریب گشتاور دندانه‌ای طبق رابطه زیر دارید:

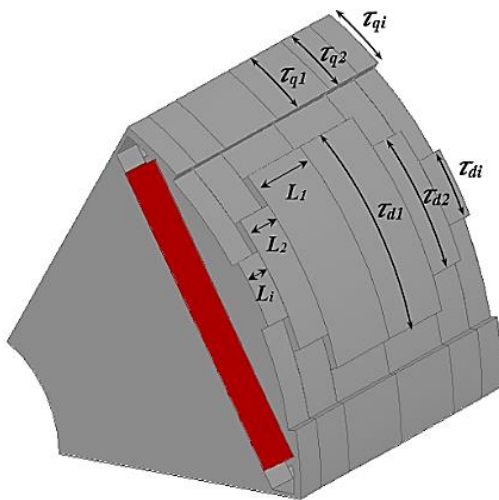
$$CTF = \frac{2Pn_s}{N_c} \quad (10)$$

گشتاور دندانه‌ای از تغییرات ناگهانی نیرومحرکه مغناطیسی آهنرباها (هارمونیک ناشی از آن) و نیز تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی که ناشی از حرکت دندانه‌های مدولاتور است، ناشی می‌گردد. طبق رابطه زیر تغییرات رلوکتانس مسیر شار مغناطیسی موجب ظهور گشتاور دندانه‌ای می‌گردد [۱۲].

$$T_{cogging}(\theta) = -\frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{d\mathcal{R}}{d\theta} \quad (9)$$



(الف)



(ب)

شکل (۲): ساختار پیشنهادی شکل‌دهی محوری قطب روتور داخل: (الف) مقطع دو بعدی یک قطب و (ب) نمای محوری روتور داخلی

به منظور انجام مقایسه عادلانه، علاوه بر طرح پیشنهادی شکل (۲) و نیز ساختار متداول با سطح روتور یکنواخت، از ساختار شکل (۳) نیز استفاده می‌گردد. در این ساختار شکل‌دهی شعاعی، رخ قطب به صورت خمیده از حالت دایروی خارج گردیده و مرکز انحناء و طول قوس آن با توجه به محدودیت فضای فاصله هوایی به منظور شکل‌دهی به میدان مغناطیسی خارج شده از قطب مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در صورت نیاز، جایگاه آهنرباها و سد شارها به صورت عمقی اصلاح می‌گردد تا امکان قوس‌دهی دلخواه فراهم آید. مقطع دو بعدی در شکل (۳-الف) و برش تک قطبی سه بعدی آن در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. بر خلاف ساختار شکل‌دهی محوری، در ساختار شکل‌دهی شعاعی، قطب در راستای محور یکنواخت می‌باشد و بنابراین توزیع شار در راستای محور یکنواخت و در راستای شعاعی متفاوت خواهد بود.

که در آن،  $N_c$  معادل کوچک‌ترین مضرب مشترک بین تعداد جفت قطب‌ها و تعداد مدولاتورها است. این متغیر نشان دهنده مؤلفه اصلی هارمونیک گشتاور دندانه‌ای است. در چرخ‌دنده‌های با نسبت تبدیل کسری، که تعداد مدولاتورهای هر قطب آهنربا تعداد صحیحی نیست، هر کدام از آهنرباها موقعیت متفاوتی نسبت به مدولاتورها خواهد داشت و در نتیجه برآیند گشتاور آن‌ها، موجب کاهش مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور دندانه‌ای خواهد شد [۱۳]. در مدل معرفی شده، تعداد قطب‌های روتور سرعت بالا برابر ۳، و تعداد قطعات مدولاتورها برابر ۱۵ است که در نتیجه ک.م.م. آن‌ها برابر ۱۵ خواهد بود. در این صورت ضریب گشتاور دندانه‌ای برابر  $CTF=6$  خواهد بود که نشان دهنده بزرگی میزان گشتاور دندانه‌ای است.

کاهش گشتاور دندانه‌ای در چرخ‌دنده مغناطیسی می‌تواند از دو طریق متداول محقق گردد: ۱- مورب‌سازی آهنرباهای دائم ۲- مورب‌سازی مدولاتورها. مدولاتورها به دلیل مورق بودن، برای مورب‌سازی از پیچیدگی ساختاری بالایی برخوردار خواهند بود [۱۲]. مورد اول بیشتر قابل اعمال به روتور سرعت بالا است زیرا که تعداد آهنرباها در این روتور کمتر و در نتیجه آزادی عمل برای مورب‌سازی بیشتر است. در آهنرباهای سطحی، ساخت نمونه مورب‌سازی بسیار پرهزینه خواهد بود. به دلیل سرعت بالای روتور داخلی عموماً از ساختار آهنربای دفنی در این روتور استفاده می‌گردد. مورب‌سازی پله‌ای یکی از گزینه‌های قابل بررسی می‌باشد. در این روش به دلیل تغییر جایگاه زاویه اولیه هر لایه، گشتاور منتجه نهایی دچار کاهش قابل توجهی می‌گردد. به همین منظور در این مقاله ساختاری جدید با شکل‌دهی محوری به رخ قطب روتور داخلی با استفاده از ایجاد شیارهایی در آن و در نتیجه تغییر رلوکتانس مؤثر و تأثیرگذاری بر توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی، عمل کاهش نوسانات گشتاور دنبال می‌گردد. ایده مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۲-الف) نمای مقطع دو بعدی یکی از قطب‌های روتور داخلی را نشان می‌دهد که از شکل دایروی کامل (خط چین) خارج شده و با انتخاب پله مناسب در راستای محور  $d$  و  $q$  رخ قطب مورد نظر ایجاد گردیده است. در شکل (۲-ب) نمای تغییرات محوری روتور نشان داده شده است. هر پله با طول متناسب خود در فرآیند بهینه‌سازی مشارکت خواهد داشت. ابعاد آهنربا در راستای محوری با مدل پایه، یکسان و بدون تغییرات است. با تغییرات برجستگی در راستای محور  $d$ ، امکان بهبود تمرکز مؤلفه محوری چگالی شار فراهم می‌آید. به منظور تعادل نیروهای وارد بر شفت روتور در طرح مذکور، روتور دارای تقارن در راستای محور می‌باشد. طول کلی روتور ثابت و برابر با ۵۰ میلی‌متر انتخاب گردیده است.

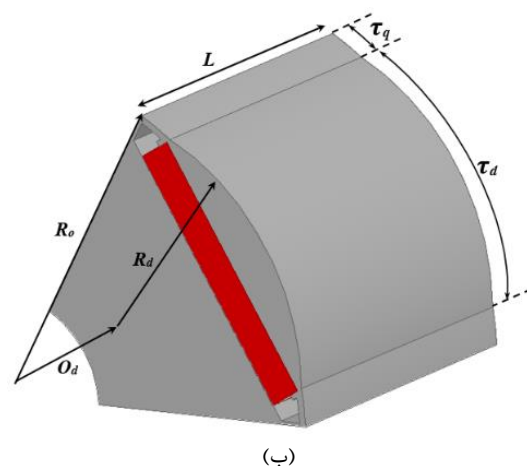
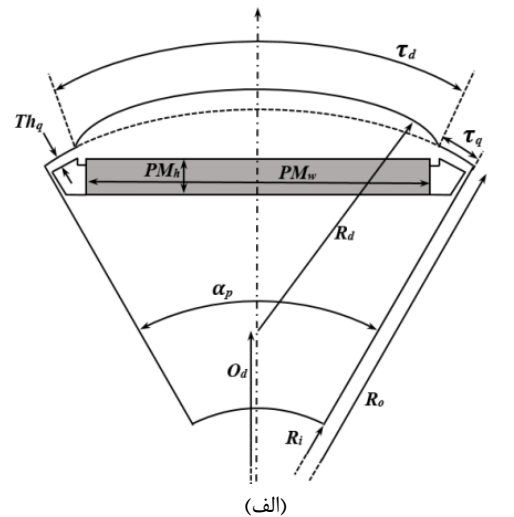
تولید خودکار مش در این نرم‌افزار که قابلیت بالا و دقت بسیار خوبی را دربر دارد استفاده گردیده است. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده الگوریتم ژنتیک می‌باشد [۱۷-۱۴]. الگوریتم ژنتیک با یک مجموع جواب تصادفی شروع به کار می‌کند. این مجموعه جواب‌ها نسل اولیه نام دارند. در این الگوریتم جواب‌های حاصل از یک نسل برای تولید نسل بعد استفاده خواهند شد. در این فرآیند انتظار می‌رود که تابع هزینه نسل جدید نسبت به نسل قبلی بهبود داشته باشد. در هر مرحله انتخاب جواب‌های مناسب از بین کل جمعیت نسل قبل (والدین) به منظور ایجاد جواب‌های بهتر (فرزندان)، بر اساس میزان مطلوب بودن کیفیت ژن مذکور انجام می‌شود. بدیهی است که جواب‌های مطلوب‌تر شانس بیشتری برای حضور در نسل‌های آتی را خواهند داشت. این مرحله تا رسیدن به شرط از پیش تعیین شده‌ای، مانند تعداد معین تکرار نسل‌ها، میزان بهبود یافتن جواب‌ها یا محدودیت زمان اجرای الگوریتم ادامه خواهد داشت. شکل (۴) شمای کلی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. مناسب بودن یا نبودن جواب‌ها (نسل جدید) رابطه مستقیمی با تابع هدف تعیین شده دارد. به‌طور کلی هر چه یک جواب شایستگی بیشتری داشته باشد، شانس تولید فرزندان مبتنی بر آن جواب در نسل آینده بیشتر خواهد بود. به‌طور مثال چنانچه هدف مسئله دستیابی به بیشینه تابع هدف باشد، میزان شایستگی پاسخ، یک تابع صعودی از تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

تابع هزینه ( $O.F.$ ) به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$O.F. = \frac{\%T_{cogg}}{T_{av}} \quad (11)$$

نرم‌افزار ماکسول در ابتدا به‌صورت تقریبی یک مش‌بندی اولیه را بر اساس "surface approximation" "settings" ارائه می‌نماید. در صورت نیاز، نرم‌افزار به بهبود وضعیت مش و جزئی‌تر نمودن آن در نقاط حساس‌تر می‌پردازد. در صورت نیاز امکان مش‌بندی اولیه توسط کاربر امکان‌پذیر است. در بیشتر موارد نرم‌افزار از قابلیت Ansoft TAU Mesh به‌منظور مش‌بندی‌هایی با دقت، سرعت، کیفیت و قابلیت اطمینان مناسب در مقایسه با گزینه Ansoft Classic Mesh بهره می‌برد. در نرم‌افزار به روش بهبود تکراری در نقاط حساس با چگالی خطای بالا، مش‌بندی بهبود می‌یابد.

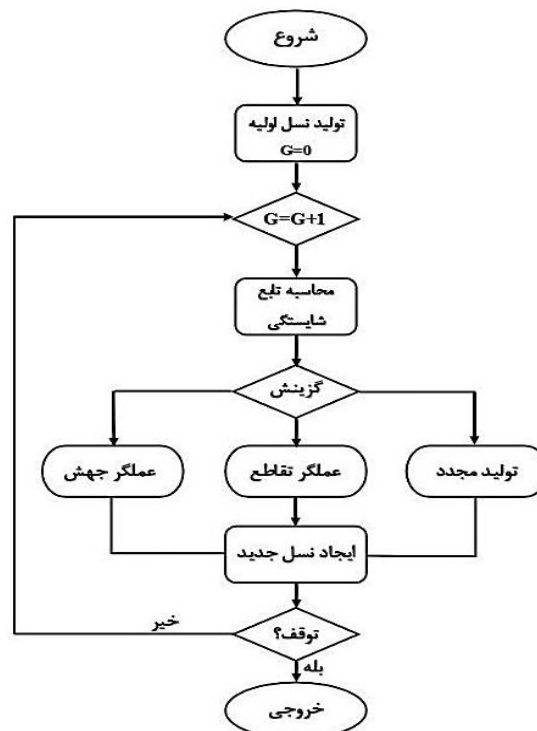
ضخامت نازک‌ترین بخش‌های ورق هسته با توجه به محدودیت‌های مکانیکی (بیشینه تنش قابل تحمل توسط ماده) و نیز اشباع مغناطیسی، حداقل ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): ساختار شکل‌دهی برجسته قطب روتور داخلی (رلوکتانس متغیر): (الف) مقطع دو بعدی یک قطب و (ب) نمای محوری

#### ۴- طراحی و بهینه‌سازی

طراحی‌های معرفی شده در بخش قبل با استفاده از مدل‌سازی المان محدود سه بعدی توسط نرم‌افزار Maxwell V.16 و ابعاد ثابت بیان شده در جدول (۱) و متغیرهای بهینه‌سازی نشان داده شده در شکل‌های (۲ و ۳) با هدف کمینه‌سازی نوسانات گشتاور و بیشینه‌سازی چگالی گشتاور انتقالی، مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. در خصوص مش‌بندی در نرم‌افزار ماکسول به‌منظور حل و مدل‌سازی سامانه، از قابلیت



شکل (۴): بلوک دیاگرام عملکرد الگوریتم ژنتیک

طراحی بهینه شکل‌دهی شعاعی روتور داخلی ارائه گردیده است.

جدول (۲): ابعاد بهینه‌سازی روتور با شکل‌دهی محوری

$L$ (mm)	$Th_d$ (mm)	$q\tau$ (Deg)	$d\tau$ (Deg)	$i$
۱۳	۱	۱۰	۳۰	۱
۷	۱	۱۰	۲۰	۲
۵	۱	۱۰	۱۰	۳

جدول (۳): ابعاد بهینه‌سازی روتور با شکل‌دهی شعاعی

$O_d$ (mm)	$R_d$ (mm)	$q\tau$ (Deg)	$d\tau$ (Deg)
۷	۴۳/۶۷	۵	۵۰

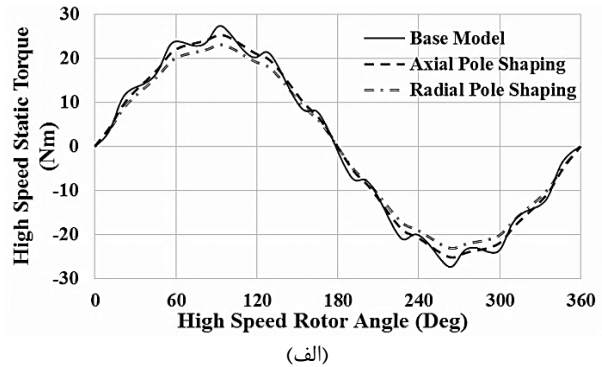
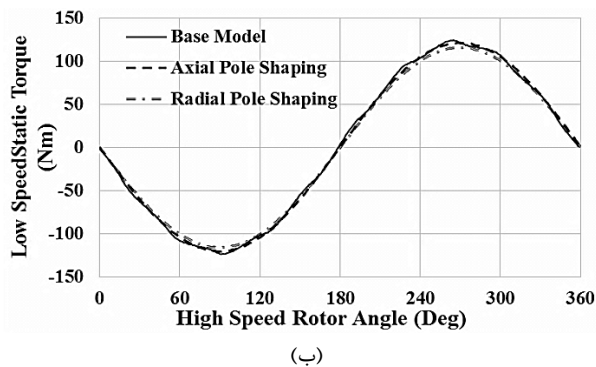
شکل (۵-الف) تغییرات گشتاور استاتیکی روتور سرعت پایین و روتور سرعت بالا را در سه طراحی بهینه پایه، شکل‌دهی محوری و شکل‌دهی شعاعی، نشان می‌دهد. شکل (۵-ب) تغییرات گشتاور دینامیکی روتور سرعت پایین را در سه طراحی بهینه پایه، شکل‌دهی محوری و شکل‌دهی شعاعی، نشان می‌دهد. تغییرات حداکثر دامنه گشتاور استاتیکی به وضوح در سه مدل بررسی شده نشان داده شده است. در طراحی قطب با شکل‌دهی محوری حداکثر دامنه گشتاور استاتیکی که به‌عنوان گشتاور بیشینه چرخ دنده نیز شناخته می‌شود نسبت به حالت شکل‌دهی شعاعی بیشتر گردیده و نسبت به مدل پایه کاهش بسیار جزئی را نشان می‌دهد. این موضوع در گشتاور هر دو روتور سرعت بالا و سرعت پایین قابل مشاهده است.

بدیهی است با افزایش تعداد قطعات لایه‌های قطب در شکل‌دهی محوری، به دلیل ایجاد آزادی عمل بیشتر برای شکل‌دهی قطب، گشتاور دندانه‌ای کاهش بیشتری پیدا می‌کند و گشتاور متوسط نیز تا حدودی بهبود پیدا می‌کند اما این موضوع هزینه‌های ساخت را به شدت افزایش می‌دهد. از همین رو تعداد لایه‌های قطب به تعداد حداکثر سه لایه طبق جدول (۲) محدود گردیده است. طرح پیشنهادی فارغ از تعداد قطب روتور (روابط (۴ و ۶)) و یا نسبت تبدیل چرخ دنده (روابط (۵ و ۷)) قابل اعمال و بررسی در ساختار هم محور می‌باشد و مفروضات بیان شده در جدول (۱) صرفاً انتخابی و برای تحلیل ایده پیشنهادی است.

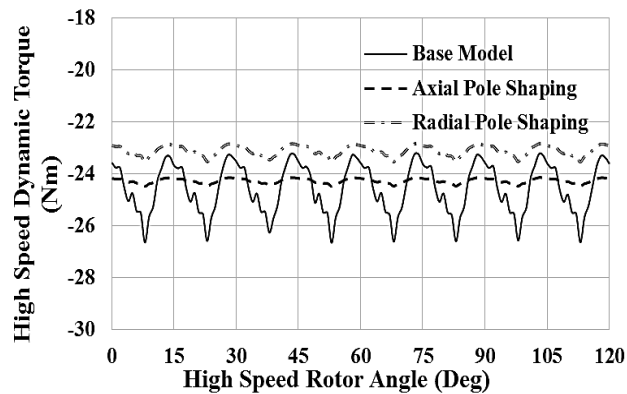
در طرح روتور با شکل‌دهی شعاعی نیز، محدودیت حداقل طول فاصله هوایی معادل ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده و متناسب با شکل قوس قطب، مکان هندسی آهنرباها و فواصل سد شار، به داخل هسته انتقال داده می‌شود تا حداقل ضخامت ورق هسته حفظ گردد. به دلیل افزایش طول فاصله هوایی در شکل‌دهی شعاعی، گشتاور متوسط کاهش خواهد داشت. در طرح شکل‌دهی شعاعی، با افزایش قوس قطب گشتاور متوسط کاهش یافته و نوسانات گشتاور کاهش محدودی خواهند داشت. هر چند کاهش بیشتر نوسانات گشتاور امکان‌پذیر خواهد بود اما این موضوع به ازای از دست رفتن شدید گشتاور متوسط و در نتیجه تضعیف تابع هدف صورت خواهد پذیرفت. مقادیر بهینه به‌دست آمده، شکل قطب را تعیین می‌نمایند.

در جدول (۲) نتایج ابعاد بهینه‌سازی شده طرح شکل‌دهی محوری نشان داده شده است. در جدول (۳) نیز مشخصات

پایه به  $1/8$  درصد در مدل شکل‌دهی محوری و به  $3$  درصد در مدل شکل‌دهی شعاعی کاهش پیدا می‌کند. این بهبود به ازای کاهش متوسط گشتاور از  $25 N.m$  در مدل پایه به  $24/3 N.m$  در مدل شکل‌دهی محوری و به  $23/2 N.m$  در مدل شکل‌دهی شعاعی خواهد بود. با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۴)، در شکل‌دهی محوری، متوسط گشتاور به ازای کاهش  $11/2$  درصدی نوسانات آن، با  $2/8$  درصد کاهش روبه‌رو گردیده است. در طراحی شعاعی نیز بهبود  $10$  درصدی نوسانات گشتاور با  $7/2$  درصد کاهش در متوسط گشتاور انتقالی روبه‌رو بوده است.



شکل (۵): تغییرات گشتاور استاتیکی بر حسب زاویه روتور سرعت بالا در سه مدل پایه متداول، شکل‌دهی شعاعی و شکل‌دهی محوری: (الف) گشتاور روتور سرعت بالا و (ب) گشتاور روتور سرعت پایین



شکل (۶): تغییرات گشتاور دینامیکی روتور سرعت بالا بر حسب تغییرات زاویه روتور سرعت بالا در سه مدل پایه متداول، شکل‌دهی شعاعی و شکل‌دهی محوری

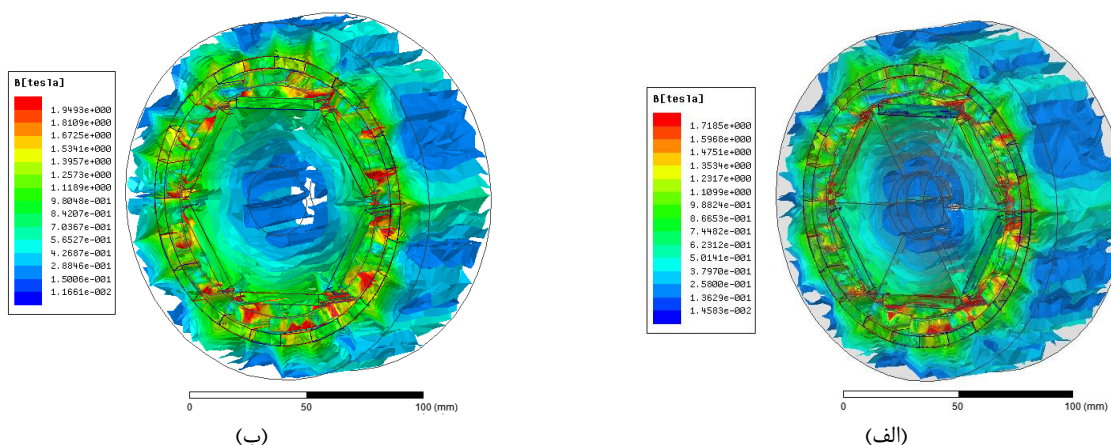
جدول (۴): مقایسه نتایج بهینه‌سازی در روتور سرعت بالا

O.F.	$T_{cogg}$ (%)	$T_{cogg}$ (N.m)	$T_{avg}$ (N.m)	Design
-	۱۳	۳/۲۵	۲۵	Base
۰/۰۷۴۰۷	۱/۸	۰/۴۳	۲۴/۳	Axial Skew
۰/۱۲۹۳۱	۳	۰/۶۸	۲۳/۲	Radial Skew

برای مطالعه دقیق‌تر برتری طرح معرفی شده، گشتاور دینامیکی روتور سرعت بالا که از چرخش هم‌زمان روتور ورودی و خروجی با حفظ نسبت تبدیل به دست می‌آید، در شکل (۶) نشان داده شده است. کاهش دامنه متوسط گشتاور در طرح شکل‌دهی محوری و شعاعی نسبت به مدل پایه و البته کاهش دامنه نوسانات گشتاور دندانه‌ای در این شکل قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به تابع هدف تعریف شده در بالا، مشاهده می‌گردد که روش شکل‌دهی محوری تابع هدف بهینه‌تری را در مقایسه با شکل‌دهی شعاعی ارائه می‌دهد. درصد نوسانات گشتاور از  $13$  درصد در مدل

توزیع چگالی شار مغناطیسی در اجزای مختلف چرخ‌دنده مغناطیسی در دو طرح شکل‌دهی محوری و شعاعی با ابعاد بهینه به دست آمده در بالا در شکل (۷) نشان داده شده است. تمرکز شار به صورت لحظه‌ای در برخی لبه‌های مدولاتورها افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، توزیع میدان مغناطیسی در شکل‌دهی شعاعی با بیشینه دامنه بزرگ‌تری نسبت به شکل‌دهی محوری روبه‌رو می‌باشد که ناشی از کاهش فاصله هوایی در برخی موقعیت‌های رخ قطب و در نتیجه کاهش رلوکتانس مغناطیسی می‌باشد. این موضوع خود موجب افزایش تلفات هسته و ایجاد اشباع لحظه‌ای و تلفات حرارتی در برخی نقاط به ویژه لبه مدولاتورها می‌گردد.





شکل (۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در اجزای مختلف هسته و مدولاتورها: (الف) شکل دهی محوری و (ب) شکل دهی شعاعی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک طراحی جدید شکل دهی محوری قطب روتور آهنربای دلفنی برای بهبود گشتاور انتقالی و کاهش نوسانات گشتاور ارائه گردید. در مدل پیشنهادی با استفاده از شیوهایی در سطح قطب روتور در لایه‌هایی با ارتفاع مختلف از طول محور روتور، و نیز با نسبت کمان‌های متفاوت، چگالی شار مغناطیسی قطب روتور به گونه‌ای در فاصله هوایی توزیع گردد تا حداکثر کاهش نوسانات گشتاور به ازای حداقل کاهش در متوسط گشتاور حاصل گردد. نتایج بهینه‌سازی طرح مذکور با نتایج مدل پایه و نیز شکل دهی بهینه شعاعی قطب روتور داخلی مورد مقایسه قرار گرفته و برتری طرح مذکور در ارائه تابع هدف بهینه‌تر اثبات می‌گردد. در این مطالعه گشتاور متوسط از  $25 N.m$  در مدل پایه به  $24/3 N.m$  و گشتاور دندانه‌ای از  $13\%$  در مدل پایه به  $1/8\%$  در طراحی بهینه محوری تغییر می‌یابد. هر چند هر دو روش شکل دهی، توانایی کاهش نوسانات گشتاور تا حد مطلوب را ارائه می‌نمایند اما شکل دهی محوری ضمن کاهش بیشتر، تضعیف کمتری را در گشتاور انتقالی ایجاد می‌نماید.

## ۷- مراجع

- [5] S. A. Afsari kashani, "Performance Analysis and Optimization of a Novel Arcuate Double-sided Magnetic Gear using Quasi 3-D Analytical Modeling for Wind Power Application," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 1, pp. 1-9, 2019. (In Persian)
- [6] A. Moghimi, M. H. Aliabadi, and H. Feshki Farahani, "Analysis and Optimization of Triple-speed Coaxial Magnetic Gears," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 9, pp. 27-34, 2020 (In Persian).
- [7] S. A. Afsari Kashani, "Rotor Pole Design of Radial Flux Magnetic Gear for Reduction of Flux Density Harmonics and Cogging Torque," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-8, Dec. 2019.
- [8] S. A. Afsari Kashani "Optimal Design of Magnetic Geared PM Synchronous Motor Pole Shape to Improve Magnetic Field Distribution and Reduce Cogging Torque," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 8, pp. 53-59, 2020 (In Persian).
- [9] [9] Z. S. Du and T. A. Lipo, "Reducing Torque Ripple Using Axial Pole Shaping in Interior Permanent Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, pp. 148-157, 2020.
- [10] P. Naderi, A. Ramezannezhad, and A. A. Motie Birjandi, "Design of a New Magnetic Coaxial Gearbox," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 9, pp. 43-49, 2020 (In Persian).
- [11] A. Khoda Karami, H. Feshki Farahani, and R. Nasiri Zarandi, "Analysis of a Coaxial Consequent-Pole Magnetic Gear Based on Magnetic Equivalent Circuit," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 9, pp. 79-88, 2020 (In Persian).
- [12] S. Ahmadreza Afsari, H. Heydari, and B. Dianati, "Cogging Torque Mitigation in Axial Flux Magnetic Gear System Based on Skew Effects Using an Improved Quasi 3-D Analytical Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, pp. 1-11, Sept. 2015.
- [1] K. Atallah and D. Howe, "A Novel High-performance Magnetic Gear," *IEEE Transaction Journal on Magnetics*, vol. 37, pp. 2844-2846, 2001.
- [2] K. Atallah and D. Howe, "High-performance Magnetic Gears," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 36, pp. 272-276, 2004.
- [3] K. Atallah, J. Wang, and D. Howe, "A High-performance Linear Magnetic Gear," *Journal of Applied Physics*, vol. 10N516, 2005.
- [4] S. A. Afsari Kashani, "Design and Optimization of Coaxial Reluctance Magnetic Gear with Different Rotor Topologies," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, pp. 101-109, Jan. 2020.

- [16] Hui Li, Zhe Chen, and Henk Polinder, "Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 82-92, March 2009.
- [17] Tao Wang and Qingfeng Wang, "Optimization Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Potential Energy Recovery System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, pp. 856-863, December 2012.
- [13] N. Niguchi, K. Hirata, M. Muramatsu, and Y. Hayakawa, "Transmission Torque Characteristics in a Magnetic Gear," *Proceedings ICEM*, pp. 1-6, 2010.
- [14] G. F. Uler, O. A. Mohammed, and Chang-Seop Koh, "Design Optimization of electrical Machines Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 31, pp. 2008-2011, 1995.
- [15] F. Wurtz, M. Richomme, J. Bigeon, and J. C. Sabonnadiere, "A Few Results for Using Genetic Algorithms in the Design of Electrical Machines," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 33, pp. 1892-1895, 1997.