

## تحلیل عملکرد و بهینه‌سازی ساختار جدید چرخ‌دنده مغناطیسی دولایه قوسی با استفاده از مدل تحلیلی شبه سه‌بعدی، به منظور استفاده در نیروگاه بادی

سید احمدرضا افسری کاشانی\*

استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

(دریافت: ۹۷/۰۸/۱۳، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۴)

**چکیده:** در این مقاله ساختار جدیدی از چرخ‌دنده مغناطیسی با نام چرخ‌دنده مغناطیسی دولایه قوسی با استفاده از ترکیب ساختارهای شار شعاعی و شار محوری با هدف افزایش چگالی گشتاور انتقالی، معرفی شده است. مشخصات عملکردی این ساختار توسط روش تحلیلی جدید شبه سه‌بعدی بهبودیافته (توسعه‌یافته روش تحلیلی دوبعدی)، استخراج و با نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی مورد مقایسه قرار گرفته و برتری و دقت روش معرفی شده مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. این مدل تحلیلی توسط مدل دوبعدی وابسته به مؤلفه‌های مختلف میدان مغناطیسی، مبتنی بر ساختار چرخ‌دنده شار شعاعی و شار محوری معرفی شده است تا ساختار دولایه قوسی را با دقت مناسب مدل‌سازی نماید. ساختار ارائه‌شده به منظور به کارگیری در یک نیروگاه بادی مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی به وضوح برتری ساختار مذکور را در مقایسه با ساختارهای متداول چرخ‌دنده‌های مغناطیسی در شاخص چگالی گشتاور انتقالی نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** چرخ‌دنده مغناطیسی، شبه سه‌بعدی، روش تحلیلی، دولایه قوسی، چگالی گشتاور، تحلیل المان محدود

### ۱- مقدمه

مغناطیسی با آهنربای دائم سه‌گانه معرفی کرده که با استفاده از یک‌لایه ثابت اضافی از آهنربای دائم بین قطعات فرو مغناطیسی و نیز مدولاتورهای T شکل، در مقایسه با انواع متداول، چگالی گشتاور بالاتری به دست آورده است. مرجع [۸] مدل تحلیلی مبتنی بر تحلیل هارمونیک‌های فضایی دوبعدی برای ساختار چرخ‌دنده مغناطیسی هم‌محور شار متمرکز ارائه کرده است. در این میان ساختارهای جدیدی نیز با هدف افزایش ظرفیت گشتاور انتقالی معرفی شده‌اند، همچون: آهنرباهای دائم با آرایش هالباخ [۹-۱۰]، ساختارهای شار متمرکز با آهنرباهای فریت [۲]، و چرخ‌دنده‌های مغناطیسی شار شعاعی ابرسانایی [۱۱-۱۲].

در این مقاله ساختار جدید ترکیبی شار شعاعی و شار محوری با نام دولایه قوسی (Arcuate Double Sided Magnetic Gear) معرفی شده است که در آن هدف، افزایش چگالی گشتاور و نیز استفاده مؤثر از فضا و شارهای ناشی بوده است. به علاوه، یک نمونه عملی ساخت چرخ‌دنده شار شعاعی به منظور مقایسه با طرح معرفی شده، مورد مقایسه قرار گرفته است. ترکیب ساختارهای شعاعی و محوری در ماشین‌های الکتریکی اخیراً در منابع متعددی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند که هدف تمامی آن‌ها ارائه چگالی گشتاور بالاتر با توجه به محدودیت‌های فضایی در ساختارهای مستقل یا وابسته الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد [۱۳-۱۵].

فیبرهای چرخ‌دنده‌های مغناطیسی به دلیل برتری‌های فراوانی همچون عدم تماس فیزیکی، حفاظت اضافه‌بار ذاتی، عملکرد کم سروصدا، عدم نیاز به روان‌کاری، لرزش کم و قابلیت اطمینان بالا نسبت به انواع مکانیکی رایج، توجهات زیادی را به خود جلب نموده‌اند. چرخ‌دنده مغناطیسی به طور کلی شامل یک روتور داخلی و یک روتور خارجی به همراه آهنرباهای دائم، و یک روتور میانی با نام مدولاتور، می‌باشد. روتور مدولاتور، با مدوله کردن میدان مغناطیسی روتور داخلی و خارجی و تغییر هارمونیک غالب بر اساس تعداد قطب مورد نیاز در روتور مورد نظر، عمل تغییر نسبت دور و تغییر گشتاور را ایجاد می‌نماید [۱]. با پیدایش آهنرباهای خاک کمیاب و ارائه ساختارهای جدید از چرخ‌دنده‌های مغناطیسی، امکان رقابت این نوع چرخ‌دنده‌ها با انواع مکانیکی فراهم گردیده و پروژه‌های فراوانی به این سو جلب شده است [۲-۳].

علی‌رغم مزایای بیان شده، مهندسی‌های حاکم بر چرخ‌دنده‌های مغناطیسی، همچنان مانع توسعه مورد نظر در این فناوری گردیده است. محدودیت‌هایی همچون: پیچیدگی ساختار و چگالی گشتاور پایین از مهم‌ترین این موارد است [۴-۶]. S. Peng و همکاران [۷] با ترکیب ساختار شار عرضی و شار محوری، یک چرخ‌دنده

آهنرباهای روتور داخلی (سرعت بالا) و روتور خارجی (سرعت پایین)، توسط قطعات فرو مغناطیس روتور میانی (مدولاتورها) مدوله شده به گونه‌ای که هارمونیک‌های ایجاد شده در فاصله هوایی مقابل، تعداد قطبی معادل تعداد قطب‌های روتور مقابل داشته و با کوپل شدن به آن، روتور مقابل را در سرعتی متفاوت (بسته به سرعت هارمونیک کوپل شده) می‌چرخاند [۱۶]، [۱۷]. به منظور ایجاد اثر گیربکسی، یعنی تغییر سرعت به صورت مؤثر با حداکثر کارایی و بیشینه گشتاور انتقالی، بایستی تعداد قطعات مدولاتور ( $n_s$ ) برابر با مجموع تعداد جفت قطب روتور سرعت پایین ( $p_l$ ) و تعداد جفت قطب روتور سرعت بالا ( $p_h$ ) باشد [۱۸] ( $n_s = p_l + p_h$ ). سرعت دورانی روتورها توسط رابطه زیر بیان می‌گردد [۱۹]:

$$\omega_h = \frac{p_l}{p_l - n_s} \omega_l + \frac{n_s}{n_s - p_l} \omega_s \quad (1)$$

در این رابطه  $\omega_l, \omega_h, \omega_s$  به ترتیب برابر با سرعت دورانی روتور مدولاتورها، روتور سرعت بالا و روتور سرعت پایین می‌باشد. در این مقاله روتور میانی (مدولاتورها) ثابت بوده و بنابراین، نسبت تبدیل چرخ‌دنده دولایه قوسی (با  $n_s = 27, p_h = 4$ ) برابر  $\frac{23}{4} = -5.75$  خواهد بود. جزییات ابعاد چرخ‌دنده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترها و ابعاد چرخ‌دنده مغناطیسی دولایه قوسی.

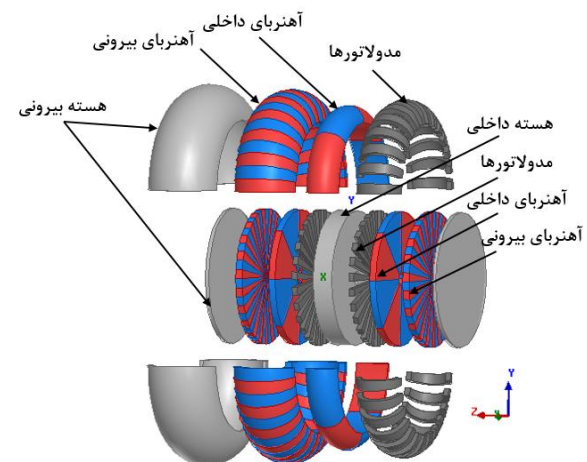
پارامتر	مقدار
سرعت نامی روتور سرعت بالا	۱۵۰۰ rpm
تعداد جفت قطب روتور سرعت بالا	۴
تعداد جفت قطب روتور سرعت پایین	۲۳
تعداد قطعات مدولاتور	۲۷
شعاع خارجی	۱۰۰ mm
ضخامت آهنربا (NdFeB-35)	۱۰ mm
ضخامت مدولاتورها (M6)	۸ mm
طول فاصله هوایی	۲ mm
ضخامت هسته روتور سرعت بالا (M43)	۳۰ mm
ضخامت هسته روتور سرعت پایین (M43)	۵/۵ mm
پس‌ماند آهنربا	۱/۳۳ T

در شکل (۲) لایه‌های مختلف ساختار پیشنهادی از زوایای مختلف نشان داده شده است. هر قطعه آهنربا بر روی هسته روتور به صورت سطحی قرار می‌گیرد. قطعات آهنربایی از دو بخش محوری که به صورت پشت‌به‌پشت قرار گرفته و یک بخش قوسی شکل که به عنوان پل بین بخش‌های محوری عمل می‌کند تشکیل شده‌اند. این موضوع در خصوص مدولاتورها نیز صادق است. بخش قوسی آهنرباها به صورت شعاعی قطبیده شده و به صورت چرخ‌دنده مغناطیسی شار شعاعی عمل می‌کنند، در حالی که آهنرباهای بخش محوری، به صورت محوری قطبیده شده‌اند. آهنرباهای قوسی در

در این مقاله دو ساختار چرخ‌دنده مغناطیسی شار محوری به صورت پشت‌به‌پشت به یکدیگر متصل گردیده و توسط هسته داخلی، پل‌های قوسی آهنربای دائم، و مدولاتورهای پل شده قوسی، در شعاع خارجی به یکدیگر متصل گردیده‌اند (شکل (۱)). در مقایسه با ساختار شار شعاعی و شار محوری، این ساختار، از لحاظ مغناطیسی مستقل بوده و بخش‌های شعاعی و محوری (به جز نواحی مرز مشترک) تأثیری بر یکدیگر ندارند.

در گام اول، تعیین دقیق توزیع میدان مغناطیسی در فواصل هوایی جهت استخراج مشخصات عملکردی ساختار ارائه شده، مورد نیاز است. با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی، به عنوان روش عددی دقیق، می‌توان توزیع میدان را تعیین نمود. این روش علی‌رغم دقت بالا، زمان تحلیل بالایی را نیاز دارد و امکان تغییرات طراحی در آن با سختی‌های فراوانی روبرو می‌باشد. از این رو، روش نیمه تحلیلی جدیدی، به منظور افزایش سرعت و نیز امکان دسترسی بیشتر در فرایند بهینه‌سازی متغیرهای طراحی توسط ساده‌سازی‌هایی در هندسه مسئله و شرایط مرزی نواحی مختلف ارائه گردیده است. این روش در مقیاس دوبعدی صورت پذیرفته و سپس با استفاده از مدل‌سازی تغییرات توزیع میدان سه‌بعدی المان محدود، به صورت شبه سه‌بعدی مدل می‌گردد [۱، ۱۶].

این روش پیشنهادی به‌ویژه در تحلیل ساختار دولایه قوسی پیشنهادی به شدت تأثیرگذار بوده و فرایند طراحی و بهینه‌سازی را امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین، در این مقاله با الهام از روند اولیه بیان شده در مرجع [۱]، در شعاع متوسط بخش محوری و قوسی (شعاعی)، مدل‌سازی صورت می‌پذیرد. بهینه‌سازی ابعاد چرخ‌دنده به منظور به‌کارگیری آن در یک نیروگاه بادی نوعی، توسط مدل بیان شده، صورت می‌پذیرد.



شکل (۱): اجزای مختلف چرخ‌دنده مغناطیسی دولایه قوسی.

## ۲- ساختار و اصول عملکرد

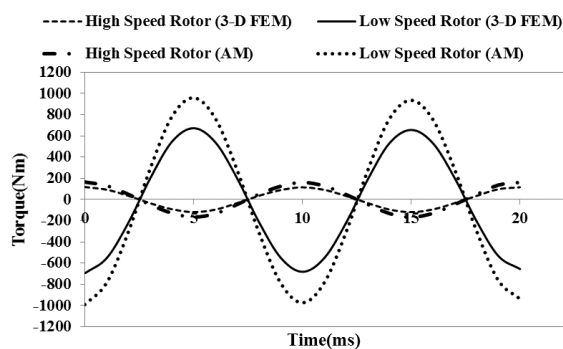
در یک چرخ‌دنده مغناطیسی، میدان مغناطیسی تولید شده توسط

شرایط مرزی و فواصل مشترک به دست می‌آید. اسکالر پتانسیل مغناطیسی در فواصل هوایی و آهنرباها به ترتیب با استفاده از معادلات لاپلاس و پواسون محاسبه می‌گردد. نحوه حل این معادلات و نیز اعمال شرایط مرزی و مؤلفه‌های توزیع میدان مغناطیسی در فواصل هوایی به صورت مفصل در مراجع [۱، ۱۷، ۲۰، ۲۱] ارائه شده است.

روش تحلیلی دوبعدی در شعاع متوسط برای بخش‌های محوری و قوسی چرخ‌دنده انتخاب شده است. این روش تحلیلی با روش عددی المان محدود سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله مورد مطالعه به وسیله برش بخش شار محور چرخ‌دنده در شعاع متوسط، صورت می‌پذیرد. بخش شار شعاعی قوسی شکل نیز با باز کردن قوس حول شعاع متوسط فاصله هوایی سرعت بالا و طول متوسط قوس میانی در فاصله هوایی سرعت بالا در بازه  $[-\pi/2, \pi/2]$  صورت می‌پذیرد.

### ۲-۳- مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی

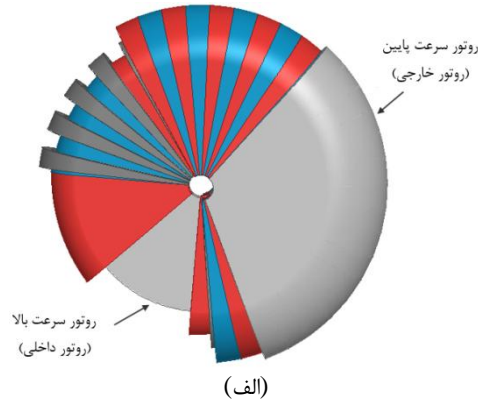
برای تعیین و تحلیل توزیع میدان مغناطیسی و گشتاور چرخ‌دنده دولایه قوسی، یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار المان محدود ANSYS Maxwell با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول (۱)، طراحی گردیده است. با توجه به شکل (۳) نتایج المان محدود سه‌بعدی و تحلیلی دوبعدی برای گشتاور، نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند. روش المان محدود سه‌بعدی به دلیل احتساب دقیق ابعاد، اثر اشباع و نیز اثر شار نشستی به‌ویژه در شعاع‌های داخلی، تحلیل دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. پیش‌بینی بالاتر گشتاور در روش تحلیلی به دلیل عوامل فوق، در حدود ۴۵٪ بالاتر از روش عددی سه‌بعدی می‌باشد. این موضوع محدودیت‌های جدی بر استفاده از روش تحلیلی دوبعدی در فرایند طراحی در پی دارد.



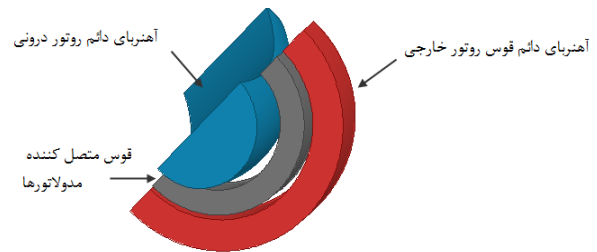
شکل (۳): گشتاور استاتیکی روتورهای سرعت پایین و سرعت بالا با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی (3-D FEM) و روش تحلیلی (AM) در چرخ‌دنده دولایه قوسی

با تحلیل پارامتریک مدل سه‌بعدی چرخ‌دنده دولایه قوسی در نرم‌افزار، با توجه به نسبت تبدیل چرخ‌دنده، گشتاور دندانه‌ای روتور سرعت بالا و سرعت پایین به صورت شکل (۴) به دست می‌آید.

بخش داخلی متفاوت از بخش خارجی می‌باشند (شکل (۲-ب)). بخش قوسی در سرتاسر شعاع خارجی امتداد دارد.



(الف)



(ب)

شکل (۲): ساختار چرخ‌دنده مغناطیسی به صورت برش خورده (الف): نمای روبرو، (ب) قطعات قوسی

### ۳- مدل‌سازی عددی و تحلیلی

#### ۱-۳- مدل‌سازی تحلیلی دوبعدی

مدل‌سازی تحلیلی دوبعدی در فضای استوانه‌ای برای بخش شار محور و نیز بخش قوسی با استفاده از معادلات لاپلاس و پواسون برای بردار پتانسیل مغناطیسی  $(\vec{A})$  در نواحی مختلف به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱، ۱۷، ۲۰، ۲۱]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 (\nabla \times \vec{M}) & \text{in PM regions} \\ \nabla^2 \vec{A} = 0 & \text{in airgap regions} \end{cases} \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

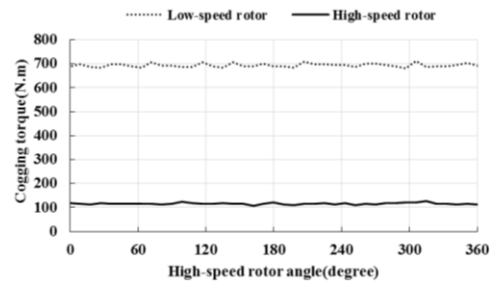
که در آن، بردار مغناطیدگی آهنرباها و  $B$  چگالی شار مغناطیسی می‌باشد. در این مقاله از روش تحلیلی زیر ناحیه‌ای برای حل معادلات فوق در نواحی مختلف چرخ‌دنده استفاده می‌گردد و هندسه چرخ‌دنده به زیر ناحیه‌هایی متناسب با ساختار و جنس ناحیه تقسیم می‌گردد [۱]. معادلات دیفرانسیل جزئی (از معادلات ماکسول) با استفاده از شرایط مرزی از پیش تعیین شده در هر زیرناحیه به روش تفکیک متغیرها حل می‌گردد [۱۷، ۲۰، ۲۱]. توزیع میدان مغناطیسی در هر ناحیه به وسیله



شکل (۵): نمونه چرخ‌دنده مغناطیسی شار شعاعی

نتایج عملی ساختار شار شعاعی صحت نتایج مدل‌سازی المان محدود را تأیید می‌نماید. نتایج نشان داده شده در جدول (۲) چگالی گشتاور بالایی (حدود ۷۰٪) را برای ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار شار شعاعی نشان می‌دهد. روش تحلیلی دوبعدی بیان شده در بخش قبل نیز در چرخ‌دنده دولایه قوسی، چگالی گشتاور را در مقایسه با روش المان محدود سه‌بعدی، حدود ۴۳٪ بالاتر تخمین می‌زند.

مشاهده می‌گردد که درصد گشتاور دندانهای روتور سرعت‌بالا و سرعت‌پایین به ترتیب معادل ۱۷/۸٪ (۲۰/۷۳ Nm) و ۴/۵٪ (۳۰/۱ Nm) می‌باشد. به‌منظور به‌دست آوردن یک دید کلی و امکان‌سنجی برتری طرح مذکور، ساختار پیشنهادی با یک ساختار شار شعاعی فیزیکی (شکل (۵)) مورد مقایسه قرار گرفته است. مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی با نتایج ساختار ساختار شار شعاعی نزدیکی بسیار زیادی دارد.



شکل (۴): گشتاور دینامیکی روتورهای سرعت‌پایین و سرعت‌بالا در چرخ‌دنده دولایه قوسی

جدول (۲): مقایسه چگالی گشتاور ساختارهای شار شعاعی متداول و دولایه قوسی

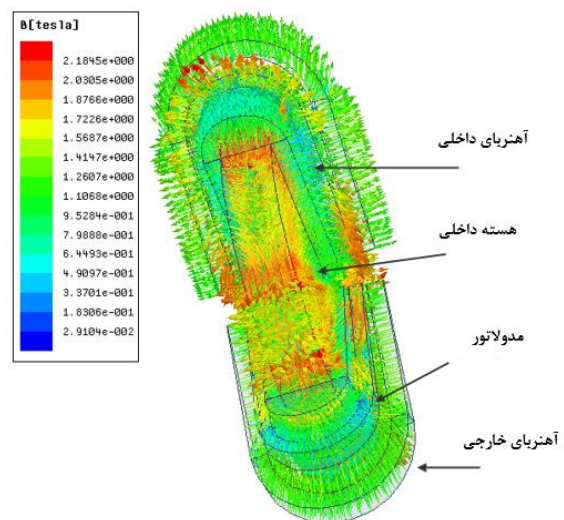
نوع چرخ‌دنده مغناطیسی	نوع تحلیل	گشتاور روتور سرعت‌بالا (Nm)	چگالی گشتاور خروجی (kNm/m <sup>3</sup> )	حجم (m <sup>3</sup> )
دولایه قوسی	المان محدود سه‌بعدی 3-D FEM	۱۱۶	۱۹/۲۷	۶/۱۹ × ۱۰ <sup>-۳</sup>
	تحلیلی دوبعدی (AM)	۱۶۶	۲۷/۵۸	
شار شعاعی	المان محدود سه‌بعدی 3-D FEM	۵/۸	۵/۷۷	۱/۰۰۵ × ۱۰ <sup>-۳</sup>
	آزمون عملی	۵/۰۱	۴/۹۸	

دلیل ضعف و خطای بالای مدل تحلیلی، امکان به‌کارگیری آن در مراحل طراحی وجود نخواهد داشت. لذا بایستی مدلی مناسب با دقت بالا ارائه گردد.

توزیع میدان مغناطیسی سه‌بعدی در ساختار پیشنهادی و تمرکز شار در لبه مدولاتورها در شکل (۶) نشان داده شده است.

### ۳-۳- روش تحلیلی شبه سه‌بعدی

هدف اصلی این بخش استخراج یک روش تحلیلی بهبودیافته مبتنی بر روش‌های معرفی شده در مراجع [۱۷، ۲۰] و بر اساس طرح [۱] می‌باشد. مدل ارائه شده یک مدل شبه سه‌بعدی بهبودیافته از روش تحلیلی دوبعدی می‌باشد که در آن طبیعت سه‌بعدی میدان مغناطیسی در بخش‌های محوری و قوسی با استفاده از فن لایه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، محاسبات کمیات خروجی مدل پیشنهادی را با دقت و سرعت بالا ارائه می‌دهد.



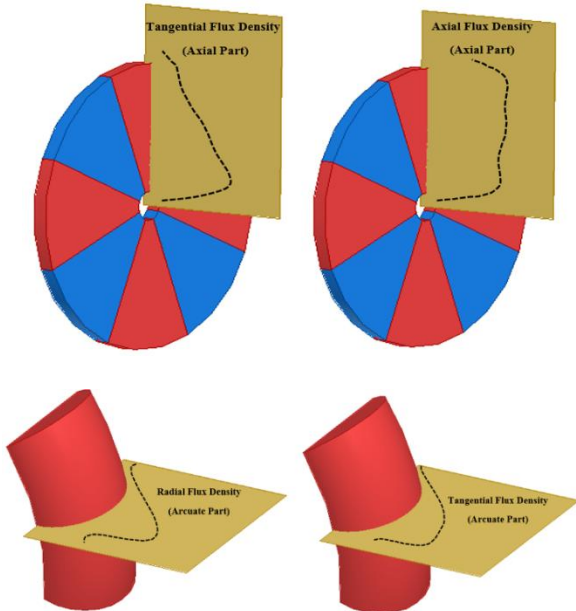
شکل (۶): توزیع برداری چگالی شار مغناطیسی در چرخ‌دنده مغناطیسی دولایه قوسی

نتایج المان محدود سه‌بعدی برای تغییرات مؤلفه‌های محوری و مماسی میدان مغناطیسی سه‌بعدی در زوایای مختلف [۰، ۳۶۰] و در شعاع‌های مختلف [۰/۱m، ۰/۰۱m] برای بخش شار محوری ساختار پیشنهادی در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده است.

با توجه به مجموعه نتایج نشان داده شده، برتری ساختار مذکور و برآورده شدن اهداف پیشنهادی، نشان شد اما به

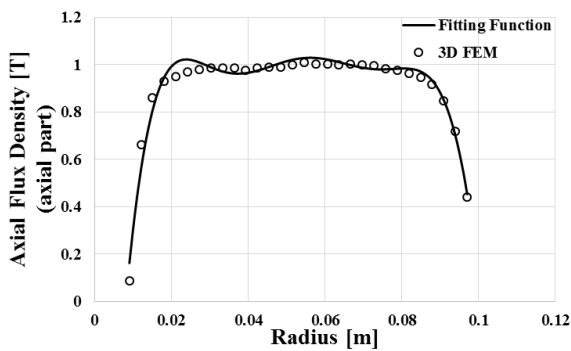


از آنجائی که بیشینه دامنه هر منحنی در شکل (۷) در زاویه‌های متفاوت رخ می‌دهد، لذا هارمونیک چهارم منحنی‌ها (هارمونیک غالب در فاصله هوایی روتور سرعت‌بالا) با استفاده از صفحه متقاطع در وسط اولین قطب N آهنربا به صورت شکل (۸) تعیین می‌گردد.



شکل (۸): صفحات متقاطع (در بخش شار محوری و قوسی) به منظور استخراج بیشینه دامنه هارمونیک چهارم در مؤلفه‌های مختلف چگالی شار مغناطیسی نشان داده شده در شکل (۷).

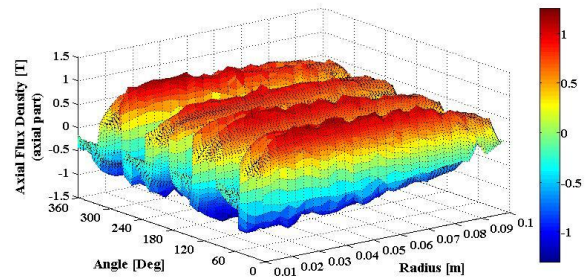
تغییرات بیشینه دامنه هارمونیک چهارم به گونه‌ای استخراج می‌گردند تا منحنی‌هایی به صورت شکل (۹) تشکیل دهند. این شکل‌ها بر اساس چگالی شار در شعاع و ارتفاع متوسط، نرمالیزه شده‌اند. به منظور به‌کارگیری این منحنی‌ها در روش تحلیلی دوبعدی و بهبود دقت و توسعه‌ی شبه سه‌بعدی آن، توابع برازش سازگار با این منحنی‌ها همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است استخراج می‌گردد.



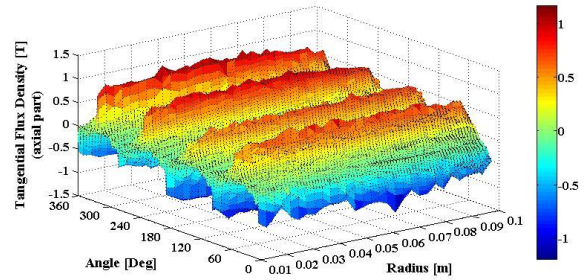
(الف)

شکل (۹): تغییرات نرمالیزه شده بیشینه دامنه هارمونیک چهارم در مؤلفه‌های چگالی شار مغناطیسی شکل (۷)، (الف) مؤلفه شار محوری در بخش شار محوری

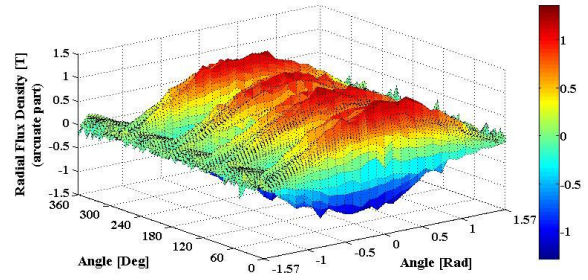
به‌طور مشابه در بخش قوسی (شار شعاعی) طرح پیشنهادی، مؤلفه‌های شعاعی و مماسی میدان مغناطیسی در ارتفاع‌های مختلف  $[-\pi/2, \pi/2]$  و زوایای مختلف  $[0, 360]$  با در نظر گرفتن اثر انتهایی در زاویه اولیه صفر روتورهای مختلف در شکل‌های (۷-ج) و (۷-د) نشان داده شده است.



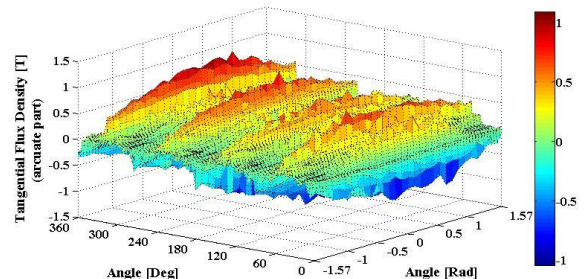
(الف)



(ب)



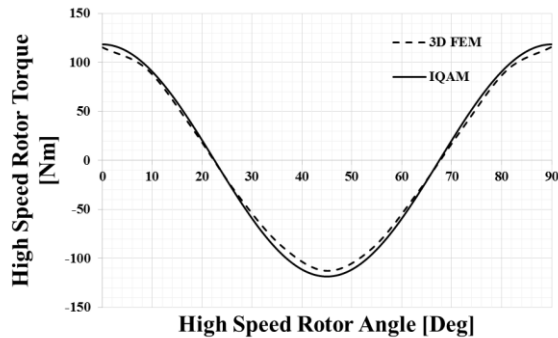
(ج)



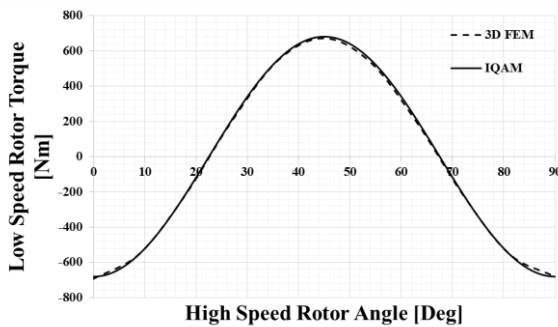
(د)

شکل (۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در وسط فاصله هوایی روتور سرعت‌بالای چرخ‌دنده دولایه قوسی، (الف) مؤلفه محوری در بخش شار محوری، (ب) مؤلفه مماسی در بخش شار محوری، (ج) مؤلفه شعاعی در بخش قوسی، (د) مؤلفه مماسی در بخش قوسی

مدل تحلیلی دوبعدی، گشتاور با استفاده از روش تحلیلی شبه سه بعدی بهبود یافته به دست می آید. همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، این نتیجه با نتایج حاصل از المان محدود سه بعدی سازگاری بالایی دارد.



(الف)



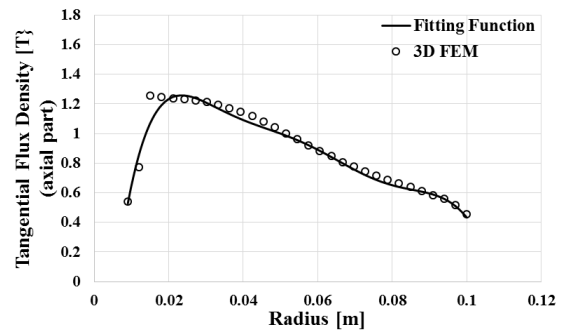
(ب)

شکل (۱۰): گشتاور استاتیکی با استفاده از روش المان محدود سه بعدی و تحلیلی شبه سه بعدی (الف) روتور سرعت بالا (ب) روتور سرعت پایین.

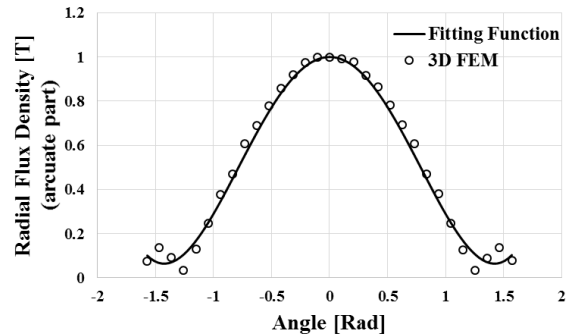
در شکل (۱۰) گشتاور استاتیکی روتور سرعت بالا و سرعت پایین با فرض ثابت بودن روتور مقابل، نشان داده شده است. نتایج، بهبود بسیار زیاد تخمین گشتاور توسط روش تحلیلی شبه سه بعدی را نشان می دهد که برای شروع روند طراحی و بهینه سازی الزامی می باشد. نتایج نهایی در جدول (۴) نشان داده شده است. دقت روش پیشنهادی به منظور به کارگیری در روند بهینه سازی اطمینان بخش بوده و دقت و سرعت بالایی را به همراه دارد. اختلافات جزئی بین روش تحلیلی شبه سه بعدی و المان محدود سه بعدی ناشی از عدم توانایی ذاتی روش تحلیلی در لحاظ نمودن اثر اشباع در هسته و نیز عدم وجود اثر شار نشتی به ویژه در شعاع داخلی در روش تحلیلی پیشنهادی می باشد.

#### ۴-۲- بهینه سازی طراحی

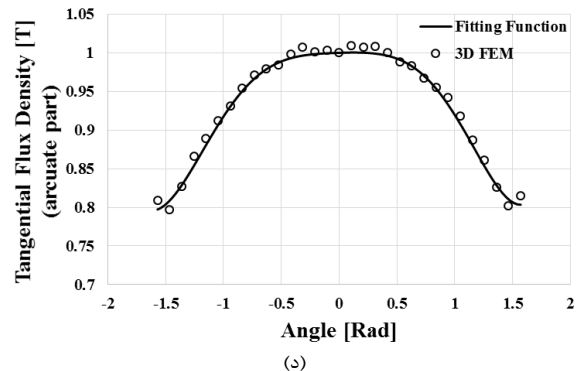
در این بخش بهینه سازی ابعاد ساختار چرخ دنده مغناطیسی دولایه قوسی مورد بررسی قرار می گیرد. یک نیروگاه بادی ۴ kW مفروض بوده و بر اساس محدودیت های حاکم بر آن، یک چرخ دنده مغناطیسی دولایه قوسی برای آن پیشنهاد می گردد [۲۲].



(ب)



(ج)



(د)

ادامه شکل (۹): تغییرات نرمالیزه شده بیشینه دامنه هارمونیک چهارم در مؤلفه های چگالی شار مغناطیسی شکل (۷)، (ب) مؤلفه مماسی در بخش شار محوری، (ج) مؤلفه شعاعی در بخش قوسی، (د) مؤلفه مماسی در بخش قوسی.

تابع زیر نشان دهنده برازش منحنی های فوق (شکل (۹)) می باشد:

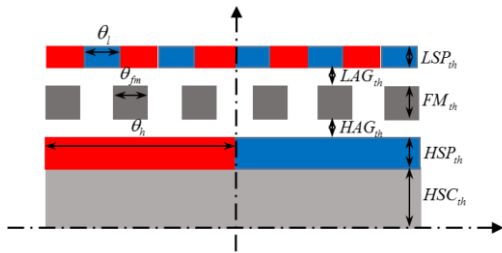
$$f(x) = K(a_0 + \sum_{i=1}^5 [a_i \cos(i\omega x) + b_i \sin(i\omega x)]) \quad (4)$$

ثوابت مربوطه با استفاده از cftool box در نرم افزار متلب بر اساس جدول (۳) به دست می آید.

#### ۴-۳- شبیه سازی و استخراج نتایج

##### ۴-۱- محاسبه گشتاور به روش تحلیلی شبه سه بعدی

با استفاده از رابطه (۵) و اعمال آن در مؤلفه های میدان مرتبط در



شکل (۱۱): پارامترهای بهینه‌سازی چرخ‌دنده دولایه قوسی.

ضخامت آهنرباهای سرعت‌بالای داخلی ( $HSP_{th}$ ) و سرعت‌پایین خارجی ( $LSP_{th}$ )، فواصل هوایی خارجی ( $LAG_{th}$ ) و داخلی ( $HAG_{th}$ )، و مدولاتور ( $FM_{th}$ ) و همچنین هسته داخلی ( $HSC_{th}$ ) همراه با گام قطب آهنربای داخلی ( $\theta_i$ ) و خارجی ( $\theta_h$ ) و نیز مدولاتورها ( $\theta_{fm}$ ) از متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند.

به‌منظور سازگاری با تعداد قطب‌های ژنراتور، روتور سرعت‌بالا با ۳ جفت قطب فرض می‌شود. جهت تولید ولتاژ با فرکانس ۵۰ Hz، بایستی ژنراتور با سرعت ۱۰۰۰ rpm بچرخد، بنابراین، سرعت روتور سرعت‌بالای چرخ‌دنده معادل ۱۰۰۰ rpm خواهد بود. با فرض سرعت نامی ورودی پره توربین معادل ۱۵۰ rpm می‌توان تعداد جفت قطب روتور سرعت‌پایین را معادل ۲۰ و تعداد مدولاتورها را برابر ۲۳ در نظر گرفت. بنابراین، نسبت تبدیل چرخ‌دنده برابر ۶/۶۷ خواهد بود. شعاع‌های خارجی و داخلی چرخ‌دنده نیز به‌منظور امکان ترکیب با ساختار ژنراتور در آینده و نیز صرفه‌جویی در فضای اشغال‌شده، محدود به ابعاد ژنراتور (۱۲۰ mm و ۷۰ mm) در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای بهینه‌سازی ساختار چرخ‌دنده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

جدول (۳): ثوابت و ضرایب توابع برازش

i	بخش قوسی				بخش محوری			
	مؤلفه شعاعی		مؤلفه مماسی		مؤلفه محوری		مؤلفه مماسی	
	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$
۰	۴/۰۸۸۴	-	۱/۶۵۳۹	-	-۱۲/۶۰۳۹	-	-۵/۷۸۲۱	-
۱	۳/۱۷۵۶	۰/۴۶۲۸	-۰/۰۱۷۴	۰/۶۵۹۵	-۹/۹۰۱۶۶	۱۴/۶۴۱۶۹	-۷/۰۴۸۶۱	۹/۹۹۹۸۷۶
۲	-۰/۵۳۳۸	۰/۱۵۵۶	-۲/۰۵۷۰	-۰/۰۱۵۹۱	-۴/۹۲۶۳۳	۱۹/۳۴۶۱۶	۲/۹۱۴۲۴۹	۸/۹۷۰۸۵۹
۳	-۹/۹۹۹۰	-۰/۱۶۶۹	۰/۲۶۰۸	-۰/۷۳۷۳	۱۹/۹۹۹۹۴	۱۴/۲۷۸۰۲	۵/۴۵۴۵۹۱	۱/۳۷۳۳۳۹
۴	-۲/۳۴۳۱	-۰/۳۰۹۶	۱/۳۵۵۲	۰/۵۶۲۶	۹/۲۵۵۵۷۴	-۱۴/۵۶۰۳	۱/۵۹۵۷۹۳	-۱/۷۱۲۷۸
۵	۶/۷۲۶۱	۰/۱۹۴۸	-۰/۶۲۷۴	-۰/۱۳۲۰	-۴/۷۵۳۵۷	-۱/۲۲۵۴۵	-۰/۱۷۵۱۶	-۰/۴۸۲۴۸
$\omega$	۰/۲۲۷۸		-۰/۳۹۶۷		۱۶/۸		۳۲/۹۲	
$K$	۱/۱۰۴۲		۰/۵۶۸۱		۱/۰۰۸۰۴۱		۱/۰۶۱۶۷	

جدول (۴): مقایسه نتایج روش‌های مختلف تحلیلی دوبعدی، تحلیلی شبه سه‌بعدی و المان محدود سه‌بعدی

گشتاور سرعت‌پایین (Nm)	حجم ( $m^3$ )	چگالی گشتاور خروجی ( $kNm/m^3$ )	نوع تحلیل
۶۶۷	$۶/۰۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	۱۱۰/۸	المان محدود سه‌بعدی
۹۵۴	$۶/۰۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	۱۵۸/۵	تحلیلی دوبعدی
۶۵۴	$۶/۰۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	۱۰۸/۶۵	تحلیلی شبه سه‌بعدی بهبود یافته

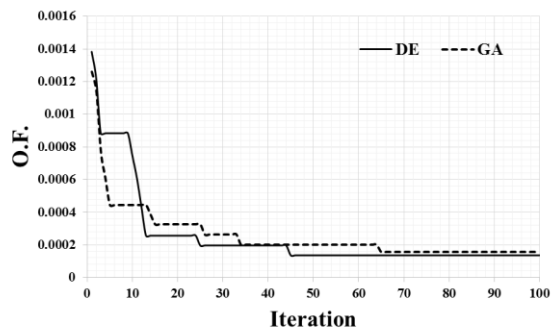
تفاضلی (DE) [۲۶-۲۵]. خطای همگرایی معادل  $10^{-6}$  و حداکثر تکرار ۱۰۰ فرض می‌گردد.

هدف بهینه‌سازی تأمین گشتاور موردنیاز برای ژنراتور جهت تولید توان خروجی نامی، با بیشترین چگالی گشتاور و کمترین حجم ماده آهنربا با تابع هدف تعریف‌شده به‌صورت زیر است:

$$O.F. = \frac{PM \text{ Volume}}{Torque \text{ Density}} \quad (۵)$$

یک مدل سه‌بعدی المان محدود با ابعاد میانگین اجرا گردیده و توابع برازش با روش‌های بیان‌شده در بخش قبل از آن استخراج می‌گردد. یک مدل تحلیلی شبه سه‌بعدی با استفاده از توابع برازش ایجاد و به‌منظور به‌کارگیری در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دو روش بهینه‌سازی اصلی غیر گرادیانی متداول در طراحی ماشین‌های الکتریکی به‌منظور بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد: الگوریتم ژنتیک (GA) [۲۴-۲۳] و الگوریتم تکاملی



شکل (۱۲): منحنی همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و تکاملی تفاضلی.

نتایج بهینه‌سازی در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، الگوریتم ژنتیک گشتاور و چگالی گشتاور بالاتری را ارائه می‌دهد در حالی که الگوریتم تکاملی تفاضلی به دلیل صرفه‌جویی مناسب‌تر در حجم ماده آهنربایی به کاررفته، تابع هدف بهتری را ارائه می‌دهد.

منحنی همگرایی الگوریتم‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. الگوریتم تکاملی تفاضلی همگرایی بهتر و سریع‌تری را در مقایسه با الگوریتم ژنتیک داشته و حدود ۲۵٪ حجم کمتری از آهنربای مصرفی، ۱۰٪ گشتاور پایین‌تر و ۱۴٪ چگالی گشتاور کمتری در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ارائه کرده است. نتایج، برتری و توانایی بالای ساختار پیشنهادی دولایه قوسی و روش تحلیلی پیشنهادی شبه سه‌بعدی در بررسی ساختار مذکور و چگالی گشتاور بالا و رقابت‌پذیر با انواع رایج و متداول چرخ‌دنده مغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی ابعاد و تابع هدف به روش ژنتیک و تکاملی تفاضلی

متغیرهای طراحی	محدودیت‌ها	الگوریتم ژنتیک GA	الگوریتم تکاملی تفاضلی DE
$LSP_{th}$	$2mm \leq LSP_{th} \leq 10mm$	$2mm$	$2mm$
$LAG_{th}$	$1mm \leq LAG_{th} \leq 3mm$	$1mm$	$1mm$
$FM_{th}$	$1mm \leq FM_{th} \leq 10mm$	$1mm$	$2mm$
$HAG_{th}$	$1mm \leq HAG_{th} \leq 3mm$	$1mm$	$1mm$
$HSP_{th}$	$2mm \leq HSP_{th} \leq 10mm$	$4mm$	$3mm$
$HSC_{th}$	$HSP_{th} \leq HSC_{th}$	$6mm$	$5mm$
$\theta_h$	$0.5 \leq \theta_h (pole\ pitch) \leq 1$	$60^\circ (1)$	$60^\circ (1)$
$\theta_i$	$0.5 \leq \theta_i (pole\ pitch) \leq 1$	$9^\circ (1)$	$9^\circ (1)$
$\theta_m$	$0.3 \leq \theta_m (pole\ pitch) \leq 0.8$	$7/182^\circ (-/5)$	$7/182^\circ (-/5)$
$Torque (HS)$	$\geq 50Nm$	$70/61 Nm$	$63/28 Nm$
$Torque\ Density$	$Maximize$	$11\ kNm/m^3$	$9/43\ kNm/m^3$
$PM\ Volume$	$Minimize$	$1/71 * 10^{-3}\ m^3$	$1/28 * 10^{-3}\ m^3$
تابع هدف O.F.	$Minimize$	$1/56 * 10^{-4}$	$1/36 * 10^{-4}$

برازش شده‌ای از نتایج المان محدود تعیین و برای بهبود عملکرد و تعیین مشخصات عملکردی بخش‌های محوری و قوسی چرخ‌دنده مورد استفاده قرار گرفت. گشتاور محاسبه شده برای ساختار پیشنهادی سازگاری بسیار خوبی با روش المان محدود سه‌بعدی

نشان داد. این مدل دقیق و سریع برای فرایند طراحی و بهینه‌سازی و به‌کارگیری در یک نیروگاه بادی نوعی، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بهینه‌سازی ساختار، به روش الگوریتم ژنتیک و تکاملی تفاضلی نشان داده شد. نتایج بهینه‌سازی در مقایسه با نتایج آزمایش عملی یک نمونه شار شعاعی، برتری ساختار پیشنهادی و نیز روش تحلیلی معرفی شده را نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اصول عملکرد و قابلیت انتقال و تبدیل گشتاور یک ساختار جدید چرخ‌دنده مغناطیسی با نام دولایه قوسی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی صحت سنجی گردید. به دلیل خطای ذاتی در روش تحلیلی دوبعدی، یک روش جدید تحلیلی با نام شبه سه‌بعدی بهبود یافته به منظور بررسی ساختار پیشنهادی ارائه گردید. این مدل تحلیلی مبتنی بر تحلیل دوبعدی میدان مغناطیسی در فواصل هوایی بوده و بر اساس میزان وابستگی چگالی شار مغناطیسی در راستای محورهای شعاعی، محوری و مماسی، توابع



## ۶- منابع

- [14] K. Ramu, "Radial-Axial electromagnetic flux electric motor, coaxial electromagnetic flux electric motor, and rotor for same"; US Patent 7,034,422 B2.
- [15] K. Tatematsu, and Y. Yagyu, "Rotary electric machines"; US Patent 2009/0021096A1.
- [16] S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, "A high-performance axial-field magnetic gear," AIP Journal of Applied Physics, Vol. 99, pp. 08R303-08R303-3, Mar. Apr. 2006.
- [17] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, "Development of a 2-D analytical model for the electromagnetic computation of axial-field magnetic gears," IEEE Transaction on Magn., Vol. 49, No. 11, pp. 5507-5521, Nov. 2013.
- [18] K. Atallah, and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Transaction On Magn., Vol. 37, pp. 2844-2846, July 2001.
- [19] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 2, pp. 135-143, Mar. 2004.
- [20] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, "Analytical computation of the magnetic field distribution in a magnetic gear," IEEE Transaction on Magn., Vol. 46, No. 7, pp. 2611-2621, Jul. 2010.
- [21] H. Tiegna, A. Bellara, Y. Amara, and G. Barakat, "Analytical Modeling of the Open-Circuit Magnetic Field in Axial Flux Permanent-Magnet Machines With Semi-Closed Slots," IEEE Transactions on Magn., Vol. 48, No. 3, pp.1212-1226, March 2012.
- [22] R. J. Wang, L. Brönn, S. Gerber, and P. M. Tlali, "Design and evaluation of a disc-type magnetically geared PM wind generator," Fourth International Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG) Istanbul, pp. 1259-1264, 2013.
- [23] G. F. Uler, O. A. Mohammed, and Chang-Seop Koh, "Design optimization of electrical machines using genetic algorithms," IEEE Transactions on Magn., Vol. 31, No. 3, pp. 2008-2011, May 1995.
- [24] G. F. Uler, O. A. Mohammed, and Chang-Seop Koh, "Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices," IEEE Transactions on Magn., Vol. 30, No. 6, pp. 4296-4298, Nov 1994.
- [25] Y. Duan and D. M. Ionel, "A Review of Recent Developments in Electrical Machine Design Optimization Methods With a Permanent-Magnet Synchronous Motor Benchmark Study," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 3, pp. 1268-1275, May-June 2013.
- [26] G. Y. Sizov, D. M. Ionel, and N. A. O. Demerdash, "Multi-objective optimization of PM AC machines using computationally efficient - FEA and differential evolution," IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, pp. 1528-1533, 2011.
- [1] S. A. 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 Magn., Vol. 51, No. 9, pp.1-11, Sept. 2015.
- [2] Xin Yin, P.-D. Pfister, and Youtong Fang, "A Novel Magnetic Gear: Toward a Higher Torque Density," IEEE Transactions on Magn., Vol. 51, No. 11, pp.1-4, Nov. 2015.
- [3] E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, and A. Rezzoug, "Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears," IEEE Transaction on Magn., Vol. 47, No. 2, pp. 439-450, Feb. 2011.
- [4] D. E. Hesmondhalgh, and D. Tipping, "A multielement magnetic gear," IEE Proceedings B in Electric Power Applications, Vol. 127, No. 3, pp.129-138, May 1980.
- [5] K. Tsurumoto, and S. Kikushi, "A new magnetic gear using permanent magnet," IEEE Transaction On Magn., Vol. 23, No. 5, pp.3622-3624, Sep 1987.
- [6] S.A. Afsari, H. Heydari, and E. Bashar, "Viable Arcuate Double-sided Magnetic Gear for Competitive Torque Density Transmission Capability," Journal of Scientia Iranica, Vol. 23, No. 3, pp. 1251-1260, 2016.
- [7] S. Peng, W. N. Fu, and S. L. Ho, "A Novel Triple-Permanent-Magnet-Excited Hybrid-Flux Magnetic Gear and Its Design Method Using 3-D Finite Element Method," IEEE Transaction on Magn., Vol. 50, No. 11, pp. 1-4, Nov. 2014.
- [8] H. Shin, and J. Chang, "Analytical Magnetic Field Calculation of Coaxial Magnetic Gear with Flux Concentrating Rotor," IEEE Transactions on Magn., Vol. 52, No. 7, pp.1-4, July 2016.
- [9] L. Jian and K. T. Chau, "A coaxial magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays," IEEE Transaction on Energy Convers., Vol. 25, No. 2, pp. 319-328, Jun. 2010.
- [10] L. Jian, K. T. Chau, Y. Gong, J. Z. Jiang, C. Yu, and W. Li, "Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies," IEEE Transaction on Magn., Vol. 45, No. 10, pp. 4526-4529, Oct. 2009.
- [11] B. Dianati, H. Heydari and S. A. Afsari, "Analytical Computation of Air-Gap Magnetic Field in a Viable Superconductive Magnetic Gear," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 6, pp. 1-12, Sept. 2016.
- [12] L. Jian, K. T. Chau, W. Li, and J. Li, "A novel coaxial magnetic gear using bulk HTS for industrial applications," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp.981-984, June 2010.
- [13] S. S. Nair, N. Shamsuddeen and S. J. Dhinagar, "A novel electromagnetic core structure for axial radial flux permanent magnet electric motor," 6th IET International Conf. on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), Bristol, pp. 1-6, 2012.

---

**Performance Analysis and Optimization of a Novel Arcuate  
Double-sided Magnetic Gear using Quasi 3-D Analytical  
Modeling for Wind Power Application**

**S. A. Afsari<sup>\*1</sup>**

**University of Kashan, Kashan, Iran**

(Received: 04/11/2018, Accepted: 05/03/2019)

**Abstract**

*This paper highlights the future perspective for novel hybrid radial-axial flux structure magnetic gear, named arcuate double-sided magnetic gear (ADSMG) with the aim of higher torque density transmission. Its performance characteristics are quantitatively analyzed using an improved quasi 3-D analytical method (IQAM) of magnetic field computations (which is an improved and amended version of 2-D analytical method). Results are verified by 3-D finite-element method simulations to enhance the reliability and precision of the analysis. This modeling is carried out by an effective dependent modeling for the different components of magnetic field distribution, based on axial and radial flux magnetic gear topologies, and modified to accurately model the proposed ADSMG structure. Utilization of proposed IQAM for optimization of ADSMG in a typical wind power application is investigated. It is shown that the optimized ADSMG has significant and superior advantages in terms of torque density compared to the traditional MGs.*

**Keywords:** Magnetic Gear, Quasi 3-D, Analytical Method, Arcuate Double-Sided, Torque Density, Finite Element Method

---

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