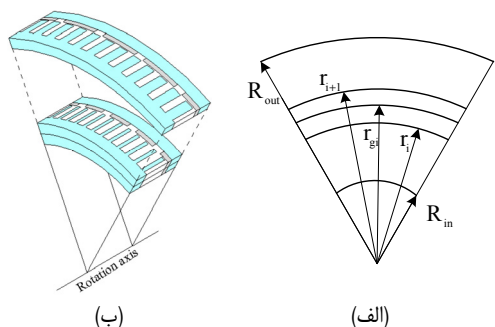


محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری در ماشین شارمحور آهن‌ربای دایم با استفاده از روش تحلیلی شبه سه‌بعدی

محمدرضا علیزاده پهلوانی، یوسف شهبازی آیت و ابوالفضل واحدی



شکل ۱: تقسیم ماشین شارمحوری چندین لایه نازک، (الف) نمای دوبعدی و (ب) نمای سه‌بعدی [۱۶].

تسهیل کند.

در چند سال اخیر، کارهای تحقیقاتی بر روی روش‌های تحلیلی انجام شده است که مبتنی بر حل معادلات ماکسول در نواحی چندگانه ماشین می‌باشد. به طور کلی مسایل میدان مغناطیسی به روش تحلیلی می‌تواند بر اساس پتانسیل مغناطیسی اسکالر و یا برداری فرمول‌بندی و محاسبه شوند [۷] تا [۲۰]. روش‌های تحلیلی ارائه‌شده را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد.

دسته اول، مقالاتی است که ماشین شارمحوری را بر اساس شعاع متوسط مانند یک ماشین خطی در نظر گرفته‌اند و با فرض این که تفاضل شعاع بیرونی و درونی خیلی بزرگ‌تر از گام قطب است، به تحلیل مدل دوبعدی ماشین پرداخته‌اند که می‌توان به [۱۱] تا [۱۳] اشاره کرد.

دسته دوم مقالاتی است که تحلیل مدل دوبعدی تنها برای شعاع متوسط انجام نمی‌شود و برای شعاع‌های مختلف ماشین تحلیل دوبعدی انجام می‌شود. در این روش ابتدا ماشین به چندین لایه مطابق شکل ۱ تقسیم می‌شود. طبق شکل، هر لایه دارای یک شعاع درونی و یک شعاع بیرونی است. شعاع متوسط هر لایه طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$r_{gi} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} \quad (1)$$

که در آن r_i ، r_{i+1} و r_{gi} به ترتیب شعاع داخلی، شعاع خارجی و شعاع متوسط لایه i ام می‌باشند.

مدل تحلیلی دوبعدی برای هر لایه در شعاع متوسط آن انجام می‌شود و در نهایت شارهای اولیه که توسط هر لایه تولید می‌شوند با هم جمع می‌شوند. مراجع [۱۴] تا [۱۶] از جمله مقالاتی هستند که از این روش در آنها استفاده شده است.

دسته سوم، مقالاتی است که مدل تحلیلی سه‌بعدی ماشین شارمحوری را با انجام یک سری ساده‌سازی‌ها و مفروضات در دستگاه مختصات استوانه‌ای ارائه داده‌اند. این روش گرچه کامل‌ترین روش برای تحلیل ماشین است اما نمی‌تواند ساختارهای متفاوت و اشکال گوناگون آهن‌رباها را لحاظ کند و فقط برای آهن‌رباهای شعاعی قابل استفاده است. شکل ۲ نمونه‌ای از آهن‌رباهای شعاعی را نشان می‌دهد. همچنین در این روش‌ها

چکیده: در این مقاله یک روش تحلیلی شبه سه‌بعدی برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری ماشین شارمحور آهن‌ربای دایم ارائه شده است. این روش به صورت ترکیبی از حل تحلیلی دوبعدی میدان مغناطیسی و استفاده از یک تابع اصلاح برای لحاظ اثر شعاعی ماشین بر روی توزیع میدان مغناطیسی می‌باشد. تابع اصلاح به صورت تحلیلی و با استفاده از پرنانس‌های فاصله هوایی و پرنانس‌های نشتی به دست آمده است. این روش تحلیلی دارای زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد و از این رو می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت اعتبارسنجی نتایج روش تحلیلی ارائه‌شده با استفاده از تحلیل افزار المان محدود انجام شده است.

کلیدواژه: ماشین‌های شارمحور، آهن‌ربای دایم، میدان‌های مغناطیسی، روش تحلیلی، معادلات ماکسول.

۱- مقدمه

ماشین‌های شارمحوری به عنوان ماشین‌هایی با چگالی توان بالا شناخته شده‌اند که دارای ساختارهای متنوعی می‌باشند [۱] تا [۵]. از ماشین‌های شارمحوری به طور فزاینده‌ای در صنعت استفاده می‌شود که می‌توان به کاربردهایی چون استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی و توربین‌های بادی اشاره کرد [۶] تا [۱۰].

مدل‌سازی دقیق ماشین‌های شارمحوری مستلزم استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود سه‌بعدی می‌باشد که به کمک آنها می‌توان ساختارهای پیچیده ماشین را شبیه‌سازی نمود و نتایج بسیار دقیقی به دست آورد. اما پروسه شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای المان محدود بسیار زمان‌بر می‌باشد به خصوص برای زمانی که بهینه‌سازی ماشین مد نظر است و شبیه‌سازی‌ها باید برای اشکال هندسی مختلف و متعدد ماشین انجام پذیرد.

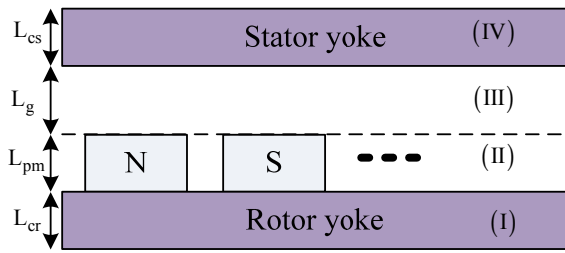
در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی می‌توان از روش‌های تحلیلی در کنار نرم‌افزارهای المان محدود بهره جست. استفاده از روش تحلیلی می‌تواند زمان طراحی و بهینه‌سازی را به شدت کاهش دهد. استفاده از روش‌های تحلیلی علاوه بر کاهش زمان محاسبات، اثر ساختار ماشین بر روی توزیع چگالی شار مغناطیسی را معین و مشخص می‌سازد که می‌تواند مطالعات پارامتری و آنالیز حساسیت بر روی ماشین را

این مقاله در تاریخ ۲۷ مهر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۱ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

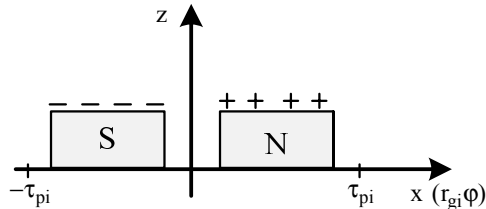
محمدرضا علیزاده پهلوانی، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، (email: mr_alizadehp@iust.ac.ir).

یوسف شهبازی آیت، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، (email: yusef.shahbazi@gmail.com).

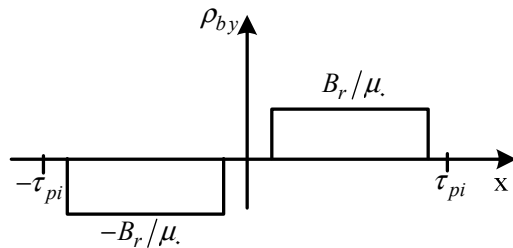
ابوالفضل واحدی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: avahedi@iust.ac.ir).



شکل ۴: مدل دوبعدی لایه i ام ماشین.



شکل ۵: توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی آهن‌رباها.



شکل ۶: توزیع چگالی بار مغناطیسی آهن‌رباها.

- خاصیت مغناطیسی برای آهن‌رباها به صورت خطی می‌باشد.
- آهن‌رباها در راستای محوری مغناطیس شده‌اند.

۳- محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری در فاصله هوایی

شکل ۴ مدل ماشین در شعاع r_{gi} را نشان می‌دهد. r_{gi} طبق (۲) به شعاع داخلی و شعاع خارجی ماشین و نیز به تعداد لایه‌ها وابسته است

$$r_{gi} = R_{in} \left(1 - \frac{i}{N} + \frac{1}{2N}\right) + R_{out} \left(\frac{i}{N} - \frac{1}{2N}\right) \quad (2)$$

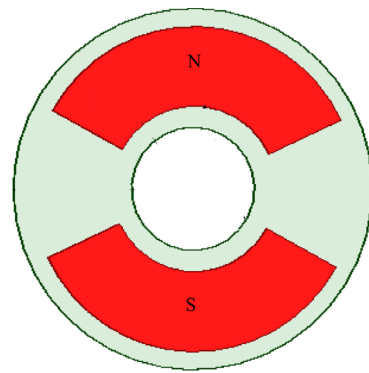
که در آن R_{in} ، R_{out} و N به ترتیب شعاع داخلی ماشین، شعاع خارجی ماشین و تعداد لایه‌ها می‌باشد.

در این تحقیق برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری از پتانسیل مغناطیسی اسکالر استفاده شده است. شکل ۵ توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی سطح آهن‌رباها در شعاع دلخواه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

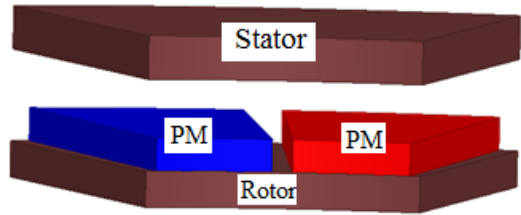
چگالی بارهای مغناطیسی فرضی در سطح آهن‌رباها می‌تواند مطابق (۳) لحاظ شود [۱۷]

$$\rho_b = \begin{cases} \frac{+B_r}{\mu}, & \text{N poles} \\ \frac{-B_r}{\mu}, & \text{S poles} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن ρ_b چگالی بار مغناطیسی فرضی در سطح آهن‌رباها، B_r چگالی شار باقیمانده آهن‌رباها و μ ضریب نفوذپذیری خلأ می‌باشد. شکل ۶ چگالی بار مغناطیسی آهن‌رباها را نشان می‌دهد که می‌تواند با استفاده از سری فوریه به صورت (۴) بیان شود



شکل ۲: آهن‌رباهای شعاعی قرار گرفته بر روی سطح روتور.



شکل ۳: ساختار ماشین شارمحوری تک‌وجهی.

در مدل تحلیل، معادلات بسط ظاهر می‌شوند که محاسبات را پیچیده و دشوار می‌سازند. مراجع [۱۷] و [۱۸] از جمله مراجعی هستند که روش تحلیلی سه‌بعدی در آنها استفاده شده است.

دسته چهارم، مقالاتی هستند که در آنها از روش تحلیلی دوبعدی در لایه‌های مختلف ماشین مشابه کار دسته دوم استفاده شده و برای لحاظ اثر شعاع‌های درونی و بیرونی، یک تابع اصلاح تعریف شده است. برای به دست آوردن ضرایب تابع اصلاح از نرم‌افزار المان محدود استفاده گردیده و به همین دلیل این روش با نام روش شبه‌تحلیلی نام‌گذاری شده است. مراجع [۱۹] و [۲۰] از مراجعی هستند که از این روش استفاده کرده‌اند.

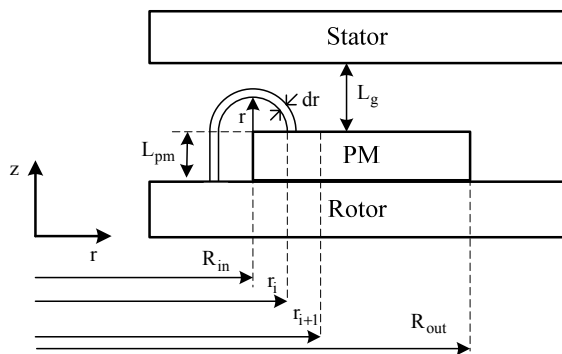
در این مقاله، یک روش تحلیلی شبه سه‌بعدی برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی ماشین مغناطیس دایم شارمحوری ارائه شده است که ابتدا چگالی شار مغناطیسی را در لایه‌های مختلف ماشین شارمحوری محاسبه می‌کند و سپس با توجه به ابعاد ماشین یک تابع اصلاح تعریف می‌شود که اثر شعاع را در لایه‌های درونی و بیرونی ماشین شارمحوری لحاظ می‌کند. تابع اصلاح به کمک روش‌های تحلیلی و بدون استفاده از نرم‌افزار به دست آمده است. تفاوت روش ارائه‌شده در این مقاله با [۱۹] و [۲۰] آن است که در [۱۹] و [۲۰] برای به دست آوردن تابع اصلاح از نرم‌افزار المان محدود استفاده شده ولی در این مقاله از روش تحلیلی و بدون استفاده از نرم‌افزار المان محدود تابع اصلاح به دست آمده است.

۲- ساختار ماشین و مفروضات مسئله

در این مقاله ساختار ماشین شارمحوری به صورت تک‌وجهی در نظر گرفته شده که شامل یک روتور با آهن‌رباهای دایم و یک استاتور می‌باشد. روش ارائه‌شده می‌تواند برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در ساختارهای چندوجهی نیز به کار برده شود. شکل ۳ بخشی از ساختار ماشین را نشان می‌دهد.

به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات در روش تحلیلی مفروضات زیر لحاظ گردیده است:

- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته‌های روتور و استاتور بی‌نهایت فرض شده و بنابراین اشباع در هسته‌های آهنی رخ نخواهد داد.



شکل ۸: وجود شارهای ناشی در لایه i ام در نزدیکی شعاع داخلی.

با توجه به وجود چگالی بار مغناطیسی در مرز دو محیط، یکی دیگر از شرایط مرزی در مرز بین دو محیط (II) و (III) به صورت $B_{z\tau} - B_{z\tau} = B_r$ می‌باشد که در آن $B_{z\tau}$ و $B_{z\tau}$ به ترتیب چگالی شار مغناطیسی در نواحی (II) و (III) هستند.

با استفاده از روش جداسازی متغیرها و با توجه به نحوه توزیع چگالی بار مغناطیسی در راستای محیطی که به صورت تابعی فرد می‌باشد، در ناحیه (II) و (III) جواب کلی معادله لاپلاس به صورت (۱۱) و (۱۲) است

$$V_{m\tau}(x, z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} z\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} x\right) \quad (11)$$

$$V_{m\tau}(x, z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} (z - L_{PM} - L_g)\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} x\right) \quad (12)$$

ضرایب A و B در روابط بالا می‌توانند با استفاده از شرایط مرزی به دست آیند. در نهایت مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد

$$B_{z\tau} = -\mu \frac{\partial V_{m\tau}}{\partial z} \quad (13)$$

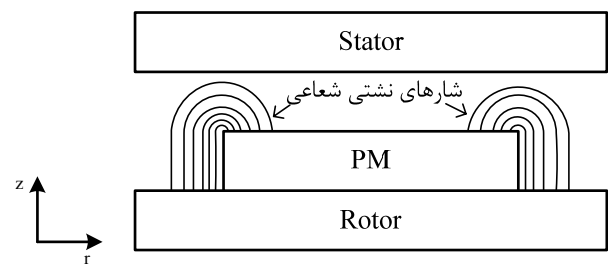
که به صورت (۱۴) خواهد شد. چگالی شار مغناطیسی به دست آمده، اثر شار ناشی در لبه‌های شعاع‌های داخلی و خارجی را لحاظ نمی‌کند. در این مقاله برای لحاظ اثر شعاعی ماشین از یک تابع اصلاح استفاده شده که در بخش بعد نحوه به دست آوردن آن توضیح داده شده است. در نهایت با داشتن تابع نسبت، چگالی شار فاصله هوایی برای هر بخش به صورت رابطه زیر قابل محاسبه خواهد شد

$$B_z(r_{gi}) = -g(r_{gi}) \mu \frac{\partial V_{m\tau}}{\partial z} \quad (15)$$

۴- تعریف تابع اصلاح جهت لحاظ اثر شعاعی ماشین

شکل ۷ شارهای ناشی مربوط به شعاع‌های داخلی و خارجی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد و شکل ۸ شار ناشی برای لایه i ام را که در نزدیکی شعاع داخلی قرار دارد به تصویر می‌کشد. در این مقاله تابع اصلاح به صورت نسبت پرمانس فاصله هوایی به مجموع پرمانس‌های فاصله هوایی و پرمانس ناشی برای لایه i ام تعریف می‌شود و به صورت (۱۶) می‌باشد

$$B_{z\tau} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} -\mu \times \rho_n \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} x\right) \times \left(\mu_r \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} L_g\right) \coth\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} L_{PM}\right) + \cosh\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} L_g\right)\right) \quad (14)$$



شکل ۷: وجود شارهای ناشی در لبه‌های شعاعی.

$$\rho_{bn}(x) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \rho_n \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} x\right) \quad (4)$$

$$\rho_n = \frac{\Psi B_r}{n\pi\mu} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{pi}}{\tau}\right) \times (-1)^{\frac{n+1}{2}}$$

که در آن α_{pi} و τ_{pi} به ترتیب گام قطب و نسبت قوس قطب به گام قطب در شعاع متوسط لایه i ام ماشین می‌باشند. گام قطب لایه i ام به صورت $\tau_{pi} = \pi r_{gi} / p$ قابل تعریف است که در آن p تعداد جفت قطب‌های ماشین است.

با توجه به عدم وجود جریان الکتریکی در محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری، پتانسیل مغناطیسی اسکالر در معادله لاپلاس صدق می‌کند که در حالت دوبعدی و در دستگاه مختصات دکارتی به صورت (۵) می‌باشد

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

که V_m پتانسیل مغناطیسی اسکالر و x و z به ترتیب راستای محیطی و محوری دستگاه مختصات می‌باشند. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی طبق (۶) و (۷) با پتانسیل مغناطیسی اسکالر در ارتباط هستند

$$H_x = -\frac{\partial V_m}{\partial x} \quad (6)$$

$$H_z = -\frac{\partial V_m}{\partial z} \quad (7)$$

که در روابط فوق H_x و H_z به ترتیب مؤلفه محیطی و مؤلفه محوری میدان مغناطیسی می‌باشند.

با توجه به فرض بی‌نهایت بودن ضریب نفوذپذیری هسته‌های آهنی روتور و استاتور، میدان مغناطیسی در ناحیه (I) و (IV) شکل ۴، صفر می‌باشد. صفر بودن میدان مغناطیسی، یک پتانسیل مغناطیسی اسکالر ثابت را نتیجه می‌دهد که این مقدار ثابت می‌تواند برابر صفر لحاظ شود $(V_{m1} = V_{m4} = 0)$.

پیوستگی پتانسیل، شرایط مرزی زیر را موجب می‌شود

$$V_{m\tau}(x, z=0) = V_{m1}(x, z=0) \quad (8)$$

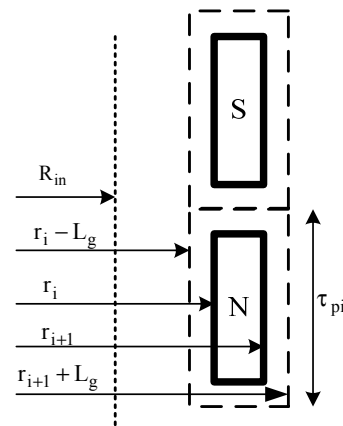
$$V_{m\tau}(x, z=L_{pm}+L_g) = V_{m4}(x, z=L_{pm}+L_g) \quad (9)$$

$$V_{m\tau}(x, z=L_{pm}) = V_{m\tau}(x, z=L_{pm}) \quad (10)$$

در روابط فوق V_{m1} ، V_{m4} ، $V_{m\tau}$ و $V_{m\tau}$ به ترتیب پتانسیل مغناطیسی در نواحی (I)، (II)، (III) و (IV) می‌باشند. همچنین L_{pm} ضخامت آهن‌رباها و L_g فاصله میان سطح آهن‌رباها تا سطح استاتور می‌باشند.

جدول ۱: مشخصات ماشین شارمخور آهنربای دایم مورد مطالعه.

۱۰	p	تعداد جفت قطبها
۱,۲۳ [T]	B_r	چگالی شار باقیمانده آهنرباها
$4\pi \times 10^{-7}$	μ	ضریب نفوذپذیری نسبی آهنرباها
۱/۱	μ_r	ضریب نفوذپذیری نسبی آهنرباها
۴ [mm]	L_{pm}	ضخامت آهنربا
۳۰۰ [mm]	D_o	قطر خارجی ماشین
۱۳۵ [mm]	D_i	قطر داخلی ماشین
۰,۸۵	α_p	قوس قطب به گام قطب
۵ [mm]	L_{cr}	ضخامت یوغ روتور
۵ [mm]	L_{cs}	ضخامت یوغ استاتور
۶,۵ [mm]	L_g	طول مؤثر فاصله هوایی



شکل ۹: سطح مقطع در نظر گرفته شده برای محاسبه پرمانس فاصله هوایی.

لازم به ذکر است که تابع اصلاح، تابعی از ابعاد هندسی ماشین بوده و بر روی لایه‌هایی اعمال می‌شود که در روابط زیر صدق کنند

$$\begin{cases} r_{gi} - R_{in} \leq L_g & \text{در نزدیکی شعاع داخلی} \\ R_{out} - r_{gi} \geq L_g & \text{در نزدیکی شعاع خارجی} \end{cases} \quad (20)$$

با توجه به رابطه فوق تعداد لایه‌هایی که تابع اصلاح باید در آنها اعمال شود، از (۲۱) قابل محاسبه می‌باشد

$$N_1 = \frac{NL_g}{R_{out} - R_{in}} + 0,5 \quad (21)$$

در رابطه فوق در صورتی که مقدار N_1 عددی صحیح نباشد، نزدیک‌ترین عدد صحیح به مقدار N_1 انتخاب می‌شود.

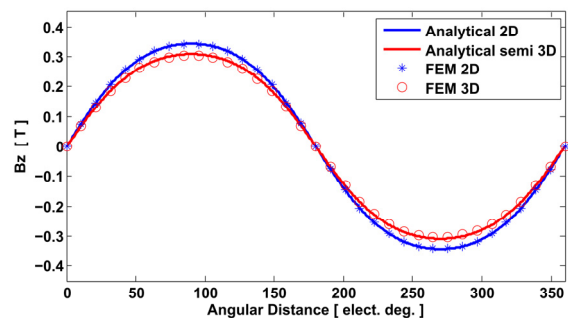
۵- اعتبارسنجی روش تحلیلی شبه سه‌بعدی

در این بخش، چگالی شار مغناطیسی بی‌باری یک نمونه ماشین شارمخوری با استفاده از روش تحلیلی ارائه‌شده به دست آمده و با نتایج ناشی از المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی مقایسه شده است. جدول ۱ مشخصات ماشین شارمخوری مورد نظر را نشان می‌دهد. تعداد لایه‌های در نظر گرفته شده برای ماشین، ۵ لایه می‌باشد. با توجه به تعداد لایه‌ها، تابع اصلاح باید به لایه اول و لایه آخر اعمال شود و ۳ لایه وسط نیازی به اعمال تابع اصلاح ندارند.

شکل ۱۰ چگالی شار مغناطیسی ناشی از لایه اول را در نزدیکی سطح استاتور را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۱۰ قابل مشاهده است روابط تحلیلی دوبعدی تطبیق خوبی با المان محدود دوبعدی دارد اما اثر شار نشستی در لبه‌های شعاعی نادیده گرفته شده است. با استفاده از تابع اصلاح و استفاده از روش تحلیلی شبه سه‌بعدی اثر لبه‌های شعاعی لحاظ شده و نتایج حاصل از آن تطابق بسیار خوبی با المان محدود سه‌بعدی دارد.

شکل ۱۱ چگالی شار مغناطیسی ناشی از لایه دوم را در نزدیکی سطح استاتور نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۱۱ قابل مشاهده است، تطابق خوبی میان چهار روش محاسبه چگالی شار مغناطیسی محوری وجود دارد و تابع اصلاح در این حالت برابر واحد است. در لایه‌های سوم و چهارم نیز مشابه لایه دوم تطابق خوبی میان چهار روش محاسبه چگالی شار مغناطیسی محوری وجود دارد.

شکل ۱۲ چگالی شار مغناطیسی ناشی از لایه پنجم (لایه بیرونی) را در نزدیکی سطح استاتور را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۱۲ قابل



شکل ۱۰: تغییرات مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی بر حسب فاصله محیطی در لایه درونی.

$$g(r_{gi}) = \frac{P_{gi}}{P_{gi} + P_{rgi}} \quad (16)$$

که در آن P_{gi} پرمانس فاصله هوایی و P_{rgi} پرمانس نشستی آهنربا در راستای شعاعی می‌باشند.

شکل ۹ سطح مقطع در نظر گرفته شده برای پرمانس فاصله هوایی را برای لایه i ام نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، پرمانس نشستی در راستای شعاعی شامل یک مسیر نیم‌دایره به اندازه πr و یک مسیر مستقیم به اندازه ضخامت آهنربا می‌باشد که به صورت (۱۷) است

$$P_{rgi} = \int_{r_i - R_{in}}^{r_{i+1} - R_{in} + L_g} \frac{\mu_r w_{pi}}{\pi r + L_{pm}} dr = \frac{\mu_r w_{pi}}{\pi} \ln \frac{r_{i+1} - R_{in} + \frac{L_{pm}}{\pi}}{r_i - R_{in} + \frac{L_{pm}}{\pi}} \quad (17)$$

که در آن w_{pi} قوس قطب در لایه i ام است. مقدار پرمانس فاصله هوایی با توجه به شکل ۹ به صورت (۱۸) می‌باشد

$$P_{gi} = \int_{r_i - L_g - R_{in}}^{r_{i+1} + L_g - R_{in}} \frac{\mu_r \tau_{pi}}{L_g} dr = \frac{\mu_r \tau_{pi} (r_{i+1} - r_i + 2L_g)}{L_g} \quad (18)$$

در نهایت تابع اصلاح در راستای شعاعی با توجه به ابعاد ماشین و به صورت رابطه زیر قابل بیان می‌باشد

$$g(r_{gi}) = \frac{\pi (r_{i+1} - r_i + 2L_g) \tau_{pi}}{\pi (r_{i+1} - r_i) \tau_{pi} + L_g w_{pi} \ln \frac{r_{i+1} - R_{in} + \frac{L_{pm}}{\pi}}{r_i - R_{in} + \frac{L_{pm}}{\pi}}} \quad (19)$$

applications brooking," in *Proc. Int. Conf. Power Electronics Machines and Drives*, pp. 153-158, 4-7 Jun. 2002.

[5] M. Andriollo, M. De Bortoli, G. Martinelli, A. Morini, and A. Tortella, "Permanent magnet axial flux disc generator for small wind turbines," in *Int. Conf. Electrical Machines*, 6 pp., 2008.

[6] R. J. Wang, M. J. Kamper, K. Van der Westhuizen, and J. F. Gieras, "Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 1, pp. 55-64, Jan. 2005.

[7] S. Brisset, D. Vizireanu, and P. Brochet, "Design and optimization of a nine-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 707-715, 6-9 Sept. 2008.

[8] T. F. Chan and L. L. Lai, "An axial-flux permanent-magnet synchronous generator for a direct-coupled wind-turbine system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 86-94, Mar. 2007.

[9] S. Javadi and M. Mirsalim, "A coreless axial-flux permanent-magnet generator for automotive applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 12, pp. 4591-4598, Dec. 2008.

[10] S. Javadi and M. Mirsalim, "Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent-magnet generators for automotive applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 4, pp. 1015-1023, Apr. 2010.

[11] Z. Q. Zhu, D. Howe, E. Bolte, and B. Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part i: open-circuit field," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 1, pp. 124-135, Jan. 1993.

[12] E. P. Furlani, "Computing the field in permanent-magnet axial-field motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 5, pp. 3660-3663, Sep. 1994.

[13] J. R. Bumby, R. Martin, M. A. Mueller, E. Spooner, N. L. Brown, and B. J. Chalmers, "Electromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines," in *Proc. Inst. Electr. Eng. Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 151-159, Mar. 2004.

[14] F. Marignetti, G. Tomassi, and J. Bumby, "Electromagnetic modeling of permanent magnet axial flux motors and generators," *Compel*, vol. 25, no. 2, pp. 510-522, 2006.

[15] P. Virtic, P. Pisek, M. Hadziselimovic, T. Marcic, and B. Stumberger, "Torque analysis of an axial flux permanent magnet synchronous machine by using analytical magnetic field calculation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1036-1039, Mar. 2009.

[16] 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 Trans. Magn.*, vol. 48, no. 3, pp. 1212-1226, Mar. 2012.

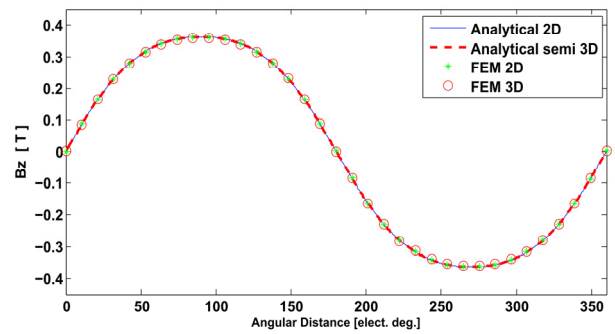
[17] Y. Huang, B. Ge, J. Dong, H. Lin, J. Zhu, and Y. Guo, "3-D analytical modeling of no-load magnetic field of ironless axial flux permanent magnet machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 2929-2932, Nov. 2012.

[18] O. De la Barriere, S. Hlioui, H. Ben Ahmed, M. Gabsi, and M. LoBue, "3-D formal resolution of maxwell equations for the computation of the no-load flux in an axial flux permanent-magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 1, pp. 128-136, Jan. 2012.

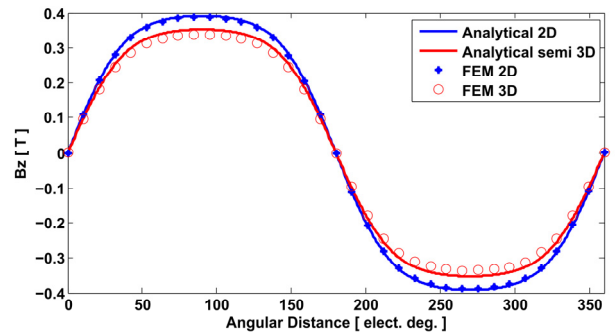
[19] J. Azzouzi, G. Barakat, and B. Dakyo, "Quasi-3-D analytical modeling of the magnetic field of an axial-flux permanent-magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 748-752, Dec. 2005.

[20] H. Tiegna, Y. Amara, and G. Barakat, "A new quasi-3-D analytical model of axial flux permanent magnet machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, pp. 748-752, Feb. 2014.

محمد رضا علیزاده پهلوانی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۸ نامبرده به عنوان محقق سیستم‌های قدرت در مرکز تحقیقات کنترل دانشگاه صنعتی مالک اشتر به کار مشغول بود و در سال ۱۳۸۲ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت وارد گردید و در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر علیزاده از سال ۱۳۸۸ در مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه دانشیاری می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی بر حسب فاصله محیطی در لایه دوم.



شکل ۱۲: تغییرات مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی بر حسب فاصله محیطی در لایه خارجی.

مشاهده است روابط تحلیلی دوبعدی تطبیق خوبی با المان محدود دوبعدی دارد اما اثر شار نشتی در لبه‌های شعاعی نادیده گرفته شده است. با استفاده از تابع اصلاح و استفاده از روش تحلیلی شبه سه‌بعدی اثر لبه‌های شعاعی لحاظ شده و نتایج حاصل از روش تحلیلی شبه سه‌بعدی تطابق بسیار خوبی با المان محدود سه‌بعدی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تحلیلی شبه سه‌بعدی با استفاده از معادلات ماکسول و حل معادله لاپلاس برای محاسبه چگالی شار بی‌باری ماشین شارمخوردی ارائه شده است. برای در نظر گرفتن شارهای نشتی در شعاع‌های داخلی و خارجی ماشین از یک تابع اصلاح استفاده شده است. روش پیشنهادی دارای دقت بسیار خوبی بوده و تطابق بسیار خوبی با نتایج المان محدود سه‌بعدی دارد و نتایج دقیق‌تری نسبت به المان محدود دوبعدی دارد. روش تحلیلی ارائه‌شده دارای زمان محاسباتی بسیار کمی در مقایسه با نرم‌افزار المان محدود می‌باشد و می‌تواند برای طراحی و بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت ماشین مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] F. Giulii Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, "Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, pp. 2190-2205, Nov./Dec. 2012.

[2] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, "Axial flux permanent magnet disc machines: a review," in *Proc. of Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM'04*, pp. 61-71, Jun. 2004.

[3] J. F. Eastham, et al., "Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 5, pp. 3003-3005, Sep. 2002.

[4] P. Brooking and J. R. Bumby, "An integrated engine-generator set with power electronic interface for hybrid electric vehicle

ابوالفضل واحدی در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت نمود و مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۴ از دانشگاه پلی تکنیک لورن فرانسه به پایان رسانده است و هم اکنون استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت می‌باشد. نامبرده پروژه‌های متعددی در زمینه ماشین‌های الکتریکی متداول و مخصوص و درایو آن‌ها راهنمایی کرده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل طراحی، پیاده‌سازی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی از جمله موتورهای وسایل نقلیه و درایو می‌باشد.

یوسف شهبازی آیت در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. نامبرده در سال ۱۳۹۰ در دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران پذیرفته شد و اینک نیز دانشجوی دکترای مهندسی برق در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران می‌اشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی، روش‌های تحلیلی و عددی در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.