

# استخراج معادلات میدان در ماشینهای دیسکی مغناطیس

## دایم در فضای دو بعدی و شرایط بی‌باری

مریم بهرامگیری<sup>۱</sup>؛ سهراب امینی ولاشانی<sup>ii</sup>

### چکیده

با توجه به این که میکروتوربین - ژنراتورها از نمودهای با اهمیت و در حال توسعه و از تولیدات پراکنده است که تا انتهای دهه میلادی جاری درصد قابل توجهی از ظرفیت تولید و به ویژه تولیدات پراکنده را تسخیر خواهند کرد، دستیابی به دانش فنی طراحی و ساخت این ادوات، اهمیت فراوانی دارد. با فرض این نکته و با عنایت به اهمیت زیاد تعیین مقادیر میدان در فضای داخلی میکروژنراتور برای تدوین روند طراحی، در این مقاله پس از اشاره به کارآمدی ساختارهای با روتور دیسکی نسبت به روتورهای گرد، روش جدیدی برای تعیین مقادیر میدان بر مبنای معادلات ماکسول ارائه می‌شود و در انتها، این روش، که از نظر دقت مشابه روش اجزای محدود و از لحاظ زمان حل نظیر روشهای مدار معادل مغناطیسی است، با استفاده از روش مدل‌سازی در محیط اجزای محدود و مقایسه نتایج مناظر، تایید می‌شود.

### کلمات کلیدی

میکروتوربین - ژنراتور، معادلات میدان، روش تحلیلی، روش اجزای محدود، پتانسیل اسکالر مغناطیسی، پتانسیل برداری مغناطیسی.

## *Extraction of Field Equations in Permanent Magnet Disk Machines in Two Dimensional Volume and No load Conditions*

Maryam Bahramgiri; Sohrab Amini Valashani  
Niroo Research Institute

### ABSTRACT

Microturbine-Generators are one of the important aspects of disperse generations. This equipment will capture cover a noticeable percentage of generation capacity till end of the current decade, therefore obtaining the manufacturing and design knowledge is very important. Thus, considering the importance of field values determination for design procedure extraction, in this paper after a short comparison between disk and round rotors, a new method is presented to specify the field values based on Maxwell equations. Finally the results are compared to the ones obtained by finite element method.

### KEYWORDS

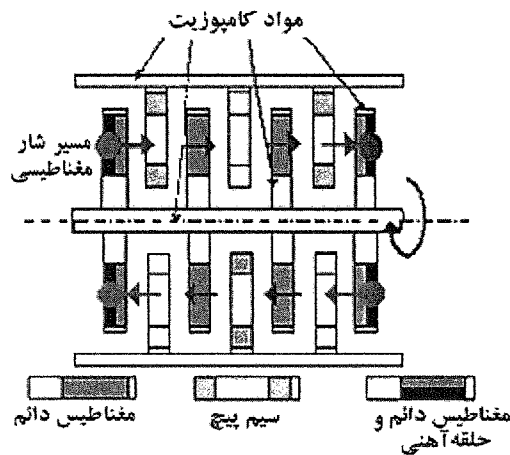
Microturbine-Generators, Field equations, Analytical method, Finite element method (FEM), Magnetic scalar potential, Magnetic vector potential.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد برق - مخابرات؛ پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق: mbahramgiri@nri.ac.ir

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد برق - قدرت؛ پژوهشگاه نیرو - پژوهشکده برق: samini@nri.ac.ir

## ۲- ساختار مسئله

ساختار مورد نظر برای تحلیل، یک میکروژنراتور دیسکی از نوع NS است، به این معنی که قطب‌های مقابل هم در دو دیسک مجاور غیر هم نام قرار دارد، بنابراین، شار محوری مسیر خود را در دو دیسک انتهایی می‌بندد. نمای سطح مقطع طولی این ماشین در شکل (۱) نمایش داده شده است [۷]، [۹].



شکل (۱): ساختار ماشین دیسکی مغناطیس دائم

همان گونه که ملاحظه می‌شود، این ساختار سه دیسک استاتور دارد که در میان چهار دیسک روتور قرار گرفته است. بر روی دیسک‌های روتور، مغناطیس‌های دائم نصب شده است که در فضای داخل ماشین شار محوری ایجاد می‌کند. دیسک‌های استاتور نیز سیم پیچی‌های آرمیچر دارد که به دلیل بررسی حالت بی‌باری ماشین از آن‌ها صرف نظر شده است.

برای انتقال مسئله از فضای سه بعدی به فضای دو بعدی، یک برش استوانه‌ای در شعاع میانگین دیسک روتور ایجاد می‌شود و سپس این برش در فضای دو بعدی گسترش می‌یابد. با توجه به نزدیکی خواص مغناطیسی سیم‌پیچ آرمیچر (استاتور) و همچنین نگهدارنده‌های مغناطیس دائم روتور به خواص مغناطیسی فاصله‌هوائی، این اجزا نیز با ویژگی هوا در نظر گرفته شده و به این ترتیب ساختار مورد نظر به ساختار دوبعدی، که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، تقلیل می‌یابد. از سوی دیگر با توجه به تکرارپذیری ساختار و تقارن‌های طولی و استوانه‌ای، هندسه دو بعدی شده به هندسه شکل (۲-ب) خلاصه می‌شود [۵]. همان گونه که در شکل (۲-الف) نشان داده شده،  $l$  طول خطی است که از وسط یک قطب تا وسط قطب مجاور کشیده شده است. اگر  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب

میکروتوربین - ژنراتور یکی از نمونه‌های در حال توسعه از مجموعه ادوات تولید پراکنده است که اخیراً به دلایلی نظیر خصوصی‌سازی صنعت برق، کاهش منابع سوخت فسیلی، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، پیشرفت تکنولوژی، کاهش یا حذف سرمایه‌گذاری نصب و تلفات خطوط انتقال و حفاظت از محیط زیست شدیداً در حال گسترش است [۲].

این تجهیزات شامل سه جزء اساسی میکروتوربین، میکروژنراتور و سیستم مونتورینگ و مبدل الکترونیک قدرت است که اجزای میکروتوربین و میکروژنراتور مستقیماً به همدیگر متصل می‌باشند. میکروژنراتور دارای دو ساختار عمده روتور گرد با مسیر شار شعاعی و روتور دیسکی شکل همراه با قطب‌های مغناطیس دائم و مسیر شار محوری است. تحقیقات و بررسی‌ها حاکی از مزایای چگالی توان بیشتر، پیاده‌سازی و ساخت آسان‌تر و بازه توانی متنوع‌تر برای خط تولید یکسان، برای ساختار دیسکی شکل می‌باشد [۲]، [۸].

همچنین استخراج روند طراحی و تحلیل این تجهیزات مستلزم استخراج روابط طراحی و عملکردی و به ویژه تعیین مقادیر میدان در سایر اجزای ماشین است. این مقادیر که برای تحلیل طرح و تأیید روند طراحی بسیار با اهمیت هستند، عموماً با استفاده از مدارهای معادل مغناطیسی و یا روش اجزای محدود محاسبه می‌شوند. روش اول دارای حجم محاسباتی کم، سرعت محاسبات زیاد و دقت کم بوده و روش دوم دارای زمان مدل‌سازی زیاد، حجم محاسباتی و دقت زیاد است، در این روش به واسطه زمان مدل‌سازی طولانی و عدم امکان انجام تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت طرح و بهینه‌سازی، غالباً فقط در انتهای فرآیند طراحی و بهینه‌سازی و در راستای تأیید نهایی طرح مورد نظر (قبل از تهیه نقشه‌های ساخت) اتخاذ می‌شود [۱].

این مقاله، که بر مبنای نتایج حاصل از حل معادلات میدان ماشین دیسکی مغناطیس دائم در فضای دو بعدی و شرایط بی‌باری نگارش یافته، روشی جدید ارائه می‌کند که براساس آن، امکان تعیین مقادیر دقیق میدان با حجم محاسباتی متوسط و در زمان کم فراهم می‌شود و علاوه بر آن به واسطه حل پارامتریک معادلات میدان، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی طرح الکترومغناطیسی میسر می‌گردد.

در این مقاله، ابتدا نحوه استخراج معادلات میدان بر مبنای قوانین ماکسول و شرایط مرزی ارائه شده است و سپس به مدل‌سازی ماشین در محیط اجزای محدود انجام می‌گیرد و در انتها نتایج حاصل از روش تحلیلی با نتایج حاصل از روش

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

اگر پتانسیل اسکالر مغناطیسی  $\Phi$  براساس رابطه  $\nabla \Phi = \vec{H}$  تعریف شود، خواهیم داشت:

$$\nabla^2 \Phi = -\nabla \cdot \vec{M} \quad (6)$$

از طرف دیگر، براساس شکل (۲-ب) بردار  $\vec{M}$  در چهار ناحیه مورد نظر به صورت زیر است:

$$\vec{M} = \begin{cases} M\hat{y} & , \text{ در ناحیه ۱} \\ 0 & , \text{ در ناحیه ۲} \\ -M\hat{y} & , \text{ در ناحیه ۳} \\ 0 & , \text{ در ناحیه ۴} \end{cases} \quad (7)$$

بنابراین، معادله میدان در چهار ناحیه به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (8)$$

با استفاده از روش تفکیک متغیرها در سیستم مختصات کارتزین، حل عمومی معادله (۸) در نواحی ۱ الی ۴ مطابق معادله زیر خواهد بود:

$$\Phi_i(x, y) = (s_{i1}e^{k_i y} + s_{i2}e^{-k_i y}) \cdot \sin(k_i x) + (c_{i1}e^{k_i y} + c_{i2}e^{-k_i y}) \cdot \cos(k_i x) \quad (9)$$

اندیس نمایش دهنده شماره ناحیه و  $s_{i1}$ ،  $s_{i2}$ ،  $c_{i1}$  و  $c_{i2}$  و  $k_i$  مجهولات معادله است که با توجه به شرایط مرزی تعیین می‌شود.

### ۴- شرایط مرزی و معادلات میدان

با توجه به شکل (۲-ب) خطوط  $x=0$  و  $x=l$  محورهای تقارن مسأله هستند که میدان‌های عمود بر این مرزها برابر صفر است.

$$H_{4x}(0, y) = 0, \quad 0 < y < g \quad (10)$$

$$H_{4x}(l, y) = 0, \quad 0 < y < g \quad (11)$$

برای نواحی ۱ و ۳ نیز فرض مشابهی را می‌توان در نظر گرفت. از طرف دیگر شرایط مرزی در مرز نواحی ۱ و ۲ و همچنین ۲ و ۳ مطابق روابط بعد است:

$$B_{1x}(a, y) = B_{2x}(a, y), \quad g < y < h \quad (12)$$

$$H_{1y}(a, y) = H_{2y}(a, y), \quad g < y < h \quad (13)$$

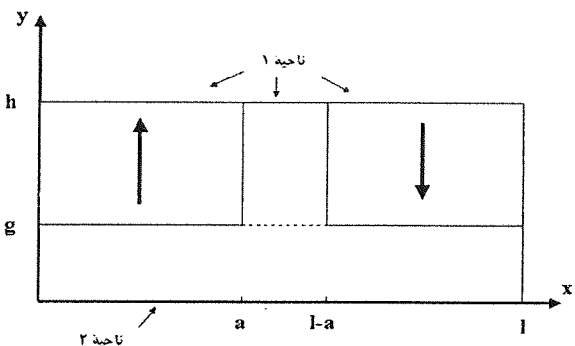
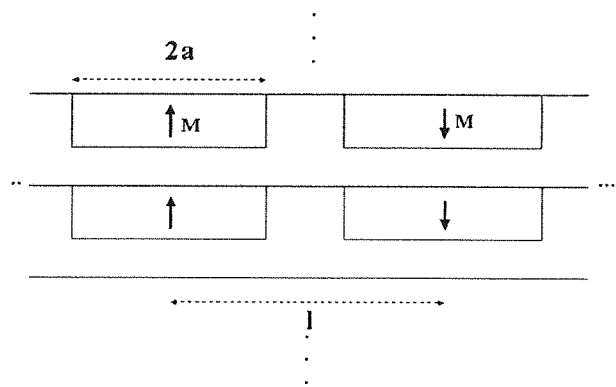
$$B_{3x}(l-a, y) = B_{2x}(l-a, y), \quad g < y < h \quad (14)$$

شعاع‌های داخلی و خارجی دیسک مغناطیس دائم باشد، خواهیم داشت:

$$\ell = \frac{\pi}{N_{pole}}(R_1 + R_2) \quad (1)$$

در این رابطه،  $N_{pole}$  تعداد قطبهای دیسک روتور است و  $\theta$  زاویه متناظر با طول  $x$  از این کمان مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta = \frac{x}{\ell} \frac{2\pi}{N_{pole}} \quad (2)$$



### ۳- معادلات حاکم بر فضای مسأله

در مدل مورد نظر مغناطیس دائم ایده‌آل فرض شده است که بر طبق آن داریم:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

که در این رابطه  $\vec{H}$ ، شدت میدان مغناطیسی،  $\vec{M}$ ، چگالی مغناطیس شونده و  $\vec{B}$  چگالی شار است. معادلات ماکسول برای فضای عاری از جریان مطابق روابط (۴) و (۵) است:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (4)$$

$$c_{41,n} = \frac{2M}{k_n^2 \ell} \text{Sin}(k_n a). \quad (25)$$

$$\frac{(e^{k_n h} - e^{-k_n g})}{e^{k_n g} (1 - e^{-k_n h})}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

$$c_{42,n} = -\frac{2M}{k_n^2 \ell} \text{Sin}(k_n a). \quad (26)$$

$$\frac{(e^{-k_n h} - e^{-k_n g})}{e^{-k_n g} (1 - e^{-k_n h})}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

در انتها مؤلفه های نهایی میدان مطابق روابط زیر محاسبه خواهد شد:

$$B_{1x}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} k_n \cdot (c_{11,n} e^{k_n y} + c_{12,n} e^{-k_n y}) \text{Sin}(k_n x) \quad (27)$$

$$B_{1y}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} -k_n \cdot (c_{11,n} e^{k_n y} - c_{12,n} e^{-k_n y}) \text{Cos}(k_n x) \quad (28)$$

$$B_{4y}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} k_n \cdot (c_{41,n} e^{k_n y} + c_{42,n} e^{-k_n y}) \text{Sin}(k_n x) \quad (29)$$

$$B_{4y}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} -k_n \cdot (c_{41,n} e^{k_n y} - c_{42,n} e^{-k_n y}) \text{Cos}(k_n x) \quad (30)$$

## ۵- مدل سازی در محیط اجزای محدود

تائید معادلات قسمت (۴) مستلزم مدل سازی دقیق ساختار شکل (۲-ب) در محیط اجزای محدود و حل معادلات نقطه ای ماکسول است. در شکل (۳) ساختار مش بندی شده مدل مزبور در محیط نرم افزار انسیس نسخه ۵/۴ نمایش داده شده است. مشخصات مدل مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است. پس از مدل سازی، اعمال شرایط مرزی و حل مسئله مقادیر میدان در تمام نقاط قابل محاسبه است. در شکل (۴)، بردارهای چگالی شار مغناطیسی نمایش داده شده است.

$$H_{3y}(\ell - a, y) = H_{2y}(\ell - a, y), \quad g < y < h \quad (15)$$

با اعمال شرایط مرزی می توان نشان داد که نواحی ۱، ۲ و ۳ در حکم یک ناحیه بوده و ضرایب مجهول در رابطه (۹) برای این سه ناحیه مشابه می باشد، از این روی معادله مورد نظر برای نواحی ۱ جدید (شامل ۱ و ۲ و ۳ قبل) و ۴ به صورت زیر خلاصه می شود.

$$\Phi_1(x, y) = (c_{11} e^{ky} + c_{12} e^{-ky}) \cdot \text{Cos}(kx) \quad (16)$$

$$\Phi_4(x, y) = (c_{41} e^{ky} + c_{42} e^{-ky}) \cdot \text{Cos}(kx) \quad (17)$$

از سوی دیگر، مؤلفه های مماسی شدت میدان بر روی مرز دو ناحیه پیوسته است و بنابراین:

$$H_{1x}(x, g) = H_{4x}(x, g), \quad 0 < x < \ell \quad (18)$$

تقارن طولی ساختار، حاکی از تکرار الگوی میدان با دوره تناوب  $h$  است و بنابراین:

$$H_{1x}(x, h) = H_{4x}(x, 0), \quad 0 < x < \ell \quad (19)$$

پیوستگی مؤلفه عمودی میدان بر مرز نواحی ۱ و ۴ روابط (۲۰) و (۲۱) را برقرار می کند:

$$B_{1y}(x, g) = B_{4y}(x, g), \quad 0 < x < \ell \quad (20)$$

$$B_{1y}(x, h) = B_{4y}(x, 0), \quad 0 < x < \ell \quad (21)$$

در نهایت، پس از اعمال شرایط مرزی یاد شده، ضرایب مجهول مطابق روابط زیر به دست می آید:

$$K_n = \frac{n\pi}{\ell}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (22)$$

$$c_{11,n} = \frac{2M}{k_n^2 \ell} \text{Sin}(k_n a). \quad (23)$$

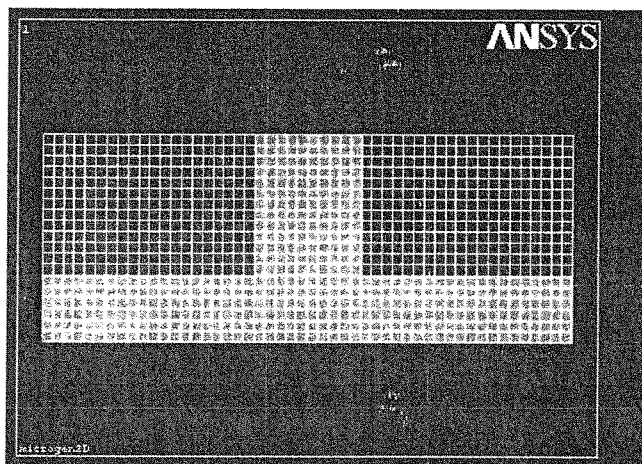
$$\frac{(1 - e^{-k_n g})}{e^{k_n g} (1 - e^{-k_n h})}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

$$c_{12,n} = -\frac{2M}{k_n^2 \ell} \text{Sin}(k_n a). \quad (24)$$

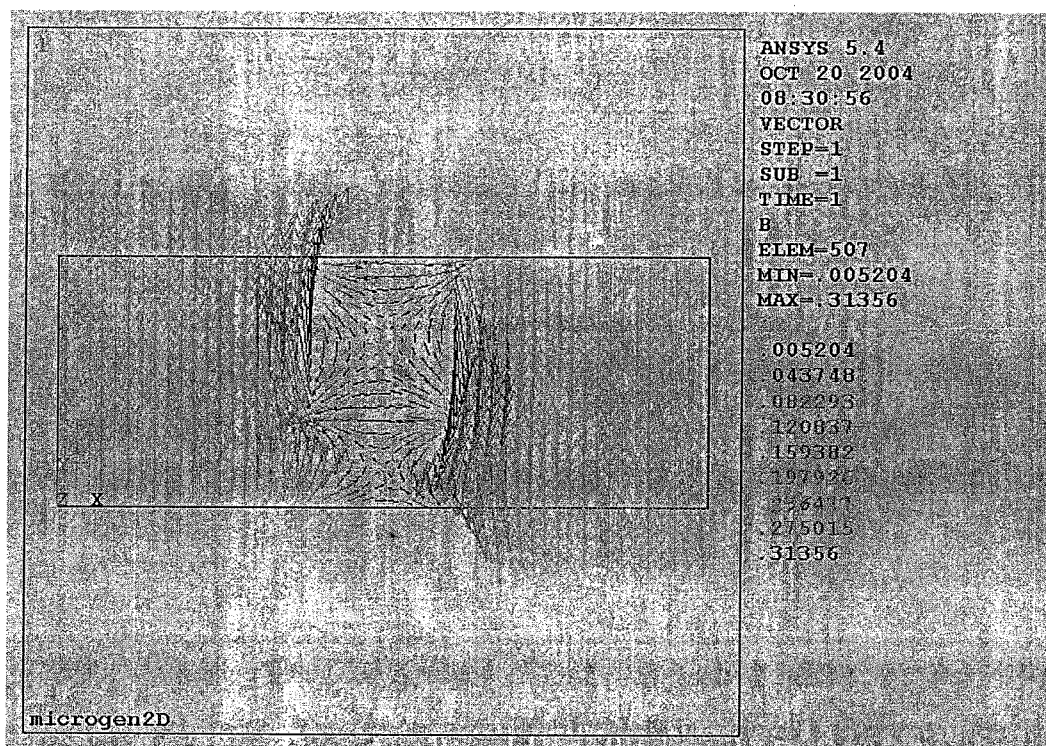
$$\frac{(1 - e^{-k_n g})}{e^{-k_n g} (1 - e^{-k_n h})}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

جدول (۱) - مشخصات ماشین نمونه

مقدار (واحد)	مشخصات ماشین
۸	تعداد قطب
۲۹۹۰۰۰ (آمپر بر متر)	طول بردار مغناطیس شونده
۶ (میلی متر)	طول فاصله هوایی
۴ (میلی متر)	ضخامت دیسک
۴۰/۶ (میلی متر)	شعاع داخلی دیسک
۸۱/۲۸ (میلی متر)	شعاع خارجی دیسک



شکل (۳) : ساختار مش بندی شده مدل مورد نظر در محیط انسیس



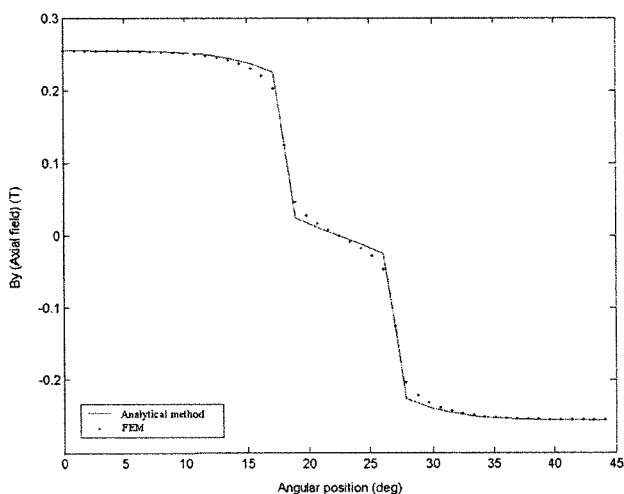
شکل (۴) : بردارهای چگالی شار در محیط انسیس

## ۶- نتایج

است. پتانسیل برداری  $A$  و از روی آن چگالی شار مغناطیسی  $B$  طبق رابطه (۳۲) حاصل می‌شود:

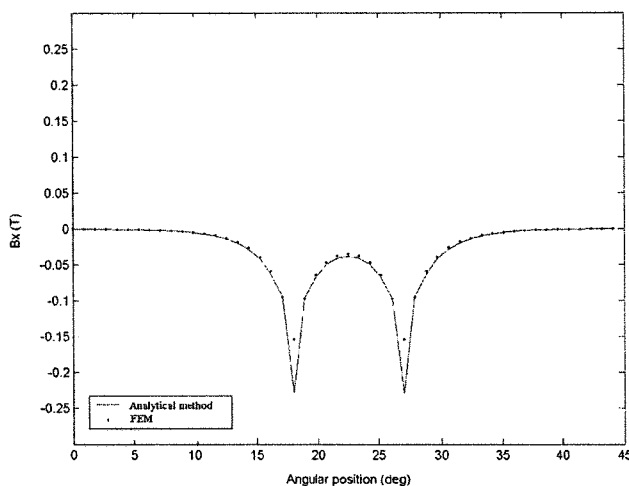
$$B_{z,s}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \sum_{j=1}^2 (-1)^{j+1} \left\{ \int_{z_s(1)}^{z_s(2)} \int_{r_s(1)}^{r_s(2)} \frac{r \sin(\theta - \theta')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dr' dz' + \int_{z_s(1)}^{z_s(2)} \int_{\theta_s(1)}^{\theta_s(2)} \frac{r \cos(\theta - \theta') - r_s(j)}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \Big|_{r'=r_s(j)} r_s(j) d\theta' dz' \right\} \quad (32)$$

در شکل (۱۳) نمایش سه بعدی چگالی شار در وسط فاصله هوایی و از مرکز یک قطب تا مرکز قطب مجاور آمده است. روابط کامل میدان در مختصات سه بعدی به صورت کامل در [۴] و [۶] استخراج شده است.



شکل (۵): مؤلفه عمودی میدان برای مسیر مرزی

$$(mse = 5.27 \times 10^{-5}) y=g$$



شکل (۶): مؤلفه افقی (شعاعی) میدان برای مسیر مرزی  $y=g$

$$(mse = 2.32 \times 10^{-4})$$

در شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب مقادیر مؤلفه‌های عمودی (محوری) و افقی (مماسی) میدان که به روش‌های تحلیلی و اجزای محدود به دست آمده، نمایش داده شده است. این مقادیر، که برای مسیر مرزی  $y=g$  به دست آمده است، دارای خطای متوسط مربعات<sup>۱</sup> از مرتبه ده هزارم و صد هزارم است که حاکی از صحت اعمال شرایط مرزی توسط روش تحلیلی در مرز مزبور می‌باشد و از سوی دیگر مؤید روابط و ضرایب به دست آمده در قسمت (۴) است. برای ارزیابی دقیق تر روابط، مؤلفه‌های عمودی و افقی میدان برای مسیر میانه فاصله هوایی  $(y = \frac{g}{2})$  به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر دو روش کاملاً بر هم منطبق است.

مؤلفه‌های افقی اگر چه خطای قابل قبولی دارد؛ اما مقدار خد نسبت به خطای مؤلفه عمودی بیشتر است که دلیل آن برخی محدودیت‌های نرم‌افزار انسیس در مدل‌سازی شرایط مرز؛ مربوط به مغناطیس دائم می‌باشد. از طرف دیگر، وجود مؤلفه غیرصفر در مسیر مزبور حاکی از بروز نشت در مغناطیس دائم نصب شده بر روی دیسک روتور است. مؤلفه افقی میدان روی مسیر مرزی  $x=0$  برابر صفر است و به خاطر همین در شکل (۹) صرفاً مؤلفه عمودی میدان نمایش داده شده است مشاهده می‌شود که به واسطه خطای نرم‌افزار اجزای محدود در مدل‌سازی این شرط مرزی، متوسط مربعات خطا به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است و در این حالت، پاسخ‌های حاصل از روش تحلیلی قابل قبول‌تر است.

در انتها، مقادیر مؤلفه‌های میدان برای مسیر عمودی

$x = \frac{a}{2}$  (مرکز مغناطیس دائم نمایش داده شده در شکل (۲) - ب

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده است، مجدداً مقادیر بسیار پایین خطای متوسط مربعات حاکی از دقت قابل توجه معادلات میدان مستخرج است.

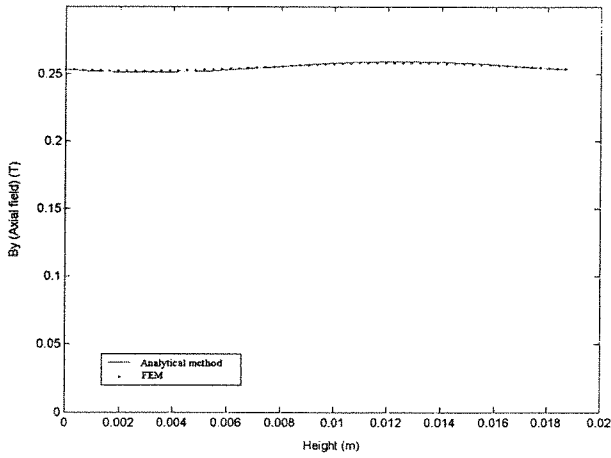
## ۷- معادله میدان در حالت سه بعدی

در فضای سه بعدی، معادلات ماکسول نوشته شد و این بار، معادله میدان بر حسب پتانسیل برداری مغناطیسی  $A$  در شکل زیر به دست آمد [۴]، [۶].

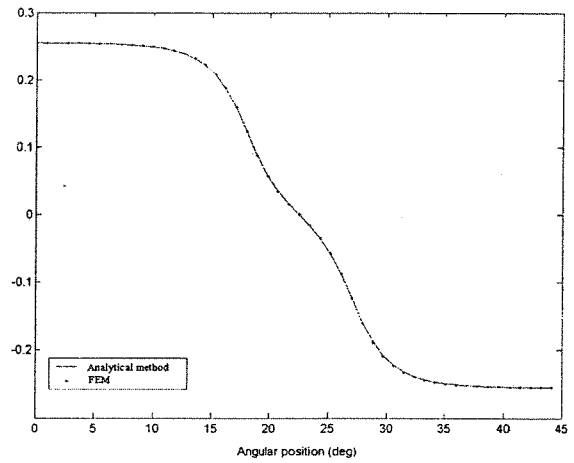
$$\nabla^2 A = -\mu_0 \nabla \times M \quad (31)$$

به دلیل پیچیدگی ساختار فوق در فضای سه بعدی، دست آوردن فرم بسته‌ای از جواب مقذور نیست. به همین دلیل از روش انتگرالی استفاده می‌شود.

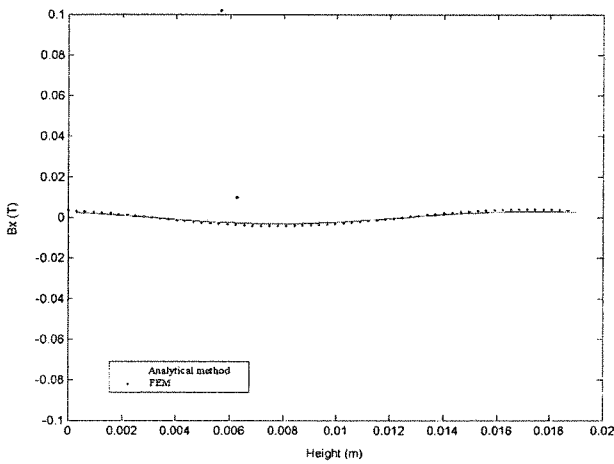
در شکل (۱۲) قطعه‌ای از مغناطیس دائم نشان داده شده



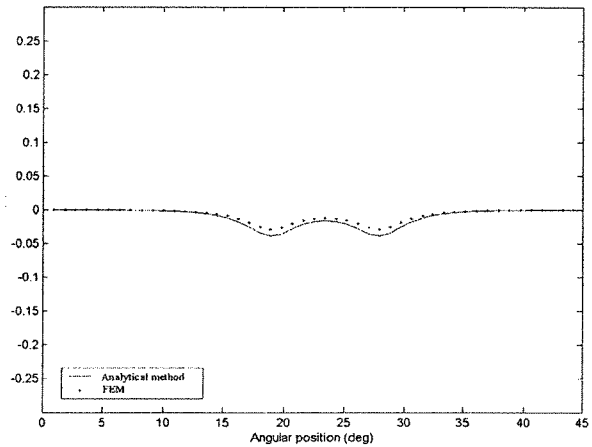
شکل (۱۰): مؤلفه عمودی میدان برای مسیر  $x=a/2$   
 $(mse = 6.35 \times 10^{-7})$



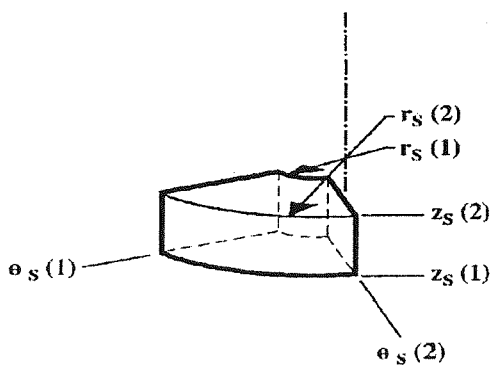
شکل (۷): مؤلفه عمودی میدان برای مسیر  $y=g/2$   
 $(mse = 1.68 \times 10^{-8})$



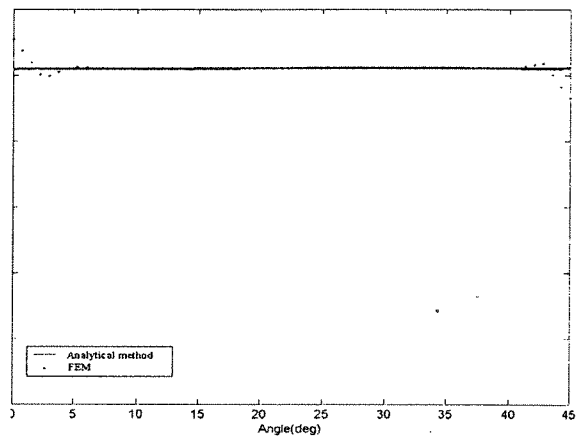
شکل (۱۱): مؤلفه افقی میدان برای مسیر  $x=a/2$   
 $(mse = 2.21 \times 10^{-6})$



شکل (۸): مؤلفه افقی میدان برای مسیر  $y=g/2$   
 $(mse = 1.89 \times 10^{-5})$



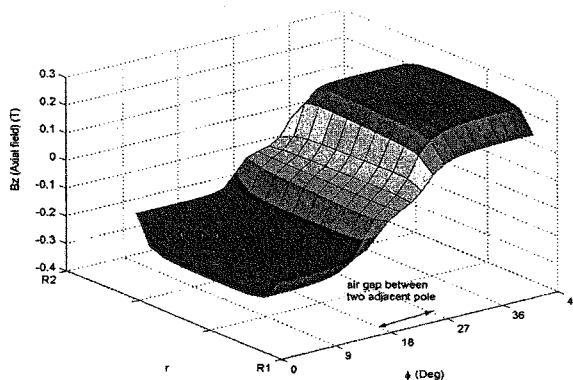
شکل (۱۲): قطعه‌ای از مغناطیس دائم



شکل (۹): مؤلفه عمودی میدان برای مسیر مرکزی  $x=0$   
 $(mse = 6.25 \times 10^{-2})$

## ۹- مراجع

- [۱] سلیمانی، سوادیه، امینی، سهراب، میرعابدینی، حسام، "مزایا و معایب الگوریتم‌های تحلیل ریاضی" مجله برق، شماره ۲۴، بهار ۱۳۸۱.
- [۲] گزارش "ارزیابی و مقایسه اقتصادی - فنی منابع تولید انرژی از نوع تولید پراکنده و هزینه‌های مرتبط با آنها"، پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق - ۱۳۸۲.
- [۳] گزارش "طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی میکروتوربین، ژنراتور برای تولید انرژی الکتریکی در مصارف شهری - گزارش فاز صفر"، پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، ۱۳۸۰.
- [۴] Bahramgiri, M, Mirzagol, M, Amini, S, Ranjbar, A. M, "Extraction of Three Dimensional Magnetic Field Equation and Induced Voltage in High Speed Axial Flux Permanent Magnet Machines in No-Load Conditions," Conf. ICEMS, Korea, 2004.
- [۵] Furlani, E. P, "Computing the Field in Permanent-magnet axial field motors," IEEE Trans. Mag., Vol.30, No. 5, Sept. 1994.
- [۶] Furlani, E. P, "A Three-Dimensional Field Solution for Axially-Polarized Multiple Disks," Magn, Mater., Vol. 135, PP. 205-214, 1994.
- [۷] Hill, R. J, Profumo, E, "A Plastic Structure Multi-Disc Axial Flux PM Motor," Conf. Rec. IEEE-IAS 2002. Vol. 2. pp. 1274-1280.
- [۸] Huang, S, Luo, J, Leonardi, F, Lipo, T. A, "A General-Approach to Sizing and Power Density Equation for Comparison of Electrical Machines", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.34, No.1, 1998.
- [۹] Huang, S, Aydin, M, Lipo, T. A, "TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies," Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, Chicago, Oct 2001, pp. 1619-1625.



شکل (۱۳): نمایش سه بعدی چگالی شار محوری در وسط فاصله هوایی و از مرکز یک قطب تا مرکز قطب مجاور

## ۸- جمع بندی

در این مقاله، روش تحلیل پارامتری برای تعیین مقادیر میدان مغناطیسی در یک مدل دوبعدی شده از میکروژنراتور دیسکی ارائه شد. دقت قابل توجه نتایج به دست آمده و انطباق منحنی‌های متناظر از دو روش تحلیلی و اجزای محدود حاکی از صحت روابط و ضرایب به دست آمده است و از طرف دیگر، مؤید فرض‌های اعمال شده به منظور ساده‌سازی مدل می‌باشد. با استفاده از روابط و ضرایب حاصل، علاوه بر امکان تعیین پارامترها و کمیت‌های مغناطیسی نظیر چگالی میدان، شدت میدان، شار و ... در زمان بسیار کمتر نسبت به نرم‌افزار اجزای محدود؛ که گاهی مدل‌سازی به وسیله آن ساعت‌ها و حتی روزها به طول می‌انجامد، امکان انجام تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی الکترومغناطیسی نیز فراهم، و از سوی دیگر، مقدمات لازم برای استخراج برخی از ضرایب طراحی نظیر ضرایب نشست شار، ضرایب شکل میدان در راستای طولی و عرضی، ضرایب شکل شار و ... آماده شده است که با استفاده از این ضرایب، امکان انجام طراحی و تحلیل ریاضی دقیق میسر می‌شود. همچنین امکان‌سنجی شرایط بارداری با اهمیت بوده و در راستای افزایش قابلیت روش تحلیلی لازم است در صورت امکان، مدل‌سازی این شرایط نیز مد نظر قرار گیرد.

زیرنویس

Mean square error (mse)