

## طراحی الکترومغناطیسی ماشینهای دیسکی در میکروتوربینها

مهران میرجعفری<sup>۱</sup> مهدی میرزا گل<sup>۱</sup> سهراب امینی ولاشانی<sup>۲</sup> علیمحمد رنجبر<sup>۱</sup> علیرضا شیرانی<sup>۲</sup>

mirjafari@mehr.sharif.edu

دانشگاه صنعتی شریف

پژوهشگاه نیرو

کلمات کلیدی: میکروتوربین - ماشین دیسکی مغناطیس دائم - طراحی الکترومغناطیسی - تحلیل اجزای محدود

### ۱- مقدمه

مبحث تجدید ساختار و خصوصی سازی در صنعت برق توجه بسیاری از محققان را در سالهای اخیر به خود جلب نموده است. رویکرد جهانی به این موضوع و همچنین حفاظت از محیط زیست باعث گردیده تا مبحث تولیدات پراکنده مورد توجه گسترده ای قرار گیرد و ساختارهای گوناگون مبتنی بر و سازگار با این شرایط بررسی گردد.

میکروتوربین - ژنراتورها و یا به اختصار میکروتوربینها یکی از منابع مهم و قابل توجه تولیدات پراکنده می باشند که راندمان بالا و حجم کم در کنار آلودگی کمتر زیست محیطی، آنان را شایسته بررسی و مطالعه بیشتری می سازد. در این میان انتخاب ساختار مناسب و سپس روند طراحی منطبق با آن جهت بخش ژنراتور این مولدها تاثیر غیر قابل انکاری در افزایش راندمان، چگالی توان و سایر نکات مثبت مجموعه دارد.

در این مقاله ابتدا خلاصه ای از اهمیت و ضرورت به کارگیری تولیدات پراکنده و میکروتوربینها ارائه گردیده و پاره ای از نمونه های ساخته شده ذکر گردیده است. در بخش سوم "ماشین دیسکی مغناطیس دائم" به عنوان یک ساختار مناسب برای این ژنراتور معرفی گردیده و الگوریتم طراحی ماشین در قسمتهای مختلف بیان شده است. در بخش چهارم چند نمونه طراحی شده ماشین به روش اجزاء محدود و توسط نرم افزار FLUX3D مورد بررسی قرار گرفته و انطباق نتایج بررسی شده است.

### ۲- اهمیت تولیدات پراکنده و میکروتوربینها

مبحث تولیدات پراکنده دامنه بسیار گسترده ای از انواع تولیدات انرژی الکتریکی را به خود اختصاص می دهد که تولیدات احتراقی جرقه ای، دیزل، دوسوخته، میکروتوربین با و

هزینه کمتر تعمیرات و نگهداری (این نکته در صورت تکمیل و پختگی تکنولوژی میکروتوربین حاصل خواهد گردید اگرچه تاکنون این تکنولوژی به پختگی لازم نرسیده است).

- فضای کم و سهولت نصب
- قابلیت استفاده به صورت ماجولهای به هم پیوسته
- قابلیت حصول راندمان بالا به کمک استفاده از تکنولوژی CHP
- صدا و نویز کم

میکروتوربین‌ها از اواسط دهه ۹۰ قرن بیستم به صورت تجاری در آمدند و مهمترین تولیدکننده این مولدها نیز شرکت کیستون<sup>۲</sup> بوده در حالی که شرکتهای مهم دیگری نظیر باومن<sup>۳</sup>، الیوت<sup>۴</sup>، اینگرسول-راند<sup>۵</sup>، توربک<sup>۶</sup> و بالاخره توربوجنس<sup>۷</sup> نیز از جمله تولیدکنندگان مهم میکروتوربین هستند. اشکال (۱) تا (۳) تصاویری از میکروتوربینهای تولید شده توسط شرکتهای مختلف را نشان می‌دهد [۱].

بدون<sup>۱</sup> CHP، توربین صنعتی، توربین بادی، پیل سوختی و سلولهای فتوولتائیک از آن جمله هستند. مشخصه کلی و دلیل رویکرد به این نوع تولیدات، راندمان بالا، آلودگی و نویز پایین، هزینه کم (در غالب موارد) و دوام زیاد آنان می‌باشد. به غیر از مزایای این گونه تولیدات پاره‌ای از مسائل باعث گردیده تا تکنولوژی اجباراً بسوی آنها گرایش یابد که از آن جمله می‌توان به مشکلات و محدودیتهای ظرفیت خطوط انتقال، فرسودگی سیستم انتقال و محدودیت ایجاد خطوط جدید، تقاضا برای افزایش قابلیت اطمینان و امکان کنترل فیزیکی تولیدات از سوی مصرف‌کنندگان و پیشرفت تکنولوژی تا حد ساخت و تکمیل واحدهای کوچک تولیدی اشاره نمود.

استفاده از میکروتوربین‌ها به عنوان یکی از منابع تولیدات پراکنده دارای مزایای زیادی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: [۱]

- قابلیت استفاده از سوختهای متنوع
- تولید اکسید نیتروژن کمتر



شکل (۱): واحد میکروتوربین کیستون C30 با توان ۳۰ کیلووات و مقایسه تقریبی با قد یک انسان

- 2- Capstone
- 3- Bowman Power Systems
- 4- Elliott Energy Systems
- 5- Ingersoll-Rand Power Systems
- 6- Turbec
- 7- Turbogenset

- 1- Combined Heat and Power



شکل (۲): میکروتوربینهای ۶۰ (چپ) و ۳۵ (راست) کیلوواتی باومن



شکل (۳): نمایی از میکروتوربین ساخته شده توسط شرکت الیوت

این ساختار به عنوان سرعت پایین در کاربردهای مختلفی نظیر گرداننده پروانه کشتی و هواپیماهای کوچک بدون سرنشین و یا موتور گرداننده وسایل نقلیه کوچک برقی مورد بررسی قرار گرفته است.

کاربرد این ماشین به عنوان میکروژنراتور در اواخر دهه ۸۰ میلادی و توسط پژوهشگران دانشگاه سلطنتی انگلستان<sup>۲</sup> مطرح

**۳- ماشین دیسکی مغناطیس دائم و روند طراحی آن**  
ساختار "دیسکی مغناطیس دائم" برای استفاده در ماشینهای کوچک برای اولین بار در دهه ۷۰ توسط کمپبل<sup>۱</sup> [۲] مطرح گردید. ساختار ذکر شده توسط او که بعدها توسط محققان دیگری نیز دنبال گردید جهت استفاده در ماشینهای کوچک و سبک که در دورههای پایین کار می‌کردند طراحی گردیده بود.

2- Imperial College

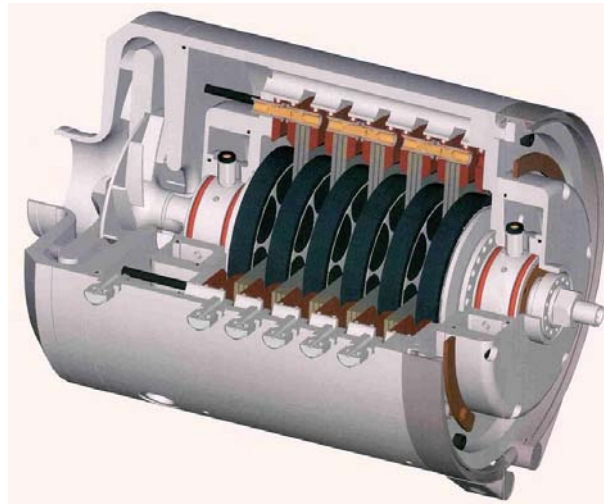
1- P. Campbell

شده‌اند و یا به دلیل اجتناب از مشکلات مکانیکی در سرعتهای بالا در داخل فضاهاى خالی روی آن قرار گرفته‌اند. استاتور ماشین شامل سیم‌پیچهای سطحی است که علی‌رغم تنوع زیاد معمولاً شکل آنها مشابه با شکل مغناطیسهای دائم انتخاب می‌گردد. استاتور فاقد هسته آهنی است که علت آن اجتناب از تلفات بسیار بالای هسته در سرعتهای زیاد می‌باشد. مسیر شار در ماشین در امتداد محور آن می‌باشد و بدین منظور روتورها باید به گونه‌ای قرار گیرند تا قطبهای مخالف در مقابل یکدیگر باشند. مسیر شار تنها در دو انتهای ماشین و از طریق دو حلقه فولادی بسته می‌شود. برش طولی ماشین و مسیر شار مغناطیسی در شکل (۵) نشان داده شده است.

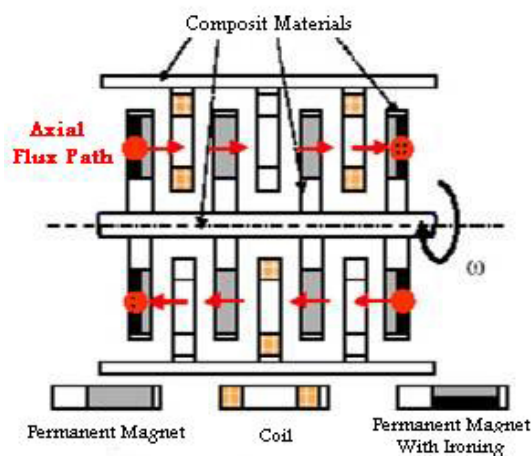
گردید و به ساخت یک نمونه صنعتی توسط شرکت توربوجنست منجر شد. از جمله مزایای مهم این ساختار که آن را جهت استفاده به عنوان میکروژنراتور مناسب می‌سازد می‌توان به چگالی توان بالا و قابلیت استفاده به صورت طبقه‌ای اشاره نمود.

### ۳-۱- معرفی ساختار [۳]

ساختار مورد بحث در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این ساختار متشکل از  $n$  استاتور است که در میان  $n+1$  روتور قرار گرفته‌اند، میدان ماشین روی روتور قرار دارد و متشکل از مغناطیسهای دائم قطاعی یا دوزنقه‌ای است که به شکل مناسبی روی روتور چسبانده



شکل (۴): ماشین دیسکی مغناطیس دائم (مربوط به شرکت توربوجنست)



شکل (۵): برش عرضی ماشین دیسکی مغناطیس دائم و مسیر عبور شار

ولی  $k_i$  و  $k_p$  وابسته به شکل موجهای ولتاژ و جریان ماشین می‌باشند. به عنوان نمونه مقادیر  $k_i$  و  $k_p$  برای زمانی که شکل موجهای ولتاژ و جریان هر دو دوزنقه‌ای هستند (که در این ماشین تا حد زیادی به واقعیت نیز نزدیک است) به ترتیب برابر با  $1/134$  و  $0/777$  می‌باشد. [۵]

### ۳-۳- محاسبات ابعاد ماشین

اندازه قطر خارجی ماشین به طور مستقیم از رابطه (۲) به دست می‌آید:

(۳)

$$D_o = \left( \frac{m_1}{m} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{k_e \cdot k_i \cdot k_p} \cdot \frac{1}{B_g} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{P}{f} \cdot \frac{2}{(1+\lambda)(1-\lambda^2)} \times P_R \right)^{1/3}$$

و بنابراین قطر داخلی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

(۴)

$$D_i = D_o \cdot \lambda$$

پارامتر  $\lambda$  یکی از پارامترهای مهم ماشین می‌باشد که تاثیر مهمی در کارایی و بخصوص چگالی گشتاور و توان آن دارد. شکل (۶) منحنی تغییر چگالی گشتاور و گشتاور ماشین را برحسب  $\lambda$  نشان می‌دهد. [۳]

### ۲-۳- معادله ابعادی ماشین

معادله ابعادی ماشین بیانگر رابطه میان ابعاد ماشین و توان تحویلی آن می‌باشد. در حالت کلی معادله ابعادی ماشین را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد. [۴]

(۱)

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int e(t) \cdot i(t) dt$$

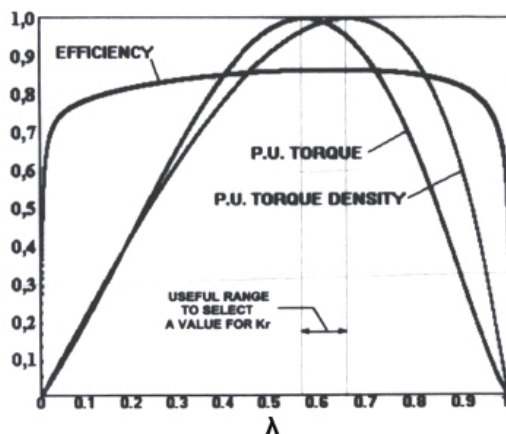
می‌توان نشان داد [۵] که معادله ابعادی در ماشین دیسکی

مغناطیس دائم را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

(۲)

$$= \frac{m}{m_1} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot K_e \cdot K_i \cdot K_p \cdot \eta \cdot B_g \cdot A \cdot \frac{f}{P} \cdot (1-\lambda^2) \left( \frac{1+\lambda}{2} \right) D_o^3$$

در رابطه فوق  $m$  تعداد کل فازها،  $m_1$  تعداد فازهای هر طبقه،  $\eta$  بازده،  $B_g$  متوسط چگالی شار فاصله هوایی،  $A$  بارگذاری الکتریکی در قطرموتوسط،  $f$  فرکانس کار ماشین،  $P$  تعداد قطبها،  $D_o$  قطر خارجی و  $\lambda$  نسبت قطر خارجی به قطر داخلی می‌باشد. ثابتهای  $k_e$ ،  $k_i$  و  $k_p$  به ترتیب ثابتهای نیروی محرکه، شکل موج جریان و شکل موج توان خوانده می‌شوند.  $K_e$  مستقیماً توسط آرایش سیم‌بندی و فضای تخصیص یافته به قطبها در یک گام قطب مشخص می‌گردد و عاملی فیزیکی است که در پروسه طراحی قابل تعیین است



شکل (۶): منحنی نمونه ای گشتاور، چگالی گشتاور و بازده برحسب  $\lambda$

- مدل لوزوی: در این مدل کلافها به صورت لوزوی پیچیده می‌شوند و اگرچه هادیها سطح موثر را جاروب نمی‌کنند ولی استفاده از این روش باعث کاهش طول قطعات غیرفعال می‌گردد. عیب این

روش سختی سیم‌پیچی آن است

- مدل بیضوی [۶]: در این مدل کلافها به شکل قرص‌های بیضی شکل روی استاتور پیچیده می‌شوند. این نوع سیم‌بندی در شکل (۷) نشان داده شده است. سادگی سیم‌بندی از مزایای این توپولوژی و عدم استفاده بهینه از طول هادیها از معایب آن می‌باشد.

و در صورتی که پارامتر  $K_L$  که برابر با نسبت قطر خارجی به طول ماشین است به عنوان یک پارامتر ورودی داخل شود طول ماشین از رابطه زیر قابل محاسبه است:

(۵)

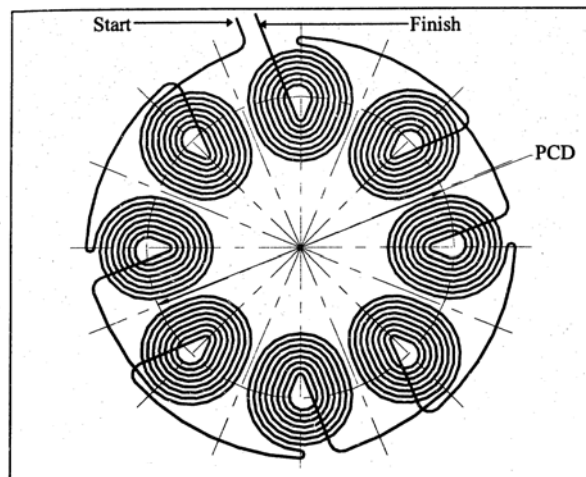
$$L = \frac{D_o}{K_L}$$

پارامتر  $K_L$  به نوعی مشخص کننده شکل و تناسب ظاهری ماشین است. از این پارامتر در الگوریتم ارائه شده در این مقاله استفاده نشده است.

### ۳-۴- محاسبات مربوط به سیم‌بندی

آرایش سیم‌بندی در این ماشین به چند شکل امکان‌پذیر است:

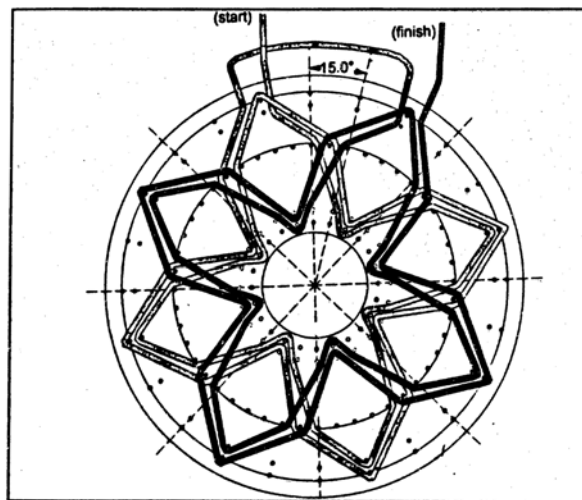
- مدل دوزنقه‌ای یا قطاعی: در این مدل دو ضلع هر کلاف باید در هر لحظه مقابل دو قطب غیرهمنام قرار گیرند و به این منظور قطعات غیرفعال کلافها<sup>۱</sup> در امتداد سطوح داخلی و خارجی پیچیده می‌شوند. طول قطعات غیرفعال در این مدل زیاد است.



شکل (۷): سیم‌بندی بیضوی

- مدل زیگزاگ [۶]: این نوع سیم‌بندی در شکل (۸) نشان

داده شده است.



شکل (۸): سیم‌بندی زیگزاگ

یا دو لایه بودن سیم‌پیچی است و در ماشین مورد نظر برای استفاده بهینه از فضای استاتور و استحکام بیشتر آن، از سیم‌بندی دو لایه استفاده شده است. در این حالت حداکثر تعداد کلافها برابر با تعداد قطبها می‌باشد.

از آنجا که مقادیر  $N_S$  و  $N_{coil}$  باید اعداد صحیحی باشند در اثر گرد کردن این مقادیر به بالا بعضی از پارامترهای محاسبه شده در قسمت قبل مانند قطرهای داخلی و خارجی تغییر می‌کنند که باعث می‌شود به اجبار تغییری در برخی از پارامترهای ورودی از جمله بارگذاری الکتریکی صورت گیرد که به نوبه خود موجب تکرار روند طراحی می‌گردد.

جریان هر هادی از رابطه زیر به دست می‌آید.

(۸)

$$I_{con} = \frac{A \times \pi \cdot D_{ave}}{N_{tot}}$$

که در آن  $N_{tot}$  تعداد کل دورهای ماشین است. سطح مقطع هادیها نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

(۹)

$$A_{con} = \frac{I_{con}}{J}$$

در این مدل طول قطعات غیرفعال کوچک است اما جهت استفاده بهینه از سطح سیم‌بندی، مغناطیسهای دائم باید به صورت لوزوی برش داده شوند که این مساله باعث دشواری و هزینه زیاد روند ساخت می‌گردد.

در محاسباتی که در ادامه خواهد آمد سیم‌پیچی دوزنقه‌ای به دلیل سادگی، کارآمدی، سهولت ساخت و هندسه مناسب به عنوان آرایش سیم‌بندی ماشین انتخاب شده است، در ابتدا از رابطه ولتاژ فاز جهت به دست آوردن کل دورهای سری هر فاز استفاده می‌شود.

(۶)

$$V_{ph} = N_S \cdot 2\pi \cdot f \cdot D_o^2 (1 - \lambda^2) B_g \times \frac{\gamma}{4}$$

که در آن  $\gamma$  نسبت زاویه قطب به کل گام قطب است. از این معادله تعداد کل دورهای سری هر فاز به دست می‌آید. تعداد دورهای هر کلاف با توجه به وجود یک کلاف در قطب در هر فاز به صورت زیر بدست می‌آید.

(۷)

$$N_{coil} = \frac{N_S \times a}{P}$$

که در آن  $a$  تعداد مسیره‌های موازی است. تعداد مسیره‌های موازی تابعی از تعداد کلافها بوده که آن نیز وابسته به تک لایه

مورد را می‌توان با در نظر گرفتن ضرایب مناسب در محاسبات وارد نمود.

نکته دیگر در مورد مغناطیسه‌های دائم تفاوت ضخامت آنها در روتورهای میانی و انتهایی است. در صورتی که ضخامت مغناطیس دائم در روتورهای میانی دو برابر ضخامت آن در روتورهای انتهایی باشد توزیع میدان مغناطیسی در فاصله هوایی مابین دیسک‌های مجاور یکنواخت بوده و در نتیجه محاسبات مدار مغناطیسی ماشین بسیار ساده خواهد گردید ولی در صورت در نظر گرفتن ضخامت یکسان برای مغناطیسه‌های دائم، روند ساخت با سادگی بیشتر و هزینه کمتری انجام می‌پذیرد. در محاسبات این قسمت حالت اول در نظر گرفته شده است یعنی مغناطیسه‌های دائم روتورهای میانی ضخامتی معادل دو برابر روتورهای انتهایی دارند. ضخامت مغناطیس دائم از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$L_{pm} = \frac{\mu_r B_g}{K_f B_r - \frac{1}{K_d} B_u} \left( g + \frac{L_s}{2} \right)$$

که در آن  $K_f$  و  $K_d$  ضرایب در نظر گرفته شده برای شکستگی و نشت شار می‌باشند.  $K_f$  حدوداً مقداری برابر با ۰/۹ تا ۰/۹۵ دارد و  $K_d$  نیز بین ۱/۰۵ تا ۱/۱ تغییر می‌کند.  $B_u$  چگالی شار در سطح مغناطیس دائم است و  $B_f$  چگالی شار ذاتی مغناطیس دائم می‌باشد که بسته به نوع مغناطیس دائم مقداری از ۰/۳ تا ۱/۴ تسلا دارد. ضخامت حلقه آهنی انتهایی ماشین نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

(۱۳)

$$L_{BI} = \frac{\varphi_{BI} \times 2}{B_{Max, iron} (D_o - D_s)}$$

که در آن  $B_{max, iron}$  چگالی شار زانوی منحنی مغناطیسی حلقه آهنی است که مقداری از ۱/۱ تا ۱/۷ تسلا دارد که  $D_s$  قطر محور ماشین و  $\varphi_{BI}$  شار گذرنده از حلقه آهنی است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

(۱۴)

$$\varphi_{BI} = B_u \times \frac{A_{pm}}{2}$$

که  $J$  چگالی جریان قابل تحمل توسط هادی است که با توجه به قابلیت خنک‌کنندگی ماشین تعیین می‌گردد. از آنجا که استاتور ماشین فاقد هسته آهنی است ضخامت آن از حجم هادیها، چسب و مواد عایقی آن تعیین می‌گردد.

(۱۰)

$$L_s = \frac{A_{con} \times N_{tot}}{D_{ave} \times K_{fill}}$$

که در آن  $K_{fill}$  ضریب پرشدگی هادیها روی استاتور است و مقداری در حدود ۰/۴ الی ۰/۶ به آن تخصیص می‌یابد. از آنجا که فرکانس بنیادی این ماشین بسیار زیاد است تلفات گردابی هادیها نقش مهمی در بازده آن دارد به طوری که در صورت استفاده از هادیهای با قطر زیاد ممکن است این تلفات از نظر تئوری به بیش از توان نامی ماشین برسد. بدین منظور استفاده از هادیهای رشته‌ای در این ماشین ضروری است و تعداد این رشته‌ها، با توجه به قطر مورد نظر که در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

(۱۱)

$$N_{strd} = \frac{A_{con}}{\pi/4 \times D_{strd}^2}$$

### ۳-۵- محاسبات مربوط به مغناطیس دائم

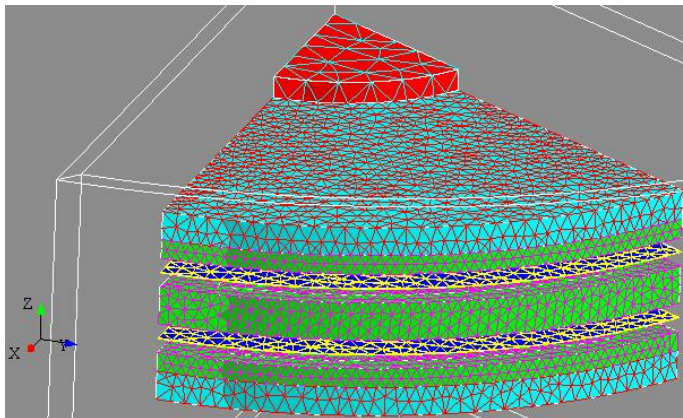
مغناطیسه‌های دائم مولد شار میدان ماشین هستند و برای حصول به شار فاصله هوایی مناسب ضخامت و نوع مغناطیس دائم باید به دقت انتخاب گردد. نوع مغناطیس دائم را می‌توان به صورت یک پارامتر ورودی در نظر گرفت ولی معمولاً از مغناطیسه‌های دائم با حاصل ضرب انرژی بالا مانند ساماریم کبالت<sup>۱</sup> یا نئودیمیم - آهن - بور<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد [۷]. شکل مغناطیس دائم نیز بهتر است مانند شکل کلاف یعنی قطاعی یا دوزنقه‌ای باشد. نکته مهم در مورد محاسبات مغناطیس دائم در نظر گرفتن اثرات شکستگی و نشت شار است که هر دو

1- SmCo  
2- NdFeB



#### ۴- تحلیل به روش اجزاء محدود

به منظور بررسی و مقایسه، نتایج حاصله از طراحی با نتایج به دست آمده از یک روش دقیق و قابل اطمینان مانند روش اجزاء محدود مقایسه می‌گردد. برای مدل‌سازی این ماشین در فضای سه بعدی از نرم‌افزار FLUX3D استفاده شده است. با توجه به تقارن و تکرارپذیری ماشین، مدل‌سازی یکی از قطبهای ماشین کافی است و نرم‌افزار FLUX3D خود قابلیت محاسبه مقادیر خواسته شده را در نقاط دیگر ماشین دارد. شکل (۹) نمایی از ساختار هندسی ماشین را پس از مش‌بندی نشان می‌دهد. پس از مش‌بندی و تحلیل ماشین می‌توان به اطلاعات مفیدی از جمله چگالی شار فاصله هوایی و چگالی شار در حلقه فولادی دست یافت. لازم به ذکر است که تحلیل اجزاء محدود با توجه به نمونه‌های مندرج در بند (۵) انجام گردیده است.



شکل (۹): مدل طراحی شده در نرم‌افزار FLUX3D

مصالحة‌ای میان قیود مکانیکی (با توجه به سرعت بسیار زیاد محور و میزان خنک‌کنندگی مورد نیاز) و بارگذاری الکتریکی و کمیت‌های مغناطیس دائم تعیین گردیده و چگالی شار پسماند نیز با توجه به جنس مغناطیس دائم که تابعی از هزینه ساخت می‌باشد، انتخاب می‌گردد. در طرح‌های ۱ و ۳ از طرح‌های ذکر شده، از مغناطیس دائم نوع ساماریم کبالت با نام تجاری Recoma S25 و در طرح دوم از نوع نئودیمیم - آهن - بور و با نام تجاری Neomag S35UC استفاده شده است. ابعاد و نتایج حاصل از طراحی و تحلیل اجزاء محدود این سه طرح در جدول (۱) آورده شده است.

که در آن  $A_{pm}$  اندازه سطح مغناطیس دائم است، اتخاذ ضریب  $\frac{1}{2}$  به علت وجود دو مسیر موازی شار در حلقه آهنی است. نیروی ضد مغناطیسی وارد بر مغناطیس دائم نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

(۱۵)

$$H = \frac{(N_{coil} \times I_{coil} + 2 \times (R_g + R_{pm}) \times \varphi_{pm})}{2(R_{pm} + R_g)(\mu_0 \cdot \mu_{rm} \times A_{pm})}$$

که در آن  $I_{coil}$  جریان کلاف و  $R_g$  و  $R_{pm}$  به ترتیب رلوکتانسهای فاصله هوایی و مغناطیس دائم هستند.  $\varphi_{pm}$  شار خروجی مغناطیس دائم و  $\mu_{rm}$  قابلیت گذردهی نسبی آن است که مقداری حدود  $\frac{1}{10}$  تا  $\frac{1}{1}$  دارد. روشن است که در صورت تجاوز این نیرو از مقدار مجاز، الگوریتم طراحی باید مجدداً و با مقادیر مناسبتری تکرار گردد.

#### ۵- مدل‌سازی و مقایسه نتایج

به جهت تایید روند و روابط طراحی، سه نمونه طرح با توان نامی ۱۵ کیلووات و ولتاژ فاز نامی موثر ۲۳۰ ولت که هر کدام دارای دو عدد استاتور و سه عدد روتور می‌باشند استخراج شده است. تفاوت طرح‌های مزبور بر مبنای تفاوت فواصل هوایی و چگالی شار پسماند مغناطیس دائم که هر دو از کمیت‌های ورودی مهم می‌باشند، ایجاد گردیده و برای انجام مقایسه بهتر متوسط چگالی شار فاصله هوایی (بارگذاری مغناطیسی) هر سه طرح یکسان فرض گردیده است. از میان کمیت‌های ورودی، طول فاصله هوایی با

جدول (۱): مشخصات ماشین و نتایج حاصله از تحلیل

شماره طرح	مشخصات ابعادی (mm)						مشخصات مغناطیس دائم و سیم‌بندی						نتایج		
	D <sub>o</sub>	D <sub>i</sub>	L <sub>s</sub>	g	L <sub>pm</sub>	L <sub>iron</sub>	B <sub>r</sub>	$\mu_{rm}$	H <sub>c</sub>	K <sub>f</sub>	K <sub>d</sub>	N <sub>s</sub>	B <sub>g</sub> (طراحی)	B <sub>g</sub> (تحلیل)	خطا
۱	۱۸۳	۱۴۶	۳	۲	۱/۳۹	۶/۱۵	۱	۱/۱۵	۹۱۵	۰/۹۵	۱/۱	۲۴	۰/۱۸۴۴	۰/۱۵۷	۱۶/۸
۲	۱۵۴	۱۰۷	۳	۲	۱/۱۶	۹/۴	۱/۲	۱/۱۵	۷۶۵	۰/۹۵	۱/۱	۲۴	۰/۱۸۴۴	۰/۱۴۴	۲۸/۰
۳	۱۷۲	۱۳۸	۳	۳	۱/۷۸	۵/۹۳	۱	۱/۱۵	۹۱۵	۰/۹۵	۱/۱	۲۴	۰/۱۸۴۴	۰/۱۶۵	۱۱/۶

گردند و یا با روابط مناسب جایگزین گردند و ثانیاً با انتخاب مواد مغناطیس دائم و هادیهای واقعی و درج ضرایب مرتبط با ساخت نظیر ضریب اصلاح طول مغناطیس دائم و ... طرحهای حاصل هر چه بیشتر واقعی گردند.

### مراجع

[۱] Hamilton, Stephanie. L., "Microturbine Generator HANDBOOK", Pennwell Corporations, 2003.

[۲] Campbell, P. "Principles of a Permanent Magnet Axial Field D.C. Machine", Proc. IEE, Dec. 1974. Vol. 121, pp. 1489-1494.

[۳] گزارش "بررسی انواع ساختارهای ماشین دیسکی مغناطیس دائم و انتخاب ساختار مناسب" پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، آبان ماه ۱۳۸۲.

[۴] Huang, Surong. et. Al. "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines", IEEE Trans. On. Industry Applications. Vol. 34, No.1, Jan 1998.

[۵] Huang, surong. et. Al., "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations", IEEE Trans. On. Energy Conversion, Vol. 4, No.2, Jun 1999.

[6] Shripad, Sameer "Design of Axial Flux Permanent Magnet Alternators", PhD thesis, London University, Feb 1997

[۷] گزارش "معرفی ماشینهای دیسکی مغناطیس دائم شار محوری و مبانی عملکرد آنها"، پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، تیرماه ۱۳۸۲.

نتایج حاصله از تحلیل اجزاء محدود حاکی از دقت مناسب روابط و روند طراحی می‌باشد چرا که اولاً مقادیر چگالی شار حاصل از تحلیل اجزاء محدود نسبت به مقادیر مورد نظر (طراحی) انحراف قابل قبولی داشته و ثانیاً سایر خروجی‌های ماشین نظیر ولتاژ و جریان به صورت مستقیم و غیرمستقیم وابسته به پارامتر مزبور می‌باشند و از این رو خطای آن پارامترها نیز در حدود معین باقی خواهد ماند.

از طرف دیگر با مقایسه خطای پارامترهای فوق‌الذکر مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی شار پس‌ماند (طرح ۲) و با کاهش طول فاصله هوایی (طرح ۱) خطا افزایش می‌یابد. هر دو پارامتر مزبور تاثیر زیادی روی نشت شار داشته و لذا با افزایش طول فاصله هوایی و یا کاهش چگالی شار پسماند (طرح ۲) خطا کاهش می‌یابد که این تحلیل مبین خطای موجود در ضرایب نشت و یا شکستگی شار می‌باشد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا تولیدات پراکنده و اهمیت آنها مورد بحث قرار گرفت و سپس در مورد میکروتوربین‌ها و نمونه‌های ساخته شده به نکاتی اشاره گردید. روند طراحی در بخش بعد مورد بررسی قرار گرفت و مراحل مختلف آن نظیر محاسبات مربوط به ابعاد، مغناطیس دائم و سیم‌بندی به تفصیل بررسی گردید و سپس در قسمت آخر سه مدل طراحی شده به روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار FLUX3D مدل شده و تحقق اهداف طراحی بررسی گردید. در ادامه فعالیت و در جهت افزایش دقت محاسبات و واقعی نمودن طرح پیشنهاد می‌گردد که اولاً ضرایب تجربی مورد استفاده در روند طراحی به صورت دقیقتری انتخاب