

مدل سازی یاتاقان مغناطیسی با استفاده از نرم افزار Ansoft

محمد اسماعیلی ادبی^{۱*}، شهربانو فرخنده^۲

* نویسنده مسئول: m.esmailiadabi@shahryariau.ac.ir

واژه‌های کلیدی

مغناطیسی، ماکسول، یاتاقان، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، تحلیل اجزای محدود.

چکیده

در این مقاله به بررسی معادلات ماکسول سه بعدی در نرم‌افزار Ansoft پرداخته شده است. راه حل‌های Ansoft بیشتر بر اساس معادلات ماکسول و تحلیل اجزای محدود (FEA) برنامه‌ریزی شده است. چنانکه تحلیل ساده‌ای جهت محاسبه نیروی مغناطیسی موجود میان دو قطب مغناطیسی همنام که مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند انجام گرفته و مدل‌سازی در نرم‌افزار Ansoft شرح داده و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند جنس مواد و ابعاد هندسی بر مقدار نیروی مغناطیسی بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن حالت خاصی از جنس مواد و ابعاد هندسی مقدار نیروی مغناطیسی ۱۸/۰۹۱۳۳ نیوتن است. در پایان تعدادی انتخاب که می‌توانستند در نرم‌افزار Ansoft جهت نقشه‌کشی مدل و تحلیل استفاده شود استخراج گردید.

۱- مری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، گروه فیزیک، تهران، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایالتی اوهایو آمریکا.

۱- مقدمه

پدن و همکاریانش انجام شد و آنها موفق به ارائه روابط کامل و دقیق شدند [۵]. طراحی و ساخت یاتاقان مغناطیسی شعاعی توسط میکر و سیبرت در سال ۲۰۰۲ اجرا شد [۷]. طراحی و ساخت یاتاقان‌های مغناطیسی غیر فعال پیشرفته‌تر نسبت به مدل‌های قبلی توسط سیبرت اجرا شد [۸]. همچنین طراحی و ساخت یاتاقان‌های مغناطیسی فعال پیشرفته با فروسیال و پایدار سازی آن توسط مرکز تحقیقات دانشگاه کلبولد در شهر اوهایو صورت پذیرفت [۱۱]. مطالعه کامل پتانسیل سنجی استفاده از تکنولوژی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال در موتور توربین‌های گازی توسط کلارک صورت گرفت [۱۲]. هدف از انجام این پژوهش مدل‌سازی و شبیه‌سازی ساز و کار یاتاقان‌های مغناطیسی با استفاده از نرم افزار Ansoft است.

۲- آشنایی با نرم افزار Ansoft FEM

نرم افزار Ansoft FEM در طراحی محیط‌های الکترومغناطیسی، کاربرد دارد. موارد استفاده آن شامل الکترونیک، سیستم‌های کنترل اتوماتیک، موتورهای الکتریکی و سنسورها است. این نرم‌افزار خود به پنج زیر گروه تقسیم می‌شود.

۲-۱- ماکسول سه بعدی (Maxwell 3D)

Maxwell 3D یکی از پیشتاز ترین نرم افزارهای شبیه ساز میدان‌های الکترومغناطیسی است که در طراحی و آنالیز ساختارهای الکترو مکانیکی دوبعدی و سه بعدی مانند موتورهای الکتریکی، راه اندازها، ترانسفورماتورها و سایر دستگاه‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی که در صنایع خودروسازی، نظامی و فضایی کاربرد دارد. پایه این نرم افزار مبتنی بر روش اجزای محدود است. Maxwell 3D به دقت مسائل مربوط به استاتیک، حوزه‌های فرکانس و حوزه تغییرات زمان را در میدان‌های الکتریکی و الکترو مغناطیسی را حل می‌کند.

استفاده از Maxwell 3D باعث ارتقای قابلیت تولید مهندسی شده است و زمان طراحی را به نحو مطلوبی کاهش داده است. نرم افزار Maxwell 3D دارای قابلیت‌های اضافی مانند مشخصه‌های خودکار جدید، رابط‌های کاربری پالایش و قابلیت‌های ارتباطی داده است که طراحی و شبیه‌سازی ساختارهای پیچیده میدان‌های الکترومغناطیسی دستگاه‌های الکترومکانیکی را ساده کرده است.

یاتاقان‌های مغناطیسی فعال امروزه در بسیاری از موارد صنعتی کاربرد دارد. این یاتاقان‌ها دسترسی به سرعت‌های بالاتر نسبت به انواع یاتاقان‌های مکانیکی و غلتشی را فراهم می‌کنند. همچنین استفاده از این یاتاقان‌ها می‌تواند باعث حذف عملیات روانکاری در کاربردهای مختلف و کاهش آلودگی محیط سیستم شود [۱-۵]. امروزه پیشرفت تکنولوژی در مباحث کنترل و پردازش، یاتاقان‌های مغناطیسی را به سوی طراحی نیرومندتر و به صرفه‌تر نسبت به گذشته هدایت کرده است. مرحله اول طراحی یاتاقان‌های فعال مغناطیسی شبیه‌سازی است. برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ساز و کار یاتاقان‌های مغناطیسی از نرم‌افزارهای مختلفی استفاده می‌شود که یکی از معتبرترین آنها نرم افزار Ansoft است. ماژول Maxwell 3D این نرم‌افزار برای یاتاقان‌های مغناطیسی بر اساس روش اجزای محدود FEA^۱ طراحی شده است [۹ و ۱۰]. نرم‌افزار Ansoft برای طراحی و ارزیابی تجهیزات و سیستم‌هایی که در حوزه الکترونیک و الکترومغناطیسی کار می‌کنند استفاده می‌شود. راه حل‌های Ansoft بیشتر بر اساس معادلات ماکسول^۲ و روش اجزای محدود برنامه‌نویسی شده است [۶].

Ansoft در طراحی اتوماسیون الکترونیک، وسایل پیچیده‌ای مانند مدارها و طراحی سیستم کاربرد دارند. ابزارهای مدل‌سازی Ansoft در محیط‌های الکترومغناطیسی برای بالا بردن دقت و قابلیت اطمینان در وسایلی چون میکروویو^۳، بی‌سیم‌ها، سیستم‌های موتوری و سیم‌پیچ^۴، استفاده می‌شوند. نرم‌افزار Ansoft به طور عمده به چهار بخش تقسیم می‌شود، که یکی از آنها Ansoft FEM است [۶].

بکرز و یونت از جمله اولین کسانی بودند که تکنولوژی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال را پیاده سازی کرده و نمونه اولیه آن را ساختند [۱-۳]. مارینسکو و همکاریانش تکنیک‌های محاسبه یاتاقان‌های مغناطیسی را بر اساس ارتجاعیت توسعه دادند [۴]. استخراج روابط طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی توسط

1-Finite Element Analysis

2- Maxwell

3- Microwave

4- Solenoid

۵- محاسبات نیروی مغناطیسی

این بخش تحلیل ساده‌ای را برای محاسبه نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد. این نیرو از تأثیرات متقابل دو صفحه مغناطیسی همنام (قطب‌های مشابه) که روبروی هم قرار دارند ناشی می‌شود. اثرات جنس مواد و اندازه‌های هندسی طبق شکل (۱) در نظر گرفته شده‌اند. سطح ناحیه مغناطیسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$a = 3/36 \text{ cm} \times 3/36 \text{ cm} = 0/001129 \text{ m}^2$$

g فاصله هوایی است که برابر $0/00102235 \text{ m}$ در نظر گرفته شده است.

نیروی مغناطیسی، اختلاف ظرفیت مغناطیسی بین دو نقطه است. با اینکه تعریف استاندارد نیروی مغناطیسی به جریان گذرا در یک هادی الکتریکی بستگی دارد، مغناطیس‌های دائمی نیروی مغناطیسی را ایجاد می‌کنند. نیروی مغناطیسی را می‌توان خط کاملی از قدرت میدان H بین دو نقطه P_1 و P_2 تعریف کرد [۱۰].

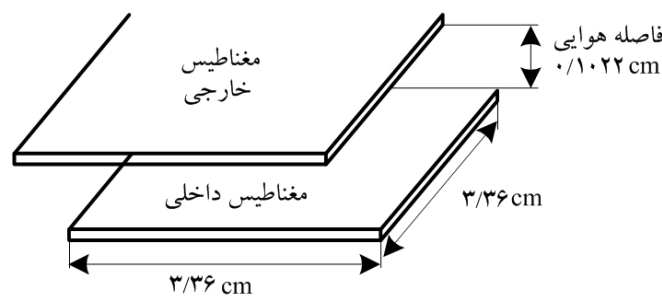
$$M = \int_{P_1}^{P_2} H dl \quad (1)$$

که در این رابطه $M (A)$ نیروی مغناطیسی و $H (A/m)$ قدرت میدان مغناطیسی $dl (m)$ جزء کوچکی از طول بین دو نقطه است. با استفاده از رابطه (۱)، چگالی شار B به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$B = \frac{\mu_0 M}{g} \quad (2)$$

طبق روابط ماکسول می‌توان مقدار نیروی F را با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کرد [۷]:

$$F = \frac{B^2 a}{\mu_0} \quad (3)$$



شکل (۱) ماکسول دو بعدی برای یک جفت صفحه مغناطیسی دائمی.

Maxwell 3D شامل حل کننده‌های مختلفی است که می‌توان به حل کننده حالت گذرا، مغناطیس دائم و الکتریکی اشاره کرد:

این حل کننده‌ها مسائل الکترومغناطیسی را در حوزه زمان و فرکانس در ساختار سه بعدی به دقت حل می‌کنند. به کمک این نرم‌افزار مدل‌های مجازی ترکیبات الکترومکانیکی پیچیده به حالت سه بعدی به آسانی قابل ساختن هستند. تعدادی از شکل‌های هندسی رایج که برای اکثر طراحی‌ها لازم است، به صورت زیر مجموعه در نرم‌افزار وجود دارند. این زیرمجموعه‌ها طراحی و مدل‌سازی را راحت‌تر و عملی‌تر می‌سازند.

هدف تحقیق حاضر مدل‌سازی یک یاتاقان مغناطیسی دائمی با استفاده از نرم‌افزار Maxwell 3D است. سرعت بالای این نرم‌افزار در سیستم‌های حساس مغناطیسی، این امکان را برای طراحان فراهم می‌آورد که جواب صدها آیا و اگر خود را در فرایند طراحی بدون آزمایش و خطاهای مختلف، دریافت کنند. برنامه‌های موجود در این نرم‌افزار، دست مهندسان طراح را برای طرح‌های بزرگ و خیلی پیچیده باز می‌گذارند. زیرا طراحان می‌توانند مشکلات طراحی و عواملی که باعث این خطاها می‌شوند را پیش‌بینی و کشف کنند.

قابلیت‌های نسخه‌های جدید Maxwell 3D به شرح زیر است:

- حل کننده سه بعدی برای حالت گذرای الکتریکی
- ارتقای مدل‌سازی دو بعدی توسط قابلیت وبرایش تاریخیچه هندسی

- متحرک‌سازی نمودار میدان‌ها برای روش‌های حل پارامتری
- قابلیت پیشرفته ارتباطی این نرم‌افزار با نرم افزارهای

ePhysics، HFSS، Simpler و ePhysics

- الگوریتم ژنتیک جدید برای حالت بهینه‌سازی

۴- مدل سازی در Ansoft

توضیحات زیر اختیارات و امکانات Ansoft را برای مدل سازی، ترسیم و تحلیل را بیان می کند.

۴-۱- برآورد اندازه نقشه / مدل

برآورد نقشه/مدل برای تعریف ناحیه ترسیم در تمام زیر پنجره های پروژه های فعال استفاده می شود. تعریف صریح ناحیه ترسیم بسیار حائز اهمیت است، زیرا نرم افزار مقدار ناحیه مغناطیسی را برای تمام ناحیه ترسیم محاسبه می کند. در ماکسول دو بعدی یا سه بعدی ناحیه هایی که در خارج از دامنه ترسیم اند، تحلیل نمی شوند.

۴-۲- اندازه ناحیه ترسیم

ابعاد ناحیه ترسیم به طور قراردادی برای پروژه ها حدوداً ۱۰۰ واحد در ۷۰ واحد ارتفاع است. اگر ناحیه ترسیم برای هر پروژه متفاوت با اندازه قراردادی باشند، با یک فرمان می توان ناحیه مورد نیاز را کوچک یا بزرگ کرد.

۴-۳- وضعیت مرز بندی

مرز بندی هایی که به طور خودکار برای مدل های مغناطیسی تعریف می شوند به شرح زیر است:

- مرزهای طبیعی که بین دو صفحه تعریف می شوند.
 - مرزهایی که برای لبه های خارجی مسئله تعیین می شوند.
- اگر ناحیه ای وضعیت مرزهای خود را مشخص نکند، وضعیت مرز قراردادی شامل آن می شود.

۴-۴- گزینه Region

Region دستوری است که برای تعیین اندازه ناحیه ای که شبکه ها را می سازد به کار می رود. این اندازه به طور خودکار بار اول برای مدل تعیین و ذخیره می شود و دیگر نیازی به تغییر آن نیست. در بیشتر موارد اندازه مسئله مطابق با منابع موجود کاهش می یابد تا سرعت حل مسئله بالا رود.

۴-۵- تصفیه شبکه^۱

این شبکه ها شامل چهار ضلعی هایی است که میدان های حل را برای ساختارهایی که در حافظه ذخیره تعریف نشده اند

از نتایج Ansoft مقدار M به دست می آید و مقدار آن (A) $357.02/28$ است [۶]. مقدار M در رابطه (۲) جایگذاری می شود.

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 357.02/28}{0.01}$$

که پس از محاسبه، مقدار چگالی شار B برابر $0.4489 T$ است. حال مقدار B در معادله (۳) جایگذاری می شود تا نیروی مغناطیسی به دست آید. مقدار نیروی F برابر N $18/09133$ خواهد بود.

۳- معادلات ماکسول

معادلات ماکسول راه های مختصر و جالبی را برای مسائل اساسی و بنیادی الکتریکی و مغناطیسی ارائه می کنند. این معادلات نقش تئوری پایه وسایل مغناطیسی و الکتریکی را ایفا نمایند. اولاً راه حل های عددی به دلیل محدودیت های حافظه کامپیوتر، قریب به صحت هستند. بطور کلی محدودیت شکل های آن به تعداد اعشارهایی که در داخل سخت افزار کامپیوتر جا داده شده بستگی دارد. دوماً، ماکسول برای جلوگیری از پیچیدگی محاسبات، بعضی از موارد را که ضروری نیستند، عمداً از آنها چشم پوشی و یا کنار می گذارد. چهار معادله ماکسول به ترتیب نشان می دهند که چگونه بارهای الکتریکی، میدان الکتریکی را (قانون گوس)، جریان ها چگونه میدان مغناطیسی (قانون آمپر) و چگونگی تغییرات میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی (قانون فاراد القایی) را تولید می کنند. این معادلات در روابط (۴) تا (۷) ارایه شده است [۱۰].

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4) \quad \text{قانون گوس}$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (5) \quad \text{قانون گوس برای مغناطیسی شدن}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6) \quad \text{قانون فاراد القایی}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (7) \quad \text{قانون آمپر + ماکسول}$$

در این معادلات:

ρ (C/m^3) چگالی بارهای آزاد الکتریکی، B ($tesla$) چگالی شار مغناطیسی (برحسب تسلا) که القاء مغناطیسی هم گفته می شود، D (C/m^2) جابه جایی میدان الکتریکی، E (A/m) میدان الکتریکی و J چگالی جریان است.

دیگری قرار بگیرند، اما سطوح نباید هم‌پوشانی^۱ داشته باشند. اگر یک جزئی بر روی دیگری هم‌پوشانی داشته باشد، هندسه مسئله به صورت نادرست تعریف شده است و سیستم راه حلی را برای این گونه موارد نمی‌شناسد. اگر جزئی در داخل جزء دیگر تعریف شود، سیستم می‌تواند جزء کوچکتر را از بزرگتر تفریق کرده و فرض می‌کند که جزء کوچکتر فضای غیر قابل استفاده‌ای را از جسم بزرگتر اشغال کرده است.

۷- نتایج

در این مقاله خلاصه‌ای از نرم افزار Ansoft و کاربرد آن بیان شد در ادامه بخش‌هایی از نرم‌افزار توضیح داده شد. همچنین یک تحلیل ساده‌ای جهت محاسبه نیروی مغناطیسی نشان داده شد. با در نظر گرفتن جنس مواد و ابعاد هندسی مقدار نیروی مغناطیسی $18/09133$ نیوتن محاسبه شد.

فهرست علائم

M	نیروی مغناطیسی
H	قدرت میدان
B	چگالی شار (FLUX)
μ_0	قابلیت نفوذپذیری (N/A^2)
g	فاصله هوایی (m)
F	مقدار نیروی Maxwell
a	سطح فاصله هوایی (m^2)
ρ	چگالی بارهای آزاد الکتریکی
D	جابجایی میدان الکتریکی
E	میدان الکتریکی
J	چگالی جریان
∇_0	دیورژانس
$\nabla \times$	کرل

تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه یک پروژه تحقیقاتی است که در سال ۱۳۸۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس انجام گرفته است.

معرفی می‌کند. در ابتدا شبکه حالت بهینه را ندارند و باید تصفیه شود تا شکل‌های هندسی مختلف به شکل‌های چهارضلعی تبدیل شوند. دو راه برای این کار وجود دارد:

• تصفیه شبکه وقتی

در طول فرایند حل مسئله، ماکسول سه بعدی، تصفیه شبکه را در ناحیه‌هایی که احتمال خطا بالاست چندین بار تکرار می‌کند تا خطای احتمالی کاهش یابد.

• تصفیه شبکه دستی

این نوع تصفیه شبکه، در جاهایی که شبکه مشخص شده‌ای باید تصفیه شود، به کار می‌رود. با تصفیه نقاطی را به شبکه جدید اضافه می‌کند یا چهارضلعی اضافی برای ایجاد شبکه ایجاد می‌کند. این روش زمانی مفید خواهد بود که نقاط بحرانی با خطا بالا را بدانیم (مانند فاصله‌های هوایی یا در جاهایی که سیم پیچ‌ها به هم متصل نیستند). ترکیب هر دو روش برای تصفیه شبکه، امکان‌پذیر است.

۴-۶- اندازه شبکه در برابر دقت حل

دقت حل مسئله بستگی به کوچکی چهار ضلعی‌های شبکه دارد. برای ایجاد راه حل‌هایی با دقت بالا، باید تا حد امکان ابعاد اجزای شبکه ریز باشد.

مولد میدان حل، با معکوس کننده‌های ماتریسی درگیر است که آنها نیز به اندازه اجزای که در گره‌های چهارضلعی وجود دارند بستگی دارند. برای هر شبکه بزرگ با تعداد زیاد اجزا باید معکوس کننده‌های با قدرت بالا در حافظه محاسباتی وجود داشته باشند. بنابراین ضروری است که شبکه‌های بهینه برای به‌دست آوردن دقت بالا در میدان حل وجود داشته باشد.

برای ایجاد شبکه بهینه، ماکسول سه بعدی، از فرایندهای تکراری که به‌طور خودکار ناحیه‌های بحرانی را تصفیه می‌کنند، استفاده می‌کند. ابتدا ماکسول سه بعدی شبکه‌های ابتدایی غیر مرغوب را برای حل مسئله می‌آفریند، بعد شبکه را در ناحیه‌های با چگالی خطای بالا تصفیه و حل جدیدی را ارائه می‌کند. ماکسول سه‌بعدی سپس پارامترهای انتخاب شده را در محدوده لازم همگرا می‌کند.

۴-۷- سطوح نهایی

در مدل نهایی هندسی یک ساختار، سطح‌های مورد نظر نباید با هم اصطکاک داشته باشند. سطوح می‌تواند در داخل

- [11] Dirusso E., Passive Magnetic Bearings with Ferrofluid Stabilization, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1996.
- [12] Clark D.J., Clark M.J., and Montague G.T.; An Over view of Magnetic Bearing Technology for Gas Turbine Engines, 2004.
- [13] AMSAT-P 3D Magnetic Bearing Momentum Wheel, International Symposium on small Satellites, France 1996.

این پروژه تحقیقاتی توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس حمایت مالی و معنوی شده و جا دارد که از مسئولین محترم دانشگاه به ویژه معاونت محترم پژوهشی قدردانی و تشکر نمائیم.

مراجع

- [1] Backers F.T., A magnetic journal bearing, Phillips Tech., Rev., Vol. 22, 1961, pp.232-238.
- [2] Yonnet J.P., Permanent magnet bearings and couplings, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 17, No.1, 1981, pp. 1169-1173.
- [3] Yonnet J.P., Lemarquand G., Himmerlin S., Olvierrulliere E., Stacked Structures Of Passive Magnetic Bearings, *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, No.10, 1991, pp.6633-6635.
- [4] Marinescu M., and Marinescu N., A New Improved Method for Computation of Radial Stiffness in Permanent Magnet Bearings, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No.5, 1994, pp.3491-3494.
- [5] Paden B., Groom N., and Antaki J.F., Design Formulas for Permanent- Magnet Bearings, *Transactions of the ASME*, Vol. 125, 2003, pp.734-738.
- [6] Ansoft Corporations <http://ansoft.com/>
- [7] Meeker D., Radial Magnetic Bearing: Example, 1999.
- [8] Siebert M., Passive Magnetic Bearing Development, 2002.
- [9] Beach R.F., Aerospace Power and Electronics Simulation Workshop, Concurrent Engineering Design practice foe Aerospace Power, NASA, 2003.
- [10] Wikipedia, Free encyclopedia, Earnshaw's theorem, 1842.