فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

مدل‌سازی یاتاقان مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار Ansoft

محمد اسماعیلی ادبی[۱،*]، شهربانو فرخنده[۲]

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

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 شده‌است. چنانکه تحلیل ساده‌ای جهت محاسبه نیروی مغناطیسی موجود میان دو قطب مغناطیسی همنام که مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند انجام گرفته و مدل سازی در نرم افزار 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.

واژه‌های کلیدی

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

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

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

۱ – مقدمه

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، یاتاقان‌ها ی 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[1] طراحی شده است[۹ و ۱۰]. نرم‌افزار Ansoft برای طراحی و ارزیابی تجهیزات و سیستم‌هایی که در حوزه الکترونیکی و الکترومغناطیسی کار می‌کنند استفاده می‌شود. راه حل‌های Ansoft بیشتر بر اساس معادلات ماکسول[2] و روش اجزای محدود برنامه‌نویسی شده است[۶].

Ansoft در طراحی اتوماسیون الکترونیکی، 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 مایکروویو[3]، بی‌سیم‌ها، سیستم‌های موتوری و سیم‌پیچ[4]، 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 همکارانش تکنیک‌های محاسبه یاتاقان‌های مغناطیسی را بر اساس ارتجاعیت توسعه دادند[۴]. استخراج روابط طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی توسط پدن و همکارانش 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 کلیولند 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 وکار یاتاقان‌های مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار Ansoft است.

۲-آشنایی با نرم‌افزار Ansoft FEM

نرم‌افزار 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 الکترومغاطیسی 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 معناطیسی را حل می‌کند.

استفاده از Maxwell 3D باعث ارتقای قابلیت تولید مهندسی شده است و زمان طراحی را به نحو مطلوبی کاهش داده است. نرم‌افزار 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.

1-Finite Element Analysis
2- Maxwell
3- Microwave
4- Solenoid

Maxwell 3D شامل حل‌کننده‌های مختلفی است که می‌توان به حل‌کننده حالت گذرا، مغناطیس دائم و الکتریکی اشاره کرد:

این حل‌کننده‌ها مسائل الکترومغناطیسی را در حوزه زمان و فرکانس در ساختار سه‌بعدی 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 می‌سازنند.

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 تاریخچه هندسی
- متحرک‌سازی نمودار میدان‌ها برای روش‌های حل پارامتری
- قابلیت پیشرفته ارتباطی این نرم‌افزار با نرم افزارهای Simplorer، HFSS و ePhysics
- الگوریتم ژنتیک جدید برای حالت بهینه‌سازی

۵- محاسبات نیروی مغناطیسی

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

$$a = ۳/۳۶\,cm \times ۳/۳۶\,cm = ۰/۰۰۱۱۲۹ m^۲$$

g فاصله هوایی است که برابر $۰/۰۰۱۰۲۲۳۵\,m$ 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 نقطهٔ P_1 و P_2 تعریف کرد[۱۰].

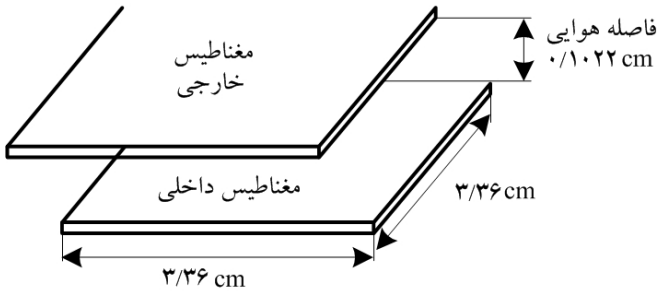
$$M = \int_{P_1}^{P_2} H dl \qquad (۱)$$

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]:

$$B = \frac{\mu_\circ M}{g} \qquad (۲)$$

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

$$F = \frac{B^۲ a}{\mu_\circ} \qquad (۳)$$



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

از نتایج Ansoft مقدار M به‌دست می‌آید و مقدار آن (A) ۳۵۷۰۲/۲۸ است[۶]. مقدار M در رابطه (۲) جایگذاری می‌شود.

$$B=\frac{۴\pi\times۱۰^{-۷}\times۳۵۷۰۲/۲۸}{۰/۰۰۱}$$

که پس از محاسبه، مقدار چگالی شار B برابر T ۰/۴۴۸۹ است. حال مقدار B در معادلهٔ (۳) جایگذاری می‌شود تا نیروی مغناطیسی به‌دست آید. مقدار نیروی F برابر N ۱۸/۰۹۱۳۳ خواهد بود.

۳- معادلات ماکسول

معادلات ماکسول راه‌های مختصر و جالبی را برای مسائل اساسی و بنیادی الکتریکی و مغناطیسی ارائه می‌کنند. این معادلات نقش تئوری پایه وسایل مغناطیسی و الکتریکی را ایفا نمایند. اولاً راه‌حل‌های عددی به دلیل محدودیت‌های حافظهٔ کامپیوتر، قریب به صحت هستند. بطور کلی محدودیت شکل‌های آن به تعداد اعشارهایی که در داخل سخت‌افزار 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 می‌گذارد.

چهار معادله ماکسول به ترتیب نشان می‌دهند که چگونه بارهای الکتریکی، میدان الکتریکی را (قانون گوس)، جریان‌ها چگونه میدان مغناطیسی (قانون آمپر) و چگونگی تغییرات میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی (قانون فاراد القائی) را تولید می‌کنند. این معادلات در روابط (۴) تا (۷) ارایه شده است[۱۰].

(۴) قانون گوس $\nabla.D=\rho$

(۵) قانون گوس برای مغناطیسی شدن $\nabla.D=۰$

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

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

در این معادلات:

$\rho\ (C/m^۳)$ چگالی بارهای آزاد الکتریکی، $B\ (tesla)$ چگالی شار مغناطیسی (برحسب تسلا) که القاء مغناطیسی هم گفته می‌شود، $D\ (C/m^۲)$ جابه‌جایی میدان الکتریکی، $E\ (A/m)$ میدان الکتریکی و J چگالی جریان است.

٤- مدل‌سازی در Ansoft

توضیحات زیر اختیارات و امکانات Ansoft را برای مدل‌سازی، ترسیم و تحلیل را بیان می‌کند.

٤-۱- برآورد اندازه نقشه / مدل

برآورد نقشه/مدل برای تعریف ناحیهٔ ترسیم در تمام زیر پنجره‌های پروژه‌های فعال استفاده می‌شود. تعریف صریح ناحیه ترسیم بسیار حائز اهمیت است، زیرا نرم‌افزار مقدار ناحیه مغناطیسی را برای تمام ناحیهٔ ترسیم محاسبه می‌کند. در ماکسول دو بعدی یا سه بعدی ناحیه‌هایی که در خارج از دامنهٔ ترسیم‌اند، تحلیل نمی‌شوند.

٤-۲- اندازه ناحیه ترسیم

ابعاد ناحیه ترسیم به‌طور قراردادی برای پروژه‌ها حدوداً ۱۰۰ واحد در ۷۰ واحد ارتفاع است. اگر ناحیه ترسیم برای هر پروژه متفاوت با اندازه قراردادی باشند، با یک فرمان می‌توان ناحیهٔ مورد نیاز را کوچک یا بزرگ کرد.

٤-۳- وضعیت مرزبندی

مرزبندی‌هایی که به‌طور خودکار برای مدل‌های مغناطیسی تعریف می‌شوند به شرح زیر است:

- مرزهای طبیعی که بین دو صفحه تعریف می‌شوند.
- مرزهایی که برای لبه‌های خارجی مسئله تعیین می‌شوند.

اگر ناحیه‌ای وضعیت مرزهای خود را مشخص نکند، وضعیت مرز قراردادی شامل آن می‌شود.

٤-٤- گزینه Region

Region دستوری است که برای تعیین اندازه ناحیه‌ای که شبکه‌ها را می‌سازد به کار می‌رود. این اندازه به طور خودکار بار اول برای مدل تعیین و ذخیره می‌شود و دیگر نیازی به تغییر آن نیست. در بیشتر موارد اندازهٔ مسئله مطابق با منابع موجود کاهش می‌یابد تا سرعت حل مسئله بالا رود.

٤-٥- تصفیه شبکه[1]

این شبکه‌ها شامل چهار ضلعی‌هایی است که میدان‌های حل را برای ساختارهایی که در حافظه ذخیره تعریف نشده‌اند

1- Mesh

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 وفقی

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.

٤-٦- 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 اندازهٔ اجزای که در گره‌های چهارضلعی وجود دارند بستگی دارند. برای هر شبکهٔ بزرگ با تعداد زیاد اجزا باید معکوس‌کننده‌های با قدرت بالا در حافظهٔ 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 محدودهٔ لازم همگرا می‌کند.

٤-٧- سطوح نهایی

در مدل نهایی هندسی یک ساختار، سطح‌های مورد نظر نباید با هم اصطکاک داشته باشند. سطوح می‌تواند در داخل دیگری قرار بگیرند، اما سطوح نباید هم‌پوشانی[1] داشته باشند. اگر یک جزئی بر روی دیگری هم‌پوشانی داشته باشد، هندسه مسئله به‌صورت 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 خلاصه ای 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 ۱۸/۰۹۱۳۳ نیوتن محاسبه شد.

فهرست علایم

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

تقدیر و تشکر

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

1- Overlap

این پروژه تحقیقاتی توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس حمایت مالی و معنوی شده و جا دارد که از مسئولین محترم دانشگاه به‌ویژه 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., Hmmerlin S., Olvierrulliere E., Stacked Structures Of Passive Magnetic Bearings, *Jounal 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, Earnshow's theorem, 1842.

[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.