

## تأثیر لایه چینی دیسک کامپوزیتی بر رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای

حسن رضائی استاد

جعفر کیقبادی\*

غلامرضا هاشمی

محررم شاملی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، keighobadi@tabrizu.ac.ir

کارشناس ارشد، مهندسی مکترونیک، پژوهشکده رانشگرهای فضائی- پژوهشگاه فضائی ایران، تبریز، ایران

استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشکده رانشگرهای فضائی- پژوهشگاه فضائی ایران، تبریز، ایران، maharramsameli@yahoo.com

### چکیده

چکیده در مسئله دفع ارتعاشات، بکارگیری سامانه‌های کنترل غیرفعال همراه با میراگر جریان گردابه‌ای و خاصیت مغناطیسی آن یک روش کلیدی برای کاهش حساسیت و مصرف انرژی است. یکی از کاربردهای مهم میراگر جریان گردابه‌ای، در سامانه‌های فضائی است؛ و در این مقاله کاربرد آن در بازکننده آنتن ماهواره است. برای شبیه‌سازی میراگر جریان گردابه‌ای از فرم‌های دیفرانسیلی و انتگرالی معادلات مکسول در نرم‌افزار COMSOL و از روش انرژی المان محدود در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در COMSOL بخش الکترومغناطیس را برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی و الکتریکی در شرایط تغییر زاویه دیسک با زمان و از PDE برای حل معادلات انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده شده است. استفاده از نرم‌افزار COMSOL به روش المان محدود و معادلات دیفرانسیلی مکسول، یک گسستگی مابین مواد مغناطیسی در مؤثر بودن برای میراگر را سبب شده است. گروه مواد نهایی برای مواد مغناطیسی از نوع گروه فرامغناطیس‌ها و دیامغناطیس به ترتیب نیکل و مس تعیین شده است. شبیه‌سازی نشان داده که وجود ایزوله ساز الکتریکی باعث کاهش ضریب میرایی می‌شود. واژه‌های کلیدی: جریان گردابه‌ای، چگالی شار مغناطیسی، ضریب میرایی، سرعت زاویه‌ای، میراگر مغناطیسی.

## Effect of Composite Disk Layering on Eddy-Current Damper Damping Behavior

H. Rezaie Ostad

J. Keighobadi

Gh. R. Hashemi

M. Shameli

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Mechatronic Engineering, Iran Space Research Institute, Tabriz, Iran

Mechanical Engineering, Iran Space Research Institute, Tabriz, Iran

### Abstract

In the issue of vibration suppression, the implementation of passive control systems based on eddy-current dampers and its magnetic features play the main role of lowering both the sensitivity and the power consumption. Regarding application in space systems, the eddy-current damper role is in opening of a satellite antenna. For simulation purpose of the eddy-current damper, the differential and integral forms of Maxwell equations in COMSOL software, as well as the finite element energy method in a MATLAB are used. In the electro-magnetic section by COMSOL, the simulation of electrical field and magnetic potential during the disk angle change is considered while the PDE of electro-magnetic field and energy are numerically solved through MATLAB. The application of COMSOL software based on finite-element method and Maxwell differential equations yield a discontinuity of magnetic materials effectiveness for damper. Resultant material groups were determined to be the Ferromagnetic and diamagnetic material which their pertaining substances are nickel and the copper. The results of simulation showed that applying electrical isolation leads to decrease of the damping ratio.

**Keyword:** Eddy-Current, Magnetic Flux Density, Damping Coefficient, Angular Velocity, Magnetic Damper.

### ۱- مقدمه

میراگرهای جریان گردابه‌ای از دو بعد قابل بررسی هستند که یکی تأثیر چیدمان آهنرباهای دائم و دیگری تأثیر لایه چینی دیسک رسانای الکتریکی است که در اینجا دیسک رسانای الکتریکی از نوع کامپوزیتی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، اثر لایه چینی دیسک کامپوزیتی بر رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای بررسی می‌شود. هدف این پژوهش بررسی اثر نوع، تعداد، جنس و شکل لایه‌های دیسک کامپوزیتی بر رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای است. میراگر جریان گردابه‌ای بر اساس سه قانون فارادی آمپر و لورنتز کار می‌کند. در این ساختار، میدان مغناطیسی توسط آهنرباهای دائم به دیسک در حال چرخش اعمال می‌شود. دیسک در حال چرخش بر اساس قانون فارادی شروع به ایجاد جریان گردابه‌ای کرده و این جریان گردابه‌ای یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند که با میدان تولیدی توسط آهنرباهای دائم مخالفت می‌کند. تقابل این میدان‌های مغناطیسی موجب تولید یک

میراگرهای جریان گردابه‌ای بکار برده شده در مکانیزم بازکننده آنتن ماهواره متشکل از دیسک رسانای الکتریکی، آهنربای دائم و محور دوران است. مکانیزم بازکننده آنتن ماهواره یک حرکت خطی در جهت طول آنتن دارد و حرکت خطی آنتن از طریق یک محور به دیسک چرخان متصل می‌شود. ارتعاشات مکانیزم بازکننده آنتن از محور به دیسک چرخان منتقل شده و موجب چرخش دیسک حول محور خودش می‌شود که این ارتعاشات به وسیله‌ی میراگر جریان گردابه‌ای خنثی می‌شوند.

در مسئله خنثی‌سازی نوسانات ایجاد شده ناشی از ارتعاش مکانیزم بازکننده آنتن ماهواره، از یک میراگر دورانی استفاده می‌شود.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: keighobadi@tabrizu.ac.ir

حالت از میرایی مابین دیسک و آهنرباها می‌شود [۱-۳].

بر اساس آنچه در مطالعات قبلی انجام شده، این روش از میرا سازی نوسانات دارای انواع مختلف در گروه میراگرهای غیرفعال است [۴]. بر این اساس خلاصه‌ای از پیشینه تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه می‌شود. در بخش مغناطیسی و به‌ویژه میراگرهای مغناطیسی، از طریق مدل شبیه‌سازی تأثیر آرایش هندسی آهنرباهای دائم بر روی گشتاور مقاوم ایجادشده توسط پدیده جریان گردابه‌ای بررسی شده است. در این مرجع، چندین قطعه آهنربای دائم در برابر دیسک هادی استفاده شده بطوریکه چیدمان آهنرباها در دو سوی یک هادی به‌صورت مخالف هم نتایج بسیار مناسبی داشته است و درواقع، این آهنرباها به‌صورت یک‌درمیان در راستای شمال و جنوب قرار داده می‌شوند قطر آهنرباها و تعداد آن‌ها در راستای خط محیطی و با هدف رسیدن به بهترین عملکرد ضریب میرایی انجام می‌شود [۴].

در مطالعه دیگر در زمینه پارامترهای مؤثر بر نیروی ترمز مغناطیسی ایجاد شده توسط پدیده جریان گردابه‌ای، نتایج نشان داده که ضریب میرایی مجموعه متناسب با توان دوم نسبت تبدیل جعبه‌دنده افزایش می‌یابد؛ و در آزمایش صورت گرفته چیدمان یک‌درمیان و مخالف در دو سمت دیسک بهترین حالت را نتیجه داده است [۵].

در تحقیقات قبلی انجام شده در رابطه با میراگر جریان گردابه‌ای، شبیه‌سازی‌ها برای چیدمان‌های مختلف در آهنرباهای دائم انجام شده است. بخش قابل‌توجه میراگر، دیسک هادی الکتریسته است که در میان آهنرباهای دائم می‌چرخد و می‌توان آن را به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد. دیسک کامپوزیتی میراگر جریان گردابه‌ای از نوع دورانی بوده و این سیستم در اتصال با یک سیستم چرخ‌دنده قرار گرفته و از طریق آن به بخش محرک در مکانیزم بازکننده آنتن متصل می‌شود [۴، ۵].

برای شبیه‌سازی مدل میراگر جریان گردابه‌ای از روش انرژی المان محدود، در نرم‌افزار COMSOL از بخش «الکترو-مغناطیس» در زیرگروه «Physics» برای آهنرباهای دائمی و دیسک‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. همچنین برای تکمیل مدل آهنرباهای دائمی از بخش «قانون آمپر» و برای دیسک کامپوزیتی از «ترم سرعت» و «محاسبه نیروی لورنتز» استفاده می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها تعداد ۶ تا ۸ آهنربا را در اطراف دیسک‌های مسی قرار دادیم که آن‌ها هم در نرم‌افزار به‌عنوان دیسک مدل شده‌اند. سپس تعداد متغیری لایه‌های دیسک کامپوزیتی مابین ۱ الی ۵ قرار داده می‌شود. چگالی شار مغناطیسی برای آهنرباهای دائمی ۱/۲۴ تسلا در نظر گرفته شده و همچنین ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مطابق جدول ۳ اعمال می‌شود. بایستی توجه شود که لایه‌های ایزوله ساز الکتریکی از جنس چوب مابین لایه‌های دیسک کامپوزیتی قرار داده می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- مکانیزم میراگر جریان گردابه‌ای

مطابق شکل ۱، میراگر جریان گردابه‌ای از سه بخش اصلی دیسک کامپوزیتی، آهنربای دائمی ۱ و محور دوران ۲ دیسک تشکیل شده است. استفاده از دیسک کامپوزیتی در این میراگر موجب شده تا اهمیت ساختار لایه چینی دیسک کامپوزیتی مورد بررسی و توجه قرار گیرد از این‌رو تأثیر لایه چینی دیسک کامپوزیتی میراگر جریان گردابه‌ای در کنار آرایش آهنرباهای دائمی از مسائل مهم و باز در زمینه طراحی میراگر جریان گردابه‌ای هستند. اثر لایه چینی دیسک کامپوزیتی بر روی رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای توسط نویسندگان این مقاله بررسی شده است.

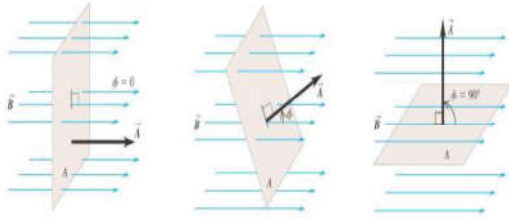
در میرایی میراگر جریان گردابه‌ای، تأثیر گشتاور میرایی در حرکت دورانی میراگر به‌عنوان مؤثرترین پارامتر ارزیابی شده است. گشتاور میرایی میراگر به دست آمده از تقابل نیروهای مغناطیسی و یا الکتریکی در دیسک کامپوزیتی موجب چرخش محور دوران متحرک مابین آهنرباهای دائم می‌شود همچنین چرخش دیسک موجب تغییر اندازه چگالی شار مغناطیسی نسبت به زمان می‌شود. بدین طریق، تغییر میدان مغناطیسی نسبت به زمان، حرکت الکترون‌های آزاد جسم متحرک یعنی دیسک کامپوزیتی را به وجود می‌آورد. با توجه به اینکه حرکت الکترون‌ها در یک مسیر مشخص است و به دلیل آنکه هدایت و چارچوب پایداری برای الکترون‌ها وجود ندارد، این الکترون‌ها در مسیر بیضوی یا دایره‌ای برای ایجاد جریان گردابه‌ای به حرکت درمی‌آیند که این حرکت به‌عنوان جریان گردابه‌ای<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد. جریان گردابه‌ای خود بر اساس قانون آمپر و لنز یک میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند که این میدان بسته به حساسیت جنس دیسک کامپوزیتی می‌تواند منفی یا مثبت شود. در صورتی که میدان مغناطیسی ایجاد شده منفی شد با میدان ایجاد شده به‌وسیله آهنرباهای دائم مخالفت کرده و موجب تولید نیروی الکترو- حرکتی در خلاف جهت چرخش دیسک کامپوزیتی می‌شود. گشتاوری که در راستای شعاع دیسک کامپوزیتی در جهت مخالف وارد می‌شود، گشتاور میرایی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. شکل ۱ نحوه کارکرد میراگر جریان گردابه‌ای را نشان داده است.

<sup>1</sup> Permanent Magnet

<sup>2</sup> Rotation Axis

<sup>3</sup> Eddy-Current

<sup>4</sup> Damping Torque



شکل ۲- شار مغناطیسی در گذر از صفحه‌ی رسانا

مطابق شکل ۲ در صورتی که زاویه بین امتداد صفحه و شار مغناطیسی صفر درجه باشد نیروی میرایی حداکثر و در صورتی که زاویه بین خطوط مغناطیسی و صفحه ۹۰ درجه باشد، نیروی میرایی صفر خواهد بود [۱۱۳]. در مواقعی که در دیسک کامپوزیتی زاویه مابین دیسک و شار مغناطیسی صفر شود، نیروی مغناطیسی به شکل زیر خواهد بود:

$$F_d = \frac{B^2 T A}{\rho} v \quad (5)$$

که  $v$  سرعت خطی،  $\rho$  ضریب مقاومت مخصوص و  $A$  سطح مؤثر زیرین آهنرباست. از آنجایی که طبق هدف این تحقیق، تأثیر لایه چینی بر میرایی میراگر بستگی به دو پارامتر گشتاور و سرعت زاویه‌ای دارد، در نمودار گشتاور میرایی در برابر سرعت زاویه‌ای، شیب خط برابر ضریب میرایی خواهد بود. همچنین در دیسک کامپوزیتی مقاومت الکتریکی طبق معادله (۶) است [۱۱۴].

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (6)$$

ضریب میرایی  $C_d$  از تقسیم نیروی میرایی  $F_d$  بر سرعت  $v$  به دست می‌آید:

$$C_d = \frac{F_d}{v} \quad (7)$$

طبق معادله (۵) و (۷) ضریب میرایی به شکل زیر قابل محاسبه است:

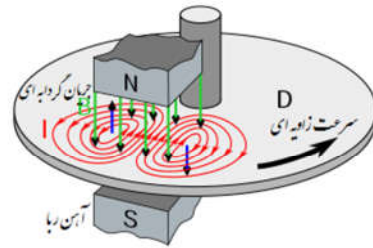
$$C_d = \frac{B^2 T A}{\rho} \quad (8)$$

با توجه به این که  $v = r\omega$  که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای و  $r$  شعاع دیسک کامپوزیتی است گشتاور میرایی  $T_d$  به شکل زیر به دست می‌آید [۱۱۴].

$$T_d = F \times r = \frac{B^2 T A}{\rho} v \times r = B^2 T A \frac{r^2 \omega}{\rho} \quad (9)$$

### ۳-۲- روش‌ها

برای الگوسازی دیسک کامپوزیتی از مواد مختلف، اندازه‌های مختلف دیسک، حالت‌های همراه با ایزوله و بدون ایزوله‌ی الکتریکی استفاده می‌شود. مواد مختلفی که می‌توان به آن‌ها اشاره نمود عبارت‌اند از: ۱- فرامغناطیس‌ها<sup>۱</sup>، ۲- فریمغناطیس<sup>۲</sup>، ۳- پارامغناطیس‌ها<sup>۳</sup>، ۴- ضد-



شکل ۱- نحوه کار میراگر جریان گردابه‌ای

همان‌گونه که از شکل ۱ مشخص است دیسک در میان آهنرباهای دائم شروع به چرخش می‌نماید و این چرخش موجب تغییر در برخورد خطوط شار مغناطیسی می‌شود که این تغییرات شار، جریان گردابه‌ای در دیسک را تولید می‌کند و این جریان، میدان متناظری که با فلش عمودی آبی‌رنگ در شکل ۱ نشان داده شده را به وجود می‌آورد بدین شکل، میدان این دیسک با میدان مغناطیسی آهنربا مخالفت کرده و نیروی مقاومی در دیسک تولید می‌شود.

### ۲-۲- مدل‌سازی

در سیستم میراگر جریان گردابه‌ای، شار مغناطیسی توسط منبع میدان مغناطیسی به دیسک‌های کامپوزیتی وارد می‌شود. این شار توسط معادله (۱) بیان می‌شود.

$$\Phi_B = \int B ds \quad (1)$$

که در آن  $\Phi$  شار مغناطیسی،  $B$  چگالی شار و  $s$  سطحی است که جریان گردابه‌ای در آن تولید می‌شود [۶-۹].

سیس تغییرات این شار نسبت به زمان یک نیروی الکترو- حرکتی ایجاد می‌کند:

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

در معادله بالا  $\mathcal{E}$  نیروی الکترو- حرکتی است.

نیروی الکترو- حرکتی در جسم رسانای الکتریکی با مقاومت  $R$ ، جریان الکتریکی  $i$  را در دیسک کامپوزیتی به وجود می‌آورد [۱۰-۱۲]:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{d(BA)}{Rdt} = -\frac{BT}{R} v \quad (3)$$

که  $A$  سطح مقطع مؤثر در مقابل میدان آهنرباهای دائمی است،  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $T$  ضخامت و  $v$  سرعت می‌باشد.

در یک جسم رسانا با ضخامت  $T$ ، نیروی میرایی  $F_d$  طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$F_d = i \cdot T \cdot B \cos \theta \quad (4)$$

در شکل (۲) نحوه‌ی برخورد شار مغناطیسی با صفحه رسانا نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Ferromagnetic

<sup>2</sup> Ferrimagnetic

<sup>3</sup> Paramagnetic

فرامغناطیس‌ها<sup>۱</sup> و ۵- دیمغناطیس‌ها<sup>۲</sup> که برای گروه اول «نیکل»، برای گروه دوم «فریت»، برای گروه سوم «آلومینیوم»، برای گروه چهارم «کرم» و برای گروه آخر «مس» قرار داده می‌شود.

دو نوع اندازه مختلف از دیسک کامپوزیتی شامل نوع اول با قطر دیسک ۲۶ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر و نوع دوم با قطر ۵۷ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر بررسی می‌شود. مشخصات شبیه‌سازی دیسک‌های کامپوزیتی جریان گردابه‌ای در جدول ۱ داده شده است.

شبیه‌سازی الگوی موردنظر در نرم‌افزار COMSOL و MATLAB با دو روش المان محدود و روش انرژی‌های کوانتومی انجام می‌گیرد. در این روش‌ها و در نرم‌افزار COMSOL از بخش فیزیک و زیر بخش «الکترو-مغناطیس» و زیرگروه‌های «قانون‌های آمپر و فارادی» و «محاسبه نیروی لورنتز» آهنرباها و دیسک‌های رسانا در دیسک کامپوزیتی برای تعیین گشتاور میرایی بهینه شبیه‌سازی می‌شود. در این روش تعداد ۱ تا ۵ دیسک از مواد فرامغناطیس، فریمغناطیس، دیمغناطیس، ضد فرامغناطیس و پارامغناطیس به‌طور متغیر در دیسک کامپوزیتی قرار داده شده و تعداد ۶ تا ۸ آهنربا میدان را روی دیسک کامپوزیتی قرار داده و چگالی شار مغناطیسی و الکتریکی آن بررسی می‌شود. در نرم‌افزار MATLAB جریان‌های گردابه‌ای و میدان مغناطیسی به روش انرژی در مقیاس کوانتومی شبیه‌سازی می‌شود.

۴	۲۶	۴	ندارد	فریت	مس
۴	۲۶	۵	ندارد	فریت	مس
۵	۲۶	۳	ندارد	کرم	مس
۵	۲۶	۴	ندارد	کرم	مس
۵	۲۶	۵	ندارد	کرم	مس

طبق جدول ۲، شبیه‌سازی‌های دیسک کامپوزیتی بر اساس اندازه ثابت برای قطر دیسک ۲۶ میلی‌متری، تعداد متغیر دیسک ۳، ۴ و ۵ تایی همراه با حالت بدون ایزوله ساز و با جنس‌های مختلف مس، آلومینیوم، نیکل، فریت و کرم در لایه‌های میانی و جنس مس در لایه‌های کناری انجام می‌شود.

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذپذیری برای مواد مختلف

نام ماده	مقدار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (H/m)
مس	۰/۹۹۹۹۹۲
آلومینیوم	۰/۰۰۰۰۲۲
کرم	۴/۷۸۵
نیکل	۱۰۰-۶۰۰
فریت	۶۴۰-۱۶

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- جدول‌ها و شکل‌ها

شبیه‌سازی دیسک کامپوزیتی میراگر جریان گردابه‌ای در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و میدان مغناطیسی ۱/۲۴ تسلا برای آهنرباهای دائمی در نظر گرفته شده است. ابتدا برای قطرهای دیسک ۲۶ و ۵۷ میلی‌متری و در حالت‌های با ایزوله ساز و بدون ایزوله ساز در حضور دو سری از آهنرباهای ۶ و ۸ تایی با تعداد ۵ لایه دیسک کامپوزیتی شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL انجام می‌گیرد. مرحله دوم این شبیه‌سازی برای اندازه قطر دیسک ۲۶ میلی‌متر و تعداد ۳ تا ۵ لایه متغیر در حالت بدون ایزوله ساز در جنس‌های مختلف مس، کرم، فریت، آلومینیوم و نیکل برای لایه‌های میانی و مس برای لایه‌های کناری انجام گرفت.

نتایج به دست آمده از این دو دسته شبیه‌سازی به‌صورت گرافیکی و همچنین نموداری به‌وسیله‌ی نرم‌افزار COMSOL در شکل‌های بعدی ارائه می‌شود. شکل ۳، سه نما از میراگر جریان گردابه‌ای را نشان می‌دهد. بخش (الف) این شکل، میدان مغناطیسی ایجاد شده در دیسک کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نما مشخص است در برابر آهنرباهای دائم بر روی دیسک یک میدان مغناطیسی ایجاد شده و تغییر رنگ آن نشان می‌دهد که میدان‌های ایجاد شده در دیسک مخالف میدان مغناطیسی آهنربای دائم هستند. این رفتار با توجه به حساسیت منفی مواد دیمغناطیس منطقی است. در مواد دیمغناطیس، میدانی که در جسم دیسک ناشی از میدان الکتریکی و میدان اعمالی ایجاد می‌شود به‌صورت مخالف ظاهر می‌شود. در نمای دیگر در بخش (ب) بردارهای میدان الکتریکی در دیسک کامپوزیتی با رنگ سفید نشان داده شده است این نما جریانی را که به سبب پدیده جریان گردابه‌ای ایجاد شده نشان می‌دهد. در بخش (ج) میدان مغناطیسی تابیده‌شده به دیسک کامپوزیتی نشان داده شده و در این

جدول ۱- پارامترهای شبیه‌سازی اول

شبه‌سازی	تعداد آهنربا	اندازه دیسک	ایزوله ساز	تعداد دیسک
۱	۶	۲۶	ندارد	۵
۲	۶	۲۶	دارد	۵
۳	۶	۵۷	دارد	۵
۴	۶	۵۷	ندارد	۵
۵	۸	۲۶	ندارد	۵
۶	۸	۲۶	دارد	۵
۷	۸	۵۷	ندارد	۵
۸	۸	۵۷	دارد	۵

جدول ۲- پارامترهای شبیه‌سازی دوم

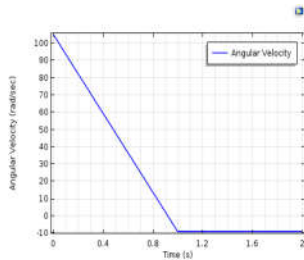
شبه‌سازی	اندازه دیسک	تعداد دیسک	ایزوله ساز	جنس لایه میانی	جنس کناری
۱	۲۶	۳	ندارد	مس	مس
۱	۲۶	۴	ندارد	مس	مس
۱	۲۶	۵	ندارد	مس	مس
۲	۲۶	۳	ندارد	آلومینیوم	مس
۲	۲۶	۴	ندارد	آلومینیوم	مس
۲	۲۶	۵	ندارد	آلومینیوم	مس
۳	۲۶	۳	ندارد	نیکل	مس
۳	۲۶	۴	ندارد	نیکل	مس
۳	۲۶	۵	ندارد	نیکل	مس
۴	۲۶	۳	ندارد	فریت	مس

<sup>1</sup> Antiferromagnetic

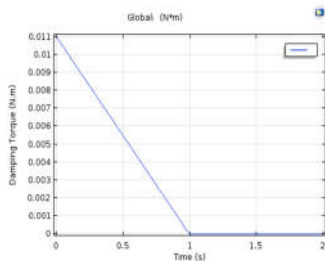
<sup>2</sup> Diamagnetic

شکل ۶ ضریب میرایی برای میراگر جریان گردابه‌ای با دیسک کامپوزیتی اندازه ۵۷ میلی‌متری و تعداد آهنربای ۶ عددی را نشان می‌دهد. در این نمودار، نتیجه شبیه‌سازی برای دو حالت با ایزوله و بدون ایزوله برای میراگر جریان گردابه‌ای ارائه شده است. در این نمودار ضریب میرایی برای حالت دیسک کامپوزیتی بدون ایزوله ساز الکتریکی بیشتر از حالت با ایزوله ساز است. این موضوع به سبب تغییر عمق که متناسب با ضخامت مؤثر ایزوله ساز الکتریکی است صورت می‌گیرد. با قرار دادن ایزوله ساز الکتریکی حرکت الکترون‌ها در ضخامت کمتری صورت گرفته

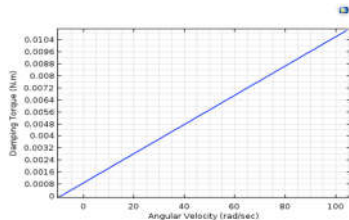
(الف)



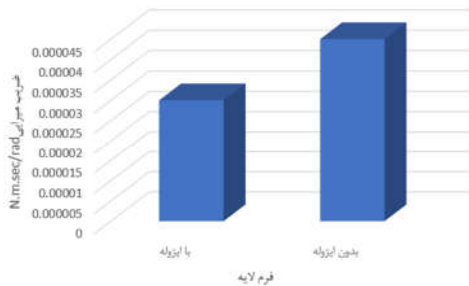
(ب)



(ج)



شکل ۴- نمودارهای سرعت زاویه‌ای و گشتاور برای میراگر جریان گردابه‌ای



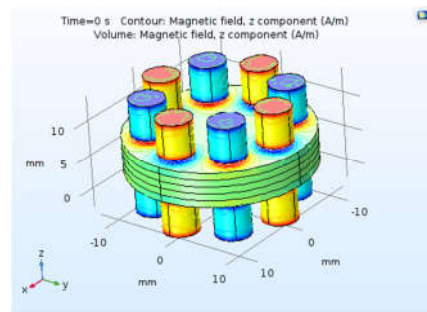
شکل ۵- ضریب میرایی در دو حالت با ایزوله و بدون ایزوله برای دیسک ۲۶ میلی‌متری

نما میدان مغناطیسی از آهنرباهای دائم به سمت دیسک کامپوزیتی تابیده می‌شود، در این روش نفوذ میدان مغناطیسی در دیسک در لایه‌های میانی به سبب ضریب نفوذ بالای مواد فرا مغناطیس مشخص شده است.

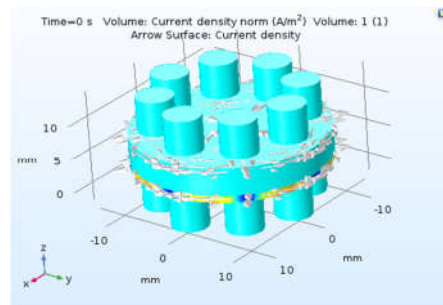
در شکل ۴ نمودارهای سرعت زاویه‌ای برحسب زمان در بخش (الف)، گشتاور میرایی برحسب زمان در بخش (ب) و نسبت میرایی در بخش (ج) برای میراگر جریان گردابه‌ای نشان داده شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سری اول برای میراگر جریان گردابه‌ای به صورت نمودار نیز ارائه شده است. شکل ۵ نمودار ضریب میرایی برای دو حالت متفاوت دیسک کامپوزیتی با اندازه ۲۶ میلی‌متری را به همراه ۶ عدد آهنربا نشان می‌دهد. در این نمودار، نتیجه شبیه‌سازی برای دو حالت همراه با ایزوله و بدون ایزوله برای میراگر جریان گردابه‌ای ارائه شده است به طوری که ضریب میرا برای حالت دیسک کامپوزیتی بدون ایزوله بیشتر از حالت همراه با ایزوله نتیجه می‌شود. دلیل این افزایش، جلوگیری ایزوله ساز الکتریکی از ایجاد جریان با عمق زیاد به عنوان یک عامل مؤثر است و این که میدان مغناطیسی متناسب با جریان است و جریان رابطه‌ی مستقیمی با ضخامت دارد.

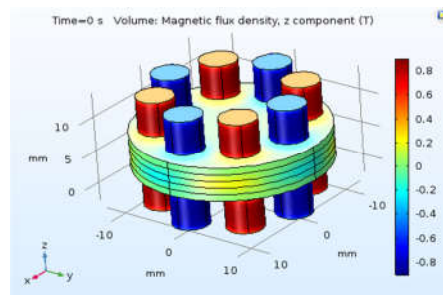
(الف)



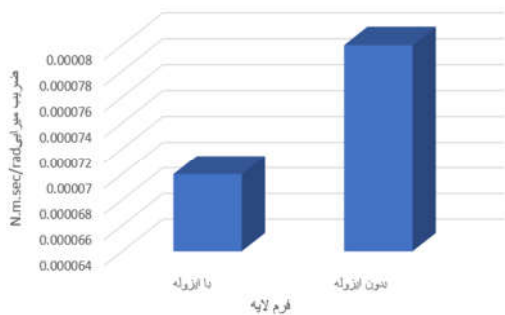
(ب)



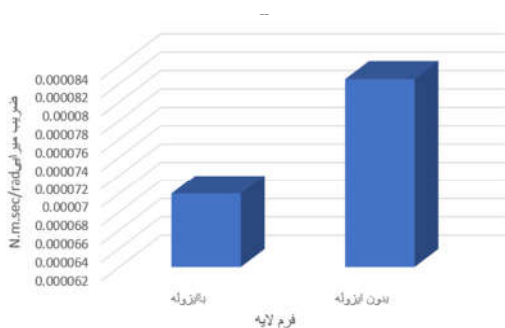
(ج)



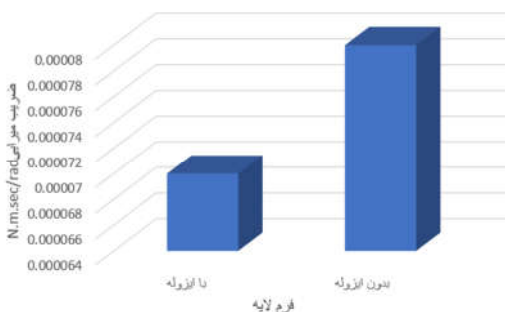
شکل ۳- میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی در میراگر جریان گردابه‌ای



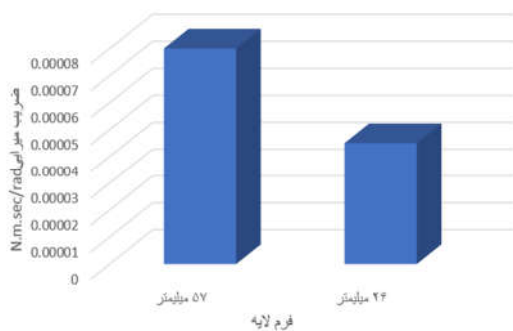
شکل ۶- ضریب میرایی در دو حالت با ایزوله و بدون ایزوله برای دیسک ۵۷ میلی متری



شکل ۷- ضریب میرایی در دو حالت با ایزوله و بدون ایزوله برای دیسک کامپوزیتی اندازه ۲۶ میلی متری با تعداد آهنربای ۸ عدد



شکل ۸- ضریب میرایی در دو حالت با ایزوله و بدون ایزوله برای دیسک کامپوزیتی ۵۷ میلی متری با تعداد آهنربای ۸ عدد



شکل ۹- ضریب میرایی برای دیسک‌های ۲۶ و ۵۷ میلی متری همراه با آهنربای ۶ عددی

و این خود سبب می‌شود تا جریان ضعیفی صورت گیرد لذا در لایه‌ها جریان مؤثری برقرار نشده و از این رو جریان گردابه‌ای به وجود آمده ضریب میرایی کمتری تولید می‌کند. از کوانتوم هم این مسئله بسیار روشن است به این صورت که وجود ناحیه‌های انرژی کمتر سبب می‌شود که انرژی‌های کوانتومی کمتری به وجود آید و انرژی کمتر جریان ضعیفی را تولید می‌کند.

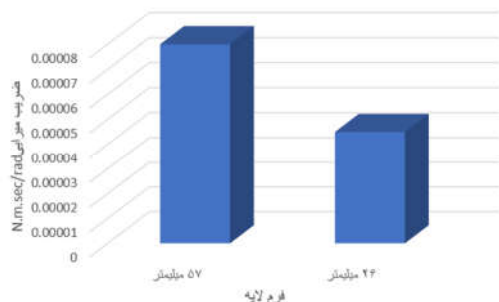
شکل ۷ ضریب میرایی برای میراگر جریان گردابه‌ای با دیسک کامپوزیتی اندازه ۲۶ میلی متری و همراه با ۸ عدد آهنربا را نشان می‌دهد. مشابه حالت اول، در این نمودار نتیجه شبیه‌سازی برای دو حالت با ایزوله ساز و بدون ایزوله ساز برای میراگر جریان گردابه‌ای ارائه شده است. ضریب میرایی برای حالت دیسک کامپوزیتی بدون ایزوله ساز بیشتر از قرار دادن ایزوله ساز نتیجه می‌دهد؛ زیرا ارتباط مابین لایه‌ها برقرار بوده و الکترون‌ها بین دیسک‌ها حرکت می‌کند و این موضوع موجب می‌شود تا ضریب میرایی متناسب با جریان افزایش یابد. از آنجائی که میدان الکتریکی در سه جهت تابعی از مختصه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  است لذا داشتن یک میدان مغناطیسی که در جهت‌های مختلف دارای مؤلفه است سبب ایجاد میدان مغناطیسی بزرگ‌تر می‌شود؛ و این در حالی است که میدان مغناطیسی مربوط به دیسک‌هایی که از نظر الکتریکی مجزا شده‌اند بسیار ضعیف است، زیرا میدان‌های دیسک‌های مجزا یکدیگر را خنثی نموده و میدان معادل ضعیفی تولید می‌شود.

شکل ۸ ضریب میرایی برای میراگر جریان گردابه‌ای با دیسک کامپوزیتی اندازه ۵۷ میلی متری و تعداد آهنربای ۸ تایی را نشان داده است. در این نمودار نتیجه شبیه‌سازی برای دو حالت استفاده از ایزوله ساز و بدون آن برای میراگر جریان گردابه‌ای ارائه شده است. ضریب میرایی برای حالت دیسک کامپوزیتی بدون ایزوله بیشتر از با ایزوله نتیجه می‌شود. دلیل افزایش ضریب میرایی در دیسک بدون ایزوله ناشی از افزایش ابعاد ناحیه‌های انرژی است.

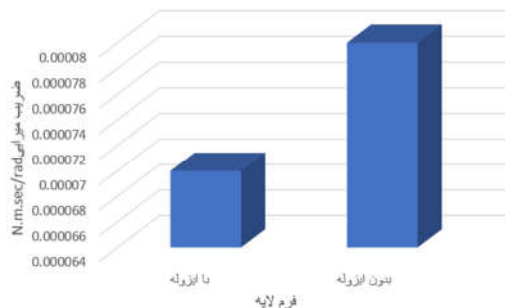
شکل ۹ ضریب میرایی برای میراگر جریان گردابه‌ای با دیسک‌های ۲۶ و ۵۷ میلی متری و تعداد آهنربای ۶ عددی را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های شکل ۹، هر چه میزان اندازه دیسک بیشتر شود، ضریب میرایی نیز افزایش پیدا می‌کند. دلیل افزایش ضریب میرایی در دیسک ۵۷ میلی متری، سطح بیشتر دیسک در مقابل میدان مغناطیسی است. چرا که ناحیه‌های انرژی تابعی از دو مؤلفه‌ی  $x$  و  $y$  هستند. در دیسک نیز که مشخصات استوانه‌ای دارد افزایش شعاع هم سبب می‌شود تا اندازه میدان مغناطیسی دیسک افزایش یابد، بر این اساس سطح بیشتر دیسک ۵۷ میلی متری سبب افزایش ضریب میرایی شده است.

شکل ۱۰ ضریب میرایی برای میراگر جریان گردابه‌ای با دیسک‌های ۲۶ و ۵۷ میلی متری و ۸ عدد آهنربا را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۰، با افزایش اندازه دیسک ضریب میرایی نیز افزایش پیدا می‌کند.

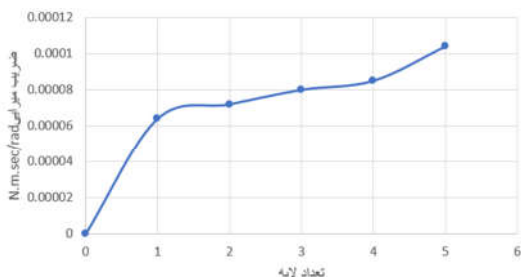
در ادامه داده‌های شبیه‌سازی دسته دوم ارائه می‌شود؛ که در آن مواد مغناطیسی مختلف در دیسک کامپوزیتی در تعداد ۳ تا ۵ لایه جایگذاری می‌شود.



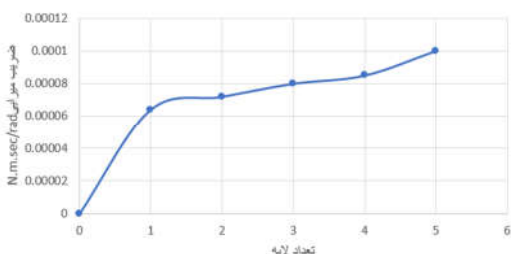
شکل ۱۱- ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای مس



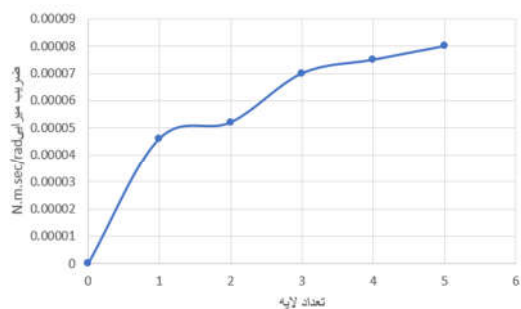
شکل ۱۰- ضریب میرایی برای دیسک‌های ۲۶ و ۵۷ میلی‌متری در تعداد آهنربای ۸ عدد



شکل ۱۲- ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای ترکیب مس و نیکل



شکل ۱۳- ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای ترکیب مس و فریت



شکل ۱۴- ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای ترکیب مس و آلومینیوم

شکل ۱۱ ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای دیسک کامپوزیتی با لایه میانی و کناری از جنس مس را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های شکل ۱۱ هر چه تعداد لایه افزایش یابد ضریب میرایی نیز افزایش می‌یابد. علت این افزایش ضریب میرایی در ضخامت یکسان دیسک، جریان گردابه‌ای مضاعفی است که در لایه اضافه‌شده ایجاد می‌شود. شکل ۱۲ ضریب میرایی در برابر تعداد لایه برای دیسک کامپوزیتی با لایه میانی نیکل و کناری از نوع مس را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های شکل ۱۲، با افزایش تعداد لایه‌ها، ضریب میرایی نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۱۳ ضریب میرایی را نسبت به تعداد لایه‌های دیسک کامپوزیتی با لایه میانی فریتی و لایه کناری مسی نشان داده است. همچنین شکل ۱۴ تغییرات ضریب میرایی را نسبت به تعداد لایه‌های دیسک کامپوزیتی نشان داده که لایه‌های میانی از آلومینیوم و جنس لایه‌های کناری مسی است. مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ هم افزایش تعداد لایه‌ها ضریب میرایی را افزایش داده است.

شکل ۱۵ ضریب میرایی نسبت به تعداد لایه دیسک کامپوزیتی با لایه میانی کرم و کناری مس را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های شکل ۱۵ هر چه تعداد لایه افزایش یابد ضریب میرایی نیز افزایش می‌یابد. در این نمونه نیز افزایش تعداد لایه‌های دیسک کامپوزیتی موجب افزایش ضریب میرایی شده است. درواقع، افزایش ضریب میرایی متناسب با تعداد لایه به دلیل تولید جریان گردابه‌ای مضاعف است.

شکل ۱۶ ضریب میرایی را برای مواد مغناطیسی مختلفی که در لایه چینی دیسک کامپوزیتی استفاده شده‌اند نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، مواد فرامغناطیس در رده اول قرار می‌گیرند. همچنین مواد فرامغناطیس به دلیل داشتن گشتاورهای دوقطبی منظم و مستقیم سبب تولید جریان گردابه‌ای قوی و منظم در دیسک کامپوزیتی می‌شوند. در دیسک کامپوزیتی برای لایه چینی در هر حالت دو نوع لایه قرار داده‌ایم. در ضمن لایه اول لایه کناری بوده و ضرورتاً از مواد دیامغناطیس است.

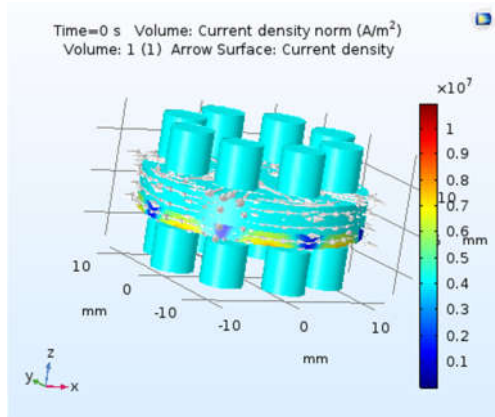


### ۲-۳- صحنه‌گذاری نتایج به‌دست آمده

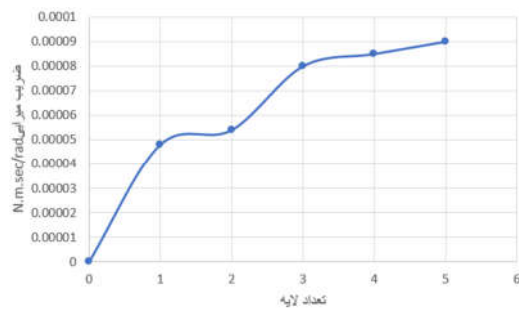
به‌منظور صحنه‌گذاری نتایج به‌دست آمده، ابتدا شبیه‌سازی در چند مرحله و همچنین در دو نرم‌افزار مختلف انجام شده است. در شبیه‌سازی اثر لایه چینی دیسک کامپوزیتی بر روی رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای، از طریق قرار دادن لایه‌های مختلف در داخل دیسک کامپوزیتی برای به دست آوردن لایه چینی بهینه استفاده گردیده است و این موضوع به بهینه‌ترین حالتی که در آن مس و نیکل به‌عنوان ترکیب دوتایی انتخاب شوند، نتیجه داده است. دیدگاه این نتیجه بر بهینه بودن جنس مس و نیکل، به توزیع میدان‌های مغناطیسی آن‌ها برمی‌گردد، چراکه این دو ترکیب مؤثرترین میدان مغناطیسی را تولید کردند و با توجه به اینکه مس از گروه دیمغناطیس‌ها و نیکل از گروه فرامغناطیس‌ها در این شبیه‌سازی استفاده شده مطابقت می‌کند. در صحنه‌گذاری شبیه‌سازی میراگر جریان گردابه‌ای، به این نکته که جریان گردابه‌ای برآمده از اعمال میدان مغناطیسی بر یک صفحه رسانا طبق قوانین فارادی، آمپر و لورنتز است توجه می‌شود که این موضوع در دو روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB و COMSOL تأیید شده است و نتایج داده‌های آن‌ها در این راستا ارائه می‌شود.

### ۱-۲-۳ شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار COMSOL

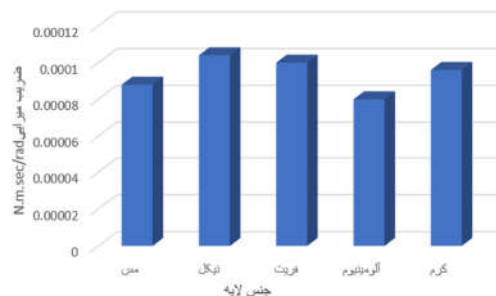
داده‌های مربوط به صحنه‌گذاری توسط نرم‌افزار COMSOL: طبق شکل ۱۷، داده‌های مربوط به جریان گردابه‌ای که در آن نقاط سفیدرنگ نشان‌دهنده جهت‌گیری جریان گردابه‌ای در دیسک کامپوزیتی است که تأیید قانون فارادی را نشان می‌دهد. در این شکل دیسک کامپوزیتی در میانه‌ی آهنرباهای دائم قرار گرفته و سرعت دوران آن ۱۰۰۰ دور بر دقیقه است، در حل معادلات قانون فارادی از



شکل ۱۷- جریان گردابه‌ای ایجاد شده در دیسک کامپوزیتی



شکل ۱۵- ضریب میرایی برای ترکیب مس و کرم



شکل ۱۶- ضریب میرایی برای مواد مغناطیسی مختلف

شکل‌ها و نمودارهای به دست آمده از شبیه‌سازی بیانگر آن است که نسبت میرایی به‌شدت به نظم جریان‌های ایجاد شده در مواد بستگی دارد. از این رو طبق شکل ۱۷ نیکل بهترین وضعیت را برای ایجاد جریان گردابه‌ای در لایه‌های کناری ایجاد نموده است. از بین مواد مختلف، چیدمان نیکل و مس بهترین ترکیب بوده و دیسک ۵۷ در ۵ با تعداد ۸ آهنربا بهترین نوع سیستم میرا کننده از بین مدل‌های مختلف است همچنین سیستم بدون ایزوله ساز الکتریکی نتیجه بهتری برای میراگر جریان گردابه‌ای می‌دهد. در حالی که در شبیه‌سازی‌های ارائه شده در مراجع قبلی، فقط تأثیر تعداد آهنرباها و نوع چیدمان آن‌ها بررسی شده است در این مقاله، شبیه‌سازی‌های کامل انجام گرفته با جنس مختلف لایه‌ها یک دستاورد جدید به همراه داشته است و انتخاب لایه‌های کناری فقط از مواد دیمغناطیس را توصیه می‌کند. ولی در شبیه‌سازی‌های قبلی بررسی‌ها برای یک جنس خاص انجام شده است [۵-۶]. در این مقاله چندین نوع مواد و با تعداد مختلف لایه‌ها در دیسک کامپوزیتی قرار داده شده است و علاوه بر آهنرباهای دائمی موارد تعداد لایه‌های دیسک در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ و تأثیر نوع آن‌ها در کنار ایزوله ساز الکتریکی مطابق شکل‌های ۵ تا ۱۰ نیز تغییر کرده است و در واقع، لایه‌های ایزوله ساز منجر به ایجاد میدان‌های ضعیف‌تر و ضریب میرایی کم‌تر شده است در حالی که با افزایش تعداد لایه مقدار ضریب میرایی افزایش می‌یافت و در نهایت فریت که از مواد فری مغناطیس است در کنار نیکل که از گروه فرامغناطیس‌هاست نتیجه مناسب‌تر را به دست می‌دهند. همچنین توصیه می‌شود که لایه کناری از جنس مواد دیمغناطیس‌ها بوده و فقط لایه‌های میانی ترکیب متغیری داشته باشند.

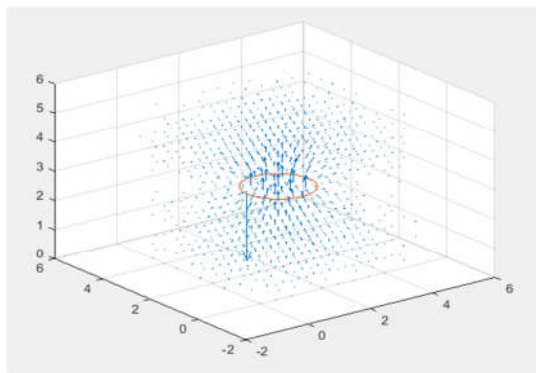


۵۷ میلی‌متری برای دیسک در نظر گرفته‌ایم. اندازه مقاومت این دیسک‌ها به ترتیب  $10^{-8} \times 66/3 \ \Omega$  و  $10^{-7} \times 57/1 \ \Omega$  است مقدار جریان نیز به ترتیب معادل ۱۵۳۷۸۴ میکرو-آمپر و ۳۵۸۵۰۳ میکرو-آمپر بوده که در این شبیه‌سازی از طریق اعمال میدان مغناطیسی، جریان به دست می‌آید. مطابق شکل ۱۹ با توجه به قانون فارادی، میدان مغناطیسی از اطراف به دیسک مسی اعمال شده و جریان گردابه‌ای مشابه حالت شکل ۱۸ نرم‌افزار COMSOL تولید می‌شود. به عبارت دیگر مطابق قانون فارادی، ابتدا میدان مغناطیسی اعمال شده و سپس جریان ناشی از آن به دست می‌آید. می‌توان جریان به وجود آمده را در قانون آمپر جایگذاری کرده و صحت میدان مغناطیسی را بررسی نمود.

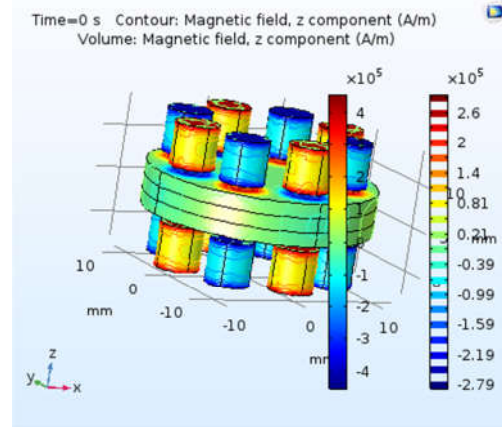
شکل ۲۰ داده‌های شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار MATLAB را ارائه می‌دهد. برای انجام این شبیه‌سازی، ابتدا یک جریان ورودی بر اساس قانون آمپر به سیستم وارد شده و میدان حاصل از آن تولید می‌شود. جریان به دست آمده از بخش فارادی را در قانون آمپر و بخش مغناطیس را از طریق MATLAB حل کرده و میدان نتیجه شده بررسی می‌شود. این قانون نشان می‌دهد که مانند آنچه در COMSOL به دست آمده جریان‌های گردابه‌ای که به صورت جریان چرخشی در سطح هستند میدان‌های مغناطیسی متناسب با جهت جریان تولید می‌کنند که از تقابل این میدان‌ها برای ایجاد ترمز مغناطیسی استفاده می‌شود. در این مثال همانند آنچه در نرم‌افزار COMSOL نتیجه شده میدان مغناطیسی در اطراف جریان ایجاد می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر نوع، تعداد و ترکیب لایه چینی دیسک کامپوزیتی بر روی رفتار میرایی میراگر جریان گردابه‌ای نشان داد که دیسک کامپوزیتی شامل نیکل و مس مناسب‌ترین نتیجه را دارد. بررسی تعداد لایه موردنیاز و موقعیت لایه‌ها بر پایه تحلیل و شبیه‌سازی سه قانون فارادی، آمپر و لورنتز نشان داده که در لایه‌های کناری و در مقابل میدان مغناطیسی بایستی لایه‌ای از مواد دیامغناطیس‌ها و با حساسیت منفی قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی برای مواد مختلف در ۵ گروه فرامغناطیس، پارامغناطیس، ضد فرامغناطیس،



شکل ۲۰- داده‌های شبیه‌سازی انجام شده در اثبات قانون آمپر



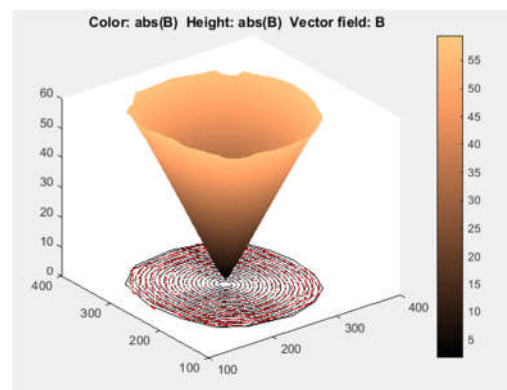
شکل ۱۸- داده‌های مربوط به ایجاد میدان مغناطیسی در دیسک کامپوزیتی

شرایط تغییر زاویه میدان مغناطیسی برخوردکننده بر صفحه رسانا استفاده شده است. این شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL انجام شده است. در این طرح، میدان توسط آهنرباهای دائم اعمال شده و جریان در دیسک محاسبه می‌شود.

به همین ترتیب در شکل ۱۸، داده‌های مربوط به ایجاد میدان مغناطیسی در تائید قانون آمپر آورده شده است. میدان مغناطیسی ایجاد شده ناشی از جریان گردابه‌ای در زیر آهنربای دائم دقیقاً معکوس میدانی است که توسط آهنربا به جسم اعمال می‌شود. این موضوع دقیقاً همان قانون آمپر در شرایط حساسیت مغناطیسی منفی است. این شکل حاصل از شبیه‌سازی در COMSOL بوده که در آن دیسک‌ها در وسط و آهنرباها در اطراف قرار داده می‌شوند. دیسک با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به چرخش درآمده و سپس از روش تغییر میدان با تغییر زاویه برای حل معادلات میدان‌های مغناطیسی استفاده شده است.

#### ۲-۲- شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB

در این بخش داده‌های مربوط به شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار MATLAB و قابلیت حل PDE آن ارائه می‌شود.



شکل ۱۹- داده‌های مربوط به شبیه‌سازی بر پایه اثبات قانون فارادی

شکل ۱۹، داده‌های نتایج شبیه‌سازی میدان جریان گردابه‌ای در دیسک کامپوزیتی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی ما ۲ اندازه ۲۶ و

فری مغناطیس و دیمغناطیس و موقعیت‌های مختلف قرارگیری آنها در دیسک کامپوزیتی نشان داد که در گام اول می‌بایستی لایه چینی به‌گونه‌ای باشد که در لایه‌های کناری یک لایه از نوع دیمغناطیس‌ها قرار بگیرد و سپس لایه میانی از چهار نوع مغناطیسی دیگر انتخاب شود. به‌عبارت‌دیگر، لایه‌های میانی از جنسی به غیر از دیمغناطیس بوده و فقط در لایه‌های کناری از مواد دیمغناطیس استفاده شود.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش تعداد لایه‌ها در دیسک با ضخامت یکسان ضریب میرایی افزایش یافته و استفاده از لایه‌های بدون ایزوله ساز الکتریکی افزایش بیشتر ضریب میرایی را به همراه دارد همچنین لایه‌های از جنس فرا مغناطیس بهترین نتیجه را در چیدمان نهایی لایه‌ها نشان دادند. توضیح این مسئله بدین‌صورت است که لایه‌های فرا مغناطیس با دوقطبی‌های منظم خود در مقیاس کوچک‌تر موجب می‌شوند که میدان مغناطیسی مناسبی در لایه‌های میانی تولید شده و بیشترین جریان گردابه‌ای را تولید کنند. همچنین در بررسی تعداد لایه‌ها مشخص شد که با افزایش آن‌ها، میدان‌های بزرگ‌تر و یکنواخت‌تری در دیسک ایجاد شده و این موضوع تأثیر مثبتی بر ضریب میرایی نهایی می‌گذارد.

## ۵- سپاسگزاری

از همکاری و حمایت مسئولین و پژوهشگران پژوهشکده رانشگرهای فضایی- پژوهشگاه فضایی ایران از این مقاله تشکر می‌کنیم و همچنین از آقای مهندس عادل پورتنقی برای همکاری‌های مؤثرشان نهایت سپاس را داریم.

## ۶- نمادها

علائم انگلیسی	
$B$	چگالی شار مغناطیسی
$S$	سطح
$I$	جریان
$R$	مقاومت الکتریکی
$A$	سطح مؤثر میدان آهنربا
$T$	ضخامت دیسک
$v$	سرعت خطی
$L$	طول جسم
$C_d$	ضریب میرایی
$F_d$	نیروی میرایی
$T_d$	گشتاور میرایی
$r$	شعاع دیسک
علائم یونانی	

$\omega$	سرعت زاویه‌ای
$\Phi_B$	شار مغناطیسی
$\varepsilon$	نیروی الکترون حرکتی
$\rho$	مقاومت مخصوص الکتریکی

## ۷- مراجع

- [1] Ishan Luthra S. K. Pahuja. Simulation and Analysis of an Eddy Current Damper [J]. *Int J Performability Eng*, 2017, 13(2): 143-152.
- [2] Pan, Qiang, He, Tian, Xiao, Denghong, & Liu, Xiandong. Design and Damping Analysis of a New Eddy Current Damper for Aerospace Applications. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(11), pp 1997-2011, 2016.
- [3] Touzani R. Rappaz J. Mathematical Models for Eddy-Current and Magneto-Static with selected Applications. 1<sup>st</sup> ed. Springer, 2014.
- [4] غلامرضا هاشمی، عادل پور تنقی، محرم شاملی، بهزاد آیشت، شبیه‌سازی اثر آرایش هندسی آهنرباهای دائم بر روی گشتاور مقاوم ایجاد شده توسط پدیده جریان گردابه‌ای، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، آذر ۱۳۹۶.
- [5] غلامرضا هاشمی، عادل پور تنقی، محرم شاملی، بهزاد آیشت، تعیین پارامترهای مؤثر بر روی نیروی ترمز مغناطیسی ایجاد شده توسط پدیده جریان گردابه‌ای، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، آذر ۱۳۹۶.
- [6] Duke, M. & Fow, A. J. Determining the volumetric characteristics of a passive linear electromagnetic damper for vehicle applications. *Cogent Engineering*, 4(1), 2017.
- [7] Fleisch, D. A student Guide to Maxwell Equations. 1<sup>st</sup> ed. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [8] Wiechers, G. Brussaard, P.J. Shell model calculations of nuclear magnetic moments and M1 transition probabilities in the  $2S_{12} 1d_{23}$  shell, *Nuclear Physics*, Vol. 73, pp 604-612, 1965.
- [9] He, J.Q. et al. Ferromagnetic domain structures and spin configuration measured in doped. *Physical Review B Condensed Matter*, Vol. 81, No. 9, pp 094427-094434, 2010.
- [10] Coey, J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials. 1th ed. Dublin: Cambridge University Press, 2010.
- [11] Bae, J. Hwang, J. Park, J. et al. Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube. *J Mech Sci Technol*, Vol. 23, pp 3024-3035, 2009.
- [12] Jiles, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 3<sup>rd</sup> ed. CRC Press Company, 2016.
- [13] Sun, X. Jiang, L. Pong, W.P. Magnetic Flux Concentration at Micrometre Scale. *Microelectronic Engineering*, pp. 77-81, 2013.
- [14] Gunter E.J. Humphris R.R. Siverson S.J. Design Study of Magnetic Eddy-Current Vibration Suppression Damper for Application to Cryogenic Turbomachinery. University of Virginia, 1ed 1983.