

مدل سازی پارامتری سه بعدی سیستم ترمزگیری جریان گردابی عملگر شار-محوری با اعمال اثر پوستی و حرارت

حسین حسن پور^۱
کارشناسی ارشد

سلیمان ابراهیمی نژاد^{۲*}
استادیار

با مطالعه تحقیقات صورت گرفته درباره تحلیل و بهینه سازی سیستم ترمزگیری جریان گردابی مشاهده می شود مشخصات فیزیکی آن کاربرد خودروبی ندارد و گشتاور ترمزی تولیدی آن کافی نمی باشد. در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر گشتاور ترمزی جریان گردابی با اضافه شدن ترمهای اثر پوستی و اثر حرارت تغییر یافته و نتایج دو مدل پایه و تغییر یافته مقایسه شده است. سپس آنالیز حساسیت به روش المان محدود صورت گرفته است. نتایج تحلیل نشان می دهد که با اعمال اثر پوستی و اثر حرارت، گشتاور ترمزی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت، تأثیر پارامترهای هندسی، دینامیکی و الکترومغناطیسی سیستم، و تغییرات ساختاری را بر مقدار آغازین، مقدار اوج و بقای گشتاور ترمزی تولیدی ترمز جریان گردابی نشان می دهد.

واژه های راهنما: ترمز جریان گردابی، گشتاور ترمزی، اثر پوستی، اثر حرارت، آنالیز حساسیت

۱- مقدمه

وسایل نقلیه زمینی از سیستم ترمزگیری اصطکاکی استفاده می کنند. پاسخ کند به دلیل تأخیر در ایجاد فشار هیدرولیکی، پیچیدگی، عدم استقلال مکانیزم کارکردی، سنگین بودن، افزایش مصرف سوخت به دلیل نیاز سیستم ترمزگیری به تقویت نیروی ترمزی، وابستگی روغن ترمزی به بخار آب جوی و خطر نشت روغن، از محدودیت ها و مشکلات سیستم ترمزگیری اصطکاکی هیدرولیکی می باشد. [۱] در سیستم های ترمزگیری الکترو هیدرولیکی و الکترونیکی مشکلات نامبرده برطرف گردیده اما معایبی مانند ایجاد نویز و ارتعاش^۳ (NVH)، محو ناگهانی گشتاور ترمزی در دماهای بالا و تولید ذرات معلق آلاینده^۴ (PM) ناشی از سایش همچنان وجود

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، آزمایشگاه سیستم های دینامیکی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

h_hassanpur@alumni.iust.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، آزمایشگاه سیستم های دینامیکی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Ebrahiminejad@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

^۳ Noise, vibration, and harshness

^۴ Particulate matter

دارند. ترمز جریان گردابی^۱ (ECB) یا ترمز فوکو ترمزی غیرتماسی است که برای کاهش یا اتلاف انرژی جنبشی چرخ به صورت حرارتی، به جای اعمال نیروی اصطکاکی، از نیروی الکترومغناطیسی با مکانیزم جریان گردابی^۲ استفاده می‌کند. مزایای ترمز ترمز جریان گردابی نسبت به ترمز اصطکاکی هیدرولیکی پاسخ سریع، گشتاور ترمزی بالا در سرعت‌های بالا، تعداد قطعات و وزن کم، عدم اشغال فضای زیاد، عدم نیاز به تعمیرات و نگهداری مکرر، و مهم تر از همه نبود سایش در نتیجه عدم ایجاد نویز و ارتعاش و ذرات معلق آلاینده می‌باشد و محدودیت اصلی آن کاهش گشتاور ترمزی با کاهش سرعت خودرو می‌باشد. [۲] با اینکه ترمز جریان گردابی به صورت گسترده در آسانسور، دوچرخه‌های ثابت، خطوط تولید صنعتی و برخی از قطارها بکار می‌رود ولی با توجه به محدودیت مذکور چون قابلیت بکارگیری به عنوان ترمز مستقل خودرو ندارد در سال‌های اخیر تحقیقات و آزمایشات زیادی حول ترمز جریان گردابی جهت بهینه‌سازی و امکان بکارگیری در خودرو صورت گرفته است.

در سال (۲۰۱۱) لیو و همکاران [3] سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی با استفاده از جریان گردابی را برای کاربرد اتومبیل طراحی کردند که در این طرح، پارامترهای ترمزگیری، دما و مصرف سوخت مورد تست قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که گشتاور ترمزی در حالت ترمزگیری مداوم به جهت بقای مغناطیسم^۳ در روتور تدریجاً کاهش می‌یابد. در سال (۲۰۱۳) محمد اونور و همکاران [۴]، به بررسی تأثیر ضخامت دیسک بر میزان گشتاور ترمزی تولیدشده در سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی پرداختند. عملگر سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی در این مطالعه از نوع القایی بوده و بر اساس پارامترهای مربوط به آن و ضخامت روتور ابتدا مدلی ریاضی برای سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی ساخته و سپس با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری مدل سه‌بعدی ترمز را شبیه‌سازی و تحلیل کردند. در سال (۲۰۱۵) ژو و همکاران [۵] به منظور پایدارسازی گشتاور تولیدی سیستم ترمزگیری جریان گردابی، بر روی مدل ریاضی خود، آنالیز حساسیت انجام دادند. آن‌ها فاصله آهنربا، موقعیت قرارگیری آهنربا، فاصله آهنربا تا دیسک و ضخامت دیسک را بررسی و در آنالیز حساسیت مدل سرعت دمغناطشی را بررسی کردند. آن‌ها در پایدارسازی گشتاور ترمزی موفق شدند ولی بیشینه گشتاور تولیدی مدل آن‌ها برای ترمزگیری کافی نیست. در سال (۲۰۱۵) رضا یزدانمهر و مجتبی میرسلیم [۶]، بر روی عملگر الکترومغناطیسی هیبرید سیستم ترمزگیری جریان گردابی کار کردند. عملگر الکترومغناطیسی هیبرید هم از آهنربای دائمی و هم از آهنربای الکتریکی برای اعمال میدان مغناطیسی بر روی روتور استفاده می‌کند. جهت اعمال میدان مغناطیسی عملگرهای الکترومغناطیسی محوری می‌باشد. آنها پارامتر فاصله عملگرهای الکترومغناطیسی از روتور را به دو روش حل تحلیلی و حل عددی مطالعه و مقایسه و گستره شار مغناطیسی، جریانات گردبی القایی و گشتاور ترمزی را محاسبه کردند. مطالعه آنها جنبه کاربرد خودروی نداشته و صرفاً بهینه‌سازی مغناطیسی با بررسی دو پارامتر شدت ضخامت دیسک و فاصله عملگر مغناطیسی را دارد. در سال (۲۰۱۶) گولج و همکاران [۷] تحقیقات و تحلیلی بر یک ترمز الکترومغناطیسی با ساختار تک-روتور-تک-استاتور انجام داده و بر اساس آن مدلی کاملاً بهینه را طراحی کردند. آن‌ها میزان حرارت تولیدشده حاصل از

¹ Eddy Current Braking System

² Eddy Current

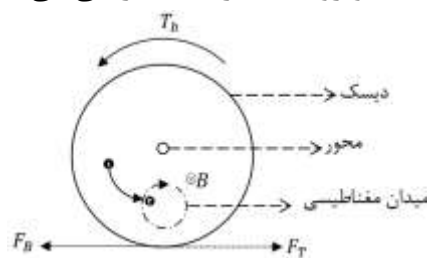
³ Remnant magnetism

اتلاف انرژی جنبشی و دمای مربوطه را محاسبه کردند. با نتایج حاصل از حل معادلات حاکم بروش MEC با نتایج بررسی آزمایشگاهی و حل تحلیلی مقایسه و صحت‌گذاری شده است. همچنین آن‌ها برای مدل ارائه‌شده با توجه به استفاده از آهنرباهای الکتریکی کنترلر نیز طراحی کردند. همچنین آن‌ها تأثیر نفوذپذیری و رسانایی الکتریکی و مغناطیسی دیسک بر روی گشتاور ترمزی را نیز بررسی کردند. نتایج تحلیل مدل آن‌ها حرارت تولیدشده حاصل از اتلاف انرژی جنبشی و دمای افزایش‌یافته را نشان می‌دهد ولی اثر آن را بر روی شدت میدان مغناطیسی و گشتاور ترمزی تولیدی بررسی نکرده‌اند. در سال (۲۰۱۶) کاراکوچ و همکاران [۸]، بر روی خواص جریان الکتریکی ورودی عملگر الکترومغناطیسی از نوع آهنربای الکتریکی کار کردند. در مدل تحلیلی آن‌ها متغیرهای جریان مستقیم و متناوب، شکل موج جریان متناوب و فرکانس جریان را برای بررسی تأثیر بر میزان گشتاور تولیدی مطالعه کردند. در سال (۲۰۱۷) چو و همکاران [۹] برای سیستم ترمزگیری جریان گردابی مدل کاسه و کفشکی را ارائه دادند. در این حالت، جهت اعمال میدان مغناطیسی عملگر الکترومغناطیسی شعاعی و داخلی بوده و روتور به جای دیسک از نوع کاسه ای یا شفت تو خالی بود. مدل کاسه‌ای برای ترمز الکترومغناطیسی و مدل‌سازی ریاضی و حل و بررسی عددی آن، ساخت و بررسی آزمایشگاهی بر اساس پارامترهایی مانند جنس کاسه و تأثیر سرعت اولیه و سایر موارد، پیشرفت و نوآوری جدید و مثبتی تلقی می‌گردد و لی محیط‌بسته بودن کاسه و سطح رسانای در معرض میدان مغناطیسی کمتر مشکلات این سیستم می‌باشد که هم کار خنک‌سازی را دشوار می‌کند و هم به انرژی الکتریکی بیشتری نیاز دارد. در سال (۲۰۲۰) گیاندشوار و همکاران [۱۰] به بررسی جنس دیسک و بهینه‌سازی ترمز جریان‌گردابی با حالت بازیاب پرداختند. آنها برای انتخاب فلز بهینه برای ترمز جریان‌گردابی مطالعات حرارتی انجام دادند بدین منظور در کنار پارامتر دمای دیسک، پارامتر سرعت دیسک را نیز در بررسی نیروی ترمزی دخالت دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد بالا بودن سرعت دیسک با افزایش دما و کاهش نیروی ترمزی رابطه مستقیم دارد. در سال (۱۳۹۳) دردانی حقیقی و میرسلیم [۱۱] برای کاربرد ترمز جریان‌گردابی خطی با آهنربای دائمی در قطار به مدل‌سازی تحلیلی پرداختند. آنها معادلات مغناطیسی و روابط ریاضی ترمز جریان‌گردابی را در سه ناحیه مختلف شامل فاصله هوایی، دیسک و هوای پشت دیسک در مختصات استوانه‌ای بررسی کردند. سپس با استفاده از شرایط مرزی تعریف شده، توزیع شار تحریک، جریان‌های گردابی و میدان‌های وابسته به آن مشخص را کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد در سرعت پایین هیچ گشتاوری تولید نمی‌شود و تا قبل از گشتاور پیک، گشتاور با سرعت رابطه خطی دارد. همچنین پس از سرعت بحرانی که بیشینه مقدار گشتاور رخ می‌دهد، نیروی ترمزی پیوسته کاهش می‌یابد.

در این مقاله با توجه به این که در مقالات بررسی شده در مدل‌سازی ترمز جریان‌گردابی، دو اثر پوستی و اثر حرارت همزمان در یک مدل بررسی نشده‌اند، تابع جدیدی برای مدل پیشنهادی ارائه خواهد شد و بدنبال آن این مدل مورد آنالیز حساسیت حول پارامترهای هندسی، دینامیکی و الکترومغناطیسی و ساختاری قرار خواهد گرفت و نقاط ضعف و قوت، و تأثیر هر پارامتر در میزان گشتاور ترمزی مشخص خواهد شد. همچنین از آنجایی که قرار است این ترمز کاربرد خودرویی داشته باشد، داده‌های مسئله با توجه به محدودیت‌های فیزیکی خودرو انتخاب و در نهایت بیشینه گشتاور ترمزی تولیدی ممکن ارائه خواهد شد.

۲- مدل سازی ریاضی

سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی یا سیستم ترمزگیری جریان گردابی از دو بخش روتور^۱ و استاتور^۲ تشکیل شده است. روتور از جنس فلزات رسانا و دارای هدایت مغناطیسی بالا و پسماند مغناطیسی^۳ پایین ساخته می شود و از طریق یک فلنج^۴ به شفت^۵ متصل می گردد. استاتور شامل آهنربای دائمی^۶ و یا آهنربای الکتریکی^۷، در قسمت ثابت سیستم ترمزگیری سوار بر شاسی قرار دارد. فاصله هوایی بین روتور و استاتور کم بوده و بنابر مکانیزم مدل های مختلف می تواند ثابت یا متغیر باشد. در حالت استفاده از آهنربای دائمی با نزدیک شدن استاتور به دیسک و در حالت استفاده از آهنربای القایی با اعمال جریان الکتریکی به سیم پیچ های آهنربای القایی، شار مغناطیسی^۸ از میدان مغناطیسی خارجی^۹ بر روتور اعمال شده و مطابق قانون القای فارادی، جریان گردابی بر روی سطح روتور القا می شود. به علت اثر پوستی بیشتر این جریان در سطح روتور متمرکز است. جریان گردابی ایجاد شده خود، مطابق قانون لنز، موجب تولید جهت گردش روتور خواهد شد که با جریان اولیه مخالفت می کند و سبب تولید گشتاوری بر خلاف جهت گردش روتور خواهد شد که به توقف روتور منجر خواهد شد [۱۲]. برای مدل سازی ریاضی جهت بدست آوردن معادلات حاکم بر مسئله با هدف تحصیل نیرو و گشتاور ترمزگیری، در هر حالت اعمال میدان مغناطیسی، استاتور عملگر مغناطیسی و قسمت ثابت و روتور قسمت متحرک مدل می باشد که جریان های گردابی در روتور ایجاد می شوند و باعث توقف حرکت روتور می گردند. در حالت متحرک از آهنربای دائمی، در حالت ثابت از آهنربای الکتریکی استفاده می شود. آنالیز حساسیت شامل بررسی انواع آهنرباهای دائمی با میدان های مغناطیسی مختلف، شکل آهنربای دائمی، سطح مقطع آهنربای دائمی، ارتفاع یا ضخامت آهنربای دائمی، فاصله آهنربای دائمی تا روتور، موقعیت قرارگیری آهنربای دائمی در سطح روتور، تعداد و نحوه چینش آهنرباهای دائمی و پارامترهایی که در حالت استفاده از آهنربای الکتریکی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت شامل نوع هسته و سیم پیچ آهنربای الکتریکی، شکل، سطح مقطع و ارتفاع آهنربای الکتریکی، موقعیت قرارگیری آهنربای الکتریکی در سطح روتور، تعداد و نحوه چینش آهنرباهای الکتریکی و جریان الکتریسیته و رودی آهنربای الکتریکی می باشند.



شکل ۱- اجزا و نیروهای سیستم ترمزگیری جریان گردابی

¹ Rotor

² Stator

³ Hysteresis

⁴ Flange

⁵ Shaft

⁶ Permanent Magnet

⁷ Electro- Magnet

⁸ Magnetic Flux

⁹ External Magnetic Field

برای مدل سازی ریاضی جهت بدست آوردن معادلات حاکم بر مسئله با هدف تحصیل نیرو و گشتاور ترمزگیری، در هر حالت اعمال میدان مغناطیسی، استاتور عملگر مغناطیسی و قسمت ثابت و روتور قسمت متحرک مدل می باشد که جریان های گردابی در روتور ایجاد می شوند و باعث توقف حرکت روتور می گردند. در حالت متحرک از آهنربای دائمی، در حالت ثابت از آهنربای الکتریکی استفاده می شود. آنالیز حساسیت شامل بررسی انواع آهنرباهای دائمی با میدان های مغناطیسی مختلف، شکل آهنربای دائمی، سطح مقطع آهنربای دائمی، ارتفاع یا ضخامت آهنربای دائمی، فاصله آهنربای دائمی تا روتور، موقعیت قرارگیری آهنربای دائمی در سطح روتور، تعداد و نحوه چینش آهنرباهای دائمی و پارامترهایی که در حالت استفاده از آهنربای الکتریکی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت شامل نوع هسته و سیم پیچ آهنربای الکتریکی، شکل، سطح مقطع و ارتفاع آهنربای الکتریکی، موقعیت قرارگیری آهنربای الکتریکی در سطح روتور، تعداد و نحوه چینش آهنرباهای الکتریکی و جریان الکتریسیته و رودی آهنربای الکتریکی می باشند.

طبق معادله (۱) جریان I جاری از باتری با توان P یا ولتاژ V به سمت آهنربای القایی رفته و شار مغناطیسی مطابق معادله (۳) را القا می کند و با حرکت میدان مغناطیسی خارجی یا جسم رسانا و یا تغییر در شار میدان مغناطیسی خارجی φ_M ، بنابر قانون القاء الکترومغناطیسی فارادی، در آن ناحیه از دیسک مطابق معادله (۴) نیروی محرکه الکتریکی ε القا می شود. در نتیجه ی القاء نیروی محرکه الکتریکی، در آن ناحیه از جسم رسانا میدان الکتریکی ایجاد می شود. زمانی که اتم های جسم رسانا تحت نیروی محرکه الکتریکی قرار بگیرند، بارهای الکتریکی آزاد Q در میدان الکتریکی شروع به حرکت کرده و به دور خطوط میدان مغناطیسی عمود بر سطح دیسک، جریانات الکتریکی گردابی ایجاد می گردد.

$$P = V \times I \quad (۱)$$

$$P = T \times \omega \quad (۲)$$

$$\varphi_M = \iint_S B \cdot dS = B \cdot S \cdot \cos \theta \quad (۳)$$

$$\varepsilon = \frac{d\varphi_M}{dt} = \int_{\partial\Sigma} (E + v \times B) \cdot dl \quad (۴)$$

در معادله بالا T گشتاور دیسک و ω سرعت دورانی دیسک و E میدان الکتریکی می باشد. بنابر قانون لنز، جریانات گردابی در جسم رسانا، باعث القاء میدان مغناطیسی می شود که میدان مغناطیسی القایی بر خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی می باشد. اندازه میدان مغناطیسی القایی B در سطحی از جسم رسانا S مطابق معادله (۵) می باشد.

$$\oint_C B \cdot dl = \mu_0 I = \mu_0 \iint_S J \cdot dS \quad (۵)$$

μ_0 تراوایی مغناطیسی است. هر گاه ذره ای تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی و میدان الکتریکی، در جریان باشد، نیرویی بر بارهای الکتریکی در سطح جسم رسانا اعمال می شود که نیروی لورنتس F_M نام داشته و به صورت معادله (۶) تعریف می شود. بنابر قاعده دست راست، جهت جریان بارهای الکتریکی سمت راست و جهت

^۱ EMF: Electromotive force

نیروی الکترومغناطیسی به سمت بالا می‌باشد. نیروی الکترومغناطیسی مطابق معادله (۸) گشتاوری مخالف با گشتاوری که دیسک را می‌چرخاند، تولید کرده و باعث توقف دیسک می‌شود [۱۳].

$$F_M = q \cdot (E + v \times B) \quad (۶)$$

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (۷)$$

$$T_M = F_M \times r \quad (۸)$$

$$B = \nabla \times A \quad (۹)$$

$$E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (۱۰)$$

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \mu\sigma(-\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} + v \times \nabla \times A) + \mu \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۱۱)$$

$$\nabla^2\phi - \frac{\partial \nabla \cdot A}{\partial t} \quad (۱۲)$$

در معادله بالا A پتانسیل برداری مغناطیسی می‌باشد. با ارسال جریان الکتریکی و ولتاژ از طرف باتری به سمت آهنربای الکتریکی و القای میدان مغناطیسی خارجی از سمت آهنربای القایی به سمت سطح روتور چرخان، بر روی سطح روتور میدان الکتریکی با جریانات گردابی ایجاد می‌شود که حاصل آن اعمال نیروی لورنتس بر ذرات سطح اعمالی روتور در خلاف جهت حرکت روتور و ایجاد گشتاور ترمزی و کاهش سرعت روتور می‌باشد. در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر سطح روتور بر روی روتور میدان الکتریکی القا می‌گردد که این میدان الکتریکی نیز متقابلاً میدانی مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی القا می‌کند.

$$\vec{B} = B_0 \sin(\Omega t) \vec{k} \quad (۱۳)$$

$$\vec{E} = E_x \cos(\Omega t) \vec{i} + E_y \cos(\Omega t) \vec{j} \quad (۱۴)$$

$$\vec{A} = A_x \sin(\Omega t) \vec{i} + A_y \sin(\Omega t) \vec{j} \quad (۱۵)$$

$$\nabla \times A = B_0 \sin(\Omega t) \vec{k} \quad (۱۶)$$

$$J^S = (\nabla \times (\nabla \times A_{net})) B \quad (۱۷)$$

$$\vec{r}_p = -\left(y - \frac{b}{2}\right) \vec{i} + \left(x + r - \frac{a}{2}\right) \vec{j} \quad (۱۸)$$

$$T_M = \iint_S r_d \times (J^S \times B) dS \quad (۱۹)$$

$$B_{AC} = NI_{AC} - \frac{\varphi}{S\mu} Z + f_1(\varphi)d + f_1(\varphi)l \quad (۲۰)$$

که در آن φ فرکانس جریان الکتریکی AC و I_{AC} جریان الکتریکی متناوب و Z فاصله آهنربا تا روتور و μ نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و h ضخامت دیسک می‌باشد [۱۴]. معادله (۱۹) فرم نهایی معادله گشتاور ترمزی ترمز جریان گردابی است که تابعی از شعاع دیسک، پارامترهای الکترومغناطیسی J^S چگالی جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی است که هر یک از این پارامترهای الکترومغناطیسی تابعی از سایر پارامترهای نامبرده در معادلات بالاست. معادله (۱۹) نیروی ترمزی حاصل از جریانات گردابی را بنابر فرضیات ساده کننده مقاله مرجع، فقط در سطح دیسک محاسبه می‌کند لذا برای حساب جریانات گردابی حاصل از میدان مغناطیسی

درون دیسک از اثر پوستی طبق معادله (۲۱) استفاده می شود. ضخامت نفوذ جریانات گردابی درون روتور Δh که در آن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ_0 ، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی روتور μ_r و ضریب تراوایی نسبی مغناطیسی روتور σ می باشد، مطابق زیر است [۱۵].

$$\Delta h = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (21)$$

همان طور که در مروری بر منابع بیان شد در تحقیقات بنابر فرضیات ساده کننده جهت ساده سازی معادلات حاکم بر گشتاور ترمزی و راحتی حل، دو مقوله اثر افزایش دمای دیسک و میزان نفوذ جریانات گردابی درون دیسک باهمدیگر در یک معادله اعمال نمی شدند. در معادله (۲۱) اثر پوستی برای توضیف میزان نفوذ جریانات گردابی درون دیسک بیان شد و برای توضیف پدیده تاثیر افزایش دمای دیسک بر تغییر رسانایی الکتریکی دیسک و بدنبال آن تاثیر بر تولد جریانات گردابی و نیروی ترمزی، رسانایی الکتریکی دیسک را ثابت فرض نمی کنیم. برای این امر از طبق معادله (۲۲) جهت وابستگی مقاومت الکتریکی روتور رسانا به دمای رسانا را استفاده می کنیم.

$$\rho_{\vartheta} = \rho_0 + A \left(\frac{\vartheta}{\Theta_R} \right)^n \int_0^{\Theta_R/\vartheta} \frac{x^n}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} dx \quad (22)$$

که در معادله بالا Θ_R دمای دیبای^۱ و (n, x) ضرایب آزمایشگاهی کوانتومی با حالات درون اتمی فلزات می باشد. بدلیل پیچیدگی معادله (۲۲)، این رابطه به صورت ساده شده در معادله (۲۳) بازنویسی می شود:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_0 (e^{-A\vartheta}) \quad (23)$$

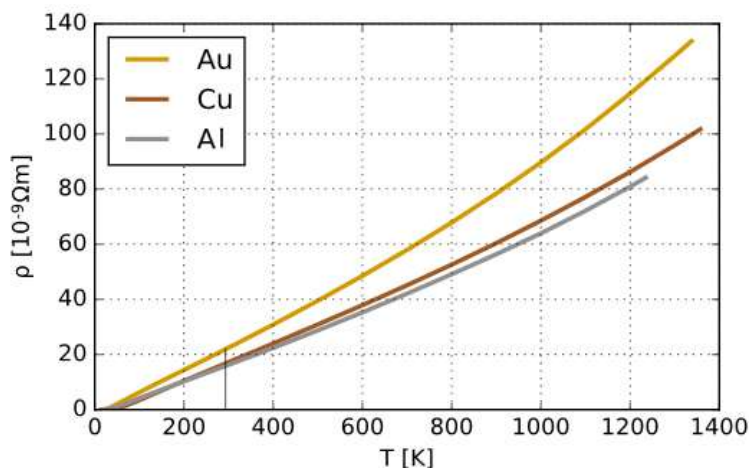
که در آن A ضریب اشتین-هارت بوده و به صورت تجربی برای هر ماده بدست می آید [۱۶]. در نهایت با اعمال اثر پوستی و اثر حرارت در معادله (۱۹) رابطه گشتاور ترمزی جریان گردابی به صورت معادله (۲۴) نوشته می شود:

$$T = \frac{\pi}{2} \mu_r \mu_0 \sigma \frac{\omega h r_a^2 r_m^2 \varphi_M^2}{\rho(\vartheta)} \left[1 - \frac{\left\{ l_g - \left(\frac{r_m}{r_a} \right)^2 \right\}}{\left\{ 1 - \left(\frac{r_m}{r_a} \right)^2 \right\}^2} \right] \quad (25)$$

که در آن h ضخامت دیسک، r_a شعاع دیسک، r_m شعاع آهنربا، r_a فاصله مرکز دیسک تا مرکز آهنربا می باشد. در قسمت بعد با ثل سازی و شبیه سازی عددی مدل بدست آمده در نرم افزار تحلیل المان محدود کامسول^۲ صحه گذاری، تاثیر اندازه مش و گام زمانی حل مسئله، آنالیز حساسیت پارامترهای هندسی، دینامیکی و الکترومغناطیسی و ساختار سیستم ترمزگیری جریان گردابی برای بررسی اندازه گشتاور ترمزی آغازین، گشتاور اوج و بقای گشتاور حین ترمزگیری تحلیل خواهد شد.

¹ Debye temperature

² COMSOL

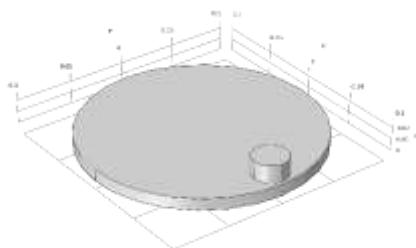


شکل ۱- رابطه تغییر رسانایی روتور با تغییر دما [۱۷]

۳- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

از آنجایی که معادلات این مقاله برای گشتاور ترمزی ترمز جریان‌گردابی دیسکی از مقاله کاپچین لی و همکاران [۱۸] بدلیل اعتبارسنجی تجربی آنها، انتخاب شده است، مدل فیزیکی پایه برای آنالیز حساسیت نیز طبق مدل آنها می‌باشد. ابتدا مدل ریاضی پایه این مقاله با نتایج تجربی مقاله آنها صحت‌گذاری خواهد شد و سپس برای ادامه تحلیل‌ها و انتخاب مش و گام زمانی حل مسئله، بررسی استقلال از مش و گام زمانی حل مسئله انجام خواهد شد. در ادامه نتایج حاصل تحلیل مدل تغییر یافته با نتایج حاصل تحلیل مدل پایه مقایسه خواهد شد. در نهایت آنالیز حساسیت انجام خواهد شد. هدف از شبیه‌سازی و تحلیل نرم‌افزاری مدل‌ها براساس پارامترهای هندسی، دینامیکی و الکترومغناطیسی، بررسی متغیرهای مهم و موثر در تولید گشتاور ترمزی و میزان انرژی مصرفی آن می‌باشد. قطعات مدل شامل یک روتور و یک استاتور و شرایط اولیه مسئله سرعت اولیه روتور می‌باشد. متغیرهایی که در تحلیل این مدل مورد بررسی قرار می‌گیرند مشخصات فیزیکی روتور و استاتور می‌باشند. پارامترهای مربوط به روتور، جنس، شعاع وضخامت و پارامترهای مربوط به استاتور آهنربای دائمی، جنس، شکل، تعداد آهنرباها و چینش آهنرباها، و پارامترهای مربوط به استاتور آهنربای الکتریکی علاوه بر پارامترهای پارامترهای مشترک با استاتور آهنربای دائمی، نوع و شدت جریان الکتریکی نیز می‌باشد.

مدل فیزیکی برای روتور یا همان دیسک و استاتور یا همان آهنربا در تمامی مقالات مشترکاً مانند شکل (۳) می‌باشد. مدل سه‌بعدی طراحی شده بصورت پایه برای بررسی مش، گام‌زمانی، صحت‌گذاری و همچنین بررسی اثر پوستی و حرارت به صورت ثابت مطابق شکل (۳) داده‌های فیزیکی و اولیه ورودی برای تحلیل مطابق جدول (۱) می‌باشد.



شکل ۲- مدل سه‌بعدی طراحی شده در این مقاله

جدول ۱- مشخصات استاتور و روتور ترمز جریان گردابی [۱۸]

پارامتر	اندازه	یکا
r_M	۲۰	mm
r_D	۵۰	mm
r_a	۳۲/۳	mm
h	۳	mm
l_g	۵	mm
σ	۵/۷۹ × ۱۰ ^۷	Ωm
A	۴/۱ × ۱۰ ^۷	1/°C

۳-۱- آنالیز حساسیت

برای بررسی تأثیر سرعت اولیه دیسک در میزان ایجاد گشتاور ترمزی، میزان ایجاد گشتاور ترمزی اولیه، بیشینه گشتاور ترمزی و ماندگاری گشتاور ترمزی به کمک نرم افزار، سرعت اولیه دیسک را در چندین حالت قرار داده و تحلیل از سرعت اولیه در نظر گرفته شده برای دیسک تا توقف دیسک انجام خواهد گرفت. با توجه به کاربرد خودرویی این مقاله سرعت های اولیه دیسک در نظر گرفته شده باید بازه منطقی و واقعی داشته باشند لذا سرعت های بین ۱۰۰ دور بر دقیقه تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه معادل سرعت خطی ۱۰ کیلومتر بر ساعت الی ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بررسی خواهیم شد.

برای بررسی تأثیر جنس دیسک در میزان ایجاد گشتاور ترمزی، میزان ایجاد گشتاور ترمزی اولیه، بیشینه گشتاور ترمزی و ماندگاری گشتاور ترمزی به کمک نرم افزار، جنس دیسک را در چندین حالت قرار داده و تحلیل برای تولید گشتاور ترمزی و میزان تولید و دفع حرارت انجام می گیرد. همانطور که در مقدمه بیان شد، روتور معمولاً از جنس فلزات خالص و رسانا و دارای هدایت مغناطیسی خوب و پسماند مغناطیسی پایین مثل فولاد با کربن پایین یا فولاد آلیاژی ساخته می شود. مواد پارامغناطیس دارای خاصیت پارامغناطیسی هستند که در آن، ماده پذیرفتاری مغناطیسی مثبت اما کوچک دارد و در نتیجه الکترونها جفت نشده تشدید میدان مغناطیسی در محیط دور و اطراف می گردند. در ادامه ۳ چهار جنس آلومینیوم، مس، نقره و فولاد چدنی برای جنس دیسک ترمز جریان گردابی بررسی خواهد شد.

مطالعاتی که در آن با افزایش ضخامت روتور، در شعاع روتور تغییری ایجاد نمی کنند و یا با افزایش شعاع روتور در ضخامت روتور تغییری ایجاد نمی کنند، باعث می شوند جرم دیسک و ممان اینرسی روتور افزایش یابد. بدیهی است که افزایش وزن و همانا افزایش ممان اینرسی یک جسم انرژی جنبشی آن جسم را افزایش می دهد لذا انرژی لازم برای متوقف کردن آن انرژی جنبشی افزایش یافته نیز بالا می رود. پارامتر تغییر ممان اینرسی به گونه ای بررسی می گردد که با تغییر مقدار ممان اینرسی، جرم روتور ثابت بماند. برای این منظور با افزایش ضخامت روتور، برای ثابت ماندن حجم و جرم روتور، متناسباً شعاع روتور کاهش می یابد. برای تحلیل در نرم افزار آنالیز المان محدود، مقدار ضخامت روتور ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ سانتی متر و متناسباً شعاع روتور ۱۴/۱۴، ۱۱/۵۴، ۱۰ و ۸/۹۴ سانتی متر داده می شود. این گونه با افزایش ضخامت روتور شعاع روتور کاهش یافته لذا

جرم دیسک ثابت مانده و ممان اینرسی آن تغییر می‌کند و اثر تغییر ممان اینرسی بر گشتاور ترمزی تولیدی بررسی می‌گردد.

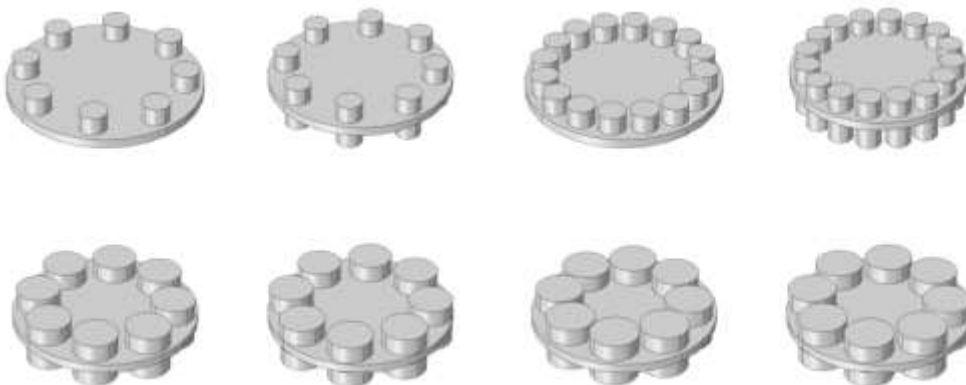
در بررسی آثار ایجاد تغییرات در آهنربا بر گشتاور ترمزی تولیدی، هدف بررسی تغییرات حاصل در شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. گشتاور ترمزی سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی با شدت میدان مغناطیسی رابطه مستقیم دارد و در آهنرباهای دائمی میدان مغناطیسی علاوه بر جنس آهنربای دائمی، به شکل و ابعاد آهنربا نیز وابسته است. در ادامه سه شکل مکعبی، استوانه‌ای و کروی بررسی خواهد شد. بدین صورت که هر سه آهنربا از جنس آهنربای نئودیمیوم با بازماندگی ۱ تسلا و هم حجم بوده و سطح مقطع اعمال میدان مغناطیسی آنها برابر می‌باشد زیرا صرفاً با تغییر طول، عرض و ضخامت هندسه نمی‌توان تغییر اثر مغناطیسی آهنربا و میزان گشتاور تولیدی را مقایسه کرد و در بررسی هندسه متفاوت، یعنی آهنربای استوانه‌ای، مکعبی و کروی، بایستی دو آهنربا اشتراکاتی داشته باشند تا قابل قیاس باشند، لذا این دو حجم ثابت و هم‌جنس در نظر گرفته شدند تا اثر افزایش ضخامت و سطح مقطع در ایجاد میدان مغناطیسی و بدنبال آن گشتاور ترمزی بررسی و مقایسه گردد. بعد از تحلیل و استخراج نتایج، گشتاور حاصل از میدان مغناطیسی هر سه شکل مقایسه شده و سایر تحلیل‌ها با شکل آهنربای برگزیده انجام خواهد گرفت. ابعاد آهنربای دائمی استوانه‌ای به شعاع ۱/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر، ابعاد آهنربای دائمی مکعبی به ضلع ۲/۶۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر و ابعاد آهنربای دائمی کروی به شعاع ۱/۳۶ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۳- تغییر ضخامت متناسب با شعاع دیسک در حالت حجم ثابت-جرم ثابت



شکل ۴- مقایسه سه شکل کروی، استوانه‌ای و مکعبی برای آهنربای دائمی



شکل ۵- بررسی تاثیر تعداد و نحوه چینش آهنرباهای دائمی

تعداد و چینش آهنرباها در هر سطح و هر دو سطح بررسی خواهد شد. نحوه قرارگیری آهنرباها در یک سطح و در کنار همدیگر باید طوری باشد که در صورت قرارگیری آهنربای دیگر در کنار آهنربای اولی، خطوط شار مغناطیسی خروجی از قطب N آهنربای اولی در خلاف جهت خطوط شار مغناطیسی آهنربای دومی نباشد زیرا این خطوط بازگشتی میدان نامغناطشی^۱ نام دارند که باعث تضعیف شدت میدان مغناطیسی آهنربای دومی می‌شوند [۱۹]. برای بررسی چینش بیش از دو آهنربا در یک سطح و هر دو سطح از روتور، مطابق شکل (۶) تعداد آهنرباها از ۱ و ۲ عدد، برای حفظ همگنی و تقارن در چینش قطب‌ها به ۸، ۱۶ و ۳۲ عدد با دو اندازه متفاوت افزایش خواهد یافت. نتایج تحلیل گشتاور ترمزی آنها مقایسه و در نهایت برای سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی با عملگر جریان‌گردابی محوری به شکل روتور دیسکی و استاتورهای آهنربای دائمی که به صورت غیرفعال عمل می‌کنند ارائه خواهد شد.

مدل نهایی بهبودیافته سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی با روتور دیسکی محوری و استاتورهای آهنربای دائمی مبنای بررسی پارامترهای سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی با استاتورهای آهنربای الکتریکی خواهد بود. پارامترهایی که در آهنربای دائمی بررسی می‌شوند، در آهنربای الکتریکی نیز صدق می‌کنند با این تفاوت که در آهنربای الکتریکی، هسته جای آهنربای دائمی را می‌گیرد و برای بررسی تغییرات شدت میدان مغناطیسی و گشتاور ترمزی تولیدی، مشخصات جریان الکتریکی وارد شده به سیم‌پیچ آهنربای الکتریکی تحلیل خواهد شد. طبق معادله (۲۰) مشاهده می‌شود که شدت میدان مغناطیسی آهنربای الکتریکی با شدت جریان الکتریکی، تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ و ضریب نفوذدهی مغناطیسی هسته رابطه مستقیم دارد. بنابراین در حالت پایه، ابعاد آهنربای الکتریکی همان ابعاد آهنربای دائمی، جریان الکتریکی پایه ۱ آمپر با ۱۰۰ دور سیم‌پیچ و دو نوع جریان الکتریکی AC و DC خواهند بود. در صورت استفاده از آهنربای دائمی، عملگر مغناطیسی سیستم ترمزگیری الکترومغناطیسی هیبرید می‌شود و باید تحریک دوگانه نیز داشته باشد [۲۰] که در این مقاله دو حالت آهنربای دائمی و الکتریکی به صورت جداگانه تحلیل خواهند شد.

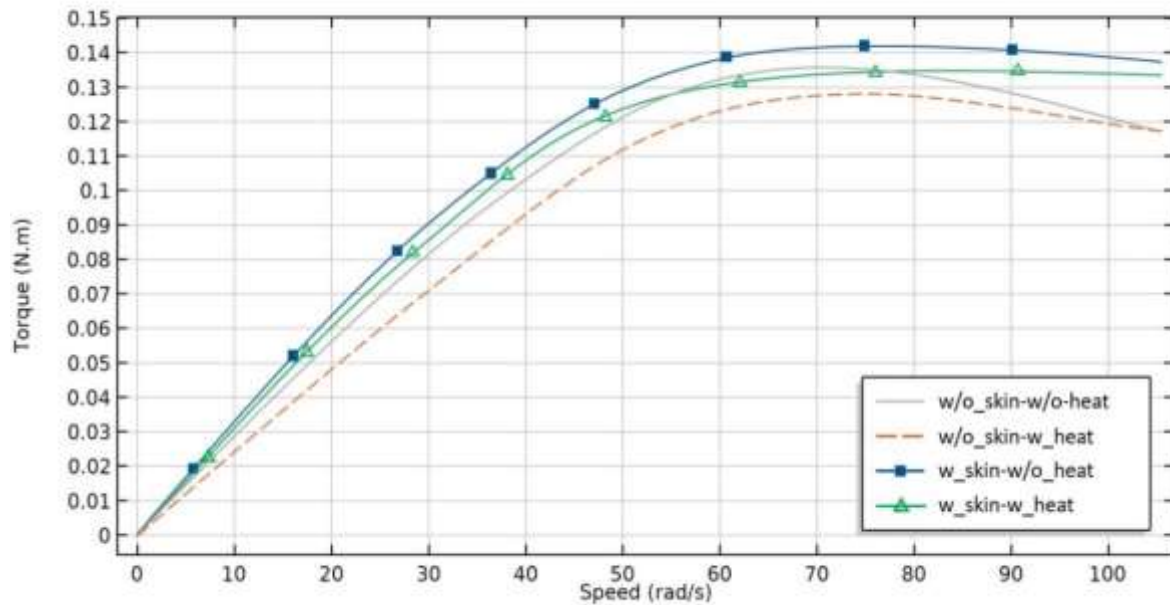
۴- نتایج

نتایج تحلیل عددی مدل ریاضی مبنا طبق معادله (۱۹) بدون اعمال اثر پوستی و اثر حرارت و به صورت مدل فیزیکی شکل (۲) و داده‌های عددی جدول (۱) بر اساس مدل مقاله لی و همکاران [۱۸]، و با مدل ریاضی تغییریافته طبق معادله (۲۱) با اعمال اثر پوستی و اثر حرارت، در شکل (۷) مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد با اعمال فقط اثر حرارت، مقدار گشتاور آغازین، مقدار گشتاور بیشینه و مقدار گشتاور کلی کاهش می‌یابد. با اعمال فقط اثر پوستی مقدار گشتاور آغازین، مقدار گشتاور بیشینه و مقدار گشتاور کلی افزایش و همچنین روند تولید گشتاور تغییر و دوام آن کاهش می‌یابد.

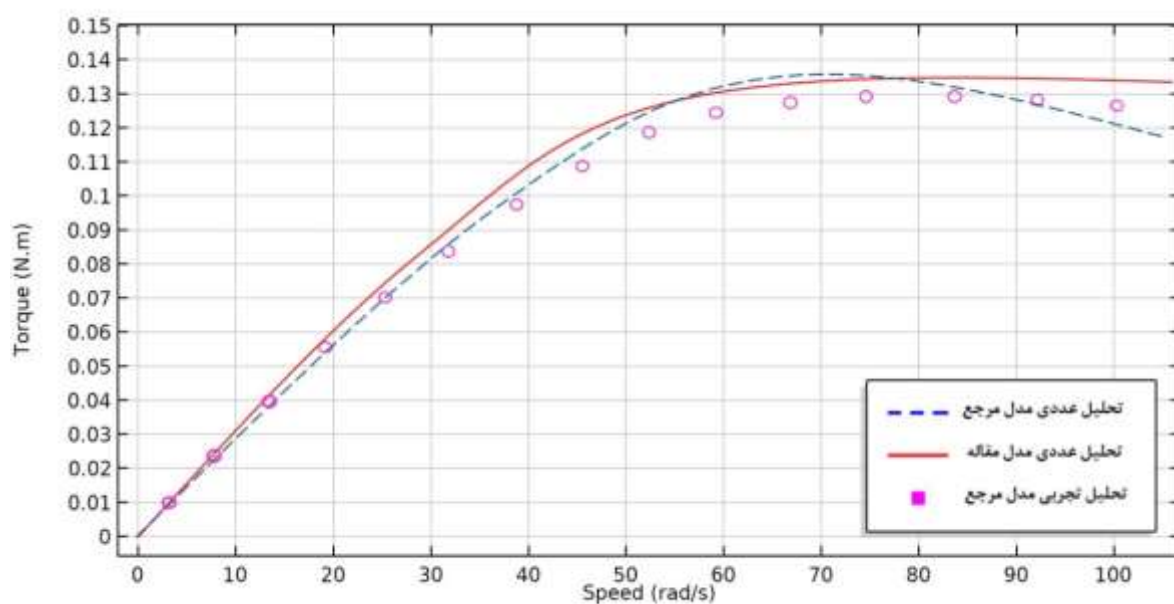
قبل از انجام آنالیز حساسیت با مدل تغییریافته، مدل مبنای انتخابی، مدل طبق معادله (۱۹) بدون اعمال اثر پوستی و اثر حرارت و به صورت مدل فیزیکی شکل (۲) و داده‌های عددی جدول (۱) بر اساس مدل مقاله لی و همکاران [۱۸] با نتایج عددی و تجربی همان صحنه‌گذاری می‌شود. نتایج تحلیل عددی لی و همکاران نیز با

^۱ Demagnetizing field

بررسی آزمایشگاهی صحنه گذاری شده است. بازه سرعتی تحلیل عددی و آزمایشگاهی لی و همکاران از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه تا صفر می باشد با اینکه بازه سرعتی خودروبی نمی باشد ولی از این بازه سرعتی استفاده شده است. نتایج تحلیل در نمودار شکل (۸) نشان می دهد، نتایج تحلیل مدل این مقاله در مقایسه با نتایج عددی مدل ترمز جریان گردابی مقاله لی اختلاف ۹ درصدی در مقدار گشتاور آغازین و اختلاف ۲ درصدی در مقدار گشتاور بیشینه، و با فرم و بقای گشتاور نمودار تحلیل عددی یکسان بوده و با نتایج تجربی در مقدار گشتاور آغازین و بیشینه و بقای گشتاور اختلاف ۳ درصدی دارد و صحنه گذاری می گردد.

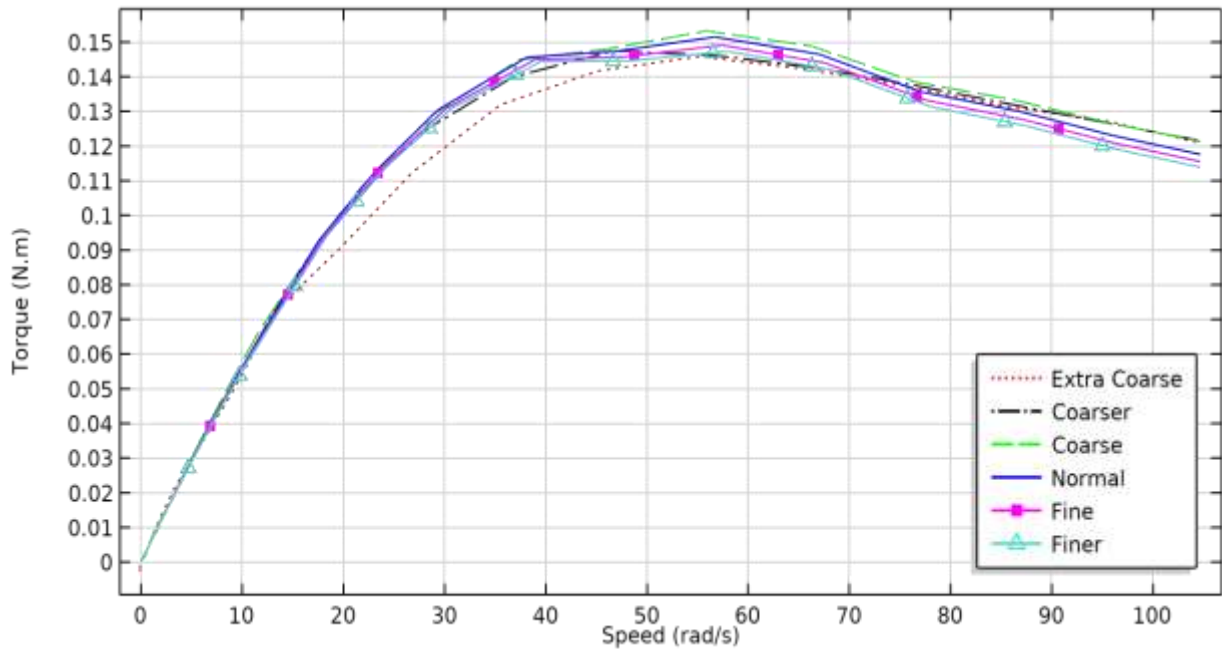


شکل ۶- مقایسه نتایج تحلیل گشتاور ترمزی ترمز جریان گردابی مدل مبنای بدون اعمال اثر پوستی و اثر حرارت با مدل تغییر یافته با اعمال اثر پوستی و اثر حرارت

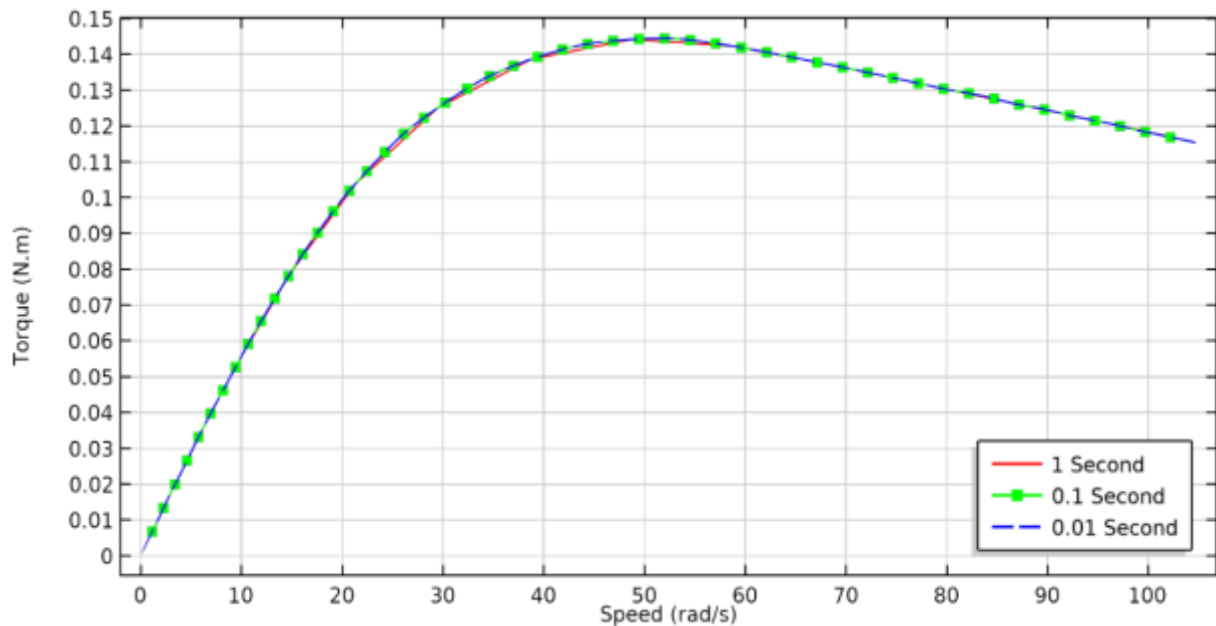


شکل ۷- نمودار صحنه گذاری مدل این مقاله با نتایج عددی و تجربی مقاله لی و همکاران [۱۸]

همانطور که در بخش مدل‌سازی توضیح داده شد برای مش‌بندی مدل از شبکه از پیش گسسته به صورت اتوماتیک از اندازه بسیار درشت تا بسیار ریز در ابعاد ۱۰ تا ۰.۵ میلی‌متر و ۰.۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. طبق نمودار شکل (۹)، از مقایسه نمودارهای تأثیر اندازه مش بر بیشینه گشتاور و محاسبه درصد اختلاف بیشینه گشتاور اندازه مش برای روتور، برای تحلیل و بررسی پارامترهای گشتاور ترمز الکترومغناطیسی، با توجه به نزدیکی و شباهت نمودارهای گشتاور مربوط به مش بسیار ریز، ریز و نرمال، و با در نظر گرفتن سرعت محاسبات، مش نرمال انتخاب شد.

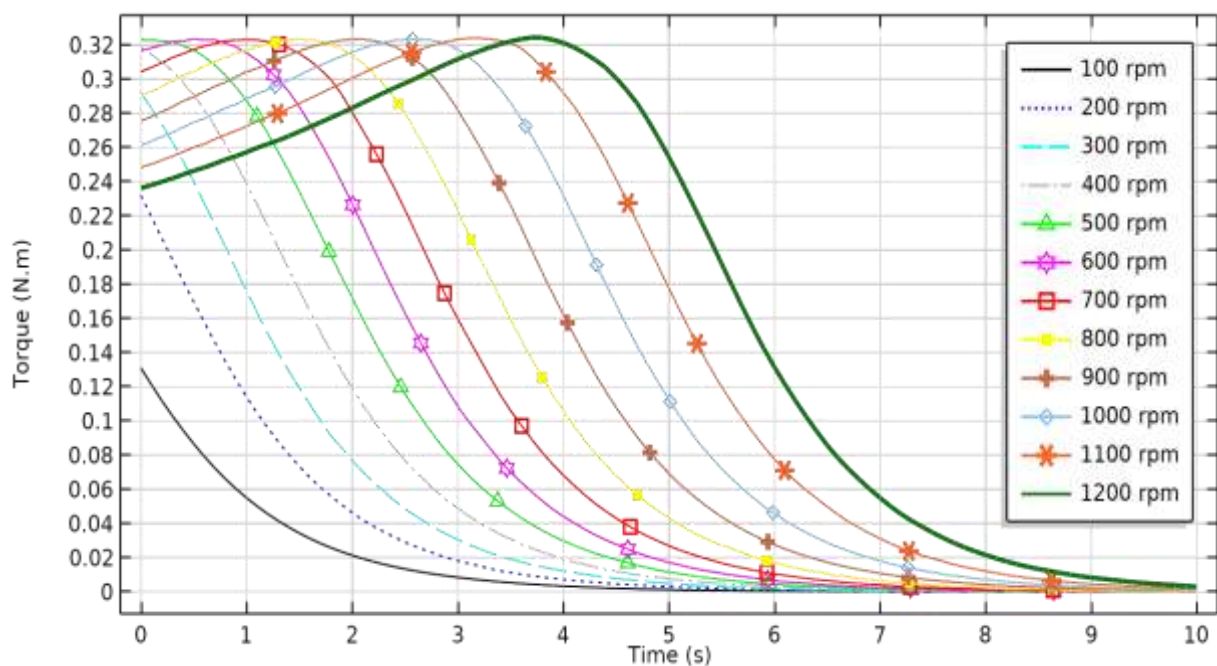


شکل ۹- نمودار مقایسه تأثیر اندازه مش بر گشتاور ترمزی



شکل ۸- نمودار مقایسه تأثیر گام زمانی حل مسئله بر گشتاور ترمزی

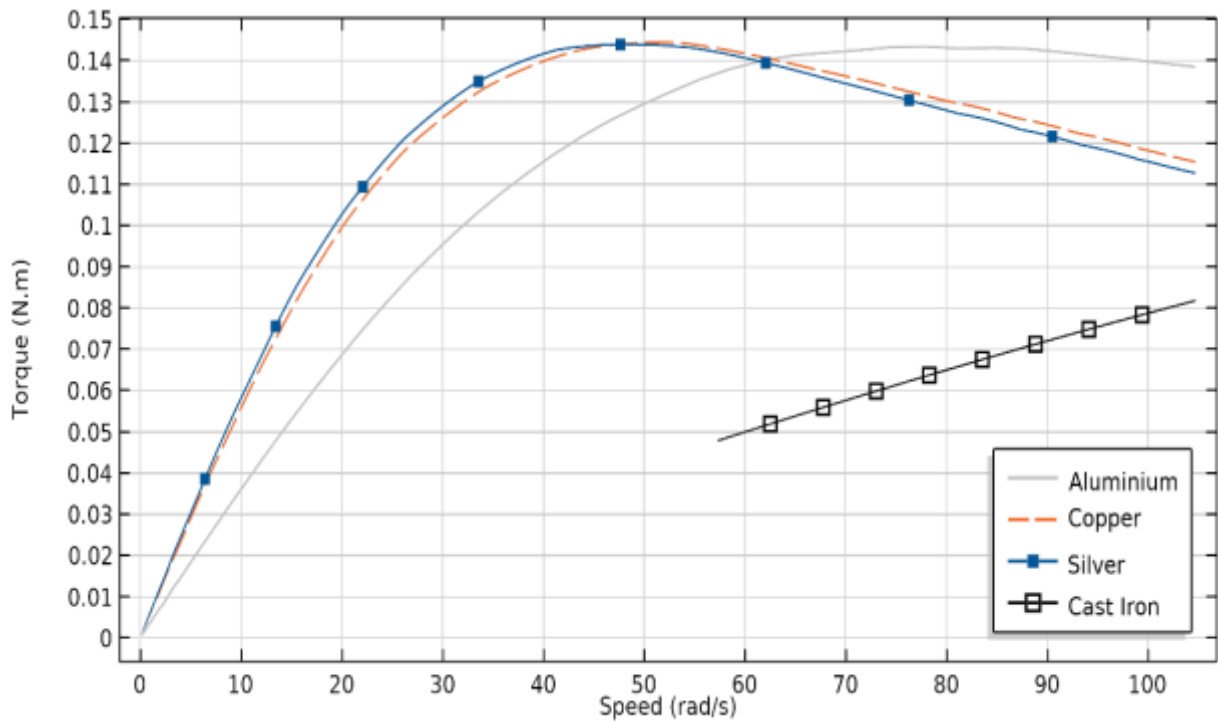
طبق نمودار شکل (۱۰)، با توجه به اختلاف کمتر از ۱ درصد در نتایج حاصل از تاثیر گام زمانی ۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ ثانیه در گشتاور ترمزی، و با در نظر گرفتن زمان حل مسئله، گام زمانی ۱ ثانیه انتخاب شد. نمودار شکل (۱۱) نتیجه حاصل از بررسی تاثیر سرعت اولیه دیسک نشان می‌دهد با افزایش سرعت اولیه دیسک، میزان گشتاور ترمزی تولیدی و میزان دوام آن افزایش، مقدار آغازین گشتاور ترمزی کاهش یافته و مقدار بیشینه گشتاور ترمزی بدون تغییر ماند. دلیل بیشتر شدن مقدار گشتاور بیشینه و گشتاور کلی، رابطه مستقیم گشتاور با سرعت دیسک و پایین بودن گشتاور آغازین، رابطه عکس جریانات گردابی در اثر پوستی با سرعت دورانی دیسک می‌باشد.



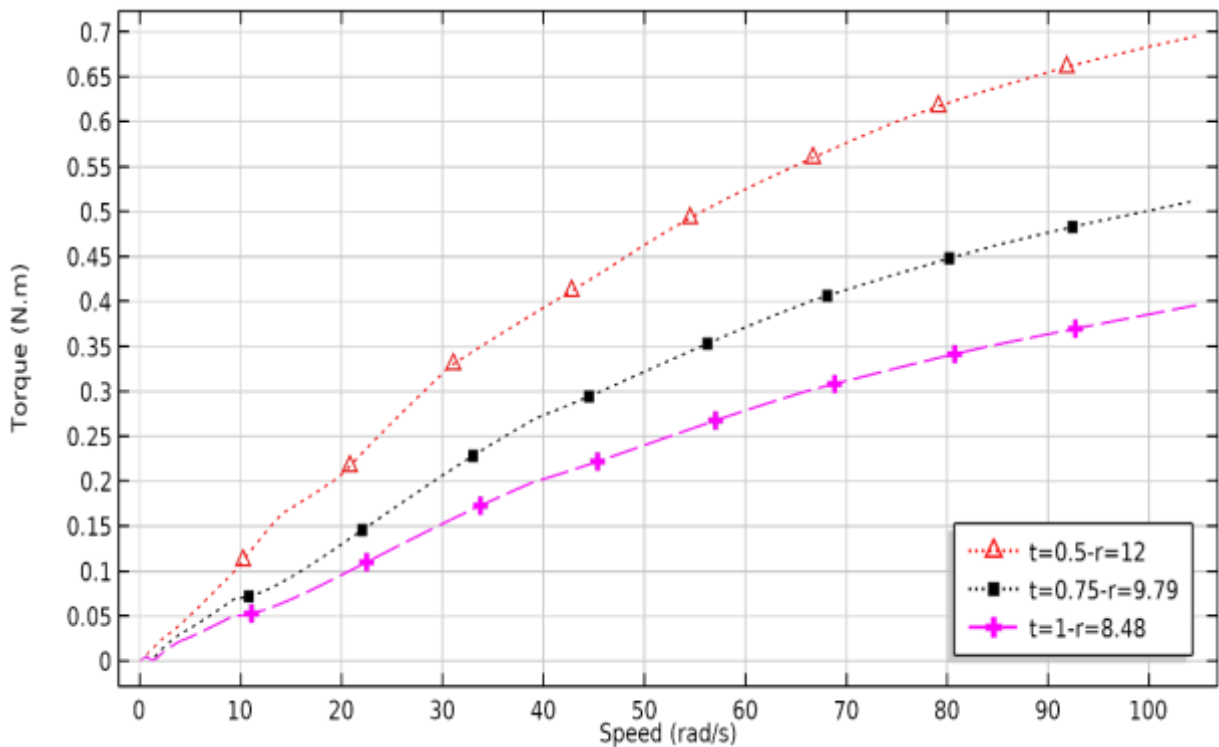
شکل ۹- تأثیر سرعت اولیه دیسک بر میزان گشتاور ترمزی

نمودار شکل (۱۲) نتایج حاصل از بررسی تاثیر جنس روتور در میزان گشتاور ترمزی تولیدی نشان می‌دهد که در صورت بکار بردن آلومینیوم در دیسک نسبت به سایر مواد، مقدار اولیه گشتاور ترمزی بیشتر، میزان دوام بالاتر و اندازه گشتاور بیشتری خواهد داشت و با داشتن مقدار بیشینه گشتاور ترمزی کمتر، ترمزگیری پایدارتر و روانتری ارائه می‌دهد. دلیل تفاوت در میزان گشتاور ترمزی تولیدی و روند تولیدی، تفاوت در نسبت تراوایی مغناطیسی و نسبی بودن مقاومت الکتریکی مواد با حرارت تولید شده می‌باشد.

در نمودار شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع دیسک و متناسب با آن کاهش ضخامت دیسک در حالت حجم ثابت-جرم ثابت، گشتاور ترمزی افزایش می‌یابد. همان طور که گفته شد اگر هم‌زمان با افزایش شعاع روتور، ضخامت روتور تغییری نیابد، باعث می‌شود جرم دیسک و ممان اینرسی روتور افزایش یابد که بدنبال آن نیز انرژی جنبشی جسم افزایش یافته لذا انرژی لازم برای متوقف کردن آن افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش شعاع روتور، برای ثابت ماندن حجم و جرم روتور، متناسباً ضخامت روتور کاهش می‌یابد. بنابراین متعاقباً ممان اینرسی دیسک نیز تغییر می‌کند و در نمودار زیر اثر تغییر ممان اینرسی بر گشتاور ترمزی تولیدی با رابطه مستقیم مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰- تأثیر جنس دیسک بر گشتاور ترمزی بر حسب سرعت دورانی

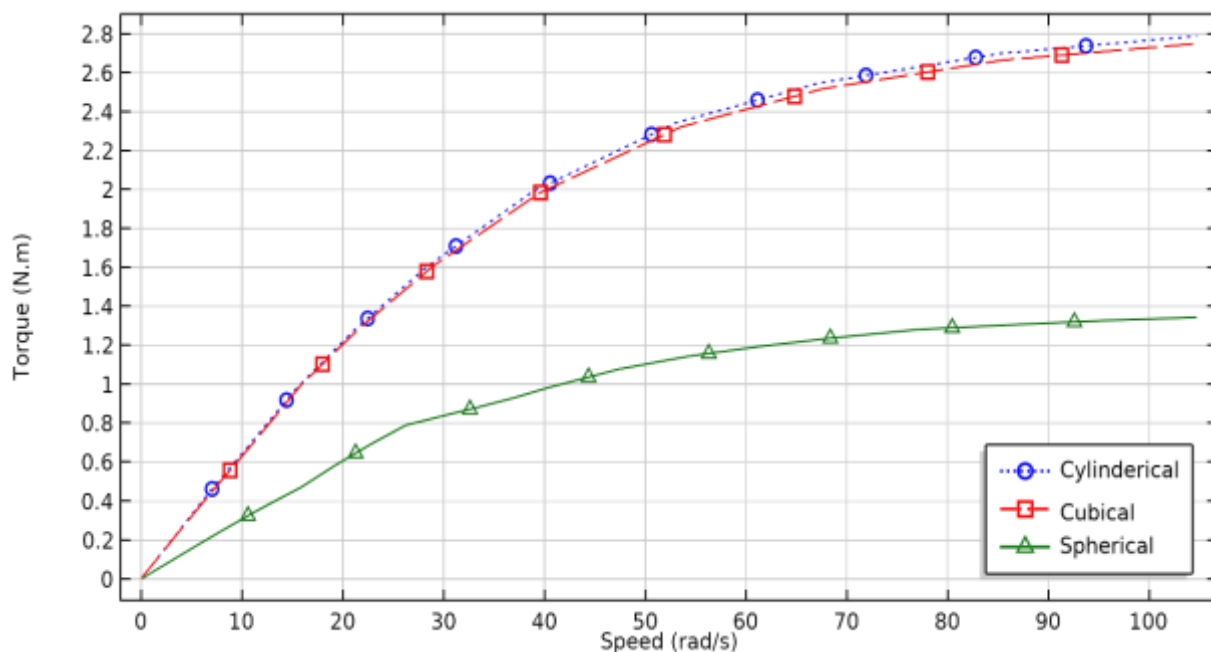


شکل ۱۱- تأثیر تغییر ضخامت متناسب با شعاع دیسک در حالت حجم ثابت-جرم ثابت

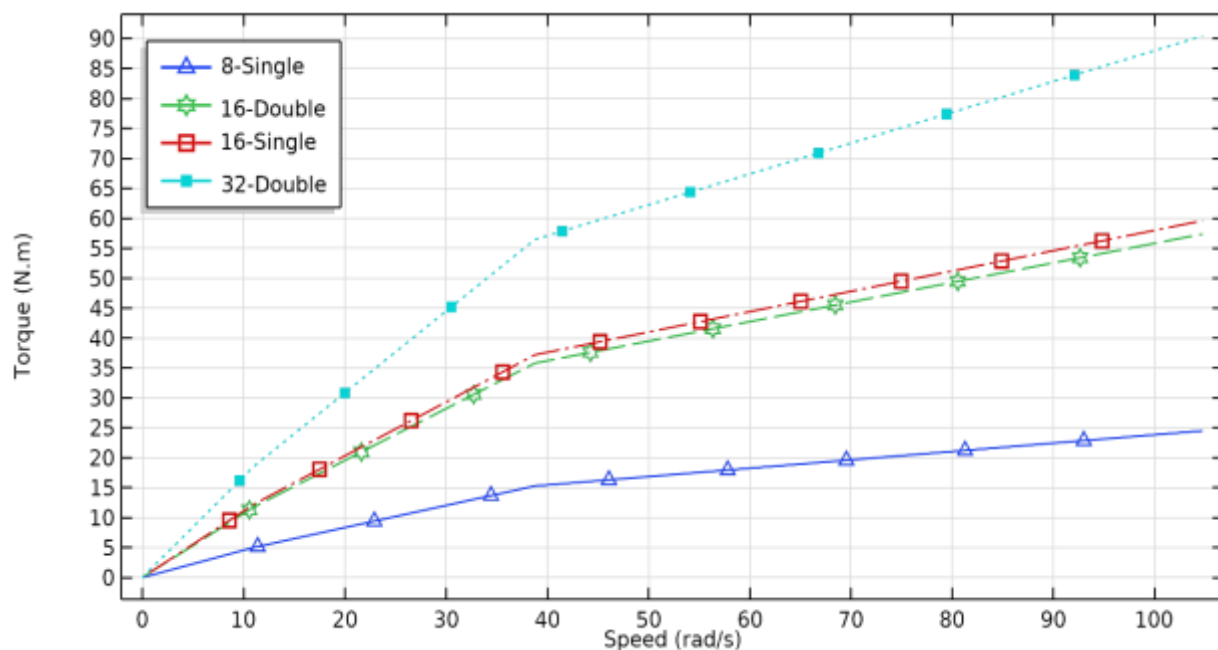
نمودار شکل (۱۴) نتیجه حاصل از بررسی تأثیر شکل آهنربا در میزان گشتاور ترمزی تولیدی، مقدار اولیه گشتاور ترمزی، مقدار بیشینه گشتاور ترمزی و میزان دوام آن را نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد سطح مقطع تابش میدان مغناطیسی، جنس و قدرت، و حجم و جرم هر سه آهنربا یکسان بوده در نتیجه اثر ضخامت

آهنربای دائمی بر تولید گشتاور ترمزی نشان می‌دهد با استفاده از آهنربای دائمی با شکل استوانه‌ای نسبت به مکعبی و کروی، گشتاور بیشتری حاصل می‌گردد.

نمودار شکل (۱۵) نتیجه حاصل از بررسی تأثیر تعداد چند آهنربا و نحوه چینش آنها در میزان گشتاور ترمزی تولیدی، مقدار اولیه گشتاور ترمزی، مقدار بیشینه گشتاور ترمزی و میزان دوام آن را نشان می‌دهد. در نتیجه با استفاده از چینش آهنرباهای دائمی در کنار هم با فاصله از هم و در یک طرف دیسک نسبت به چینش آهنرباهای دائمی در کنار هم بدون فاصله از هم و در دو طرف دیسک، گشتاور بیشتری حاصل می‌گردد.



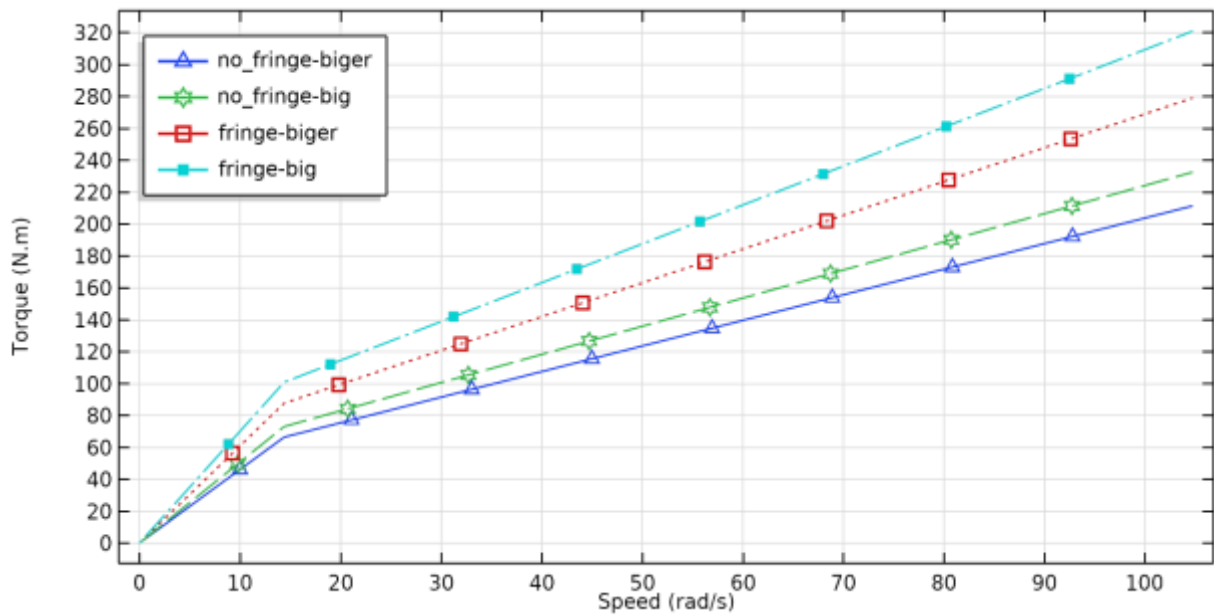
شکل ۱۴- تأثیر شکل آهنربا بر میزان گشتاور ترمزی بر حسب سرعت دورانی



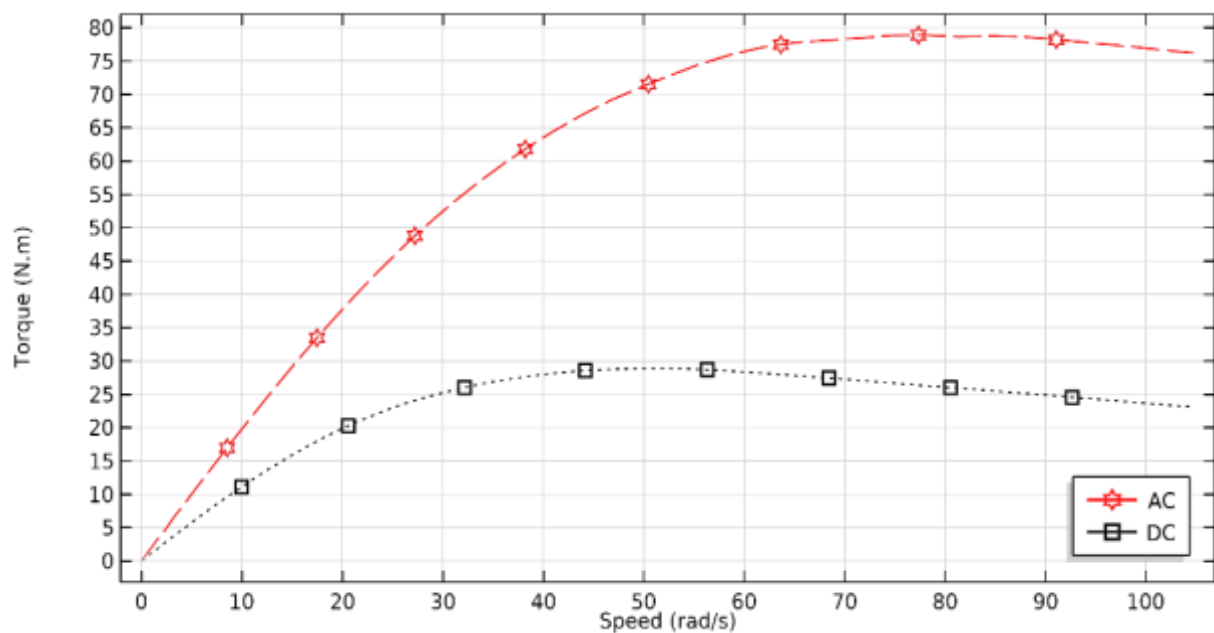
شکل ۱۲- تأثیر افزایش تعداد آهنربای کوچک و چینش آنها در کنار هم

نمودار شکل (۱۶) نشان می‌دهد که در صورت استفاده از آهنرباهای بزرگتر نسبت به آهنرباهای کوچک‌تر با سطح مقطع یکسان و در هر دو طرف گشتاور به مراتب بیشتری تولید می‌شود که دلیل آن اثر میدان نامغاطشی می‌باشد که اثر خنثی‌کننده دارد.

نمودار شکل (۱۷) نتیجه حاصل از بررسی تأثیر نوع جریان الکتریکی آهنربای القایی در میزان گشتاور ترمزی تولیدی، مقدار اولیه گشتاور ترمزی، مقدار بیشینه گشتاور ترمزی و میزان دوام آن را نشان می‌دهد. در نتیجه با استفاده از جریان الکتریکی متناوب در آهنربای الکتریکی نسبت به جریان الکتریکی مستقیم، گشتاور بیشتری حاصل می‌گردد.

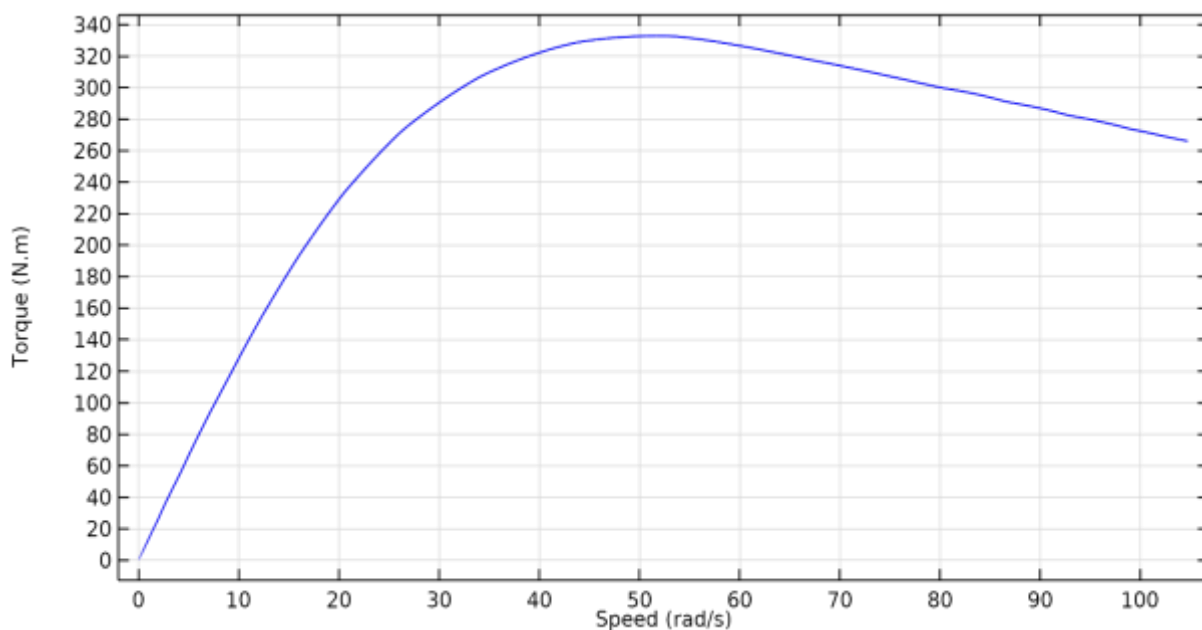


شکل ۱۶- تأثیر افزایش تعداد آهنربای بزرگ و چینش آنها در کنار هم

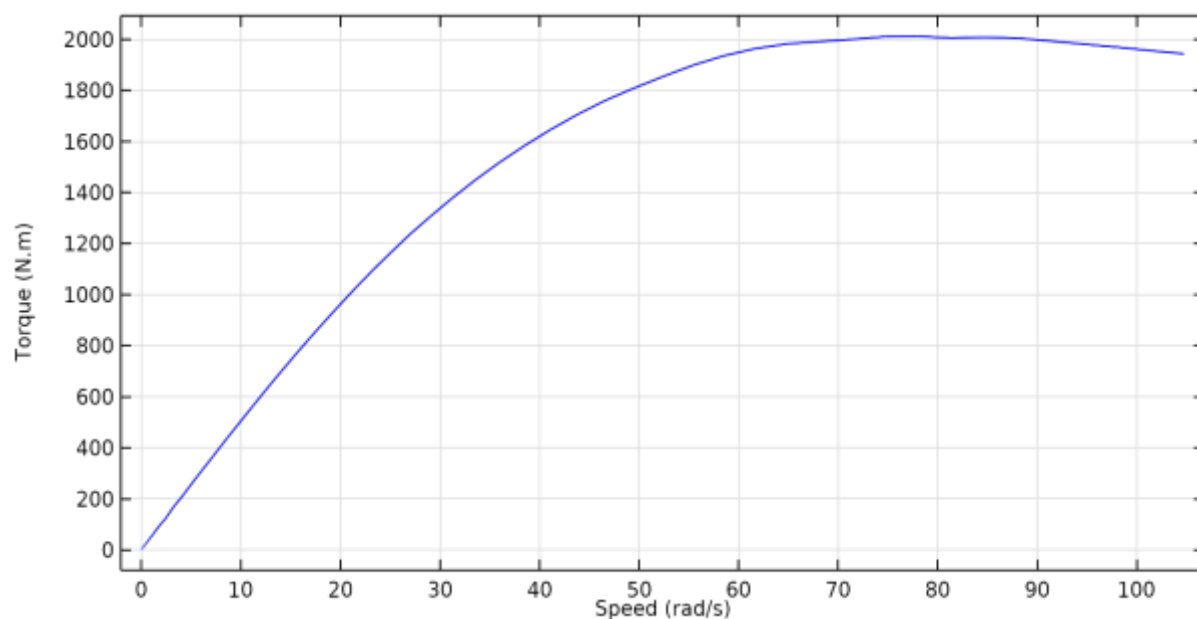


شکل ۱۷- تأثیر نوع جریان الکتریکی و رودی آهنربای الکتریکی

در طراحی مدل نهایی بهبودیافته برای ترمز جریان گردابی، گشتاور ترمزی مورد نیاز بایستی با توجه به محدودیت‌های دینامیکی، هندسی و انرژی الکتریکی ممکن قابل استفاده در خودرو محاسبه گردد. بدین گونه که با توجه و فضای موجود در خودرو برای مکان قرارگیری سیستم ترمزگیری جریان گردابی با آهنربای دائمی و امکان بکارگیری بیشترین تعداد و بزرگترین آهنربای دائمی، بیشینه مقدار گشتاور ترمزی تولیدی مطابق شکل (۱۸) می‌باشد. در مقالات مطالعه شده بدون توجه به محدودیت‌های موجود مانند سرعت اولیه دیسک و ابعاد سیستم ترمزگیری امکان دستیابی به گشتاورهای بیشتر از ۳۴۰ نیوتون‌متر وجود دارد ولی از لحاظ عملی و کاربردی با وجود محدودیت‌های مذکور غیرممکن است.



شکل ۱۳- بیشینه گشتاور بدست‌آمده از سیستم ترمزگیری جریان گردابی با آهنربای دائمی



شکل ۱۴- بیشینه گشتاور بدست‌آمده از سیستم ترمزگیری جریان گردابی با آهنربای الکتریکی

بعد از مشخص شدن مدل نهایی سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی با آهنربای دائمی از لحاظ هندسه، تعداد و چینش آهنرباهای دائمی، آهنرباهای الکتریکی جایگزین آهنرباهای دائمی‌شده و با اعمال جریان الکتریکی مناسب، مدل بهینه سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی با عملکرد آهنربای الکتریکی ارائه خواهد شد. نمودار شکل (۱۹) با ۳۲ آهنربای کوچک دوطرفه طبق شکل (۶) با ولتاژ ۱۲ تحت ۲۴ آمپر بدست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

بعد از بررسی مدل‌های موجود برای سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی، مدل و معادلات حاکم بر گشتاور ترمزی شامل تحلیل عددی و تجربی انتخاب و استخراج شد. معادلات مربوط به میدان مغناطیسی آهنربای دائمی و آهنربای الکتریکی ارائه و پارامترهای موثر نیز بررسی شد. در ادامه ترم‌های اثر پوستی و دما به مدل پایه افزوده شد. مدل جدید با مدل موجود در مقالات صحت‌گذاری شد و پس از اعتبارسنجی مدل، تأثیر مش‌بندی و تأثیر گام زمانی حل مسئله بررسی شد. برای آنالیز حساسیت سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی به صورت عددی، مدل سه بعدی برای مدل پیشنهادی، در نرم افزار کامسول طراحی و شبیه‌سازی، و به روش المان محدود تحلیل و تأثیر پارامترهای هندسی، دینامیکی و الکترومغناطیسی سیستم، و تغییرات ساختاری، بر گشتاور ترمزی تولیدی ترمز جریان‌گردابی بررسی شد. آنالیز حساسیت شامل تحلیل دو قسمت روتور و استاتور به صورت جداگانه بود.

نتایج حاصل از مقایسه دو مدل ریاضی پایه و تغییر یافته نشان می‌دهد که با اعمال اثر پوستی و اثر حرارت، گشتاور ترمزی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و این تغییرات در راستای نزدیکی نتایج تحلیل عددی به نتایج تحلیل تجربی مقاله مرجع است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که هرچه سرعت اولیه دیسک بیشتر باشد، گشتاور ترمزی تولیدی، اندازه و بقای بیشتر و مقدار آغازین کمتری خواهد داشت ولی اوج گشتاور ترمزی در هر سرعتی ثابت است. در بین چهار جنس آلومینیوم، مس، نقره و فولاد انتخاب شده برای دیسک ترمز، آلومینیوم نسبت به سایر جنس‌ها، گشتاور بیشتری تولید می‌کند. بررسی تأثیر تغییر ضخامت و شعاع دیسک در حالت حجم ثابت و جرم ثابت نشان می‌دهد، افزایش شعاع همراه متناسب با کاهش ضخامت، باعث افزایش اندازه گشتاور ترمزی تولیدی می‌گردد. در تحلیل تأثیر شکل آهنربا در گشتاور ترمزی تولیدی، مشاهده می‌شود که دو شکل استوانه‌ای و مکعبی به مراتب بیشتر از شکل کروی، و شکل استوانه‌ای اندکی بیشتر از شکل مکعبی بهتر است. در بررسی ساختار سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی، نتایج نشان می‌دهد چینش آهنرباها با تعداد ثابت در یک طرف دیسک، نسبت به چینش آهنرباها با تعداد ثابت در دو طرف دیسک گشتاور ترمزی بیشتری تولید می‌کند. همچنین در مقایسه تأثیر افزایش تعداد آهنرباها با افزایش اندازه آهنرباها به تعداد ثابت، مشاهده می‌گردد که افزایش تعداد از افزایش ابعاد موثرتر است.

شرایط فیزیکی آهنرباهای دائمی عیناً قابل اعمال بر آهنرباهای القایی هستند و پس از انتخاب و قرار دادن مشخصات آهنرباهای دائمی برای آهنرباهای القایی، تأثیر نوع و شدت جریان الکتریکی بررسی شد و نتایج تحلیل نشان می‌دهد که جریان الکتریکی ورودی از نوع AC نسبت به جریان الکتریکی DC شدت میدان مغناطیسی و به دنبال آن گشتاور ترمزی بیشتری تولید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد مدل نهایی با مصرف ۱۲ ولت و ۲۴ آمپر جریان الکتریکی در هر ثانیه قادر به تولید گشتاور ترمزی معادل ۲۰۸۰ نیوتون‌متر می‌باشد.

بدیهیست در حالت عددی با افزایش جریان الکتریکی ورودی به آهنربای الکتریکی، گشتاورهای بیتشری حاصل می‌شود ولی با توجه به محدودیت‌های فیزیکی موجود در مدل سیستم ترمزگیری جریان‌گردابی شامل ابعاد مدل، فضای موجود در خودرو، انرژی الکتریکی که باتری خودرو می‌تواند فراهم کند و همچنین سرعت دیسک ترمز، افزایش جریان الکتریکی و گشتاور ترمزی تولیدی بیش از این مقدار منطقی نمی‌باشد.

مراجع

- [1] حسینی تهرانی، پ.، مرادی، خ.، و بال محمدی، س.، "تنش‌های حرارتی در دیسک و لنت قطار"، نشریه مهندسی مکانیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۳- شماره پایانی ۲۴، سیستم‌های دینامیکی و مکانیک جامدات، صفحه ۲۷-۶، (آذر ۱۳۹۰).
- [2] Baharom, M.Z., Nuawi, M.Z., Priyandoko, G., Harris, S.M., and Siow, L.M., "Eddy current Braking Study for Brake Disc of Aluminum, Copper and Zinc", Regional Engineering Postgraduate Conference, Perak, Malaysia, (2011).
- [3] Liu, C.Y., Jiang, K.J., and Zhang, Y., "Design and Use of an Eddy Current Retarder in an Automobile", International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, pp. 611-614, (2011).
- [4] Onur, M., Ahmet, D., and Kubilay, A., "Determination of the Effect of Conductive Disk Thickness on Braking Torque for a Low Power Eddy Current Brake", 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, (2013).
- [5] Zhou, Q., Guo, X., Tan, G., X., Shen, Y.Ye., and Wang, Z., "Parameter Analysis on Torque Stabilization for the Eddy Current Brake: A Developed Model, Simulation, and Sensitive Analysis", Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015, pp. 1-11, (2015).
- [6] Yazdanpanah, R., and Mirsalim, M., "Analytical Study of Axial-flux Hybrid Excitation Eddy Current Brakes", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 47, pp. 885-896, (2015).
- [7] Gulec, M., Yolacan, E., and Aydin, M., "Design, Analysis and Real Time Dynamic Torque Control of Single-rotor-single-stator Axial Flux Eddy Current Brake", IET Electric Power Applications, Vol. 10, pp. 869-876, (2016).
- [8] Karakoc, K., Suleman, A., and Park, E.J., "Analytical Modeling of Eddy Current Brakes with the Application of Time Varying Magnetic Fields", Applied Mathematical Modelling, Vol. 40, pp. 1168-1179, (2016).
- [9] Cho, S., Liu, H.C., Ahn, H., Lee, J., and Lee, H.W., "Eddy Current Brake with a Two-layer Structure: Calculation and Characterization of Braking Performance", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, (2017).
- [10] Gyaneshwar, V., Shaji, B., Ramanaryanan, N., Chandar, S.V., Devika, D., and Narayanan, K.S., "Material Selection and Optimisation of an Eddy Current Braking System with Regeneration", Materials Today: Proceedings, Vol. 24, pp. 1608-1617, (2020).

- [11] میرسلیم، م. د. ح. م.، "مدلسازی تحلیلی ترمز جریان‌گردابی آهن ربایی"، سومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفتهای اخیر در مهندسی راه آهن (ICRARE)، تهران، (۱۳۹۲).
- [12] Gulec, M., Aydin, M., Lindh, P., and Pyrhonen, J., "Investigation of Braking Torque Characteristic for a Double-stator Single-rotor Axial-flux Permanent-magnet Eddy-current Brake", 23rd International Conference on Electrical Machines, Ramada Plaza, (2018).
- [13] Ye, L., Liu, Y., and Li, D., "Braking Characteristics and Experiment of a Permanent Magnet Eddy-current Retarder", Journal of Beijing University of Technology, Vol. 44, pp. 837-842, (2018).
- [14] Abali, B.E. and Queiruga, A.F., "Theory and Computation of Electromagnetic Fields and Thermomechanical Structure Interaction for Systems Undergoing Large Deformations", Journal of Computational Physics, Vol. 394, pp. 200-231, (2019).
- [15] Hao, B. and Lee, K.M., "Distributed Current Source Modeling Method for 3D Eddy Current Problem in Magnetic Conductor with Discrete State-space J- ϕ Formulation", Journal of Computational Physics, Vol. 17, pp. 109-121, (2019).
- [16] Eser, E. and Koç, H., "Investigations of Temperature Dependences of Electrical Resistivity and Specific Heat Capacity of Metals", Physica B: Condensed Matter, Vol. 492, pp. 7-10, (2016).
- [17] Jones, W. and March, N. H., "*Theoretical Solid State Physics*", Dover Publications, (1985)
- [18] Lee, J.K. and Park, K., "Modeling of the Eddy Currents with the Consideration of the Induced Magnetic Flux", IEEE International Conference, Singapore, (2001).
- [19] Li, Z., Yan, Z., and Luo, J., "Performance Comparison of Electromagnetic Energy Harvesters Based on Magnet Arrays of Alternating Polarity and Configuration", Energy Conversion and Management, Vol. 179, pp. 132-140, (2019).
- [20] Xu, W., Fang, H.y., Cao, J., and Ding, W.b., "Parametric Effect of Large Impulse Current Excited Coil on Electromagnetic Force in Coil-sheet System", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 19, pp. 806-810, (2009).

فهرست نمادهای انگلیسی

P	توان
T	گشتاور
ρ	دما
B	میدان مغناطیسی
E	میدان الکتریکی
A	پتانسیل الکتریکی
J	چگالی جریان الکتریکی
I	جریان الکتریکی

V	ولتاژ الکتریکی
v	سرعت
ω	سرعت دورانی
η	بازده
φ	شار مغناطیسی
Ω	فرکانس جریان
μ	نفوذپذیری مغناطیسی
σ	هدایت الکتریکی

بالانویس‌ها

<i>ECB</i>	ترمز جریان گردابی
<i>EMF</i>	نیروی محرکه الکتریکی
NVH	نویز و ارتعاش

زیرنویس‌ها

D	دیسک
a	محور
M	مغناطیسی
B	ترمزی
x	درراستای محور x
y	درراستای محور y
g	فاصله
0	مقدار اولیه
r	نسبی
S	سطحی

Abstract

By reviewing the research conducted on the eddy current braking system's analysis and optimization, it is observed that eddy current braking's physical characteristics are not studied in the automotive application, and its braking torque is not sufficient. In this paper, the governing equations of the braking torque of the eddy current brake with the addition of skin effect and heat are applied, and the results of the two basic and modified models are compared. Then the sensitivity analysis was performed by the finite element method. The analysis results show that by applying the skin effect and heat, the skin effect and heat, the braking torque increases and decreases, respectively. The sensitivity analysis results show the effect of the system's geometric, dynamic, and electromagnetic parameters and structural modifications on the initial value, peak value, and durability of the braking torque produced by the eddy current brake.