

طراحی بهینه ترمز جریان گردابی با در نظر گرفتن اثر چگالی شار القایی در دیسک

امیرحسین سهیلیان^۱، فرید توتونچیان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، amirhoseinsheilian1988@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، tootoonchian@iust.ac.ir

چکیده

دینامومترهای الکتریکی جهت تعیین منحنی مشخصه‌های موتورهای الکتریکی، تایید مشخصات موجود در پلاک آنها، آزمایش عملکرد موتورهای تعمیر شده و شبیه‌سازی انواع بارهای مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع مختلف دینامومترها عبارتند از دینامومتر ترمز جریان گردابی، دینامومتر هیستریزس و دینامومتر ژنراتوری که نوع اول به دلیل سادگی ساختار، در سرعت‌های متوسط و زیاد مورد توجه قرار گرفته است. ترمز جریان گردابی بر مبنای قوانین القای فارادی و لنز عمل کرده و بر اثر چرخش دیسک از میان قطب‌های مغناطیسی، جریان گردابی در دیسک القا می‌شود. هدف از این مقاله ارائه روش طراحی بهینه ترمز جریان گردابی با در نظر گرفتن اثر چگالی شار ناشی از جریان القا شده در دیسک است. عملکرد ترمز طراحی شده با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود در حالت گذرا، تایید شده است.

واژه‌های کلیدی

دینامومتر، ترمز جریان گردابی، قانون فارادی، قانون لنز

مقدمه

از تجهیزات مبتنی بر جریان گردابی به عنوان اتصال‌دهنده (کوپلر)، دمپر و ترمز جریان گردابی در صنایع گوناگون نظیر سیستم تعلیق خودرو، ترمز قطارها و دینامومترهای جریان گردابی استفاده می‌شود. ترمز جریان گردابی بر اساس قوانین القای فارادی و لنز عمل می‌کند. به این صورت که بر اثر چرخش دیسک هادی از میان فاصله هوایی میان دو قطب مغناطیسی، جریان گردابی در دیسک القا می‌شود که بر اثر تعامل بین چگالی شار تحریک و چگالی شار ناشی از جریان گردابی القاشده، نیرویی در خلاف جهت حرکت هادی به آن اعمال می‌شود. اندازه این نیرو به ازای چگالی شار فاصله هوایی ثابت، به سرعت حرکت هادی وابسته است. به این ترتیب که با افزایش سرعت از سرعت صفر تا سرعت بحرانی، گشتاور افزایش می‌یابد و در سرعت‌های بیشتر از سرعت بحرانی گشتاور کاهش می‌یابد. تحریک تجهیزات جریان گردابی به صورت آهنربای دایم، تحریک ترکیبی

آهنربا و سیم‌پیچی) و فقط سیم‌پیچی است. به دلیل مزایای ترمز جریان گردابی با تحریک سیم‌پیچی شده از قبیل هزینه کمتر و دی مغناطیس نشدن قطب‌ها در این مقاله یک ترمز جریان گردابی با تحریک سیم‌پیچی طراحی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود. روابط تحلیلی ترمز جریان فوکو سیم‌پیچی شده، برای دو سرعت زیاد و کم، در [۱] ارائه شده است. نویسندگان [۲] به طراحی یک ترمز جریان گردابی بر مبنای روابط J. H. Wouters در سرعت‌های کم، با هسته خطی پرداخته‌اند و از آن برای تعیین بازده موتور صندلی چرخ‌دار برقی، استفاده کرده‌اند. در [۳] یک میز تست مجهز به ترمز جریان گردابی، با در نظر گرفتن چگالی شار هسته، طراحی و کنترل شده است. نویسندگان [۴] گشتاور دینامومتر را با فرض حلقه سیلندری و لحاظ نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از جریان گردابی محاسبه کرده‌اند. در [۵] یک روش طراحی بهینه و کنترل ترمز جریان گردابی در یک چرخه مربوط به رانندگی در شهر برای اصلاح مشخصه مصرف انرژی را ارائه می‌دهد. مراجع [۶] - [۸] به بهینه‌سازی و بررسی اثر پارامترهای ساختاری مثل فاصله هوایی، تعداد دورسیم‌پیچی، تعداد قطب‌ها و ضخامت دیسک، بر روی منحنی مشخصه گشتاور - سرعت یا نیرو - سرعت پرداخته‌اند.

در مراجع فوق، اثر چگالی شار ناشی از جریان القا شده در دیسک مورد توجه قرار نگرفته است. لذا، در این مقاله یک روش سریع و دقیق برای طراحی بهینه ترمز جریان گردابی بر مبنای روابط سرعت پایین J. H. Wouters ارائه شده است؛ با این مزیت که در آن اثر نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از جریان گردابی القا شده در دیسک در نظر گرفته شده است. ترمز طراحی شده بروش پیشنهادی، بروش اجزای محدود در حالت گذرا و با استفاده از نرم افزار انسیس ماکسول ۲۰۱۹ شبیه‌سازی شده و عملکرد آن تایید شده است.

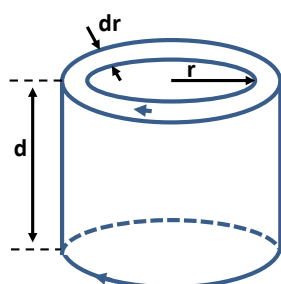
طراحی ترمز جریان گردابی بر مبنای روابط J.H.Wouters

همانطور که قبلاً اشاره شد؛ عبور دیسک هادی از میان قطب‌ها باعث القای جریان گردابی و در نتیجه گشتاوری در جهت مخالف حرکت دیسک می‌شود. شکل (۱) نحوه عملکرد یک دیسک هادی در یک میدان مغناطیسی (B) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که اگر دیسک با سرعت خطی V حرکت کند؛ در فاصله R که نشان دهنده

رابطه برای طراحی یک ترمز جریان گردابی حتی با هسته خطی، خطای قابل ملاحظه‌ای دارد.

در نظر گرفتن چگالی شار ناشی از جریان گردابی القایی

به منظور رسیدن به یک رابطه دقیق، باید ضمن در نظر گرفتن منحنی مغناطیسی هسته ترمز جریان گردابی، مقدار چگالی شار حاصل از القای جریان گردابی نیز، محاسبه شود. به این ترتیب خطای محاسبات تحلیلی کاهش می‌یابد و نتایج آن به شبیه‌سازی اجزای محدود نزدیک می‌شود. برای این منظور، مسیر حرکت جریان گردابی در هادی دیسک (رتور) به صورت شکل ۲، فرض می‌شود. در این شکل با فرض عبور جریان گردابی از درون یک سیم‌پیچ یک دوری به صورت سیلندر، محاسبات انجام می‌شود [۴] و [۵].



شکل ۲: مسیر حرکت جریان گردابی در هادی دیسک (رتور)

در این تحلیل، یک جزء کوچک با ضخامت dr که داخل میدان فاصله هوایی حرکت می‌کند و در آن ولتاژ القا می‌شود؛ در نظر گرفته می‌شود [۵]. همچنین با توجه به وابستگی مقاومت اهمی دیسک به سرعت آن (فرکانس میدان القایی) لازم است عمق نفوذ جریان متناسب با اثر پوستی لحاظ شود. در سرعت کم، به دلیل اینکه عمق نفوذ جریان نسبت به ضخامت دیسک و قطر سیلندر زیاد است؛ می‌توان مقاومت مسیر عبور جریان گردابی را با مقاومت dc برابر در نظر گرفت.

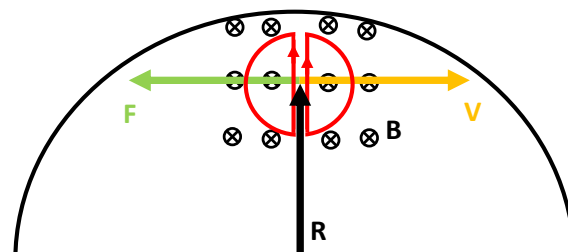
مولفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\phi_g = B_g A_g \cos \omega t \quad (4)$$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که در هر دو قطب مجاور، جهت عبور جریان‌ها مخالف یکدیگر است. لذا شار برآیند و چگالی شار فاصله هوایی متناوب خواهد بود. البته از آنجا که قطر قطب‌ها الزاماً مساوی فاصله بین دو قطب مجاور نیست؛ این شار هامونیک خواهد بود که در این مطالعه به منظور سهولت مدل‌سازی، مطابق رابطه (۴) از مولفه اصلی چگالی شار برآیند فاصله هوایی استفاده می‌شود. برای محاسبه مولفه

فاصله مرکز دیسک تا مرکز قطب است؛ جریان گردابی I در دیسک القا می‌شود و نیروی F خلاف جهت حرکت به آن وارد می‌شود.



شکل ۱: عملکرد یک دیسک هادی در حضور میدان مغناطیسی

در روش J. H. Wouters نیروی وارد بر هادی در سرعت کم و زیاد متفاوت فرض می‌شود [۱] و در سرعت کم از چگالی شار ناشی از جریان گردابی صرف‌نظر می‌شود. زیرا در سرعت‌های خیلی کم نسبت به سرعت بحرانی (سرعتی که حداکثر گشتاور در آن روی می‌دهد) می‌توان به علت ناچیز بودن مقدار جریان گردابی، از چگالی شار ناشی از آن در دیسک، در مقابل چگالی شار تحریک صرف‌نظر کرد. لازم به ذکر است که چگالی شار تحریک، به دلیل ثابت بودن جریان تحریک، همواره مقداری ثابت است. چگالی شار تحریک لازم به ازای یک قطب، عبارتست از [۲]:

$$B_0 = \sqrt{\frac{4F_e \rho}{\pi(CD)^2 dc v}} \quad (1)$$

که در آن F_e ، ρ ، C ، D ، d و c به ترتیب نیروی خطی وارد بر دیسک، مقاومت مخصوص دیسک هادی، قطر دایره‌ای که مساحت آن با مساحت قطب مستطیلی یکسان است، ضریب تصحیح و سرعت خطی دیسک، هستند. معادله (۱) همان چگالی شار فاصله هوایی است که در روش J. H. Wouters برای سرعت‌های کم ارایه شده است. در این معادله از چگالی شار ناشی از جریان گردابی در سرعت‌های کم در مقابل چگالی شار تحریک ناچیز فرض شده است. اما با در نظر گرفتن چگالی شار جریان گردابی القاء شده در دیسک، B_e ، چگالی شار برآیند فاصله هوایی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B_g = B_0 - B_e \quad (2)$$

با صرف‌نظر از شار جریان گردابی، چگالی شار فاصله هوایی زیر هر قطب، در سرعت صفر، B'_0 ، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$B'_0 = \frac{B_0}{\sqrt{Pole}} \quad (3)$$

که در آن $pole$ تعداد قطب را نشان می‌دهد.

رابطه (۳) به علت در نظر نگرفتن چگالی شار ناشی از جریان گردابی، فقط در سرعت‌های بسیار کوچک و نزدیک به صفر صادق است. این

جدول ۱: ورودی‌ها و خروجی‌های واسط کاربری ارائه شده برای طراحی ترمز جریان گردابی

ورودی‌های GUI	خروجی‌های GUI
گشتاور (N.m.)	نیروی کششی در سرعت طراحی (N)
سرعت (rpm)	جریان سیم‌پیچ (A)
شعاع دیسک یا روتور (m)	تعداد دور در هر لایه
ضخامت دیسک (m)	تعداد لایه‌ها
سرعت چرخش فعلی (rpm)	قطر بیرونی سیم‌پیچ (m)
مقاومت مخصوص ماده (Ω.m)	طول سیم‌پیچی (m)
تعداد قطب‌ها	مقاومت استاتور (Ω)
تعداد دور سیم‌پیچی	ولتاژ ورودی (V)
عرض قطب (m)	توان مصرفی (W)
طول قطب (m)	چگالی شار کل (T)
فاصله هوایی (m)	چگالی شار فاصله هوایی برای هر قطب (T)
قطر هادی سیم‌پیچی (m)	سرعت خطی بحرانی ($\frac{m}{s}$)
ضریب زینتا	سرعت زاویه‌ای بحرانی ($\frac{rad}{s}$)
قطر قطب یا طول اضلاع برای قطب‌های مربعی (m)	سرعت بحرانی (rpm)
	گشتاور در سرعت چرخش فعلی (N.m.)
	بیشترین نیروی اعمالی/نیرو در سرعت بحرانی (N)
	چگالی جریان ($\frac{A}{mm^2}$)
	ضریب شکستگی
	شدت میدان هسته ($\frac{AT}{m}$)
	چگالی شار هسته (T)
	عمق پوستی (m)

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش یک ترمز جریان گردابی ۸ قطبی، که با استفاده از روابط تحلیلی بخش قبل، طراحی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است؛ شبیه‌سازی می‌شود. نرم افزار Ansys Maxwell 2019 برای شبیه‌سازی اجزای محدود و تایید نتایج حاصل از روش تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که قبلاً اشاره شد؛ برای اجرای الگوریتم طراحی، یک واسط کاربری گرافیکی در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است که در شکل ۳-ب، نشان داده شده است. نتایج تحلیلی حاصل از اجرای این واسط کاربری نشان می‌دهد که در سرعت ۱۹/۲۵ دور در دقیقه، گشتاور ترمز ۱۵ نیوتن-متر است

اصلی جریان گردابی dR بر حسب dr به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$dR = \frac{\rho 2\pi r}{dr \times d} \quad (6)$$

با تقسیم روابط (۵) و (۶) و انتگرال‌گیری در طول شعاع سیلندر، مولفه اصلی جریان گردابی بدست می‌آید. رابطه (۷) مقدار موثر جریان گردابی را نشان می‌دهد.

$$I_e = \frac{\sqrt{2}n\pi \frac{N_p}{2} dCD' B'_g}{960\rho} \quad (7)$$

$$CD' = Fringing\ factor \times CD \quad (8)$$

که در آن n ، B'_g و N_p به ترتیب سرعت چرخش بر حسب دور در دقیقه، چگالی شار فاصله هوایی در سرعت n و تعداد قطب‌ها هستند. حال با در نظر گرفتن مقدار موثر جریان گردابی و ضرب آن در ضریب K_p مقدار نیروی محرکه القایی ایجاد شده توسط جریان گردابی محاسبه می‌شود [۴].

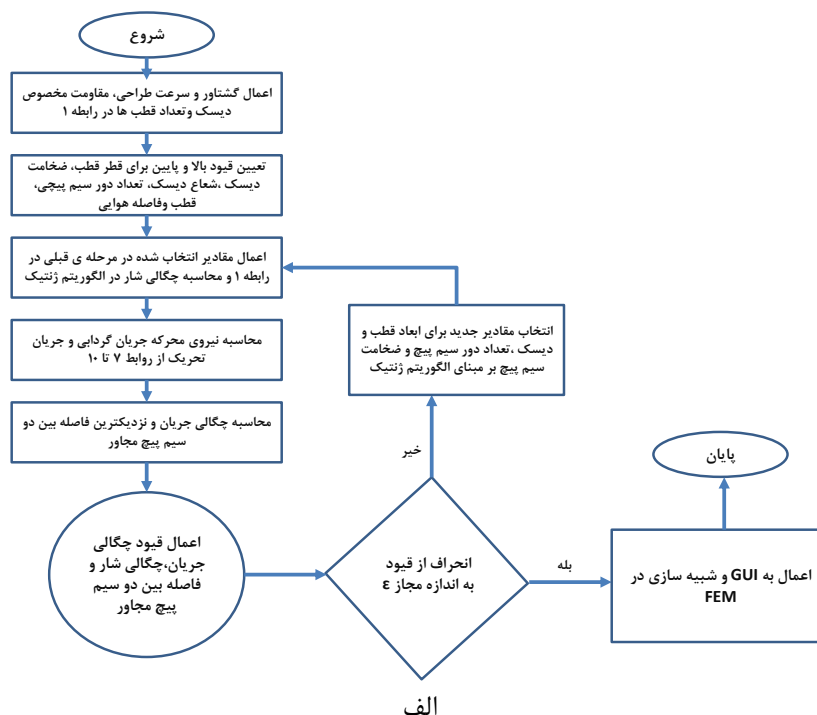
$$K_p = 1.5 \quad (9)$$

جریان سیم‌پیچی تحریک از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$NI_0 = H_g L_g + H_c L_c + K_p I_e \quad (10)$$

در واقع رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که برای ابعاد انتخاب شده به ازای چه جریانی گشتاور مورد نظر تامین خواهد شد. همچنین این رابطه برای هسته‌های غیرخطی کاربرد دارد.

با در نظر گرفتن ملاحظات و روابط ارائه شده، الگوریتم طراحی در شکل ۳-الف، ارائه شده است. لازم به توضیح است که نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده، توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است و خروجی‌های آن توسط یک واسط کاربری گرافیکی (GUI) در محیط MATLAB نرم‌افزار ارائه شده است. شکل ۳-ب، واسط کاربری گرافیکی طراحی شده، شامل ورودی‌های لازم برای طراحی و خروجی‌های الگوریتم طراحی را نشان می‌دهد. ورودی‌ها و خروجی‌های GUI ارائه شده، در جدول (۱) آمده است.



Design of Eddy Brake

List of input

max motor Torque_T(N.m):	15
Minimum Speed_w(RPM):	19.25
Pole Diameter(m):	0.0536
Rotor Radius(m):	0.1777
Thickness of Rotor(m):	0.0077
Rotor Material:	35*10^-8
Stator Number_S:	8
Turns:	912.733
Width_(m):	0.1805
Length_(m):	0.2475
Air Gap_(m):	0.0095
Wire Size_wd_(m):	0.00126
Zeta:	1
high speed:	3000

List of outputs

Dragging Force_F(N)=	131.6333	Stator Current(A)=	3.9575
Turns per Layer=	103.4127	Number of Layer=	8.8261
Total Coil Diameter(m)=	0.096342	Stator Wire Length(m)=	274.6267
Total Length of Stator(m)=	2197.0137	Resistance of Stator(Ohms)=	32.6355
PS Voltage_V(V)=	129.1534	PS Power_P(Watts)=	511.1189
Air gap induction at zero speed_B0(T)=	1.2239	Induction at each stator core_B1(T)=	0.43273
Critical velocity(m/s)=	3.2069	Critical angular velocity=	28.1423
Critical rpm=	268.7396	Te(N.m)=	18.6094
Fe(Max)=	918.8336	Current Density=	3.4992
Fringing factor=	1.3859	Flux of core_(Hc)=	0.00010044
Skin depth(m)=	0.072322	Flux density of core_(Bc)=	0.59972

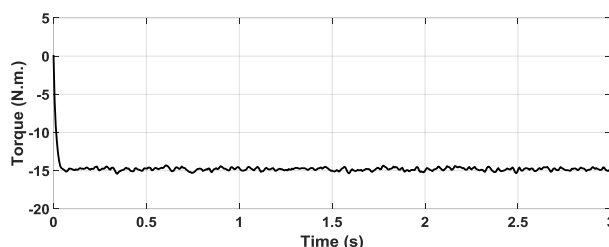
Compute

ب

شکل ۳: فرایند طراحی و بهینه سازی ترمز جریان گردابی: (الف) الگوریتم طراحی و (ب) نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک و GUI.

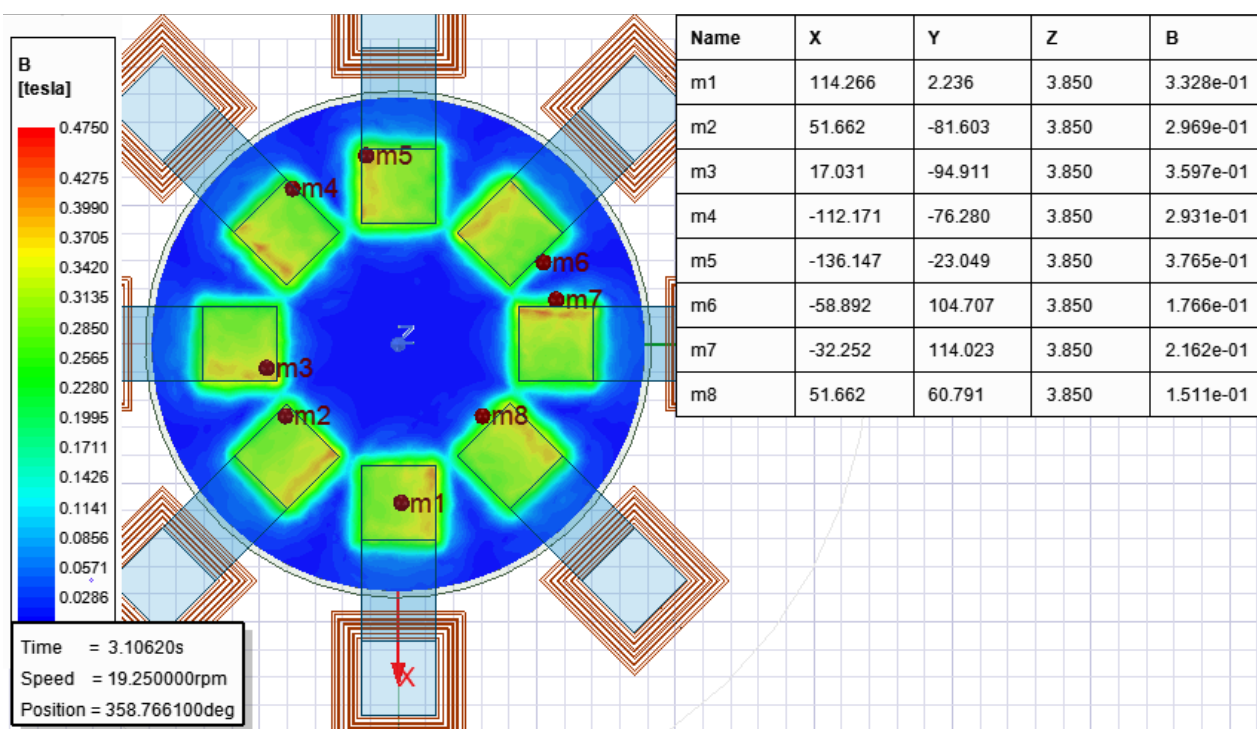
طراحی ترمز جریان گردابی با استفاده از روش تحلیلی میتنی بر رولپت سرعت پایین J.H.Wouters به علت صرفنظر از چگالی شار ناشی از جریان گردابی القا شده تنها در سرعت های نزدیک به صفر قابل استفاده است و هر چه از سرعت دیسک از صفر فاصله بگیرد خطای محاسباتی افزایش خواهد یافت. زیرا، همانطور که در روابط تحلیلی مشاهده شد مقدار جریان گردابی به سرعت دیسک وابسته است و با افزایش سرعت نیروی محرکه ناشی از جریان گردابی افزایش می یابد. در این مطالعه با فرض یک سیلندر، مقدار جریان گردابی آن محاسبه شد. در ادامه نیروی محرکه القایی ناشی از این جریان بدست آمد. با در نظر گرفتن این نیروی محرکه مناطیسی، مقدار جریان لازم برای تحریک سیم پیچی ترمز جریان گردابی با دقت مناسبی محاسبه شد. محاسبه دقیق جریان تحریک امکان محاسبه دقیق ابعاد ساختار ترمز فوکو را فراهم ساخت. در نهایت، پس از بهینه سازی، ترمز طراحی شده بشیوه پیشنهادی، با روش اجزای محدود سه بعدی شبیه سازی گردید. گشتاور ترمزی و چگالی شار فاصله هوایی به دو روش تحلیلی و المان محدود محاسبه شد. بررسی نتایج، تطابق قابل قبولی میان محاسبه بروش تحلیلی و اجزای محدود نشان داد.

این در حالی است که نتایج شبیه سازی اجزای محدود همان ترمز طراحی شده، مطابق شکل (۴)، نشان می دهد که گشتاور خروجی ۱۴/۸۵ نیوتن-متر است. به عبارت دیگر، خطای مدل تحلیلی ارائه شده نسبت به مدل اجزای محدود ۱٪ است. همچنین چگالی شار متوسط فاصله هوایی در روابط تحلیلی برابر با ۰/۴۳ تسلا محاسبه شده است؛ که با نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود، ۰/۴۷ تسلا ۸ درصد اختلاف دارد.



شکل ۴: منحنی گشتاور-زمان ترمز جریان گردابی برای یک دور چرخش در سرعت ۱۹,۲۵ دور بر دقیقه

نتیجه گیری



شکل ۵: توزیع چگالی شار فاصله هوایی بعد از یک دور چرخش در سرعت ۱۹,۲۵ دور بر دقیقه

Proceedings B-Electric Power Applications, vol.138, no.4, 1991.

[2] W. J. Brin, "Design and Fabrication of an Eddy Current Brake Dynamometer for Efficiency

مراجع و منابع

[1] J. H. Wouterse, "Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron", *IEE*

- Conference 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), pp. 158–160, 2018.
- [7] Z. Ying, X. Xu, J. Zhu, “Analysis of simulation design of the disc eddy Current braking device”, International Conference on Computer, Mechatronics Control and Electronic Engineering, vol. 5, pp. 309 – 311, 2010.
- [8] Kyung-Ho Ha; Jung-Pyo Hong; Gyu-Tak Kim; Ju Lee; Do-Hyun Kang, ”A study of the design for touch free linear eddy current brake,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 4031 – 4033, 1999.
- Determination of Electric Wheelchair Motors”, M.Sc. thesis, Wright State University, 2012
- [3] S. Hukkelås, “Control of Eddy-Current Brakes” M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [4] L. Duo-yang, W. Jun-zheng, S. Wei, C. Ying-hui, Z. Jiang-bo, and C. Guang-rong, “A calculation method of braking torque for eddy current dynamometer using least square method based on assumption of cylindrical ring”, 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2017
- [5] D. Hu, Y. Yan, and X. Xu,” Energy saving optimal design and control of electromagnetic brake on passenger car”, Mechanical science, School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China, January 2019, doi.org/10.5194/ms-10-57-2019.
- [6] M. Putra, M. Nizam, D. Tjahjana, M. Arfandi, Ubaidillah, I. Choirunisa, “Design Study in Single Disk Axial Eddy Current Brake,” 5th International

↑ تا حد امکان دو ستون موجود در صفحه آخر را تراز کنید. ↑