GU J Sci, Part C, 5(1): 1-10 (2017)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

dergipark.gov.tr/http-gujsc-gazi-edu-tr

Kampana-tipi ve Disk-tipi Manyetoreolojik Frenlerin Sayısal Yöntemlerle Karşılaştırılması

Yiğit TAŞCIOĞLU[1,*]

[1]*TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Söğütözü, Ankara*

Makale Bilgisi

Başvuru: 21/05/2016
Düzeltme: 15/11/2016
Kabul: 06/12/2016

Anahtar Kelimeler

Manyetoreolojik fren
FEMM
Bingham plastik modeli

Keywords

Magnetorheological brake
FEMM
Bingham plastic model

Öz

Bu çalışmada kampana-tipi ve disk-tipi manyetoreolojik frenler, tork yoğunluğu ve verim yönlerinden karşılaştırılmıştır. Parametrik olarak tasarlanan frenlerin manyetik analizi FEMM sonlu elemanlar yazılımı ile yapılmış, elde edilen manyetik akı değerleri ile kullanılan ticari manyetoreolojik sıvının akma gerilmesi bulunmuştur. Frenleme torku, Bingham plastik modeli kullanılarak, analitik olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma kriterlerinin maksimum olduğu noktalarda frenlerin hacimlerinin ve kütlelerinin benzer olduğu, ancak kampana-tipi frenin performansının disk-tipi frene göre yaklaşık iki kat daha iyi olduğu görülmüştür.

Comparison of Drum-type and Disc-type Magnetorheological Brakes by Computational Methods

Abstract

This paper presents a comparison between drum-type and disc-type magnetorheological brakes, based on torque density and efficiency. Magnetic simulations of the parametric brake designs are carried out in FEMM finite element software. The yield stress of the used commercial magnetorheological fluid is detemined based on the magnetic flux obtained from the simulations. Braking torque is analytically calculated by using the Bingham plastic model. It is shown that the brakes have similar volumes and masses at the maximum points of the comparison criteria. However the performance of the drum-type brake is found to be about twice better than the disc-type brake.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Manyetoreolojik sıvı (MRS) mikronize büyüklükteki (örn. 1 ~ 10 µm) ferromanyetik parçacıkların mineral yağ veya sentetik yağ gibi bir taşıyıcı sıvı içerisinde süspansiyon halinde bulunduğu aktif bir malzemedir. MRS ilk olarak 1948 yılında Rabinow [1] tarafından kullanılmıştır. Manyetik alan yokluğunda MRS'ler sıvı gibi davranır ve içlerindeki taşıyıcı sıvınınkine yakın reolojik özellikler sergiler. Manyetik alan uygulandığında ise viskoziteleri hızlıca artarak (örn. <10 ms) neredeyse viskoelastik katı davranışı gösterirler. Bunun nedeni parçacıkların manyetik alana paralel yönde sıralanarak zincir benzeri yapılar oluşturmasıdır [2] (bkz. Şekil 2). Bu davranış manyetik alan şiddetiyle doğru orantılı, sürekli ve tersinir yapıdadır, yani manyetik alan kaldırıldığında MRS sıvı haline geri döner.

Manyetoreolojik (MR) cihazların tasarımı başta otomotiv olmak üzere inşaat, sağlık ve robotik alanlarına yönelik olarak, özellikle son yıllarda, hız kazanmıştır. Genellikle kampana-tipi ve disk-tipi tasarımlar etrafında kümelenmiş olan dönel MR cihazlar, kullanım amacına göre, kavrama [1,3-4], fren [5-7] ve sönümleyici [8-9] olarak isimlendirilmiştir.

MR frenler, MRS'nin bağıl hareket eden iki paralel yüzey arasında manyetik alana maruz kaldığı kayma modunda çalışır. Kampana-tipi tasarımlarda kayma modu, rotorla gövde arasındaki radyal boşlukta meydana gelir. Performansı etkileyen başlıca parametreler radyal boşluğun kalınlığı, etkin alanın

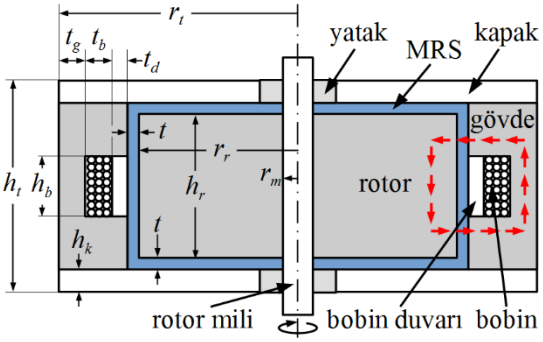
*İletişim yazarı, e-mail: ytascioglu@etu.edu.tr

büyüklüğü ve manyetik alan şiddetidir. Radyal boşluk inceldikçe, ferromanyetik parçacıkların manyetik alan etkisiyle oluşturdukları zincirler kısalır ve dayanımları artar. MRS'nin kayma modundaki dayanımı zincirlerin dayanımlarının toplamı olduğu için frenin uygulayabileceği maksimum tork da artar. Rotorun radyal yüzeyini genişletmek etkin alanı büyüterek maksimum torku arttırır, ancak bu değişiklik rotorun atalet momentinin artmasına ve fren boyutunun büyümesine neden olur [5]. Disk-tipi frenlerde kayma modu rotorla gövde arasındaki eksenel boşluklarda meydana gelir [10]. Boşluk kalınlığının etkisi kampana-tipi cihazlardakiyle aynıdır. Öte yandan, disk-tipi tasarımlarda rotor uzunluğunun etkin alana etkisi yoktur. Etkin alan rotor çapı büyütülerek arttırılabilir.

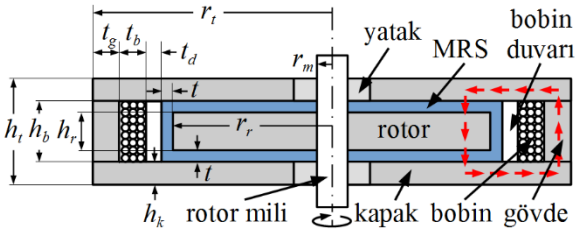
Bu çalışmanın amacı kampana-tipi ve disk-tipi MR frenleri, maksimum fren hacmi 500 cm^3 olacak şekilde, sayısal yöntemler kullanılarak karşılaştırmaktır. Karşılaştırmada kullanılan performans ölçütleri, birim hacim başına üretilen frenleme torkunu ifade eden tork yoğunluğu ve frenleme torkunun elektriksel güç girdisine oranı olan verimdir.

2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Karşılaştırmada kullanılacak kampana-tipi ve disk-tipi frenlerin paramerik tasarımları, sırasıyla, Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Oldukça benzer yapıda olan frenler aynı boyutsal parametrelerle tanımlanabilmektedir. Tasarımlar arasındaki tek fark kampana-tipi frenin kapaklarının antimanyetik olmasıdır. Bunun nedeni manyetik akıyı rotorla gövde arasındaki radyal boşluktan geçmeye zorlamaktır. Disk-tipi frende, gövdenin tamamı manyetik olduğundan, akı radyal yönde gövdenin içinden ilerlemekte, MRS'yi eksenel boşluklarda kesmektedir. Her iki frende de ticari bir MRS olan MRF 132-DG [11] kullanılmıştır. Tasarımların bileşen bazında malzeme listesi Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. *Kampana-tipi MR fren (Drum-type MR brake)*



Şekil 2. *Disk-tipi MR fren (Disc-type MR brake)*

Tablo 1. *Fren tasarımlarında kullanılan malzemeler (Materials used in brake designs)*

Bileşen	Malzeme	M/A*
Bobin	Bakır tel AWG 28	M
Rotor	Düşük karbonlu çelik 1018	M
Gövde	Düşük karbonlu çelik 1018	M
MRS	MRF 132-DG	M
Bobin duvarı	Alüminyum 6061T6	A
Rotor mili	Paslanmaz çelik 304	A
Kapak**	Paslanmaz çelik 304	A

* M = manyetik, A = antimanyetik
** sadece kampana-tipi için

Frenleme torku hesaplanırken MR cihazların modellenmesinde sıklıkla kullanılan Bingham plastik modeli kullanılmıştır. Eşitlik (1)'de verilen bu model, MRS'nin reolojik davranışını akma-öncesinde rijit, akma-sonrasında ise Newtonyen akışkan olarak tarif eder [12].

$$\tau = \tau_a(H) + \eta \frac{\omega r}{t} \tag{1}$$

burada τ sıvının kayma gerilmesi, $\tau_a(H)$ manyetik alan şiddeti H'nin fonksiyonu olan akma gerilmesi, η MRS'nin manyetik alan uygulanmadığındaki viskozitesi, ω açısal hız, r yarıçap ve t MRS kanalı kalınlığıdır.

Kampana-tipi frenler için (1)'de hesaplanan kayma gerilmesinin rotorun radyal alanıyla çarpılmasıyla rotora teğet yöndeki kuvvet elde edilir. Bu kuvvetin rotor yarıçapı ile çarpımı (2)'de verilen frenleme torkudur.

$$T_k = 2\pi h_r \tau_a(H) r_r^2 + \frac{2\pi\omega\eta h_r r_r^3}{t} \tag{2}$$

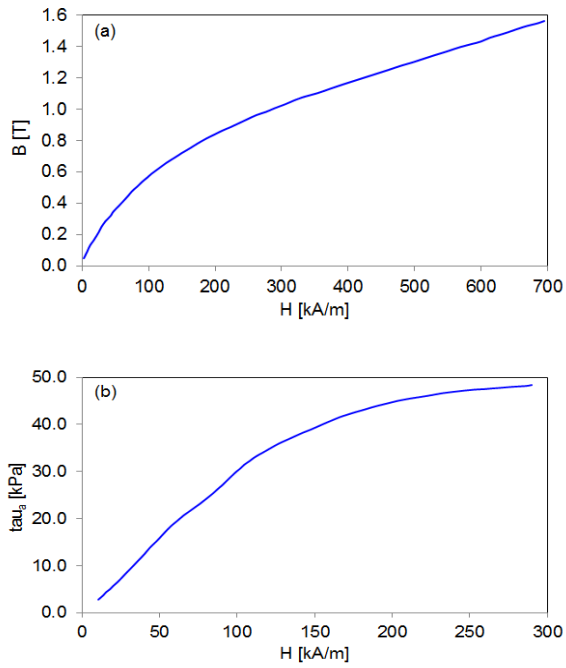
Disk-tipi frenler için, diskin eksenel yüzeylerinde (3)'te gösterildiği gibi integral alınarak (4)'te verilen frenleme torku ifadesi bulunur.

$$T_d = 2\int_0^{2\pi}\int_{r_m}^{r_r}(r\tau) r dr d\theta \tag{3}$$

$$T_d = \frac{4\pi}{3}\tau(H)(r_r^3 - r_m^3) + \frac{\pi\omega\eta(r_r^4 - r_m^4)}{t} \tag{4}$$

(2) ve (4)'teki tork ifadelerinde ikinci terimler torkun viskoz bileşenidir. MR frenlerin tipik çalışma hızlarında (<2000 devir/dak.) viskoz bileşen manyetik bileşene oranla önemsenmeyecek kadar küçük olacağından ihmal edilmiştir.

Tork hesapları için gereken akma gerilmesi manyetik alan şiddetine, manyetik alan şiddeti ise MRS üzerinden geçen manyetik akıya (B) göre değişmektedir. Üretici firmanın veri föyünden alınan H-B ve H-τ_a grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Manyetik akının hesaplanması için açık kaynaklı bir sonlu elemanlar yazılımı olan FEMM [13] kullanılmıştır. Tasarımlar iki boyutlu, simetrik eksenli (axisymmetric) manyetik problemi olarak çözülmüştür. FEMM ile veri alışverişi için bir MATLAB kodu yazılmıştır. Bu kod, Tablo 2'de verilen parametreleri kullanarak fren geometrisini ve elektromıknatıs özelliklerini Tablo 1'de verilen malzeme bilgileriyle birlikte FEMM'e göndermekte ve çözüm sonucunda elde edilen manyetik akı değeri ile Şekil 3'teki grafiklerden akma gerilmesini, interpolasyon yoluyla bulmaktadır. Her döngüde tekrarlanan bu işlemler sonucunda, her bir tasarım için tork ve hacim değerleri ile bunlara karşılık gelen performans ölçütleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. *MRF 132-DG a) B-H grafiği b) τ_a-H grafiği [11'den uyarlanmıştır] (MRF 132-DG a) B-H plot b) τ_a-H plot [adapted from 11])*

Frenlerin karşılaştırılmasında kullanılan performans ölçütleri, birim hacim başına üretilen frenleme torkunu ifade eden tork yoğunluğu (5) ve frenleme torkunun elektriksel güç girdisine oranı olan verimdir (6). Tablo 2'de belirtilen toplam yarıçap ve toplam uzunluk aralıklarının üst limitleri maksimum fren hacmi 500 cm^3 olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\rho = \frac{T}{\pi r_t^2 h_t} \tag{5}$$

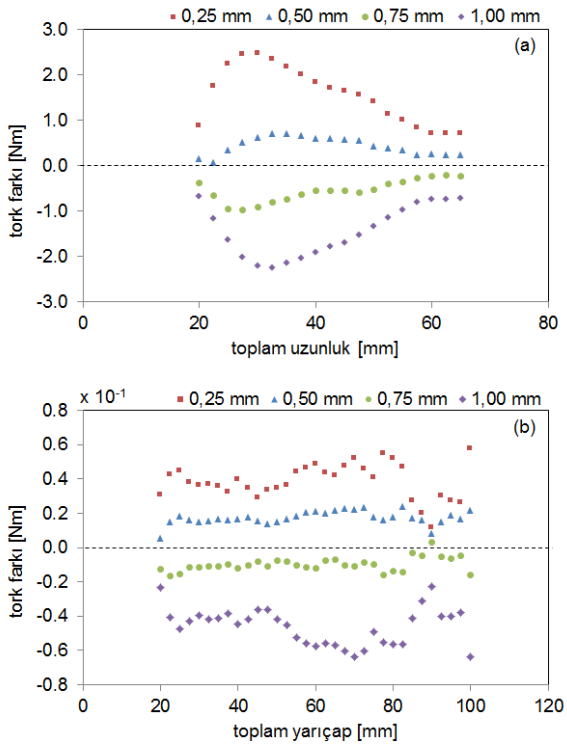
$$e = \frac{T}{I^2 R} \tag{6}$$

Tablo 2. *Tasarım parametreleri (Design parameters)*

Sembol	Birim	Kampana	Disk
t	mm	0,25~1,00	
r_t	mm	20~50	20~100
h_t	mm	20~65	16
r_m	mm	3	
t_d	mm	2	
t_b	mm	5	
t_g	mm	5	
h_b	mm	10	
h_k	mm	3	
r_r	mm	$r_t - t_g - t_b - t_d - t$	
h_r	mm	$h_t - 2(h_k + t)$	
N	tur	412	
I	A	1	

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

İlk olarak MRS kanalı kalınlığının frenleme torkuna etkisi incelenmiştir. Kampana frenin toplam yarıçapı 50 mm'ye sabitlenmiş, toplam uzunluk 20 mm'den 65 mm'ye 2,5 mm adımlarla arttırılarak 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm ve 1 mm kanal kalınlıkları için frenleme torku hesaplanmıştır. Şekil 4a farklı toplam uzunluklarda hesaplanan frenleme torklarının ortalama tork değerlerine göre farkını göstermektedir. Genel olarak frenleme torkunun kanal kalınlığıyla ters orantılı olduğu görülmektedir. 35 mm civarı toplam uzunluklarda, incelenen maksimum ve minimum kanal kalınlıklarında elde edilen frenleme torku farkı 5 N.m gibi değerleri bulabilmektedir.

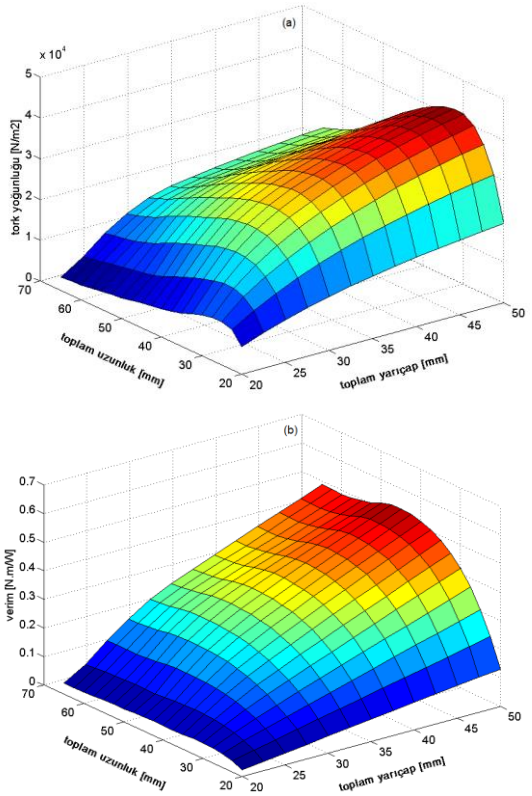


Şekil 4. *MRS kanalı kalınlığının frenleme torkuna etkisi a) kampana-tipi b) disk-tipi (Effect of MRF channel thickness on braking torque a) drum-type b) disc-type)*

Şekil 4b'de disk-tipi fren için yapılan analizin sonuçları gösterilmiştir. Toplam uzunluğu 16 mm olan frenin toplam yarıçapı 20 mm'den 100 mm'ye 2,5 mm adımlarla arttırılmıştır. Frenleme torku ile kanal kalınlığı arasındaki ters orantı burada da görülse de maksimum ve minimum kalınlıklardaki tork farkı 0,1 N.m mertebesindedir.

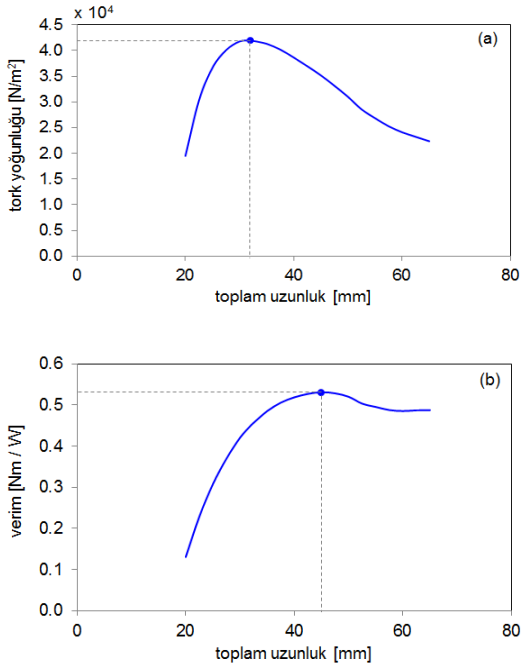
Karşılaştırma ölçütleri olan tork yoğunluğu ve verim frenleme torkuyla doğru orantılı olduklarından, takip eden analizlerde kanal kalınlığı 0,25 mm'ye sabitlenmiştir.

Kampana-tipi frenin analizinde toplam yarıçap ve toplam uzunluk Tablo 2'de verilen aralıklarda değiştirilerek tork yoğunluğu (Şekil 5a) ve verim (Şekil 5b) toplam 247 durum için hesaplanmıştır. Sonuçlar her iki kriterin de toplam yarıçapla birlikte arttığını göstermektedir, toplam uzunluğun etkisi ise daha karmaşık yapıdadır.



Şekil 5. *Kampana-tipi frenin analiz zonuçları: a) tork yoğunluğu b) verim (Analysis results of drum-type brakes: a) torque density b) efficiency)*

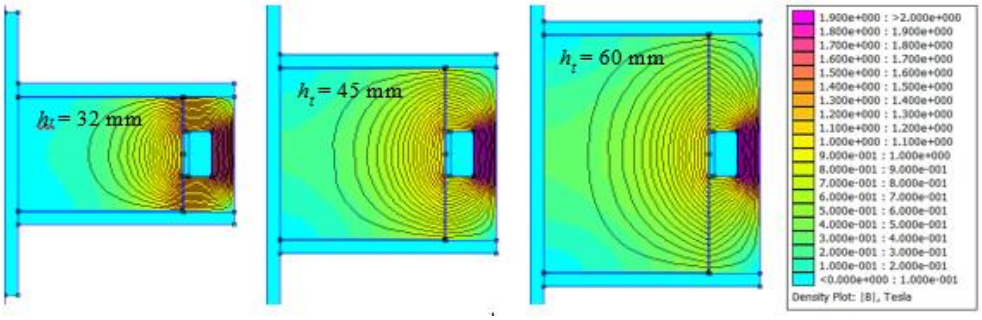
Toplam uzunluğun etkisini incelemek için, toplam yarıçap Tablo 2'de belirtilen aralığın maksimum değeri olan 50 mm'ye sabitlenerek, Şekil 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Toplam uzunluğun küçük değerlerinde, tork yoğunluğu ve verim uzunlukla doğru orantılı olarak sert artış göstermektedir. Tork yoğunluğunun maksimum değerine 32 mm, verimin maksimum değerine ise 45 mm toplam uzunlukta ulaşılmıştır.



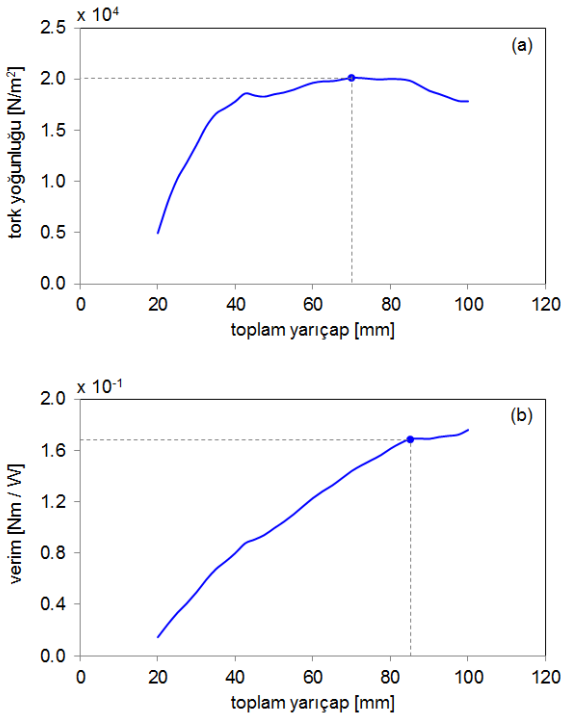
Şekil 6. *Kampana-tipi frenin analiz sonuçları (r_t = 50 mm): a) tork yoğunluğu b) verim (Analysis results of drum-type brakes (r_t = 50 mm): a) torque density b) efficiency)*

Şekil 7, karşılaştırma ölçütlerinin maksimum olduğu noktalardaki ve her iki ölçütün de düşük değerde olduğu 60 mm toplam uzunluktaki manyetik simülasyon sonuçlarını göstermektedir. 32 mm uzunlukta manyetik akı MRS üzerinde dar bir kesitten akmaya zorlanmaktadır. Buna bağlı olarak yüksek tork yoğunluğu elde edilebilmektedir. Ancak manyetik devrenin 1,6 T civarında doyuma ulaşmaktadır. Maksimum verim noktasında (45 mm) gövdeden 2 T mertebesinde bir akı geçtiği ve akının kanal boyunca düzenli bir şekilde dağıldığı gözlenmektedir. 60 mm uzunlukta ise akı, maksimum verim noktasındakine benzer olmasına rağmen, MRS kanalının alt ve üst kısımlarında etkili olamamaktadır.

Disk-tipi frenin analizinde toplam kalınlık 16 mm'ye, MRS kanalı kalınlığı da 0,25 mm'ye sabitlenmiştir. Toplam uzunluk Tablo 2'de verilen aralıklarda değiştirilerek tork yoğunluğu (Şekil 8a) ve verim (Şekil 8b) toplam 33 durum için hesaplanmıştır. Tork yoğunluğunun 70 mm toplam yarıçapta maksimum değere ulaştığı ortaya çıksa da 60 mm ile 85 mm arası maksimum tork yoğunluğu bandı olarak değerlendirilebilir. Diğer yanda, verimin maksimum noktası olan 85 mm toplam yarıçapa kadar düzenli arttığı, sonrasında sabit kaldığı görülmektedir.



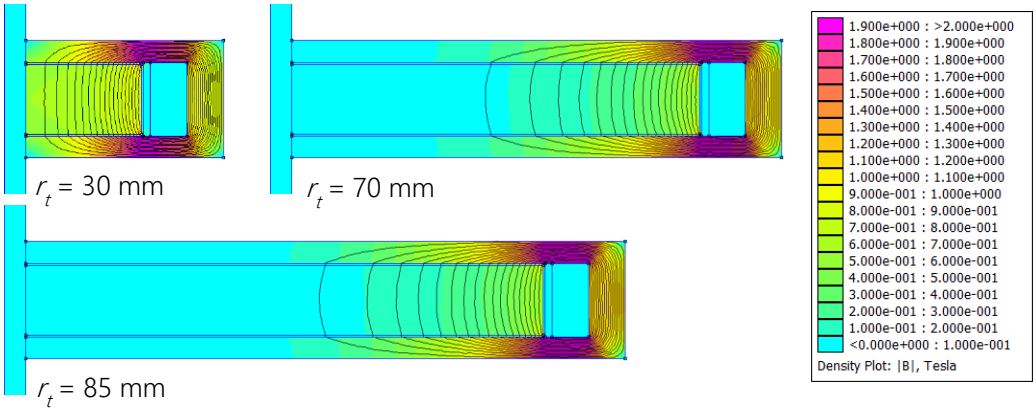
Şekil 7. *Farklı uzunluklardaki kampana-tipi frenlerin simülasyon sonuçları (r_t = 50 mm) (Simulation results of drum-type brakes with various lengths (r_t = 50 mm))*



Şekil 8. *Disk-tipi frenin analiz sonuçları (h_t = 16 mm): a) tork yoğunluğu b) verim (Analysis results of disc-type brakes (h_t = 16 mm): a) torque density b) efficiency)*

Disk-tipi frende ölçütlerin maksimum olduğu noktalardaki simülasyon sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Anlatıma yardımcı olması açısından toplam yarıçapın 30 mm olduğu durumdaki sonuç da gösterilmiştir. Burada, MRS üzerindeki manyetik alan daha yoğun olmasına rağmen, elde edilen tork küçüktür. Bunun başlıca nedeni frenleme torkunun yarıçapın küpüyle doğru orantılı olmasıdır. 70 mm ve 85 mm toplam yarıçaplarda ise manyetik akı profilleri birbirinin aynısıdır ve sadece diskin dış kısmında etkili olmaktadır. Çap büyüdükçe manyetik etki merkezden uzaklaşmakta, dolayısıyla tork hacimle birlikte artmaktadır.

Analiz sonuçları verim yönünden incelendiğinde çap artışının elektriksel güç girdisine etkisi göze çarpmaktadır. Bobinin sarım sayısı sabit tutulup, sarım çapı büyüdüğünde elektriksel direnci artar. Bobine sağlanan akım sabit olduğu için elektriksel güç girdisi sarım çapıyla doğru orantılı olarak büyümektedir. Maksimum verim noktasından sonra güç girdisi ve frenleme torku aynı oranda artmaktadır.



Şekil 9. *Farklı yarıçaplardaki disk-tipi frenlerin simülasyon sonuçları (h_t = 16 mm) (Simulation results of disc-type brakes with various radii (h_t = 16 mm))*

Tablo 3. *Analiz sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of analysis results)*

		Maksimum ρ		**Maksimum e**	
		Kampana	**Disk**	**Kampana**	**Disk**
r_t	[mm]	50	70	50	85
h_t	[mm]	32	16	45	16
V	[cm^3]	251	246	353	363
m	[kg]	1,957	1,903	2,754	2,806
T	[N.m]	10,542	4,956	12,429	7,207
P	[W]	23,4	34,4	23,4	42,7
ρ	[N/m^2]	41947	20122	35168	19844
e	[N.m/W]	0,45	0,144	0,53	0,168

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; basit yapıdaki kampana-tipi ve disk-tipi frenler aynı malzemeler kullanılarak parametrik tasarlanmış, tork yoğunluğu ve verim ölçütlerine göre sayısal yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Tasarımların toplam yarıçapı, toplam uzunluğu ve MRS kanalı kalınlığı, toplam hacim 500 cm^3 sınırını geçmeyecek şekilde, sabit adımlarla değiştirilmiştir. Kampana-tipi fren için 988, disk-tipi fren için 132 farklı tasarım incelenmiş ve belirlenen ölçütlerde maksimum değere ulaşan tasarımların karşılaştırması Tablo 3'de verilmiştir. Buna göre:

- Aynı ölçütte maksimum değere ulaşan tasarımların hacimleri ve kütleleri birbirine çok yakındır.
- Tork yoğunluğu ölçütüne göre, kampana-tipi frenin performansı disk-tipi frene göre yaklaşık iki kat daha iyidir.
- Maksimum verim noktalarında iki tasarım arasındaki fark az da olsa kapanmaktadır.
- Maksimum verim noktasında hesaplanan frenleme torkunun, maksimum tork yoğunluğu noktasına göre, kampana-tipi frende %20, disk-tipi frende ise %40 fazla olduğu görülmektedir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

Sembol	Birim	Açıklama
B	T	manyetik akı
e	N.m/W	verim
H	A/m	manyetik alan şiddeti
h_b	mm	bobin uzunluğu
h_k	mm	kapak uzunluğu
h_r	mm	rotor uzunluğu
h_t	mm	toplam uzunluk
I	A	akım
m	kg	kütle
N	tur	sarım sayısı
P	W	elektriksel güç
R	Ω	elektriksel direnç
r_m	mm	rotor mili yarıçapı
r_r	mm	rotor yarıçapı
r_t	mm	toplam yarıçap
t	mm	MRS kanalı kalınlığı
t_b	mm	bobin kalınlığı
t_d	mm	bobin duvarı kalınlığı
T_d	N.m	disk-tipi fren torku
t_g	mm	gövde duvarı kalınlığı
T_k	N.m	kampana-tipi fren torku
V	cm^3	toplam hacim
η	Pa.s	dinamik viskozite
ρ	N/m^2	tork yoğunluğu
τ	Pa	kayma gerilmesi
$\tau_a(H)$	Pa	akma gerilmesi
ω	1/s	açısal hız

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Rabinow, J., "The magnetic fluid clutch", **AIEE Transactions**, Cilt 67, 1308–1315, 1948.

[2] Carlson, J.D., Jolly, M.R., "MR fluid, foam and elastomer devices", **Mechatronics**, Cilt 10, 555–569, 2000.

[3] Kavlicoglu, B.M., Gordaninejad, F., Wang, X., "Study of a magnetorheological grease clutch", **Smart Materials and Structures**, Cilt 22, No 12, 2013.

[4] Dai, S., Du, C., Yu, G., "Design, testing and analysis of a novel composite magnetorheological fluid clutch", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Cilt 24, No 14, 1675–1682, 2013.

[5] Huang, J., Zhang, J., Yang, Y., Wei, Y., "Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 129, No 1-3, 559–562, 2002.

[6] Liu, B., Li, W.H., Kosasih, P.B., Zhang, X.Z., "Development of an MR-brake-based haptic device", **Smart Materials and Structures**, Cilt 15, No 6, 1960–1966, 2006.

[7] Shiao, Y., Nguyen, Q.-A., "Development of a multi-pole magnetorheological brake", **Smart Materials and Structures**, Cilt 22, No 6, 2013.

[8] Naito, H., Akazawa, Y., Tagaya, K., Matsumoto, T., Tanaka, M., "An Ankle-Foot Orthosis with a Variable-Resistance Ankle Joint Using a Magnetorheological-Fluid Rotary Damper", **Journal of Biomechanical Science and Engineering**, Cilt 4, No 2, 182–191, 2009.

[9] Giorgetti, A, Baldanzini, N., Biasiotto, M., Citti, P., "Design and testing of a MRF rotational damper for vehicle applications", **Smart Materials and Structures**, Cilt 19, No 6, 2010.

[10] Li, W.H., Du, H., "Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 21, No 7, 508–515, 2003.

[11] LORD Corp., "MRF-132DG Veri föyü", **http://www.lordmrstore.com/**, 2011. (son ziyaret tarihi 19 Mayıs 2016).

[12] Choi, Y.T., Cho, J.U., Choi, S.B., Wereley, N.M., "Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers", **Smart Materials and Structures**, Cilt 14, No 5, 1025–1036, 2005.

[13] Meeker, D., "Finite Element Method Magnetics (FEMM) - Version 4.2 User's Manual", **http://www.femm.info/**, 2015. (son ziyaret tarihi 19 Mayıs 2016).