



# **Kuvvet-Geri-Beslemeli Haptik Cihazlar için Döner Manyetoreolojik Sönümleyici Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 3001**

**Proje No: 115M019**

**Proje Yürütücüsü:  
Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU**

Araştırmacı:  
Doç. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN

Bursiyerler:  
Okan TOPÇU (01.05.2015 - 31.08.2015)  
Ahmet AKSEL (01.09.2015 - 30.04.2016)  
Dariush MOHAMMADZADEH (01.09.2015 - 30.04.2016)

HAZİRAN 2016  
ANKARA

## ÖNSÖZ

Kuvvet-Geri-Beslemeli Haptik Cihazlar için Döner Manyetoreolojik Sönümleyici Geliştirilmesi isimli bu proje TÜBİTAK tarafından 3001 programı kapsamında 115M019 proje numarası ile desteklenmiştir.

Projede manyetoreolojik sıvının ince cidarlı, esnek bir haznenin içinde kapalı-çevrim taşıdığı özgün bir döner manyetoreolojik sönümleyici geliştirilmiştir. Öncelikle cihazın elektromanyetik tasarımı ve buna bağlı olarak boyutlandırması bir sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Sonrasında, tasarım detaylandırılıp prototip üretilmiş ve bir test düzeneği kurularak deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda cihazın üretebildiği maksimum ve minimum tork değerleri ile tepki süresi belirlenmiştir, elde edilen bulgular literatürde haptik uygulamalarda kullanılan benzer boyuttaki örneklerle karşılaştırılmıştır.

12 ay süren proje kapsamında, geliştirilen özgün sönümleyiciyi konu alan, bir patent başvurusu yapılmış, bir adet de dergi makalesi incelenmek üzere gönderilmiştir.

## İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Manyetoreolojik Sıvılar ve Cihazlar	3
2.2. Döner Manyetoreolojik Sönümleyiciler	5
2.3. Haptik Uygulamalarda Manyetoreolojik Cihazlar	7
3. YÖNTEM	10
3.1. Manyetik Devre Modellemesi ve Tasarımı	11
3.1.1. Sarım Sayısı	11
3.1.2. Bobin Teli Çapı	12
3.1.3. Manyetik Gövde	13
3.1.4. MRS Haznesi	14
3.1.5. MRS Tipi	15
3.2. Prototip Tasarımı ve Üretimi	16
3.3. Deney Düzeneği Tasarımı	18
3.4. Deneyler	19
3.4.1. Tork-Hız İlişkisinin Belirlenmesi	19
3.4.2. Tork-Akım İlişkisinin Belirlenmesi	19
3.4.3. Tepki Süresinin Belirlenmesi	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	20
4.1. Manyetik Devre	20
4.1.1. Bobin Teli	20
4.1.2. Manyetik Gövde	21
4.1.3. MRS Haznesi	22
4.1.4. MRS	23
4.2. Deney Sonuçları	23
4.2.1. Tork-Hız İlişkisi	24
4.2.2. Tork-Akım İlişkisi	24
4.2.3. Tepki Süresi	26
5. SONUÇLAR	27
KAYNAKLAR	31

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Farklı tipteki MR cihazların karşılaştırması (Li vd. 2014b'den tercüme edilmiştir)	6
Tablo 2. MR cihaz tasarımları için değerlendirme kriterleri (Rossa vd. 2014'ten uyarlanmıştır)	6
Tablo 3. Haptik uygulamalarda kullanılan MR cihazlar için karşılaştırma tablosu	8
Tablo 4. Maxon EC-max elektrik motorları ile aynı boyutlardaki MR cihazların tork karşılaştırması	8
Tablo 5. Boyutsal tasarım parametreleri	10
Tablo 6. Simülasyon veri seti: Farklı bobin teli çapları, $t_b$ , $h_b$ =sabit	13
Tablo 7. Simülasyon veri seti: Farklı bobin teli çapları, $N$ =sabit	13
Tablo 8. Simülasyon veri seti: $t_g = 1,2,\dots,5$ mm	14
Tablo 9. Simülasyon veri seti: Farklı manyetik gövde malzemeleri	14
Tablo 10. Simülasyon veri seti: Farklı MRS haznesi duvarı kalınlıkları	15
Tablo 11. Simülasyon veri seti: Farklı manyetoreolojik sıvılar	15
Tablo 12. Prototip parametreleri	16
Tablo 13. Prototip malzemeleri	17
Tablo 14. Deney düzeneği bileşenleri	18
Tablo 15. Karşılaştırma tablosu	23

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. a) Geomagic Touch X haptik arayüz [Kaynak: <a href="http://www.geomagic.com">http://www.geomagic.com</a> ]	
b) Force Dimension Omega 7 haptik arayüz [Kaynak: <a href="http://www.dlr.de">http://www.dlr.de</a> ]	1
Şekil 2. Peristaltik döner MR sönümleyici konsepti: a) dönme eksenine paralel kesit,	
b) dönme eksenine dik kesit	2
Şekil 3. Manyetik alan uygulanmadığında (a) ve uygulandığında (b) MRS.	
(Kciuk ve Turczyn, 2006'dan uyarlanmıştır)	3
Şekil 4. MR cihazların çalışma modları: a) kayma modu, b) akış modu,	
c) sıkıştırma modu	4
Şekil 5. MR sönümleyici/fren tipleri: a) silindir (kampana) tipi, b) disk tipi,	
c) çoklu-disk tipi	5
Şekil 6. Peristaltik MR sönümleyicinin kesit görüntüleri ve tasarım parametreleri	10
Şekil 7. LORD firmasına ait ticari MRS'lerin $B-H$ ve $H$ - $\tau$ eğrileri	
(Lord Corp. 2016b'den uyarlanmıştır)	11
Şekil 8. Peristaltik MR sönümleyici prototipi	16
Şekil 9. MRS haznesi ve döküm kalıbı	17
Şekil 10. Deney düzeneği	18
Şekil 11. FEMM yazılımında manyetik devre simülasyonu örneği	20
Şekil 12. Bobin teli çapının etkileri: a) $t_b$ , $h_b = \text{sabit}$ , b) $N = \text{sabit}$	20
Şekil 13. Manyetik gövde parametrelerinin etkileri: a) farklı gövde duvarı kalınlıkları,	
b) farklı gövde malzemeleri	21
Şekil 14. MRS haznesi duvar kalınlığının MRS'de oluşan akma gerilmesine etkisi:	
a) 0.2 A, b) 1 A, c) 2 A	22
Şekil 15. Farklı MRS'ler için akıma karşı akma gerilmesi eğrileri	23
Şekil 16. MRF-132DG kullanılan sönümleyicide açısız hıza karşı pasif-durum torku	24
Şekil 17. Artan ve azalan akım durumlarında manyetik tork ve histeresiz eğrileri:	
a) MRF-122EG, b) MRF-132DG, c) MRF-140CG	25
Şekil 18. Prototip sönümleyicinin basamak cevapları: a) MRF-132DG 0 A'dan 0.2 A'ya,	
b) MRF-132DG 0.2 A'dan 0 A'ya, c) MRF-132DG 1.0 A'dan 1.2 A'ya,	
d) MRF-132DG 1.2 A'dan 1.0 A'ya, e) MRF-140CG 0 A'dan 0.2 A'ya,	
f) MRF-140CG 0.2 A'dan 0 A'ya, g) MRF-122EG 0 A'dan 0.2 A'ya,	
h) MRF-122EG 0.2 A'dan 0 A'ya	26

## ÖZET

Haptik arayüzlerde şeffaflığı azaltmadan empedans genişliğini arttırmak için akademik literatürde en çok başvurulan yöntem, elektrik motorlarının sönümleyici ve fren gibi pasif cihazlarla birlikte kullanımudur. Bu cihazların motorlara sadece büyük empedanslar gerçekleşirken destek olmaları, küçük empedanslarda ise olabildiğince şeffaf olmaları gerekmektedir. Bu amaç için tasarlanacak bir cihazın yüksek tork üretmesi, hafif ve küçük boyutlu olması, elektronik olarak kontrol edilebilmesi ve hızlı tepki vermesi gerektiğinden araştırmacılar, birkaç istisna dışında, manyetoreolojik (MR) cihazlara yönelmiştir. MR cihazlar; viskoziteleri manyetik alan uygulandığında hızlıca artan (örn.  $<10$  ms), alan kaldırıldığında ise yine hızlı bir şekilde eski haline dönen manyetoreolojik sıvılar (MRS) sayesinde çalışır. Manyetik alan cihaza entegre edilmiş elektromıknatıslar yardımıyla oluşturulabileceğinden, MR cihazların davranışı elektronik olarak kontrol edilebilir.

Haptik uygulamalarda kullanılan MR cihazlar, bu teknolojiyi daha uzun süredir kullanan, otomotiv ve makina sektörlerindeki uygulamalar için geliştirilmiş tasarımların küçültülmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu tasarımlarda MRS, cihazın gövdesi ile rotoru arasına doldurulmaktadır. Sıvı kaybı cihazın davranışını değiştireceğinden sızdırmazlığın sağlanması şarttır ve bunun için keçeler (O-ring) kullanılır. Keçelerden kaynaklanan sürtünme kuvvetleri, büyük ölçekli cihazların kullanıldığı uygulamalarda (örn. otomotiv) önemsiz sayılabilir de, haptik uygulamalarında şeffaflığı olumsuz etkilemektedir.

Bu projede, MRS'nin ince cidarlı, esnek bir haznenin içinde kapalı-çevrim taşıdığı özgün bir döner MR sönümleyici geliştirilmiştir. Sağlık sektöründe sıklıkla kullanılan peristaltik pompa mantığına benzer şekilde çalışan sönümleyicide MRS kapalı haznenin içinde kalıp hareketli parçalara doğrudan temas etmemektedir. Bu sayede sızdırmazlık keçe olmadan sağlanarak sürtünme azaltılmıştır.

Öncelikle cihazın elektromanyetik tasarımı ve buna bağlı olarak boyutlandırması bir sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Sonrasında, tasarım detaylandırılıp prototip üretilmiş ve bir test düzeneği kurularak deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda cihazın üretebildiği maksimum ve minimum tork değerleri ile tepki süresi belirlenmiştir, elde edilen bulgular literatürde haptik uygulamalarda kullanılan benzer boyuttaki örneklerle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** haptik, kuvvet geri besleme, manyetoreolojik sönümleyici, peristaltik pompa

## ABSTRACT

The most commonly used method for increasing impedance width of haptic interfaces, without affecting transparency, is to employ passive devices such as brakes and dampers alongside electric motors. The passive devices support the electric motors only when the simulated impedance is large, and for small impedances they must be as transparent as possible. The design requirements for these devices are high torque capacity, light weight, small size, fast response time and controllability. Due to these requirements, most of the researchers in this area concentrate on magnetorheological (MR) devices. MR devices make use of magnetorheological fluids (MRF), the apparent viscosity of which rapidly (e.g. <10 ms) increase under magnetic field and reverts back to normal when the field is removed. Since the magnetic field can be generated by electromagnets integrated to the device itself, the behavior of the MR devices can be electronically controlled.

MR devices used in haptic applications are the miniaturized versions of the designs developed originally for industrial and automotive applications which have already been using this technology. The common feature of these designs is that the MRF is between the stator and the rotor of the device. Since fluid leakage results in a change in the behavior of a device, proper sealing is a necessity and, traditionally, O-rings are used for this purpose. Friction forces due to the O-rings can be neglected for the large scaled designs; however, they have negative effect on transparency in haptic applications.

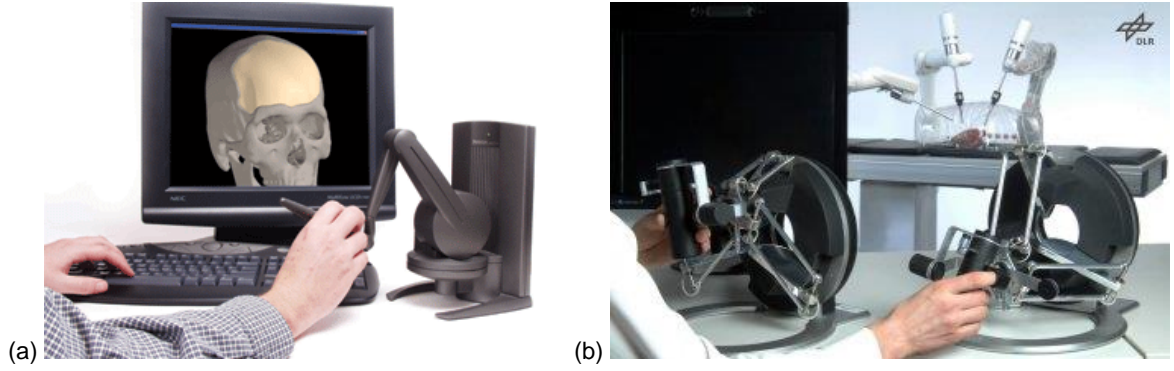
This project presents a novel rotary MR damper. The working principle of the proposed design is similar to that of peristaltic pumps such that the MRF is contained in a flexible closed chamber to avoid direct contact with the moving parts. This way, the damper does not require O-ring seals, hence the friction is reduced.

In this context, firstly, the electromagnetic design and accordingly the sizing of the device is performed by using a finite element analysis software. Then, a prototype is manufactured and experimentally evaluated in a test setup, which is built within the scope of the project. The maximum and minimum torque values and also the response time of the damper are determined and compared against similar sized MR devices, used in haptic applications in literature.

**Keywords:** haptics, force-feedback, magnetorheological damper, peristaltic pump

## 1. GİRİŞ

Haptik teknolojisi, dokunma hissinin yapay olarak gerçekleştirilmesidir. Uzaktan kumandallı robotlar (teleoperasyon) ve simülasyonlar haptik teknolojilerden büyük ölçüde faydalanmaktadır. Ameliyat robotları ve bomba imha robotları gibi teleoperasyon sistemlerinde, uzak bir ortamdaki cisimlerden dokunsal geri besleme alınabilmekte; araç simülasyonları ve sağlık sektöründeki simülasyonlar gibi sanal gerçeklik uygulamalarında ise sanal ortamdaki cisimlere dokunulmuş gibi hissedilmektedir.



Şekil 1. a) Geomagic Touch X haptik arayüz [Kaynak: <http://www.geomagic.com>] b) Force Dimension Omega 7 haptik arayüz [Kaynak: <http://www.dlr.de>]

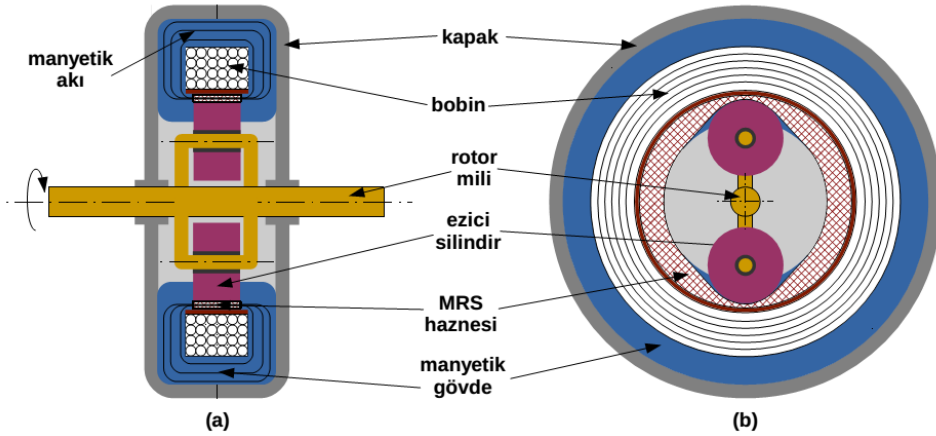
Bir haptik sistemin kullanıcı ile etkileşimi “haptik arayüz” adı verilen bir cihaz yardımıyla olur. Arayüzü hareket ettiren kullanıcıya konuma bağlı olarak kuvvet tepkisi uygulanır. Ticari haptik arayüzlerden örnekler Şekil 1’de verilmiştir. Bir haptik arayüz için en belirleyici kriterler şeffaflık (transparency) ve empedans genişliğidir (Z-width). Şeffaflık bir haptik arayüzün sanal (veya uzaktaki) ortamın empedansını kullanıcıya aynen yansıtabilmesidir. Empedans genişliği ise arayüzün kararlı olarak gerçekleyebileceği mekanik empedansların sınırlarını gösterir. Örneğin; sanal gerçeklik uygulamasında kullanılan ideal bir arayüz, sanal ortamda boşlukta hareket edilirken hiç tepki kuvveti uygulamamalı, rijit bir sanal duvarla karşılaşıldığında ise duvar yönünde harekete izin vermemelidir.

Haptik arayüzlerde kuvvet tepkileri genellikle sadece doğru akım motorları tarafından üretilir. Küçük boyutlu ve güç/ağırlık oranı yüksek motorlar tercih edilmektedir. Hassas mekanik tasarımlar ve gelişmiş kontrol sistemleri sayesinde çok küçük (sıfıra yakın) empedansları gerçekleyebilen, şeffaflığı yüksek sistemler üretilebilmektedir. Diğer taraftan, empedans genişliği açısından bakıldığında, şeffaflık adına kullanılan küçük elektrik motorları rijitliği yüksek cisimlerle etkileşimin gerçekleşmesinde yetersiz kalmakta ve bu cisimlerle ilk karşılaşma anındaki süreksizlik istenmeyen titreşimlere neden olabilmektedir.



Haptik arayüzlerde şeffaflığı azaltmadan empedans genişliğini arttırmak için akademik literatürde en çok başvurulan yöntem, elektrik motorlarının sönümleyici ve fren gibi pasif cihazlarla birlikte kullanımınıdır. Bu cihazların motorlara sadece büyük empedanslar gerçekleşirken destek olmaları, küçük empedanslarda ise olabildiğince şeffaf olmaları gerekmektedir. Bu amaç için tasarlanacak bir cihazın yüksek tork üretmesi, hafif ve küçük boyutlu olması, elektronik olarak kontrol edilebilmesi ve hızlı tepki vermesi gerektiğinden araştırmacılar, birkaç istisna dışında, manyetoreolojik (MR) cihazlara yönelmiştir. MR cihazlar; viskoziteleri manyetik alan uygulandığında hızlıca artan (örn.  $<10$  ms), alan kaldırıldığında ise yine hızlı bir şekilde eski haline dönen manyetoreolojik sıvılar (MRS) sayesinde çalışır. Manyetik alan cihaza entegre edilmiş elektromıknatıslar yardımıyla oluşturulabileceğinden, MR cihazların davranışı elektronik olarak kontrol edilebilir.

Bu projede, MRS'nin ince cidarlı, esnek bir haznenin içinde kapalı-çevrim taşıdığı yeni bir döner MR sönümleyici geliştirilmiştir. Medikal sektörde sıklıkla kullanılan peristaltik pompa mantığına benzer şekilde çalışan sönümleyicide MRS kapalı haznenin içinde kalıp hareketli parçalara doğrudan temas etmemektedir. Bu sayede sızdırmazlık keçe olmadan sağlanarak sürtünme azaltılmıştır. Diğer taraftan geliştirilen sönümleyici zamanla eskiyen MRS'nin hazne ile birlikte temiz ve kolay bir şekilde değiştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Geliştirilen sönümleyicinin konsept resimleri Şekil 2'de verilmiştir.



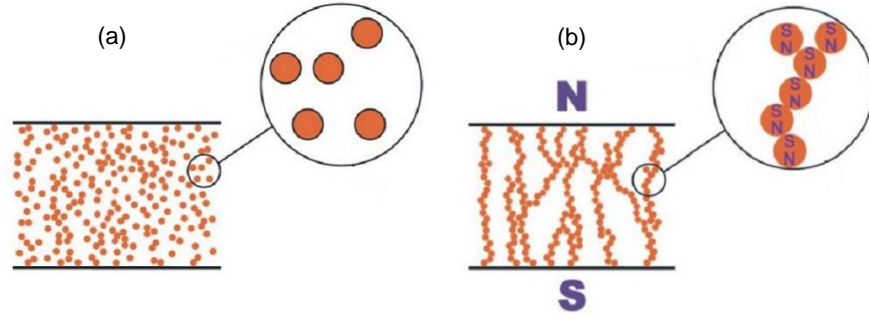
Şekil 2. Peristaltik döner MR sönümleyici konsepti: a) dönme eksenine paralel kesit, b) dönme eksenine dik kesit

Bölüm 2'de MR cihazların tasarımı ve haptik arayüzlerde kullanımı ile ilgili literatür özetlenmiştir. Projenin izlediği aşamalar Bölüm 3'te detaylandırılmış, bulgular Bölüm 4'te sunulmuş ve tartışılmıştır. Bölüm 5 projenin sonuçlarını ve çalışmanın devamı için önerileri içermektedir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1 Manyetoreolojik Sıvılar ve Cihazlar

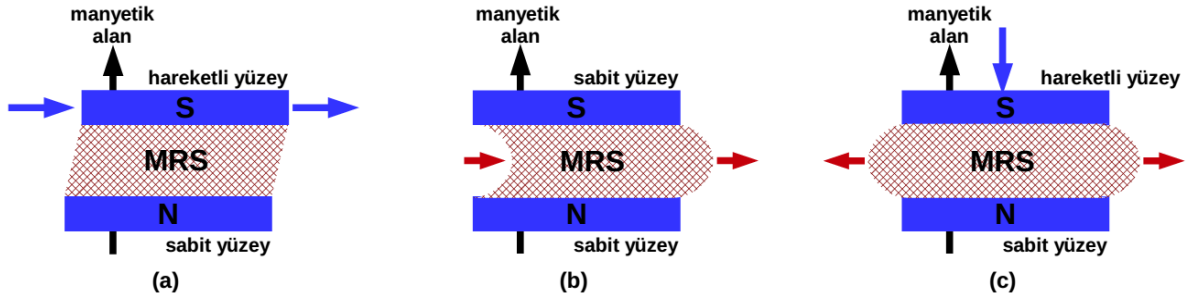
Manyetoreolojik sıvılar mikronize büyüklükteki (örn. 1 ~ 10  $\mu\text{m}$ ) ferromanyetik parçacıkların mineral yağ veya sentetik yağ gibi bir taşıyıcı sıvı içerisinde süspansiyon halinde bulunduğu aktif malzemelerdir. MRS ilk olarak 1948 yılında Rabinow (1948) tarafından kullanılmıştır. Manyetik alan yokluğunda MRS'ler sıvı gibi davranır ve içlerindeki taşıyıcı sıvınıninkine 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 (Carlson ve Jolly, 2000) (bkz. Şekil 3). Bu davranış manyetik alan şiddetiyle doğru orantılı, sürekli ve tersinir yapıdadır, yani manyetik alan kaldırıldığında MRS sıvı haline geri döner.



Şekil 3. Manyetik alan uygulanmadığında (a) ve uygulandığında (b) MRS. (Kciuk ve Turczyn, 2006'dan uyarlanmıştır)

MR cihazların tasarımı başta otomotiv (Karakoç vd., 2008; Giorgetti vd., 2010; Nguyen ve Choi, 2012a) olmak üzere inşaat (Dyke vd., 1996; Yang vd., 2002), sağlık (Naito vd., 2009; Gudmundsson vd., 2010; Avraam vd., 2010) ve robotik (Yadmellay ve Kermani 2013; Li vd., 2014a) alanlarında, özellikle son yıllarda, hız kazanmıştır. MR cihazlardan en yaygını piston-silindir tipi doğrusal sönümleyicidir (Wang ve Liao, 2011). Temelde standart bir piston sönümleyici ile aynı şekilde çalışan bu cihazda yağ yerine MRS bulunur ve akış ağzı pistonu yerleştirilmiş bir elektromıknatis yardımıyla kontrol edilir. Bu tipteki cihazlar Lord Corp. (2016a) tarafından başlı başına bir ürün olarak ticarileştirilmiştir ve savunma sanayine yönelik otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır. Döner tip MR cihazlar ise kavrama (Rabinow, 1948; Kavlicoglu vd., 2013; Dai vd., 2013), valf (Yoo ve Wereley, 2002; Grunwald ve Olabi, 2008), fren (Huang vd., 2002; Liu vd., 2006; Shiao ve Nguyen, 2013) ve sönümleyici (Naito vd., 2009; Giorgetti vd., 2010) olarak sınıflandırılmıştır. Tasarımları aynı

olan frenler ve sönümleyiciler arasındaki tek fark, frenlerin aç-kapa, sönümleyicilerin ise kademeli çalıştırılmasıdır (Imaduddin vd., 2013).



Şekil 4. MR cihazların çalışma modları: a) kayma modu, b) akış modu, c) sıkıştırma modu

MR cihazların üç temel çalışma modu vardır. Bunlar kayma, akış (veya vana) ve sıkıştırma modlarıdır (Carlson ve Jolly, 2000). Bir MR cihaz bu modların biri veya birkaçında çalışabilir. Şekil 4a'da gösterilen kayma modu MRS'nin biri sabit, diğeri hareketli iki paralel yüzey arasında manyetik alana maruz kaldığı moddur; genellikle döner fren ve kavramalarda görülür. Akış modunda MRS, hareketsiz, paralel yüzeyler arasında manyetik alan etkisinde akar (Şekil 4b). Bu mod doğrusal piston-silindir tipi sönümleyicilerde ve vana tasarımlarına kullanılır. Kullanımı diğeri iki mod kadar yaygın olmayan sıkıştırma modunda manyetik alan etkisindeki MRS sıkıştırılır (Şekil 4c). Hareket genliği küçük olduğundan, bu mod genellikle titreşim sönümlenme uygulamalarında kullanılmaktadır (Imaduddin vd., 2013).

MR cihazların modellenmesinde genellikle iki temel model kullanılır (Rossa vd., 2014; Imaduddin vd., 2013). En sık kullanılan Bingham plastik modeli MRS'nin reolojik davranışını akma-öncesinde rijit, akma-sonrasında ise Newtonyen olarak tarif eder (Choi vd., 2005). Bu model (1)'de gerilim-gerinim bağıntısı şeklinde ifade edilmiştir (Wang ve Liao, 2011):

$$\tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

burada  $\tau$  sıvının kayma gerilmesi,  $\tau_y(H)$  akma gerilmesi,  $H$  manyetik alan kuvveti,  $\eta$  MRS'nin manyetik alan uygulanmadığındaki viskozitesi ve  $\dot{\gamma}$  kayma gerinimi hızıdır.

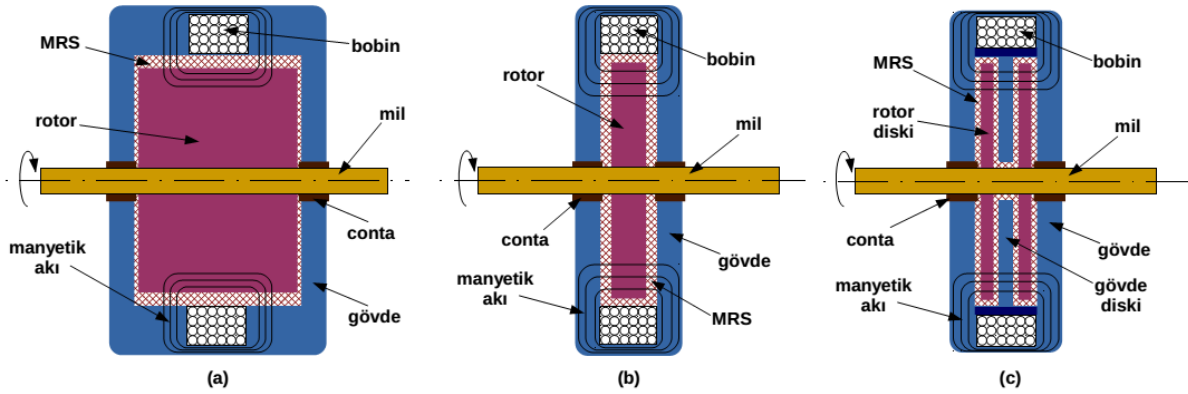
$$\tau = \left( \tau_y(H) + K |\dot{\gamma}|^{1/m} \right) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

Denklem (2)'de verilen Herschel-Bulkley modeli (Wang ve Liao, 2011), MRS'lerde yüksek kayma hızlarında ortaya çıkan kesme-incelmesi (shear-thinning) ve kesme-kalınlaşması (shear-thickening) davranışlarını da modelleyen, doğrusal olmayan bir modeldir. Bingham

plastik modeline benzer yapıda olan bu modelde tutarlılık parametresi ( $K$ ) ve akış davranışı indisi ( $m$ ) olarak anılan iki ilave parametre bulunmaktadır. Tutarlılık parametresi, Bingham plastik modelindeki  $\eta$ 'ye benzer, akış davranışı indisi ise kesme-incelmesi ve kesme-kalınlaşması etkilerini temsil eder. Bingham plastik modelinden daha doğru sonuçlar vermesine rağmen, daha fazla parametre gerektirmesi ve bu parametrelerin elde edileceği deneysel verilerin azlığı Herschel-Bulkley modelinin kullanımını kısıtlamaktadır (Farjoud ve Vahdati, 2007). Ayrıca, bu projenin hedefi olan haptik arayüzler görece düşük hızlarda çalıştığından bu model avantaj sağlamayacaktır.

## 2.2 Döner Manyetoreolojik Sönümleyiciler

Döner MR frenler ve sönümleyiciler ile ilgili akademik literatürde birçok yayın bulunmaktadır. Aynı tipteki bir frenle bir sönümleyici bire bir aynı tasarıma sahip olmalarına rağmen yayınlarda kullanım amacına göre isimlendirilmiştir. Bu nedenle literatür özetinin devamında fren ve sönümleyici terimleri ilgili yayınlarda geçtiği şekliyle birbirleri yerine kullanılacaktır.



Şekil 5. MR sönümleyici/fren tipleri: a) silindir (kampana) tipi, b) disk tipi, c) çoklu-disk tipi

Döner MR frenlerle ilgili ilk çalışmalardan biri Huang vd. (2002) tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada, Şekil 5a'da gösterilene benzer, silindir tipi bir tasarım anlatılmaktadır. Silindir tipi tasarımlarda MRS'deki kayma modu rotorla gövde arasındaki radyal boşlukta meydana gelir. Performansı etkileyen başlıca parametreler radyal boşluğun kalınlığı, etkin alanın büyüklüğü ve manyetik alan şiddetidir. Radyal boşluk incelidikçe, ferromanyetik parçacıkların manyetik alan etkisiyle oluşturdukları zincirler kısalır ve dayanımları artar. MRS'nin kayma modundaki dayanımı zincirlerin dayanımlarının toplamı olduğu için cihazın uygulayabileceği maksimum kuvvet de artacaktır. Diğer taraftan, ince radyal boşluk cihazın manyetik alan kapalıykenki tepkisini de arttıracığından, cihazın çalışma aralığı daralır (Imaduddin vd., 2013). Bu durum haptik uygulamalardaki şeffaflık gereksinimi nedeniyle özellikle istenmemektedir. Rotorun

radyal yüzeyini genişletmek etkin alanı büyütürken maksimum kuvveti artırır, ancak bu değişiklik rotorun atalet momentinin artmasına ve cihaz boyutunun büyümesine neden olur (Huang vd., 2002). Son olarak, Şekil 5a'daki kesit görünüm incelendiğinde, manyetik akı MRS'yi iki bölgede kesmektedir. Radyal yüzeyin daha büyük bir kısmını manyetik alanın etkisine alarak kuvveti arttırmak için birden fazla bobin kullanarak (Kikuchi ve Kobayashi, 2011) veya manyetik ve manyetik olmayan malzeme kombinasyonları ile akıyı dolaşmaya zorlayarak (Senkal ve Gurocak, 2010) çözümler üretilmiştir. Manyetik devre optimizasyonu sayesinde benzer boyuttaki MR cihazlara oranla iki kattan fazla kuvvet artışı sağlandığı belirtilmektedir.

Şekil 5b'de verilen disk tipi fren tasarımların ilki Li ve Du (2003) tarafından yayınlanmıştır. Bu tip cihazlarda MRS'deki kayma modu rotorla gövde arasındaki aksel boşluklarda meydana gelir. Boşluk kalınlığının etkisi silindir tipi cihazlardakine aynıdır. Öte yandan, disk tipi tasarımlarda rotor genişliğinin etkin alana etkisi yoktur. Etkin alan rotor çapı büyütülerek veya, Şekil 5c'deki gibi, çoklu-disk tasarımlarıyla artırılabilir (Park vd., 2006; Karakoc vd., 2008; Poznic vd., 2012). Çoklu-disk tasarımının bir diğer avantajı bobin yerleşimi için alternatif sunmasıdır. Bobinin gövde diskinin ortasına yerleştirildiği çalışmalarda (Zhou vd., 2007; Poznic vd., 2012) hem etkin alan iki kat daha artmış hem de cihazın dış çapı küçülmüştür.

Tablo 1. Farklı tipteki MR cihazların karşılaştırması (Li vd. 2014b'den tercüme edilmiştir)

	Silindir	Disk	Çoklu-disk
Kompaktlık	Sıradan	İyi	<b>Mükemmel</b>
Ağırlık	Sıradan	İyi	<b>Mükemmel</b>
Akım kapasitesi	<b>Mükemmel</b>	Sıradan	İyi
Sıfır-akım torku	<b>Mükemmel</b>	İyi	Sıradan
Çıkış atalet momenti	Sıradan	İyi	<b>Mükemmel</b>
Uzunluk/çap oranı	<b>Mükemmel</b>	Sıradan	İyi
Üretim kolaylığı	<b>Mükemmel</b>	İyi	Sıradan

Tablo 2. MR cihaz tasarımları için değerlendirme kriterleri (Rossa vd. 2014'ten uyarlanmıştır)

Tork yoğunluğu	$\rho = T_{max} / V_t$
Verim	$E = T_{max} / P_{max}$
Kontrol edilebilirlik	$K = T_{max} / (T_f / \omega)$
Reaktiflik	$\delta t = T_{max} / \delta t_c$

Li vd. (2014b) silindir tipi, disk tipi ve çoklu disk tipi cihazları COMSOL simülasyonları yoluyla karşılaştırmıştır. Üç tasarımın her biri 2 W elektriksel güç girişi karşılığında 20 Nm çıkış torku üretebilecek şekilde optimize edilmiş ve sonuçta Tablo 1'de verilen karşılaştırma sunulmuştur. Rossa vd. (2014) yaptıkları çalışmada farklı tipteki MR fren tasarımları,

elektromanyetik için sonlu-elemanlar yazılımı olan, FEMM ortamında simülasyon yoluyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için tanımlanan değerlendirme kriterleri Tablo 2'de verilmiştir. Burada;  $T_{max}$  üretilen maksimum torku,  $V_t$  cihazın toplam hacmini,  $P_{max}$  maksimum elektriksel güç girdisini,  $T_f$  viskoz torku,  $\omega$  açısal hızı, ve  $\delta t_c$  elektromanyetik devrenin zaman sabitini göstermektedir. Sonuç olarak, silindir ve disk tipi frenlerin tork yoğunluklarının eşdeğer olduğu, disk frenin daha verimli ancak silindir frenin daha reaktif olduğu belirtilmiştir. Disk sayısını arttırmanın verime ve kontrol edilebilirliğe etkisi olmadığı fakat tork yoğunluğunu ve reaktifliği arttırdığı da ifade edilmiştir.

Silindir ve disk tipi cihazların performansını arttırmaya yönelik çalışmalar son yıllarda doyuma ulaşmış ve temel amacı kayma modundan hem radyal hem de aksel boşluklarda faydalanmak olan hibrit tasarımlar çalışmaya başlanmıştır (Imaduddin vd., 2013). Bu çalışmalardan en özgünü, York vd. (1997) tarafından patentlenmesine rağmen son birkaç yılda araştırmacıların ilgisini çeken (Avraam vd., 2010; Nguyen ve Choi, 2012a, 2012b, 2012c) T-kesitli rotor tasarımıdır. Nguyen ve Choi (2012b) T-kesitli hibrit tasarımı benzer boyutlardaki disk tipi ve silindir tipi cihazlarla ANSYS simülasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Cihazın dış çapının 60 mm, uzunluk/çap oranının 1,5, maksimum tork/minimum tork oranının da 50 olduğu durumda T-kesitli cihazın silindiri tipi cihaza göre yaklaşık iki kat, disk tipi cihaza göre de yaklaşık 3 kat fazla maksimum tork üretebileceği belirtilmiştir. Farklı cihaz çaplarında ve uzunluk/çap oranlarında sonuçlar da verilmiş olmasına rağmen deneysel karşılaştırma yapılmamıştır. Diğer yandan, T-kesitli rotorun getireceği üretim zorlukları ve ek maliyete de dikkat çekilmiştir.

### 2.3 Haptik Uygulamalarda Manyetoreolojik Cihazlar

Bir MR cihazın haptik uygulamasında kullanıldığı, bilginiz dahilindeki, en eski yayın 2002 yılına aittir. An ve Kwon'un (2002, 2006a, 2006b) çalışmalarında, LORD frimasının o yıllarda ürettiği MRB-2107-3 model döner MR fren bir elektrik motoru ile birlikte kullanılmış; nominal torku 0,319 Nm olan motor, 1 A akımda 5,65 Nm tork uygulayabilen MR frene 10:1 çevrim oranı ile bağlanmıştır. Sanal duvar, sanal sıvı içinde hareket ve sanal Coulomb sürütünmesi simülasyonları sadece elektrik motoru kullanılan durum ile karşılaştırılmış, her iki karşılaştırmada da motor ve frenden oluşan hibrit konfigürasyonun çok daha kararlı olduğu sonucuna varılmıştır. An ve Kwon'un (2002) çalışmasında, ayrıca, iki Lego parçası birleştirilirken ve styrofoam bir test parçası sıkıştırılırken oluşan kuvvet-konum davranışı başka bir düzende ölçülmüş ve hibrit konfigürasyonla taklit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tatminkar olmasına karşın sadece grafiksel olarak sunulmuş, detaylı karşılaştırma verilmemiştir.

Beş-çubuk mekanizması formunda, iki-serbestlik-dereceli iki ayrı haptik arayüzün anlatıldığı Reed ve Book'un (2004) çalışmasında arayüzlerden birinin üç, diğerinin ise dört eklemine LORD MRB-2107-3 döner MR frenler bağlanmıştır. Bu çalışma MR cihazların elektrik motoruyla beraber kullanılmadığı ender çalışmalardandır. Burada MR frenlerin sürtümlü frenlere göre hızlı tepki verdiği, yapışmadan (stiction) ve titreşimsiz çalıştıkları belirtilmiştir.

Yukarıda özetlenen ve 2002-2006 yıllarını kapsayan çalışmalarda amaç MR frenlerin haptik uygulamalarda kullanılabilirliğini incelemek olduğu için özel tasarımlar yapılmamış, endüstriyel ve otomotiv uygulamaları için geliştirilmiş ticari bir MR fren kullanılmıştır. Çok iyi sonuçlar vermesine rağmen çapı 92,2 mm, uzunluğu 36,6 mm ve kütlesi 1,36 kg olan bu fren günümüzün haptik arayüz tasarımlarında kullanılmayacak kadar ağır ve büyüktür.

Tablo 3. Haptik uygulamalarda kullanılan MR cihazlar için karşılaştırma tablosu

	LORD Corp. MRB-2107-3	Liu vd. (2006)	Demersseman vd. (2008)	Kikuchi vd. (2009)	Şenkal ve Gürocak (2010)
Çap (mm)	92,2	156	71,8	52	63,5
Uzunluk (mm)	36,6	21	~27	32	89,7
Maks. Tork (Nm)	5,65	7	1,4	6	10,9
Maks. Akım (A)	1	2	4	1	1,5
Min. Tork (Nm)	<0,34	<0,5	-	0,15	<0,1
Tork/Hacim (N/m <sup>2</sup> )	23.121	17.440	12.806	88.288	54.893

Tablo 4. Maxon EC-max elektrik motorları ile aynı boyutlardaki MR cihazların tork karşılaştırması

Motor Modeli	EC- max 40	EC- max 40	EC- max 30	EC- max 30	EC- max 22	EC- max 22	EC- max 16
Motor Gücü	120 W	70 W	60 W	40 W	25 W	12 W	8 W
Çap (mm)	40	40	30	30	22	22	16
Uzunluk (mm)	80	55	60	40	45	30	30
Nominal Tork (mNm)	168	94	63	34	23	10,9	8,2
Maks. (Stall) Tork (mNm)	2090	636	519	160	127	35,5	22
MR Tork* (mNm)	3610	2830	1890	1190	497	330	68

\* Aynı boyutlardaki MR cihazın maksimum torku

Haptik arayüzlere özel MR cihazların tasarımını anlatan yayınlara 2006 yılından itibaren rastlanmaktadır. Liu vd. (2006) 2 A akımda 7 Nm tork üretebilen disk tipi bir cihaz tasarlamıştır. Boyutlandırma için bir sonlu elemanlar yazılımından faydalanılan frenin çapı 156 mm, uzunluğu 21 mm dir. Demersseman vd. (2008) analitik yöntemlerle boyutlandırılan 71.8 mm çapındaki disk tipi frenle 6 W güç girdisi ve 4 A akımda 1.4 Nm tork üretmiştir. Kikuchi vd. (2009) çoklu disk tipindeki tasarımın 1 A akımda 6 Nm tork üretebildiğini belirtmiştir. Bu cihaz 52 mm çapa, 32 mm yüksekliğe ve 237 g kütleye sahiptir. Şenkal ve

Gürocağ (2010) silindir tipinde bir cihazda manyetik akıyı MRS üzerinden birçok kez geçmeye zorlayarak tork artışı sağlamıştır. 1,5 A akımda 10,9 Nm tork üretebilen bu cihazın çapı 63,5 mm, uzunluğu 62,7 mm'dir. Burada özetlenen cihazların bir karşılaştırması Tablo 3'te verilmiştir. Tork/hacim oranları için kullanılan hacimler cihazların boyutları ile yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Najmaei vd.'nin (2014a, 2014b) güncel yayınlarında, yüksek kaliteli haptik arayüz tasarımlarında sıklıkla kullanılan Maxon firmasının EC-max sınıfı elektrik motorları aynı boyutlardaki MR cihaz tasarımlarıyla karşılaştırılmıştır. MR cihazların elektrik motorlarına göre yüksek tork (bkz. Tablo 4), düşük atalet momenti ve hafiflik avantajlarına sahip oldukları, ancak bu cihazlarda görülen gecikme (hysteresis) ve sıcaklığa bağımlılık davranışlarının dezavantaj olduğu belirtilmiştir. Lakin gecikme etkisini model tabanlı olarak, sıcaklık bağımlılığı etkisini ise cihaza yerleştirilecek sıcaklık sensörleri yardımıyla asgariye indirmek mümkündür.

Haptik uygulamalarda kullanılan MR cihazlar, bu teknolojiyi daha uzun süredir kullanan, otomotiv ve makina sektörlerindeki uygulamalar için geliştirilmiş tasarımların küçültülmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu tasarımlarda MRS, cihazın gövdesi ile rotoru arasına doldurulmaktadır. Sıvı kaybı cihazın davranışını değiştireceğinden sızdırmazlığın sağlanması şarttır ve bunun için keçeler (O-ring) kullanılır.

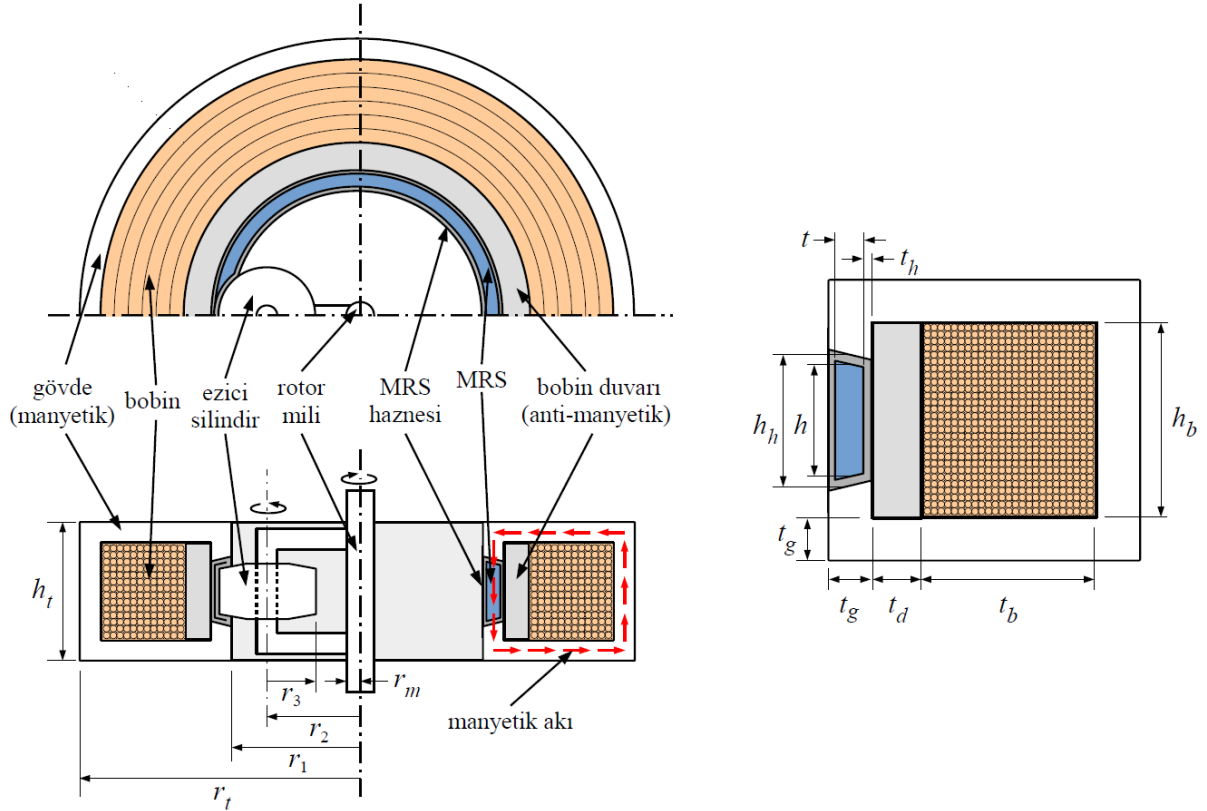
Keçelerden kaynaklanan sürtünme kuvvetleri, büyük ölçekli cihazların kullanıldığı uygulamalarda (örn. otomotiv) önemsiz sayılabilir de, haptik uygulamalarında şeffaflığı olumsuz etkilemektedir. Doğrudan bu problem üzerine yoğunlaşan, bilginiz dahilindeki, tek yayın Şenkal ve Gürocağ'ın (2010) çalışmasıdır. Keçe yerine kullanılan ve "ferro-fluidik sızdırmazlık tekniği" adı verilen tasarımda; MR frenin her iki tarafında rotor mili etrafına yerleştirilen çember şeklindeki sabit mıknatısların sağladığı manyetik akı yardımıyla MRS'nin sızması engellenmiştir. Bu yöntem sayesinde MR frenin minimum torkunun 1,05 Nm'den 0,08 Nm'ye düştüğü belirtilmiştir, ancak ferro-fluidik sızdırmazlık elemanları eklendiğinde frenin uzunluğu yaklaşık %50 oranında artmaktadır. Sızdırmazlık problemini küçük boyutta, sürtünmesiz şekilde çözen bir cihazın eksikliği literatürdeki boşluktur.

Diğere yandan; bir MR cihazın içindeki sıvının belli aralıklarla yenilenmesi gerekir. Bunun nedeni MRS'nin davranışının, maruz kalınan gerilime (stress) ve zamana bağılı olarak demir tozu parçalaması (Carlson, 2003) ve oksitlenme (Ulicny vd., 2007) nedeniyle, değişmesidir. Büyük ölçekli döner cihazlarda bile oldukça zor olan sıvı değiştirme işlemi küçültülmüş tasarımlarda iyice zorlaşmaktadır.



### 3. YÖNTEM

Proje aşamaları; manyetik devre modellemesi ve tasarımı, prototip tasarımı ve üretimi, deney düzeneği tasarımı, deneyler ve sonuçların değerlendirilmesi çalışmalarını kapsamaktadır. Bu bölümde, projede yapılan çalışmalar ve uygulanan yöntemler sırasıyla anlatılmaktadır.



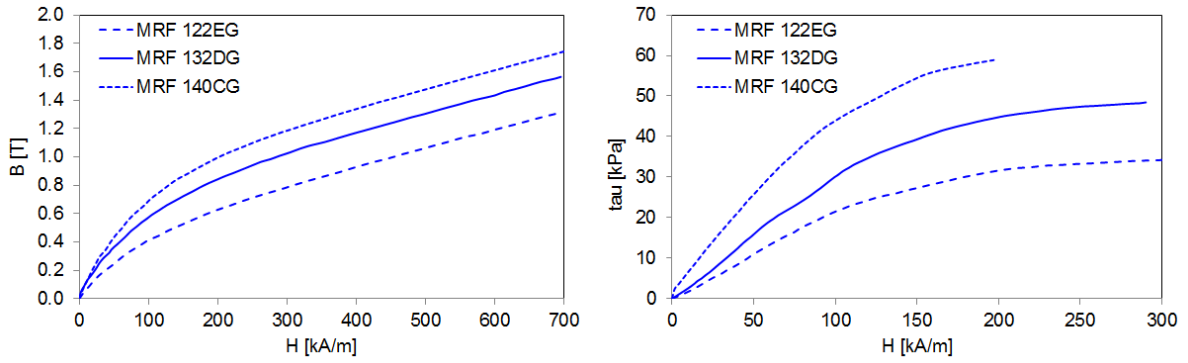
Şekil 6. Peristaltik MR sönümleyicinin kesit görüntüleri ve tasarım parametreleri

Tablo 5. Boyutsal tasarım parametreleri

Sembol	Parametre	Sembol	Parametre
$h$	MRS kanalı yüksekliği	$r_2$	silindir merkezi yarıçapı
$h_b$	bobin yüksekliği	$r_3$	ezici silindir yarıçapı
$h_h$	MRS haznesi yüksekliği	$t$	MRS kanalı kalınlığı
$h_t$	toplam yükseklik	$t_b$	bobin kalınlığı
$r_m$	rotor mili yarıçapı	$t_d$	bobin duvarı kalınlığı
$r_t$	toplam yarıçap	$t_g$	gövde duvarı kalınlığı
$r_1$	gövde iç yarıçapı	$t_h$	MRS haznesi duvar kalınlığı

Geliştirilen sönümleyicinin genel yapısı, bileşenleri ve boyutsal parametreleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu raporun devamında anlatıma yardımcı olması amacıyla boyutsal parametrelerin açıklaması Tablo 5'te verilmiştir.

### 3.1 Manyetik Devre Modellemesi ve Tasarımı



Şekil 7. LORD firmasına ait ticari MRS'lerin  $B-H$  ve  $H-\tau$  eğrileri (Lord Corp. 2016b'den uyarlanmıştır)

MR cihazlarda manyetik alana bağlı tork bileşeninin kaynağı MRS'nin akma gerilmesidir. Akma gerilmesi ( $\tau$ ) manyetik alan şiddeti ( $H$ ) ile, manyetik alan şiddeti ise manyetik akı ( $B$ ) ile doğru orantılıdır (bkz. Şekil 7). Manyetik devre tasarımının amacı MRS'nin üzerinden azami oranda akı geçmesini sağlamaktır. Manyetik devre, akıyı üreten bobinden ve akının dolaştığı yoldan meydana gelir. Akının dolaştığı yol manyetik gövde ve MRS haznesinden oluşur (bkz Şekil 6).

Manyetik akı, açık kaynaklı bir sonlu elemanlar yazılımı olan FEMM (Meeker, 2015) kullanılarak hesaplanmış; tasarımlar iki boyutlu, simetrik eksenli (axisymmetric) manyetik problemi olarak çözülmüştür. FEMM ile veri alışverişi için bir MATLAB kodu yazılmıştır. Bu kod, Tablo 5'te verilen boyutsal parametreler ile manyetik devrenin geometrisini ve elektromıknatis özelliklerini bileşenlerin malzeme bilgileriyle birlikte FEMM'e göndermekte ve çözüm sonucunda elde edilen manyetik akı değeri ile Şekil 7'deki eğrilerden akma gerilmesini, interpolasyon yoluyla, bulmaktadır.

Bu bölümde incelenen parametreler ve izlenen yöntemler ilgili veri setleriyle birlikte alt başlıklar halinde sunulmuştur.

#### 3.1.1 Sarım Sayısı

Sarım sayısının hesaplanması için eşitlik (3)'te verilen Ampere yasası kullanılmıştır.

$$\oint H \cdot dl = NI \quad (3)$$

Burada  $N$  sarım sayısını,  $I$  akımı, eşitliğin sol tarafı ise akı yolu boyunca manyetik alanların toplamını ifade etmektedir. Şekil 6'da gösterilen manyetik devre kesitinde akı yolu üzerindeki mıknatıslanabilen bileşenler gövde ve MRS'dir. Gövdenin permeabilitesi MRS'ninkine göre oldukça yüksek olacağından ihmal edilirse, azami sarım sayısı,  $N_{maks}$ , için aşağıda verilen eşitlik (4) yazılabilir.

$$N_{maks} \approx \frac{hH_{sat}}{I} \quad (4)$$

$H_{sat}$  MRS'nin doyuma ulaştığı manyetik alan şiddetidir ve Şekil 7'nin sağ tarafındaki eğriden bu değerin yaklaşık 200 kA/m olduğu görülebilir.

Sönümleyicinin toplam hacminin mümkün olduğunca küçük tutulması bu projenin amaçlarından biridir. Silindirik yapıdaki sönümleyicinin hacmi yarıçapın karesiyle, yüksekliğin ise kendisiyle doğru orantılı olduğundan bobin kesiti için eşitlik (5)'te verilen bağıntı kullanılmıştır.

$$h_b = 2t_b \quad (5)$$

Buna göre, çapı  $d_b$  olan bir bobin teli  $N$  tur sarıldığında bobin kalınlığı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$t_b = d_b \sqrt{N/2} \quad (6)$$

### 3.1.2 Bobin Teli Çapı

Bu bölümdeki analizler iki grup altında toplanmıştır. İlk grupta sönümleyicinin boyutları sabit tutulmuş, farklı çaptaki beş bobin telinin sarım sayıları sabit bobin kesitine sığacak şekilde hesaplanarak analiz yapılmıştır. Sonuçlar elektriksel güç ve MRS'de oluşan akma gerilmesi ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. İkinci grupta bobinin sarım sayısı sabit tutulmuş, farklı bobin telleri için sönümleyici boyutları, gövde iç çapı sabit kalacak şekilde, hesaplanmıştır. Sonuçlar toplam hacim ve elektriksel güç ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır.

Bu aşamada elastik MRS haznesinin etkisi hesaba katılmamış ( $t_h=0$ ), akı yolunun manyetik gövdeden ve MRS'ten oluştuğu kabul edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan veri setleri Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Simülasyon veri seti: Farklı bobin teli çapları,  $t_b$ ,  $h_b$ =sabit

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_b$	14	mm	$h$	$h_n - 2t_h$	mm
$h_h$	9	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$r_m$	3	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$r_1$	25	mm	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$t_b$	7	mm	$N$	$h_b t_b / d_b^2$	tur
$t_d$	2	mm	<b>Karşılaştırma Ölçütleri</b>		
$t_g$	2	mm	$P$	$I^2 R$	W
$t_h$	0	mm	$\tau$	Şekil 7	kPa
$l$	2	A			
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-132DG			
gövde		1018 Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		20 AWG ( $\emptyset$ 0.812), 22 AWG ( $\emptyset$ 0.644), 24 AWG ( $\emptyset$ 0.511), 26 AWG ( $\emptyset$ 0.405), 28 AWG ( $\emptyset$ 0.321)			

Tablo 7. Simülasyon veri seti: Farklı bobin teli çapları,  $N$ =sabit

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_h$	9	mm	$h$	$h_n - 2t_h$	mm
$r_m$	3	mm	$h_b$	$2t_b$	mm
$r_1$	25	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$t_d$	2	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$t_g$	2	mm	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$t_h$	0	mm	$t_b$	$(N/2)^{0.5} d_b$	mm
$l$	2	A	<b>Karşılaştırma Ölçütleri</b>		
$N$	900	tur	$V$	$\pi r_t^2 h_t$	cm <sup>3</sup>
			$P$	$I^2 R$	W
			$\tau$	Şekil 7	kPa
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-132DG			
gövde		1018 Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		20 AWG ( $\emptyset$ 0.812), 22 AWG ( $\emptyset$ 0.644), 24 AWG ( $\emptyset$ 0.511), 26 AWG ( $\emptyset$ 0.405), 28 AWG ( $\emptyset$ 0.321)			

### 3.1.3 Manyetik Gövde

Manyetik gövdenin incelendiği analizler iki grupta yapılmıştır. Birinci grupta; gövde duvarı kalınlığının, gövde iç çapı sabit kalacak şekilde, değiştirilmesinin toplam hacim ve MRS'de oluşan akma gerilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci grupta, boyutsal parametreler sabit tutularak, sadece gövde malzemesi değiştirilmiş ve MRS'de oluşan akma gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Veri setleri sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Simülasyon veri seti:  $t_g = 1, 2, \dots, 5$  mm

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_h$	9	mm	$h$	$h_h - 2t_h$	mm
$r_m$	3	mm	$h_b$	$2t_b$	mm
$t_d$	2	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$t_g$	1, 2, ..., 5	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$t_h$	0	mm	$r_1$	$27 - t_g$	mm
$l$	2	A	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$N$	900	tur	$t_b$	$(N/2)^{0.5}d_b$	mm
			Karşılaştırma Ölçütleri		
			$V$	$\pi r_t^2 h_t$	cm <sup>3</sup>
			$\tau$	Şekil 7	kPa
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-132DG			
gövde		1018 Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		24 AWG ( $\emptyset 0.511$ mm)			

Tablo 9. Simülasyon veri seti: Farklı manyetik gövde malzemeleri

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_h$	9	mm	$h$	$h_h - 2t_h$	mm
$r_m$	3	mm	$h_b$	$2t_b$	mm
$r_1$	25	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$t_d$	2	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$t_g$	2	mm	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$t_h$	0	mm	$t_b$	$(N/2)^{0.5}d_b$	mm
$l$	2	A	Karşılaştırma Ölçütleri		
$N$	900	tur	$\tau$	Şekil 7	kPa
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-132DG			
gövde		Demir, 1006 Çelik, 1010 Çelik, 1018 Çelik, 416 P. Çelik, 430 P. Çelik, 455 P. Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		24 AWG ( $\emptyset 0.511$ mm)			

### 3.1.4 MRS Haznesi

Bu aşamada, elastik MRS haznesinin duvar kalınlığının MRS'de oluşan akma gerilmesine etkisi incelenmiştir. Manyetik akının yolu gövde, MRS ve hazne duvarlarından oluşmaktadır. Hazne duvarlarının permeabilitesi diğer iki bileşene göre oldukça düşük olacağından, en kötü durumu analiz etmek adına, duvar malzemesi olarak hava kullanılmıştır. Hazne duvarı kalınlığının etkisi farklı akım seviyelerinde ve, gövde iç çapı sabit kalacak şekilde, iki farklı gövde duvarı kalınlığı değerinde incelenmiştir. Veri seti Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Simülasyon veri seti: Farklı MRS haznesi duvarı kalınlıkları

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_h$	9	mm	$h$	$h_h - 2t_h$	mm
$r_m$	3	mm	$h_b$	$2t_b$	mm
$t_d$	2	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$t_g$	2, 3	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$t_h$	0.1, 0.2, ..., 1.0	mm	$r_1$	$27 - t_g$	mm
$l$	0.2, 1, 2	A	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$N$	900	tur	$t_b$	$(N/2)^{0.5}d_b$	mm
			Karşılaştırma Ölçütleri		
			$\tau$	Şekil 7	kPa
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-132DG			
MRS haznesi		Hava			
gövde		1018 Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		24 AWG ( $\varnothing$ 0.511 mm)			

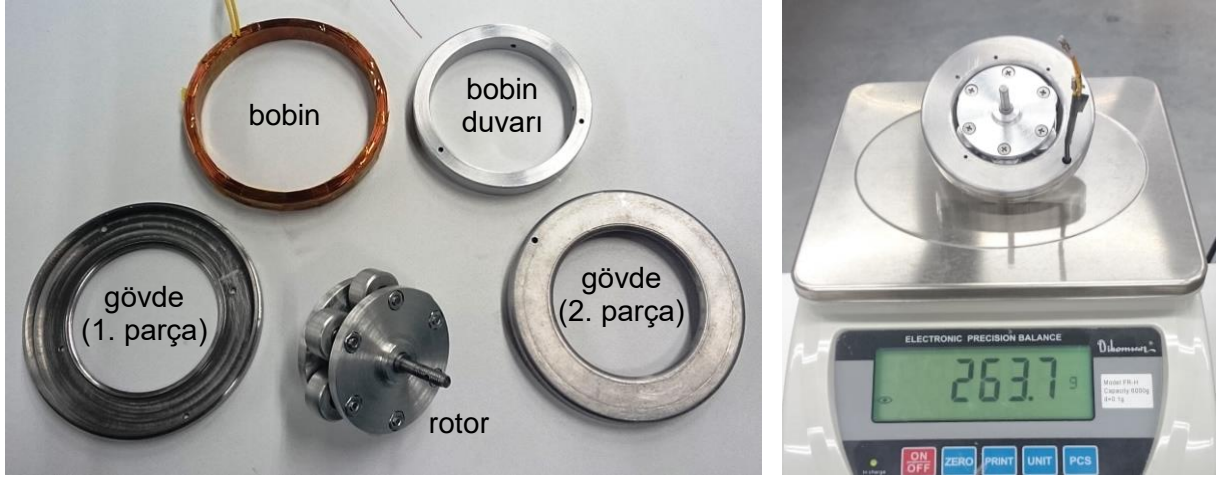
### 3.1.5 MRS Tipi

Bu bölümde mıknatıslanma eğrileri Şekil 7'de verilen, LORD firmasına ait üç farklı MRS'de oluşan akma gerilmesi akıma bağlı olarak Tablo 11'deki veri seti ile incelenmiştir. Sönümleyicinin diğer bütün parametreleri sabit tutulmuştur.

Tablo 11. Simülasyon veri seti: Farklı manyetoreolojik sıvılar

Girilen Parametreler			Hesaplanan Parametreler		
$h_h$	9	mm	$h$	$h_h - 2t_h$	mm
$r_m$	3	mm	$h_b$	$2t_b$	mm
$r_1$	25	mm	$h_t$	$h_b + 2t_g$	mm
$t_d$	2	mm	$r_t$	$r_1 + 2t_g + t_d + t_b$	mm
$t_g$	2	mm	$t$	$t_g - 2t_h$	mm
$t_h$	0	mm	$t_b$	$(N/2)^{0.5}d_b$	mm
$l$	0.2, 0.4, ..., 2	A	Karşılaştırma Ölçütleri		
$N$	900	tur	$\tau$	Şekil 7	kPa
Bileşen		Malzeme			
MRS		MRF-122EG, MRF-132DG, MRF-140CG			
gövde		1018 Çelik			
bobin duvarı		Aluminyum 6061-T6			
bobin teli		24 AWG ( $\varnothing$ 0.511 mm)			

### 3.2 Prototip Tasarımı ve Üretimi



Şekil 8. Peristaltik MR sönümleyici prototipi

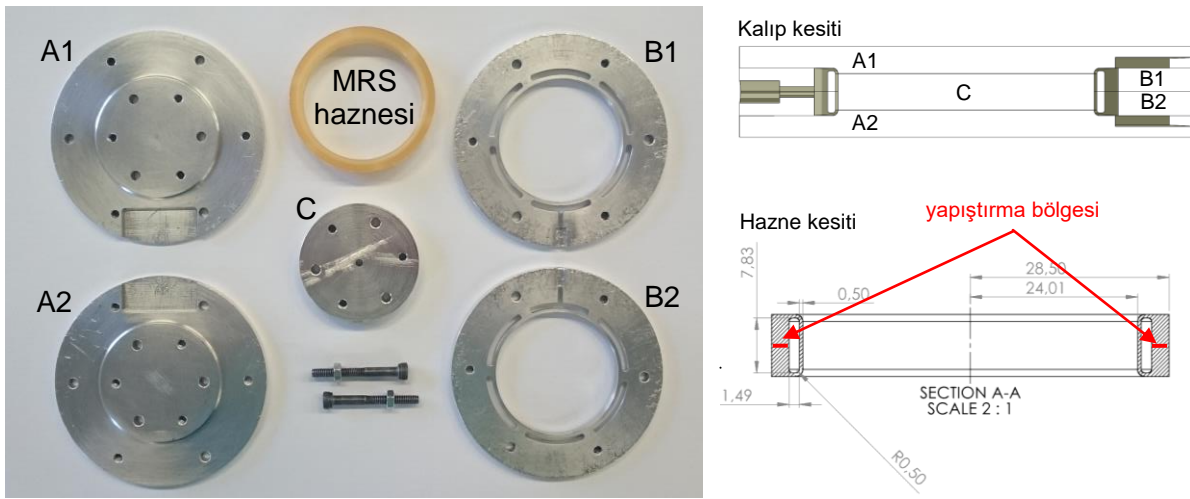
Peristaltik MR sönümleyicinin proje kapsamında tasarlanıp üretilen ilk prototipinin bileşenleri ve montajlanmış hali Şekil 8'de gösterilmiştir. Hacmi  $58.8 \text{ cm}^3$ , ağırlığı 264 g olan prototipin boyutları ve kullanılan malzemeler, sırasıyla, Tablo 12 ve Tablo 13'te listelenmiştir. Rotor tamamiyle anti-manyetik malzemelerden imal edilmiş olup iki paralel dairesel plaka arasında dönen altı adet ezici silindirden oluşmuştur. Ezici silindirlerin sayısı azaltılabilmektedir. Sürtünmeyi azaltmak amacıyla ezici silindirlerin merkezlerine bilyalı rulmanlar yerleştirilmiştir. Manyetik gövde montaj kolaylığı sağlamak adına iki parça halinde üretilmiştir.

Tablo 12. Prototip parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
MRS kanalı yüksekliği	$h$	8 mm
bobin yüksekliği	$h_b$	10 mm
MRS haznesi yüksekliği	$h_h$	9 mm
toplam yükseklik	$h_t$	14 mm
rotor mili yarıçapı	$r_m$	3 mm
toplam yarıçap	$r_t$	39.5 mm
gövde iç yarıçapı	$r_1$	25 mm
silindir merkezi yarıçapı	$r_2$	18 mm
ezici silindir yarıçapı	$r_3$	8 mm
MRS kanalı kalınlığı	$t$	1.5 mm
bobin kalınlığı	$t_b$	5 mm
bobin duvarı kalınlığı	$t_d$	5.5 mm
gövde duvarı kalınlığı	$t_g$	2 mm
MRS haznesi duvar kalınlığı	$t_h$	0.5 mm
sarım sayısı	$N$	150 tur
ezici silindir adedi	$n$	6 adet

Tablo 13. Prototip malzemeleri

	Bileşen	Malzeme	
stator	MRS	MRF-122EG MRF-132DG MRF-140CG	manyetik
	Bobin	Bakır Tel AWG 24	
	Gövde	1010 Çelik	
	MRS haznesi	Poliüretan	
rotor	Bobin duvarı	6000 Alüminyum	anti-manyetik
	Rotor plakaları	6000 Alüminyum	
	Rotor mili	304 Paslanmaz Çelik	
	Ezici silindir	6000 Alüminyum	
	Ezici silindir milleri	304 Paslanmaz Çelik	



Şekil 9. MRS haznesi ve döküm kalıbı

Proje öneri aşamasında da öngörüldüğü gibi, prototipin üretimindeki en zorlayıcı kısım MRS haznesinin üretimidir. Proje süresince bu kısımda birçok farklı yöntem ve tasarım değerlendirilmiş, son olarak Şekil 9'de bileşenleri ve kesit görüntüsü verilen döküm kalıbı üretilmiştir. İki-bileşenli Poly 74-30 poliüretan kauçuktan dökülen haznelerin üretim süreci aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır:

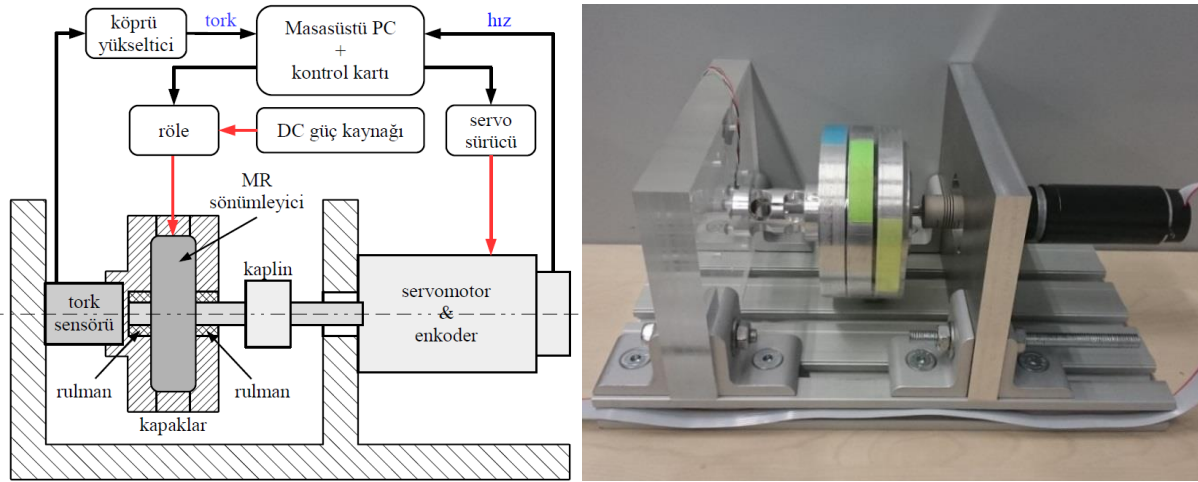
- Kalıp Şekil 9'de verilen kesit görüntüdeki gibi kapatılır ve civatalarla sabitlenir.
- Poly 74-30 1A:1B oranında karıştırılır.
- Karışımın havası vakum hücresinde alınır.
- Karışım kalıba doldurulur.
- Dolu kalıbın havası vakum hücresinde alınır.
- Kalıp oda sıcaklığında 16 saat bekletilir.
- Kalıp açılır, hazne yapıştırma bölgesinden (bkz. Şekil 9) çevresi boyunca kesilip çıkartılır.
- Hazne yapıştırma bölgesinden sıvı poliüretan kullanılarak yapıştırılır.



- MRS hazneye enjektör yardımıyla doldurulur.
- Dolum deliği sıvı poliüretan kullanılarak yapıştırılır.

İlk olarak benzer bir yöntem döküm silikonu için uygulanmış ve başarılı silikon hazneler üretilmiştir. Ancak, MRS'nin içindeki yağın zamanla silikon haznedeki terleme yoluyla sızdığı görüldüğünden poliüretan döküme geçilmiştir.

### 3.3 Deney Düzeneği Tasarımı



Şekil 10. Deney düzeneği

Tablo 14. Deney düzeneği bileşenleri

Bileşen	Marka-Model	Kapasite
Tork sensörü	Futek TFF-325	$\pm 1.5$ Nm
Köprü yükseltici	Futek CSG-110	10 kHz
Servomotor	Maxon RE-35	1.25 Nm, 1500 dev/dak
Enkoder	Maxon MR Type L	1024 puls/dev
Servo sürücü	Maxon ESCON 70/10	70V, 10A
DC güç kaynağı	GW Instek GPC-3060D	(0~30 V/0~6 A)x2
Kontrol kartı	Humusoft MF-634	

Proje kapsamında tasarlanıp üretilen deney düzeneği Şekil 10'da gösterilmiştir. Düzenekte MR sönümleyicinin gövdesi reaksiyon tipi bir tork sensörüne sabitlenmiş kapakların arasına sıkıştırılmıştır. Bu yöntem farklı çap ve uzunluklardaki sönümleyicilerin basit fikstürler kullanılarak test edilmesine olanak sağlamaktadır. Rotor; konumu, hızı veya torku kontrol edilebilen bir DA motoru tarafından sürülmektedir. Açısal hız, motor miline bağlı bir artımlı enkoder yardımıyla okunmaktadır. Düzeneğin gerçek-zamanda kontrolü MATLAB/Simulink Desktop Real-Time ortamında masaüstü bilgisayar ve veri toplama kartı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Deney düzeneği bileşenlerinin detayı Tablo 14'te listelenmiştir.

### **3.4 DeneYler**

Yürütölen deneysel çalışmalar üç gruba ayrılmış, uygulanan yöntemler aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmıştır.

#### **3.4.1 Tork-Hız İlişkisinin Belirlenmesi**

Prototip sönümleyicinin sürtünme torku ve viskoz tork bileşenlerinden oluşan pasif-durum (off-state) torkunu belirlemek için, MRF-132DG ile doldurulmuş sönümleyicinin rotoru, elektromıknatısa akım verilmeden, servomotor tarafından 30 ila 180 dev/dak arasında 30 dev/dak adımlarla sürölmüştür. Hız her değiştirildiğinde tork sinyalinin kararlı hale gelmesi için bir süre beklenmiş ve ortalama tork değerı kaydedilmiştir.

#### **3.4.2 Tork-Akım İlişkisinin Belirlenmesi**

Bu aşamada amaç sönümleyicinin manyetik tork bileşeninin belirlenmesidir. Motor tarafından 120 dev/dak sabit hızda sürölen sönümleyiciye önce 0 A'dan 0.2 A adımlarla 2 A'ya kadar, sonra 2 A'dan -0.2 A adımlarla 0 A'ya kadar akım uygulanmıştır. Akım her değiştirildiğinde tork sinyalinin kararlı hale gelmesi için 10 s beklenmiş ve ortalama tork değerleri kaydedilmiştir. Bu değerlerden 0 A akımdaki tork değerı çıkartılarak manyetik tork değerleri artan ve azalan akım durumlarında elde edilmiş, MR cihazlarında tipik olarak görölen histeresiz davranışı belirlenmiştir. DeneYler MRF-122EG, MRF-132DG ve MRF-140CG sıvılarının herbiri için ikişer kez tekrarlanmış ve deneYlerin ortalaması alınmıştır.

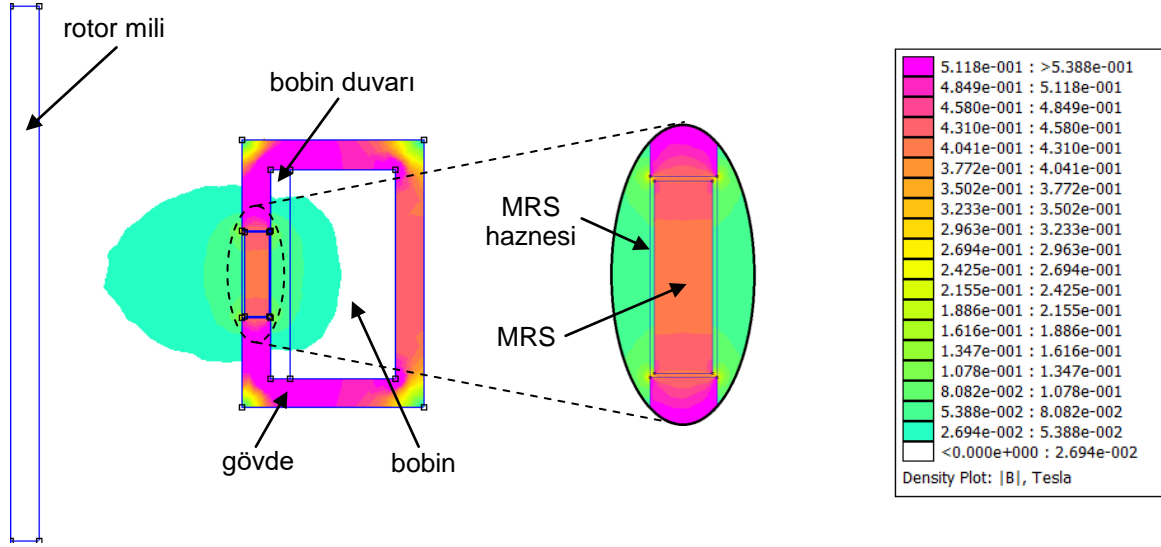
#### **3.4.3 Tepki Süresinin Belirlenmesi**

Son deney grubunda MR sönümleyicinin tork tepki süresi belirlenmiştir. Motor tarafından 120 dev/dak sabit hızda sürölen sönümleyiciye verilen akım 0 A'dan 0.2 A'ya basamak şeklinde arttırılıp tekrar 0 A'ya basamak şeklinde düşürölmüş ve tork davranışı kaydedilmiştir. DeneYler MRF-122EG, MRF-132DG ve MRF-140CG sıvıları ile tekrarlanmıştır. Yüksek akımlardaki tepki süresini görmek için MRF-132DG ile yapılan deneyde 1 A - 1.2 A -1 A aralığı da incelenmiştir. Kazancı, ölçölen davranışın kararlı hal torkları arasındaki farka eşit olan bir birinci merteye sistemin basamak cevabı farklı zaman sabitleriyle simöle edilerek ölçölen davranışın üzerine giydirilmiştir. Simöle edilen cevabın ölçölen cevapla örtüştüğü zaman sabiti değerı tepki süresinin göstergesidir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Manyetik Devre

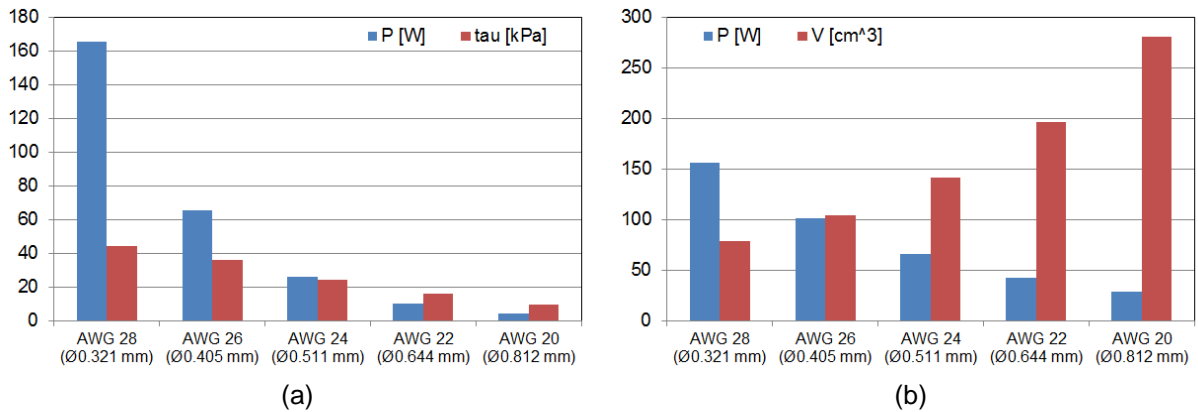
Bu bölümde, Bölüm 3.1’de anlatılan manyetik devre analizlerinden elde edilen bulgular değerlendirilecektir. Analizlere girdi olarak verilen boyutsal parametre değerleri, Tablo 12’de sunulmuş olan prototip parametre değerleri çevresinde değiştirilerek etkileri incelenmiştir.



Şekil 11. FEMM yazılımında manyetik devre simülasyonu örneği

FEMM yazılımı kullanılarak yapılan manyetik sonlu elemanlar analizlerinden örnek bir ekran görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir. Burada, elektromıknatis tarafından üretilen manyetik akının büyük ölçüde MRS üzerinden geçtiği görülebilir.

#### 4.1.1 Bobin Teli

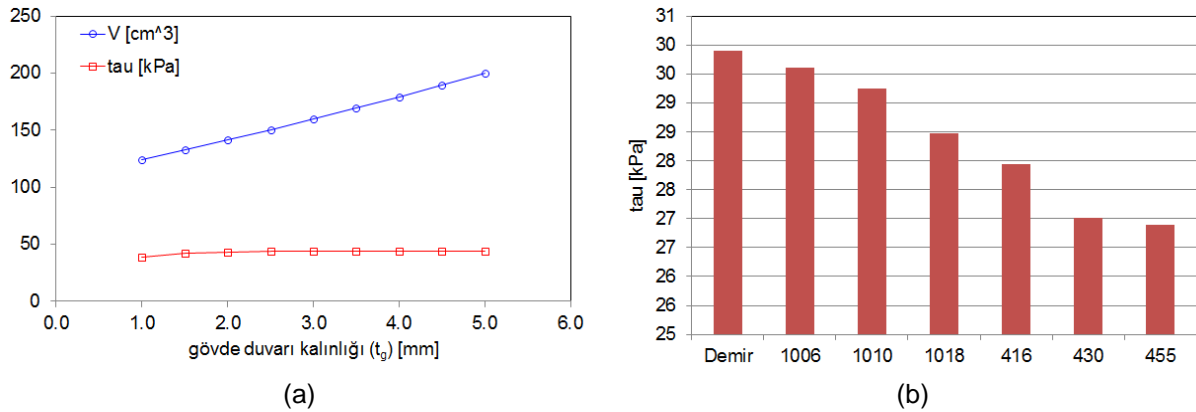


Şekil 12. Bobin teli çapının etkileri: a)  $t_b$ ,  $h_b$  = sabit, b)  $N$ =sabit

MRS kanal kalınlığının  $h=9$  mm, akımın  $I=2$  A olduğu durumda, kullanılan MRS'lerin doyuma ulaşması için, esitlik (4)'e göre, sarım sayısı yaklaşık  $N=900$  tur olmaktadır. Şekil 12a'da karşılaştırılan bobin tellerinden çapı en küçük olanın (AWG 28) 900 tur ile sarılabileceği bobin kesiti hesaplanıp sabit tutulmuş, diğer tellerin sarım sayıları bu kesite sığacak şekilde belirlenmiştir. Sabit kesitte tel çapı büyüdükçe sarım sayısı, ve buna bağlı olarak, elektriksel direnç azaldığından elektriksel güç düşmektedir. Sarım sayısının azalması, akma gerilmesinin de düşmesine sebep olsa da bu düşüş daha yavaştır. Örneğin AWG 28 ile AWG 24 arasında güç %85 oranında azalırken, akma gerilmesi %45 oranında düşmüştür.

Şekil 12b'de bütün tellerin sarım sayısı 900 tur ile sabitlenmiş ve gövde iç çapı sabit kalacak şekilde bobin kesitinin, dolayısıyla toplam hacmin, büyümesine izin verilmiştir. Bu durumda  $NI$  çarpımı sabit olduğu için akma gerilmesi de sabittir. Tel çapının büyümesi, bobinin ortalama çapının da büyümesine rağmen, elektriksel güç ihtiyacını azaltmaktadır. Burada, uygun bobin telinin seçimi hedeflenen uygulamanın azami hacim ve güç isterlerine bağlıdır.

#### 4.1.2 Manyetik Gövde



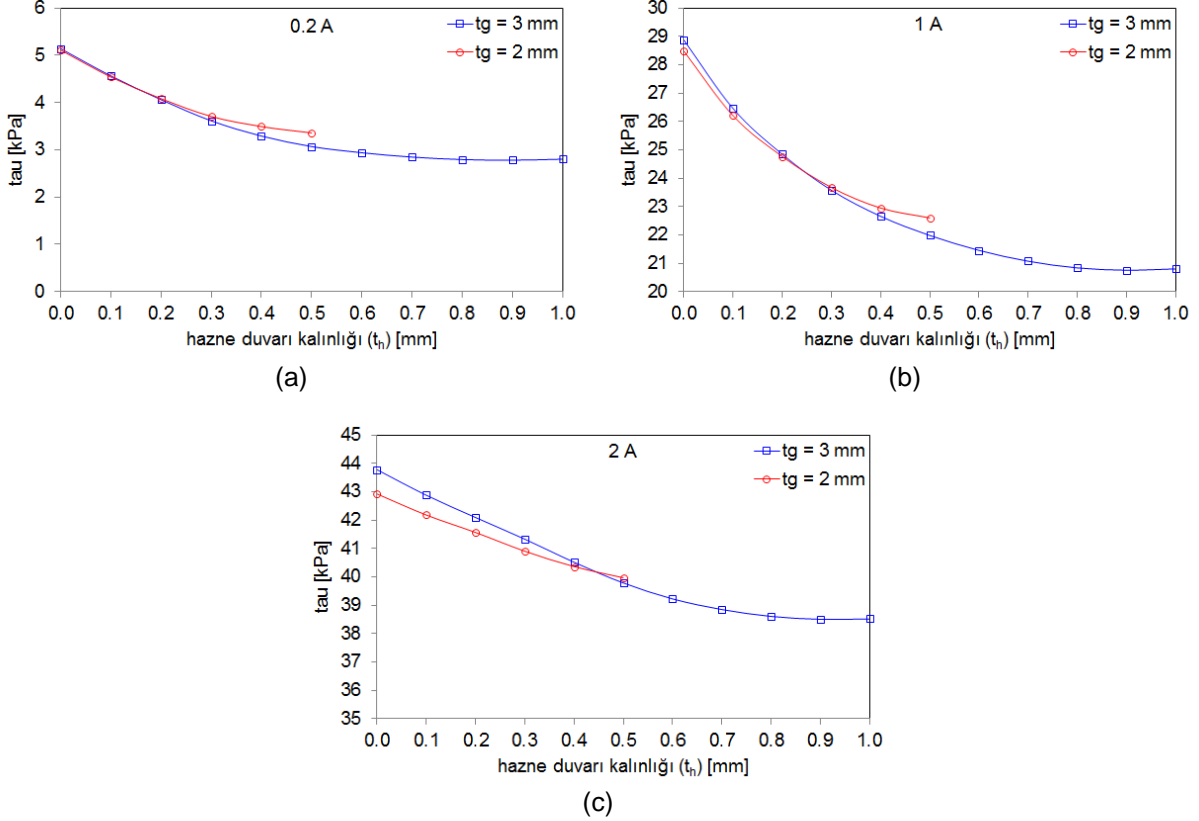
Şekil 13. Manyetik gövde parametrelerinin etkileri: a) farklı gövde duvarı kalınlıkları, b) farklı gövde malzemeleri

Potansiyel gövde malzemelerinin permeabiliteleri MRS'lerinkine kıyasla oldukça yüksek olduğundan, MRS'lerin doyuma ulaştığı manyetik alanlarda oldukça ince gövde duvarları yeterli olabilmektedir. Şekil 13a'da gövde duvarı kalınlığının toplam hacime ve MRS'de oluşan akma gerilmesine etkisi verilmiştir.  $t_g=2$ mm'den kalın gövde duvarlarının akma gerilmesine belirgin bir etkisi görülmemektedir.

Şekil 13b'de saf demir, düşük karbonlu çelikler (1006, 1010, 1018) ve manyetik paslanmaz çeliklerden (416, 430, 455) mamül gövdelerin, aynı koşullarda, MRS'de oluşan akma

gerilmesine etkisi gösterilmiştir. Sonuçlar, bu alandaki yayınların neredeyse tamamında kullanılan, düşük karbonlu çeliklerin, özellikle 1006 ve 1010'un uygunluğunu göstermektedir.

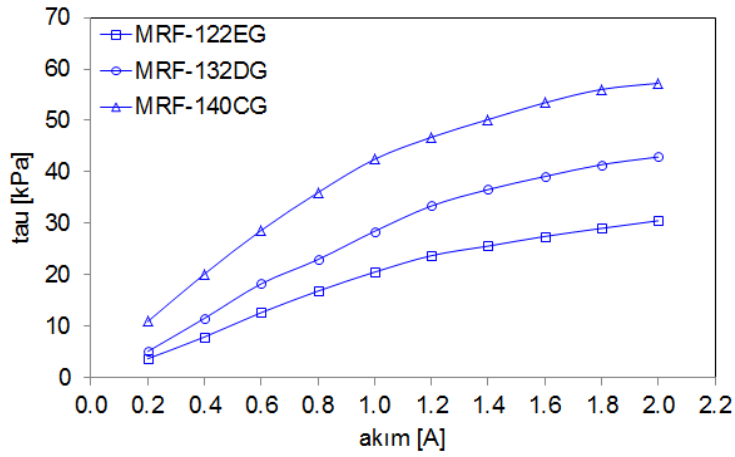
#### 4.1.3 MRS Haznesi



Şekil 14. MRS haznesi duvar kalınlığının MRS'de oluşan akma gerilmesine etkisi: a) 0.2 A, b) 1 A, c) 2 A

Esnek MRS haznesi duvarlarının manyetik olmaması, manyetik devrenin performansını düşürmektedir. Duvar kalınlığının MRS'te oluşan akma gerilmesine etkisi Şekil 14'te verilmiştir. 900 sarım sayısında MRS'nin doyuma yaklaştığı 2 A değerine ek olarak simülasyonlar 1 A ve 0.2 A akımlar için tekrarlanmıştır. Örneğin; hazne duvarı kalınlığı 0.1 mm'den 0.5 mm'ye çıkarıldığında 2 A akımda %7, 1 A akımda %17 ve 0.2 A akımda %33 akma gerilmesi kaybı ortaya çıkmaktadır. Bu hazne duvarı kalınlığı değerleri arasında, gövde duvarı kalınlığının etkisi belirgin değildir. Diğer taraftan hazne duvarının ince tutulması haznenin üretimini zorlaştıracığı gibi dayanımını da düşürecektir.

#### 4.1.4 MRS



Şekil 15. Farklı MRS'ler için akıma karşı akma gerilmesi eğrileri

MRS'nin ticari anlamda tek üreticisi LORD firmasıdır. Firmanın ürün gamında bulunan üç farklı MRS'de aynı koşullarda oluşan akma gerilmesi eğrileri Şekil 15'te verilmiştir. En yüksek akma gerilmesi MRF-140CG'de oluşmasına rağmen geleneksel silindir-tipi ve disk-tipi MR cihazları konu alan akademik literatürde çoğunlukla viskozitesi orta seviyede ( $\sim 0.112$  Pa.s) olan MRF-132DG kullanılmıştır. Bunun nedeninin, geleneksel cihazlardaki MRS kanallarının oldukça dar olması nedeniyle, görece yüksek viskoziteli ( $\sim 0.280$  Pa.s) MRF-140CG'nin pasif-durum torkunu arttırması ve manyetik alan kaldırıldığında MRS üzerinde kalan artık manyetik etki olduğu düşünülmektedir.

#### 4.2 Deney Sonuçları

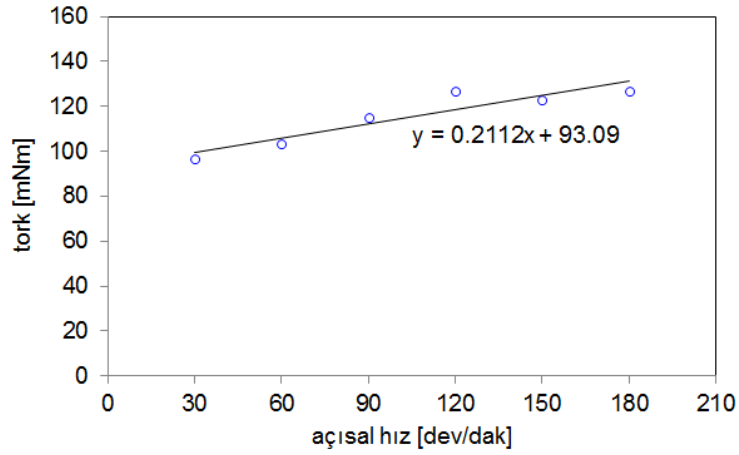
Bu bölümde, peristaltik MR sönümleyici prototipinin deneysel incelemelerinin sonuçları sunulacaktır. Deney performansının literatürdeki benzer cihazlarla karşılaştırması Tablo 15'te sunulmuştur.

Tablo 15. Karşılaştırma tablosu

	$r_t$ [mm]	$h_t$ [mm]	$T_{maks}$ [Nm]	$I$ [A]	$T_{min}$ [Nm]	$\tau$ [ms]
LORD Corp. RD-8191	47,5	51	5	1	<0,5	-
Liu vd. (2006)	78	21	7	2	<0,5	-
Demersseman vd. (2008)	35,9	$\sim 27$	1,4	4	-	-
Kikuchi vd. (2009)	26	32	6	1	0,15	20
Şenkal ve Gürocak (2010)	31,8	89,7	10,9	1,5	<0,1	60
Guo ve Liao (2011)	25	18	0,27	2,4	<0,5	100
<i>Prototip</i>	39,5	14	0,38	2	<0,1	150

#### 4.2.1 Tork-Hız İlişkisi

Prototip sönümleyicinin sürtünme torku ve viskoz tork bileşenlerinden oluşan pasif-durum (off-state) torkunu belirlemek için, MRF-132DG ile doldurulmuş sönümleyicinin rotoru, elektromıknatısa akım verilmeden, servomotor tarafından 30 ila 180 dev/dak arasında 30 dev/dak adımlarla sürülmüştür. Hız her değiştirildiğinde tork sinyalinin kararlı hale gelmesi için bir süre beklenmiş ve ortalama tork değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 16. MRF-132DG kullanılan sönümleyicide açısal hıza karşı pasif-durum (off-state) torku

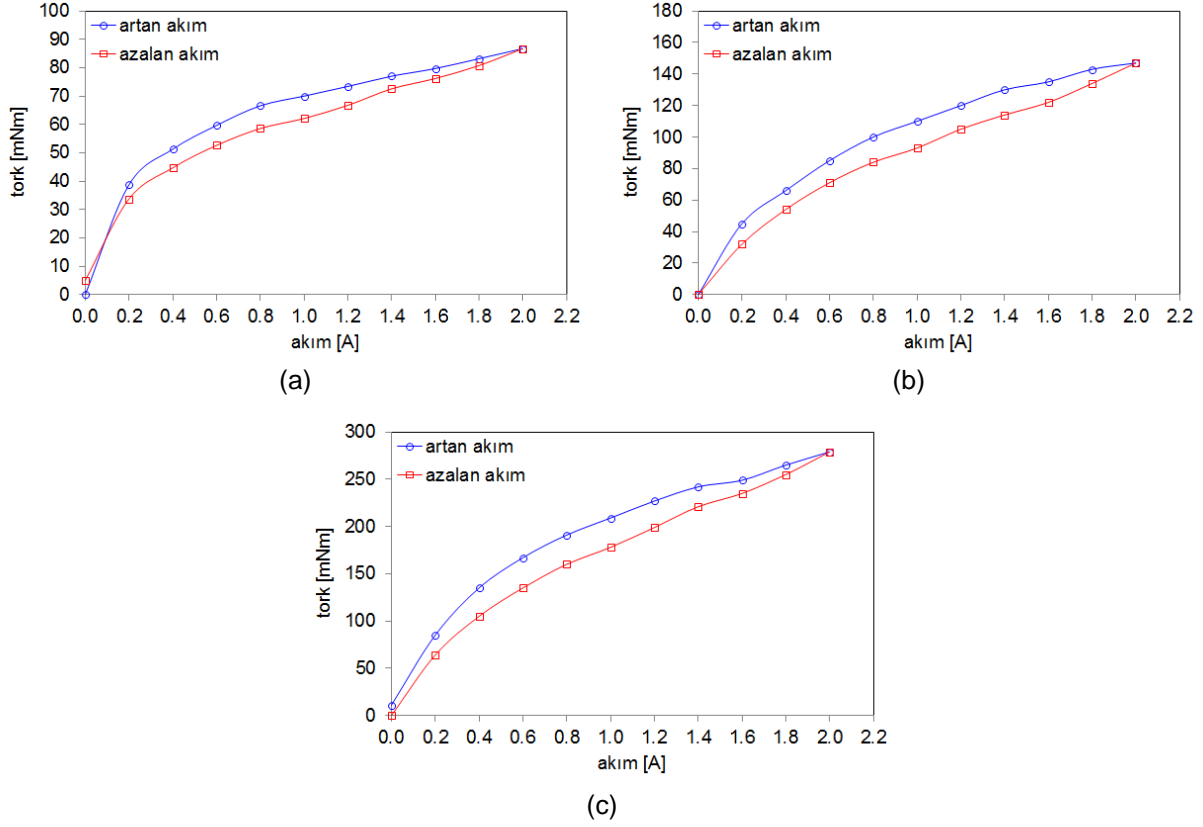
Sabit hızlarda örneklenen tork-hız davranışını daha iyi ifade edebilmek için ortalama tork değerlerine, Şekil 16'da gösterdiği gibi, bir doğru uydurulmuştur. Doğrunun tork eksenini kestiği değer olan 93.09 mNm sürtünme torkunu, eğimi ise viskoz sönümleme katsayısını vermektedir.

Bu projenin hedefi olan haptik cihazlar düşük hızlarda çalışmaktadır. Dolayısıyla, geliştirilen sönümleyicinin yaklaşık 100 mNm mertebesinde olan pasif-durum torku, LORD firmasının ticari sönümleyicisine göre oldukça düşüktür, akademik literatürdeki benzer cihazlara kıyasla da en düşükler arasındadır (bkz. Tablo 15).

#### 4.2.2 Tork-Akım İlişkisi

Motor tarafından 120 dev/dak sabit hızda sürülen sönümleyiciye önce 0 A'dan 0.2 A adımlarla 2 A'ya kadar, sonra 2 A'dan -0.2 A adımlarla 0 A'ya kadar akım uygulanmıştır. Akım her değiştirildiğinde tork sinyalinin kararlı hale gelmesi için 10 s beklenmiş ve ortalama tork değerleri kaydedilmiştir. Bu değerlerden 0 A akımdaki tork değeri (pasif-durum torku) çıkartılarak manyetik tork değerleri artan ve azalan akım durumlarında elde edilmiştir.

Deneyler MRF-122EG, MRF-132DG ve MRF-140CG sıvılarının herbiri için ikişer kez tekrarlanmış ve deneylerin ortalaması alınmıştır.

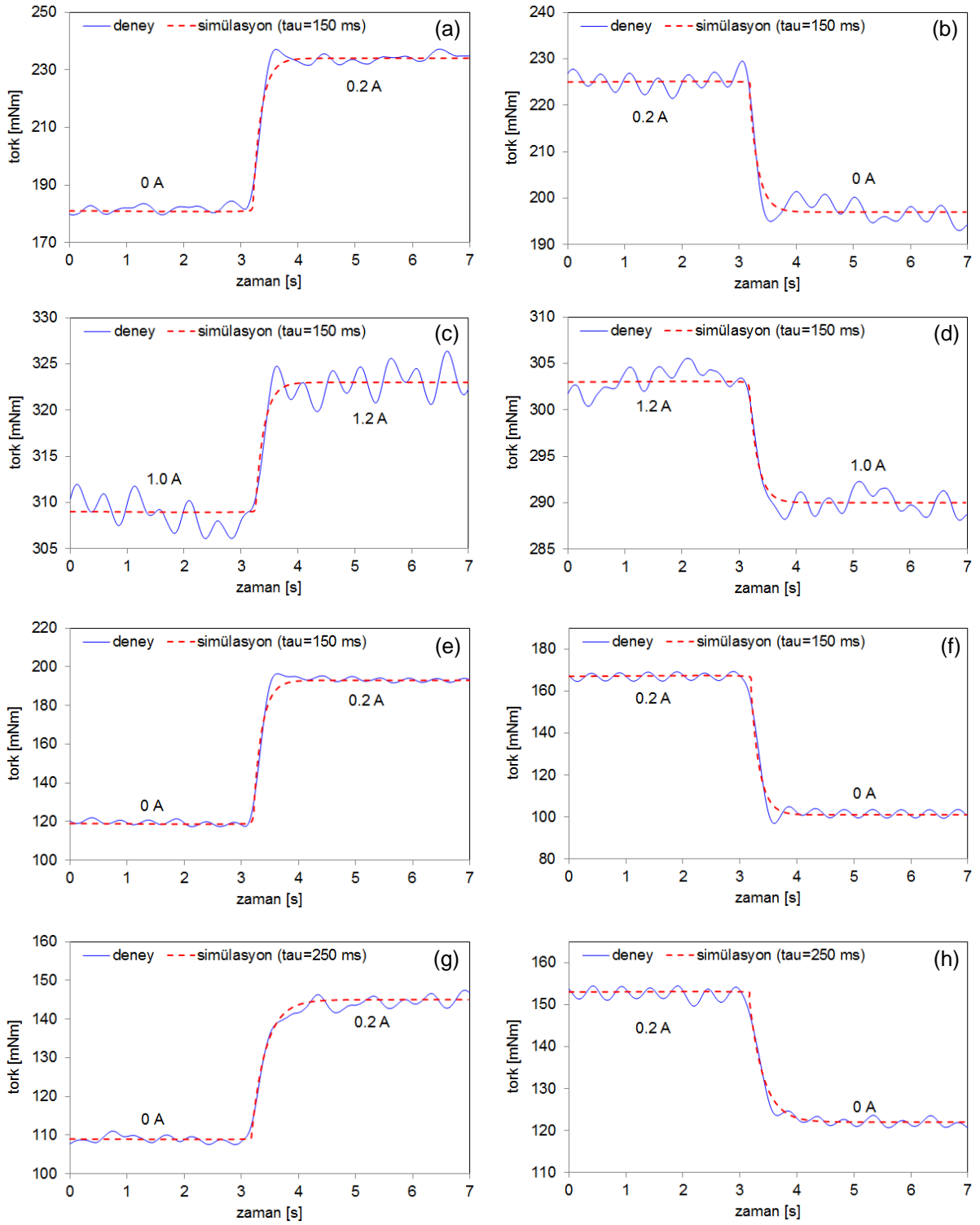


Şekil 17. Artan ve azalan akım durumlarında manyetik tork ve histeresiz eğrileri: a) MRF-122EG, b) MRF-132DG, c) MRF-140CG

Şekil 17'de verilen deney sonuçları MR cihazlarda tipik olarak görülen histeresiz davranışını göstermektedir. Tork farkının en yüksek olduğu 1 A akımda, farkların maksimum değerlere oranı MRF-122EG, MRF-132DG ve MRF-140CG için sırasıyla %9, %11.5, %11 olarak ortaya çıkmıştır. Maksimum akım değeri olan 2 A'da ulaşılan manyetik tork değerleri aynı sırayla 87 mNm, 147 mNm ve 279 mNm'dir. Bu değerler Tablo 15'teki diğer cihazların maximum torklarıyla karşılaştırıldığında, bir cihazdan yüksek olmasına rağmen, diğer cihazlardan oldukça küçüktür.



### 4.2.3 Tepki Süresi



Şekil 18. Prototip sönümleyicinin basamak cevapları: a) MRF-132DG 0 A'dan 0.2 A'ya, b) MRF-132DG 0.2 A'dan 0 A'ya, c) MRF-132DG 1.0 A'dan 1.2 A'ya, d) MRF-132DG 1.2 A'dan 1.0 A'ya, e) MRF-140CG 0 A'dan 0.2 A'ya, f) MRF-140CG 0.2 A'dan 0 A'ya, g) MRF-122EG 0 A'dan 0.2 A'ya, h) MRF-122EG 0.2 A'dan 0 A'ya

Motor tarafından 120 dev/dak sabit hızda sürülen sönümleyiciye verilen akım 0 A'dan 0.2 A'ya basamak şeklinde arttırılıp tekrar 0 A'ya basamak şeklinde düşürülmüş ve tork davranışı kaydedilmiştir. Deneyler MRF-122EG (Şekil 18g,h), MRF-132DG (Şekil 18a,b) ve MRF-140CG (Şekil 18e,f) sıvıları ile tekrarlanmıştır. Yüksek akımlardaki tepki süresini görmek için MRF-132DG ile yapılan deneyde 1 A - 1.2 A -1 A aralığı da incelenmiştir (Şekil 18c,d).

Kazancı, ölçülen davranışın kararlı hal torkları arasındaki farka eşit olan bir birinci mertebe sistemin basamak cevabı farklı zaman sabitleriyle simüle edilerek ölçülen davranışın üzerine giydirilmiştir. Simüle edilen cevabın ölçülen cevapla örtüştüğü zaman sabiti değeri tepki süresinin göstergesidir. MRF-122EG haricindeki deneylerde davranış her iki yönde de zaman sabiti 150 ms olan simülasyonla örtüşmüştür. MRF-122ED'de ise zaman sabiti 250 ms olarak belirlenmiştir. Bu MRS, kullanılanlar içinde, yoğunluğu, içerisindeki demir tozunun kütleli oranı ve pasif-durum viskozitesi en düşük olanıdır. Bu nedenle, özellikle hareket halinde iken, manyetikleşmesi diğerlerine göre yavaş olmaktadır.

Şekil 18'deki deneysel tork eğrilerinde 2 Hz frekansa ve tepeden-tepeye yaklaşık 5 mNm genliğe sahip dalgalanma görülmektedir. Sönümleyicinin rotoru motora, gövdesi ise tork sensörüne bağlı olan kapaklara sabitlenmiştir (bkz. Şekil 10). Dalgalanma motor ve tork sensörü eksenleri arasındaki kaçıklıktan kaynaklanmaktadır. Rotor dönerken tork sensörü eğilmeye zorlandığı için okunan sinyal dalgalıdır. Dalgaların frekansı, deneylerin yapıldığı hız olan 120 dev/dak (2 Hz) ile örtüşmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle projenin sonuçları, öneri formunda sunulan amaç, hedefler ve başarı ölçütleri ile karşılaştırmalı olarak maddeler halinde listelenmiştir. Son olarak, araştırmanın devamına yönelik çalışmalar önerilmektedir.

### Amaç ve Hedefler

- Proje, “manyetoreolojik sıvının (MRS) peristaltik olarak kapalı-çevrim taşıdığı özgün bir döner manyetoreolojik (MR) sönümleyici geliştirmek” ifadesiyle tanımlanmış olan amacına ulaşmıştır.
- Proje kapsamında kurgulanan tasarım ve analiz sistematığı peristaltik MR sönümleyicinin istenilen boyutta tasarlanmasına ve performansın yaklaşık olarak öngörülmesine

olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla “MR sönümleyicinin haptik arayüzlerde kullanılabilmesi amacıyla küçük boyutlu tasarımlanması.” hedefine ulaşılmıştır.

- “MR sönümleyicinin ilk prototipinin üretilmesi.” hedefi gerçekleşmiştir.
- “MR sönümleyicinin üretebileceği tork aralığının ve tepki süresinin belirlenmesi.” hedefine ulaşılmıştır.
- Türk Patent Enstitüsü’ne 27.11.2015 tarihinde 2015/15094 başvuru numarası ve “Bir Ayarlanabilir Sönümleyici” başlığıyla patent başvurusu yapılmış, “MR sönümleyici için patent başvurusu yapılması.” hedefi gerçekleşmiştir.

### Proje Planı

- Projede planlanan tüm iş paketleri ve iş paketlerine dağıtılan tüm faaliyetler yürütülmüş, proje zamanında ve bütçe aşılmadan tamamlanmıştır.

### Başarı Ölçütleri

- 1. İş Paketi’nin başarı ölçütleri olan bobin teli kesiti, sarım sayısı, manyetik gövdenin malzemesi ve boyutları, MRS haznesinin boyutları, MRS tipi, MRS miktarı parametrelerinin sönümleyicinin performansına etkileri belirlenmiştir.
- 2. İş Paketi’nin başarı ölçütleri olan mekanik üretim için gerekli sarf malzemeleri ve deney düzeneği bileşenlerinin tümü temin edilmiştir.
- 3. İş Paketi’nin başarı ölçütü olan çalışan prototip üretilmiştir.
- 4. İş Paketi’nin başarı ölçütü olan deney düzeneği kurulmuştur.
- 5. İş Paketi’nin başarı ölçütleri olan tork-hız grafiği ve tork-akım grafiği elde edilmiş, tepki süresi belirlenmiştir. Bulgular literatürdeki benzer cihazlarla karşılaştırılmıştır.

### Risk Yönetimi

Proje önerisinde öngörülen beş önemli riskten ikisi gerçekleşmiş, prototip için bobin sarılmasında öngörülemeyen bir risk ortaya çıkmıştır. Bu riskler ve risk yönetimi aşağıda listelenmiştir.

- 1. İş Paketi’nde COMSOL yazılımının karmaşık yapısı ve öğrenilme süresi nedeniyle bir risk unsuru olabileceği öngörülmüştü. COMSOL’da manyetik devre geometrisinin oluşturulması, malzemelerin atanması ve problemin tanımlanarak çözülmesi kısa bir sürede öğrenilmiş ve uygulanmıştır. Ancak bu işlemlerin MATLAB üzerinden birçok farklı veri seti için otomatik yapılabilmesini sağlayacak araç kiti döviz kurunun değişmesi nedeniyle satın alınamamıştır. Bu aşamada bazı yanarlarda kullanıldığı görülen açık kaynaklı FEMM yazılımı araştırılmış ve bu yazılımın bedelsiz olarak MATLAB ile haberleşebildiği ve çok hızlı sonuç verdiği görülmüştür. O zamana kadar COMSOL’da

çözölmüş olan bazı problemler FEMM ile de çözümlere sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların örtüşmesi sonucu projenin devamında FEMM yazılımının kullanılmasına karar verilmiştir.

- 2. İş Paketi'nde esnek MRS haznesinin üretiminin risk oluşturduğu öngörölmüştü. Bu alandaki çışılmalar gerek proje ekibinin tecrübe eksikliği, gerekse MRS'lerin diğer malzemelerle olan uyumluluğu konusundaki kaynak eksikliği nedeniyle çok uzun süreli ve zorlayıcı olmuştur. Bölüm 3.2'de verilen döküm süreci ile bir adet haznenin dökümü bir gün sürmektedir. Üstelik, kapalı kalıp kullanıldığından, vakumun başarılı olup olmadığı ancak kalıp açıldıktan sonra anlaşılabilir. Üretilen on haznedden ancak bir tanesi kullanılabilmiş, kullanılan haznelerin de yarıya yakını kullanım sırasında yırtılmıştır. İlk olarak hazneler döküm silikonundan üretilmiştir. Ancak, MRS'nin içindeki yağın zamanla silikon haznedden terleme yoluyla sızdığı görüldüğünden poliüretan döküme geçilmiştir. Sağlam bir hazneye MRS doldurulduktan sonra doldurma deliği haznenin malzemesiyle yama şeklinde kapatılmıştır. MRS'nin içindeki yağ kapatma işlemini oldukça zorlaştırmaktadır.
- Bobin, belli bir sarım sayısındaki asgari kesite sığacak şekilde sarılamamıştır. Bu nedenle deneylerde MRS'ler doyum sınırının oldukça altında çalışmıştır. Bobini düzgün ve dağılmayacak şekilde sarılabilmek için epoksi yapıştırıcı katkılı sarım yapmak gerekmektedir. Bu alanda profesyonel hizmet alınması uygun olacaktır.

### Öneriler

- Proje kapsamında geliştirilen deney düzeneği farklı çap ve uzunluklardaki sönümleyicilerin basit fikstürler kullanılarak test edilmesine olanak sağlamaktadır. Düzenekte test edilen sönümleyicinin rotoru motora, gövdesi ise tork sensörüne bağlı olan kapaklara sabitlenmektedir (bkz. Şekil 10). Motor ve tork sensörü eksenleri arasındaki kaçıklık nedeniyle deneyler sırasında dönme frekansında tork dalgaları ortaya çıkmaktadır. Bu dalgalar, genlikleri oldukça küçük ( $T_{tt} = 5 \text{ mNm}$ ) olmasına rağmen, sönümleyici için hedeflenen haptik uygulamalarda yanlış algı oluşmasına neden olabilir. Rotorun doğrudan gövde üzerine yatakladığı yekpare bir sönümleyicide eksen kaçıklığı nedeniyle oluşacak tork dalgalanması asgariye inecektir.
- Sönümleme torkunun model tabanlı hesaplanması proje kapsamında planlanmamıştır. Peristaltik MR sönümleyicide, döner cihazların hemen hepsinde baskın mod olan, kayma modu yerine akış ve sıkıştırma modları baskındır. Bu modlarda MRS'de oluşan kayma gerilmesinden kaynaklanan kuvvetler, doğrusal MR sönümleyicilerin ve titreşim sönümleyici MR cihazların anlatıldığı yayınlarda modellenmiştir. Mevcut modellerin önerilen sönümleyiciye uyarlanması ve deneylerle doğrulanması faydalı olacaktır.

- MRS haznesinin tamamı yerine sadece silindir tarafından ezilen yüzeyinin elastik olması önerilmektedir. Böylece haznenin üretimi oldukça kolaylaşacak ve manyetik akı hazne duvarlarından geçmeye zorlanmadığı için manyetik devrenin performansı artacaktır. Diğer taraftan önerilen sönümleyicinin özgünlüğü ve çalışma prensibi aynı kalacaktır.

Yukarıda listelenen son iki öneri proje kapsamında hazırlanan ve değerlendirme aşamasında olan aşağıdaki dergi makalesinde kısmen uygulanmıştır.

Topçu, O., Taşcıoğlu, Y., Konukseven, E.İ. "A rotary peristaltic magnetorheological fluid device". Sensors & Actuators A: Physical

## KAYNAKLAR

- An, J., Kwon, D.-S. 2002. "Haptic experimentation on a hybrid active/passive force feedback device", 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 4217–4222.
- An, J., Kwon, D.-S. 2006a. "Virtual Friction Display of Hybrid Force Feedback Interface with Actuators Comprising DC Motor and Magnetorheological Brake", IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 3997–4002.
- An, J., Kwon, D.-S. 2006b. "Stability and Performance of Haptic Interfaces with Active/Passive Actuators--Theory and Experiments", The International Journal of Robotics Research, 25(11), 1121–1136.
- Avraam, M., Horodincu, M., Romanescu, I., Preumont, A. 2010. "Computer Controlled Rotational MR-brake for Wrist Rehabilitation Device", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21(15), 1543–1557.
- Carlson, J.D., Jolly, M.R. 2000. "MR fluid, foam and elastomer devices", Mechatronics, 10, 555–569.
- Carlson, J.D. 2003. "Critical factors for MR fluids in vehicle systems", International Journal of Vehicle Design, 33, 207-217.
- Choi, Y.T., Cho, J.U., Choi, S.B., Wereley, N.M. 2005. "Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers", Smart Materials and Structures, 14(5), 1025–1036.
- Dai, S., Du, C., Yu, G. 2013. "Design, testing and analysis of a novel composite magnetorheological fluid clutch", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 24(14), 1675–1682.
- Demersseman, R., Hafez, M., Lemaire-Semail, B., Clenet, S. 2008. "Magnetorheological brake for haptic rendering". Haptics: Perception, Devices and Scenarios. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Dyke, S., Spencer, B., Sain, M., Carlson, J. 1996. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", Smart Materials and Structures, 5, 565–575.
- Farjoud, A., Vahdati, N. 2007. "Mathematical Model of Drum-type MR Brakes using Herschel-Bulkley Shear Model", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 19(5), 565–572.
- Giorgetti, A, Baldanzini, N., Biasiotto, M., Citti, P. 2010. "Design and testing of a MRF rotational damper for vehicle applications", Smart Materials and Structures, 19(6), 065006.
- Grunwald, A., Olabi, A. 2008. "Design of magneto-rheological (MR) valve", Sensors and Actuators A: Physical, 148(1), 211–223.
- Gudmundsson, K.H., Jonsdottir, F., Thorsteinsson, F. 2010. "A geometrical optimization of a magneto-rheological rotary brake in a prosthetic knee", Smart Materials and Structures, 19(3), 035023.
- Guo, H., Liao, W.H. 2011. "Optimization of a multifunctional actuator utilizing magnetorheological fluids", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 67-72.

- Huang, J., Zhang, J., Yang, Y., Wei, Y. 2002. "Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake", *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 559–562.
- Imaduddin, F., Mazlan, S.A., Zamzuri, H. 2013. "A design and modelling review of rotary magnetorheological damper", *Materials & Design*, 51, 575–591.
- Karakoc, K., Park, E.J., Suleman, A. 2008. "Design considerations for an automotive magnetorheological brake", *Mechatronics*, 18(8), 434–447.
- Kavlicoglu, B.M., Gordaninejad, F., Wang, X. 2013. "Study of a magnetorheological grease clutch", *Smart Materials and Structures*, 22(12), 125030.
- Kciuk, M., Turczyn, R. 2006. "Properties and application of magnetorheological fluids", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1), 127–130.
- Kikuchi, T., Ikeda, K., Otsuki, K., Kakehashi, T., Furusho, J. 2009. "Compact MR fluid clutch device for human-friendly actuator", *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 012059.
- Kikuchi, T., Kobayashi, K. 2011. "Design and Development of Cylindrical MR Fluid Brake with Multi-Coil Structure", *Journal of System Design and Dynamics*, 5(7), 1471–1484.
- Li, W., Yadmellat, P., Kermani, M.R. 2014a. "Linearized Torque Actuation Using FPGA-Controlled Magnetorheological Actuators", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–9.
- Li, W., Yadmellat, P., Kermani, M.R. 2014b. "Design optimization and comparison of magneto-rheological actuators", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 5050–5055.
- Li, W.H., Du, H. 2003. "Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(7), 508–515.
- Liu, B., Li, W.H., Kosasih, P.B., Zhang, X.Z. 2006. "Development of an MR-brake-based haptic device", *Smart Materials and Structures*, 15(6), 1960–1966.
- LORD Corp.. "RD-8040-1 and RD-8041-1 Dampers".  
[http://www.lordmrstore.com/literature\\_192929/Data\\_Sheet\\_DS\\_RD-8040-1\\_and\\_RD-8041-1](http://www.lordmrstore.com/literature_192929/Data_Sheet_DS_RD-8040-1_and_RD-8041-1)  
Son erişim tarihi: 15 Haziran 2016a
- LORD Corp.. "MRF-122EG", "MRF-132DG", "MRF-140CG".  
<http://www.lordmrstore.com/>  
Son erişim tarihi: 15 Haziran 2016b
- Meeker, D. 2015 "Finite Element Method Magnetics (FEMM) - Version 4.2 User's Manual".  
<http://www.femm.info/>  
Son erişim tarihi: 15 Haziran 2016
- Naito, H., Akazawa, Y., Tagaya, K., Matsumoto, T., Tanaka, M. 2009. "An Ankle-Foot Orthosis with a Variable-Resistance Ankle Joint Using a Magnetorheological-Fluid Rotary Damper", *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 4(2), 182–191.
- Najmaei, N., Yadmellat, P., Kermani, M.R., Patel, R. V. 2014a. "Application of Magneto-Rheological Fluid based clutches for improved performance in haptic interfaces", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 832–837.
- Najmaei, N., Kermani, M., Patel, R. 2014b. "Suitability of Small-Scale Magnetorheological Fluid-Based Clutches in Haptic Interfaces for Improved Performance", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Basım aşamasında.

- Nguyen, Q.H., Choi, S.B. 2012a. "Optimal Design of a T-Shaped Drum-Type Brake for Motorcycle Utilizing Magnetorheological Fluid", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 40(2), 153–162.
- Nguyen, Q.H., Choi, S.B. 2012b. "Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume", *Smart Materials and Structures*, 21(1), 015012.
- Nguyen, Q.H., Choi, S.B. 2012c. "Optimal design of a novel hybrid MR brake for motorcycles considering axial and radial magnetic flux", *Smart Materials and Structures*, 21(5), 055003.
- Park, E.J., Stoikov, D., Falcao da Luz, L., Suleman, A. 2006. "A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller", *Mechatronics*, 16(7), 405–416.
- Poznić, A., Zelić, A., Szabó, L. 2012. "Magnetorheological Fluid Brake—Basic Performances Testing with Magnetic Field Efficiency Improvement Proposal", *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 40(2), 113–119.
- Rabinow, J. 1948. "The magnetic fluid clutch", *AIEE Transactions*, 67, 1308–1315.
- Reed, M., Book, W. 2004. "Modeling and control of an improved dissipative passive haptic display", *2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, 311–318.
- Rossa, C., Jaegy, A., Lozada, J., Micaelli, A. 2014. "Design Considerations for Magnetorheological Brakes", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(5), 1669–1680.
- Senkal, D., Gurocak, H. 2010. "Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications", *Mechatronics*, 20(3), 377–383.
- Shiao, Y., Nguyen, Q.-A. 2013. "Development of a multi-pole magnetorheological brake", *Smart Materials and Structures*, 22(6), 065008.
- Ulicny J.C., Balogh M.P., Potter N.M., Waldo R.A. 2007. "Magnetorheological fluid durability test—iron analysis", *Material Science and Engineering A*, 443, 16–24.
- Wang, D.H., Liao, W.H. 2011. "Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling", *Smart Materials and Structures*, 20(2), 023001.
- Yadmellat, P., Kermani, M.R. 2013. "Adaptive hysteresis compensation for a magnetorheological robot actuator", *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4900–4905.
- Yang, G., Spencer, B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K. 2002. "Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations", *Engineering Structures*, 24(3), 309–323.
- Yoo, J., Wereley, N. 2002. "Design of a high-efficiency magnetorheological valve", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(10), 679–685.
- York, T.M., Gilmore C.D., Libertiny T.G. 1997. "Magnetorheological fluid coupling device and torque load simulator system", *US patent 5,598,908*.
- Zhou, W., Chew, C.-M., Hong, G.-S. 2007. "Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake", *Robotica*, 25(04), 493.



**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. YİĞİT TAŞCIOĞLU
Proje No:	115M019
Proje Başlığı:	Kuvvet-Geri-Beslemeli Haptik Cihazlar İçin Döner Manyetoreolojik Sönümleyici Geliştirilmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	ERHAN İLHAN KONUKSEVEN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2015 - 01/05/2016
Onaylanan Bütçe:	97000.0
Harcanan Bütçe:	83057.4
Öz:	<p>Haptik arayüzlerde şeffaflığı azaltmadan empedans genişliğini arttırmak için akademik literatürde en çok başvurulan yöntem, elektrik motorlarının sönümleyici ve fren gibi pasif cihazlarla birlikte kullanımudur. Bu cihazların motorlara sadece büyük empedanslar gerçekleşirken destek olmaları, küçük empedanslarda ise olabildiğince şeffaf olmaları gerekmektedir. Bu amaç için tasarlanacak bir cihazın yüksek tork üretmesi, hafif ve küçük boyutlu olması, elektronik olarak kontrol edilebilmesi ve hızlı tepki vermesi gerektiğinden araştırmacılar, birkaç istisna dışında, manyetoreolojik (MR) cihazlara yönelmiştir. MR cihazlar; viskoziteleri manyetik alan uygulandığında hızlıca artan (örn. 10 ms), alan kaldırıldığında ise yine hızlı bir şekilde eski haline dönen manyetoreolojik sıvılar (MRS) sayesinde çalışır. Manyetik alan cihaza entegre edilmiş elektromıknatıslar yardımıyla oluşturulabileceğinden, MR cihazların davranışı elektronik olarak kontrol edilebilir.</p> <p>Haptik uygulamalarda kullanılan MR cihazlar, bu teknolojiyi daha uzun süredir kullanan, otomotiv ve makina sektörlerindeki uygulamalar için geliştirilmiş tasarımların küçültülmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu tasarımlarda MRS, cihazın gövdesi ile rotoru arasına doldurulmaktadır. Sıvı kaybı cihazın davranışını değiştireceğinden sızdırmazlığın sağlanması şarttır ve bunun için keçeler (O-ring) kullanılır. Keçelerden kaynaklanan sürtünme kuvvetleri, büyük ölçekli cihazların kullanıldığı uygulamalarda (örn. otomotiv) önemsiz sayılabilsede, haptik uygulamalarında şeffaflığı olumsuz etkilemektedir.</p> <p>Bu projede, MRS'nin ince cidarlı, esnek bir haznenin içinde kapalı-çevrim taşıdığı özgün bir döner MR sönümleyici geliştirilmiştir. Sağlık sektöründe sıklıkla kullanılan peristaltik pompa mantığına benzer şekilde çalışan sönümleyicide MRS kapalı haznenin içinde kalıp hareketli parçalara doğrudan temas etmemektedir. Bu sayede sızdırmazlık keçe olmadan sağlanarak sürtünme azaltılmıştır.</p> <p>Öncelikle cihazın elektromanyetik tasarımı ve buna bağlı olarak boyutlandırması bir sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Sonrasında, tasarım detaylandırılıp prototip üretilmiş ve bir test düzeneği kurularak deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda cihazın üretebildiği maksimum ve minimum tork değerleri ile tepki süresi belirlenmiştir, elde edilen bulgular literatürde haptik uygulamalarda kullanılan benzer boyuttaki örneklerle karşılaştırılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	haptik, kuvvet geri besleme, manyetoreolojik sönümleyici, peristaltik pompa
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır