

**MANYETO-REOLOJİK AKIŞKANLI
MOTOR TAKOZU TASARIMI VE
KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ**

Tamer TÜRKÜCÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2013
ANKARA**

Tamer TÜRKÜCÜ tarafından hazırlanan “MANYETO-REOLOJİK AKIŞKANLI MOTOR TAKOZU TASARIMI VE KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

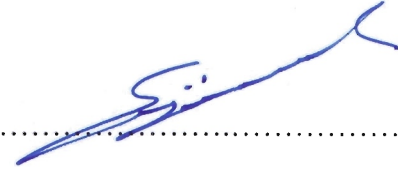
Prof. Dr. Ömer KELEŞ



Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şefaatdin YÜKSEL



Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Ömer KELEŞ



Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Mehmet Ali GÜLER



Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB ETÜ

Tez Savunma Tarihi: 26/02/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Tamer TÜRKÜCÜ

**MANYETO-REOLOJİK AKIŞKANLI MOTOR TAKOZU TASARIMI VE
KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Tamer TÜRKÜCÜ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2013

ÖZET

Bu çalışmada, Manyeto-Reolojik (MR) akışkanlı motor takozları tasarlanmış ve karakteristikleri belirlenmiştir. İlk olarak, bilgisayar ortamında CAD programı kullanılarak 3 farklı prototip tasarlanmıştır. Daha sonra, MR sıvı akışımı kontrol eden elektro-mıknatısın manyetostatik analizleri yapılmıştır. Tasarımı yapılan prototiplerin imalatı yapıldıktan sonra, bu prototiplerin karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla statik ve dinamik testleri bu amaç için özel olarak üretilmiş servo-hidrolik test ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Statik testler 0-10 mm yer değiştirme ile yapılmıştır. Dinamik testler 0-100 Hz aralığında $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm genlikler için ve 0-20 Hz aralığında $\pm 3,0$ mm ve $\pm 4,0$ mm genlikler için yapılmıştır. MR motor takozların yanı sıra, geleneksel hidrolik takoz ve elastomerik takoz için de aynı testler uygulanmıştır. Test sonuçları incelenerek bu takozlar arasındaki farklar açıklanmış ve MR takozlarının frekans aralığındaki karakteristiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.091

Anahtar Kelimeler : Manyeto-reolojik akışkan, MR motor takozu

Sayfa Adedi : 98

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

**MAGNETORHEOLOGICAL ENGINE MOUNT DESIGN AND
EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION**

(M.Sc. Thesis)

Tamer TÜRKCÜ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2013

ABSTRACT

In this study, engine mounts which contain magnetorheological (MR) fluid are designed and characteristics are experimentally investigated. In the beginning, MR mounts are designed using a CAD software and three different types of MR mount prototypes are build. Next, magnetostatic analysis is performed for the designed electromagnetic coil which controls the MR fluid flow. Designed MR mounts are manufactured and then tested statically and dynamically using a servo-hydraulic rate machine. Static tests are performed between 0-10 mm displacements. Dynamic tests are performed for 0-100 Hz with $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm displacements and between 0-20 Hz frequency with $\pm 3,0$ mm, $\pm 4,0$ mm displacements. Besides MR mounts, hydromount and top elastomeric mount are tested with the same test procedure. Test results are analyzed, different mount properties are explained and MR mounts characteristics in frequency domain are shown.

Science Code : 914.1.091

Key Words : Magneto-rheological Fluid, MR Engine Mount

Page Number : 98

Adviser : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca yanımda olan, beni bilgi ve tecrübeleriyle yönlendiren danışmanım Sn. Prof. Dr. Ömer KELEŞ'e, Sn. Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, bu çalışmayı 06/2011-45 kodlu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ile destekleyen Gazi Üniversitesi'ne, AR-GE tesislerinde deney imkanı sunan ve deneylerde sonuna kadar yanımda olan LASPAR A.Ş.'ye, Sn. Ali Kamil SERBEST'e ve Sn. Savaş KAYACI'ya, Hidromek A.Ş.'ye, Sn. Metin ŞİMŞEK'e, Sn. Hüseyin İNAN'a, adını buraya sığdıramadığım iş arkadaşlarıma, Balgat EML teknik öğretmenlerinden Sn. Önder DURGUN'a, TAMEM teknik öğretmenlerinden Eyüp TÜRKÜCÜ'ye, burada adını yazamadığım tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Maddi, manevi her türlü destekleri ve bana bugüne kadar öğrettikleri değerler için anneme ve babama teşekkür ederim.

Motivasyonum bir parçası olan ve makaleleri benimle birlikte okuyan sevgili eşim Gülçin'e tüm desteği için buradan ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TASARIM.....	34
2.1. Manyetik Devre Tasarımı	38
2.2. Bilgisayar Destekli Tasarım Modeli	45
2.3. Üretim	46
2.4. Dolum Düzeneği	58
3. DENEYLER.....	59
3.1. Manyetik alan şiddeti	59
3.2. Titreşim Deneyleri	62
3.3. Deney Sonuçları	70
3.3.1. Elastomer üst gövde	70
3.3.2. Hidrolik takoz	72

Sayfa

3.3.3. Takoz tiplerinin karşılaştırılması (akım kapalı).....	74
3.3.4. Takoz tiplerinin farklı akımlarda karşılaştırılması.....	77
3.3.5. MR slotlu takozun karakteristik eğrileri	81
3.3.6. MR 16 delikli takozun karakteristik eğrileri	84
3.3.7. MR 8 delikli takozun karakteristik eğrileri	86
3.3.8. Farklı genliklerde sabit akımda takoz tiplerinin karşılaştırılması.....	90
4. SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1 MR sıvısının ER sıvısı ile karşılaştırılması.....	8
Çizelge 2.1. Takoz tiplerinin isimlendirilmesi.....	46
Çizelge 2.2. MR takoz parçalarının malzeme türleri	51
Çizelge 3.1. Manyetik akı yoğunluğu değerleri (gauss)	61
Çizelge 3.2. Manyetik alan şiddeti değerleri (H, kA/m).....	61
Çizelge 3.3. Yapılan statik deneylerin listesi	68
Çizelge 3.4. Yapılan dinamik deneylerin listesi.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. MR akışkan çalışma şekli	6
Şekil 1.2. Bingham plastik modeli	7
Şekil 1.3. MR çalışma modları.....	7
Şekil 1.4. MR sıvılı amortisör	9
Şekil 1.5. Delphi magneride sistemi	10
Şekil 1.6. Sürücü koltuğu uygulaması	10
Şekil 1.7. Fren ve kavrama uygulamaları.....	11
Şekil 1.8. Kauçuk takoz örnekleri	12
Şekil 1.9. Kelvin-Voigt modeli	13
Şekil 1.10. Orifisli ve ayırıcılı hidrolik motor takozu örnekleri	14
Şekil 1.11. Ayırıcılı ve çan tasarımlı hidrolik motor takozu.....	14
Şekil 1.12. Hidrolik ve elastomerik takozlar için dinamik katılık eğrileri.....	17
Şekil 1.13. MR takoz için akışkan ve mekanik model.....	18
Şekil 1.14. MR takozun şematik gösterimi	19
Şekil 1.15. Titreşim geçirgenliği ve dinamik katılık eğrileri üzerinde kontrol eğrilerinin gösterilmesi	19
Şekil 1.16. Tipik bir ER sıvılı takoz, akış modu ve sıkıştırma modu	21
Şekil 1.17. Akış modunda çalışan MR takozun tipik bir tasarımı	22
Şekil 1.18. Kayma ve akış modlu MR takoz.....	23
Şekil 1.19. Birleşik modda çalışan MR takozun şematik gösterimi ve prototibi.....	24
Şekil 1.20. Yeni tip akış ve sıkıştırma modunu kullanan MR takoz.....	25

Şekil	Sayfa
Şekil 1.21. Motor titreşimleri	25
Şekil 1.22. Hidrolik takoz elemanları	27
Şekil 1.23. Düşük frekanslı titreşimler için tek serbestlik dereceli model.....	29
Şekil 1.24. Bağıl konum geçirgenliğinin boyutsuz frekans oranına göre değişimi ...	30
Şekil 1.25. Motor kaynaklı titreşimler için tek serbestlik dereceli model üzerinde kuvvetlerin gösterilmesi	30
Şekil 1.26. Kuvvet geçirgenliğinin boyutsuz frekans oranına göre değişimi	31
Şekil 1.27. Geçirgenliğin frekans oranına göre değişimi grafiği	32
Şekil 1.28. Hidrolik takoz dinamik katılık eğrileri	33
Şekil 2.1. MR takozun fiziksel modeli ve iç kanaldaki manyetik alan yönü	35
Şekil 2.2. Manyetik devrenin şematik olarak gösterilişi	38
Şekil 2.3. Akış kanalı boyunca manyetik alan çizgilerinin yönü	39
Şekil 2.4. MR sıvısı akma gerilmesinin manyetik alan şiddetine bağlı değişimi	40
Şekil 2.5. MR sıvısı mıknatıslanma eğrisi	40
Şekil 2.6. Kayma gerilmesi - kayma hızı ilişkisi	41
Şekil 2.7. Düşük karbonlu çelik için mıknatıslanma eğrisi.....	41
Şekil 2.8. Manyeto-statik model	42
Şekil 2.9. Manyetik Akı çizgileri	43
Şekil 2.10. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı	44
Şekil 2.11. Manyetik alan şiddeti	44
Şekil 2.12. Tasarımı yapılan MR takoz.....	45
Şekil 2.13. İlk tasarlanan MR motor takozu	47
Şekil 2.14. Nüve (yana ayrılan tasarım).....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 2.15. Slotlu tip ara plakalı MR motor takozu.....	49
Şekil 2.16. Delikli tip ara plakalı MR motor takozu	50
Şekil 3.1 Farklı kanal genişlikleri için manyetik alanın akıma göre değişimi	62
Şekil 3.2. Tipik bir servo-hidrolik test ünitesi konfigürasyonu	63
Şekil 3.4. İletilen kuvvet ve vektörler	65
Şekil 3.4. Üst elastomer için kuvvet - yer değiştirme eğrisi	71
Şekil 3.5. Üst elastomer dinamik katılığının frekansa göre değişimi	71
Şekil 3.6. Üst elastomer sönüm katsayısının frekansa göre değişimi	72
Şekil 3.7. Hidrolik takoz için kuvvet - yer değiştirme eğrisi	72
Şekil 3.8. Farklı genliklerde dinamik katılığın frekansa göre değişimi	73
Şekil 3.9. Frekansa göre titreşim geçirgenliğinin değişimi	74
Şekil 3.10. $\pm 0,1$ mm genlik için dinamik katılığın frekansa göre değişimi	74
Şekil 3.11. $\pm 1,0$ mm genlik için dinamik katılığın frekansa göre değişimi	75
Şekil 3.12. $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	76
Şekil 3.13. $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	76
Şekil 3.14. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	78
Şekil 3.15. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	79
Şekil 3.16. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	80
Şekil 3.17. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	81

Şekil	Sayfa
Şekil 3.18. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	82
Şekil 3.19. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	82
Şekil 3.20. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	83
Şekil 3.21. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	83
Şekil 3.22. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	84
Şekil 3.23. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	85
Şekil 3.24. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	85
Şekil 3.25. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	86
Şekil 3.26. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	87
Şekil 3.27. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi	88
Şekil 3.28. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	89
Şekil 3.29. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi	89
Şekil 3.30. MR 16 delikli takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi	90
Şekil 3.31. MR slotlu takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi	91
Şekil 3.32. MR 8 delikli takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi	92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. MR akışkan yapısı	4
Resim 1.2. Sismik damper uygulamaları	10
Resim 1.3. Protez bacak uygulaması.....	11
Resim 1.4. Egzersiz ünitesi ve protez bacak	11
Resim 1.5. Deneysel test araçları	16
Resim 2.1 Hidrolik motor takozu.....	46
Resim 2.2. Nüve ve elektro-mıknatıs (üste ayrılan tasarım).....	48
Resim 2.3. Üst gövde ve bağlantıları	51
Resim 2.4. Çan kısmının görünümü.....	52
Resim 2.5. MR slotlu takoz üzerinde sızdırmazlık elemanı	53
Resim 2.6. MR slotlu takozun üst ve alt plakaları	54
Resim 2.7. MR delikli takozların üst ve alt plakaları.....	54
Resim 2.8. Bobin.....	55
Resim 2.9. Elektro-mıknatıs ve nüve montajı.....	55
Resim 2.10. Farklı ölçülerdeki nüve karşılığı parçaları	56
Resim 2.11. Nüve ve nüve karşılığı parçalarının alüminyum plaka içine yerleşimi..	57
Resim 2.12. Montajı yapılmamış MR takoz	57
Resim 2.13. Dolum düzeneği	58
Resim 3.1. Gausmetre ve sabit akıma ayarlanabilir güç kaynağı	59
Resim 3.2. Nüve ve nüve karşılığı parçalarının bağlantı şekli.....	60

Resim	Sayfa
Resim 3.3. Dört farklı ölçüde nüve karşılığı parçaları	60
Resim 3.4. Deneilerin gerçekleştirildiği laboratuvar ve deney ekipmanları	64
Resim 3.5. MR takozun MTS Test Cihazına bağlanması	66
Resim 3.6. MR takozun MTS Test Cihazına bağlanması	66
Resim 3.7. MTS Landmark 200 Hz elastomerik test cihazı	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

A_i	İç kanal kesit alanı
A_p	Üst elastomer piston eş değer alanı
b	Dikdörtgen kesitli iç kanalın genişliği
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_r	Elastomer sönüm katsayısı
C_1	Üst hazne volümetrik elastikiyeti
C_2	Alt hazne volümetrik elastikiyeti
F_d	Sönüm kuvveti
F_T	İletilen kuvvet
H	Manyetik alan şiddeti
h	Kanal genişliği
L	Manyetik alanın etkili olduğu MR kanalı içindeki uzunluk
I_i	MR akış kanalındaki sıvı inertansı
K^*	Dinamik katılık (kompleks katılık)
K_r	Üst elastomerin katılığı
K_t	Kayıp katılık (viskoz katılık)
K_s	Korunan katılık (elastik katılık)
M	Titreşen gövdenin ağırlığı
P_1	Üst haznedeki sıvı basıncı
P_2	Alt haznedeki sıvı basıncı
R_i	MR akış kanalındaki sıvı direnci
ΔP_{MR}	MR sıvısının akma gerilme kuvveti sonucu oluşan basınç farkı
τ_y	Manyetik alana bağlı akma gerilmesi

Simgeler	Açıklama
ζ	Sönüm oranı
μ	Sıvının dinamik viskozitesi
x	Üst kauçuğun yer deęiřtirmesi
\dot{x}	Üst kauçuğun hızı
\ddot{x}	Üst kauçuğun ivmesi
x_i	İç kanal içindeki sıvının yer değiştirmesi
\dot{x}_i	İç kanal içindeki sıvının hızı
\ddot{x}_i	İç kanal içindeki sıvının ivmesi
Q_i	Debi
ϕ	Faz açısı
ω_{dr}	Titreşim frekansı
ω_n	Doğal frekans

Kısaltmalar	Açıklama
2D / 3D	2 Boyut / 3 Boyut
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
ER	Elektro-reolojik
HEM	Hidrolik Motor Takozu
LVDT	Doğrusal yer değiştirme sensörü
MR	Manyeto-reolojik
NVH	Gürültü, Titreşim Sertlik
TR	Titreşim geçirgenliği

1. GİRİŞ

Motor tahrik kuvvetleri, gaz basıncı ve balanssız kuvvetler taşıtlardaki başlıca titreşim kaynaklarıdır. Günümüzde kullanılan motor takozu tasarımları motordan şasiye iletilen titreşimleri sönmlemek için kabul edilebilir seviyede olsa da daha hafif ve yüksek güçlü araçların yapılmasına yönelik çalışmalardan dolayı motor bağlantılarının performansını iyileştirmeye sürekli ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Günümüz otomotiv sektörünün eğilimi, yakıt tüketimini ve emisyon oranlarını azaltmak yönündedir. V6 ve V8 motorlar için, gerektiğinde sadece 3 ya da 4 silindiri aktif çalıştıran değişken silindir yönetimi sistemi geliştirilmiş, daha fazla güce sahip ve yüksek verimlilikle çalışan hibrit sistemler tasarlanmıştır. Ancak bu sistemler gürültü ve titreşim problemlerini de beraberinde getirmiştir [2]. V6 motor mükemmel şekilde balanslıdır ancak bunu üretilmekte olan diğer 4 silindiri ve özellikle 3 silindiri motorlar için söylemek mümkün değildir. Motor ile şasi arasında ve şasi ile kabin arasında yeterli yalıtım olmaması titreşimlerin doğrudan sürücüye etki etmesine neden olur. Sürücüye etki eden titreşimlerin artması sürücünün erken yorulmasına, daha az çalışabilmesine ve hatta zaman içinde bazı fizyolojik bozuklukların oluşmasına neden olabilir.

En iyi yalıtım sistemleri aktif süspansiyonlardır ancak bu süspansiyonlar yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alındığında sadece özel ve pahalı uygulamalarda kullanılabilirler. Yarı-aktif süspansiyonlar ile aktif süspansiyonları aratmayacak sistemlerin tasarlanması mümkündür. MR akışkan, sahip olduğu çeşitli avantajlı özellikleri ile yarı-aktif sistemler arasında ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, MR sıvısı kullanılmış ve seçilen sistem için mevcut ticari uygulamada kullanılan elastomerik takozların yerine geçebilecek MR sıvılı hidrolik takozlar tasarlanmıştır. Tasarlanan ve üretilen MR takozlar, motorlarda, operatör kabinlerinde ya da titreşime maruz kalan benzer konstrüksiyonlarda kullanılacaklardır.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı taşıtlarda motor titreşimlerini ve gürültüyü azaltmaya yönelik bir MR motor takozu tasarlayarak karakteristiğinin belirlenmesidir. MR takoz da aslında bir hidrolik takozdur. Bu projedeki üretim ve yatırım maliyetlerini azaltmak için seri imal edilen bir hidrolik takozun alt ve üst elastomer parçaları kullanılarak MR takozlar tasarlanmış ve imal edilmiştir. İmal edilen 3 farklı tip prototipin statik ve dinamik testleri yapılarak karakteristikleri belirlenmiştir.

Birinci bölümde, süspansiyon sistemleri açıklanmış, MR akışkanların özellikleri, çalışma yöntemleri, bu akışkanların avantajları ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Ardından literatür araştırmasına yer verilmiş, motor takozlarının görevleri, özellikleri ve tipleri açıklanmıştır. Kauçuk takozlar, geleneksel hidrolik takozlar, Elektro-Reolojik (ER) ve MR sıvılı takozlar ayrı ayrı anlatılmıştır.

İkinci bölümde tasarım kriterleri anlatılmış, manyetik devre hakkında bilgi verilmiş, MR takozun matematiksel modellemesi örnek olarak verilmiştir. Ayrıca, takozun üretim aşamaları ve üretilen parçalar daha detaylı incelenmiştir. Üç farklı tip MR motor takozu tasarlanmış ve tasarım detayları bu bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmanın detayları verilerek deney sonuçları grafikler halinde sunulmuştur. Grafiklerin incelenmesi neticesinde, geliştirilen motor takozlarının karşılaştırılması yapılarak karakteristikleri belirlenmiştir.

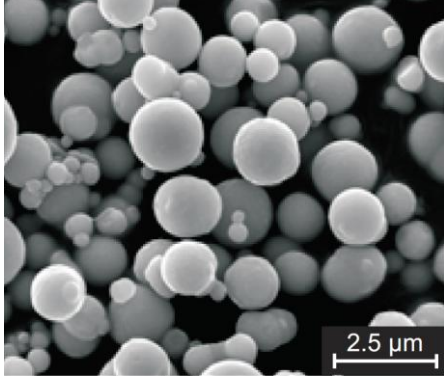
Dördüncü ve son bölümde sonuçlar özetlenmiş, sonraki çalışmalara yardımcı olması amacıyla tavsiyelerde bulunulmuştur.

Süspansiyon Sistemleri

Süspansiyon sistemleri pasif, yarı-aktif ve aktif olmak üzere üç gruba ayrılır. Pasif süspansiyon sistemleri bir enerji sönümleyen damper elemanından ve bir enerji depolayan yay elemanından oluşur. Bu sistemler, sisteme enerji veremedikleri için pasif sistemler olarak adlandırılırlar. Aktif sistemde pasif sistemdeki yay ve damper çıkarılarak yerlerine bir aktüatör getirilir. Sistem üzerindeki sensörlerden gelen bilgiye göre kontrolcü aktüatörün sisteme uygulaması gereken tepki kuvvetini hesaplayarak sistemde oluşan titreşim kuvvetlerine karşılık sönüm kuvveti oluşturur. Aktif süspansiyon sistemi harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Ayrıca sistemin karmaşıklığı, emniyeti, maliyeti ve ağırlığı bu sistemler için önemli bir dezavantajdır. Aktif süspansiyonların karmaşıklığından ve maliyetinden kaçınmak için yarı-aktif süspansiyon sistemleri tasarlanmıştır. Pasif sistemlerdeki yay yarı-aktif sistemlerde de vardır ancak damper yerini çalışma şartlarına göre ayarlanabilir dampere bırakmıştır. Orifis alanını dolayısıyla akışa karşı direnci değiştirerek damper kuvveti ayarlanır [3].

Aktif süspansiyon sistemleri performans açısından en iyisidir. Ancak yatırım ve işletme maliyetleri çok yüksek olduğu için sadece özel uygulamalarda tercih edilir. Yarı-aktif süspansiyon sistemleri performans açısından aktif sistemler kadar iyi olmasalar da çok az güç gerektirir. Sistemin tasarım yöntemi ile çok iyi sonuçlar alınabilmektedir. Bu konuda yapılan araştırmaların yoğunluğu ve teknolojinin gelişmesi ile yarı-aktif sistemler aktif sistemlerin yerini almaya başlamıştır. Pasif sistemler, aktif ve yarı-aktif sistemlere göre performans açısından daha kötü olmakla beraber maliyet açısından her ikisinden de ucuzdur ve sistem olarak daha basittirler. Doğru seçilen parametreler ile pasif sistem güvenlik için gerekli sönümleme kabiliyetine sahiptir.

MR Akışkan ve Özellikleri



Resim 1.1. MR akışkan yapısı [4]

Reoloji, malzemelerin deformasyon ve akış özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. MR akışkanlar, viskoz bir sıvı içinde mikron boyutunda metal partiküller içeren ve uygulanan manyetik alan ile birlikte reolojik özellikleri kontrol edilebilen sıvılardır. MR akışkan; taşıyıcı sıvı, manyetik toz ve diğer katkı maddelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Taşıyıcı sıvı olarak mineral yağ, sentetik hidrokarbon yağı, silikon yağı, su ve glikol kullanılır. Manyetik toz olarak demir karbonil, demir/kobalt alaşımı, nikel alaşımları sıklıkla kullanılmaktadır. Tane boyutu 1 ila 10 mikron arasında olan manyetik tozlar hacimce %20 ila %40 oranlarında taşıyıcı sıvı içine ilave edilir. MR sıvısına ayrıca bağlayıcı maddeler, tiksotropik akışkanlar, aşınma ve sürtünme önleyici maddeler ve anti-korozif katkı maddeleri eklenerek manyetik tozların sıvı içinde çökelmemeleri ve homojen olarak dağılmaları sağlanır [5].

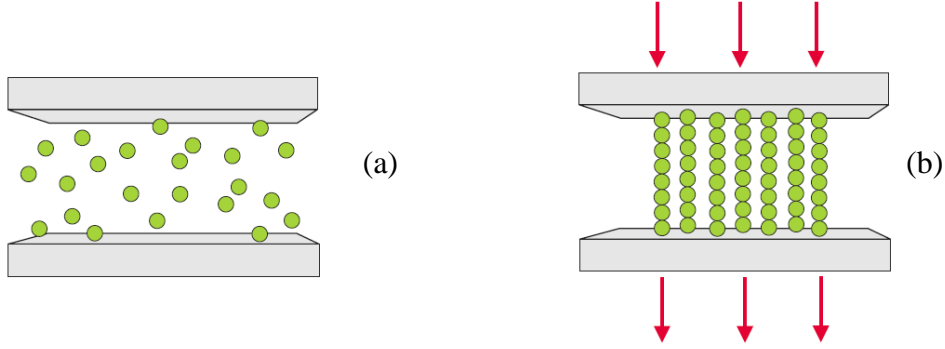
MR sıvısı ilk olarak 1948 yılında, Jacob Rabinow'un patentini aldığı kavrama uygulamasıyla ortaya çıkmıştır. Winslow, 1949 yılında MR sıvısının, kendi çalışmasında ortaya koyduğu Elektro-Reolojik (ER) sıvıya benzer özellikler gösterdiğini söylemiştir. Bu yıllarda, ER ve MR sıvısına yönelik yayınlar ve patentler alınmış; ancak ER sıvısının ticari olarak kullanılmasının zorluğu anlaşıldıktan sonra çalışmalar MR sıvısına yönelmiştir [6]. MR sıvılı yarı-aktif sistemlerin, otomobil süspansiyonlarında kullanılmasının yararları araştırılmıştır [7]. İlk olarak 2002

yılında, General Motors'un ürettiği Cadillac'ın Seville modelinde, sürekli kontrol edilebilir MR amortisörleri içeren ve standart donanıma eklenmiş; MagneRide™ süspansiyon sistemi ile ticari olarak kullanılmaya başlanmışlardır. Ardından çeşitli üreticiler tarafından başka modellerde de bu sistem uygulanmaya başlanmıştır [8]. Otomobil süspansiyonlarının yanı sıra, MR sönümleyiciler yol ve arazi taşıtlarının sürücü koltuğu süspansiyon sistemlerinde kullanılacak şekilde tasarlanmıştır [9]. Bu sistem, LORD firmasının Motion Master sürüş yönetim sisteminde ticari olarak kullanılmıştır [10]. MR sönümleyici inşaat mühendisliği uygulamalarında yer almış, binaların depreme karşı korunmasında ve köprüler üzerindeki kablo titreşimlerinin sönümlenmesinde kullanılmıştır [11].

Bir diğer uygulamada, LORD firmasının MotionMaster sistemindeki sönümleyici, Biedermann Motech GmbH firmasının geliştirdiği protez bacak uygulamasında kullanılmış; sensörler ve kontrolcü kullanılarak protez bacağa, yokuş çıkma ve inme hatta bisiklet kullanma özelliği kazandırılmıştır [12]. MR sıvılarının başka bir uygulama alanı da frenler ve kavramalar olmuştur. Lord firması tarafından üretilen MR frenler egzersiz aletlerinde, pnömatik aktüatörlerde, kablolu direksiyon sistemlerinde kullanılmıştır [4]. Bu çalışmaların yanı sıra, MR motor takozu kullanan ilk ticari uygulama 2010 model Porsche 911 GT3 olmuştur ve Delphi tarafından duyurulmuştur [13].

MR akışkanın enerjilendirilmesi

Şekil 1.1'de MR akışkana manyetik alan uygulandığında akışkanın davranışı gösterilmektedir. Manyetik alan uygulanması ile birlikte MR akışkan içindeki metal tozlar, manyetik alan yönünde sıraya dizilirler. Bu durum MR akışkanın akış yönünde akmaya karşı direncini artırır [4].



Şekil 1.1. MR akışkan çalışma şekli [4]

a) Manyetik alan uygulanmamış b) Manyetik alan tam uygulanmış

Pasif durumdayken Newton tipi akışkan olarak davranır.

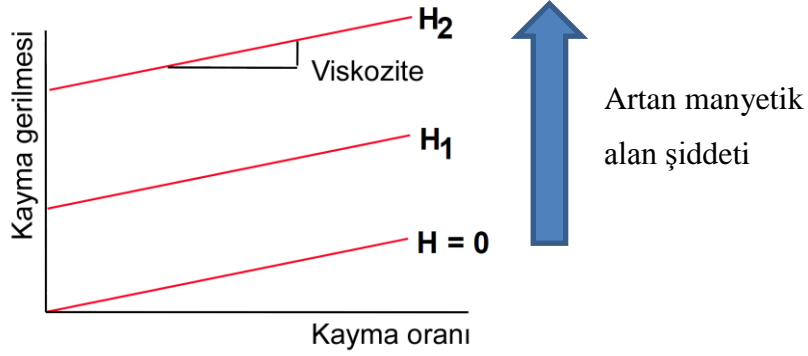
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

bağıntısı geçerlidir. Burada, τ : kayma gerilmesi [Pa] , μ : akışkanın viskozite katsayısı [Pa.s] olarak ifade edilir [14].

Bu akışkanlar, sabit sıcaklık ve basınçta sabit viskozitededir. Kayma gerilmesi ve kayma hızı arasındaki oran doğrusaldır. Manyetik alan uygulandığında yani aktif durumdayken akışkanın davranışını modellemek için yaygın olarak Bingham plastik modeli kullanılır [14].

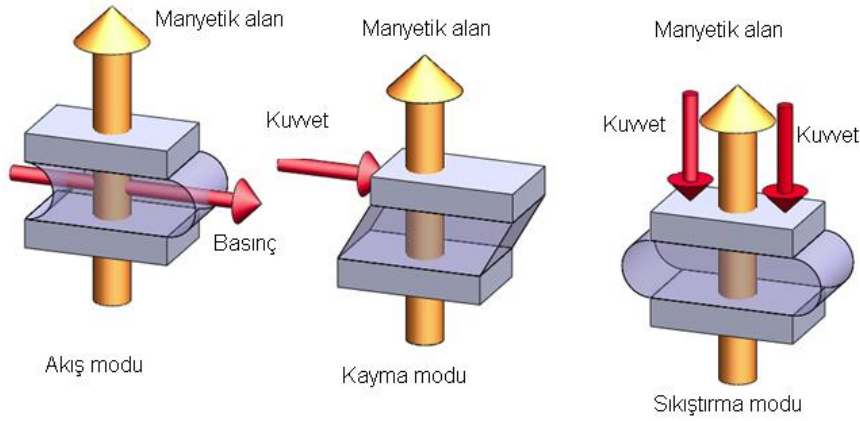
$$\tau = \tau_y + \mu \gamma \quad \tau > \tau_y \quad (1.2)$$

Bu modele göre kayma gerilmesi (τ); manyetik alan şiddetine (H) bağlı akma gerilmesi ($\tau_y + \mu \gamma$), görünür viskozite (μ) ve incelenen bölgedeki kayma hızına (γ) bağlı olarak tanımlanır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi sıvıya uygulanan manyetik alan şiddeti arttıkça akma gerilmesi artar ve bingham plastik davranışı gösterir. Manyetik alan şiddeti sıfır iken Newton tipi akışkan olarak davranırken, manyetik alan şiddeti arttıkça sıvının akmaya başlaması için gerekli kayma gerilmesi miktarı da artar. Bu ilişki Şekil 1.2’de görülmektedir [14].



Şekil 1.2. Bingham plastik modeli [14]

MR sıvılar Şekil 1.3'de gösterildiği gibi akış, kayma ve sıkıştırma olmak üzere üç farklı modda çalışırlar.



Şekil 1.3. MR çalışma modları [15]

MR teknolojinin avantajları

MR sıvılar ile 100 kPa'a kadar direnç kuvveti oluşturulabilir ve manyetik alan şiddeti değiştirilerek bu kuvvet sonsuz şekilde ayarlanabilir. 10 milisaniyenin altında tepki süresi olduğu için sistemler hızlı çalışır. Gerekli sistemler basittir ve üretim maliyetleri düşüktür. MR sıvısı çalışma sıcaklığından etkilenmez. Akışkan içindeki manyetik toz aşınmaya neden olmaz. Araçlarda 12V güç kaynakları kullanılarak rahatlıkla çalıştırılabilir ve 0 ila 2 amper gibi düşük akımlar maksimum kuvvet

oluşturmak için yeterli olur. Arıza durumunda pasif sönümlenme özelliği devam ederek geleneksel hidrolik takoz gibi davranırlar. ER sıvısı ile karşılaştırıldığında MR sıvısının bir çok üstünlüğü vardır. ER ve MR sıvılarının özellikleri Çizelge 1.1’de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. MR sıvısının akma gerilmesi ER sıvısına göre daha fazladır. Bir sistemde mekanik özelliklerin ER sıvı ile sağlanabilmesi için MR sıvısının yaklaşık iki katı aktif sıvı kullanılması gerekir. Her iki sıvı da aynı oranda güç tüketirler ancak MR sıvısı düşük voltajlı güç kaynakları ile çalışabilir. Kirliliğin ER sıvısının çalışmasını engellemesine rağmen MR sıvısı için böyle bir sorun yoktur [14].

Çizelge 1.1 MR sıvısının ER sıvısı ile karşılaştırılması [4]

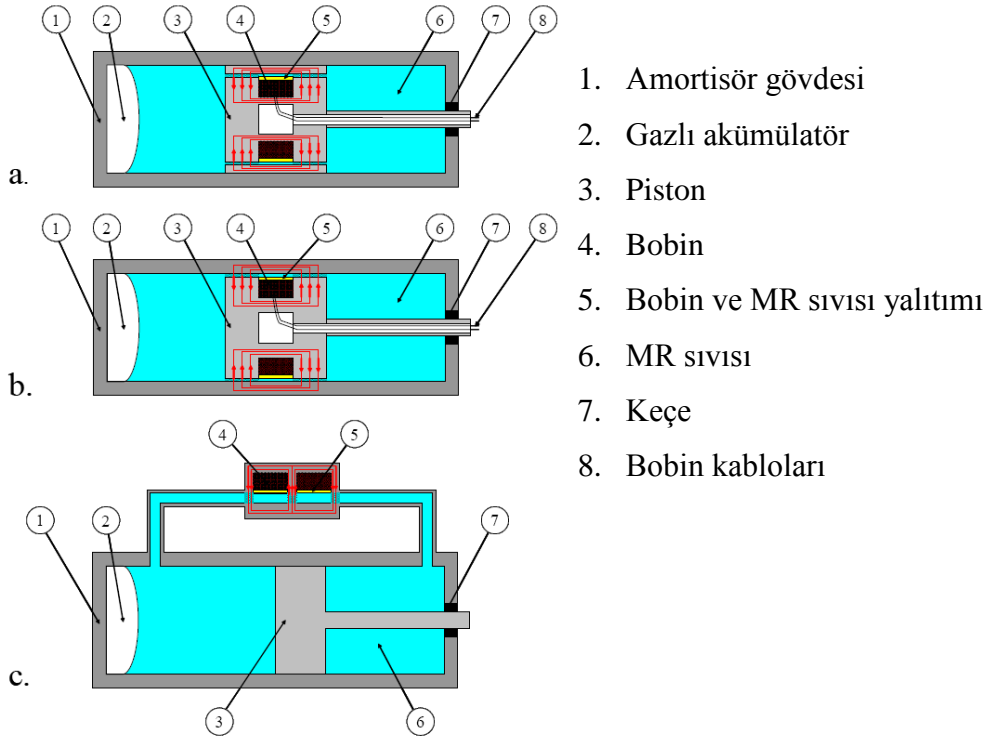
	MR	ER
Maksimum kayma gerilmesi	50 - 100 kPa	2 - 5 kPa
Maksimum alan	~ 250 kA/m (Doyma ile sınırlıdır)	~ 4 kV/mm (Arıza ile sınırlıdır)
Viskozite	0,1 - 1,0 Pa-s	0,1 - 1,0 Pa-s
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40 ila +150 °C (taşıyıcı sıvının özellikleri ile sınırlıdır)	+10 ila +90 °C (iyonik, DC) -25 ila +125 °C (iyonik değil, AC)
Stabilite	Kirlilikten etkilenmez	Kirlenmeye müsaade edilmez
Tepki Süresi	< milisaniye	< milisaniye
Yoğunluk	3 - 4 g/cm ³	1 - 2 g/cm ³
Maksimum Enerji Yoğunluğu	0,1 Joule/cm ³	0,001 Joule/cm ³
Güç Kaynağı (tipik)	2 - 25 V @ 1 - 2 A (2 - 50 watt)	2 - 5 kV @ 1 - 10 mA (2 - 50 watt)

Kullanım alanları

Amortisörler (akış modu)

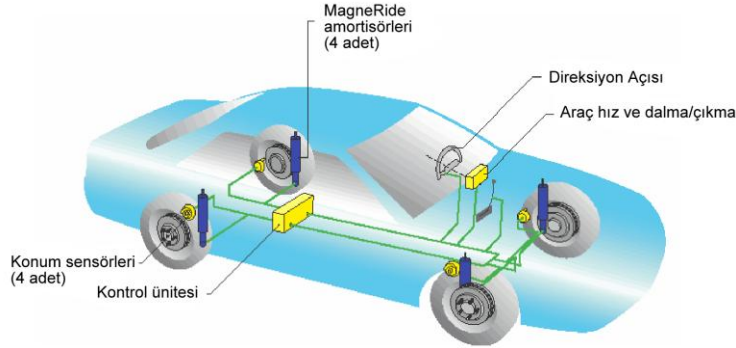
- Taşıtların ana süspansiyon sisteminde
- Sürücü koltuklarında
- Kabin süspansiyonlarında
- Arazi taşıtlarında
- Yarış otomobillerinde
- Köprülerde
- Binaların depreme karşı korunmasında
- Protez diz yapımında

MR amortisör tipleri



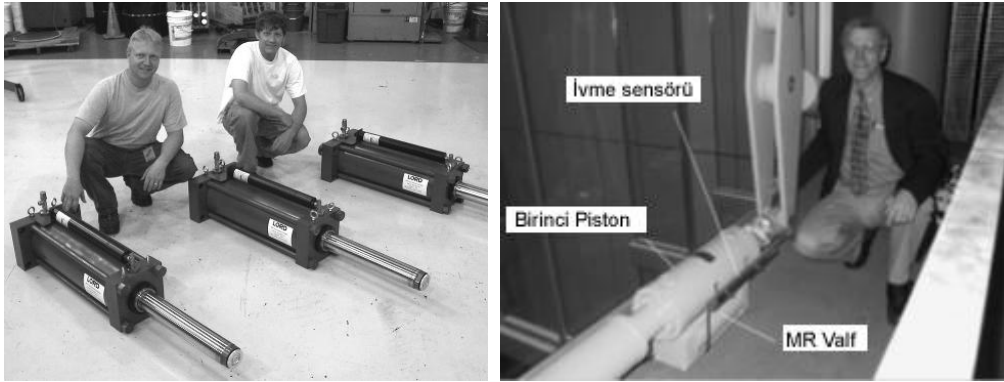
Şekil 1.4. MR sıvılı amortisör [16]

Delphi magneride sistemi



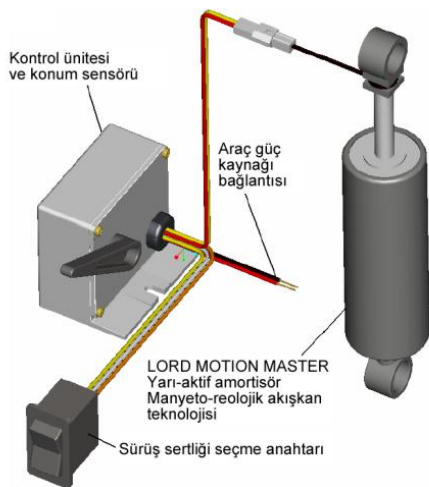
Şekil 1.5. Delphi magneride sistemi [14]

Sismik sistemler



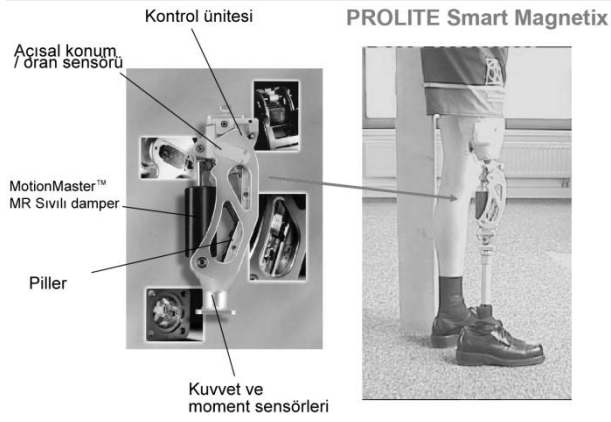
Resim 1.2. Sismik damper uygulamaları [14]

Ağır taşıtların sürücü koltuğu



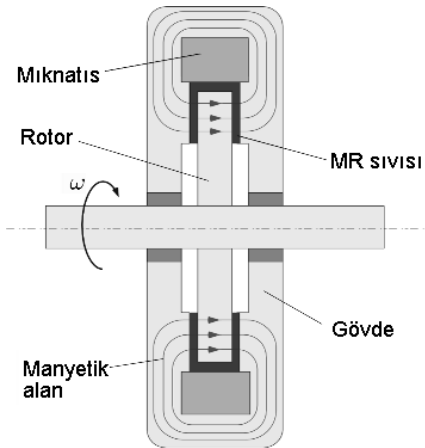
Şekil 1.6. Sürücü koltuğu uygulaması [5]

Protez bacak



Resim 1.3. Protez bacak uygulaması [5]

Frenler ve kavramalar (kayma modu)



Şekil 1.7. Fren ve kavrama uygulamaları [5]

Egzersiz ünitesi ve protez bacak



Resim 1.4. Egzersiz ünitesi ve protez bacak [4]

Motor Takozları

Yu ve arkadaşları [17] ve Korkmaz [1] araçlardaki motor askı sistemlerini literatür araştırması olarak kapsamlı şekilde incelemiştir. Kauçuk takoz, hidrolik takoz ve ER takozların motor askı sistemlerinde kullanıldıklarından bahsetmişlerdir. Motor takozları kauçuk motor takozları, hidrolik motor takozları, ER ve MR motor takozları olarak sınıflandırılarak incelenmiştir.

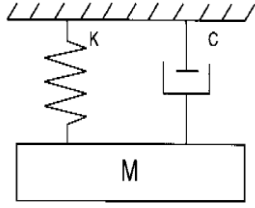
Kauçuk takozlar

Kauçuk takozlar 1930'lu yıllardan beri motor titreşimini araç gövdesinden izole etmek amacı ile kullanılmaktadır [17]. Motor yükünü ve titreşim yalıtımını sağlayacak şekilde birçok farklı tasarımları mevcuttur. Bazı örnek tasarımlar Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Kauçuk takoz örnekleri [18]

Bu takozlar genellikle lineer ya da nonlineer yay ve bir sönümleyici eleman kullanılarak modellenirler. En sık kullanılan model Şekil 1.9'da gösterilen Kelvin-Voigt modelidir.



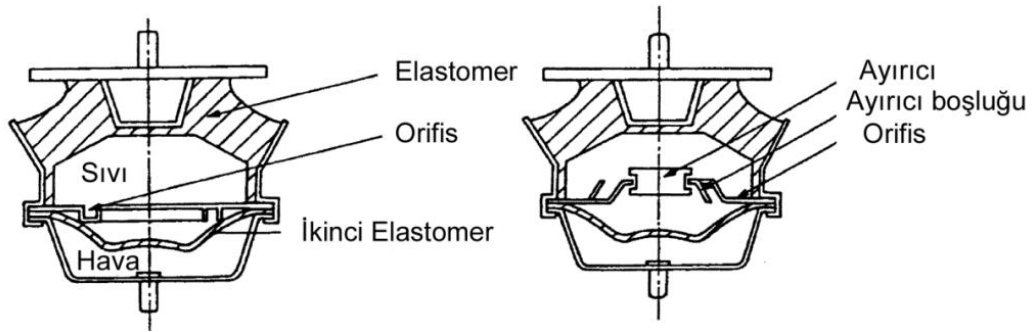
Şekil 1.9. Kelvin-Voigt modeli

Kauçuk takozların katılığı çalışma frekansına, yüke ve uzama miktarına göre nonlineer çeşitlilik gösterir. Yüksek frekanslarda dinamik katılığı genellikle düşük frekanslardaki dinamik katılığına göre yüksektir. Bu karakteristiği, geniş frekans aralığında çalışan sistemlerin tasarımını oldukça zorlaştırmaktadır. Yüksek katılıklı ve yüksek sönümlenmeli bir kauçuk takoz ile düşük frekanslarda düşük titreşim seviyeleri elde edilebilir ancak yüksek frekanslarda performansı zayıf olur. Aynı şekilde düşük katılıklı ve düşük sönümlenmeli takoz ile yüksek frekanslarda düşük gürültü seviyeleri elde edilebilir ancak bu takoz düşük frekanslarda yüksek titreşime neden olur [17]. Bu özellikler göz önünde tutularak kauçuk takozun seçiminde optimum çalışma noktasının belirlenmesi gerekir. Bu dezavantajlarına rağmen ucuz olmaları ve bakım gerektirmemeleri gibi önemli avantajları göz önüne alındığında kauçuk takozlar birçok sistemde tercih edilirler. Kauçuk takozları karakterize eden bir kaç farklı yöntem olmasına rağmen en popülerleri statik yüke göre yer değiştirme eğrilerinin incelenmesidir.

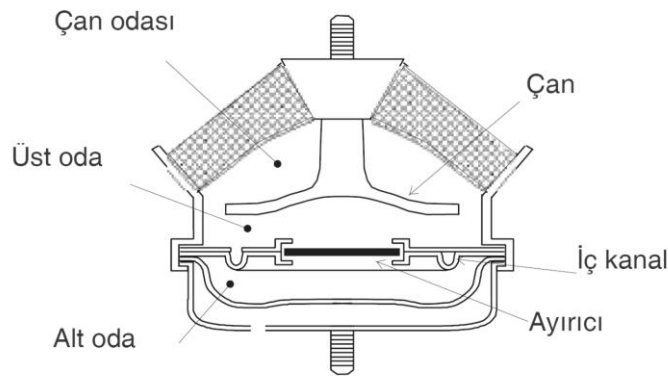
Hidrolik takozlar

1962'de Richard Rasmussen, bir hidrolik takozun patentini almıştır. Bu takozlar yüksek sönümleme özellikleri nedeniyle popüler olmuşlardır. Hidrolik takozlar kullanılarak, sürüş konforunun artırılmasının yanı sıra gürültü seviyesinde 5 dB'e varan ve şok seviyesinde 1/3'e varan düşüş sağlanmıştır [17]. Hidrolik motor takozlarının asıl özelliklerini ortaya çıkaran ilk yayın 1984 yılında Bernuchon'a aittir. Yazar, hidrolik takozun fiziksel özelliklerini anlatmış ve deneysel olarak takozun karakteristiğini belirlemiştir. Bu çalışma dinamik katılığın ve faz açısının ölçüm yöntemlerini anlatan ilk yayın olmuştur [19].

Sıvı takozların en yaygın kullanımı otomotiv güç aktarma sistemleridir. Hidrolik takozlar, karakteristik özellikleri kolaylıkla ayarlanabildiği için motor titreşimleri izolasyonunda giderek daha fazla kullanılmaktadır [1]. Çok çeşitli hidrolik takoz tasarımları mevcuttur. Bunlar konsept olarak benzerdir, fakat yapısal farklılıkları vardır. Basit orifisli hidrolik takozlara ve ayırıcılı hidrolik takozlara ait kesit resimleri Şekil 1.10'de verilmiştir. Daha gelişmiş bir tasarım da Şekil 1.11'de verilmiştir. Birden fazla orifise ve birden fazla iç kanala sahip farklı tasarımları olan hidrolik takozlar da mevcuttur [19].



Şekil 1.10. Orifisli ve ayırıcılı hidrolik motor takozu örnekleri [1]



Şekil 1.11. Ayırıcılı ve çan tasarımlı hidrolik motor takozu [19]

Basit orifisli ya da iç kanallı hidrolik takozların dinamik yay katsayıları genelde kauçuk takozlara göre daha büyüktür. Bunun sonucu olarak sönümlenme özellikleri düşük frekanslarda oldukça fazla olsa da titreşim yalıtımı özellikleri yüksek frekanslarda kötüleşir. Bu problem hidrolik takozlara eklenen ayırıcı ile çözülmüştür.

Ayırıcı, hareketi genlik ile sınırlı yüzer bir piston gibi davranır ve düşük genlikli titreşimlerde hidrolik takozun, genliğe bağımlı davranış göstermesini sağlar. Yüksek genlikli titreşimlerde takozun elastomerik takoz gibi davranmasına neden olarak, iyi titreşim izolasyonu sağlar. Aynı zamanda hidrolik takoz özelliğini de koruyarak şok titreşimlerin sönümlemesini sağlar. Hidrolik takozlarda dinamik yay katsayısı belirli frekans aralığında statik yay katsayısından daha düşük değerlere ayarlanabilir. Bu özellik çalışma frekansı sabitse çok kullanışlıdır. Sonuç olarak, hidrolik takozların frekansa ve genliğe bağlı karakteristikleri sayesinde titreşim ve gürültü izolasyonu için düşük yay katsayısı ve şoklara karşı yüksek sönüm elde edilebilir [17].

Singh ve arkadaşları [20] otomobillerde kullanılan bir hidrolik motor takozunun, frekans ve genlik ile değişen süper katılık ve sönümleme özelliği gösterebileceğini söylemişlerdir. Böyle pasif bir sistemi daha iyi anlamak için mekanik ve akışkan özelliklerini de içeren doğrusal zaman sabiti modelini oluşturmuşlar ve 1-50 Hz aralığındaki düşük frekanslarda deneysel dinamik katılık verileri ile karşılaştırarak modeli doğrulamışlardır. Tipik bir hidrolik takozun geleneksel elastomer takoz ile rezonans kontrolü ve titreşim iletimi özellikleri yönünden karşılaştırmasını yapmışlardır. 100 Hz'e kadar olan titreşimler için modelin uygunsuzluklarından ve lineer modelin diğer eksiklerinden bahsetmişlerdir.

Hidrolik takozların karakteristiğini yüksek doğruluk ile elde etmek amacıyla, Geisberger [19] hidrolik motor takozunun nonlinear bir modelini geliştirmiştir. Modelin geliştirme aşamaları çalışmada detaylı olarak anlatılmıştır. Diğer hidrolik takoz modellerinin yüksek frekansları kapsadığı ve tüm frekans aralığını kapsayan bir model olmadığı söylenmiştir. Çalışmaya hidrolik takozun lineer toplu parametrelili modelini oluşturarak başlamıştır. Daha sonra Bond grafikleri tekniğini kullanarak diferansiyel denklemleri çözmüştür. Önemli noktaların ayırıcının, iç kanalın ve çanın dinamik davranışları olduğunu söylemiştir. Nonlinear model oluşturulurken tüm kritik parametreler frekansın, genliğin ve ön yükün fonksiyonu olarak yazılmışlardır. Parametreler yay katsayısı, sönüm katsayısı, üst oda esnekliği ve direnci, alt oda esnekliği, iç kanal parametreleri ve ayırıcı parametreleridir. Akışkanın iç kanaldaki

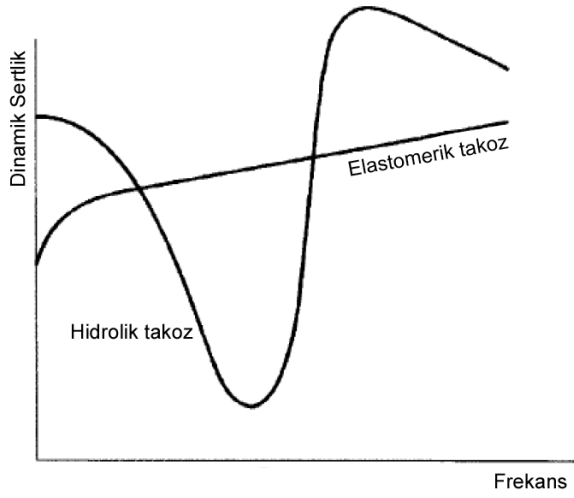
akış modeli nonlinear iki farklı parametre içermektedir, bunlardan bir tanesi laminar akış ve bir diğeri ise türbülanslı akıştır. Benzer analizler ayırıcıdaki akış için de kullanılmıştır. Ayrıca ayırıcıdaki kaçak akış yüksek dirençli akışı göstermek için eklenmiştir. Oluşturulan sistem parametrelerinin gerçek değerleri özel test aparatları kullanılarak deneysel olarak bulunmuş ve modelin cevabını doğrulamak için kullanılmıştır.



Resim 1.5. Deneysel test araçları [19]

Parametrelerin fonksiyonlarını tanımlamak için üst ve alt hazneler ayrı ayrı test edilmiştir. Ayırıcı ve iç kanal parametrelerinin elde edilmesi için bu parçalar birbirinden bağımsız olarak test edilmiştir. Elde edilen parametreler daha önce oluşturulan modelin simülasyonları için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarının dinamik katılık ve basınç farkı açısından deneylerle uyumulu olduğu bildirilmiştir. Oluşturulan modelin hem düşük hem de yüksek frekanslarda, hidrolik takoz davranışlarını temsil ettiği söylenmiştir.

Hidrolik takoz ve elastomerik takozlar için örnek dinamik katılık eğrisi Şekil 1.12'de verilmiştir. Elastomerik takozda dinamik katılığın sabit olduğu ya da çok az değiştiği bu eğriden görülmektedir. Hidrolik takozun dinamik katılık eğrisinde bir dip frekans bir de zirve frekans bulunmaktadır. Bu takozlarda dip frekans sistemde en fazla oluşan titreşime göre ayarlanır. Elastomerik ya da hidrolik takozlar belirli frekanslarda farklı dinamik katılık oluşturamazlar [15].



Şekil 1.12. Hidrolik ve elastomerik takozlar için dinamik katılık eğrileri [15]

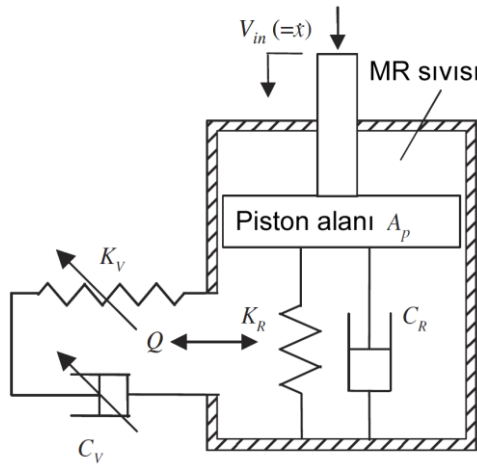
Ushijima ve Takano [21] pasif hidrolik takozların taşıtların çalışması sırasında tüm problemlere çözüm olmadıklarını belirtmiştir. Hidrolik takozların basit sinüzoidal girişlere mükemmel cevap verdiğini ancak farklı birleşik girişlere ayırıcı plakının nonlineerliğinden dolayı yeterli cevap veremediklerini ifade etmiştir. Sistemlerinin dinamik cevabı frekansa, genliğe ve yapısal parametrelere bağlı olduğu için hidrolik takozlar kısmi titreşim problemlerinin çözümü için çok uygun oldukları halde çalışma frekans aralığı arttığında yetersizlikleri olduğu belirtilmiştir [19].

Bu yetersizliği gidermek için yarı-aktif sistemlerin adapte edildiği ifade edilmiştir. Bu sistemlerde yay katsayısı ya da sönüm katsayısı kontrol edilerek sistemin cevabı değiştirilmiştir. ER sıvısı, viskozite özelliklerinin hızla değiştirilebilmesi nedeniyle motor takozlarında çok ilgi görmüştür [19].

ER ve MR takozlar

MR takozlar da aslında birer hidrolik takozdur. Bu nedenle, MR ve hidrolik takozlar bir çok benzerliğe sahiptir. Belirgin bir farklılık olarak, tipik bir hidrolik takozda hidrolik yağ, glikol veya benzeri sıvılar kullanılırken; MR takozda MR sıvısı kullanılır. Enerjilendirilerek performansı kontrol edilebilen MR takoz, enerjisi kesildiğinde hidrolik takoz olarak görev yapmaya devam eder.

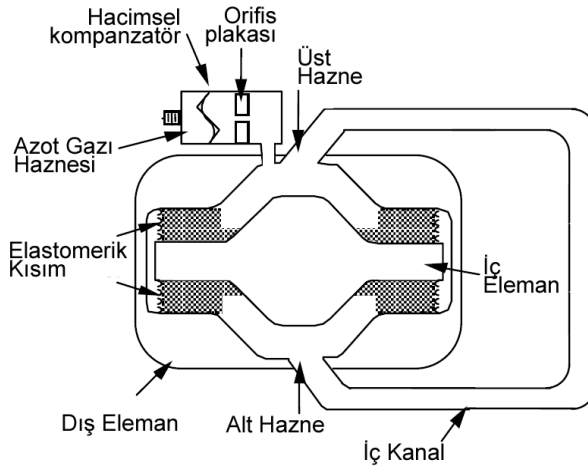
Yarı-aktif MR takozu sistemleri ile ilgili çalışmalar hidrolik takoz sistemlerinin değiştirilerek MR sıvısı ile yarı-aktif kontrolünden oluşur. Ahn ve arkadaşları [6], otomobillerde kullanılan ve gün geçtikçe sayısı artan elektronik sistemleri titreşimlerden korumak için MR sıvısı kullanan küçük boyutlu bir takoz geliştirmiştir. Bu takozun (Şekil 1.13) performansını deneysel olarak incelemiş ve sönümleme mekanizmasını analitik olarak hesaplanmışlardır.



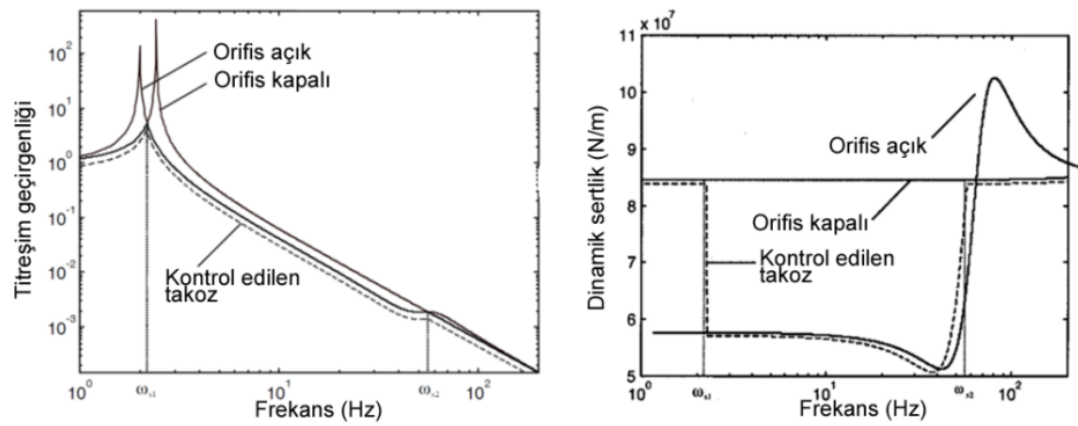
Şekil 1.13. MR takoz için akışkan ve mekanik model [6]

Bu araştırmacıların diğer bir çalışmasında [22], açık ve kapalı iç kanal kullanımının hidrolik takozların performansına etkisi gösterilmiştir. Bu çalışmada üst ve alt haznesi MR sıvısı ile dolu ve bir iç kanala sahip geleneksel bir hidrolik takoz kullanılmıştır. MR sıvısının akış (valf) modunu kullanan bu takozun (Şekil 1.14) valf kapalı konumda ve valf açık konumda olmak üzere iki fonksiyonu vardır. Valf açık konumda iken takoz sıradan bir hidrolik takoz gibi davranır. Valf kapatıldığında

takoz kauçuk takoza benzer davranış gösterir. Her iki durum için matematiksel modeller oluşturulmuştur. En düşük dinamik katılığı titreşim geçirgenliğini elde etmek üzere bu değerlerin frekansa göre değişim grafikleri Şekil 1.15'deki gibi oluşturulmuş ve kontrol eğrileri bu grafikler üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, hassas analiz yapılarak takozun parametrelerinin takozun karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elastomerin katılığı, iç kanal, sıvı rezistansı, piston alanı ve volümetrik elastikiyetin etkilerinin takozun titreşim geçirgenliği üzerindeki etkileri araştırılmış ve elastomerin yay katsayısının, piston alanının ve volümetrik elastikiyetin takozun titreşim performansı üstünde büyük etkileri olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1.14. MR takozun şematik gösterimi [22]

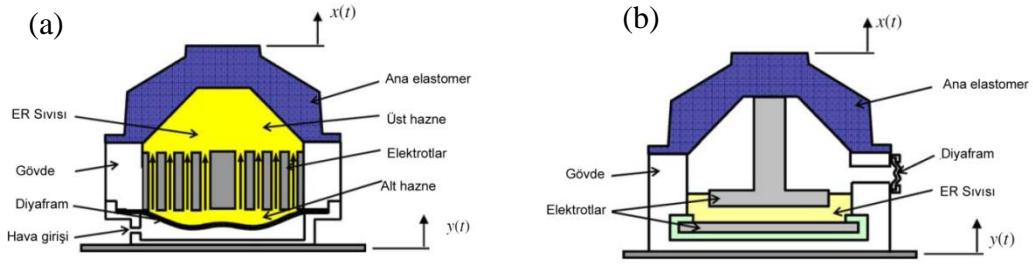


Şekil 1.15. Titreşim geçirgenliği ve dinamik katılık eğrileri üzerinde kontrol eğrilerinin gösterilmesi [22]

Stelzer ve arkadaşları [23], otomobil şasisi üzerindeki kompresörün yüksek frekanslı titreşimlerini sönümlemek için MR izolatörlü yarı-aktif sistemin modelini oluşturmuşlardır. Simülasyon çalışması ile pasif ve yarı-aktif sönümleyici arasındaki farkları araştırmışlardır. Düşük geçiş filtresi kullanmanın etkilerini göstermişlerdir. Filtrelemenin açık ve kapalı konumları ile pasif sisteme göre daha fazla kararlılık ve titreşim yalıtım performansı elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Carlson ve Jolly [24]; MR sıvı, MR köpük ve MR elastomerlerin akıllı malzemelerin çeşitleri olduklarını ve manyetik alan ile birlikte reolojik özelliklerinin kontrol edilebildiğini duyurmuştur. MR sıvıların akış ve kayma özellikleri kullanılarak, bu sıvıların tork transferi ya da titreşim izolasyonunda kullanılabilecekleri belirtilmiştir. Emici bir matris içinde kontrol edilebilen sıvı barındıran MR köpükler sayesinde pahalı ve hassas uygulamalarda MR sıvıların faydalarından yararlanılabileceği açıklanmıştır. MR elastomerlerin ise kauçuk benzeri malzemeler oldukları ve bunların katılıkları kontrol edilebildiği için ayarlanabilir takozlar ve süspansiyon sistemlerinde kullanılabilecekleri belirtilmiştir.

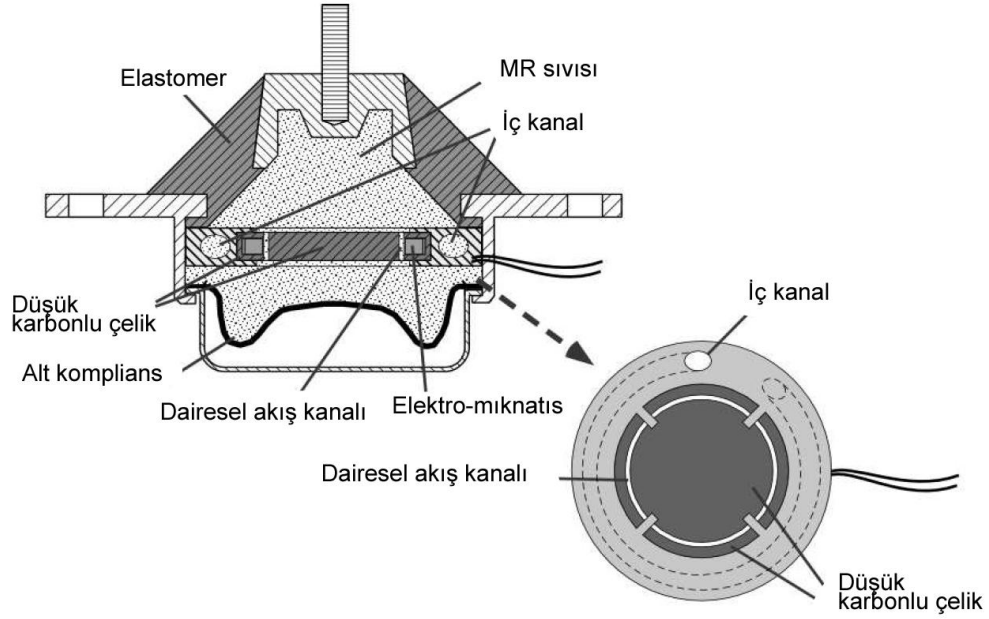
Hong ve arkadaşları [25] akış ve sıkıştırma modlarını kullanan iki farklı ER sıvılı takozu (Şekil 1.17) karşılaştırmıştır. Dinamik model formüllerini ve tasarım parametrelerini 200 kg'lık bir ön yüklemeye göre yapılmış ve her iki tip prototip üretildikten sonra elektrik alanına bağlı genlik geçirgenlikleri incelenmiştir. Daha sonra titreşimleri azaltmak için basit bir sky-hook kontrol yöntemi kullanılmış ve deneysel olarak test edilmiştir. Çalışma sonucunda sky-hook kontrol yöntemi kullanılmasının titreşim geçirgenliğini etkili bir şekilde azalttığı belirtilmiş ve sıkıştırma modunu kullanan ER takozun akış modunu kullanan ER takozu göre düşük seviye titreşimlerde daha etkili olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Tipik bir ER sıvılı takoz, akış modu (a) ve sıkıştırma modu (b) [25]

Choi ve arkadaşları [26]; otomobillerde kullanılacak bir ER takoz geliştirmiştir. Bu takozda ER sıvısının akış ve kayma modu beraber kullanılmış ve takoz tasarımı sırasında ER sıvısı modeli için Bingham plastik modeli kullanılmıştır. Daha sonra prototipi üretilmiş ve test edilmiştir. Bu takozda silindirik elektrotlar üst elemana bağlanmıştır. Böylece üst eleman hareket ettiğinde üst elektrot alt elektroda göre bağıl olarak hareket etmektedir. Araştırmacılar, elektrotlar arasındaki sıvının hem akış hem de kayma modlarında çalıştığını söylemişlerdir. Tam araç modeli simülasyonu ile takoz performansı test edilmiş ve H-sonsuz kontrolü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda sürüş şartlarının önemli derecede iyileştirildiği söylenmiştir.

Barber ve Carlson [27] LORD firmasında geliştirdikleri glikol bazlı MR sıvısı kullanan ve akış modunda çalışan MR takozu tanıtmışlardır. Bu takoz orta kısmına elektro-mıknatıs yerleştirilerek modifiye edilmiş bir hidrolik takozdur. Sıvı hacimce %22 oranında demir içermektedir ve hidrokarbon esaslı yağlara duyarlı elastomerler ile kullanılabilmesi için glikol esaslı MR sıvısı kullanılmıştır. Takoz herhangi bir matematiksel model sunulmadan deneysel olarak geliştirilmiş ve test edilmiştir.



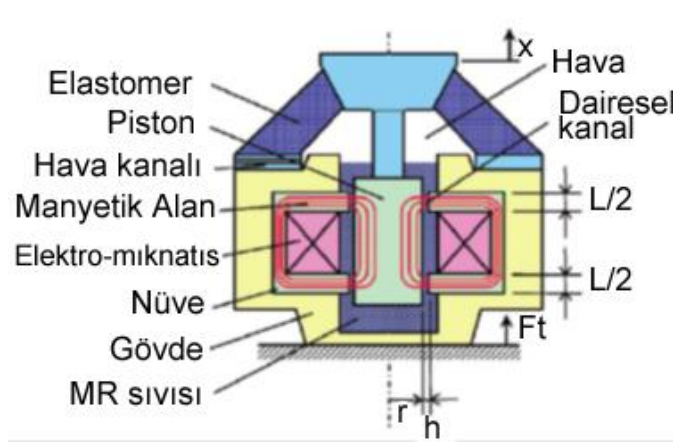
Şekil 1.17. Akış modunda çalışan MR takozun tipik bir tasarımı [27]

Takoz iki farklı konfigürasyonda üretilmiştir. Birinci takozda alt ve üst hazne arasına MR valf eklenmiştir. Diğer takozda (Şekil 1.17) alt ve üst hazne arasına MR valf ve ayrıca alt ve üst hazneyi bir birine bağlayan iç kanal eklenmiştir. İç kanal boyunca akış manyetik alan ile kontrol edilmemiştir. Takoz karakteristiğini belirlemek için dinamik katılık ve faz açısının frekansa göre değişimi incelenmiştir. MR valfli takoz sadece uygulanan akım arttırıldığında dikkat çeken bir katılık etkisi göstermiştir. Diğer taraftan MR valf ve iç kanallı takoz, geniş frekans aralığı için düşük dinamik katılık ve yüksek sönümlenme özelliğinin elde edileceği daha fazla seçenek sunmuştur. Ayrıca, sonuçlar geleneksel hidrolik takozla göre daha geniş bir aralıkta dinamik katılık göstermiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar, MR takozların titreşim kontrolüne oldukça uygun oldukları yorumunda bulunmuştur.

York ve arkadaşları [28] MR sıvı-elastomer (MRF-E) titreşim sönümleyici takoz üretmiştir. Üretilen takoz 0,1 ile 10 Hz arasındaki frekanslarda harmonik sinüzoidal titreşimler ile test edilmiştir. Test sonuçları katılığın ve sönüm kapasitesinin manyetik alanın ve genliğin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda

çok düşük de olsa frekansa bağlı olduğu görülmüştür. Yeni geliştirilen bu MRF-E takozların ayarlanabilir titreşim karakteristiği özelliğinden dolayı uygulamalarda kullanılma potansiyeli olduğu söylenmiştir.

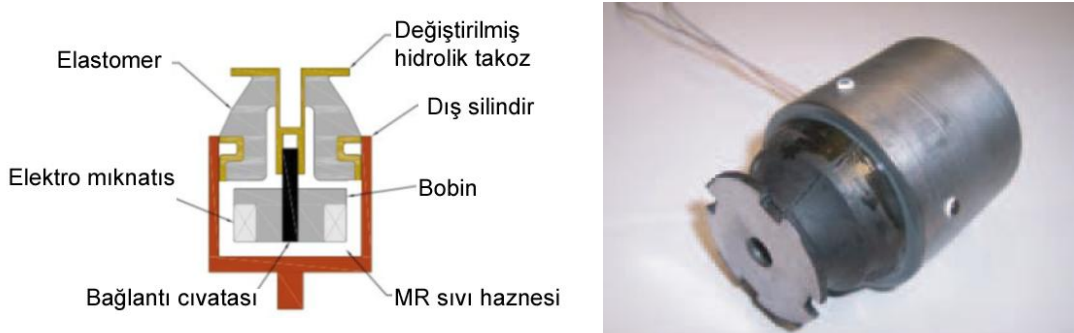
Choi ve arkadaşları [29], akış ve kayma modlarında çalışan birleşik modlu MR takoz ile bir kirişin titreşim kontrolü üzerine çalışmıştır. Takoz (Şekil 1.18) boyutsuz Bingham sayısına göre tasarlanmış ve ölçülandırılmıştır. Bu takoz hidrolik takozdan ziyade damperler gibi çalışmaktadır. Takoz üretilmiş ve test edilmiştir. Takoz daha sonra bir kiriş sisteminde titreşim sönümleyici olarak denenmiştir. Kontrol stratejileri arasından Lineer Quadratic Gaussian (LQG) kontrolü ve Kalman-Bucy filtresi (KBF) bu sisteme adapte edilmiştir. MR takoz aktif hale geldiğinde genlik ve ivme değerlerinde önemli derecede düşüş görülmüştür. Çalışmada verilen sonuçların yarı-aktif MR takozun titreşim kontrolü ve yalıtımı için otomobil ve gemi konstrüksiyonlarında kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 1.18. Kayma ve akış modlu MR takoz [29]

Brigley ve arkadaşları [30] MR sıvısının üç çalışma modunu da kullanan bir takoz (Şekil 1.19) geliştirmiştir. Bu takozda elektro-mıknatıs bobinin etrafına sarılmış ve takozun üstündeki elastomere bağlanmıştır. Takozun üst kısmı hareket edince bobinde hareket etmektedir. MR sıvı haznesi manyetik alanı ileten malzemeden yapılmıştır. Elektro-mıknatısa elektrik verildiğinde bobin ile haznenin alt kısmı arasında sıkıştırma modu oluştuğu, bobin aşağı hareket ederken hazne ile bobinin kenarları arasındaki boşlukta kayma ve akış modları oluştuğu belirtilmiştir.

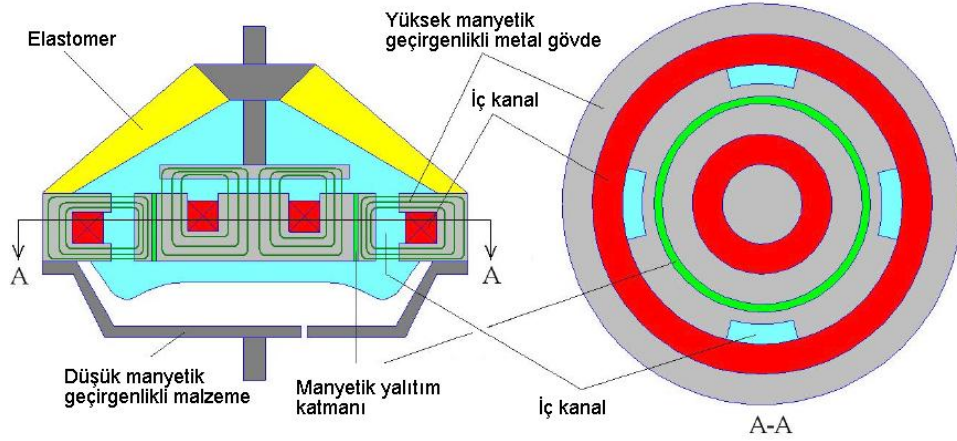
Damperin karakteristiğini bulmak için MTS test cihazı kullanılarak, eşdeğer sönüm katsayısı ve kompleks katılık değerleri araştırılmıştır. Genlik arttıkça ve frekans azaldıkça eşdeğer sönüm katsayısının azaldığı görülmüştür. Akım kapalı konumda sönüm katsayısı frekans ya da genlikle fazla değişmemiştir. Ancak frekans arttıkça elastik katılık düşmüş ve viskoz katılık artmıştır. Bingham modeline göre takozun modeli oluşturulmuş ve elastik katılık ve akma gerilmesi gibi önemli parametreler ortalama kuvvet yöntemi ile kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiklerinden bulunmuştur. Deney sonrasında elastik katılığın teorik hesaplarla örtüştüğü ancak viskoz katılığın deneylerden daha küçük olduğu söylenmiştir. Bunun nedeninin de teorik modelin düşük hızlı histerezis döngüyü veya sıkıştırma döngüsünü kuvvet-hız diyagramında göstermemesi olarak yorumlanmıştır.



Şekil 1.19. Birleşik modda çalışan MR takozun şematik gösterimi (a) ve prototipi (b) [30]

Nguyen [2], sıkıştırma ve akış modunu kullanan yeni tip bir MR takoz (Şekil 1.20) tasarlamıştır. Çalışmaya başlarken önce hidrolik takoz modeli oluşturulmuş, daha sonra MR takoz modeli geliştirilmiştir. Piston alanı, üst hazne esnekliği, alt hazne esnekliği, sıvı inertansı, sıvı rezistans, üst elastomer katılığı ve sönüm katsayısı gibi parametreler deneyler sonucunda belirlenmiştir. Takozun CAD modeli oluşturulmuş ve imalatı yapılmıştır. Akış kanallarının sayısı, daire ile dikdörtgen kesitli orifisin karşılaştırması ve manyetik alan analizleri simülasyon programlarıyla yapılmıştır. Deneylerde farklı akımlarda dinamik katılık değerlerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sönüm katsayısı $\pm 0,3$ mm genlikte farklı akımlar için karşılaştırılmıştır. Deneyler sıkıştırma modu ve akış modu için hem ayrı ayrı hem de beraber

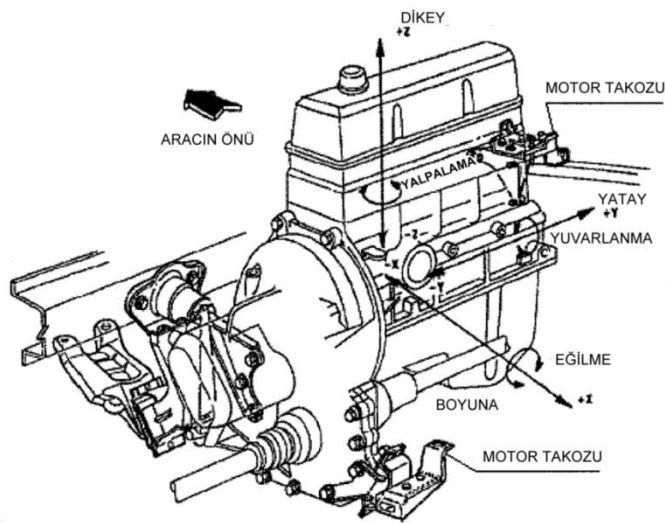
yapılmıştır. Bu çalışmada takozun havasının alınarak doğru şekilde doldurulmasının takozun çalışması için çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Simülasyon ve deneyler ile beraber MR takozun çalışmasının iyice anlaşıldığı ve matematiksel modelin doğrulandığı söylenmiştir. Akış ve sıkıştırma modlarının birbirinden etkilenmeden çalıştırılabildiği bildirilmiştir.



Şekil 1.20. Yeni tip akış ve sıkıştırma modunu kullanan MR takoz [2]

Motor titreşimlerinin kaynağı

Gaz kuvvetleri, vargel hareketi yapan parçalar, dönen parçalar motor titreşimlerine neden olurlar.



Şekil 1.21. Motor titreşimleri [17]

Motor takozundan beklenen üç temel işlev vardır [31]:

- Motorun ağırlığını taşımak,
- Motor titreşimlerinin iletimini engellemek (motorun çalışmasından ve iç yapısından gelen kuvvetler),
- Motoru yerinde tutarak aşırı hareketini engellemek (düzgün olmayan yollarda, rölantide aracın hızlanma ya da yavaşlaması anında).

Motor titreşimlerinin iletimini engellemek için motor takozlarında, yüksek frekanslarda oluşan düşük genlikli titreşimlere karşı düşük katılık ve düşük sönümleme, düşük frekanslarda oluşan yüksek genlikli titreşimlere karşı yüksek katılık ve yüksek sönümleme özellikleri aranmaktadır [17].

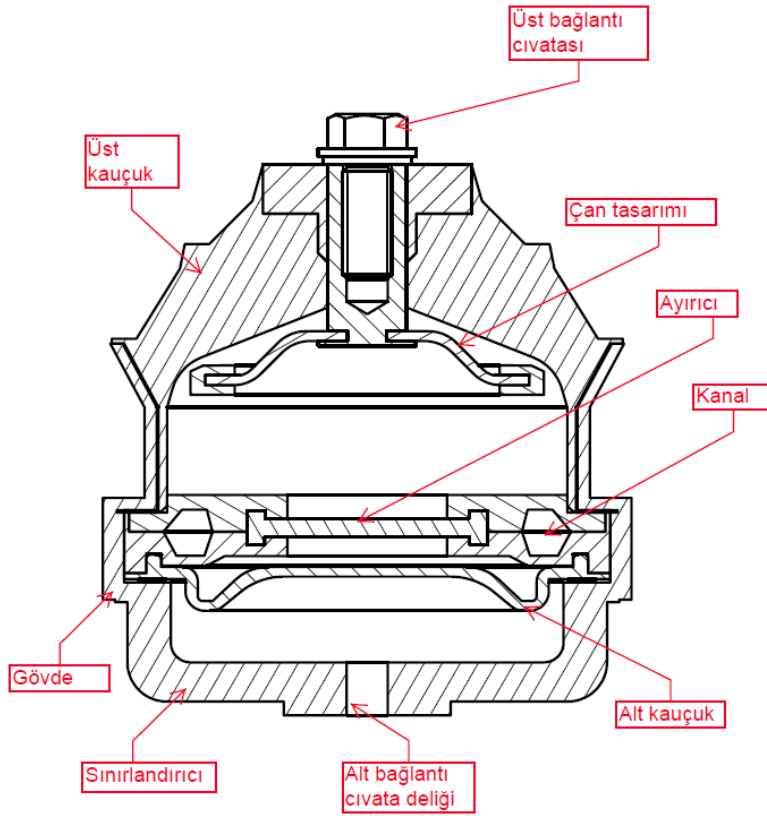
Elastomerik takozlar veya hidrolik takozlar motor takozunun birinci işlevini kolaylıkla karşılamaktadırlar. Ancak ikinci ve üçüncü işlevleri karşılamak için genliğe ve frekansa göre değişen dinamik karakteristiğe ihtiyaç duyulmaktadır. Elastomerik takozlar sistemin titreşim frekansından neredeyse tamamen bağımsız oldukları için ikinci ve üçüncü işlevleri karşılayamamaktadırlar. Modern araçlarda, daha hafif araç gövdesi ve daha güçlü motor kullanılma isteği ile birlikte, elastomerik takoz kullanılması durumunda titreşim ve gürültü seviyeleri artacağı için otomotiv endüstrisi pasif hidrolik motor takozları kullanmak zorunda kalmıştır [31].

Tipik bir hidrolik takoz aşağıdaki elemanlara sahiptir [17]:

- Motorun ağırlığını taşıyacak ve piston görevi görerek içerideki sıvıyı alt hazneye geçmeye zorlayacak üst elastomerik gövde,
- Sıvı geçişi için alt ve üst olmak üzere iki ayrı hazne,
- Sönümlemeyi sağlamak için orifis ya da iç kanal,
- Hidrolik sıvı (genellikle etilen glikol kullanılmaktadır),
- İç hazneler ile dış ortam arasında yalıtım,
- Düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşimlerin sönümlenmesi için ayırıcı.

Hidrolik Takoz ve Çalışma Prensibi

Bu çalışmada parçaları kullanılan hidrolik takozun kesiti Şekil 1.22'de gösterilmiştir. Bu takoz; gövde, üst elastomer, ayırıcı plaka grubu, alt elastomer ve sınırlandırıcı olarak isimlendirilen 5 kısımdan oluşmaktadır. Gövde, üst elastomer, ayırıcı, alt elastomer ve sınırlandırıcı elemanları içinde bulunduran kapalı bir parçadır. Sınırlandırıcı eleman bu kutunun alt kapağı gibidir. Sistemin dinamik özellikleri iç parçaların birbiri ile etkileşimi sonucu oluşur. Ayırıcı plaka grubu; üst plaka, alt plaka ve ayırıcı olmak üzere üç elemandan oluşur. Üst plaka sarsıntı önleyici, alt plaka ise ayırıcı plakası olarak da isimlendirilmektedir [19].



Şekil 1.22. Hidrolik takoz elemanları

Takoz genellikle etilen-glikol, hidrolik yağ ya da benzer bir sıvı ile doldurulur. Ayırıcı plakalar bir iç kanal ve ayırıcıyı içerir. Üst elastomer elemanın yay katsayısı

sistemden gelen kuvveti ($F = M.g$) taşıyacak şekilde seçilir. M motorun ağırlığının bir takoza gelen büyüklüğü, g yerçekimi katsayısı ve F ön yüküdür. Dört silindirli bir içten yanmalı motor genellikle şasiye üç ya da dört noktadan bağlanır. Sınırlandırıcı üzerindeki vida deliği şasiye bağlantı noktasıdır. Motorun dikey yönde yukarı hareketi ile birlikte üst odada bir vakum etkisi oluşturma eğilimi olduğundan, hidrolik takoz içinde hava kalmaması gerekir. Bunun için elemanlar bir sıvı banyosu içinde ya da vakum ortamında monte edilirler. Takoza doldurulan sıvının içinde de çözünmüş hava olmamalıdır [19].

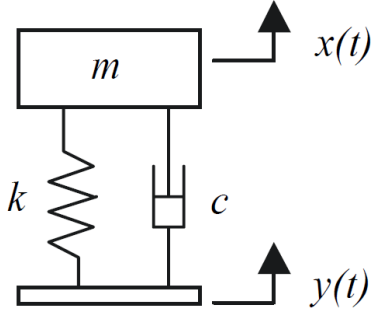
Yüksek frekanslı ve düşük genlikli titreşimler sırasında, üst haznedeki sıvı ayırıcı üzerinden kolaylıkla alt hazneye geçebilmektedir. Böylelikle hidrolik takozun dinamik katılığı ve sönümlenme özelliği düşürülür ve takoz elastomerik takoz gibi davranır. Yüksek genlikli ve şok titreşimler sırasında ayırıcı sıvının geçişini engeller. Sıvı iç kanaldan geçmek zorunda kalır ve bu da daha fazla sönümlenme ile birlikte dinamik katılığı arttırır. Kauçuk takozlara göre bu üstün özelliklerine rağmen pasif hidrolik takozlar da araçların çalışması sırasında oluşan tüm problemlere karşı yeterli değildirler [31].

İstenen Motor Takoza Karakteristikleri

Araçlarda sürücülerini etkileyen iki farklı titreşim kaynağı vardır. Birincisi, genellikle 25 ila 200 Hz arasında frekansa sahip ve genliği 0,3 mm'den düşük titreşimleri meydana getiren motorun eksantrikliğidir. Düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşimler daha çok gürültü olarak etki eder. İkincisi, yoldan gelen titreşimler ve motorun ani hızlanması ile oluşan tork sonucu meydana gelen titreşimlerdir. Bu titreşimler de genellikle 30 Hz frekansın altındadır ve 0,3 mm'den büyük genliğe sahiptirler. Bu titreşimler sürücünün yorulmasını ve sağlığını doğrudan etkileyen titreşimlerdir [19].

Yoldan gelen titreşimler

Yoldan araç gövdesine iletilen düşük frekanslı ve yüksek genlikli titreşimlerdir. İstenen takoz karakteristiğini göstermek için sistemin tek serbestlik dereceli bir modeli kullanılmıştır. Burada m motor kütleini, k yay katsayısını, c sönüm katsayısını göstermektedir [1].



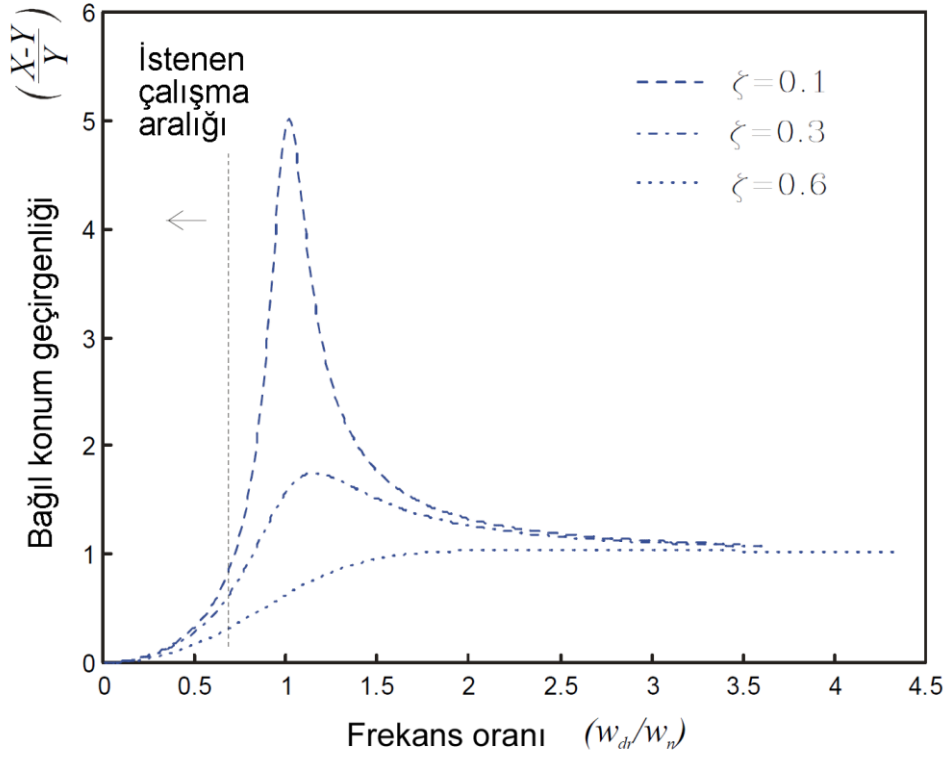
Şekil 1.23. Düşük frekanslı titreşimler için tek serbestlik dereceli model [1]

Burada, m motor kütlesi, k yay katılığı, c sönüm katsayısı, ω_{dr} titreşim frekansı ve ω_n doğal frekans, ζ sönüm oranı olmak üzere bağıl konum geçirgenliği aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$k y - x + c \dot{y} - \dot{x} = m \ddot{x} \quad (1.1)$$

$$\frac{x - Y}{Y} = \frac{\omega_{dr}^2 m}{-\omega_{dr}^2 m + \omega_{dr} c j + k} \quad (1.2)$$

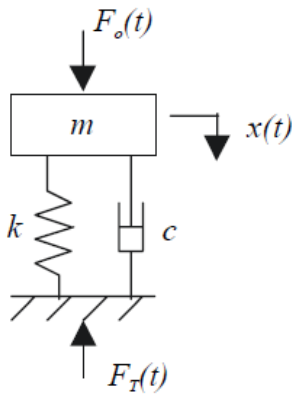
Çalışma bölgesi, Şekil 1.24'de ok ile gösterilen kısımdır. Buna göre sistemin titreşim frekansı sistemin doğal frekansından küçük olmalıdır. Takoz katılığının artması doğal frekansı artırır ve boyutsuz frekans oranını azaltır. Ayrıca sönüm katsayısının artması da rezonans genliğini azaltır ve bağıl konum geçirgenliğini azaltır [1].



Şekil 1.24. Bağıl konum geçirgenliğinin boyutsuz frekans oranına göre değişimi [1]

Motorun eksantrikliği ile oluşan titreşimler

Yüksek frekanslı, düşük genlikli titreşimlerdir. Bu titreşimler tek serbestlik dereceli model ile Şekil 1.25'de gösterilmiştir. F_0 motor dengesizliğinden kaynaklanan kuvvetleri, F_T ise takozdan gövdeye iletilen kuvvetleri göstermektedir [1].



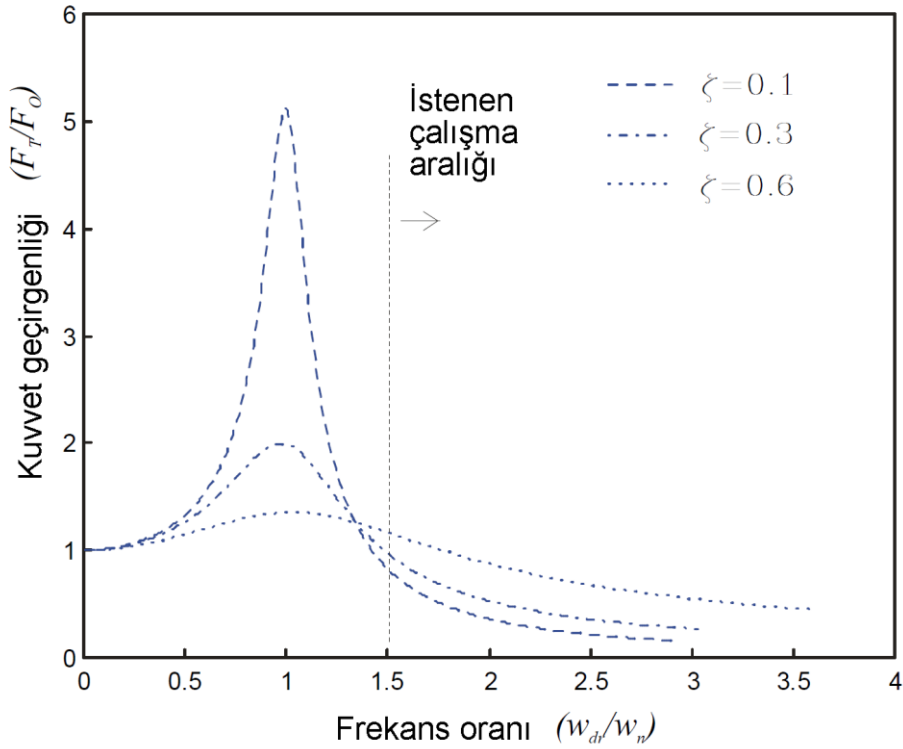
Şekil 1.25. Motor kaynaklı titreşimler için tek serbestlik dereceli model üzerinde kuvvetlerin gösterilmesi [1]

$$F_0 = mx + cx + k \quad (1.3)$$

$$F_T = cx + k \quad (1.4)$$

$$\frac{F_T}{F_0} = \frac{c\omega_{dr}j + k}{-\omega_{dr}^2 m + \omega_{dr}cj + k} \quad (1.5)$$

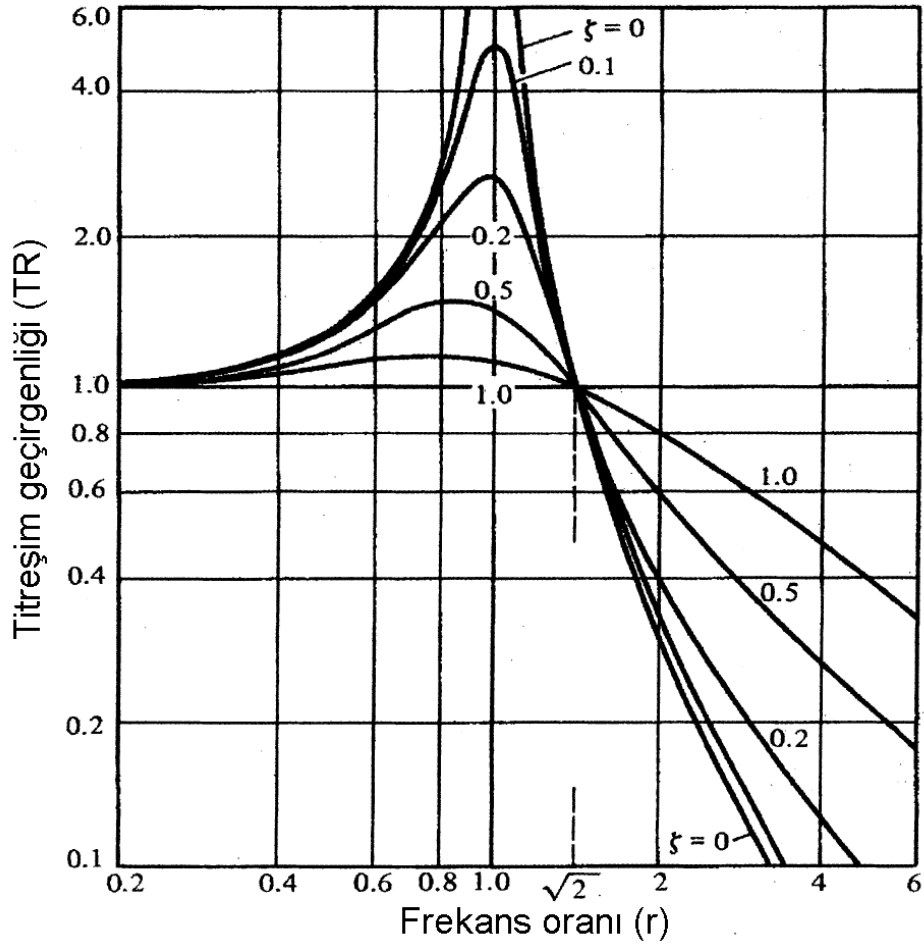
Burada, m motor kütlesi, k yay katılığı, c sönüm katsayısı, ω_{dr} titreşim frekansı ve ω_n doğal frekans, ζ sönüm oranı olmak üzere kuvvet geçirgenliği Şekil 1.26'da gösterilmiştir. Çalışma bölgesi, şekilde ok ile gösterilen kısımdır. Bu durumda motor titreşimleri motor askı sisteminin doğal frekansının üzerinde çalışmalıdır. İlk durumdakinin aksine daha esnek takozlar, doğal frekansı düşüreceğinden tercih edilir. Düşük sönümlenme oranları da rezonans bölgesinin sağına doğru gidildikçe geçirgenliği azaltmaktadır [1].



Şekil 1.26. Kuvvet geçirgenliğinin boyutsuz frekans oranına göre değişimi [1]

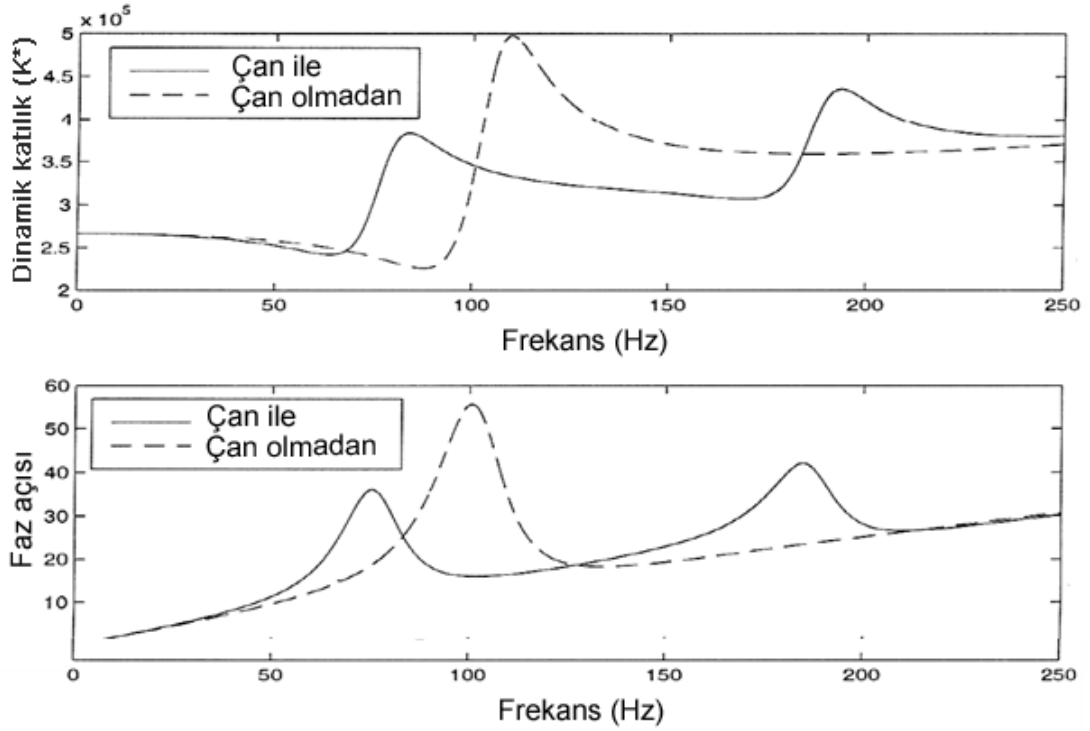
Yukarıdaki analiz bize istenen motor takozu karakteristiğini anlatmaktadır. Düşük frekanslı ve yüksek genlikli titreşimler sırasında düşük geçirgenlik elde etmek için ideal takoz yüksek katılığa ve yüksek sönümlenmeye sahip olmalıdır. Bununla birlikte yüksek frekanslı ve düşük genlikli titreşimler sırasında düşük geçirgenlik elde etmek için ideal takoz düşük katılığa ve düşük sönümlenmeye sahip olmalıdır.

Bu iki çelişkili durum göz önünde bulundurulursa ideal motor takozunun katılığı ve sönümlenme karakteristiğinin titreşim genliğine bağlı olması gerekir. Bu genliğe bağlı karakterler MR takozlar kullanılarak oluşturulabilir. Titreşim geçirgenliği eğrilerinin farklı sönüm oranlarına göre çeşitlendirilmesi Şekil 1.27'de verilmiştir. Bu eğriler titreşim sistemlerinin tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 1.27. Geçirgenliğin frekans oranına göre değişimi grafiği [17]

Hidrolik takozlarda üst hazne içindeki türbülansı gidermek için üst haznede piston görevi gören çan tasarımı takozlara eklenmiştir [19]. Çan tasarımı olan ve çan tasarımı olmayan hidrolik takozların dinamik katılık eğrileri Şekil 1.28’de verilmiştir.



Şekil 1.28. Hidrolik takoz dinamik katılık eğrileri [32]

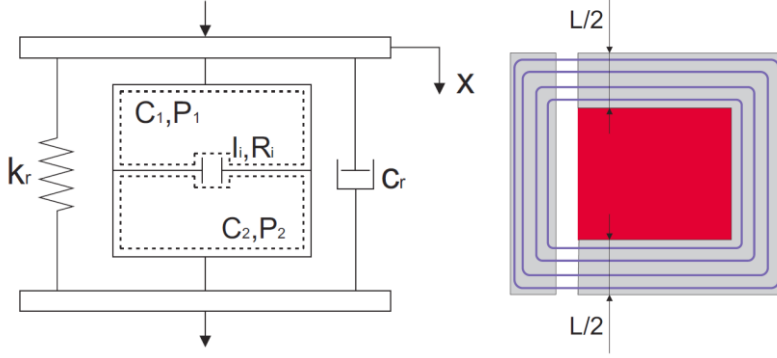
Üst haznesinde çan bulunan takoz ile daha düşük dinamik değerleri elde edildiği grafiklerde görülmektedir. Bu çalışmada parçaları kullanılan hidrolik takozun üst gövdesinde çan tasarımı bulunmaktadır.

2. TASARIM

İçten yanmalı motorlar şasiye genellikle 3 ya da 4 noktadan bağlanır. Bu çalışmada referans alınan motor şasi üzerine 3 noktadan bağlanmıştır. Motor ile şanzıman beraber montajlı olduğu için bu üç takoz her iki elemanı da taşımaktadır. Motor ile şasi arasına iki adet hidrolik takoz ve şanzıman ile şasi arasına diğer üçüncü takoz yerleştirilmiştir. Motor ve şanzıman ağırlığı toplam 300 kg olarak alınmış ve tüm takozlara eşit yük geldiği düşünülmüştür. Böylece hidrolik takoz üzerinde 100 kg yük bulunmaktadır. Daha önce, MR akışkanın enerjilendirilmesi bölümünde açıklandığı gibi MR akışkanlar; akış modu, sıkıştırma modu ve kayma modu olmak üzere üç farklı çalışma moduna sahiptirler. Bu çalışmada geliştirilen takoz akış modunu kullanmaktadır. Sistemde sıvının akışını etkileyen her hangi bir hareketli parça yoktur. Sıvı sabit bir kanal içinden akmaktadır.

MR takozun üst kısmında bir elastomer eleman bulunur. Bu eleman motorun ağırlığını taşır. Takozun orta kısmında, takozu alt ve üst sıvı haznesi olarak bölen ara plakalar ve alt kısımda alt hazneye geçen sıvıyı taşıyan bir elastik diyafram bulunur. Geleneksel hidrolik takozların aksine ara plakaların yapısı farklıdır. Plakalar içine elektro-mıknatis ve karşılıklı nüvelerden oluşan MR valf olarak adlandırılan kısım yerleştirilmiştir. MR valf içindeki elektro-mıknatisa farklı akımlarda elektrik uygulayabilmek için elektro-mıknatisa bağlanan kablo takoz dışına çıkarılır.

Nguyen tarafından oluşturulmuş MR takoz sisteminin fiziksel modeli Şekil 2.1'de verilmiştir. Nguyen, bu modelden yola çıkarak MR takozun hareket denklemlerini elde etmiştir [2]. Nguyen'ın çalışmasında geliştirdiği model hem akış modunu hem de sıkıştırma modunu kullanan bir MR takozu ait olduğu için başka kaynaklardan da yararlanılmıştır. Bu denklemlerin bir araya getirilmesindeki amaç deney sonuçlarının değerlendirilmesine yarar sağlamalarıdır.



Şekil 2.1. MR takozun fiziksel modeli ve iç kanaldaki manyetik alan yönü [2]

MR akışkanın iç kanaldan akması sonucu oluşan basınç farkı, lineer momentum denklemi yazılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır :

$$P_1 - P_2 = I_i \cdot Q_i + R_i \cdot Q_i + \Delta P_{MR} \quad (2.1)$$

Burada, P_1 üst haznedeki basınç, P_2 alt haznedeki basınç, I_i sıvı inertansı, R_i manyetik alan sıfır iken sıvının rezistansı, Q_i sıvının iç kanaldaki debisi ve ΔP_{MR} sıvının akma gerilmesinden dolayı oluşan basınç düşüşü olarak tanımlanmıştır. Sisteme süreklilik denklemi uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilmiştir :

$$P_1 = \frac{A_p}{C_1} \cdot x - \frac{Q_i}{C_1} \quad (2.2)$$

$$P_2 = \frac{Q_i}{C_2} \quad (2.3)$$

Burada, C_1 ve C_2 üst ve alt hazne volümetrik elastikiyetleri, A_p üst kauçuğun efektif piston alanı, x desteklenen kütlenin hızı, y takozun alt bağlantı noktasının hızıdır. A_i 'ye iç kanalın kesit alanı ve x_i 'ye kesit alanı içindeki akışkanın hızı denirse kanal içindeki debi (Q_i) aşağıdaki şekilde yazılmıştır :

$$Q_i = A_i x_i \quad (2.4)$$

MR etkisinin neden olduğu basınç düşüşü aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [31]:

$$\Delta P_{MR} = C \frac{L}{h} \tau_y H \text{sign}(x_i) \quad (2.5)$$

Burada, C akış durumuna bağlı olarak 2 ve 3 arasında bir değer alan sabit katsayıdır. C = 2 olarak alınmıştır. L iç kanalın içinde manyetik alanın etkili olduğu uzunluk; h, iç kanalın yüksekliğine eşit olan manyetik kutuplar arasındaki mesafedir. $\tau_y(H)$, MR sıvısının manyetik alan şiddetine (H) bağlı akma gerilmesidir. Bu çalışmada Lord firmasının MRF-132DG MR sıvısı kullanılmıştır [33]. MRF-132LD tipi sıvısı için akma gerilmesi manyetik alan şiddetinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [31]. Bu bağıntı bu çalışmada kullanılan sıvı için de kullanılabilir.

$$\tau H = 1.93H^{1.73} \quad (2.6)$$

Takozun tabanına iletilen kuvvet aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [31].

$$F_T t = K_r x + C_r \dot{x} + A_p P_1 \quad (2.7)$$

Burada, K_r elastomerin katılığı ve C_r sönüm miktarıdır.

ω_0 çalışma frekansındaki kompleks katılık aşağıdaki şekilde tanımlanır [31].

$$K_s = \lim_{\omega \rightarrow \omega_0} \frac{L(F_T t)}{L(x t)} = K_s + jK_t \quad (2.8)$$

Burada; L, Laplace transformu ve $s = j\omega$. K_s depolanan katılık ve K_t kayıp katılıktır. Dinamik katılık K^* ve kayıp açısı (ϕ) aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$K^* = \sqrt{K_s^2 + K_t^2} \quad (2.9)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{K_t}{K_s}\right) \quad (2.10)$$

Sıvı inertansı (I_i) ve sıvı rezistansı (R_i) aşağıdaki şekilde yazılmıştır [2].

$$I_i = \rho L / A_i \quad (2.11)$$

Burada, ρ sıvının yoğunluğu, L akış kanalının uzunluğu ve A_i akış kanalının kesit alanıdır.

Dairesel kesitli akış kanalı için sıvı rezistansı :

$$R_i = \frac{128\eta L}{\pi d_i^4} \quad (2.12)$$

Burada, η sıvının viskozitesi, L akış kanalının uzunluğu, d akış kanalının çapıdır.

Dikdörtgen kesitli akış kanalı için sıvı rezistansı :

$$R_i = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (2.13)$$

Burada, η sıvının viskozitesi, L akış kanalının uzunluğu, b dikdörtgenin genişliği, h dikdörtgenin yüksekliğidir.

Bu çalışmada literatürdeki MR takoz modelleri incelenmiş ve sadece akış modunu kullanan MR takoz modeli alınmıştır. MR takoz da bir hidrolik takoz olduğu için, MR takozun analitik modeli genellikle hidrolik takoz modeli üzerine kurulur. MR çalışma modu ve takoz yapısına uygun olarak modele MR etkisi eklenir.

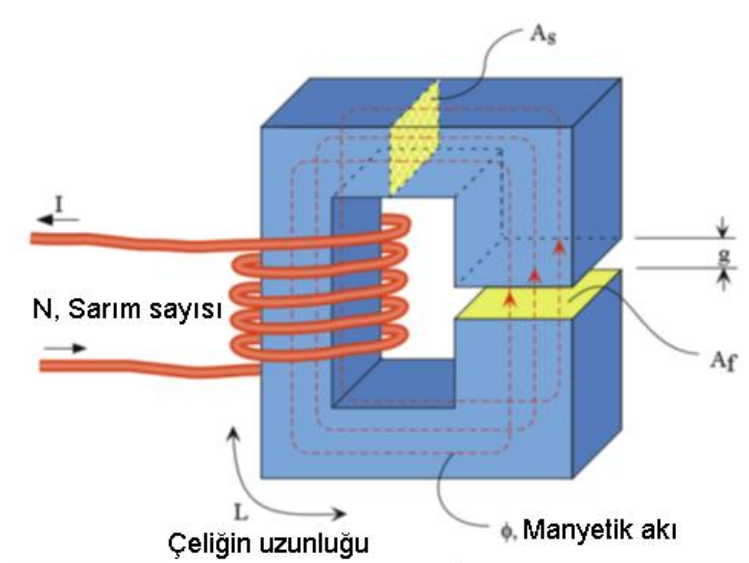
Hidrolik takozun performansını etkileyen başlıca parametreler [19] aşağıdaki gibidir:

- Kauçuk kısmın yay katsayısı,
- İç kanal,
- Sıvı rezistansı,
- Efektif Piston Alanı,
- Volümetrik elastikiyet.

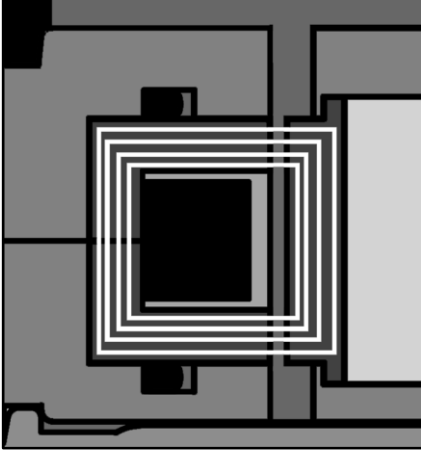
2.1. Manyetik Devre Tasarımı

MR sıvısının viskozitesini arttırarak akışını yavaşlatmak için yeterli akma gerilmesi oluşturulması gerekir. MR sıvısının akma gerilmesini arttırmak için sıvının akış kanalı içindeki manyetik alan şiddeti arttırılmalıdır. Bu çalışmada LORD firmasından alınan MRF-132DG sıvısı kullanılmıştır [33]. Manyetik alan şiddeti ile sıvının akma gerilmesinin değişimi Şekil 2.4’de verilmiştir. Sıvısının üst haznedan alt hazneye aktığı kanal içinde yeterli miktarda manyetik alan şiddeti olduğundan emin olmak için sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla statik manyetik analiz yapılmıştır. MR takoz tasarımında en çok dikkat edilmesi gereken problemlerden biri manyetik devre elemanlarını doğru şekilde yerleştirmek ve boyutlarını belirlemektir.

Aktif manyetik sıvının üzerinde (kanal içinde) gereken miktarda manyetik alan oluşmasını sağlayacak düşük manyetik dirençli malzeme kullanılması gerektiğinden dolayı düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Kanal içinde manyetik alan şiddeti maksimum ve kayıplar minimum olmalıdır. Çeliğin içindeki manyetik alan şiddetini (H) çok düşük tutmak için, çeliğin kesiti minimum olmalıdır.



Şekil 2.2. Manyetik devrenin şematik olarak gösterilişi [34]



Şekil 2.3. Akış kanalı boyunca manyetik alan çizgilerinin yönü

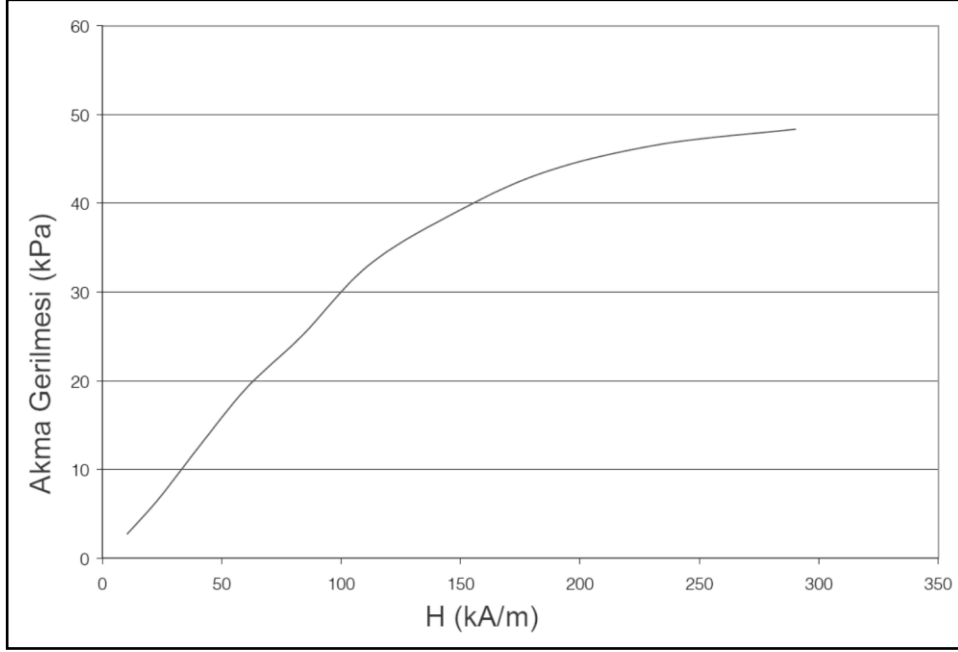
MR sıvısı için maksimum ulaşılabilecek manyetik alan şiddetine bağlı akma gerilmesi Şekil 2.4'den 300 kA/m olarak alınmıştır. Bu değere karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu (B) Şekil 2.5'den 1 Tesla olarak bulunmuştur.

$\Phi_{MR} = B_{MR} \cdot A_{MR}$ denkleminde $\Phi_{MR} = 24 \cdot 10^{-6}$ bulunmuştur. Manyetik akının sürekliliğine göre $\Phi_{MR} = \Phi_{çelik}$ 'dir. $B_{çelik} = \Phi_{çelik} / A_{çelik} = \Phi_{MR} / A_{çelik}$ denklemi kullanılarak $B_{çelik} = 0,96$ T hesaplanmıştır. $B_{çelik}$ değerine karşılık gelen çeliğin $H_{çelik}$ değeri Maxwell Student Version programı içinde verilen çeliğin B-H eğrisi üzerinden bilinen noktaların interpolasyonu yöntemiyle $H_{çelik} = 620,8$ A/m olarak hesaplanmıştır.

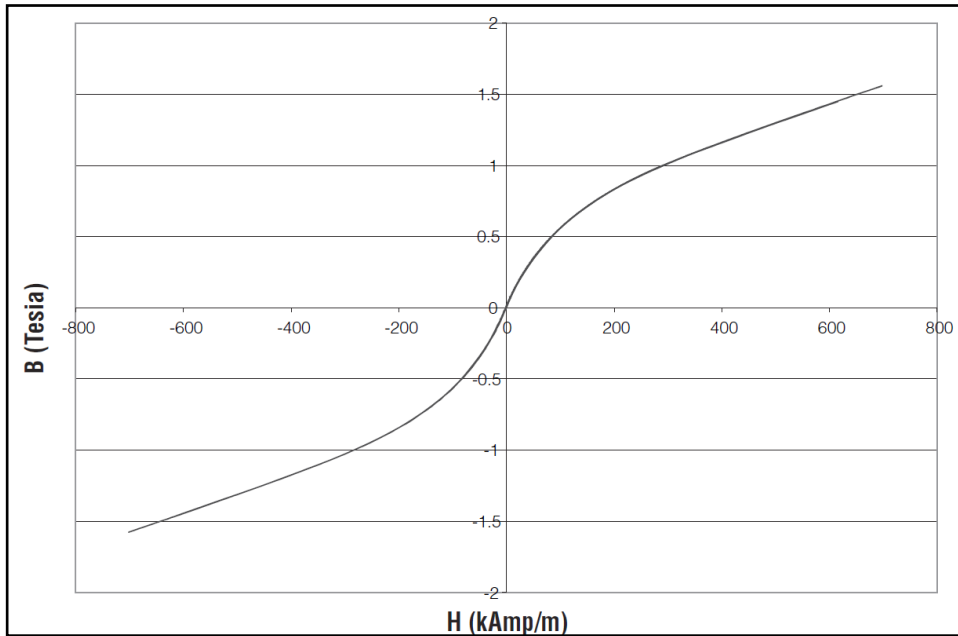
Kirchoff'un manyeto-motor kuvvet kanununa göre kapalı bir manyetik devredeki manyeto motor kuvvet devre elemanlarının manyetik alan şiddetleri ile uzunluklarının çarpımlarının toplamına eşittir.

$M.M.K = \sum H_i \cdot L_i$ denkleminde yazılmıştır ve $N.I = H_{çelik} \cdot L_{çelik} + H_{MR} \cdot h$ denkleminde $N.I = 492,4$ olarak hesaplanmıştır. Elektro-mıknatıs $N = 400$ sarım olarak alındığı için $I_{max} = 1,23$ A bulunmuştur. Burada bulduğumuz değer MR sıvısının akma gerilmesini doyma seviyesine kadar ulaştırmak için uygulanması

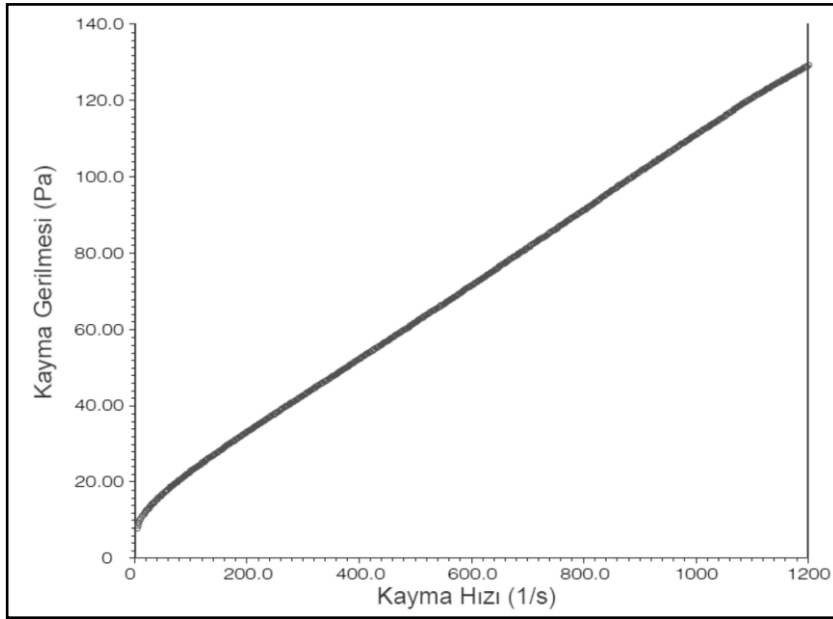
gereken akımı gösterir. Bu akım değerinden sonra MR sıvısının akma değerinde değişiklik olmaz.



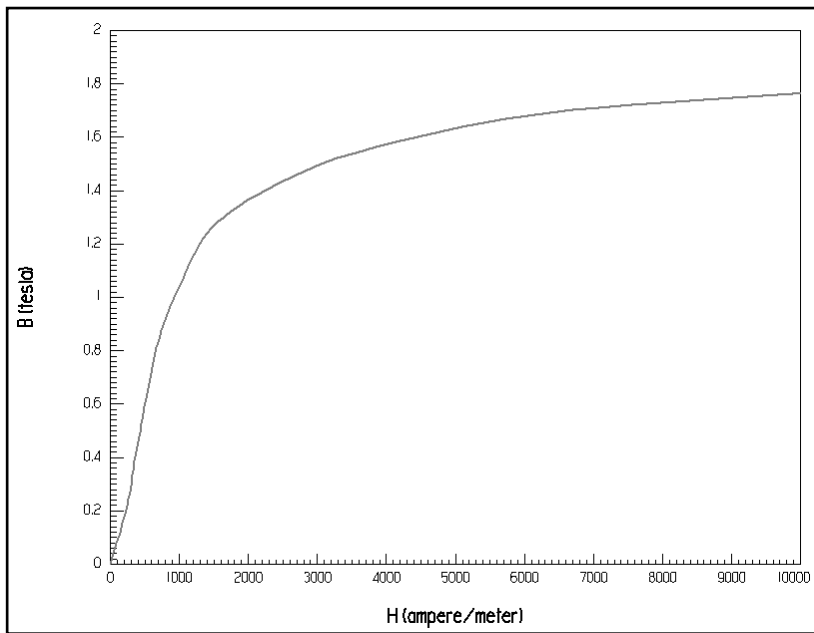
Şekil 2.4. MR sıvısı akma gerilmesinin manyetik alan şiddetine bağlı değişimi [33]



Şekil 2.5. MR sıvısı mıknatıslanma eğrisi [33]



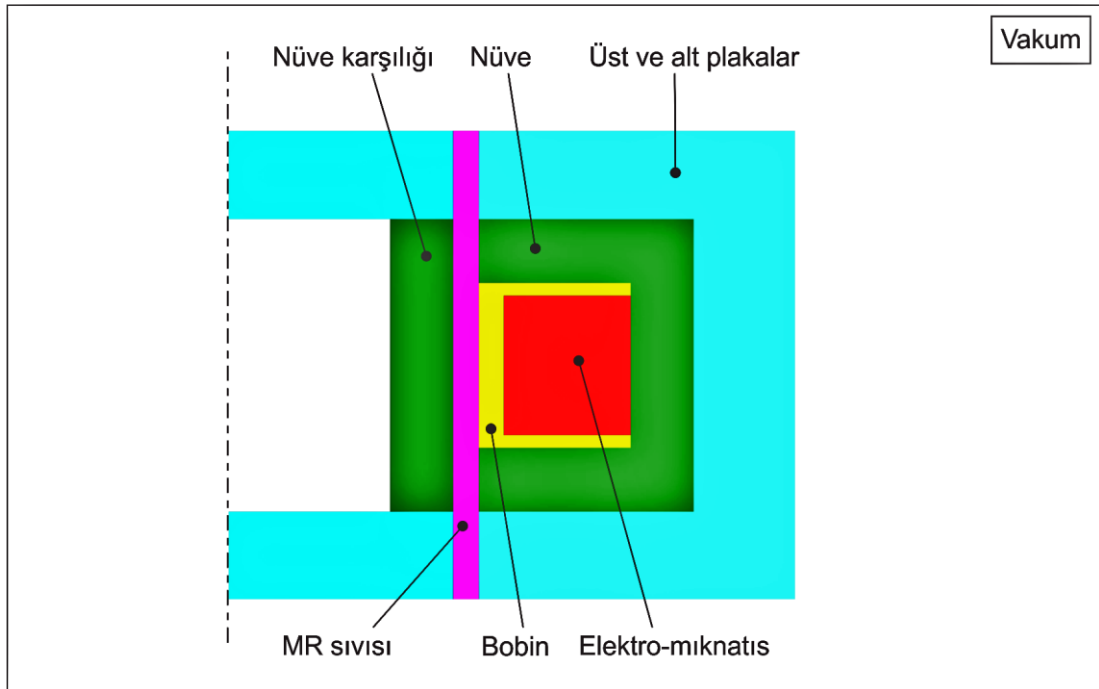
Şekil 2.6. Kayma gerilmesi - kayma hızı ilişkisi [33]



Şekil 2.7. Düşük karbonlu çelik için mıknatıslanma eğrisi

Manyeto-statik analiz

Analiz kanal içinde oluşan manyetik alan yönünü ve şiddetini doğrulamaya yönelik gerçekleştirilmiş; simülasyonlar “Maxwell Student Version” programı kullanılarak yapılmıştır. Manyeto-statik model oluşturulmuş, yapılan statik analizler sonucunda manyetik devre parçalarının boyutlarına karar verilmiştir. Şekil 2.8’de gösterildiği şekilde MR sıvı akış kanal genişliği 1,0 mm ile 5,0 mm arasında farklı ölçülerde alınarak analizler yapılmış, analizler sonunda 400 sarım sayısı olan ve 0,50 mm çaplı emaye kaplı bakır tele sahip silindirik tip elektro-mıknatis kullanılmaya karar verilmiştir. Simülasyon sonuçları 800 amper-sarım manyetomotor kuvvet ve 2,0 mm kanal genişliği için Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Manyeto-statik model

Göz önünde bulundurulanan faktörler

MR sıvısı için LORD firması tarafından sağlanan B-H eğrisi kullanılmıştır (Bkz. Şekil 2.5).

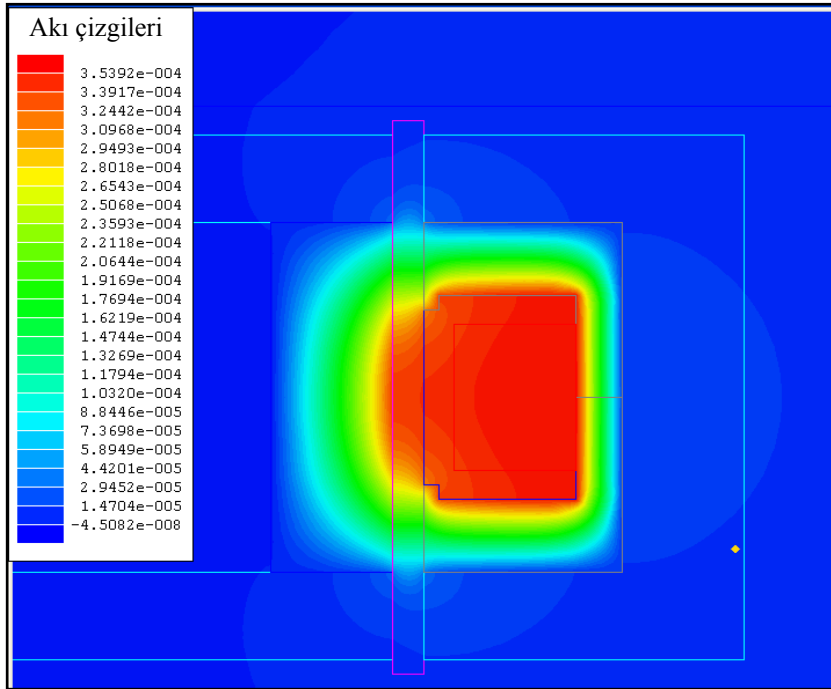
Düşük karbonlu çelik için Maxwell Student Version programı içindeki B-H eğrisi (Bkz. Şekil 2.7) kullanılmıştır.

Sıvının aktığı kanal genişliği 2 mm olarak alınmıştır.

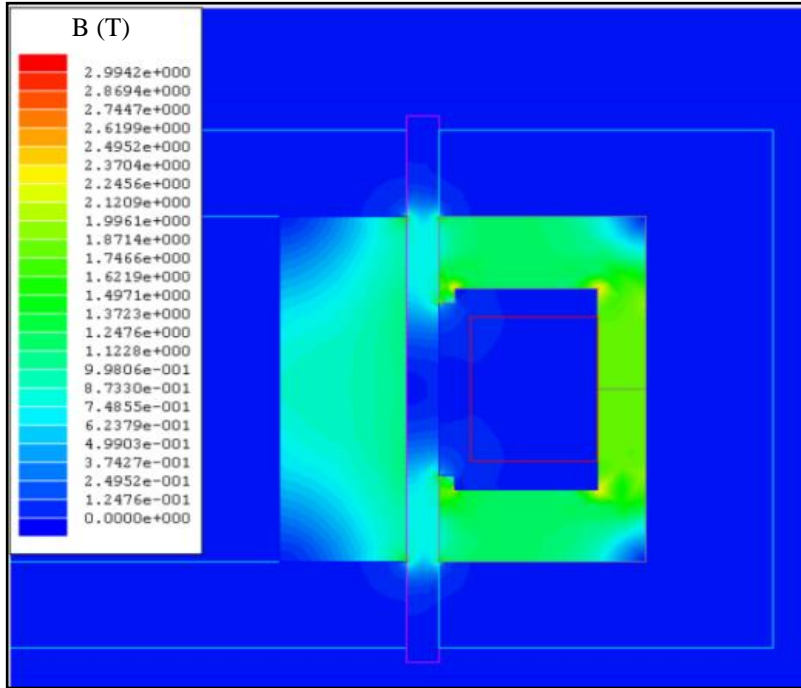
Köşelerde ve sınır noktalarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

Elektrik devresinin 12 volt ve maksimum 2 amper ile çalıştırılacağı düşünülmüştür.

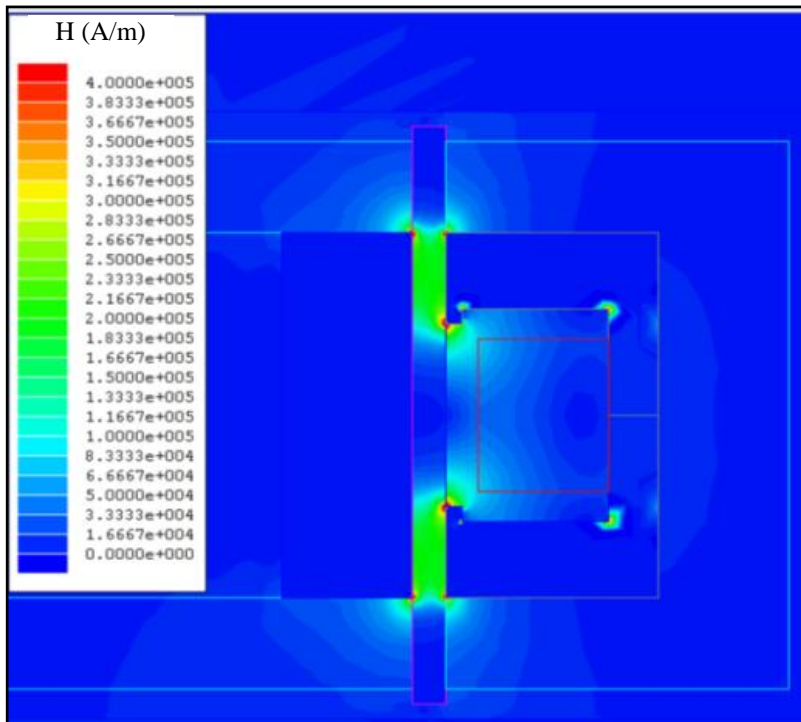
Yapılan analizler sonunda manyetik akı çizgileri (Şekil 2.9), manyetik akı yoğunluğu (Şekil 2.10) ve manyetik alan şiddeti (Şekil 2.11) dağılımları incelenmiştir.



Şekil 2.9. Manyetik Akı çizgileri



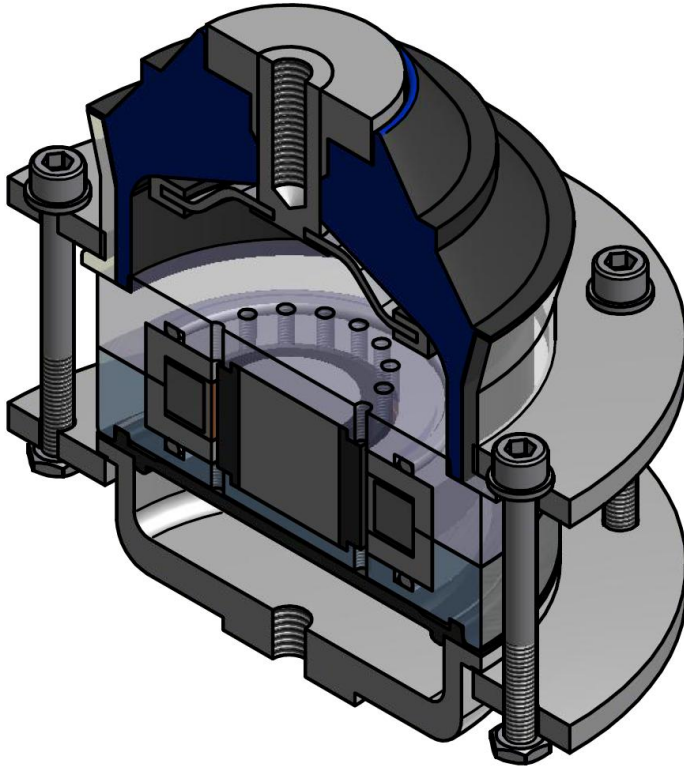
Şekil 2.10. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 2.11. Manyetik alan şiddeti

2.2. Bilgisayar Destekli Tasarım Modeli

MR motor takozunun karakteristik özelliklerini deneysel olarak belirlemek için MR takoz prototipleri üretilmiştir. Öncelikle, prototipler CAD yazılımı kullanılarak 3 boyutlu (3D) olarak modellenmiştir. 3D CAD modeli kullanılarak elde edilen imalat resimleri ile imalat gerçekleştirilmiştir. Bazı ölçülerin çok hassas toleranslara sahip olmaları ve bazı geometrik engeller bu parçaların üretilmelerini zorlaştırmıştır. Üretimi kolaylaştırmak için özellikle üst ve alt plaka yükseklikleri arttırılmıştır. Bu parçaların daha düşük cidar kalınlıklarında üretilmeleri için alüminyum enjeksiyon kalıplama kullanılmasının uygun bir yöntem olduğu düşünülmüştür. Ancak bu yöntemle yapılacak üretim, başta yüksek kalıp tasarım ve kalıp üretim maliyeti olmak üzere, bu çalışmada üretilmesi hedeflenen farklı prototipler için çok yüksek maliyetli olmakla birlikte, seri imalat söz konusu olduğunda oldukça caziptir.



Şekil 2.12. Tasarımı yapılan MR takoz

Üst ve alt plaka parçaları elektro-mıknatis ve karşılıklı nüve parçaları için gövde görevi görmektedir. Bu parçalar farklı kanal ölçülerinde ve tiplerinde imal edilmiştir. Birinci kanal tipi 16 delikli ve ikinci kanal tipi 4 adet slot şeklinde kanala sahip slotlu tip olarak tasarlanmıştır. Birinci tipte deliklere vida dişi açılmış, böylece deney sırasında delik sayısı değiştirilerek farklı parametrelerin test edilmesi amaçlanmıştır. İkinci tipteki plakada slot tipi kanalların alanı 16 delikli plakadaki deliklerin alanından daha büyüktür.

Çizelge 2.1. Takoz tiplerinin isimlendirilmesi

Takoz tiplerinin isimlendirilmesi		
Slot tipi kanallı	Dairesel kanallı	
MR Slotlu	MR 16 delikli	MR 8 delikli

2.3. Üretim

Kullanılacak hidrolik takozun seçimi sırasında iç yapı olarak birbirine benzer iki tip takoz değerlendirilmiştir. Birincisi düz, ikincisi ise açılı tasarıma sahiptir. Açılı takozun üst kısmında dolun ve hava alma kanallarının işlenmesi için uygun alan olmayışı göz önünde bulundurularak düz takozun kullanılmasına karar verilmiştir.



a) Düz tip

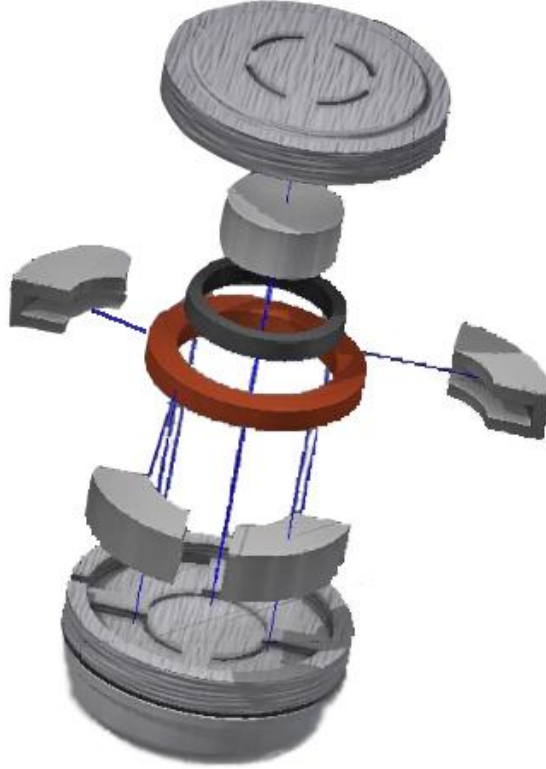


b) Eğik tip

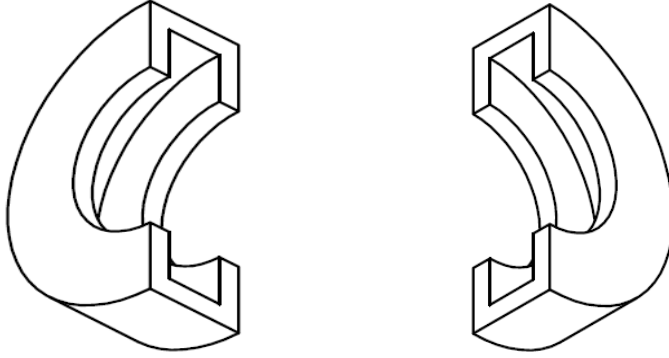
Resim 2.1 Hidrolik motor takozu

İlk oluşturulan CAD modellemesi Şekil 2.13'de görülmektedir. Bu tasarımda bobin etrafındaki nüveler dört parça olarak modellenmiştir. Orta kısımda içi dolu yuvarlak parça yerleştirilerek nüve ile arasında kanal içindeki akışa dik yönde manyetik alan

oluşturulması amaçlanmıştır. Nüvenin iç kısmına kapak görevi görmesi için şekilde siyah renkle görünen izolasyon parçası yerleştirilerek bobinin içine MR sıvısı girmesinin önlenmesi düşünülmüştür. Ancak bu tasarımda imalatı zorlaştıran nüvenin 4 parçalı yapısı ve içindeki kanal nedeniyle değişiklik yapılmıştır. Nüve 2 parçalı (Şekil 2.14) ve yana açılır olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tasarımda, elektro-mıknatis parçaların arasına zarar vermeden sıkı bir şekilde yerleştirilememiştir. Elektro-mıknatisin nüve içine mıknatıs zarar vermeden takılabilmesi için nüvelerin içindeki mıknatis yatağını fazla boşluklu yapmak gerekmektedir. Ayrıca, yuvarlak parçadan kesilerek üretildiği için kesildikten sonra tam ölçüsünde olmazsa yerine alıştırılmaktansa yenisini imal etmek daha kolaydır.



Şekil 2.13. İlk tasarlanan MR motor takozu



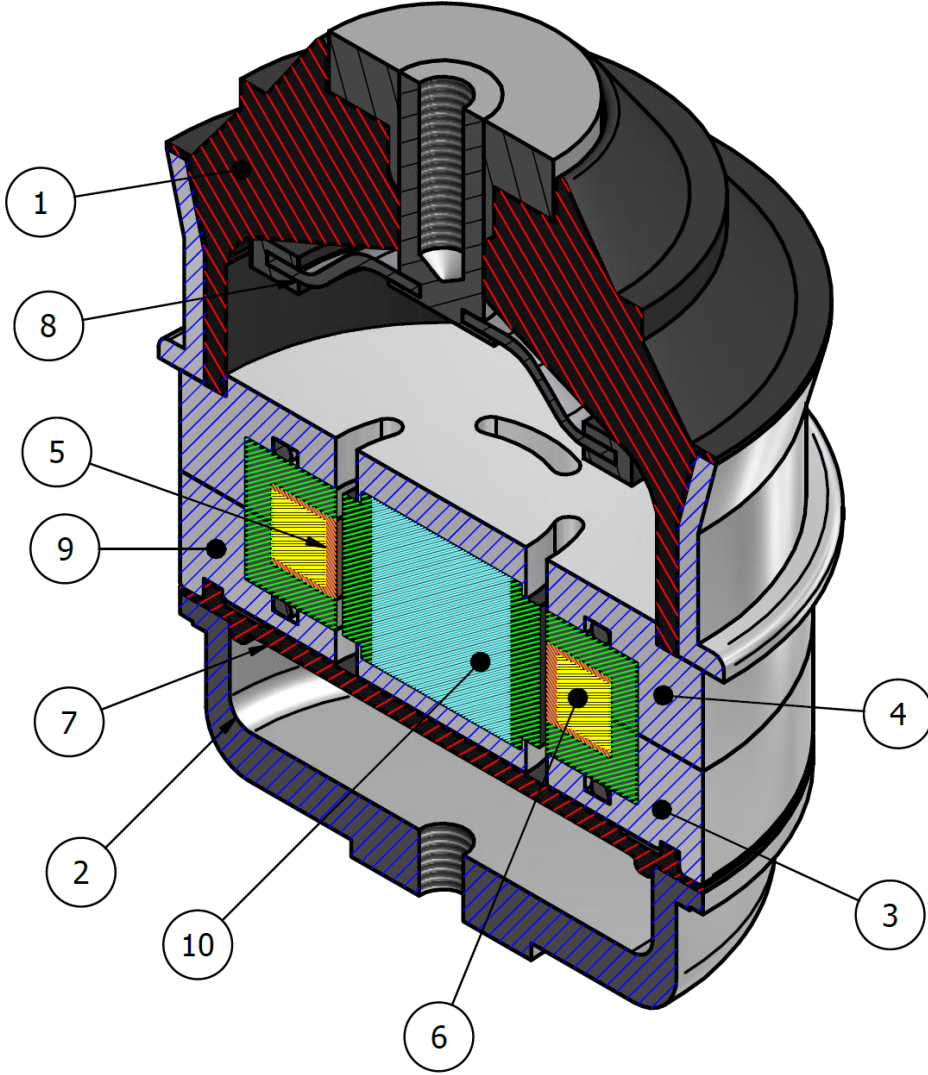
Şekil 2.14. Nüve (yana ayrılan tasarım)

Nihai tasarım olan MR slotlu takozun (Şekil 2.15) ve MR delikli takozun (Şekil 2.16) kesitleri gösterilmiştir. Bu tasarımlarda, nüve (9) iki parçalı ve dikey yönde açılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde bobinin nüvenin içine boşluksuz ve zarar görmeden yerleştirilmesi kolaylaştırılmıştır. Nüve malzemesi olarak yüksek manyetik geçirgenlikli düşük karbonlu çelik kullanılmıştır.



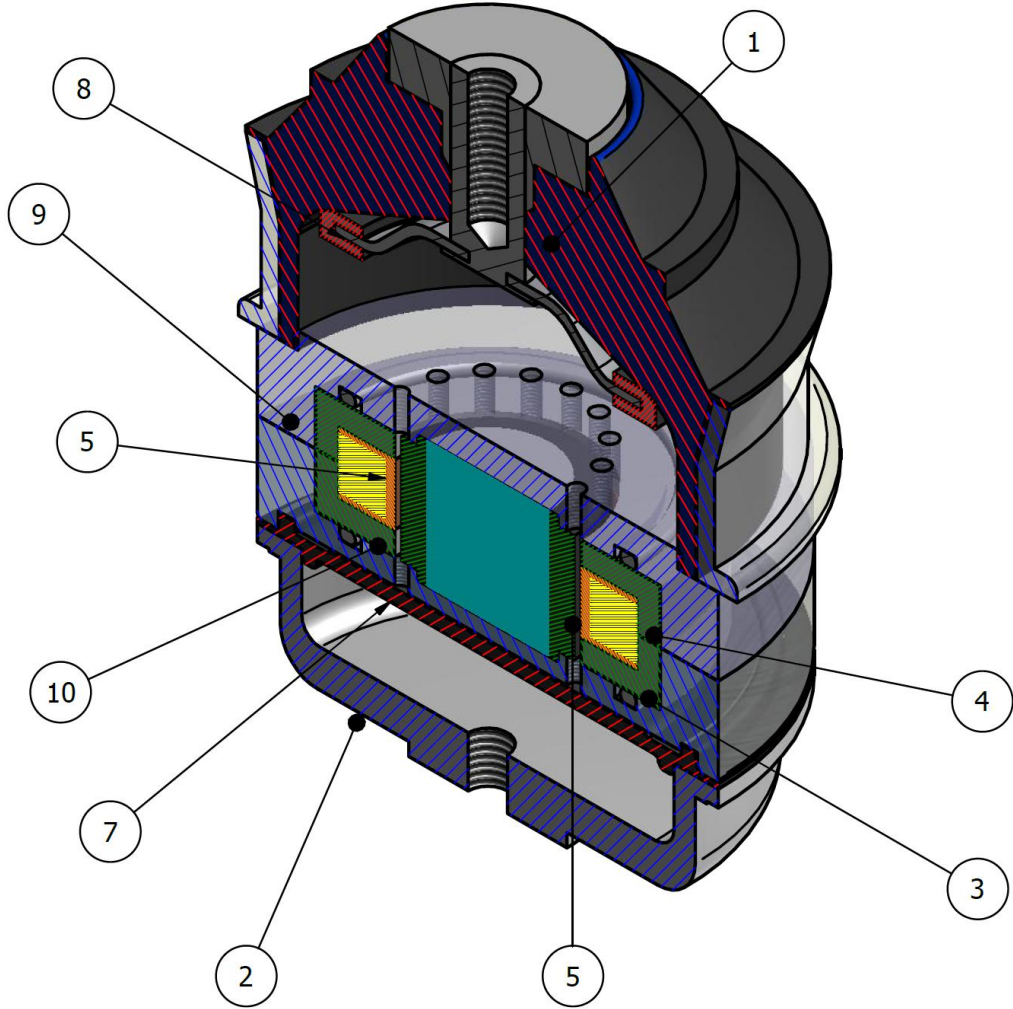
Resim 2.2. Nüve ve elektro-mıknatıs (üste ayrılan tasarım)

MR slotlu takozda ve MR delikli takozda, mevcut hidrolik takozun parçalarından üst gövde (1), çan (8), sınırlandırıcı (2) ve diyafram (7) kullanılmıştır.



Şekil 2.15. Slotlu tip ara plakalı MR motor takozu

- | | | | |
|------------------------|---------------------|--------------|--------------|
| 1. Elastomer üst gövde | 2. Sınırlandırıcı | 3. Alt plaka | 4. Üst plaka |
| 5. Bobin | 6. Elektro-mıknatıs | 7. Diyafram | 8. Çan |
| 9. Nüve | 10. Nüve karşılığı | | |



Şekil 2.16. Delikli tip ara plakalı MR motor takozu

- | | | | |
|------------------------|---------------------|--------------|--------------|
| 1. Elastomer üst gövde | 2. Sınırlandırıcı | 3. Alt plaka | 4. Üst plaka |
| 5. Bobin | 6. Elektro-mıknatıs | 7. Diyafram | 8. Çan |
| 9. Nüve | 10. Nüve karşılığı | | |

MR slotlu takozda ve MR delikli takoz elemanları ve bu elemanları üretildiği malzeme türleri Çizelge 2.1’de liste olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2. MR takoz parçalarının malzeme türleri

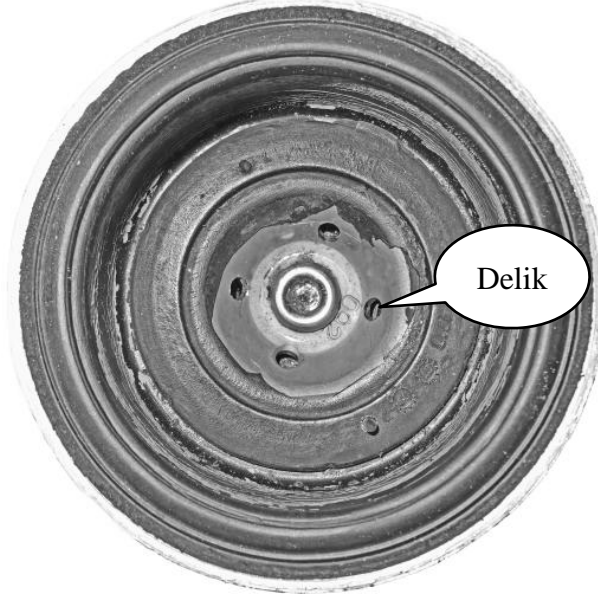
Numara	Adı	Malzeme
1	Elastomer üst gövde	NR , 60 Shore
2	Sınırlandırıcı	Alüminyum
3	Alt plaka	Alüminyum 7075
4	Üst plaka	Alüminyum 7075
5	Bobin	Asetal
6	Elektro-mıknatıs	Emaye kaplı bakır tel, çapı : 0,5 mm sipir sayısı : 400
7	Diyafram	NR
8	Çan	Kauçuk kaplı çelik
9	Nüve	St 37-2
10	Nüve karşılığı	St 37-2

Üst gövde (1) tepesinde takoza sıvı doldurmak ve havasını almak için iki delik delinmiş ve bu deliklere küresel vanalar bağlanmıştır. Bu büyüklükte hazır komponent olarak bulunabilecek, her iki tarafa da akışkan hareketini kesebilen ve sızdırmayan en uygun valf tipi küresel vanadır. Bu sistem çabuk bağlantı rakorlarıyla daha pratik olarak yapılmak istenmiştir ancak bu kadar küçük ölçülerde çabuk bağlantı rakoru tedariği mümkün olmamıştır.



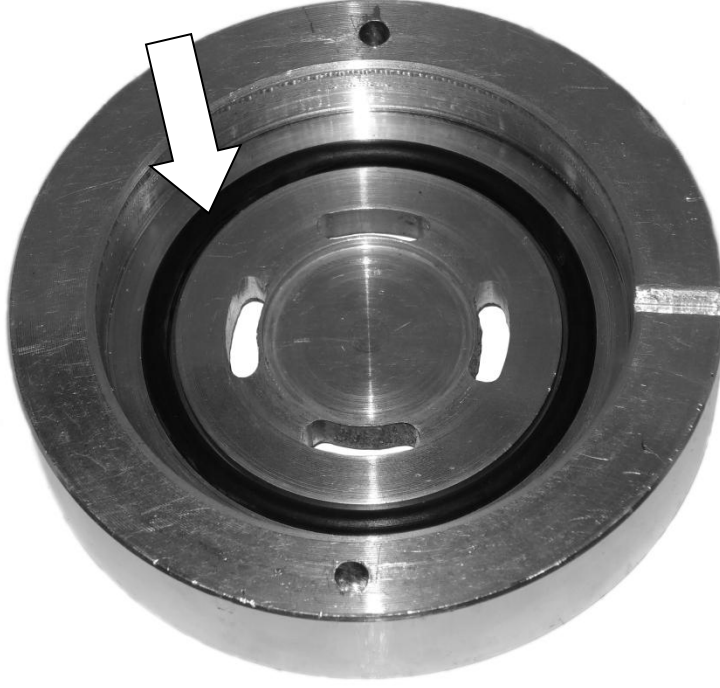
Resim 2.3. Üst gövde ve bağlantıları

Hidrolik takozun dolumu için üst elastomerik gövde (1) üzerinde açılan dolum deliklerinden takoza giren sıvı, takozun içine çan (8) üstündeki tekli delikten geçerek girmektedir. Bu durumda sıvının doldurulması ve boşaltılması sırasında sıvı akışının bloke olması problemi fark edilmiştir. Bu problemin çözümü için çan parçası üzerindeki delik sayısı arttırılarak Resim 2.3’de görüldüğü gibi dörde çıkarılmıştır.



Resim 2.4. Çan kısmının görünümü

Üst plaka (4) ve alt plakalar (3) karşılıklı nüve parçalarını taşımak, takozu alt hazne ve üst hazne olarak ikiye ayırmak ve üzerlerinde bulunan kanallar sayesinde sıvısının bu hazneler arasında akışına imkan sağlamak ile görevlidir. Üst ve alt hazne arasında sıvı geçişi sırasında basınçlı MR sıvısının dışarı sızmasını engellemek için plakaların içine Resim 2.5’de görüldüğü gibi sızdırmazlık elemanları yerleştirilmiştir. Bu sızdırmazlık elemanlarına üretilen takozlar prototip oldukları için ihtiyaç vardır. Bu tip takozların seri imalatında takozun kompleksi kalıp içinde elastomer ile kaplanır ve ömrünü doldurana kadar her hangi bir şekilde dışarı sıvı sızdırmaz.



Resim 2.5. MR slotlu takoz üzerinde sızdırmazlık elemanı

Üst plaka (4) ve alt plakalar (3) iki farklı tipte imal edilmiştir. Birinci tipte sıvının geçiş kanalları 4 parçalı olarak slot şeklinde açılmıştır (Resim 2.6). İkinci tipte aynı merkez etrafında olmak üzere sıvı geçiş kanalları dairesel olarak delinmiştir (Resim 2.7). Hem slot tipi dikdörtgen kesitli kanal tipinin, hem de dairesel kesitli kanal tipinin yapılacak deneylerle test edilebilmesi amaçlanmıştır. Dairesel kanallı tipte, delikler metrik 4 cıvata ile kapatılabilecek şekilde düşünülmüştür. Böylece MR delikli takozda deliklerin bir kısmının cıvatalar ile kapatılması sonucu farklı delik sayısına sahip MR takozlar elde edilmiştir.



Resim 2.6. MR slotlu takozun üst ve alt plakaları



Resim 2.7. MR delikli takozların üst ve alt plakaları

Nüve içine yerleştirilen elektro-mıknatıs, bir bobin etrafına sarılan bakır telden elde edilmiştir. Bobin (5) plastik malzemedен işlenmiştir (Resim 2.8). Daha sonra bobin üzerine 400 sarım olacak şekilde 0,50 mm kalınlığındaki emaye kaplı bakır tel sıkı olarak sarılmıştır.



Resim 2.8. Bobin

Bobin üzerine bakır tel sarılarak elde edilen elektro-mıknatıs daha sonra Resim 2.9'da görüldüğü gibi üst ve alt nüve parçalarının arasına yerleştirilmiştir. Nüvenin kenarına açılan kanaldan elektro-mıknatısın kabloları dışarı çıkarılmıştır. Bu tasarımda bobin (5) ile nüve (9) arasındaki boşluktan bobine MR sıvısı geçmesini önlemek için arası sıvı conta ile doldurulmuş ve Elektro-mıknatıs ve nüve birbirine sabitlenmiştir.



Resim 2.9. Elektro-mıknatıs ve nüve montajı

Nüve karşılığı olarak çapı 37 mm ölçüsünde parça kullanılmıştır. Bu parça ile birlikte sıvı geçiş kanalının genişliği 1,5 mm olarak elde edilmiştir. Parça uygun cidar kalınlığını sağlamak için içi boş olarak üretilmiştir. Daha sonra içindeki boşluk sistemde hava kalmasını önlemek ve takoza sıvı dolumu sırasında ölü alan oluşturmaması için plastik malzemeden yapılan parçaların sıkı geçme olarak çakılması ile doldurulmuştur. Kanal genişliğini 2 mm, 3 mm ve 4 mm olarak ayarlayabilmek için Resim 2.9’da gösterildiği gibi nüve karşılığı parçaları 4 farklı çap ölçüsünde imal edilmiştir.



Resim 2.10. Farklı ölçülerdeki nüve karşılığı parçaları

Nüve ve nüve karşılığı parçalarının alt plaka içine yerleştirilmesi Resim 2.11’de gösterilmiştir. Burada nüve karşılığı parçasının seçilen çap büyüklüğüne göre nüve ile nüve karşılığı arasındaki kanal genişliği değişmektedir. Takozun üst elastomer kısmı hareket ettiğinde, piston görevi gören çan parçası tarafından üst haznedeki sıvı üst plakalardaki slotlu ya da delikli tip kanallardan geçerek nüve ile nüve karşılığı arasındaki kanala girmektedir. Bu kanaldan geçen sıvı alt plaka üzerindeki ve üst plaka üzerindeki ile aynı şekilde ve hizada işlenmiş slotlu ya da delikli tip kanallardan alt hazneye geçmektedir.



Resim 2.11. Nüve ve nüve karşılığı parçalarının alüminyum plaka içine yerleşimi

Üst ve alt plakalar içine elektro-mıknatısı içeren nüve ve nüve karşılığı parçaları yerleştirildikten sonra, alt plakanın altına diyafram yerleştirilmiş ve alt kısım sınırlandırıcı ile kapatılmıştır. Üst plakanın üstüne üst elastomer gövde yerleştirilmiştir. Tüm parçaların bir araya getirilmesi ile oluşturulan MR takoz Resim 2.12’de gösterilmiştir. Daha sonra üst elastomer gövde ve sınırlandırıcı üzerine yerleştirilen flanşlar cıvatalar ile sıkılarak tüm takoz bir araya getirilmiş ve sızdırmazlık sağlanmıştır.



Resim 2.12. Montajı yapılmamış MR takoz

2.4. Dolum Düzeneği

MR takozun montajı tamamlandıktan sonra, MR sıvısının takoza doldurulması işlemini vakum dolum yöntemi ile yapılmıştır. Bu amaç için Resim 2.13'de görülen dolum düzeneği tasarlanmıştır. Bu uygulamada, MR sıvısı özel tasarlanmış bir dolum kabına doldurulmuş ve öncelikle MR sıvısının içinde bulunan hava vakum pompası kullanarak dışarı atılmıştır. Daha sonra takozun içindeki hava vakum yardımıyla boşaltılmıştır. Takoz içindeki hava da boşaltıldıktan sonra aradaki vana açılarak MR sıvısının takoza dolması sağlanmıştır. Nguyen [2], MR takozun içinde hava kalması durumunda, havanın sıkıştırılabilir akışkan olması nedeniyle MR takozun karakteristiğinin olumsuz etkileneceğini belirtmiştir.

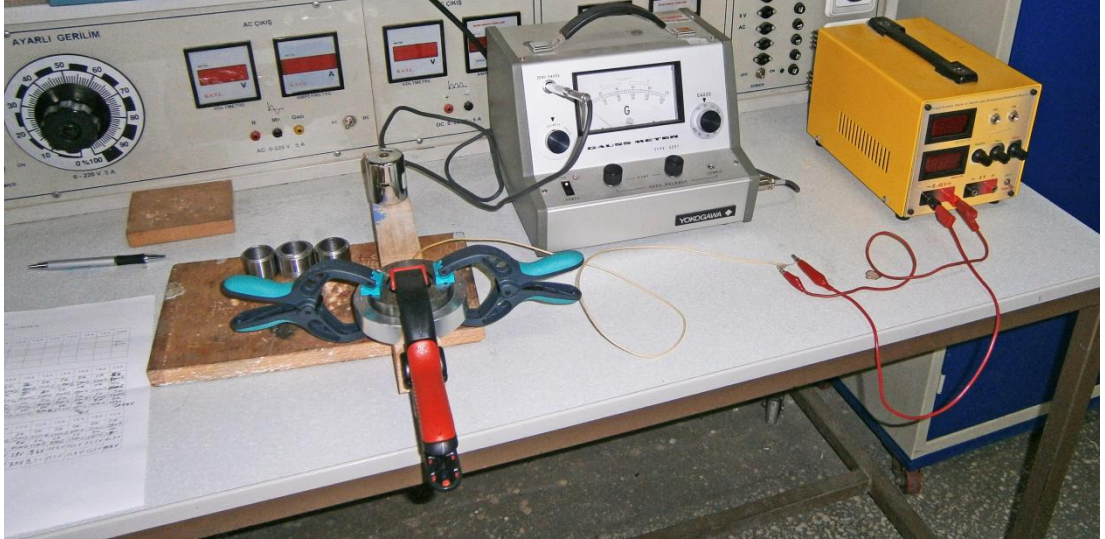


Resim 2.13. Dolum düzeneği

3. DENEYLER

3.1. Manyetik alan şiddeti

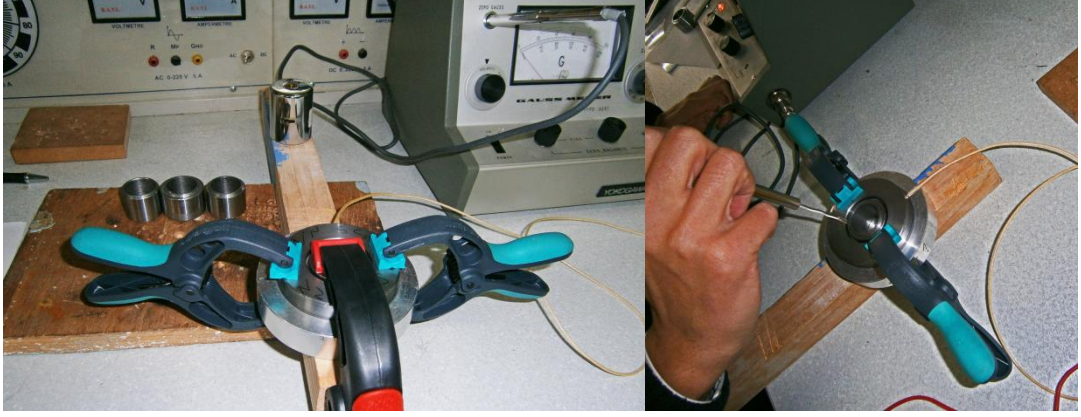
Takozun çalışması esnasında manyetik alan şiddetinin ölçülmesi mümkün olmadığı için elektro-mıknatısın havadaki manyetik alan şiddetini bulmak üzere deneyler yapılmıştır. Ölçümler için sabit akıma ayarlanabilir bir güç kaynağı ve Yokogawa 3251 gausmetre kullanılmıştır (Resim 3.1). Kullanılan gausmetre, 20G (gauss) ile 20KG aralığında ölçüm yapabilen ve yüksek hassasiyette çalışan bir cihazdır. Cihazı kullanmadan önce göstergenin doğru şekilde sıfırlanması deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.



Resim 3.1. Gausmetre ve sabit akıma ayarlanabilir güç kaynağı

Ölçüm ucu soketini cihazı açmadan önce cihazın sağındaki konnektöre bağlamak önemlidir. Ölçüm ucu ve ucundaki hall jeneratörü cihaz üzerindeki sıfır gauss yuvasına yerleştirildikten sonra gösterge önce yüksek gauss değerlerine ayarlanarak sıfırlanmış daha sonra kademeli olarak 20G'a kadar düşürülerek hassas ayar düğmeleri ile sıfırlanmıştır. Cihaz sıfırlandıktan sonra ölçüm aralığı (range) ayar düğmesi ölçülecek değere uygun kademeye getirilmiştir. Hall jeneratörü yüzeyi ile

manyetik alanın yönü birbirine dik açıda kesişecek şekilde hall jeneratörü manyetik alan oluşan kanalın içine yerleştirilmiştir (Resim 3.2).



Resim 3.2. Nüve ve nüve karşılığı parçalarının bağlantı şekli

Yapılan deneylerde ayarlanabilir güç kaynağı kullanılarak, akım 0 amperden başlayıp 0,2 amper aralıklarla 2 ampere kadar arttırılmıştır. Ayarlanan her amper değerine karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu değerleri G (gauss) olarak gaussmetre üzerinden okunmuştur. Deneylerde farklı ölçülerde nüve karşılıkları kullanılarak (Resim 3.3), 1,5 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm kanal genişlikleri için manyetik alan şiddeti değerleri araştırılmıştır. Nüve karşılığı parçaları değiştirildikten sonra yeni bir deneye başlamadan önce bobine ters yönde akım uygulanarak elektromıknatıs üzerindeki artık manyetik alan sıfırlanmıştır.



Resim 3.3. Dört farklı ölçüde nüve karşılığı parçaları

Ölçümlerde elde edilen manyetik akı yoğunluğu değerleri Çizelge 3.1'de gauss cinsinden verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu değerleri kullanılarak manyetik alan

şiddeti değerleri Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan manyetik alan şiddeti değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

$$B = \mu_0 \times H \quad (3.1)$$

Burada; B manyetik akı yoğunluğu (1 T = 10 000 G), H manyetik alan şiddeti (A/m), μ manyetik. Hava ortamında manyetik geçirgenlik $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am’dir.

Çizelge 3.1. Manyetik akı yoğunluğu değerleri (gauss)

Deney No	Aralık (mm)	AKIM DEĞERLERİ										
		0 A	0,2 A	0,4 A	0,6 A	0,8 A	1,0 A	1,2 A	1,4 A	1,6 A	1,8 A	2,0 A
1	1,5	40	300	840	1200	1600	1900	2450	2750	3100	3600	4000
2	2,0	25	200	460	680	920	1200	1400	1600	1800	2000	2600
3	3,0	12	175	220	440	680	900	1000	1200	1400	1500	1600
4	4,0	20	75	220	350	480	600	780	840	980	1100	1190

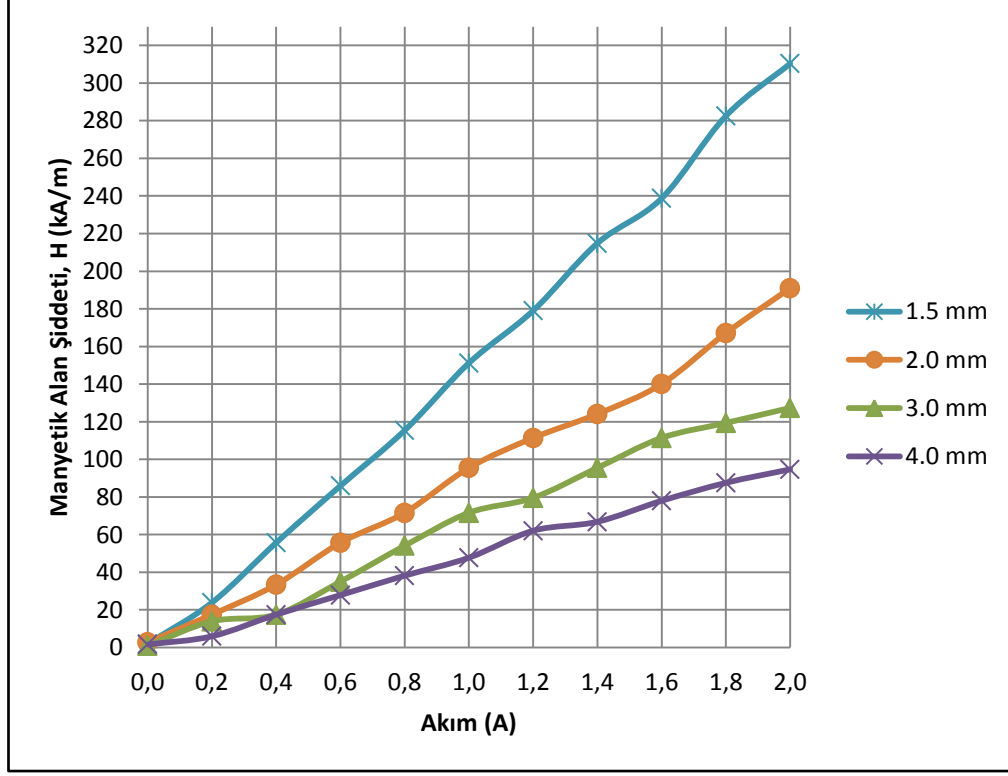
Çizelge 3.2. Manyetik alan şiddeti değerleri (H, kA/m)

Deney No	Aralık (mm)	AKIM DEĞERLERİ										
		0 A	0,2 A	0,4 A	0,6 A	0,8 A	1 A	1,2 A	1,4 A	1,6 A	1,8 A	2 A
1	1,5	3	24	67	95	127	151	195	219	247	286	318
2	2,0	2	16	37	54	73	95	111	127	143	159	207
3	3,0	1	14	18	35	54	72	80	95	111	119	127
4	4,0	2	6	18	28	38	48	62	67	78	88	95

Ohm metre ile yapılan ölçümde bobinin omik direnci 0,75 Ohm bulunmuştur. Deney sonuçları kullanılarak hesaplandığında da bobinin omik direnci = 0,7 ila 0,8 Ohm arasındadır.

Farklı kanal genişliklerinde ölçülen ve Çizelge 3.2’de tablo halinde verilen manyetik alan şiddeti değerlerinin akıma göre değişimi Şekil 3.1’de grafik olarak gösterilmiştir. Kanal genişliği 1,5 mm olduğunda oluşan eğrinin eğimi diğer kanal genişliklerinde elde edilen eğrilerden daha fazladır ve yapılan ölçümler

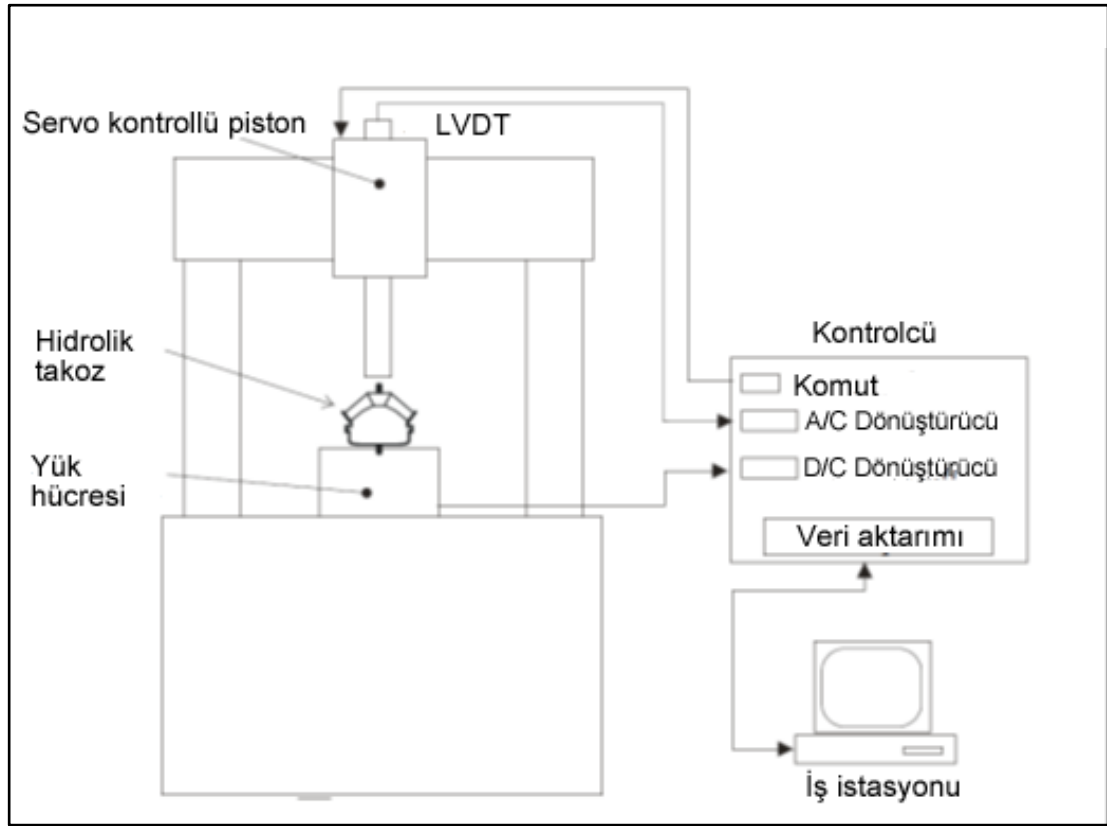
karşılaştırıldığında 1,5 mm kanal genişliğinde maksimum manyetik alan şiddeti elde edilmiştir.



Şekil 3.1 Farklı kanal genişlikleri için manyetik alanın akıma göre değişimi

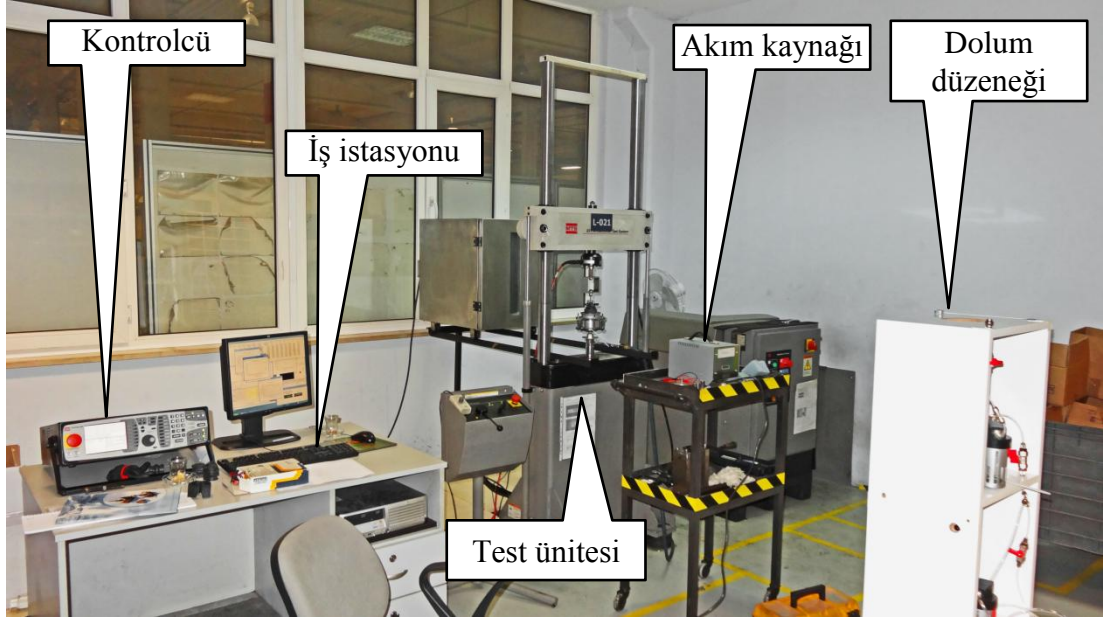
3.2. Titreşim Deneyleri

Motor takozlarını istenilen frekans aralığında test etmek için servo-hidrolik test cihazları kullanılır. Bu çalışmada kullanılan cihaz, Şekil 3.2'de gösterilen MTS Landmark 200 Hz elastomerik test cihazıdır. Bu cihaz elastomerik takozların ve hidrolik takozların testleri için özel olarak geliştirilmiş bir cihazdır. Cihaz, 200 Hz frekansa kadar maksimum 25kN kuvvet kapasitesi ile çalışabilmektedir. Yapılan deneylerde kullanılan ve Resim 3.3.'de gösterilen cihazda Şekil 3.2'de gösterilen cihazdan biraz farklı olarak yük hücresi ile servo kontrolü pistonun yerleri farklıdır. Servo kontrollü piston alt kısma yerleştirilmiştir ve yukarı doğru hareket eder. Yukarı yerleştirilen yük hücresi de aynı şekilde iletilen kuvveti üstten ölçmektedir.



Şekil 3.2. Tipik bir servo-hidrolik test ünitesi konfigürasyonu [19]

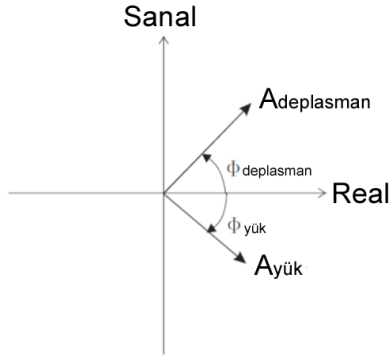
Deneilerin gerçekleştirildiği laboratuvar ve deney ekipmanları Resim 3.4'de gösterilmiştir. Test ünitesi alt kısmında tahrik oluşturan bir servo-hidrolik piston ve üst kısmında ölçüm yapan yük hücresinden oluşmaktadır. İş istasyonu üzerindeki yazılım aracılığıyla yapılacak deneyler için program oluşturulmakta ve bu programın test ünitesinde çalıştırılması kontrolcü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Deneylere başlamadan MR takozlara MR sıvısı dolum düzeneği kullanılarak doldurulmuş ve daha sonra bu takozlar test ünitesine bağlanmıştır. Akım kaynağı ile test sırasında MR takozlara farklı akımlar uygulanmış ve iş istasyonunda oluşturulan program sayesinde aynı şartlarda deneyler tekrar edilmiştir.



Resim 3.4. Deneilerin gerçekleştirildiği laboratuvar ve deney ekipmanları

Motor takozuna, motorun ağırlığını temsil etmek için test öncesi belirli bir ön yük ya da genlik uygulanır. Motorun bir takozu düşen ağırlığını temsil etmek için, deney öncesi test parçasına 1000 N ön yük uygulanmıştır. Test sırasında hidrolik pistonun konumu LVDT (doğrusal yer değiştirme sensörü) yardımıyla kontrol edilerek belirlenen genlikte ve frekanslarda sinüs dalgaları oluşturulmuştur. Takozun üst kısmına iletilen kuvvet yük hücresi ile ölçülmüştür. Bu ölçülen değerler takozu uygulanan ortalama kuvveti, kuvvetin genliğini ve frekansını belirlemek için kullanılmıştır. Test yazılımı kullanılarak önce statik test yapılmıştır. Ardından 1 ile 100 Hz arasında sırasıyla $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm, $\pm 0,1$ mm genliklerde ve 1 ile 20 Hz arası $\pm 3,0$ mm, $\pm 4,0$ mm genliklerde dinamik test uygulanmıştır. $\pm 3,0$ mm, $\pm 4,0$ mm genliklerde cihazın kapasitesi yeterli olmadığı için deneyler sadece düşük frekans aralığında yapılmıştır. Dinamik testlerin bitiminde statik test tekrarlanmıştır. Bu test sırası tüm motor takozu varyasyonları için aynı şekilde uygulanmıştır. Takozu uygulanan akım değiştirildikçe tüm deney sırası tekrarlanmıştır. Böylece MR takozun farklı akımlardaki davranışları hakkında veriler toplanmıştır.

Deney sırasında oluşan kuvvet büyüklükleri vektörel olarak Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Ayarlanan genlikte ve frekansta titreşim üretildiği zaman uygulanan kuvvetin genliği ve iletilen kuvvetin büyüklüğü ölçülmüştür. Sinüs regresyonu uygulanarak her veri için genlik ve faz açısı hesaplanmıştır. Bu vektörler ve Eş 3.1 ve Eş 3.2 denklemleri kullanılarak takozun dinamik katılığı ve faz açısı hesaplanmıştır.

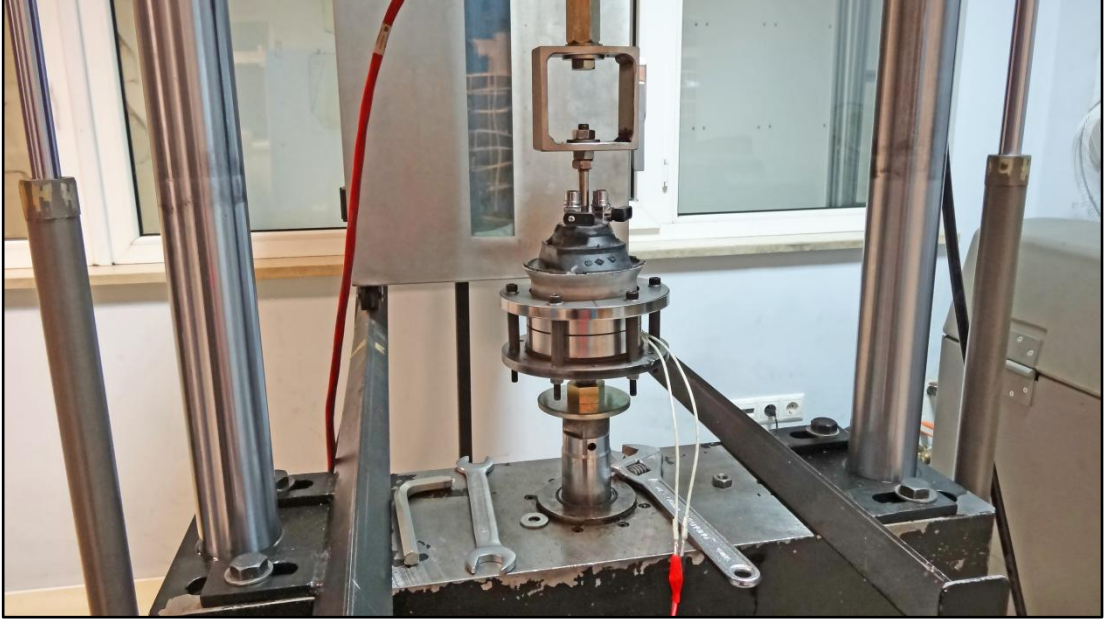


Şekil 3.3. İletilen kuvvet ve vektörler

$$K^* = \frac{A_{yük}}{A_{deplasman}} \quad (3.2)$$

$$\text{Faz } \phi = \phi_{yük} - \phi_{deplasman} \quad (3.3)$$

Aynı şekilde bütün frekans aralığında hesaplamalar yapılarak frekansa göre karakteristikler belirlenmiştir. Her frekans değişiminde takoz üzerindeki yükün ve takozun iç dinamiğinin sıfırlanması için kısa bir süre kadar beklenmiştir. Dinamik katılık ve faz açısı, iletilen kuvvetin büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olduğu için titreşim sönümleyici olarak görev yapan motor takozlarının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılır. MR takozun test ünitesi bağlantısı ve akım uygulanan kablo bağlantısı Resim 3.5'de gösterilmiştir.



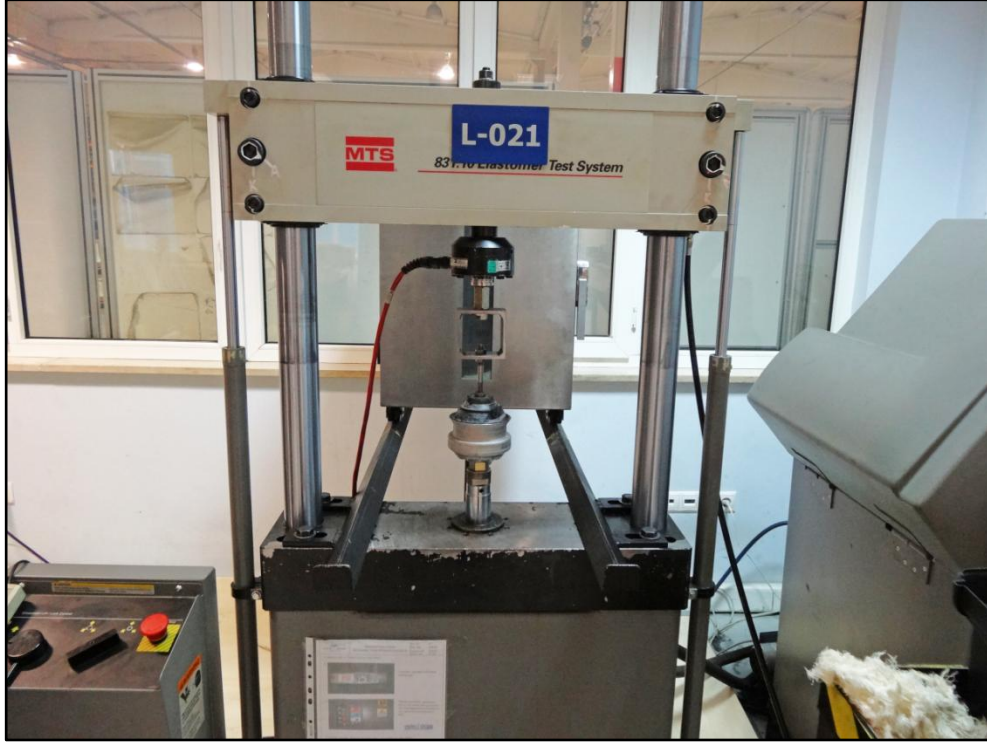
Resim 3.5. MR takozun MTS Test Cihazına bağlanması

MR takozun test ünitesine bağlantısı Resim 3.6'da daha yakından gösterilmiştir.



Resim 3.6. MR takozun MTS Test Cihazına bağlanması

Test edilen hidrolik takozun test ünitesine bağlanması Resim 3.7’de gösterilmiştir.



Resim 3.7. MTS Landmark 200 Hz elastomerik test cihazı

Yapılan deneylerin türü, deney şartları ve deney sonrası elde ölçülen veriler Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de listelenmiştir. Gerçekleştirilen statik deneylerin listesi Çizelge 3.3’de, dinamik deneylerin listesi ise Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Statik deneyler

Çizelge 3.3. Yapılan statik deneylerin listesi

Genlik	Deney No	Deney Parçası	Uygulanan Akım	Ölçülen değerler	
0-10 mm	Deney 1	Üst elastomer gövde	-	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 2	Orijinal hidrolik motor takozu	-	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 3	MR slotlu takoz	0 A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 4		0,1A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 5		0,2A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 6		0,3A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 7		0,4A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 8		0,5A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 9		1,0A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 10		1,5A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 11		2,0A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 12		MR 16 delikli takoz	0 A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji
0-10 mm	Deney 13			0,1A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji
0-10 mm	Deney 14	0,2A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 15	0,3A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 16	0,4A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 17	0,5A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 18	1,0A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 19	1,5A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 20	2,0A		Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 21	MR 8 delikli takoz		0 A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji
0-10 mm	Deney 22		0,1A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 23		0,2A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 24		0,3A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 25		0,4A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 26		0,5A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 27		1,0A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 28		1,5A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	
0-10 mm	Deney 29		2,0A	Kuvvet, Yay katsayısı, Toplam enerji, Absorbe edilen enerji, Korunan enerji	

Dinamik deneyler

Çizelge 3.4. Yapılan dinamik deneylerin listesi

Frekans Aralığı ve Genlik	Deney No	Deney Parçası	Uygulanan Akım	Ölçülen değerler
0-100 Hz arası uygulanan genlikler : ±0,1mm, ±0,5mm, ±1mm , ±2mm	Deney 30	Üst elastomer gövde		İvme (a), Dinamik katılık (K*), Elastik katılık (K), viskoz katılık (K"), Sönüm katsayısı (C), Titreşim geçirgenliği (TR), Faz açısı (Φ), Tan Delta, Enerji
	Deney 31	Orijinal hidrolik motor takozu		
	Deney 32	MR slotlu takoz	0 A	
	Deney 33		0,1A	
	Deney 34		0,2A	
	Deney 35		0,3A	
	Deney 36		0,4A	
	Deney 37		0,5A	
	Deney 38		1,0A	
	Deney 39		1,5A	
Deney 40	2,0A			
Deney 41	MR 16 delikli takoz		0 A	
Deney 42		0,1A		
Deney 43		0,2A		
Deney 44		0,3A		
Deney 45		0,4A		
Deney 46		0,5A		
Deney 47		1,0A		
Deney 48		1,5A		
Deney 49		2,0A		
Deney 50		MR 8 delikli takoz	0 A	
Deney 51	0,1A			
Deney 52	0,2A			
Deney 53	0,3A			
Deney 54	0,4A			
Deney 55	0,5A			
Deney 56	1,0A			
Deney 57	1,5A			
Deney 58	2,0A			
0-20 Hz arası uygulanan genlikler : ±3mm, ±4mm				

3.3. Deneysel Sonuçları

Bu bölümde elastomerik üst gövde, hidrolik takoz, MR slotlu, MR 16 delikli, MR 8 delikli takozların deneysel sonuçları açıklanmıştır. Elastomerik üst gövde olarak isimlendirilen takoz orijinal hidrolik takozun ve MR takozların üst elastomer parçasıdır. Hidrolik takoz olarak isimlendirilen takoz, MR takozlarda alt ve üst elastomer parçaları kullanılan takozdur.

3.3.1. Elastomer üst gövde

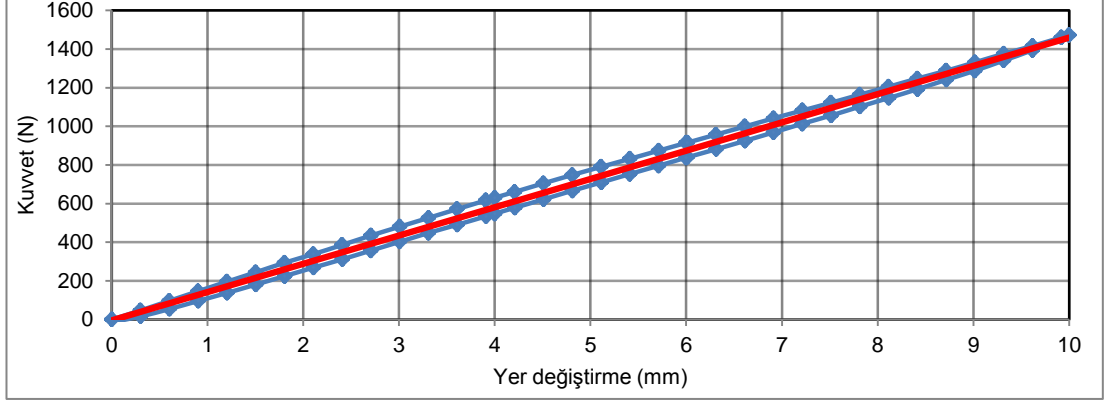
Elastomer üst gövdenin statik kuvvet sonucu oluşan yer değiştirme eğrisi ölçülmüş ve Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu eğri aynı zamanda histerezis eğrisi olarak da bilinir. Yer değiştirme arttırılırken oluşan eğri ile yer değiştirme azaltılırken oluşan eğriler birbirinden farklıdır. Eğrinin içinde kalan kapalı alan sönmelenen enerjiyi göstermektedir. Ölçümleri yapmak için elastomer üst gövde içindeki sıvı boşaltılarak diğer parçalardan ayrı olarak test edilmiştir. Bu eğriyi lineer olarak ifade eden en uygun doğru, düz çizgi ile birleştirilerek gösterilmiştir.

$k_r = \frac{F}{x}$ denklemi ile ve verilerin ortalaması alınarak, $k_r = 142 \text{ N/mm}$ bulunmuştur.

Burada F uygulanan kuvvet, x yer değiştirme miktarıdır.

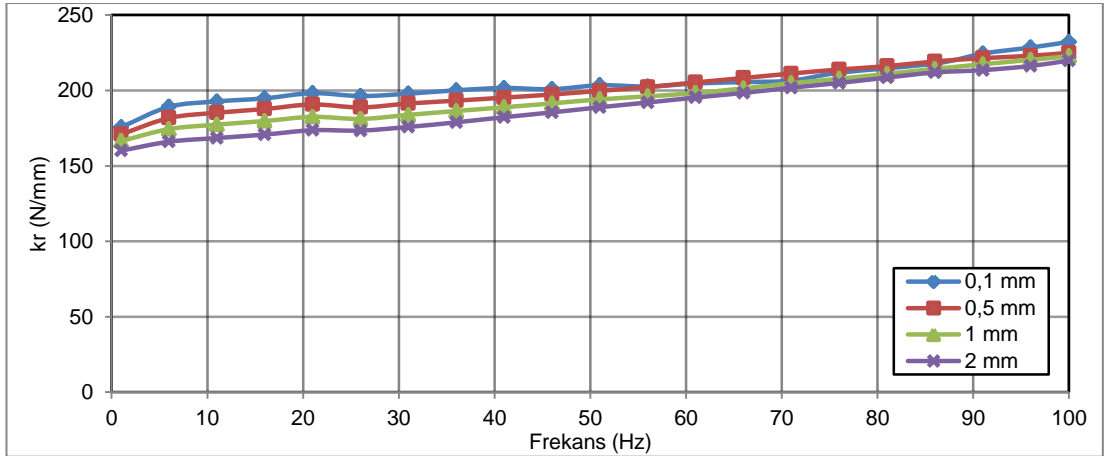
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.4)$$

Doğal frekans Eş. 3.1 kullanılarak 6 Hz olarak hesaplanmıştır. Burada f_n doğal frekans, k yay katılığı, m küttedir.

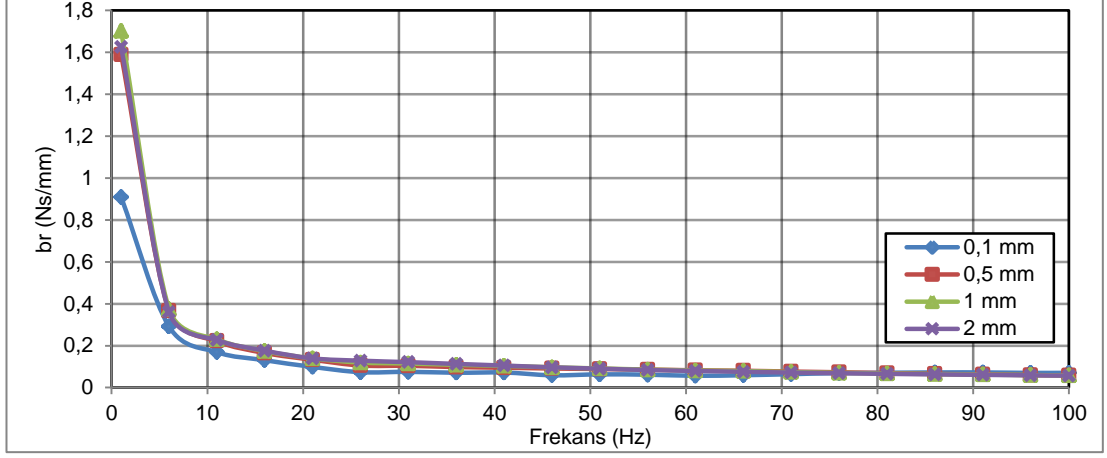


Şekil 3.4. Üst elastomer için kuvvet - yer değiştirme eğrisi

Üst elastomerin dinamik katılık ölçümleri $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm genlikler için gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesi takozun çalışma şartlarında olduğu gibi takozu motorun ağırlığını temsilen 1000 N ön yükleme uygulanmış daha sonra belirtilen genlik değerlerinde eğriler elde edilmiştir. Dinamik katılık (Şekil 3.5) ve sönüm katsayısı (Şekil 3.6) eğrileri çizilmiştir. Dinamik katılığın tüm genliklerde aynı davranışı göstererek frekans ile birlikte 40 Hz'den itibaren arttığı gözlemlenmiştir. Artış miktarı çok düşük olduğu için, bu artış ihmal edilebilir ve kullanılan elastomerin frekansa göre dinamik katılığının sabit olduğu söylenebilir.



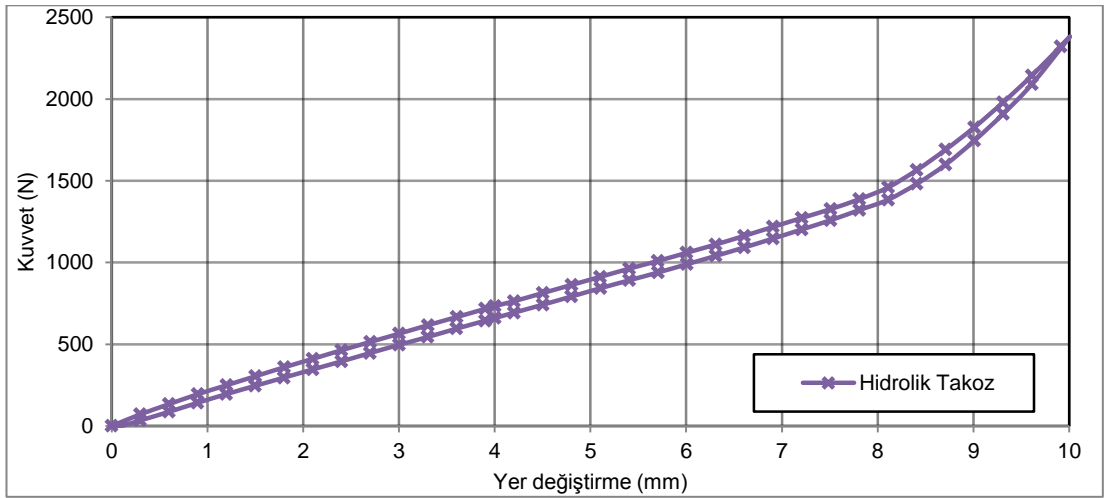
Şekil 3.5. Üst elastomer dinamik katılığının frekansa göre değişimi



Şekil 3.6. Üst elastomer sönüm katsayısının frekansa göre değişimi

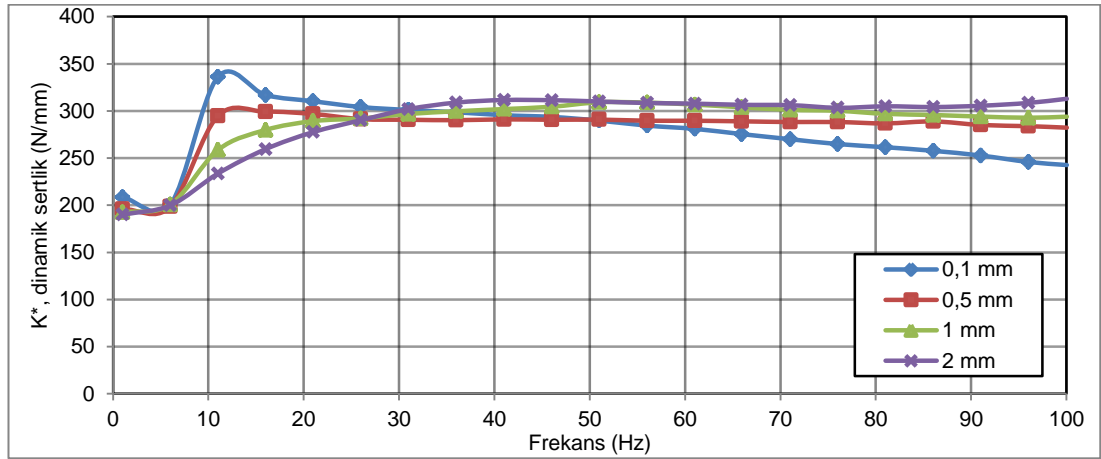
3.3.2. Hidrolik takoz

Prototip MR takozların test sonuçlarını değerlendirirken yapılacak karşılaştırmalarda kolaylık sağlaması için öncelikle hidrolik takoz eğrileri incelenmiştir. MR takoz hidrolik takoz ile aynı elastomer üst gövdeyi kullandığı için elastomer üst gövde de ayrı olarak test edilmiştir. Statik deney 0 ile 10 mm genlik arasında yapılmıştır ve deney sonuçları grafik halinde Şekil 3.7'de verilmiştir. Hidrolik takozun yay katsayısı 162,73 N/mm olarak bulunmuştur. Takozun doğal frekansı Eş. 3.1 denklemi kullanılarak 6,4 Hz olarak hesaplanmıştır.



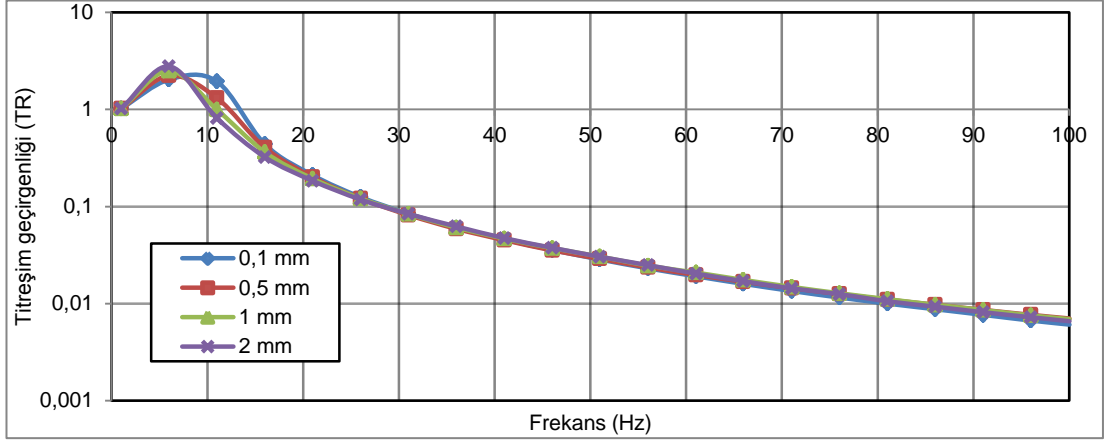
Şekil 3.7. Hidrolik takoz için kuvvet - yer değiştirme eğrisi

Şekil 3.8'de hidrolik takozun dinamik katılık eğrilerinin genliğe ve frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Genlik arttıkça dinamik katılık düşük frekanslarda azalmış, yüksek frekanslarda (30 Hz ve üstü) sabit kalmıştır. Ancak $\pm 0,1$ mm genlikli titreşimler için frekans arttıkça dinamik katılığın düştüğü görülmektedir. Daha önce hidrolik takozun çalışma mantığı anlatılırken söylendiği gibi düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşimlerde ayırıcı etkin olmaktadır. Bu grafikte gördüğümüz üzere $\pm 0,1$ mm genlik için ayırıcının aktif olması katılığı ve sönümü azaltıcı etkiye bulunmuştur.



Şekil 3.8. Farklı genliklerde dinamik katılığın frekansa göre değişimi

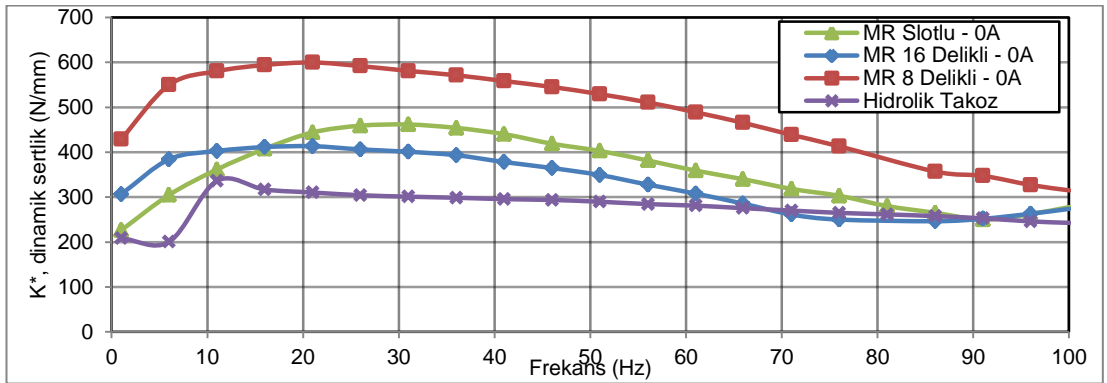
0 ile 100 Hz arasında $\pm 0,1$, $\pm 0,5$, $\pm 1,0$ ve $\pm 2,0$ genlikleri için yapılan titreşim geçirgenliği ölçüm sonuçları Şekil 3.10'da verilmiştir. Titreşim geçirgenliği grafiği incelendiğinde düşük genliğin rezonans noktasını sağa doğru kaydıracağı görülmüştür. Diğer genlikler için takozun davranışı büyük benzerlik göstermiştir. Genlik arttıkça takozu uygulanan kuvvet de arttığı için titreşim geçirgenliği daha fazla olmuştur. Düşük genlikli titreşimlerde ayırıcı içinden yağ geçişi sağlandığı için düşük sönüm olmuştur. Bu da titreşim geçirgenliğini azaltıcı etki göstermiştir.



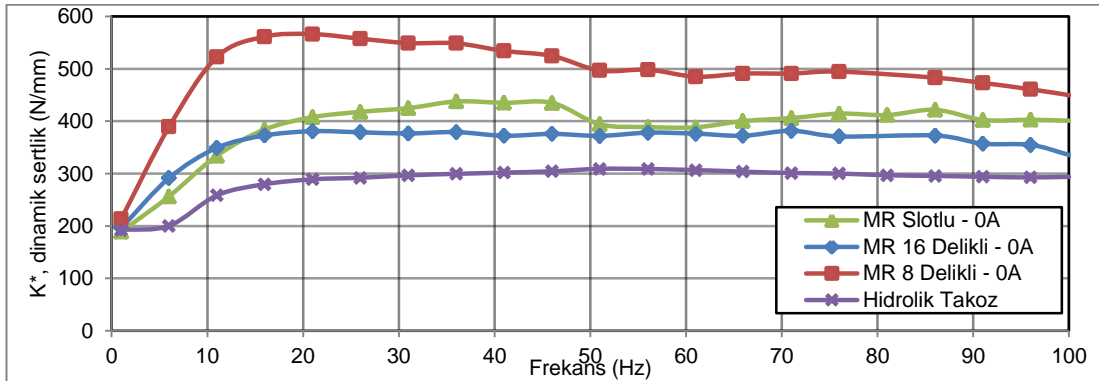
Şekil 3.9. Frekansa göre titreşim geçirgenliğinin değişimi

3.3.3. Takoz tiplerinin karşılaştırılması (akım kapalı)

Akım kapalı durumda takoz tiplerinin dinamik katılıkları ve titreşim geçirgenlikleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Dinamik katılıkların frekansa göre değişim sonuçları, düşük genlik olarak alınan $\pm 0,1$ mm için Şekil 3.10'de ve yüksek genlik olarak alınan $\pm 1,0$ mm genlik değeri için Şekil 3.11'de verilmiştir. MR 8 delikli takozda en yüksek dinamik katılık değerleri elde edilmiştir. Çünkü ara plakalar üzerindeki kanal alanının küçülmesi sonucu sıvının akmaya karşı direnci artmış ve sıvının alt hazneye geçişi zorlaşmıştır. MR 16 delikli takozun kanal genişliği MR slotlu takozun kanal genişliğinden daha küçük olmasına rağmen 15 Hz ve üzeri frekanslarda MR slotlu takozda daha yüksek dinamik katılık değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni slot tipi dikdörtgen geometride frekansın artmasıyla akışa karşı daha fazla direnç oluşmasıdır.

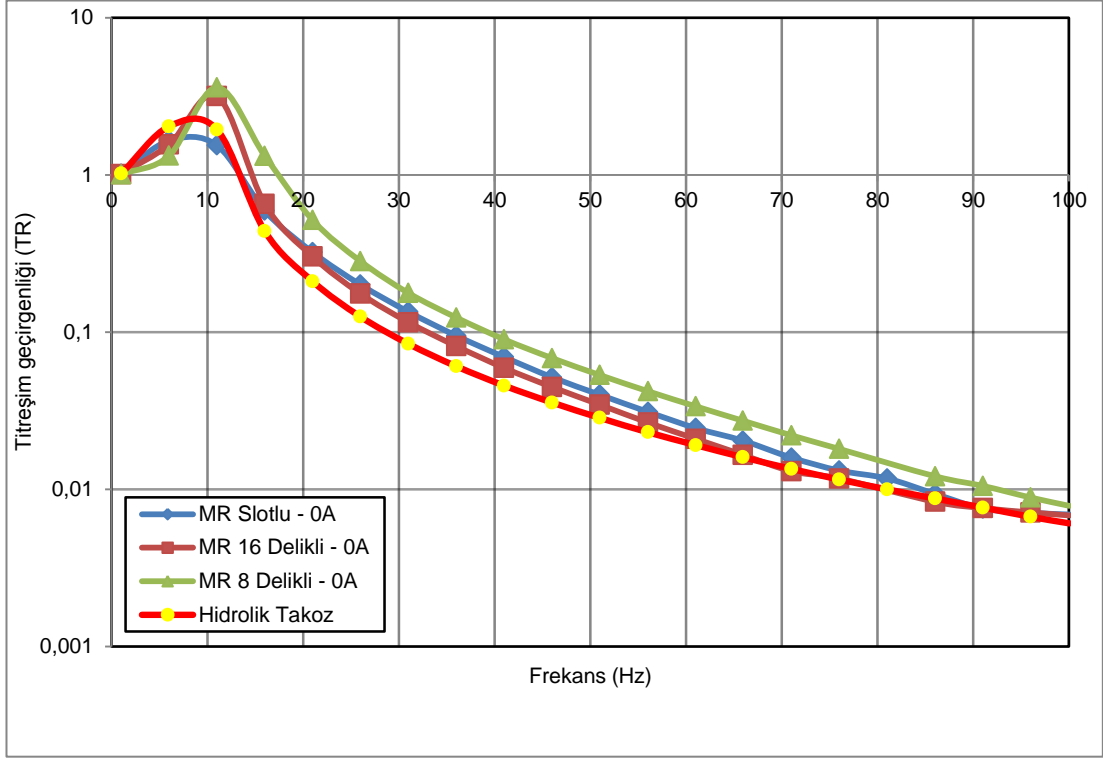


Şekil 3.10. $\pm 0,1$ mm genlik için dinamik katılığın frekansa göre değişimi

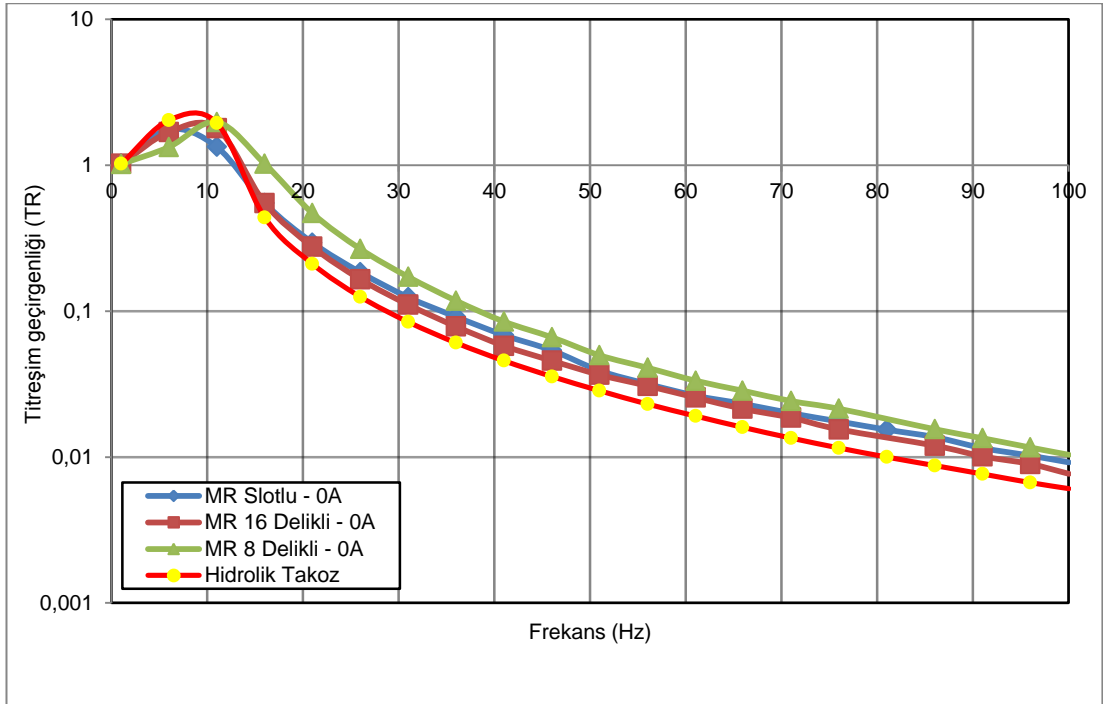


Şekil 3.11. $\pm 1,0$ mm genlik için dinamik katılığın frekansa göre değişimi

0 ile 100 Hz arasında MR 8 delikli, MR 16 delikli, MR slotlu takozlar ve hidrolik takoz için yapılan titreşim geçirgenliği ölçüm sonuçları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de verilmiştir. Şekil 3.12'de $\pm 0,1$ mm düşük genlik için sonuçlar bulunurken, Şekil 3.13'de $\pm 1,0$ mm yüksek genlikler için sonuçlar gösterilmiştir. Düşük ve yüksek genlik için yapılan farklı ölçümler sonucu takoz tipleri için frekansa göre titreşim geçirgenliği eğrileri oluşturulmuştur. Hidrolik takoz ile karşılaştırıldığında tüm takoz tiplerinin titreşim geçirgenliklerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bu yeni tasarımlarda düşük frekanslarda hidrolik takoza göre daha fazla sönüm elde edildiğini göstermiştir. Böylece düşük frekanslarda hidrolik takoza göre daha düşük titreşim geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Yüksek frekanslarda da hidrolik takozdan daha fazla sönüm elde edildiği için titreşim geçirgenliği hidrolik takoza göre daha yüksek değerlere ulaşmıştır.



Şekil 3.12. $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

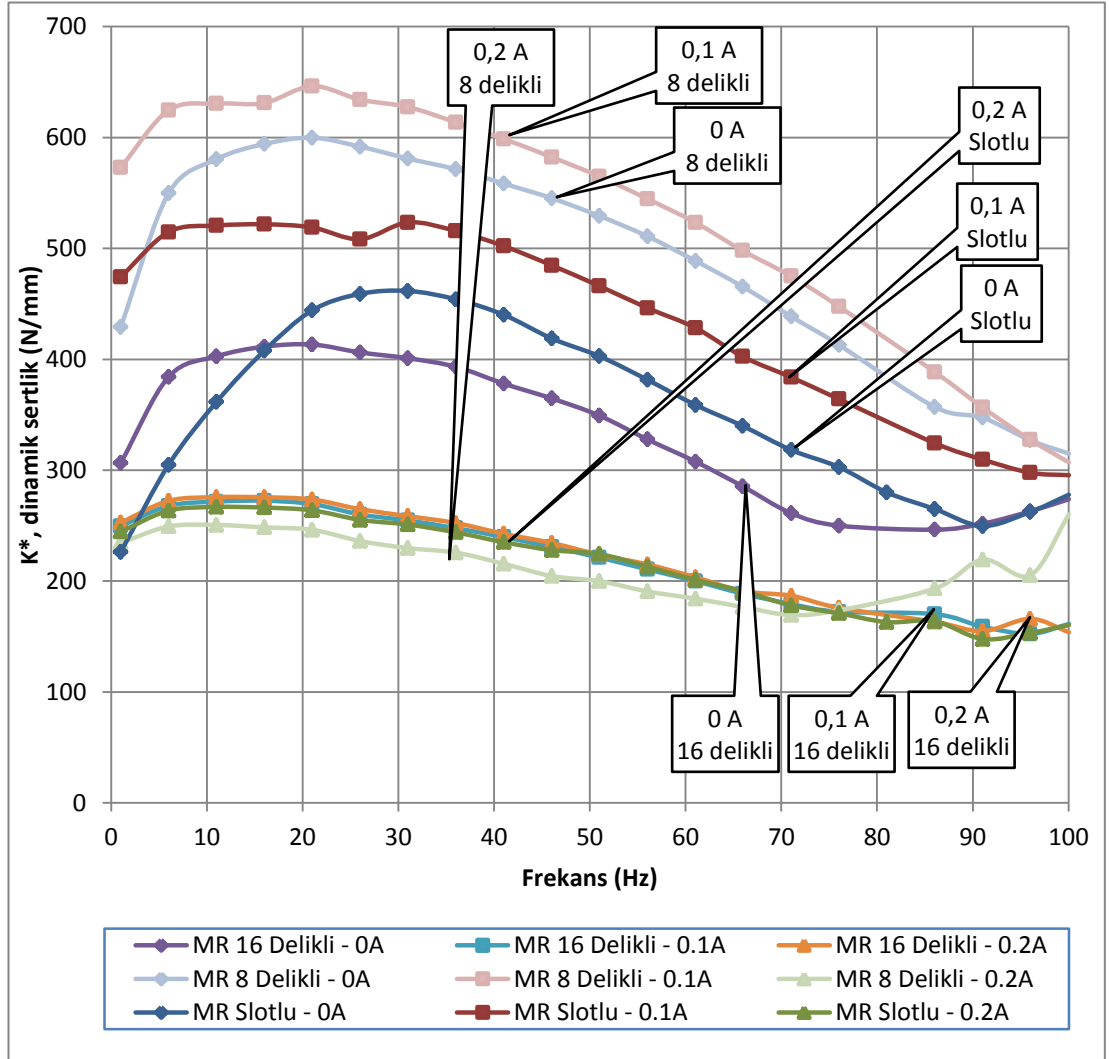


Şekil 3.13. $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

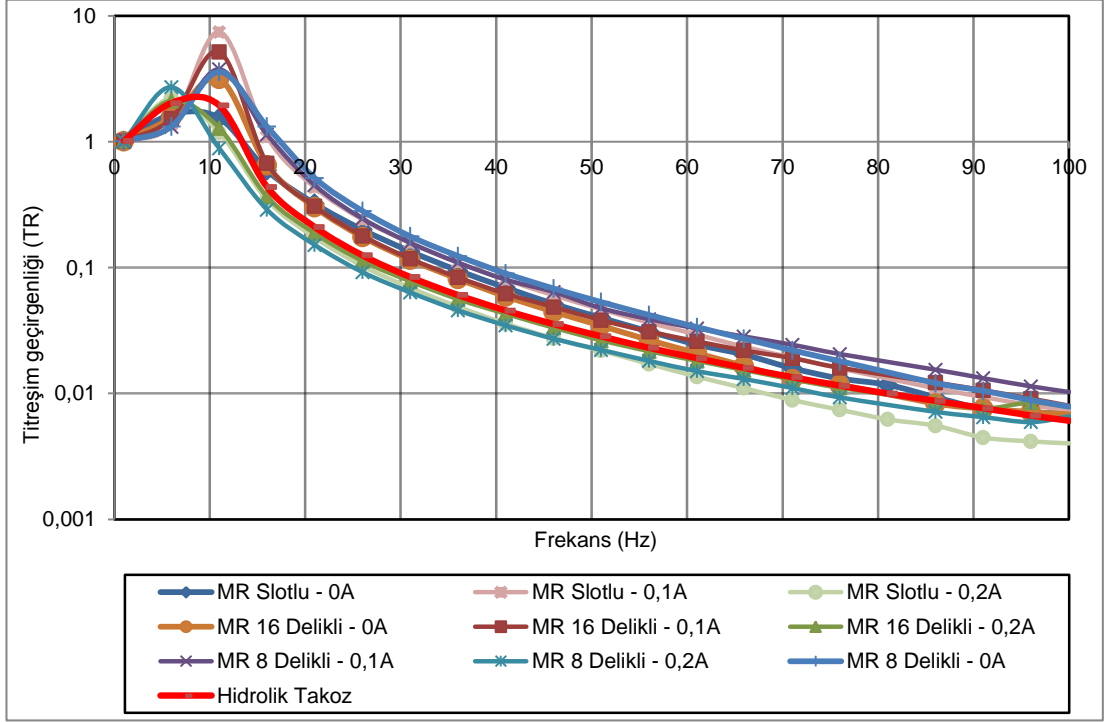
3.3.4. Takoz tiplerinin farklı akımlarda karşılaştırılması

MR 8 delikli, MR 16 delikli ve MR slotlu takoz tiplerinin farklı akımlarda karşılaştırılması Şekil 3.14'de gösterilmiştir. 0,1 A akım değerlerine karşılık gelen eğriler incelendiğinde katılık değerlerinin akım kapalı durumdaki katılık değerlerinden yüksek olduğu ve eğrinin düzleştiği görülmüştür. Akımın artırılmasıyla elektro-mıknatısın oluşturduğu manyetik alan artmış ve dolayısıyla kanal içindeki MR sıvısının viskozitesi artmıştır. Böylece MR sıvısının akmaya karşı direncinin artmasıyla uygulanan kuvvete karşı oluşan direnç kuvvetinin artması takozun katılığını arttırmıştır.

0,2 A akım uygulandığında her üç tip takozda da kanal içindeki MR sıvısı akışı bloke olmuştur. Takoz elastomerik takoz davranışına benzer bir davranış göstermeye başlamış ve katılık eğrisi elastomerik takozda olduğu gibi düz şekil almıştır. Katılık değerinin elastomerik takoz için ölçülen değerlerden daha büyük olması takozun içindeki sıvı ile birlikte katılığın artmasından kaynaklanmaktadır. MR 16 delikli takozda ise akış 0,1 A'da bloke olmuştur. Bunun nedeni düşük genlikli kuvvet ile oluşan kayma gerilmesinin MR sıvısının akma gerilmesinden küçük olması sonucu akışın bloke olmasıdır. Delik çaplarının MR 8 delikli takozda göre daha büyük olmasına rağmen MR 16 delikli takozda görülen bu davranış çok düşük genliklerde çalışıldığından kaynaklanmaktadır. Bu durum ancak matematiksel model geliştirilerek ve deney sonuçları ile model doğrulandıktan sonra tam olarak açıklanabilir.

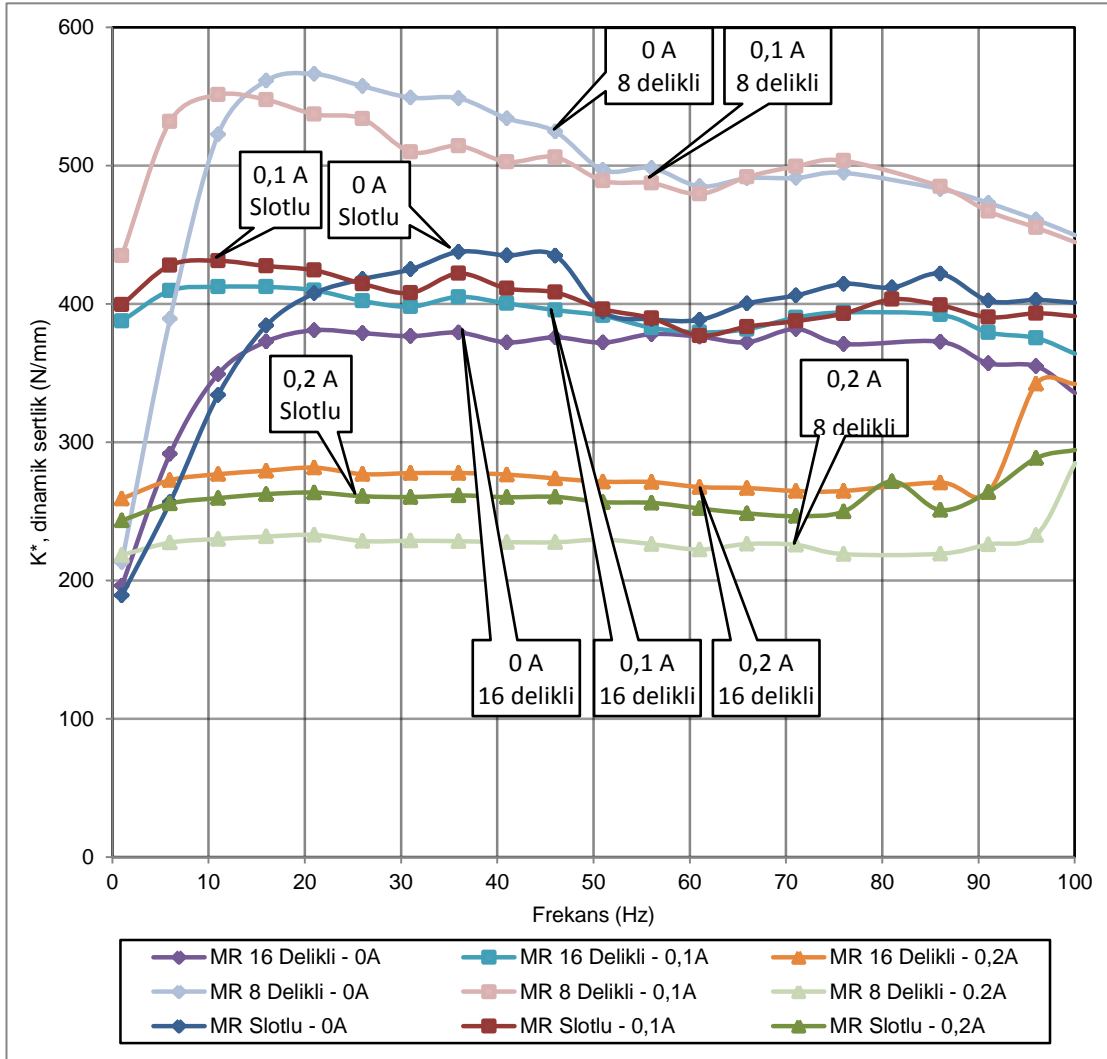


Şekil 3.14. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

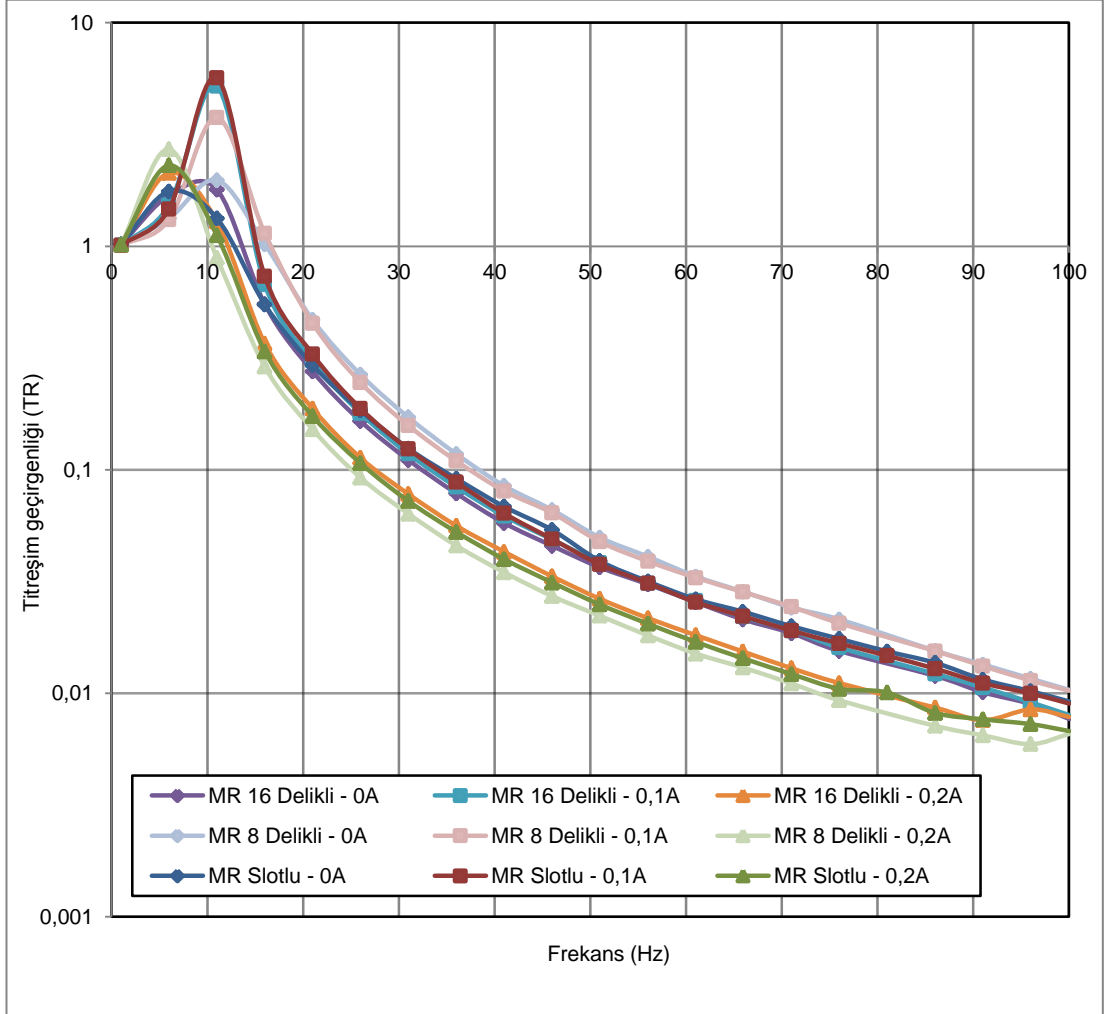


Şekil 3.15. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

Yüksek genlik olarak verilen $\pm 1,0$ mm genlik için dinamik katılığın frekansa göre değişimi MR slotlu, MR 16 delikli ve MR 8 delikli takoz tipleri için Şekil 3.16 'da ve titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi aynı takozlar için Şekil 3.17'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde $\pm 0,1$ mm genlikte elde edilen sonuçlarla benzerlik görülmektedir. Akım değeri 0,1 A'ya ayarlandığında takozların katılıkları düşük frekans aralığında artmış, yüksek frekanslarda azalmıştır. Bu frekans geçişi 15 ila 20 Hz arasına denk gelmektedir. MR 16 delikli takozda 0,1 A'da akışın bloke olmadığı ve katılığın arttığı görülmüştür ancak diğer takozlardan farklı olarak MR 16 delikli takozda yüksek frekanslarda katılık değeri azalmamış, artmıştır. Akım 0,2 A değerine getirildiğinde, kanal içindeki basıncın oluşturduğu kayma gerilmesi MR sıvısının akma gerilmesinden daha düşük olduğu için akış bloke olmuştur. Takoz elastomerik takoz davranışı göstermeye başlamıştır.



Şekil 3.16. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

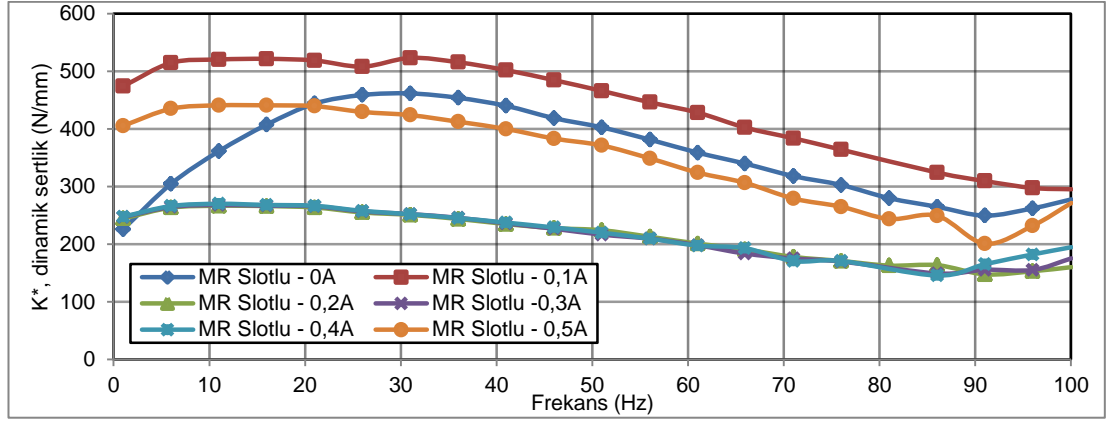


Şekil 3.17. Farklı akımlarda farklı takoz tipleri için $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

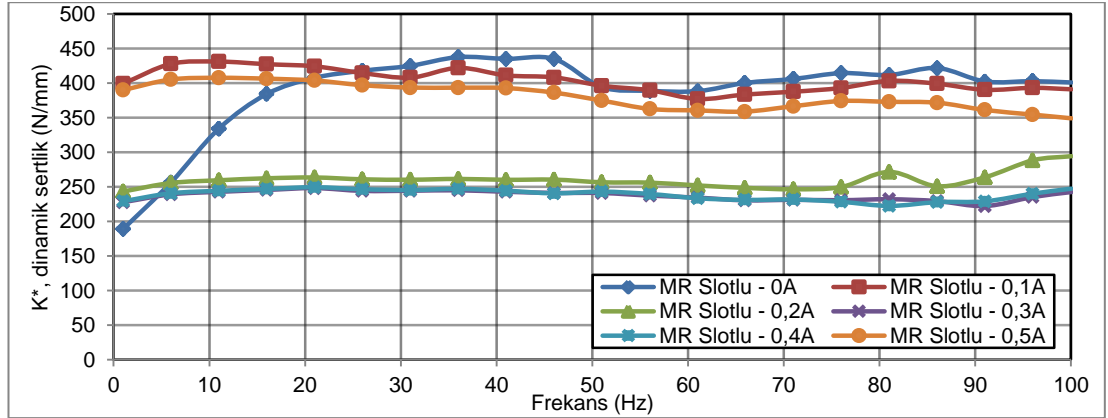
3.3.5. MR slotlu takozun karakteristik eğrileri

MR slotlu takoz ile yapılan deneyler sonucunda; düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.18'de ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.19'da dinamik katılığın frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Takoza uygulanan akım ile birlikte oluşan manyetik alanın artması sonucu MR sıvısının viskozitesi artmıştır. Bingham modeline göre uygulanan manyetik alan ile orantılı olarak akma gerilmesi oluşmuştur. MR sıvısı daha büyük viskoziteli bir sıvı durumuna gelmiştir. 0,1A'da oluşan kayma gerilmesi

MR sıvısının akma gerilmesinin üstündedir. Bu nedenle kanal içinden akan MR sıvısının direnci ve inertansı ile bağlantılı olarak takozun katılığı artmıştır. 0,2A ve üstünde MR sıvısının akma gerilmesi uygulanan kayma gerilmesinden büyük olduğu için kanal içindeki sıvı akışı durmuştur. Takozun katılığı ve sönüm kabiliyeti elastomer üst gövdenin özelliklerine bağlı davranış göstermiştir.



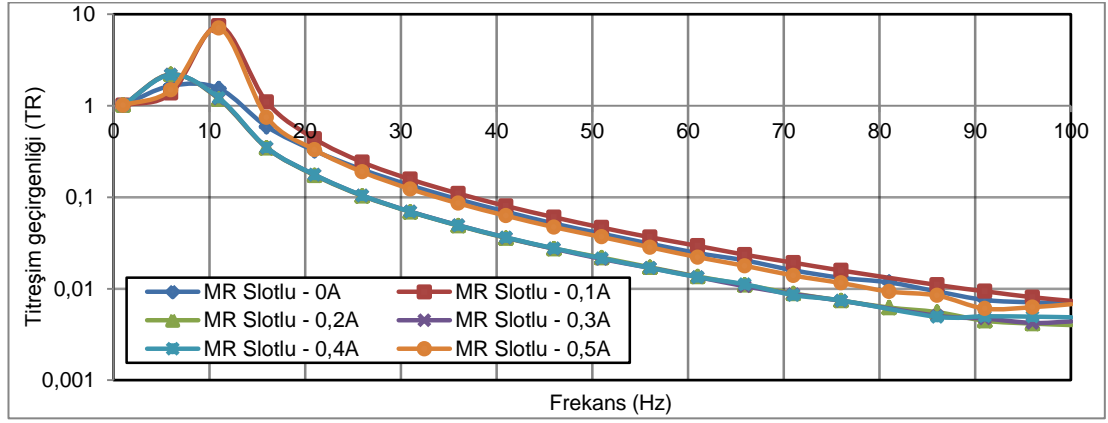
Şekil 3.18. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi



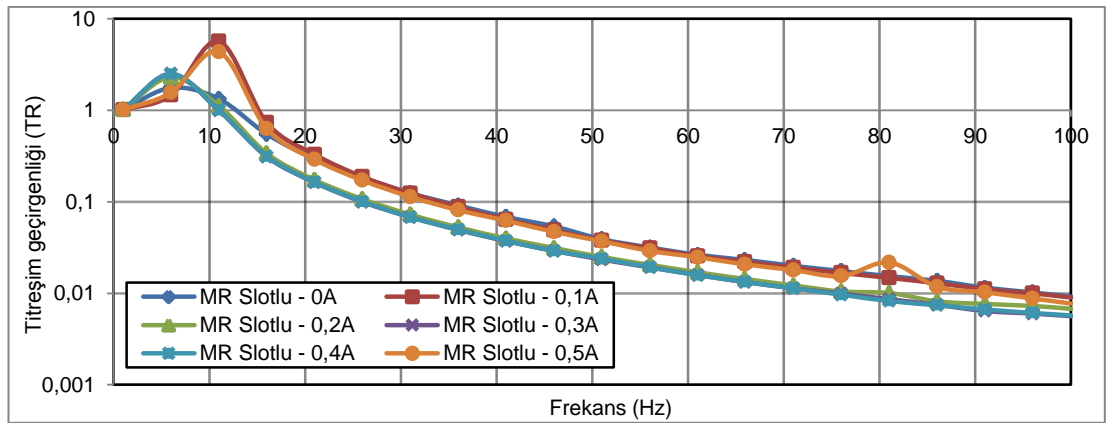
Şekil 3.19. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

MR slotlu takozun farklı akımlarda titreşim geçirgenliği eğrileri incelenmiştir. Düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.20'de ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.21'de titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Akımın 0,1A'ya artırılmasıyla birlikte takozun rezonans frekansında ve daha düşük frekanslarda

sönümlenme kabiliyeti arttığı için bu frekanslarda titreşim geçirgenliği azalmıştır. Ancak Rezonans frekansın üstünde akım uygulanmamış takozda göre daha yüksek geçirgenlik elde edilmiştir. Bunun nedeni sönüm katsayısının fazla olmasıdır. Akım 0,2A'nın üstüne çıkarıldığında ise rezonans frekansın üstünde oldukça düşük geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Ancak rezonans frekans ve altında daha yüksek geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Çünkü elastomerik takozun özellikleri baskın duruma gelen takozda sönümlenme etkisi düşük frekanslarda hidrolik sönümlenme etkisinden daha düşüktür.



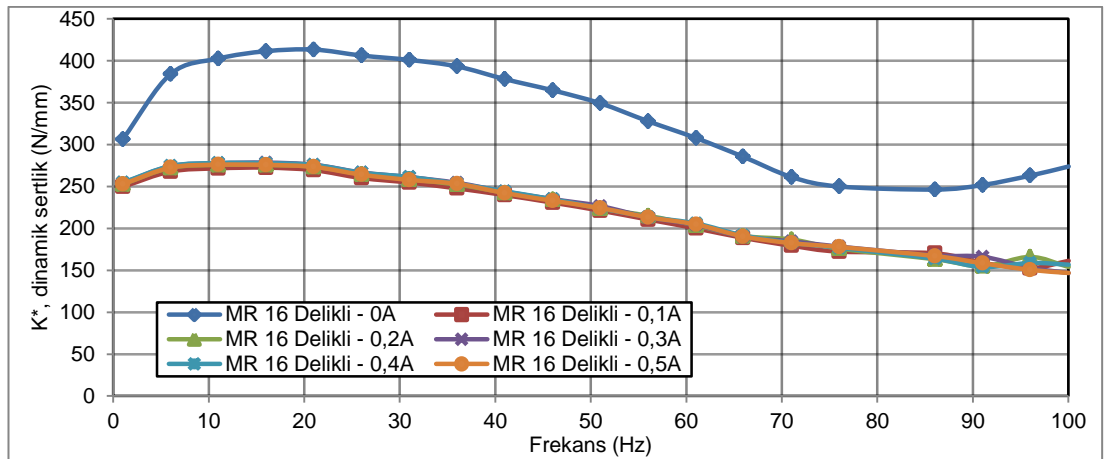
Şekil 3.20. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi



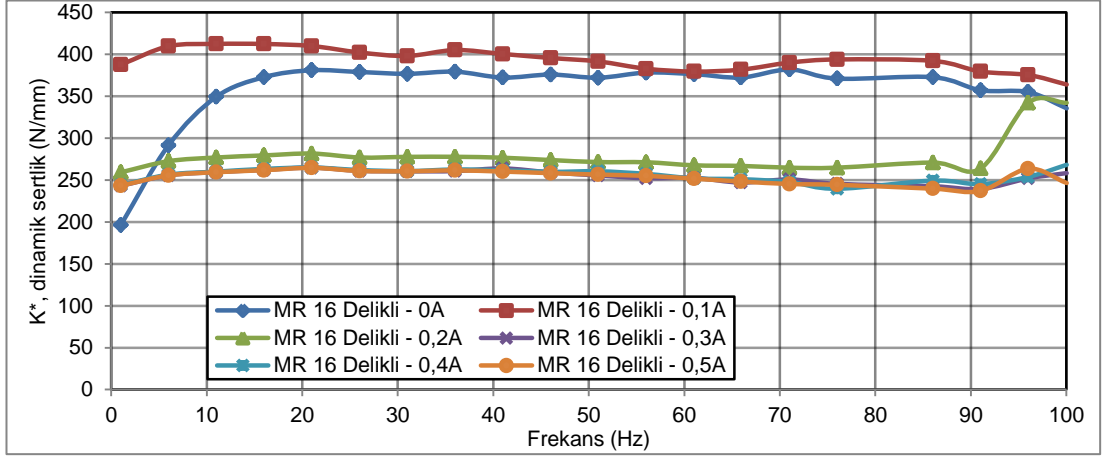
Şekil 3.21. MR slotlu takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

3.3.6. MR 16 delikli takozun karakteristik eğrileri

MR 16 delikli takoz deneyleri sonucu elde edilen dinamik katılığın frekansa göre değişimi eğrileri düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.22'de ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Bu takozda bir önceki bölümde incelenen MR slotlu takozda olduğu gibi benzer özellikler görülmüştür. Takoza uygulanan akım ile birlikte oluşan manyetik alanın artması sonucu MR sıvısının viskozitesi artmıştır. 0,1A'da oluşan kayma gerilmesi MR sıvısının akma gerilmesinin üstündedir. Böylece takozda akış bloke olmuş ve elastomerik takoz davranışı görülmüştür. Yüksek genlikli titreşimlerde ise 0,1 A için MR sıvısı akmaya devam etmiştir. Böylece hem hidrolik etki hem de elastomerik etki sonucu takozun katılığı artmıştır. 0,2A ve üstünde MR sıvısının akma gerilmesi uygulanan kayma gerilmesinden büyük olduğu için kanal içindeki sıvı akışı durmuştur. Bu noktadan sonra takozun katılığı ve sönüm kabiliyeti sadece üst elastomerin özelliklerine bağlıdır. MR slotlu takozun aksine MR 16 delikli takozda $\pm 0,1$ mm genliğinde uygulanan akımın 0,4 amperden 0,5 ampere değiştirilmesi sonrasında dinamik katılık eğrisi değişmemiştir. Bu eğrinin burada olduğu gibi değişmemesi beklenen bir durumdur, aksine eğrinin değişmesini açıklamak için matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır.

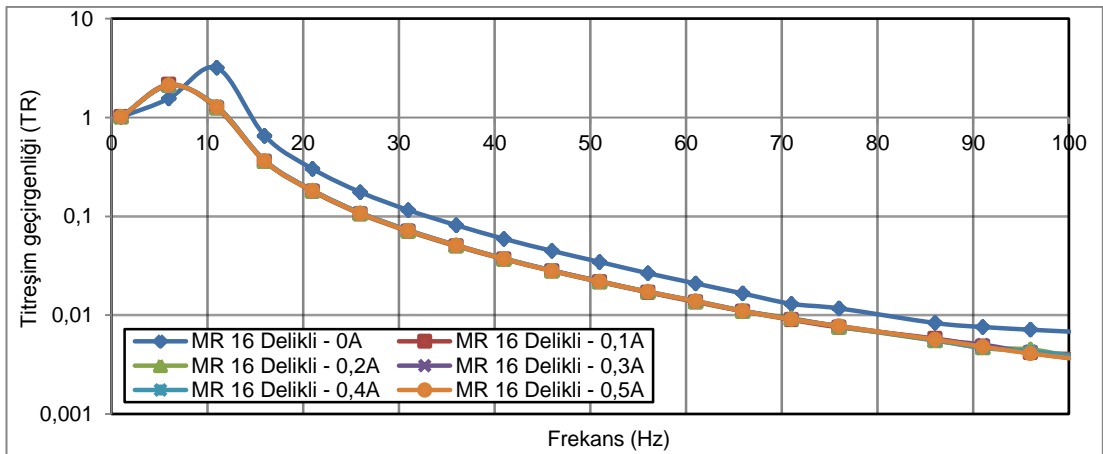


Şekil 3.22. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi



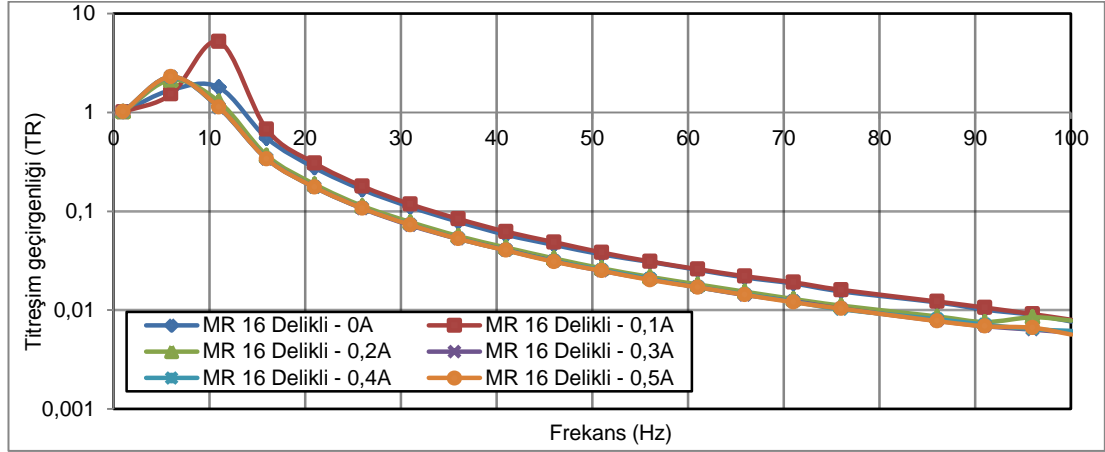
Şekil 3.23. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

MR 16 delikli takozun farklı akımlarda titreşim geçirgenliği değerleri ölçülmüştür. Düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.24'de ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.25'de titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Düşük genlikli titreşimler için akımın artırılması ile birlikte takozun rezonans frekansında ve daha yüksek frekanslarda sönümlenme kabiliyeti arttığı için bu frekans aralığında titreşim geçirgenliği eğrisi daha düşük değerleri göstermiştir. Rezonans frekansın altındaki frekanslarda akım uygulanmamış takozlara göre daha yüksek geçirgenlik elde edilmiştir. Bunun nedeni sönüm katsayısının fazla olmasıdır.



Şekil 3.24. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

Şekil 3.25'de sonuçları verilen yüksek genlikli titreşimler incelendiğinde ise akım 0,1A'da rezonans frekansa kadar düşük titreşim geçirgenliği elde edildiği, rezonans frekansın üstünde daha yüksek titreşim geçirgenliği değerleri elde edildiği görülmüştür. 0,1 A'da takozun katılığı ve sönüm katsayısı arttığı için düşük frekanslarda titreşim geçirgenliği azalmış, yüksek frekanslarda ise artmıştır. 0,1 A'nın üstündeki diğer akım değerleri için sonuçlar birbirine çok yakın eğriler olarak kendini göstermiştir. Akım kapalı durum ile karşılaştırıldığında rezonans frekansın altında titreşim geçirgenliği eğrisi artış göstermiştir. Rezonans frekansın üstüne çıkıldığında titreşim geçirgenliği eğrisi önemli ölçüde düşmüştür.

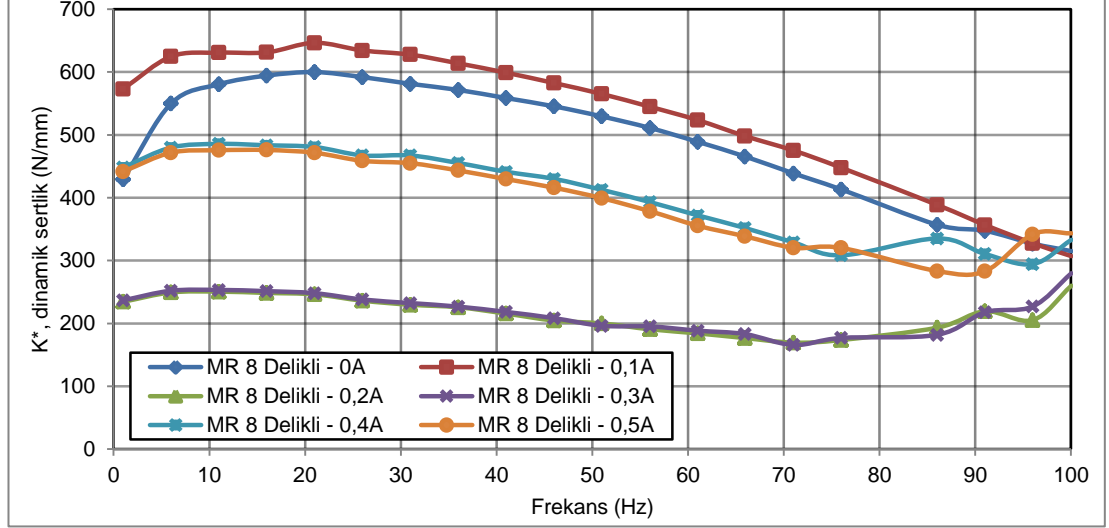


Şekil 3.25. MR 16 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

3.3.7. MR 8 delikli takozun karakteristik eğrileri

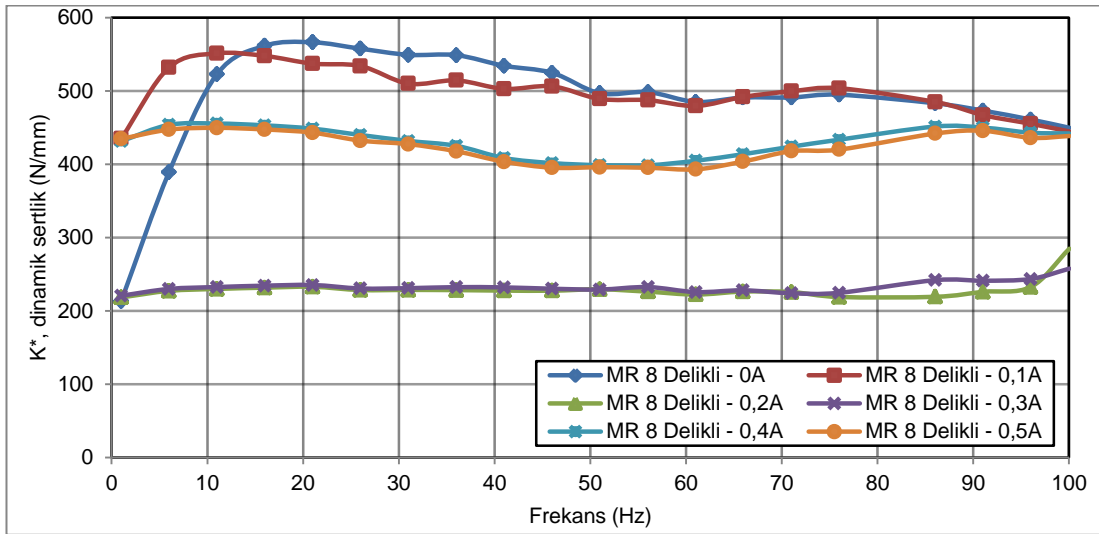
MR 8 delikli takoz deneyleri sonucu elde edilen dinamik katılığın frekansa göre değişimi eğrileri düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.26'da ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.23'de gösterilmiştir. 0 ile 0,5 amper akım değerleri arasında 0,1 amper akım artış değeri ile birlikte eğriler aynı grafik üstünde gösterilmiştir. Bu takozda bir önceki bölümde incelenen MR slotlu ve MR 16 delikli takozda olduğu gibi benzer özellikler görülmüştür. Takoza uygulanan akım ile birlikte oluşan manyetik alanın artması sonucu MR sıvısının viskozitesi artmıştır. 0,1A'da oluşan kayma gerilmesi MR sıvısının akma gerilmesinin üstündedir. Bu nedenle takozun

katılığı artmıştır. 0,2A ve 0,3 A değerlerinde MR sıvısının akma gerilmesi uygulanan kayma gerilmesinden büyük olduğu için kanal içindeki sıvı akışı durmuştur.



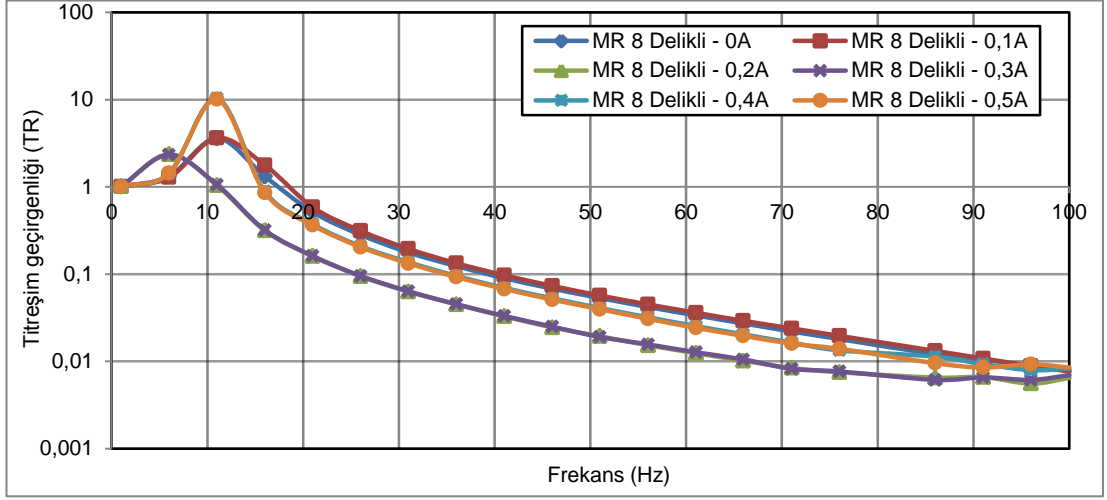
Şekil 3.26. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

Bu noktadan sonra takozun katılığı ve sönüm kabiliyeti elastomer üst gövdenin özelliklerine bağlıdır. MR 8 delikli takozda da MR slotlu takozun dinamik katılık eğrilerinde 0,5 amper akımda olduğu gibi bir artış olmuştur. Bu artış MR 8 delikli takoz için takozu hem 0,4 amper hem de 0,5 amper akım uygulandığında elde edilen eğrilerde görülmüştür. Eğrinin değişmesini açıklamak için matematiksel modele ve hidrolik etkinin daha ayrıntılı anlaşılmasını sağlayacak ilave deneylere gerek görülmüştür.



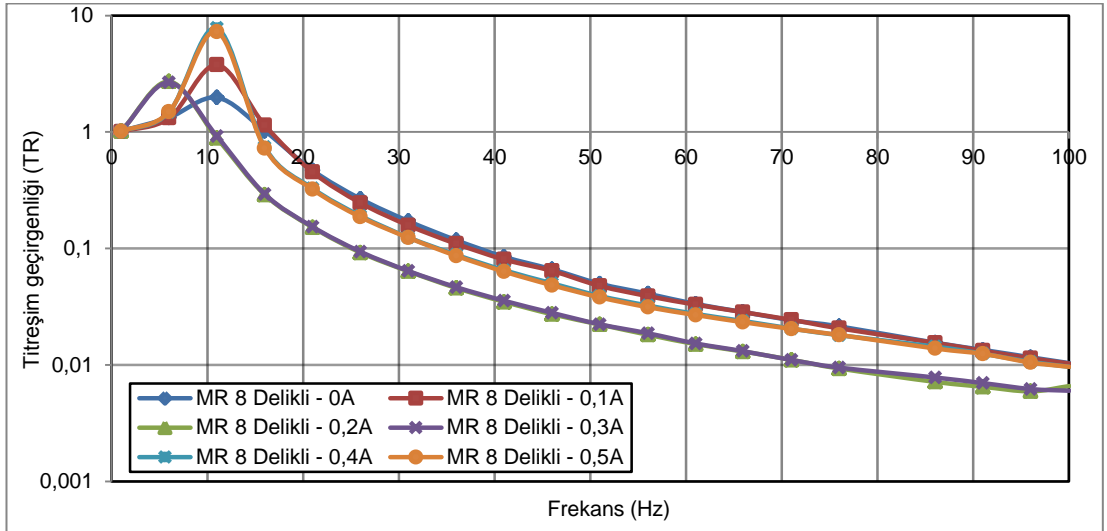
Şekil 3.27. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte dinamik katılığın frekansa göre değişimi

MR 8 delikli takozun farklı akımlarda titreşim geçirgenliği değerleri ölçülmüştür. Düşük genlikli titreşimler için Şekil 3.28'de ve yüksek genlikli titreşimler için Şekil 3.29'da titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Düşük genlikli titreşimler için eğriler incelendiğinde 0 A ve 0,1 A eğrilerinin çakışan eğriler olduğu görülmüştür. 0,2 A ve 0,3 A eğrileri çakışmaktadır. Ayrıca 0,4 A ve 0,5 A eğrileri de çakışmaktadır. Sonuçlara göre, 6 farklı kontrol akımı değeri için ortaya üç farklı tip eğri çıkmıştır. 0,2 A ve 0,3 A eğrileri en düşük titreşim geçirgenliği eğrileridir. Bu akımlarda MR sıvı akışının durduğundan bahsetmiştik. Elastomerin düşük yay katsayısı ve düşük sönümlenme değeri nedeniyle takozun titreşim geçirgenliği 8 Hz'den başlamak üzere diğer tüm artan frekanslarda düşmüştür. Ayrıca sistemin doğal frekansı 5 Hz'e doğru kaymıştır. 0,4 A ve 0,3 A akım değerlerinde 14 Hz'e kadar olan frekanslarda sistemin titreşim geçirgenliği akım kapalı durumdakine göre daha yüksektir. Takoz akım kapalı durumdakinden daha yumuşaktır ve sönümlenmesi düşüktür. 0 A ve 0,1 A eğrileri incelendiğinde ise aralarında fazla bir fark görülmemiştir.



Şekil 3.28. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 0,1$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

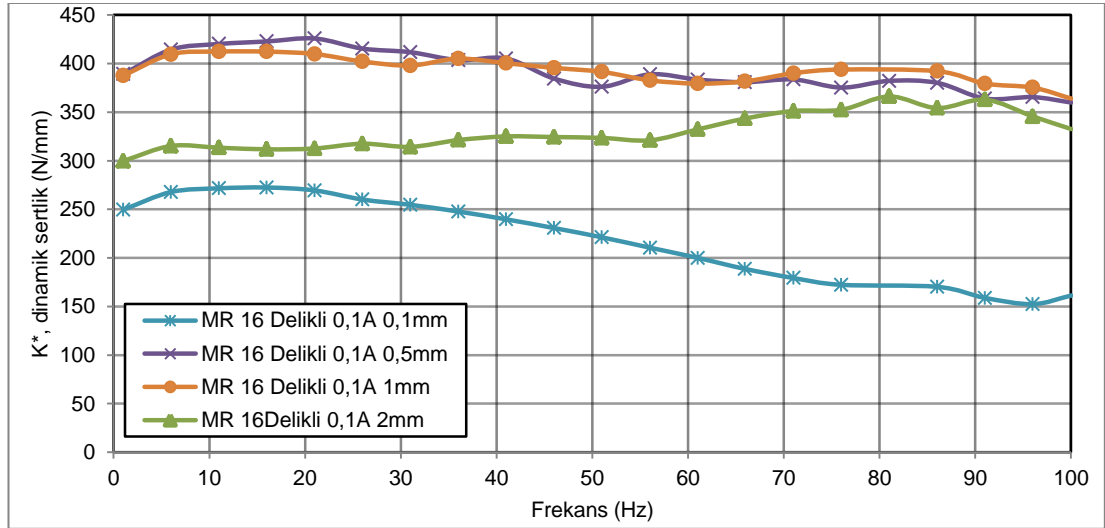
Şekil 3.29'da sonuçları verilen yüksek genlikli titreşimler için titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi incelendiğinde ise eğriler arasında Şekil 3.28 ile aynı ilişkiler gözlemlenmiştir. MR 8 delikli takoz ile 8 Hz'in altındaki frekanslarda takoza giden akım kapalı ya da takoza 0,1 A akım uygulandığında en düşük titreşim geçirgenliği elde edilmiştir. 8 Hz'in üstündeki frekanslarda ise takoza 0,2 A ya da 0,3 A uygulandığında en düşük titreşim geçirgenliği değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.29. MR 8 delikli takoz için farklı akımlarda ve $\pm 1,0$ mm genlikte titreşim geçirgenliğinin frekansa göre değişimi

3.3.8. Farklı genliklerde sabit akımda takoz tiplerinin karşılaştırılması

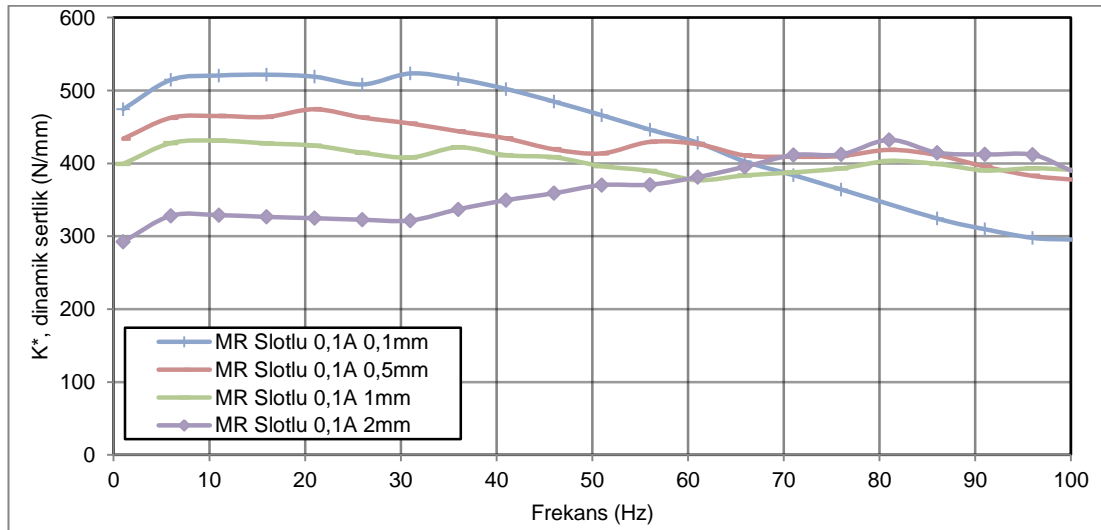
Bu bölümde 0,1A değerinde takoz tiplerinin farklı genliklerdeki davranışları gösterilmiştir. $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm genliklerde 0 ile 100 Hz arasında ölçüm yapılmış. $\pm 0,3$ mm ve $\pm 0,4$ mm genliklerde 0-20 Hz arasında ölçüm yapılmıştır. MR 16 delikli takoz için $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm, $\pm 2,0$ mm genliklerde yapılan dinamik katılık ölçüm sonuçları Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Farklı akımlarda farklı tip takozların karşılaştırma grafiklerine bakıldığında, MR 16 delikli takozun 0,1A akımda ve $\pm 0,1$ mm genlikte elastomerik takoz davranışı göstermeye başladığı görülmüştür. Dinamik katılık değerlerinin $\pm 0,5$ mm ve $\pm 1,0$ mm genliklerde birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Bu genliklerde takoz hidrolik takoz davranışı göstermiştir. Takoza bu genliklerde daha fazla kuvvet uygulandığı için MR sıvısının akma gerilmesi aşılmıştır. $\pm 2,0$ mm genlikte daha da artan kuvvet nedeniyle takozda nispeten düşük dinamik katılık değerleri görülmüştür. Bu genlikte de MR sıvısının akışı devam etmiştir.



Şekil 3.30. MR 16 delikli takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi

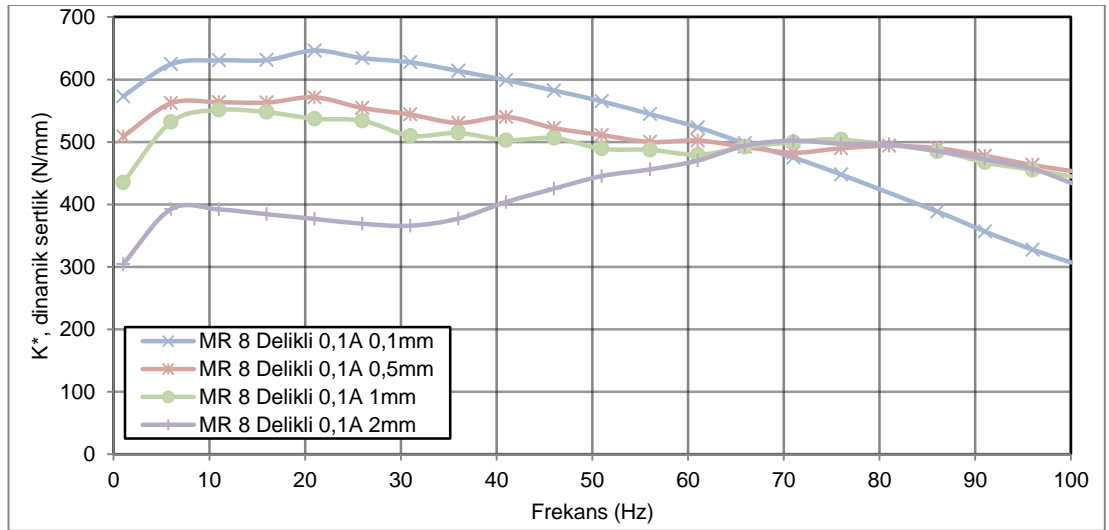
MR slotlu takozun dinamik katılık eğrileri $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm ve $\pm 2,0$ mm genliklerde ölçülmüş ve farklı genlikler için dinamik katılığın frekansa göre değişimi

Şekil 3.31'de verilmiştir. Dinamik katılık eğrilerinin değişim noktası olarak 66 Hz frekansı dikkat çekmiştir. 66 Hz'e kadar dinamik katılık genlik arttıkça azalmıştır. 66 Hz'in üstünde dinamik katılık genlik arttıkça artmıştır. Nguyen'ın [2] belirttiğine göre, genlik arttıkça kanal içinden geçen sıvının miktarı arttığı için sıvının akışa direnci ve inertansı artmalıdır. Ayrıca üst haznenin esnekliği artmalı, alt haznenin esnekliği ise azalmalıdır. Bu bilgilere göre test sonuçları incelendiğinde, bir benzerlik kurulamamıştır. Bu noktada hidrolik takozun farklı genliklerdeki dinamik katılık eğrileri ile karşılaştırma yapılmış ve aynı durumun hidrolik takozda da olduğu görülmüştür. $\pm 0,5$ mm ve $\pm 1,0$ mm eğrilerinin orijinal hidrolik takozda da beraber hareket ettikleri görülmüştür. $\pm 0,1$ mm ve $\pm 2,0$ mm eğrilerinin kesişme noktasının 30 Hz olduğu görülmüş ve 30 Hz'den sonra $\pm 0,1$ mm eğrisi azalırken $\pm 2,0$ mm eğrisi artmaya başlamıştır (Bkz. Bölüm 3.3.2). Frekansa göre değişen bu davranış üst elastomer gövdenin piston alanı ile ilgilidir. MR slotlu takozda iç yapı değiştirildiği için kesişme frekansı değişmiştir ancak ana karakter korunmaktadır.



Şekil 3.31. MR slotlu takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi

MR 8 delikli takozun dinamik katılık eğrileri $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,5$ mm, $\pm 1,0$ mm ve $\pm 2,0$ mm genliklerde ölçülmüş ve farklı genlikler için dinamik katılığın frekansa göre değişimi Şekil 3.32'de verilmiştir. MR slotlu takozda yapılan açıklamaların bu takoz içinde geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. $\pm 0,1$ mm ve $\pm 2,0$ mm eğrilerinin kesişme noktasının MR slotlu takozdaki gibi 66 Hz frekansına karşılık geldiği görülmüştür. Ancak MR 16 delikli takozda 0,1A ve $\pm 0,1$ mm genlik değerlerinde akış bloke olduğu için benzer kesişme noktası görülememiştir. Bu nedenle MR 16 delikli takozun 0 A akımda farklı genlikteki dinamik katılık eğrilerine başvurulmuştur. En düşük ve en yüksek genlikler için aynı kesişme noktası bu eğrilerde 48 Hz frekansta olduğu görülmüştür. Bu kez, MR slotlu ve MR 8 delikli takozların 0A akımda ve farklı genliklerdeki dinamik katılık eğrileri incelenmiş, MR slotlu takoz için kesişme noktası 52 Hz ve MR 8 delikli takoz için 64 Hz olduğu görülmüştür. Yani tüm takoz tipleri genlik değiştiğinde hidrolik takozla benzer bir karakteristiğe sahip olmalarında rağmen etkileşim frekanslarının iç yapıya bağlı olarak değişiklik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 3.32. MR 8 delikli takozun 0,1A akımda farklı genlik değerlerinde dinamik katılığın frekansa göre değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı tip MR takoz tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Tasarım amacı olarak geleneksel kauçuk ve hidrolik takozların özelliklerini geliştirecek, daha iyi titreşim yalıtımı sağlayacak bir ürün oluşturmak amaçlanmıştır. Çalışma sırasında daha önce yapılmış MR takoz çalışmaları titizlikle incelenmiş ve farklı tasarımlar oluşturulmuştur.

Elastomerik takoz, hidrolik takoz ve üretimi yapılan MR slotlu, MR 16 delikli ve MR 8 delikli takozlar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir :

- Elastomerik takoz ile çalışma frekans aralığında aynı dinamik katılık değeri elde edilmektedir. Sönümlenme özelliği diğer takozlara göre daha düşüktür.
- Hidrolik takoz ile düşük ve yüksek frekanslarda farklı dinamik katılık ve farklı sönüm değerleri elde edilebilmektedir.
- Akış kanal genişliğinin MR takozun karakteri üzerindeki etkisi MR 16 delikli takoz ve MR 8 delikli takoz karşılaştırıldığında görülmüştür.
- MR 16 delikli takozun üst ve alt haznesi arasındaki akışın 0,1A akım uygulandığında bloke olduğu, MR 8 delikli takozda hazneler arasındaki akışın devam ettiği görülmüştür. Bu davranışı açıklamak için matematiksel model geliştirilmesine ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.
- MR slotlu takozun kanal alanının daha büyük olmasına rağmen, 15 Hz üzeri frekanslarda MR 16 delikli takozla göre daha yüksek katılık elde edilmesi dikdörtgen geometrili kanalda dairesel geometrili kanala göre akışa karşı direncin bu frekanslarda daha fazla olduğunu göstermiştir.
- MR takoz tasarımları ile hidrolik takozdan daha düşük titreşim geçirgenliği değerleri elde edilmiştir. Bu takozlar kullanılarak, elastomerik ve hidrolik takozlara göre daha fazla titreşim yalıtımı sağlanabilir.

- MR 8 delikli takozda diğer MR takoz tiplerine göre daha düşük titreşim geçirgenliği değerleri elde edilmiş ve bu takozun kullanılacağı sistemde daha iyi titreşim yalıtımı sağlanabileceği görülmüştür.
- Bu çalışmada MR takozlar için elde edilen karakteristik eğriler, bu takozların kullanılacağı sisteme uygun kontrolcü geliştirilmesi için kullanılabilirler.

Sonraki Çalışmalar

Bu araştırmada fiziksel ve matematiksel modeller oluşturularak sayısal bir çalışma yapılmamıştır. Bu modellerin oluşturulması ve deney verileri kullanılarak modellerin doğrulanması test sonuçlarının daha ayrıntılı yorumlanmasına ve takozun geliştirilmesine kolaylık sağlayacaktır.

MR takoz içindeki akışın bloke olduğu akım değerine kadar farklı ve daha hassas akımlarda test yapılması takozun bu aralıktaki davranışının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada, maliyeti azaltmak için mevcut bir hidrolik takozun bazı parçaları kullanılmıştır. Üst gövde ve alt diyafram parçalarında MR takoz için iyileştirme yapılması takozun performansını arttıracaktır. Dayanıklılığı etkilemediği sürece üst elastomerin katılığının azaltılması mümkündür. Bu çalışmada kullanılan 60 Shore sertliğindeki üst elastomerin katılığını azaltmak yüksek frekanslı titreşimlerde daha düşük titreşim geçirgenliği elde edilebilmesini mümkün kılacaktır. MR takozu uygulanan akım artırılarak takoz katılığının ve takozun sönümlemesinin düşürülmesi mümkündür. Akım kapalı durumda ise takoz için istenen katılık hidrolik parametreler ile ayarlanabilir. Bu parametrelerin çalışma koşullarını da göz önünde tutarak beraber ayarlanmaları optimum performans sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Korkmaz, İ., "Araçlarda motor askı sistemlerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-7, 18-26, 34-37 (2007).
2. Nguyen, T. M., "A Novel Semi-Active Magnetorheological Mount For Vibration Isolation", Doktora Tezi, *The University of Toledo*, Amerika Birleşik Devletleri, 1-10, 43-51, 91-92, 101 (2009).
3. Khajavi, M. N., Abdollahi, V., "Comparison between optimized passive vehicle suspension system and semi active fuzzy logic controlled suspension system regarding ride and handling", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 1, 57-61 (2007).
4. Avraam, M. T., "MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device", Doktora Tezi, *Universite libre de Bruxelles, Department of Mechanical Engineering and Robotics*, Belçika, 7-8, 13, 19-20 (2009).
5. İnternet : Lord Corporation "Magneto-rheological technology and applications", www.lord.com (2007).
6. Ahn, Y. K., Yang, B., Ahmadian, M., Morishita, S., "A small-sized variable-damping mount using magnetorheological fluid", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16 (2) : 127-133 (2005).
7. Lee, H. S., Choi, S. B., "Control and response characteristics of a magnetorheological fluid damper for passenger vehicles", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11 (1) : 80-87 (2000).
8. Janocha, H., Jendritza, D. J., "Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications", *Springer*, 198-200 (1997).
9. Choi, S. B., Nam, M. H., Lee, B. K., "Vibration Control Of MR Seat Damper For Commercial Vehicles", *Journal of Intelligent Materials System and Structures*, 11 (12) : 936-944 (2000).
10. McManus, S. J., St. Clair, K. A., Boileau, P. E., Boutin, J., "Evaluation of Vibration and Shock Attenuation Performance of a suspension Seat with a Semi-Active Magnetorheological Fluid Damper", *Journal of Sound and Vibration*, 253 (1) : 313-327 (2002).

11. Duan, Y. F., Ni, Y. Q., Ko, J. M., "Cable Vibration Control using Magnetorheological Dampers", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17, 321 (2006).
12. Carlson, J. D., Matthis, W., Toscano, J. R., "Smart Prosthetics Based on Magnetorheological Fluids", *Proceedings of SPIE*, 4332, 308-316 (2001).
13. İnternet : Delphi "Innovative New Powertrain Mounts Use Magneto Rheological Fluids To Improve Performance, Safety And Refinement", www.delphi.com (2009).
14. İnternet : Lord Corporation "Magnetorheological Fluid Technology", www.lord.com (2007).
15. Anderson, W. B., "Parametric investigation toward achieving an optimal magnetorheological mount", Yüksek Lisans Tezi, *The University of Toledo*, Amerika Birleşik Devletleri, 12-13, 17 (2010).
16. Demersseman, R., "Caracterisation et modelisation causale d'un frein a liquide magnetorheologique en vue de sa commande", Doktora Tezi, *Ecole Nationale Supérieure D'arts et Metiers Paristech*, Paris, 14 (2009).
17. Yu, Y., Naganathan, N. G., Dukkupati, R. V., "A literature review of automotive vehicle engine mounting systems", *Mechanism and Machine Theory*, , 36, 123-142 (2001).
18. Wang, R., "A Study Of Vibration Isolation Of Engine Mount System", Yüksek Lisans Tezi, *Concordia University, Department Of Mechanical And Industrial Engineering*, Canada, 16 (2005).
19. Geisberger, A. A., "Hydraulic engine mount modeling, parameter identification and experimental validation", Yüksek Lisans Tezi, *University of Waterloo, Mechanical Engineering*, Ontario, 1-11, 17, 44, 98 (2000).
20. Singh, R., Kim, G., Ravindra, P. V., "Linear analysis of automotive hydro-mechanical mount with emphasis on decoupler characteristics", *Journal of Sound and Vibration*, 158, A.B.D., 219-243 (1992).
21. Ushijima, T., Takano, K., Kojima, H., "High performance hydraulic mounts for improving vehicle noise and vibration", *SAE*, 880073 (1988).
22. Ahn, Y. K., Ahmadian, M., Morishita, S., "On the Design and Development of a Magneto-Rheological Mount", *Vehicle System Dynamics*, 32 (2) : 199-216 (1999).

23. Stelzer, G. J., Schulz, M. J., Kim, J., Allemang, R. J., "A Magnetorheological Semi-active Isolator to Reduce Noise and Vibration Transmissibility in Automobiles", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No.12, 743-765 (2003).
24. Carlson, J. D., Jolly, R. M., "MR fluid, foam and elastomer devices", *Mechatronics*, 10, 555-569 (2000).
25. Hong, S. R., Choi, S. B., Lee, D. Y., "Comparison of vibration control performance between flow and squeeze mode ER mounts: Experimental work", *Journal of Sound and Vibration*, 291, 740-748 (2006).
26. Choi, S. B., Choi, Y. T., Cheong, C. C., Jeon, Y. S., "Performance evaluation of a mixed mode ER engine mount via hardware-in-the-loop simulation", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10, 671-677 (1999).
27. Barber, D., Carlson, J. D., "Performance Characteristics of Prototype MR Engine Mounts Containing LORD Glycol MR Fluids", *11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Journal of Physics: Conference Series*, 149 012035 (2009).
28. York, D., Wang, X., Gordaninejad, F., "A new magnetorheological fluid-elastomer vibration isolator", *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008, Proceedings of SPIE*, 6928 (69281D) (2008).
29. Choi, S., Hong, S., Sung, K., Sohn, J., "Optimal control of structural vibrations using a mixed-mode magnetorheological fluid mount", *International Journal of Mechanical Sciences*, 559-568 (2008).
30. Brigley, M., Choi, Y. T., Wereley, N. M., Choi, S. B., "Magnetorheological Isolators Using Multiple Fluid Modes", *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, 18, 1143-1148 (2007).
31. Feyzi, T., Tikani, R., Esfahanian, M., Ziaei, R. S., "Performance Analysis of Different Modified MR Engines Mounts", *Journal of Solid Mechanics*, 3 (2), 124-131 (2011).
32. Ay, R., Golnaraghi, M. F., Khajepour, A., "Investigation on a semi-active hydromount using MR fluid", *Active Control Technology for Enhanced Performance Operational Capabilities of Military Aircraft, Land Vehicles and Sea Vehicles*, RTO-MP-051 (2001).
33. Internet : Lord Corporation "MRF- 132DG", www.lord.com (2008).
34. Internet : Lord Corporation "Magnetic Circuit Design", www.lord.com (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TÜRKÜCÜ, Tamer
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 29.05.1980 Edirne
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (530) 975 86 56
 e-mail : tamerturkucu@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Çankaya Milli Piyango Anadolu Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008 -	Hidromek A.Ş. (Ankara)	Dokümantasyon Uzmanı
2007 - 2008	Ekay Mühendislik Ltd. Şti. (Kırıkkale)	Şantiye Şefi
2006 - 2007	ZİRVE Plastik Kalıp Ltd. Şti. (Ankara)	İmalat Mühendisi
2004	KOL&BEN Motor Supap Gayd Ltd.Şti. (Konya)	İmalat Mühendisi
2002	MAKO Elektrik Sanayi ve ticaret A.Ş. (Bursa) “AR-GE Bölümü”	Stajyer (Organizasyon Stajı)
2001	BSH Profilo Elektrikli Gereçler Sanayi A.Ş. (Tekirdağ) “Plastik Enjeksiyon Kalıphanesi”	Stajyer (İmalat Stajı)
2000	MANAŞ (Ankara) “Beceri Eğitim Merkezi”	Stajyer (Atölye Stajı)
2000	Selçuk Üni. & Konya Ticaret Odası Vakfı Dorthmund Eğitim Merkezi (Konya)	Stajyer (Atölye Stajı)

Yabancı Dil

İngilizce, Fransızca, Almanca