

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MANYETOREOLOJİK DAMPER SİSTEMLERİNDE SIVI
BİLEŞEN GELİŞTİRİLMESİ VE SÖNÜMLEME
ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**

ERCAN OLCAY

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANYETOREOLOJİK DAMPER SİSTEMLERİNDE SIVI
BİLEŞEN GELİŞTİRİLMESİ VE SÖNÜMLEME
ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

ERCAN OLCAY

Prof. Dr. Sedat KARABAY
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. A. Tamer ERTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Murat PAKDİL
Jüri Üyesi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Manyetoreolojik damperler manyetik alan altında, içlerinde ihtiva ettikleri manyetik parçacıkların zincir şeklini almasıyla farklı viskozite değerleri gösteren yarı aktif titreşim kontrolü ekipmanlarıdır. Bu ekipmanlar özellikle savunma sanayiinde zorlu arazi koşullarında araç içi titreşim değerini düşürmek için kullanılmaktadır. Farklı manyetik parçacık, farklı taşıyıcı sıvı ve farklı hacim oranları kullanılarak bu damperlerin karakteristikleri değiştirilebilmektedir. Bu sebeple bu konu hakkında birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmaların açtığı yolda daha kararlı sıvılar sentezlenmiş, özellikle parçacık boyutu ve parçacık yoğunluğu düşürülmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada yeni tür bir manyetik parçacık sentezi içi boş cam küreler manyetik kaplanmaya çalışılmış ancak farklı bir demir oksit olan hematit kaplanmıştır. Daha sonra bu parçacıklar kaplanmış ve kaplanmamış olarak 200 cSt viskozitesine sahip silikon yağına daldırılarak titreşim karakteristikleri, sönüm oranları ve çökeltme oranları karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için duyulan maddi desteği sağlayan Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğü'ne, tez süresi boyunca bilgi ve birikimini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Sedat KARABAY'a, akademik ve mesleki bilgi birikimini paylaşmanın yanında karşılaşılan sorunlara daha analitik ve çözüm odaklı yaklaşmamı sağlayarak tez süresince karşılaştığım tüm problemlerin üstesinden gelmemi sağlayan Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK'e, laboratuvar çalışmalarında beni destekleyen ve yardımcı olan Arş. Gör. Fahri VATANSEVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde şüphesiz ki en çok emeği sarf eden, yapıcı tavrıyla beni başarabileceğime ikna eden annem Türkan OLCAY'a ve beni istediğimi yapmam konusunda her zaman teşvik eden babam Mehmet Cumhur OLCAY'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Söz konusu tez çalışması Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2018/036HD proje numarası ile desteklenmiştir.

Mayıs – 2019

Ercan OLCAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLLOLALAR DİZİNİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Manyetoreolojik Sıvı.....	3
1.1.1. MR sıvı üretiminde karşılaşılan zorluklar	6
1.1.2. Çift dağılımlı sıvılar.....	7
1.1.3. Çekirdek-kabuk yapılar	9
1.1.4. Yeni tür manyetik parçacıklar	15
1.1.5. Cam kürelerin kaplanması	16
1.2. Manyetizma.....	19
1.2.1. Ferromanyetizma ve ferrimanyetizma	22
2. MALZEMELER VE YÖNTEM	26
2.1. Elektromanyetik Sistem Tasarımı	26
2.1.1. Akım yoğunluğunun belirlenmesi	26
2.1.2. Bobin parametreleri	27
2.2. Damperin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	28
2.2.1. Fiziksel çevrenin oluşturulması	28
2.2.2. Modelin oluşturulması ve mesh edilmesi	30
2.2.3. Sınır şartları ve yüklerin belirlenmesi	32
2.2.4. Modelin çözümü	32
2.3. İçi Boş Cam Kürelerin Kaplanması	33
2.3.1. Ön işlemler.....	34
2.3.2. Kaplama işlemi	36
2.4. Sıvıların Hazırlanması.....	39
2.4.1. Kürelerin silikon yağına daldırılması	39
2.5. Sönüm Oranının (ξ) Hesaplanmasında Kullanılan Cihaz ve Yöntem.....	40
2.5.1. Deneysel test düzeneği	40
2.5.2. Matematiksel titreşim modelinin oluşturulması	42
2.5.3. Düzeneğin çalışması ve veri toplama yazılımıyla verilerin eldesi	45
2.6. Çökme Oranlarının Belirlenmesi	47
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
EKLER.....	61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	86
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Manyetik alan yokluğunda (solda), manyetik alan uygulandığında (sağda) MR sıvısının davranışı	3
Şekil 1.2.	(A)valf modeli (B)direkt kesme modeli (C)sıkıştırma modeli (D)manyetik gradyan sıkıştırma modeli	5
Şekil 1.3.	Bakır tel etrafında oluşan manyetik alan	20
Şekil 1.4.	Bakır tel etrafında oluşan manyetik akı yoğunluğu	20
Şekil 1.5.	Katı malzemede oluşan manyetik akı yoğunluğu	21
Şekil 1.6.	Demir iyonlarının konumlarına göre oluşturdukları net manyetik momentler.....	23
Şekil 1.7.	Saf demir ve manyetitin sıcaklık – doyma manyetikleşmesi grafiği	24
Şekil 1.8.	Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin örnek B-H eğrisi.....	25
Şekil 2.1.	Bobin kesit alanı	27
Şekil 2.2.	Damperin ölçüleri (solda), damperin bileşenleri (sağda).....	27
Şekil 2.3.	Plane 13 elemanın belirlenmesi	29
Şekil 2.4.	132 DG sıvısının B-H eğrisinin yazılıma aktarılması.....	30
Şekil 2.5.	Modellenmiş sistem görüntüsü ve bileşenlerin gösterimi.....	31
Şekil 2.6.	Mesh sonrası model görünümü.....	32
Şekil 2.7.	122 EG sıvısına 0,5 A uygulandığındaki manyetik akı yoğunluğu ve yönü.....	33
Şekil 2.8.	122 EG sıvısına 0,5 A uygulandığında manyetik alan çizgileri.....	33
Şekil 2.9.	İçi boş cam kürelerin etanolla yıkanması	34
Şekil 2.10.	Deiyonize suyla yıkanan kürelerin filtrelenmesi işlemi.....	35
Şekil 2.11.	0,5 M NaOH solüsyonunda içi boş cam kürelerin ultrasonik temizleyicide temizlenmesi işlemi	35
Şekil 2.12.	Kurumaya alınmış cam küreler.....	36
Şekil 2.13.	Kurutulmuş Küreler	36
Şekil 2.14.	FeCl ₃ (solda) ve Na ₂ SO ₃ çözeltilerinin hazırlanması.....	37
Şekil 2.15.	Karışımın çeker ocakta karıştırılması	38
Şekil 2.16.	Hazırlanan karışımın süzülmesi.....	38
Şekil 2.17.	Hematit kaplanan kürelerin kuruduktan sonraki hali.....	39
Şekil 2.18.	Hematit kaplanmış küre içeren (solda) ve kaplanmamış cam küre içeren (sağda) sıvıların damper içindeki görünüşü.....	40
Şekil 2.19.	Enkoder elemanının sisteme dahil edilmiş görüntüsü	41
Şekil 2.20.	Cihazın test için hazırlanmış halinin görünüşü.....	42
Şekil 2.21.	İndirgenmiş sistem diyagramı.....	42
Şekil 2.22.	Veri toplama yazılımı ekran görüntüsü.....	46
Şekil 2.23.	%5 saf 6014 %95 200 cSt silikon yağı karışımının tek elastomer kullanılarak oluşturulmuş genlik-zaman grafiği.....	46
Şekil 2.24.	Kaplanmamış küre ihtiva eden sıvı içeren damperin sistemdeki görüntüsü.....	47

Şekil 2.25.	Çökeltme oranının belirlenmesinde kullanılan yöntemin şematiği	47
Şekil 3.1.	Farklı MR sıvılarının, farklı akım değerlerindeki ortalama manyetik akı yoğunlukları.....	48
Şekil 3.2.	Kaplanmamış küre içeren sıvıların sönüm oranlarının karşılaştırılması.....	50
Şekil 3.3.	Kaplanmış küre içeren yağların sönüm oranlarının karşılaştırılması	51
Şekil 3.4.	Yağların ortalama sönüm oranlarının karşılaştırılması.....	52
Şekil 3.5.	Kaplanmamış kürelerin çökeltme oranlarının karşılaştırılması	53
Şekil 3.6.	Kaplanmış kürelerin çökeltme oranlarının karşılaştırılması	53



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. MR sıvıların genel özellikleri	3
Tablo 1.2. Literatürdeki çekirdek-kabuk yapılar tablosu	19
Tablo 1.3. Bazı kaynakların manyetik akı yoğunlukları	22
Tablo 2.1. Akım-akım yoğunluğu değerleri.....	28
Tablo 2.2. Yazılıma girilen noktalar	30
Tablo 3.1. Farklı MR Sıvıların Farklı Akım Değerlerindeki B değerleri	48



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

τ	: Akma Gerilmesi (N/mm ²)
τ_0	: Manyetik Alanın Sebep Olduğu Akma Gerilmesi (N/mm ²)
$\dot{\gamma}$: Kayma Oranı (s ⁻¹)
η	: Plastik Viskozite (Pa.s)
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
B ₀	: Vakumun Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
μ_0	: Vakumun Manyetik Geçirgenliği (H/m)
μ	: Katının Manyetik Geçirgenliği (H/M)
μ_r	: Bağlı Geçirgenlik
M	: Manyetikleşme Alanı
X _m	: Manyetik Alan Hassasiyeti
J _s	: Akım Yoğunluğu (A/m ²)
N	: Sarım Sayısı
I	: Akım Değeri (A)
A	: Bobinin Kesit Alanı (m ²)
J	: Atalet Momenti (kg.m ²)
k	: Yay Katsayısı (N/m)
l	: Uzunluk (m)
c	: Sönüm Katsayısı (N.s/m)
F _{eq} sin ω t	: Zorlayıcı Kuvvet
$\dot{\theta}$: Açısal Hız (rad/s)
$\ddot{\theta}$: Açısal İvme (rad/s ²)
L	: Moment Kolu Uzaklığı (m)
m _{eq}	: Sistemin Eşdeğer Kütlesi (kg)
c _{eq}	: Eşdeğer Sönüm Katsayısı (N.s/m)
k _{eq}	: Eşdeğer Yay Katsayısı (N/m)
F _{eq}	: Eşdeğer Kuvvet Genliği (N)
m _u e	: Disklerin Dengesizliği (kg.m)
ω	: Disklerin Açısal Hızı (rad/s)
X _{st}	: Statik Yer Değiştirme
r	: Frekans Oranı
ξ	: Sistemin Sönüm Faktörü
R	: Dinamik Büyütme Faktörü
X ₀	: Başlangıç Yer Değiştirmesi (mm)
X _n	: n. Salınım Sonundaki Titreşim Genliği (mm)
δ	: Logaritmik Azalma

Kısaltmalar

ER	: Elektroteolojik
H	: Manyetik Alan Şiddeti
MWCNT	: Multi Wall Carbon Nano Tube (Çok Katlı Karbon Nano Tüp)

MR	: Manyetoreolojik
PAM	: Poliakrilamit
PAMM	: Polyacrylamide-Coated Magnetite (Poliakrilamit Kaplanmış Manyetit)
PMMA	: Poli Metilmetakrilat
PS-AAEM	: Polystyrene–Acetoacetoxyethyl Methacrylate
PVP	: Polivinil Prolidon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu



MANYETOREOLOJİK DAMPER SİSTEMLERİNDE SIVI BİLEŞEN GELİŞTİRİLMESİ VE SÖNÜMLEME ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Manyetoreolojik akışkanlar, manyetik alan uygulanmadığında non-Newtonian manyetik alan varlığında Newtonian davranış gösteren akışkanlardır. Bu akışkanlar genellikle üç bileşenden oluşur. Bunlar taşıyıcı sıvı, manyetik parçacık ve katkı maddeleridir. Manyetoreolojik sıvılar damper, fren, kavrama gibi endüstriyel alanlarda kullanılmakla beraber ayrıca köprü, bina gibi yapısal alanlarda da karşımıza çıkmaktadır. MR damperler önceliği savunma sanayiinde olmakla beraber otomotiv endüstrisinde de kullanılan ve üzerinde halen çalışılan konulardan biridir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında MR sıvıların yapısal özelliklerinden kaynaklanan birkaç önemli sorun göze çarpmaktadır. Bunlar çökme, yeniden dağılılabilirlik ve topaklanma gibi süspansiyonun doğası gereği karşılaşılan sorunlardır. Bu sorunları aşmak için parçacık yoğunluğunu düşürmek kullanılan en yaygın yöntemdir, ayrıca eklenen katkı maddeleriyle de çökme problemi önlenmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada içi boş cam küreler manyetit kaplanmaya çalışılmış ancak parçacıkların başka bir demir oksit bileşiği olan hematit kaplandığı gözlemlenmiştir. Hematit kaplanan küreler farklı hacim oranlarında 200 cSt viskozite değerine sahip silikon yağına daldırılmış ve bu sıvıların sönüm oranlarıyla birlikte çökme oranları da karşılaştırılmıştır. Parçacıkların manyetit kaplanacağı öngörüsüyle hareket edilerek yeni bir damper tasarımı ve üretimi yapılmış, ardından bu damperin endüstriyel MR sıvılarıyla nasıl bir davranış sergileyeceği sonlu elemanlar analiziyle belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İçi Boş Cam Kürelerin Hematit Kaplanması, MR Damper, MR Sıvı Sentezi, Sonlu Eleman Analizi.

LIQUID COMPONENT DEVELOPMENT IN MAGNETOREOLOGICAL DAMPER SYSTEMS AND CHARACTERIZATION OF DAMPING PROPERTIES

ABSTRACT

Magnetorheological fluids are fluids behave Newtonian in the absence of magnetic field but non-Newtonian in the presence of magnetic field. These fluids usually consist of three components. These are carrier liquids, magnetic particles and additives. Magnetorheological fluids are used in industrial areas such as damper, brake, clutch and structural areas such as bridges and buildings. MR dampers are used in automotive industry as well as defence industry. It has been seen a few important problems caused structural properties of MR fluids from literature survey. These are the problems encountered in the nature of the suspension such as sedimentation, redispersibility and aggregation. Reducing the particle density to overcome these problems is the most common method used and also the addition of additives to avoid settling problems. In this study, hollow glass spheres were tried to be coated with magnetite but the particles were coated with another iron oxide compound, hematite. Hematite coated spheres were immersed in silicone oil having 200 cSt viscosity at different volume ratios, damping ratios and the sedimentation rates of these fluids were also compared. Acting with the prediction that the particles will be coated with magnetite, a new damper has been designed and produced. Then, it is tried to determine how this damper will behave with industrial MR fluids by finite element analysis.

Keywords: Hematite Coating of Hollow Glass Spheres, MR Dampers, MR Fluid Synthesis, Finite Element Method Analysis.

GİRİŞ

Akıllı malzemeler, belirli koşullar altında şekil, boyut ya da davranışlarını değiştiren malzemelerdir. Reoloji, akış halinde olan akışkanların biçimlerindeki bozulmayı inceleyen bilim dalıdır. Manyetoreoloji, manyetik parçacık içeren akışkanların reolojik özelliklerini inceleyen bilim dalıdır.

Araçlarda güvenli ve konforlu seyahat edebilmek için yoldaki düzensizlik ve bozuklukların araca ve sürücüye aktarımını en aza indirmek adına sönümleme elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı yol şartlarında ve taşıt türlerinde farklı sönümleme oranları beklenmektedir. Bu sebeple farklı viskozite değerlerine sahip sıvılar, farklı katsayıya sahip yaylar ve bunların çalışma aralığı üzerinde çalışılan konulardır.

MR akışkan ilk olarak Amerikan Ulusal Standartlar Bürosu çalışanı olan Jacob Rainbow tarafından, manyetik sıvılı kavrama yapımında, 1948 yılında kullanılmıştır [1]. Bu tarihten başlayarak MR sıvılar farklı kullanım alanlarında ve farklı çalışma koşullarında kullanılmaya başlamıştır. Bu alanlara valf, fren, kavrama ve damper örnek olarak gösterilebilir.

MR sıvılar, manyetik alan uygulanmadığında sıvının kendi özelliklerini gösteren, manyetik alan uygulandığında yarı-katı bir hal alarak daha viskoz bir davranış sergileyen sıvılardır. Bu sıvılar manyetik parçacık, taşıyıcı sıvı ve katkı maddelerinden meydana gelmektedir. Manyetik parçacıklar taşıyıcı sıvı içerisinde askıda kalan, manyetik alan uygulandığında zincir şeklini alan mikron boyutundaki parçacıklardır. Taşıyıcı sıvı manyetik parçacıkları içinde barındıran yağ türevi sıvıdır. Katkı maddeleri ise MR sıvılarda en sık karşılaşılan çökeltme probleminin önüne geçmek için eklenen maddelerdir.

Literatürde çökeltme probleminin önüne geçmek adına birçok farklı yaklaşım benimsenmiştir. Bu çalışmalar çift dağılımlı sıvılar [11-14], çekirdek/kabuk yapılar [15-31] ve yeni tür manyetik parçacıklar [32-34] başlıkları altında incelenmiştir.

Bu çalışmada, çekirdek/kabuk yaklaşımı benimsenerek içi boş cam küreler kimyasal işlemler sonucunda manyetit kaplanmaya çalışılmış ancak farklı bir demir oksit bileşiği olan, manyetik özellik göstermeyen hematit kaplanmıştır. Taşıyıcı sıvı olarak 200 cSt viskozite değerinde silikon yağına bu parçacıklar farklı oranlarda eklenmiştir. Damper elemanının boyutları belirlenip tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Ardından manyetik alanı uygulamak için bobin parametreleri belirlenip, bobin damper üzerine bakır tel sarılarak üretilmiştir. Daha sonra bu bobin tasarımı farklı MR sıvılarının B-H eğrileri kullanılarak sonlu elemanlar analiziyle incelenmiştir.



1. GENEL BİLGİLER

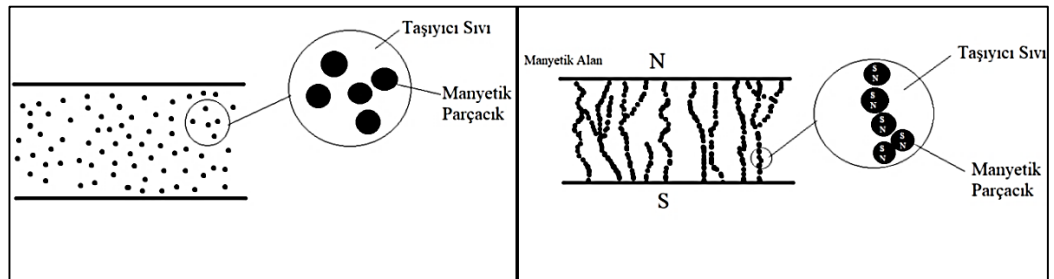
1.1. Manyetoreolojik Sıvı

Genel olarak; manyetoreolojik sıvılar, mikron boyutundaki manyetik parçacıkların bir yağ içerisinde askıda kalmasıyla oluşmaktadır. Taşıyıcı sıvı manyetik parçacıkların homojen dağılmasını sağlarken MR sıvılarda kullanılan bazı katkı maddeleri de çökmeyi yavaşlatmaktadır. Manyetik alan yokken Newtonian akış özellikleri sergileyen MR sıvılar, manyetik alan varlığında non-Newtonian akış özellikleri göstermektedir [2].

Tablo 1.1. MR sıvıların genel özellikleri [3]

Özellikler	Değerler
İlk Viskozite	0,2 - 0,3 [Pas]
Yoğunluk	3 - 4 g/cm ³
Manyetik Alan Şiddeti	150 - 200 [kA/m]
Maksimum Akma Gerilmesi	50 - 100 [kPa]
Tepki Süresi	Birkaç milisaniye
Giriş Gerilim ve Akım Değerleri	2 - 25 [V], 1 - 2 [A]
Çalışma Sıcaklığı	50 - 150 C

MR sıvılar manyetik alan yokluğunda sıvının özelliklerini gösterirken, manyetik alan uygulandığında manyetik parçacıklar zincir düzenine geçer ve sıvı yarı katı bir hal alır.



Şekil 1.1. Manyetik alan yokluğunda (solda), manyetik alan uygulandığında (sağda) MR sıvının davranışı [2]

Birçok mühendislik uygulamasında Bingham modeli verimlidir ve başlıca özelliklerin belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır [2].

Bu modelde toplam akma gerilmesi;

$$\tau = \tau_0(H) + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

olarak belirtilmektedir.

Burada τ_0 ; manyetik alanın sahip olduğu akma gerilmesini, H; manyetik alan kuvvetini, $\dot{\gamma}$; kayma oranını, η ise plastik viskozite değerini ifade etmektedir.

MR Sıvılar üç ana fazdan oluşmaktadır. Bunlar manyetik parçacık, taşıyıcı sıvı ve katkı maddeleridir.

Manyetik parçacıklar, 0,1 μ m ile 10 μ m arasındaki boyutlarda değişim gösteren parçacıklardır. Büyük parçacıklar daha kararlı, yüksek manyetiklenebilirlik ve geri döndürülebilir parçacık davranışı sağlarken, parça boyutu küçüldükçe yüzlerce manyetik alan oluşturmaktadırlar [3].

Taşıyıcı sıvılar genel olarak sıcaklık kararlılıklarına göre istenen değerler doğrultusunda reolojik ve tribolojik özelliklerine göre seçilmektedirler. Petrol bazlı yağlar, silikon yağları, mineral yağlar, poliesterler, polieterler, su ve sentetik hidrokarbon yağlar MR sıvılarda taşıyıcı sıvı olarak kullanılmaktadır [3].

MR sıvılar daha iyi yağlama özellikleri istenen yerler için ek katkı maddelerine ihtiyaç duymaktadırlar. Eklenen katkı maddeleri çökelme ve topaklanmaya karşı ekstra bir koruma sağlamaktadır [3].

MR akışkanlar endüstride birçok uygulamada kendine yer bulmaktadır. Fren, damper ve valflerde sıklıkla MR akışkan uygulamalarıyla karşılaşılmaktadır.

MR frenler MR sıvının kesme kuvvetinden yararlanılarak moment aktarımında kullanılmaktadır. Döner MR frenin frenleme momenti, uygulanan manyetik alan kuvvetine hızlı cevap vermektedir [4].

Optik cilalama ilk olarak Kordonski v.d. tarafından duyurulmuştur. Optiklerin, seramiklerin ve yarı iletkenlerin son işlemlerinde MR etkinin umut verici olduğu

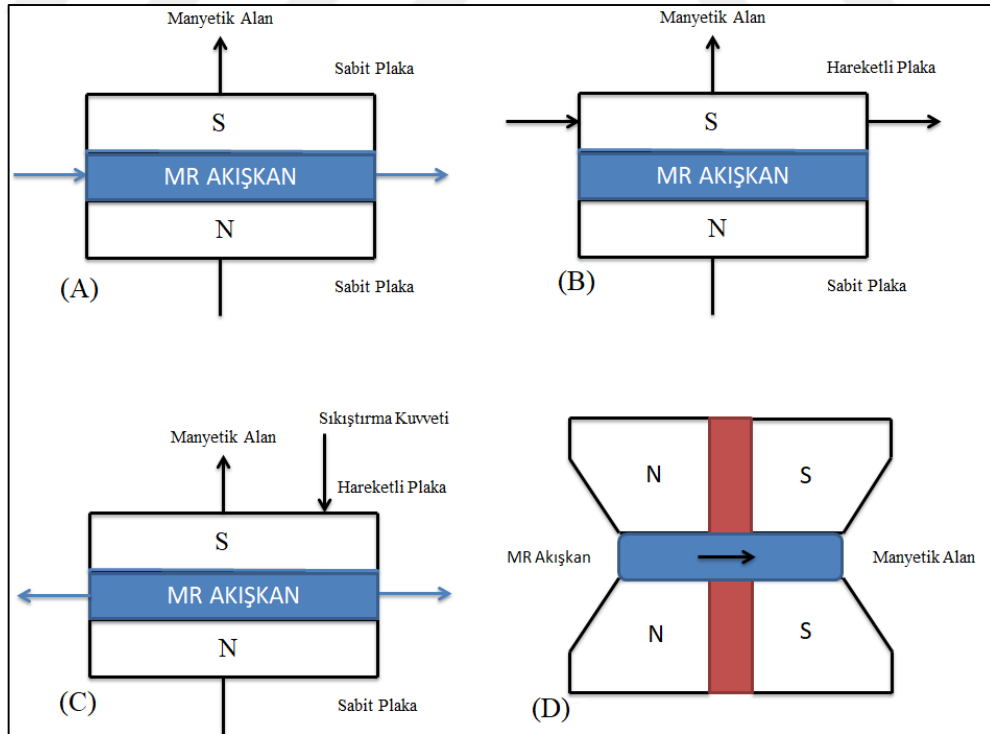
söylenmektedir. Mil üzerinde dönen parça, hareket edebilen duvar tarafından cilalama sıvısı ile temas haline getirilmiştir. Parça ve sıvının temas ettiği alanda uygulanmış olan manyetik alan yüzeyden malzeme alınması için yeterli koşulları sağlamıştır. Cilalama işlemi, cilalama noktasının parça yüzeyinde benzetimi ile hareket ettirilmesiyle tamamlanmış olur [5].

MR sıvı valf üzerinden akarken, valfe manyetik alan uygulanırsa sıvının viskozitesi artar ve akış yavaşlar veya durma noktasına gelir [6].

Rosenfeld v.d (2004) MR ve ER valflerle ilgili çalışma yayınlamıştır [7].

MR damperler MR sıvı, silindir, piston ve kontrol edilebilir manyetik alandan oluşmaktadır. MR sıvının reolojik özellikleri manyetik alan uygulanmadığında taşıyıcı sıvı ile aynı özellik göstermektedir. Manyetik alan uygulandığında taşıyıcı sıvı içerisindeki manyetik parçacıklar zincir şekliyle yarı-katı bir davranış sergilemektedir [8].

Gerilme modellerine göre MR damperler dört farklı şekilde sınıflandırılmaktadır [8].



Şekil 1.2. (A)valf modeli (B)direkt kesme modeli (C)sıkıştırma modeli (D)manyetik gradyan sıkıştırma modeli [8]

Valf modelinde MR sıvı akarken, manyetik alan akış yönüne dik yönde oluşturulmaktadır. Manyetik alan yoğunluğu değiştirilerek akışın direnci düzenlenebilmektedir. Bu tipte kullanılan MR sıvılarla otomotiv endüstrisinde sıkça karşılaşılmaktadır [8].

Direkt kesme modelinde MR akışkan bağıl hareket yapan iki plaka arasından akmaktadır. Manyetik alanın akış yönüne dik yönde oluşturulduğu bu modelin kullanıldığı MR akışkanlar birçok kavrama ve fren bağlantısında görülmektedir [8].

Bu modelde MR akışkan iki elektrot arasında bulunmaktadır. Bu elektrotlardan biri manyetik alana paralel olarak hareket etmektedir. Sonuçta MR sıvı farklı gerilme ve sıkıştırma darbelerine maruz kalmaktadır, akışkanın kesilmesi de tam bu esnada meydana gelmektedir. Mevcut yer değiştirmeler küçük ama kompakt cihazlardan gelen kuvvetler büyüktür [8].

Genel olarak valf modeliyle aynı prensipte çalışmaktadır. Ancak manyetik devre tasarımı valf modelinden farklıdır. Bu modelde manyetik kutuplar aksel olarak düzenlenmiş ve akış yolu manyetik olmayan bir malzemeyle ayrılmıştır [8].

Günümüzde birçok uygulamada sadece valf modeli, direkt kesme tipi ya da her ikisinin kombinasyonundan oluşan sistemler kullanılmaktadır. Bu uygulamaların sebebi manyetik devre yapısının basit ve kolay tasarlanabilir olmasıdır [8].

MR damper uygulamalarından bazıları; otomotiv endüstrisinde, tren süspansiyon sistemlerinde, binaların sismik korumasında, kablolu köprülerde, gemi motorlarının titreşim kontrolünde karşımıza çıkmaktadır [9].

1.1.1. MR sıvı üretiminde karşılaşılan zorluklar

MR sıvıların üretiminde karşılaşılan başlıca sorunlar parçacık çökmesi, parçacık topaklanması ve çökme sonrası yeniden dağılımın sağlanmasıdır.

Mikron boyutundaki parçacıklarla hazırlanan süspansiyonlarda parçacık ve parçacıkların içerisinde bulunduğu sıvı arasındaki yoğunluk farkından dolayı çökme sorunuyla karşılaşılmaktadır. Ek olarak parçacıklar arası topaklanma, yüzey enerjisini düşürerek yeniden dağılım özelliğini olumsuz etkilemektedir [10].

Manyetik parçacık boyutunu küçültmek kinetik kararlılıkta artış, çökelme ve aşındırıcılıkta azalma sağlar. Başka bir yaklaşım ise çekirdek/kabuk yapıların kullanımınıdır. Çekirdek/kabuk yapısında kullanılan manyetik parçacıklarda dağılım birliğinde artış, oksidasyon ve korozyonda azalma gözlemlenmektedir [10].

Tiksotropik (akışkanlığı hıza bağlı artan) ağlar nano boyutta, tütsülenmiş silika, anizotropik karbon fiberler, iğnemsiz demir oksit nano parçacıklar kullanılarak hazırlanabilmektedir. Yüzey aktif madde olarak da stearat ve oleat kullanılabilir. Bu parçacıklar MR sıvılara eklendiğinde büyük parçacıklarla sıvı arasındaki boşluğu doldurarak çökeltmede azalma özelliği sergilemektedir [10].

Bu zorlukların üstesinden gelmek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar çift dağılımlı sıvılar ve çekirdek/kabuk yapılar olarak incelenmiştir.

1.1.2. Çift dağılımlı sıvılar

Calarç v.d. 2003 yılında yaptıkları çalışmada MR sıvılarının reolojik özelliklerini araştırmışlardır. İyi manyetik özellik istediklerinden karbonil demiri manyetik parçacık olarak seçmişlerdir. Bu seçimi karbonil demirin yüksek manyetiklenebilirliği ve artık manyetikliğinin az olması dolayısıyla yaptıklarını belirtmişlerdir. %99 saflıkta 7 ± 1 μm çapında $7,8$ g/cm^3 yoğunluğunda demir parçacıkları kullanmışlardır. Karışımı hazırlarken karbonil demir parçacıkları farklı oranlarda farklı viskozitelerdeki silikon yağına atmışlardır. MR sıvı hazır olana kadar 200 d/dk hızında birkaç saat karıştırmışlardır. Dinamik reolojik ölçümleri koni biçimli uzama kontrollü reometreyle, statik ölçümleri de aynı geometriye sahip gerilme kontrollü reometre yardımıyla, oda sıcaklığında yapmışlardır. Sonuç olarak manyetik kuvvetler ve elastiklik modülü arasındaki bağıntıyı doğrulamışlardır. Sistemin en küçük deformasyonda bile saf elastik davranış gösterdiğini belirtmişler, viskoz kayıplarını paracıklar arası harekete bağlamışlardır [11].

Wereley v.d 2006 yılında yaptıkları çalışmada çift dağılımlı sıvıların avantajlarını araştırmışlardır. Çift dağılımlı sıvıların; geleneksel mikron boyutundaki parçacıklarla nano boyuttaki parçacıkların bir sıvı içerisinde karıştırılmasıyla oluştuğu dile getirilmiştir. Nano boyuttaki demir tozunun hazırlanmasında Materials Modification firmasının patentli mikro-dalga bazlı proses yöntemi izlenmiştir. Bu yöntemle

üretmiş tanecik boyutunun 28 nm olduğu belirtilmiştir. Geleneksel parçacık boyutunun ise 30 µm olduğu söylenmiştir. Kararlı MR sıvısı hazırlamak için hidrolik yağ kullanılmış, parçacıklar farklı oranlarda bu sıvıya eklenmişlerdir. Yüzey aktif madde olarak lesitin kullanılmıştır. Nano parçacık katkısının çökelmeye karşı direnç kazandırdığı gözlemlenmiştir. Reolojik özellikler Poor Physica MCR 300 paralel diskli reometre yardımıyla belirlenmiştir. Parçacıkların kütle oranı olarak %20'sinin nano parçacık olmasının çökeltme oranında iyileşme sağladığı, dinamik akma gerilmesinde %15'ten fazla artış gözlemlendiği belirtilmiştir [12].

Iglesias v.d. 2012 yılında yaptıkları çalışmada çift dağılımlı sıvıların kararlılığını ve yeniden dağılımı birliğini araştırmışlardır. Çökeltme problemi tiksotropik ajan eklentisi yerine manyetik nano parçacık eklentisiyle çözülmeye çalışılmıştır. Nano boyuttaki karbonil demirin tane boyutu 900 ± 300 nm olarak seçilmiş, manyetit ise mikrometre boyutunda kullanılmış ve farklı oranlardaki karışımlar mineral yağa (SN-60) dağıtılmıştır. Çökeltme MR sıvısının üst katmanının manyetik geçirgenliğinin değişim oranı ölçülerek belirlenmiştir. Yeniden dağılımı birliği belirleyebilmek için parçacıkların çöktükten sonra ne kadar sert bir yapı oluşturduğu ölçülmek istenmiş, bu nedenle standart bir penetrasyon iğnesi (ASTM-D5-0,50) kullanılmıştır. Reolojik özelliklerin ölçümünde Poor-Physica MCR-300 manyetometre kullanılmıştır. Sonuç olarak %30 üzeri mikro boyutta demir parçacık varlığında, eklenen nano parçacık oranının %3'ten fazla olmaması durumunda sürekliliğin uzun süreli sağlandığı belirtilmiş, kaçınılamayacak olan parçacık çökeltmesi durumunda önemli olanın yeniden dağılımı birlik olduğu dile getirilmiştir [13].

Jiang v.d. 2011 yılında yapılan çalışmalarında çökelmeyi azaltmak ve akma gerilmesini arttırmak için çift dağılımlı sıvı sentezlemişlerdir. NaBH_4 100 ml deiyonize suda 1,2 mol/l yoğunluğunda çözülmüş ve ardından 200 ml 0,05mol/l $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ solüsyonu ile çözülmüştür. Yumuşak siyah parçacıklar miknatis yardımıyla toplanmış ve etanolla birkaç kez yıkanmıştır. 50 °C'de 12 saat kurutulmuştur. Karbonil demir ise 3,5 µm olarak kullanılmıştır. Taşıyıcı sıvı olarak 0,168 PaS viskozitesinde silikon yağı seçilmiştir. Stearik asit %3 ağırlık oranında katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Demir teller ve karbonil demir parçacıklar XRD ile karakterize edilmiştir. Morfoloji SEM mikroskopuyla, manyetik histeri döngüleri SQID ile belirlenmiştir. Sonuç olarak demir tel katkısının, geleneksel MR sıvılarıyla

karşılaştırıldığı takdirde, gerilme mukavemetinde büyük bir artış sağladığı gözlenmiş, çökme probleminde de azalma olduğu belirtilmiştir [14].

Tanecik boyutunu küçültmenin kinetik kararlılıkta artış sağladığı ve sonuç olarak çökme ve aşındırıcılıkta azalma meydana geldiği görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında yeni trendin parçacıkların kaplanmasıyla yoğunlaştığı, diğer bir deyişle çekirdek/kabuk yapıların önem kazandığı açıkça görülmektedir.

1.1.3. Çekirdek-kabuk yapılar

Cho v.d. 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada yoğunluğu büyük olan karbonil demirin sebep olduğu çökme ve topaklanma problemlerinin önüne geçmek için parçacıkları PMMA kaplamışlardır. Karbonil demir 2,57 μm boyutunda ve 7,89 g/cm^3 yoğunluğunda seçilmiştir. Karbonil demirin yüzeyi akrilik asitle modifiye edilmiş ve sonrasında stabilizör olan PVP içeren metanole daldırılmıştır. Ardından MMA ve AIBN reaksiyon sisteminde çözülmüştür. Karbonil demirin MMA' daki kütle oranının 2 olduğu belirtilmiştir. Daha sonra PMMA kaplanan karbonil demir %30 hacim oranında mineral yağa daldırılmıştır. SEM fotoğraflarında PMMA kaplanan karbonil demir parçacıkların boyutu 2,81 μm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak PMMA kaplaması sadece yoğunluğu düşürmekle kalmamış, sabit kayma gerilmelerinde akma davranışı sergilemiştir. Geleneksel karbonil demir parçacıklara göre daha iyi çökme kararlılığı ve dağılıma davranışı gözlemlendiği belirtilmiştir [15].

Jun v.d. 2005 yılında yaptıkları çalışmada MR sıvısının çökelmeye karşı olan dayanımını arttırmak için kompozit bir malzeme, demir oksit kaplanarak manyetik parçacık olarak kullanılmış olup, çökme sorunun çekirdek/kabuk yapıyla aşılmaya çalışılmıştır. PS parçacıklar çeşitli kimyasal işlemler yardımıyla demir oksit kaplanmış, ardından karakterize edilmişlerdir. Yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskopuyla gözlemlenmiştir. Parçacık boyutu da SEM kullanılarak belirlenmiştir. Parçacıklar viskozitesi 0,1 Pas^{-1} olan silikon yağına alınmıştır. Kompozit parçacığın yapısı XRD ve TGA kullanılarak belirlenmiştir. MR süspansiyonun karakteristiği ticari reometre yardımıyla belirlenmiştir. Sonuç olarak kompozit parçacıklı süspansiyonun MR özelliklerinin demir oksit bileşimine ve sıvı kompozisyonuna bağlı olduğu belirtilmiştir [16].

Choi v.d 2005 yılında yaptıkları çalışmada manyetitın manyetik alan yönünde zincir şekli oluşturduğu, ayrıca manyetik alana verdiği hızlı cevap değişimlerinden bahsetmiş, ardından çökme davranışı üzerinde durulmuştur. Bu sorunu aşmak için çekirdek/kabuk yapısı anlatılmıştır. Çalışmada PS-AAEM polimerik çekirdek manyetit kaplanmıştır. Parçacık boyutu 200 nm, yoğunluğu 1,3 g/cm³ olarak belirtilmiş, parçacık konsantrasyonu %20 hacim oranı olarak seçilmiştir. Parçacıkların MR karakteristikleri rotasyonel reometre yardımıyla belirlenmiştir. Yönlenmiş parçacık yapısı kesme deformasyonu ile kırılmaya başlamış, kırık yapılar yeniden zincir yapısını oluşturmuşlardır. Çökme davranışında azalma gözlemlenmiştir [17].

Wu v.d 2005 yılında yaptıkları çalışmalarında guar sakızını MR süspansiyonlar için katkı maddesi olarak kullanmışlar, çökme kararlılığında iyileşme ve MR etkide neredeyse hiçbir değişiklik gözlemlenmemişlerdir [18].

Daha sonraki çalışmalarında (2006) guar sakızını çekirdek/kabuk yapıda; çekirdek karbonil demir, kabuk olarak guar sakızı olarak kullanmayı denemişlerdir. Guar sakızı kaplanan karbonil demir parçacıkları silikon yağına daldırmışlardır. Silikon yağının viskozitesi 25 °C'de 10 cPs, parçacık boyutunun 2-4 µm olduğu belirtilmiştir. Öncelikle yeterli miktarda su ve guar sakızı tozu 30 dakika 400 devir/dakikada karıştırılmıştır. Karbonil demir tozu asetonla ultrasonik banyoda yıkanmıştır. Kuruduktan sonra jele eklenerek 30 dakika 600 devir/dakikada karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma yavaş yavaş etanol eklenmiştir. Etanolün burada guar sakızının demir tozu kaplaması için rol aldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak guar sakızı kaplamanın en çok etkisinin görüldüğü yer MR etki olduğu söylenmiştir. Ayrıca çökme davranışında da iyileşme gözlemlenmiştir. En uygun guar sakızı miktarının ağırlık oranında %3 olduğu vurgulanmıştır. Çökme miktarının 3 ayın sonunda %2-3 olduğu gösterilmiştir [19].

Choi v.d. 2006 yılında yaptıkları çalışmada MR sıvıların dağılma kararlılığını arttırmak amacıyla karbonil demir parçacıkları PMMA kaplayarak çekirdek/kabuk yapısını benimsemişlerdir. Kaplamanın amacının karbonil demir parçacıkların sıvıyla arasındaki yoğunluk farkını düşürmek olduğu belirtilmiştir. Küresel karbonil demir parçacıkların yoğunluğu 7,86 g/cm³, SEM yardımıyla belirlenen tanecik boyutu 2,57

μm olarak verilmiştir. Karbonil demirin yüzeyi polimerizasyon reaksiyonu nu indirgemek için metakrilik asit ile modifiye edilmiştir. Metanolle yıkanıp ürün toz halinde $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulmuştur. MR sıvı hacim olarak %30 karbonil demir-PMMA çekirdek/kabuk yapısının mineral yağa daldırılmasıyla hazırlanmıştır. MR karkteristikleri rotasyonel reometre yardımıyla (MCR-300) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de belirlenmiştir. Sargı akımı ve manyetik alan kuvveti farklı kontrol birimleri ve reometre programıyla değiştirilmiştir. Paralel plaka ölçüm sistemi manyetik olmayan malzemedan imal edilerek boşluk mesafesi 1 mm olarak belirlenmiştir. Sentezlenen parçacıkların yoğunluğu $1,83\text{g/cm}^3$, tane boyutu $2,81\text{ }\mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. MR sıvının matematiksel modellemesinde Bingham modeli kullanılmıştır. Çekirdek kabuk yapının yoğunluğu düşürmekle kalmadığı ayrıca akma davranışında da iyileşme sağladığı vurgulanmıştır [20].

Gu v.d. 2008 yılında yaptıkları çalışmada çökeltme ve topaklanma probleminin üstesinden gelmek için silika kaplı demir parçacıklar sentezlemiş ve bu parçacıkları PEG 400 sıvısına daldırılmışlardır. Sentezlenen sıvının reolojik özellikleri reometre yardımıyla belirlenmiştir. Fe-SiO₂ parçacıklar $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ kürelerinden hidrojen indirgeme yöntemiyle elde edilmiştir. MR sıvının hazırlanmasında PEG 400 ve Fe-SiO₂'ler beraberce karıştırılmıştır. Karışımın kütle oranının %10 olduğu ve katkı maddesi eklenmediği belirtilmiştir. Parçacıkların şekil ve boyutları yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu kullanılarak 10 nm bulunmuştur. Manyetizasyon SQUID cihazı ile belirlenmiştir. Reolojik özellikler Anton Poor Physical MCR 301 cihazı ile belirlenmiştir. Testler $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yapılmıştır. Deneyler sonucunda manyetik sıvının düşük kesme hızlarında görece yüksek bir manyetoviskoz özellik gösterdiği gözlemlenmiş, ek olarak malzemenin viskoelastik özelliklerinin geleneksel malzemelerden farklı olduğu belirtilmiştir [21].

Fan v.d. tarafından 2008 yılında yapılan bir çalışmada Fe₃O₄ manyetik kompozit küreler P(MAH-co-MAA) kaplanmıştır. Kaplandıktan sonra ESME ve TEM ölçümlerinde elde edilen parçacığın küreselliğinden emin olunmuş ve yeni bir tür çekirdek/kabuk yapı elde edilmiştir. Ortalama tane boyutu $1,6\text{ }\mu\text{m}$ olarak belirtilmiş, çökeltme ve dağılımda iyileşmeler gözlemlendiği vurgulanmıştır [22].

Fang v.d. 2008 yılında yaptıkları çalışmada karbonil demir/polistren kompozit malzeme çekirdek/kabuk yaklaşımıyla üretilmiştir. Ardından üretilen parçacıklar yağlama yağına (Yubose 8 oil) %37 hacim oranında daldırılmıştır. Karbonil demirin tane boyutu 4,5 – 5,2 μm , yoğunluğu 7,91 g/cm^3 olarak belirtilmiştir. Reolojik özellikler MCR 300 rotasyonel reometre yardımıyla belirlenmiştir. Çökme problemiyle ilgili olarak kaplama sonrası parçacık yoğunluğunun 2,51 g/cm^3 olduğu, yağın yoğunluğunun 1 g/cm^3 olması sebebiyle yoğunluk farkının düşük olduğu belirtilmiş ve testlerin yapıldığı birkaç günlük süre zarfında çökme problemiyle karşılaşmadığı vurgulanmıştır [23].

Cheng v.d. 2009 yılında yaptıkları çalışmada karbonil demir parçacıkları N-glucose ethylenediamine triacetic acid (GED3A) ile kapsüllemişlerdir. Kapsüllenen parçacıklar sulu MR sıvı içine daldırılarak kullanılmıştır. Kapsülleme işleminde amacın çökmeyi azaltmak ve oksidasyonu azaltmak olduğu belirtilmiştir. Morfolojik yapı, manyetik özellikler ve sabit kesme akışı uzama kontrollü reometre yardımıyla belirlenmiştir. Karbonil demirin parçacık boyutu 1-6 μm , yoğunluğu 7,86 g/cm^3 olarak verilmiştir. Çekirdek olarak kullanılan bu yapıya %3 ağırlık oranında N-glucose ethylenediamine triacetic acid eklenmiştir. Karışım 40 $^{\circ}\text{C}$ 'de 36 saat boyunca 300 devir/dakikada karıştırılmıştır. Daha sonra kimyasal tepkimelerle reaksiyon karışımı hazırlanmıştır. Kapsüllenen parçacıkların yoğunluğu 7,70 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Kapsüllenen parçacıklar %30 hacim oranında saf suya daldırılmıştır. Sıvı 10000 devir/dakikada 15 dakika karıştırılmıştır. Sonuç olarak kapsüllenen parçacıkların daha yüksek manyetizasyona sahip olduğu gözlemlenmiş ve su bazlı MR sıvı hazırlamaya uygun olduğu vurgulanmıştır. Bu parçacıklarla hazırlanan MR sıvıların daha yüksek akma gerilmesine uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca daha iyi dağılım karakteristiği ve oksidasyon direnci gösterdiği ortaya konmuştur [24].

Yuan v.d. tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada süper manyetik içi boş kompozit kürelerin üretimi yeni bir yaklaşım uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle tane boyutu 120 nm olan içi boş silika küreler üretilmiştir. Ardından bu kürelerin manyetit kaplanması işlemine geçilmiştir. Bu işlemde ilk olarak 0,3 g sülfonik asitle işlevselleştirilmiş içi boş silika küreler 100 ml deiyonize su ve etilen glikol karışım solüsyonuna daldırılmıştır. Ardından 2 g hekzametilen tetramin ve 0,2 g potasyum

nitrat sisteme yavaş karıştırma sırasında eklenmiştir. Son olarak 20 ml sıvı demir solüsyonu farklı konsantrasyonlarda sisteme eklenmiştir. Bu aşamalardan sonra sistem 80 °C ye ısıtılmış ve 3 saat nitrojen korumasında bırakılmıştır. Karışım soğuduktan sonra çökelti filtrelenmiştir. Daha sonra çökelti deiyonize su ile yıkanmış ve 100 °C de vakum altında kurutulmuştur. Böylece silika/manyetit kompozit içi boş küre tozu elde edilmiştir. Sonuç olarak içi boş silika küreler yüzey çekirdeklenmesi ile manyetit kaplanmıştır. Demir iyonlarının miktar ve konsantrasyonunun kürelerin morfolojisinde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [25].

Xiaojuan v.d. tarafından 2011 yılında yayınlanan çalışmada mika/Fe₃O₄ hazırlanmasındaki önemli parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada mika/Fe₃O₄ sentezi de açıklanmıştır. Tüm kimyasallar analitik saflıkta temin edilmiş, distile su, oksijeni uzaklaştırmak için 5 dk kaynatılmıştır. Daha sonra mika/Fe₃O₄ sentezi için öncelikle 100 ml kaynatılmış distile su ve 10 g mika laboratuvar kabına konulmuş, ardından manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Nitrojen atmosferinde belirli molar oranlarda FeCl₃.6H₂O ve FeCl₂.4H₂O kaba eklenmiş ardından NaOH pH kontrol edilerek eklenmiştir (pH > 9,2). Tüm reaktanlar eklendiğinde 30 dk karıştırılmıştır. İşlem sonunda ürün filtreden geçirilmiş ve 60 °C de kurutulmuştur. Ürünler elektrik rezistanslı fırında 350 °C de 3 saat nitrojen gazı akışında kalkine edilmiştir. Ayrıca ideal durumda Fe⁺³/Fe⁺² oranının 2:1 olması gerektiğinden bahsedilmiş ancak Fe⁺² çok çabuk oksitlendiğinden bu oranın daha küçük tutulmasında yarar görüldüğü belirtilmiştir. Çalışmada bu oran 1:6 olarak alınmıştır. Sonuç kısmında; NaOH konsantrasyonu 0,5 mol/L olduğunda ve pH Fe⁺³ ve Fe⁺² nin beraber çökeldiği değerde olduğunda kaplamanın pürüzsüz ve kaplama oranının yüksek olduğu söylenmiştir [26].

Liu v.d. tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada karbonil demir parçacıklar silika kaplanmış ve ardından silikon yağına daldırılarak bir MR sıvı sentezlenmiştir. Çalışmadaki amacın uygun maliyette kolay sentezlenebilen parçacık üreterek çökeltme ve oksidasyonda iyileşme sağlamak olduğu belirtilmiştir. 4,5 µm boyutunda, 7,91 g/cm³ yoğunluğunda karbonil demir parçacıklar kullanılmıştır. Manyetik çekirdek/kabuk yapısını elde etmek için uygulanan kimyasal işlemlerin ardından kaplanan parçacıkların yoğunluğu 6,11 g/cm³ olarak ölçülmüştür. 100 cSt viskozite değerindeki silikon yağına, parçacıklar %20 hacim oranıyla dağıtılmıştır.

Silika kapsüllenmiş parçacıkların yüzey morfolojisi SEM ve EDS yardımıyla incelenmiştir. Parçacık yoğunluğunda azalma, oksidasyon ve korozyon direncinde artış gözlemlenmiştir [27].

Galindo-Gonzalez v.d. tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada daha önce manyetik kaplanmış kil parçacıkların MR sıvılarda manyetik parçacık olarak kullanılması gerçekleştirilmiştir. Kaplanan parçacığın çökeltme ve yeniden dağılım sorunlarını azalttığı yaklaşımı ele alınmıştır. NaMt parçacıkların uzunluğu 1 µm ve en-boy oranı 14 olarak belirtilmiştir. Bir dizi kimyasal işlemde sonra manyetik kaplanan parçacık boyutu $11,1 \pm 2$ nm olduğu vurgulanmıştır. Bu parçacıklarla su taşıyıcı sıvı olacak şekilde bir MR sıvı hazırlanmıştır. Sonuç olarak manyetik alan varlığında akma gerilmesinin manyetik alan gücüne bağlı olduğunu söylemişlerdir [28].

Fang v.d. 2012 yılında yaptıkları çalışmada yumuşak manyetik karbonil demirin sadece MR özelliklerini değil, buna ek olarak dağılım kararlılığını da iyileştirmek için karbonil demirin yüzeyine çok katlı karbon nanotüp ağı üretilmiştir. MWCNT ortalama çapı 15 nm olduğu belirtilmiştir. Yağ olarak silikon yağı kullanılmıştır. Sonuç olarak, çökeltmede azalma gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin yoğunluktaki azalma olduğu belirtilmiştir. Polimerik kabuklara kıyasla MWCNT 'ün daha uygun olduğu vurgulanmıştır [29].

Mrlik v.d. tarafından 2013 yılında yapılan bir çalışmada MR sıvıların uzun dönem kullanımını en çok etkileyen problem olan çökeltmenin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bunun için çekirdek/kabuk yapıdaki manyetik parçacık yapısı uygulanmıştır. Karbonil demir parçacıklar hazır olarak alınmıştır. Belirli kimyasal işlemlerden sonra karbonil demir parçacıklar cholesteryl chloroformate kaplanmıştır. Parçacıkların karakterizasyonu taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış parçacıklar %40, %60, %80 ağırlık oranlarında viskozitesi 194 mPaS olan silikon yağına daldırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda çökeltme davranışında azalma gözlemlenmiş, kaplamanın oksijen atmosferinde termal kararlılığı arttırdığı belirlenmiştir. Reolojik ölçümler sonucunda MR performansının farklı parçacık oranlarında güven veren performans gösterdiği vurgulanmıştır [30].

Agustin-Serrano v.d. tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada mikron altı silika kaplanmış manyetik parçacıklar silikon yağına daldırılarak deneysel sonuçları ortaya konmuştur. Manyetit parçacık eldesi $\text{FeCl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_4 + \text{FeCl}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_6 + \text{HCl} + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{alt ürünler}$ şeklinde belirtilmiştir. 100 ml cam laboratuvar kabına 2,0 M $\text{FeCl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_4$ ve 2,0 M HCl solüsyonu hazırlanmıştır. Diğer bir kaptaki 1,0 M $\text{FeCl}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_6$ ve 2,0 M HCl hazırlanmıştır. Bu iki solüsyon sallayarak 10dk boyunca karıştırılmıştır. 50 ml 0,1 M NH_3 yavaşça 5dk boyunca bu karışıma eklenmiştir. Burada oluşan siyah çökeltinin manyetit tozu olduğu söylenmiştir. Parçacıklar deiyonize su ile yıkanarak 70 °C de 30dk boyunca kurutulmuştur. Parçacık boyutu SEM görüntülerinde 0,05 µm ve 15 µm olarak gözlemlenmiştir. Manyetiti silika kaplamak için 200 mg manyetit 15 ml etanol ve 5 ml deiyonize su ile ultrasonik banyoda 10 dk boyunca yıkanmıştır. 4 ml TEOS (tetraethyl-orthosilicate) 30 ml etanole eklenerek oda sıcaklığında önceki karışıma eklenerek 24 saat karıştırılmıştır. Küresel parçacıklar yaklaşık 0,5 µm elde edilmiştir. Yoğunluk 3,48 g/cm³, parçacık boyutu 0,48 µm olarak verilmiş, MR sıvı 350 cSt viskoziteye sahip yağa %10 hacim oranında parçacık eklenmesiyle oluşturulmuştur [31].

1.1.4. Yeni tür manyetik parçacıklar

Dong v.d. tarafından 2010 yılında yayınlanan çalışmada içi boş manyetit küreler şablonsuz hidrotermal reaksiyon ile elde edilmiştir. Sentezinde; 15 ml Fe-naftalin ksilen solüsyonuna 15 ml LiOH eklenmiştir. Sonra, siyah solüsyon 50 ml teflon astarlı otoklava konmuştur. Solüsyon; 120-210 °C de 24 saat bekletilip oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Santrifüjden sonra, siyah ürünler distile su ve saf etanolla birkaç kez yıkanıp havada 60 °C de 6 saat kurutulmuştur. Alkali solüsyonların rolünü öğrenmek/anlamak için LiOH; NaOH ve KOH solüsyonlarıyla değiştirilmiştir. Sonuç olarak küreler oda sıcaklığında süper manyetik özellik göstermiştir [32].

Wang v.d. tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada kalsiyum ferrit (CaFe_2O_4) nanokristal parçacıkların solvotermal yöntemle MR sıvılara uygulanabilirliği araştırılmıştır. CaFe_2O_4 ün sentezinde; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaOH, etilen glikol ve polietilen glikol analitik saflıkta kullanılmıştır. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 40 ml EG 'de çözülmüştür. Daha sonra PEG-1000 (1gr) ve NaOH (3,2gr) yavaşça eklenerek

karıştırılmıştır. Karışım 60dk boyunca homojen olana kadar karıştırılmıştır. Otoklavda 180 °C de 12 saat bekletilmiştir. Daha sonra siyah çökeltiler toplanıp distile su ile 3 kez yıkanmıştır. 60 °C de 24 saat kurutulmuştur. Sonuçta; karbonil demir parçacıklarla karşılaştırıldığında CaFe_2O_4 parçacıkların çökeltme açısından daha kararlı olduğu, ayrıca yüksek performanslı MR sıvı üretiminde umut vadettiği belirtilmiştir [33].

Esaeilnezhod v.d. tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada yağ rezervuarlarının performansını kontrol etmek ve tehlikeli atık su üretimini azaltmak için yeni bir metot kullanılmıştır. Yeni tür bir manyetik parçacık sentezlenerek belirlenen alana enjekte edilmiş, böylece manyetik alan varlığında yağın dağılması engellenerek tehlikeli atık su üretimi azaltılmaya çalışılmıştır. Bu parçacıkların sentezlenmesi işleminde 2 mmol NaNO_3 ve 1 mmol $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ve 4mmol NaOH 19 ml suda çözülmüştür. Bu karışım 100 °C ye ısıtılmış ve karışıma 1ml 2M $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ eklenmiştir. Koşullar 1 saat sağlandıktan sonra oda sıcaklığında soğutulmuştur. Kahverengi modifiye edilmiş Fe_3O_4 parçacıklar mıknatis yardımıyla toplanmış ve suyla yıkanmıştır. Sentezlenen manyetik parçacıkların PAM kaplama işleminde 10 mmol acrylamide, 10 mmol $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 100 ml nanoparçacıklara eklenerek (%5 hacim) vakum altında nitrojen atmosferinde karıştırılıp 60 °C lik fırında kurutulmuştur. Sonuç olarak bu parçacıklar silikon yağı ve suya daldırılmıştır. Sonuçlar Bingham ve Herschel-Buckley modelilerine uygunluk göstermiştir. Yüksek MR etki ve katı-gibi bir yapı sergilenmiş, atık su üretimini kontrol altına almanın başarıldığı vurgulanmıştır [34].

1.1.5. Cam kürelerin kaplanması

Zhao v.d. tarafından 2007 yılında yapılan bir çalışmada içi boş cam küreler NiFe_2O_4 nano parçacıklarla kaplanmış ve elektromanyetik özellikleri incelenmiştir. Kaplama işleminde; tane boyutu 3-5 μm olan küreler 0,5 mol/L NaOH solüsyonunda birkaç kez ultrasonik olarak yıkanmıştır. Daha sonra distile su ile pH yaklaşık 7 olana kadar distile su ile yıkanmıştır. 30 ml $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ve 15 ml $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ distile suda sırasıyla çözümlenip homojen bir solüsyon elde edilmiştir. Molar oran $\text{Ni}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$ 1:2 'de sabitlenmiştir. Sonra 2,0 g acrylamide ve 0,4 gr N, N'-methylene diacrylamide eklenerek sabit hızda karıştırılmıştır. Daha sonra %15, 40, 65 ağırlık oranlarında cam

küreler bu karışıma eklenmiştir. 0,05 gr $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ eklenmiştir. 80 °C de 2 saat sonunda karışmış solüsyon jel haline gelmiştir. 90 °C de 12 saat kurutulmuştur. 400, 600 ve 800 °C de 2 saat ısıtılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Sonuç olarak tüm yüzeyler homojen ve uniform olarak kaplanmıştır. NiFe_2O_4 parçacık boyutunun 80nm den küçük ve %40 cam içeren karışımın yoğunluğunun 1,2 g/cm^3 olduğu vurgulanmıştır [35].

An v.d. tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada ön işlem uygulanarak yüzeyi akımsız kaplama için daha verimli hale getirilen içi boş cam küreler üçlü alaşım olarak Ni-Fe-P kaplanmıştır. Yoğunluğu 0,3 g/cm^3 olan küreler 20 ml konsantre HCl ve 180 ml deiyonize su içerisine 5 dk daldırıldıktan sonra iki kez deiyonize su ile yıkanmıştır. Islak küreler 30 ml 3-aminopropyl triethoxy silane (K550) etanol (30 g) solüsyonuna daldırılmıştır. 50 °C'de 40 dk çalkalanmış, daha sonra filtreden geçirilip vakum kurutma çemberinde 120 °C'de 1,5 saat kurutulmuştur. Buradan alınan 5 g küreler 300 ml 15 g/L AgNO_3 ve 10 ml/L amonyak (%25) solüsyonunda 15 dk bekletilmiş ardından iki kez deiyonize su ile yıkanmış, 50 °C'de kurutulmuştur. Daha sonra Ni-Fe-P üçlü alaşımı alkalın kaplama banyosunda kürelere kaplanmıştır. Sonuçta Fe oranı arttığında yumuşak manyetik özelliklerin arttığı söylenmiştir [36].

An v.d. tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada kolay hazırlanabilir yeni tür bir kaplama yöntemi üzerinde durulmuştur. FeCl_2 (0,2 M), 30 ml etanol ve deiyonize su karışımında çözülmüş, ardından 0,3 g içi boş cam küre eklendikten sonra karışım 5 dk boyunca karıştırılmıştır. 50 ml kapasiteli otoklava alınıp 180 °C'de 12 saat bekletilmiştir. Cam/ Fe_3O_4 küreler 360°C'lik hidrojen/argon gazı akışında tavlansmıştır. Sonuç olarak parçacık yoğunluğu 0,89 g/cm^3 olarak belirtilmiştir [37].

Carvalho v.d. tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada anlamlı çapı 7 ile 20 nanometreye değişen demir oksit parçacıklar iki yöntemle sentezlenmiştir. Bunlardan biri kontrollü atmosferde çökeltme yöntemi, diğeri ise havada indirgeme-çökeltme işlemidir. Çökeltme yönteminde demir tuzları (Fe^{+2} ve Fe^{+3}) ayrı ayrı asidik bir çözeltide, oksitlenmeden kaçınmak için nitrojen atmosferinde çözülmüştür. İndirgeme-çökeltme yöntemindeyse sadece Fe^{+3} kullanılmıştır. Fe^{+2} oluşumu Na_2SO_4 eklenmesiyle sağlanmıştır. Böylece sentez normal atmosfer şartlarında yapılabilmıştır. Burada $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ oranının 2 olması için $\text{Fe}^{+3}/\text{SO}_3^{-2}$ oranının 6 olması

gerektiği belirtilmiştir. Sonuçta en kk nano parçacıkların indirgeme-okeltme yöntemiyle elde edildiği vurgulanmıştır [38].

Wang v.d. tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada mikron büyüklüğünde camlar sodyum hidroksit zeltisiyle n işlemden geçirilmiş ardından KF solüsyonunda ultrasonik işleme tabi tutulmuş ve cam manyetit kaplanmıştır. Mikron cam tozun n işleminde önce camlar 10 gr olarak plastik laboratuvar şişelerine alınmış, deiyonize su ile iki kez yıkanmışlar, etil alkolle de temizlenmişlerdir. NaOH solüsyonu ile (0,5 mol/L) ultrasonik banyoda 5, 15, 25 dk boyunca sırasıyla temizlenmişlerdir. Filtre edildikten sonra 80 C'de kurutulmuş ve kullanana kadar bekletilmiştir. KF solüsyonu (80 ml, 1 mol/L) ve konsantre sülfürik asit (3 ml) sırasıyla içerisinde 10 g mikron cam bulunan kapların her birine eklenmiştir. Daha sonra karışımlar 2, 5, 8, 8, 8, ve 8 dk sırasıyla karıştırılmıştır. Bu proses sırasında hidroflorik asit mikron camı aşındırmak için potasyum florür ile konsantre sülfürik asit reaksiyonu ile üretilmiştir. Sonra aşınmış cam szlmş, ultrasonik işlemden geçirilmiştir. Daha sonra 80 C de kurutulup kullanana kadar bekletilmiştir. Manyetit kaplanmasında kullanılan tüm kimyasalların analitik saflıkta olduğu vurgulanmış, distile suyun oksijeni uzaklaştırmak için 5 dk kaynatıldığı belirtilmiştir. Tipik kaplama deneyleri [26]'da verilmiştir. CNaOH = 0,5 mol/L, molar oranı $CFe^{+3}/CFe^{+2} = 1.6:1$, pH = 9,2 olarak verilmiş, 30 C 'de 130 d/dk manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Son rn filtreden geçirilip 60 C'de kurutulmuştur. 3 saat boyunca 350 C sıcaklıktaki tüp fırında, nitrojen atmosferi altında, kalkine edilmiştir (yakarak toz haline getirilmiş). Sonuç olarak pürüzsüz ve etkili kaplama koşulları için 13,29 emu/g seçilmesi gerektiği, manyetit kaplama yüzdesi %57,41 olarak verilmiştir [39].

Literatürdeki kaplamalar kaplanan parçacık, ortalama parçacık boyutu, kaplama malzemesi, kaplama kalınlığı, kaplanmış parçacık yoğunluğu, taşıyıcı sıvı, parçacık katkı oranlarına göre Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

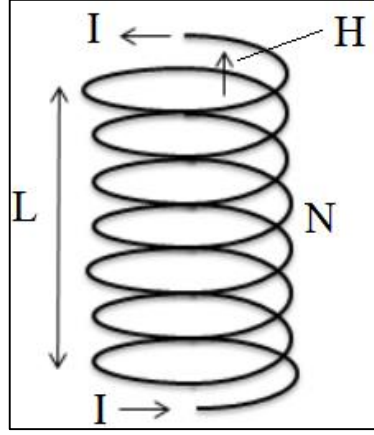
Tablo 1.2. Literatürdeki çekirdek-kabuk yapılar tablosu

Kaplanan Parçacık	Ortalama Parçacık Boyutu	Kaplama Malzemesi	Kaplama Kalınlığı	Kaplanmış Parçacık Yoğunluğu	Taşıyıcı Sıvı	Parçacık Katkı Oranı	Kaynak Nu
Karbonil Demir	2,81µm	PMMA	-	4,5 g/ml	Mineral Yağ Su	Hacimce %30	[15]
Karbonil Demir	1-6 µm	GED3A	-	7,70 g/cm ³	Silikon Yağı	Hacimce %30	[24]
Demir Oksit	7,68 µm	Polimer Kompozit	-	-	Silikon Yağı	Ağırlıkça %40	[16]
PS-AAEM	200 nm	Manyetit	-	1,3 g/cm ³	Silikon Yağı	Hacimce %20	[17]
Karbonil Demir	2-4 µm	Guar Sakızı	-	-	Silikon Yağı	Hacimce %29,5-33	[19]
Karbonil Demir	2,57 µm	PMMA	-	1,83 g/cm ³	Mineral Yağ	Hacimce %30	[20]
Manyetit	10,6 nm	P(MAH-co-MAA)	-	1,27 g/cm ³	-	-	[22]
İçi Boş Silika Küreler	120 nm	Manyetit	20 nm	-	-	-	[25]
Karbonil Demir	4,5 - 5,2 µm	Polistren (PS)	-	2,51 g/cm ³	Yağlama Yağı	Hacimce %37	[23]
Karbonil Demir	4,5 µm	Silika	-	6,11 g/cm ³	Silikon Yağı Su	Hacimce %20	[27]
Montmorillonite Kil	11,1 ± 2,2 nm	Manyetit	-	-	-	Hacimce %3	[28]
Karbonil Demir	4,5 µm	Çok Katlı Karbon Nanotüp	115 nm	5,67 - 6,55 g/cm ³	Yağlama Yağı	Hacimce %35	[29]
Karbonil Demir	0,5 - 2 µm	Cholesteryl Chloroformate	-	-	Mineral Yağ	Ağırlıkça %40-60-80	[30]
Manyetit	0,48 µm	Silika	-	3,48 g/cm ³	Silikon Yağı	Hacimce %10	[31]
İçi Boş Cam Küreler	3 - 5 µm	NiFe ₂ O ₄	-	1,2 g/cm ³	-	-	[35]
İçi Boş Cam Küreler	-	Ni-Fe-P	-	-	-	-	[36]
İçi Boş Cam Küreler	20 - 40 µm	Manyetit	-	500 - 600 nm	-	-	[37]
Cam	30 nm	Manyetit	-	-	-	-	[39]

1.2. Manyetizma

Manyetoreolojik sıvılı damper tasarımında manyetik tasarımın önemi büyüktür. MR damperlerde kullanılan manyetik parçacıklar ve bunların hareketiyle, bobin tasarımı damperin sönümlenme karakteristiğini tamamen değiştireceğinden manyetizma konusunun iyi irdelenmesi gerekmektedir.

Elektrikteki + ve - yükler yerine kuzey ve güney kutuplarından meydana gelmiş mıknatıs olarak düşünülebilen çubuğa manyetik dipol denir.



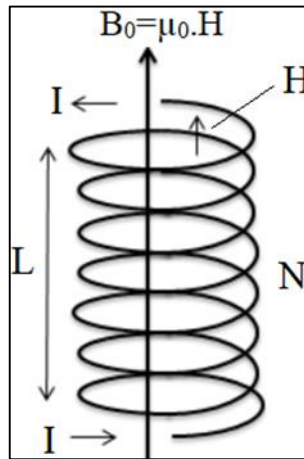
Şekil 1.3. Bakır tel etrafında oluşan manyetik alan

Üzerinden akım geçen bir teldeki manyetik alan şiddeti şu formülle bulunabilir;

$$H = \frac{N \times I}{L} \quad (1.2)$$

Burada; N ; telin sarım sayısını, H ; manyetik alan şiddetini, L ise bobin uzunluğunu ifade etmektedir.

H manyetik alanını altındaki maddenin manyetik alan şiddeti büyüklüğü manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indükleme olarak adlandırılır ve B ile gösterilir. Manyetik akı yoğunluğunun birimi Wb/m^2 veya Tesla olarak belirtilmektedir. Ayrıca B ve H büyüklükleri vektörel büyüklüklerdir. Manyetik akı yoğunluğu formülü;



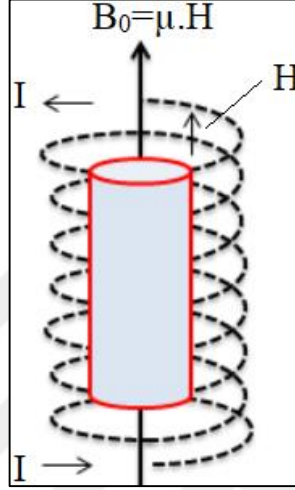
Şekil 1.4. Bakır tel etrafında oluşan manyetik akı yoğunluğu

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (1.3)$$

olarak ifade edilmektedir.

Burada μ_0 değeri vakumun manyetik geçirgenliğidir ve değeri $4\pi \times 10^{-7}$ H/m 'dir.

Bir katı malzemede oluşan manyetik akı yoğunluğu ise;



Şekil 1.5. Katı malzemede oluşan manyetik akı yoğunluğu

$$B_0 = \mu \cdot H \quad (1.4)$$

formülüyle hesaplanabilir.

Burada μ değeri katının manyetik geçirgenlik değeridir ve B 'nin ölçüldüğü ortama ait bir malzeme özelliğidir.

Katıların manyetik özelliklerini tanımlamak için kullanılan bir diğer parametre ise bağıl manyetik geçirgenliktir. Bu değer malzemenin geçirgenliğinin vakum geçirgenliğine oranıdır.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.5)$$

Burada μ_r ;bağıl geçirgenlik değerini, μ ; malzemenin manyetik geçirgenlik değerini, μ_0 , vakumun geçirgenliğini ifade etmektedir.

Katıların manyetikleşmesi sonucu başka bir alan daha ortaya çıkar. Bu manyetikleşme alanı M ile ifade edilir.

$$B_0 = \mu_0 \times H + \mu_0 \times M \quad (1.6)$$

H manyetik alan etkisine maruz kalmış malzeme içerisinde manyetik momentler bu alanla birlikte düzenlenme eğilimine girer ve manyetik moment şiddetlenir. Yukarıdaki denklemde bu şiddetlenme $\mu_0 \times M$ terimi ile gösterilmiştir.

Manyetikleşme ile manyetik alan şiddeti arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki aşağıdaki formülde belirtilmiştir.

$$M = X_m \times H \quad (1.7)$$

X_m manyetik alan hassasiyeti olarak tanımlanmaktadır ve birimsizdir. Manyetik hassasiyetle bağıl geçirgenlik arasında da bir ilişki bulunmaktadır ve bu ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$X_m = \mu_r - 1 \quad (1.8)$$

Tablo 1.3. Bazı kaynakların manyetik akı yoğunlukları [4]

Kaynak	Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
İnsan Beyni	10^{-14}
İnsan Kalbi	10^{-12}
Yıldızlar Arası Uzay	10^{-10}
Gezegenler Arası Uzay	10^{-9}
Dünya'nın Yüzeyi	10^{-5}
Güneş'in Yüzeyi	10^{-4}
Bobin	10^{-2}
Elektro Miknatis	1
Süper İletken Miknatis	10
Patlayıcı Akı Sıkıştırması	10^4
Nötron Yıldızı	10^8
Magnetar	10^{11}

1.2.1. Ferromanyetizma ve ferrimanyetizma

Ferromanyetizma bir manyetizma türüdür ve dış alana ihtiyaç duymadan kalıcı manyetik momente sahip olan malzemelere ait bir özelliktir. Fe (HMK, α -Ferrit), Co,

Ni geçiş elementlerinde ve bazı nadir toprak elementlerinde ferromanyetik özellikler görülmektedir. Bu malzemelerde manyetik hassasiyet değeri 10^6 kadar yüksek bir değer olabilir. Sonuçta $H \ll M$ olduğundan manyetik akı yoğunluğu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [41].

$$B \cong \mu_0 \times M \quad (1.9)$$

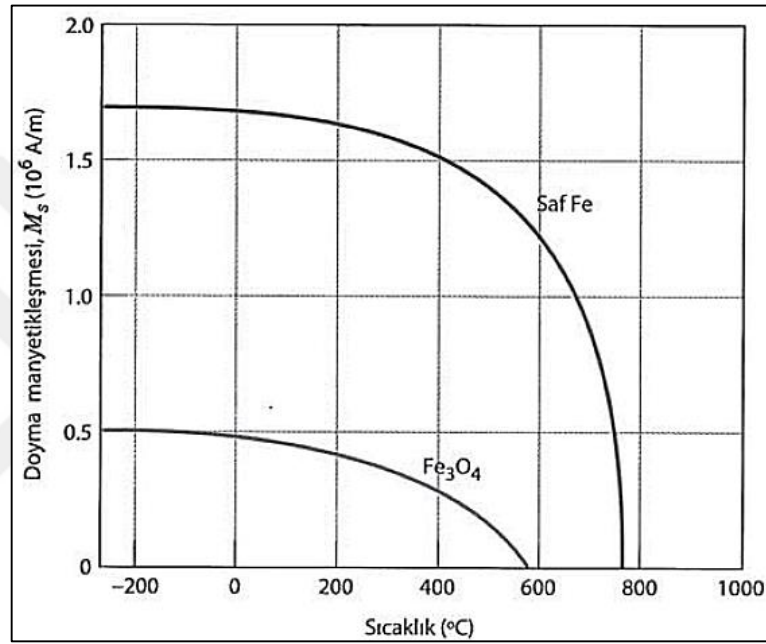
Ferrimanyetizma bazı seramik türdeki malzemelerin kalıcı manyetikleşme göstermesi olarak açıklanabilir. Ferromanyetizma ile ferrimanyetizma birbirine çok benzer olmakla birlikte aralarındaki tek fark manyetik momentin kaynağıdır. Ferrimanyetik malzemelere örnek olarak manyetit (Fe_3O_4) verilebilir. Manyetit bileşiminde 1:2 oranında Fe^{+2} ve Fe^{+3} iyonlarını bulundurmaktadır. O^{2-} iyonları ise manyetik olarak nötr bir davranış sergiler [42].

Fe_3O_4 ters spinel kafes yapısına sahip olduğundan iyonların yerleşebileceği iki tür konum vardır. Bu konumlar tetrahedral ve oktahedral olarak ikiye ayrılır. Fe^{+3} iyonlarının yarısı tetrahedral konuma, diğer yarısı ise oktahedral konuma yerleşirler ve manyetik momentler bu konumlarda birbirine zıttır. Dolayısıyla manyetik momentler birbirini yok ederler. Bu sebeple manyetitin manyetik davranışında Fe^{+3} iyonlarının bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak Fe^{+2} iyonları yalnızca oktahedral konumda bulduklarından net manyetik moment bu iyonlar tarafından meydana gelir ve manyetitin manyetik davranışı bu şekilde ortaya çıkar. Şekil 1.6'da bu durum açıklanmaya çalışılmıştır [42].

Katyon	Oktahedral Konum	Tetrahedral Konum	Net Manyetik Moment
Fe^{+3}	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑	↓↓↓↓↓ ↓↓↓↓↓	Tamamen Yok Olma
Fe^{+2}	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑	-	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑

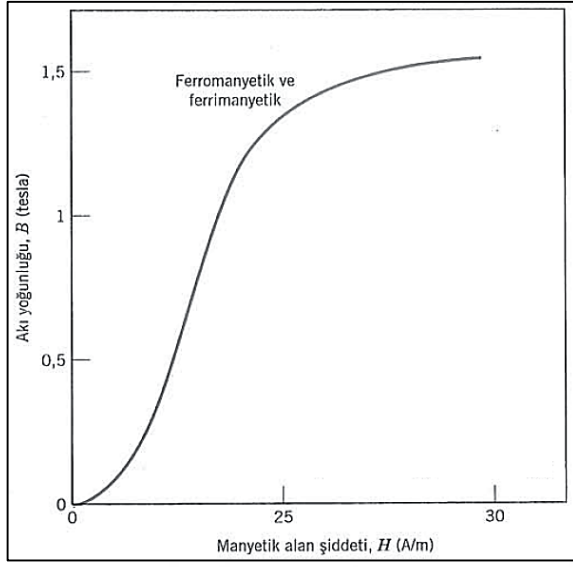
Şekil 1.6. Demir iyonlarının konumlarına göre oluşturdukları net manyetik momentler [41]

Sıcaklığın artması atomlarda ısıl titreşimi arttırdığından, manyetik özellikler ve davranış da sıcaklıkla beraber değişmektedir. Doyma manyetikleşmesi, ısıl titreşimlerin minimum olduğu 0 K'de maksimum değerine ulaşmaktadır ve artan sıcaklıkla doyma manyetikleşmesi düşmektedir. Curie sıcaklığı (T_c) olarak adlandırılan bir sıcaklıkta manyetikleşme sıfırdır. Curie sıcaklığı değerleri demir için 768 °C, kobalt için 1120 °C, nikel için 335 °C ve manyetit için 585 °C'dir. Demir ve manyetit için doyma manyetikleşmesi-sıcaklık eğrisi Şekil 1.7'de verilmiştir.



Şekil 1.7. Saf demir ve manyetit için sıcaklık - doyma manyetikleşmesi grafiği [41]

Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerde akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (H) arasında bir orantı yoktur. Başlangıçta manyetik olmayan malzemelerde B, H'nin bir fonksiyonu olarak değişim sergilemektedir. Dolayısıyla bu malzemelerde net bir manyetik geçirgenlik değerinden (μ) söz edilemez. Doyma manyetikleşmesi değerine ulaşan malzeme, H'deki artış B değerinde bir değişime sebep olmamaktadır. Şekil 1.8'de ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler için örnek bir B-H eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin örnek B-H eğrisi [41]

2. MALZEMELER VE YÖNTEM

2.1. Elektromanyetik Sistem Tasarımı

Bu kısımda elektromanyetik eleman görevi görmesi amacıyla bir bobin tasarımı yapılmıştır. Tecquipment TM 16A cihazının kendi damper pistonu yeniden tasarlanıp üretilmiştir. Ardından bobin, bu yeni tasarıma bakır tel sarılması ile üretilmiştir. Bobin tasarımında manyetik akı yoğunluğu formülü kullanılmıştır. Burada bulunan değerler daha sonra elektromanyetik sistem tasarımının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi aşamasında da göz önüne alınmıştır.

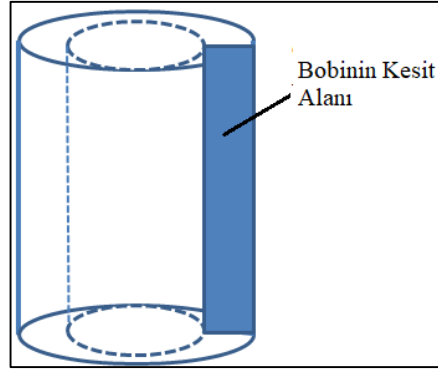
2.1.1. Akım yoğunluğunun belirlenmesi

Manyetik akı yoğunluğunun belirlenmesi, sonlu elemanlar yöntemiyle sistemin modellenmesinde gerekli bir kıstas olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple bobinin oluşturduğu akım yoğunluğu belirlenmelidir. Akım yoğunluğunun belirlenmesinde Denklem (2.1) kullanılmıştır.

$$J_s = \frac{NI}{A} \quad (2.1)$$

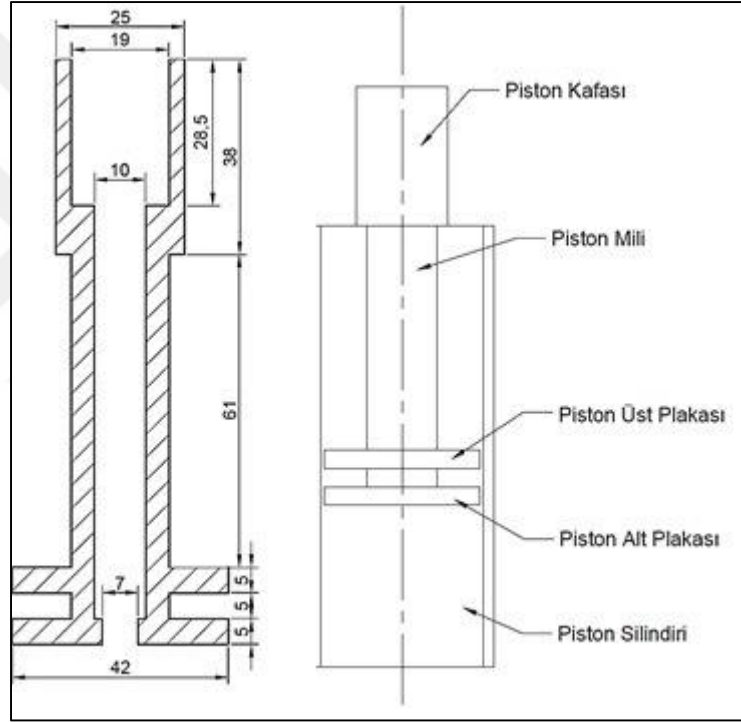
Burada J_s ; akım yoğunluğu, N ; sarım sayısı, I : akım değeri, A ; bobinin kesit alanı olarak ifade edilmektedir.

Bu denklemde akım değerlerinin 1-2 A arasında kalması hedeflenerek bir tasarım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Bobin kesit alanı

Kullanılan damperin ölçüleri ve bileşenleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Damperin ölçüleri (solda), damperin bileşenleri (sağda)

2.1.2. Bobin parametreleri

Bobin tasarımında 0,25 mm çapında bakır tel kullanılmıştır. Bobin 20 kat olmak üzere, her bir katta 46’şar sarım yapılarak üretilmiştir. Sonuç olarak farklı akım değerlerinde elde edilen akım yoğunluklarının ne kadar olduğu Tablo 2.1’de belirtilmiştir.

N = 920 sarım

$$I = 2 \text{ A}$$

$$A = (5 \times 32,5) \times 10^{-6} = 1,625 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$J_S = \frac{920 \times 2}{1,625 \times 10^{-4}} = 11323076 \text{ A/m}^2 \quad (2.2)$$

Tablo 2.1. Akım-akım yoğunluğu değerleri

Akım Değeri (A)	Akım Yoğunluğu (A/m ²)
0,5	2830769
1	5661538
1,5	8492307
2	11323076

2.2. Damperin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Tasarlanan damperin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi için ANSYS Mechanical APDL yazılımından yararlanılmıştır. Geliştirilen tasarım iki boyutlu olarak değerlendirilmiş olup; manyetik alan çizgileri ve manyetik alan yönü olarak iki farklı parametre gözetilerek incelenmiştir.

Ayrıca Tablo 2.2 kullanılarak akım yoğunluğu değerleri simülasyona aktarılmış, böylece manyetoreolojik sıvıda oluşan manyetik akı yoğunluğu değerleri tayin edilmiştir.

2.2.1. Fiziksel çevrenin oluşturulması

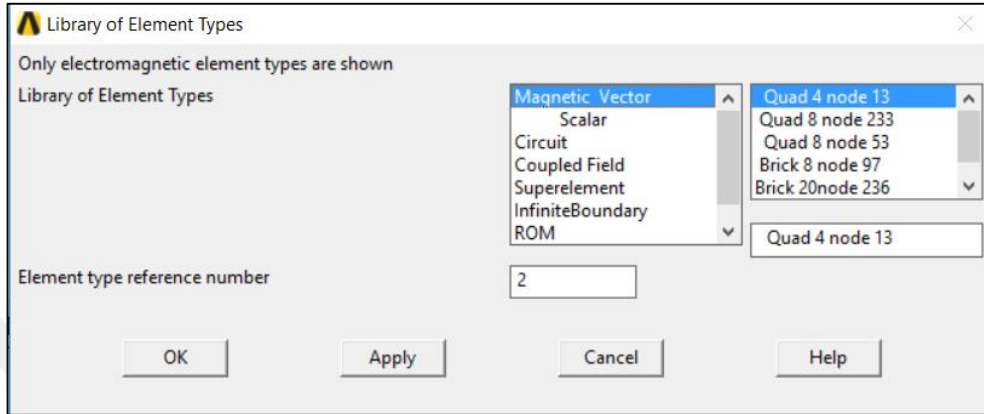
ANSYS yazılımında manyetik analiz için Preferences Menu → Magnetic-Nodal seçeneği işaretlenmiştir. Böylece programın ilerleyen bölümlerinde seçilecek olan eleman tipinin filtrelenmesi sağlanmıştır.

2.2.1.2. Eleman tipinin belirlenmesi

Eleman tipinin belirlenmesi modelin düğüm noktalarının atanması ve dolayısıyla daha gerçekçi sonuçlar vermesi için oldukça önemlidir. Yapılan araştırmalar sonucunda, benzer denemelerin yapıldığı çalışmalarda [46] Plane 13 elemanın

kullanıldığı saptanmış ve bu çalışmada da bu eleman tipi kullanılarak devam edilmesi kararı verilmiştir.

Plane 13 elemanının seçimi Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → Magnetic Vector → Quad Node 13 rotası izlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Plane 13 elemanın belirlenmesi

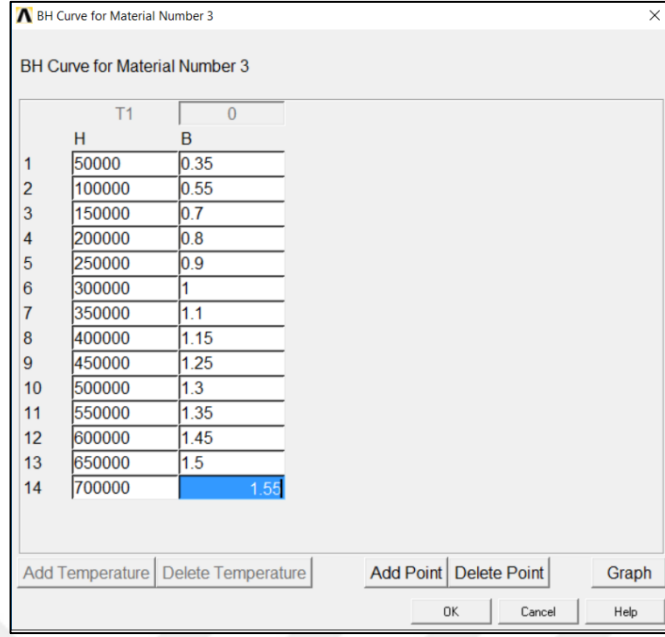
2.2.1.3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

ANSYS yazılımında farklı malzeme türleri için farklı özellikler atanabilmektedir. Yazılımın bu özelliği kullanılarak damperin farklı malzemeleri için farklı karakteristikler belirlenmiştir.

Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde Preprocessor → Material Props → Material Models → Electromagnetics rotası izlenmiştir.

Bağıl geçirgenlik değerine sahip olan bakır ve akrilik boru için, relative permeability seçilirken, MR sıvılar için B-H curve adımları izlenmiştir.

Damperin çalışma ortamında bulunan malzemeler olan bakır, östenitik çelik ve akrilik için bağıl geçirgenlik değerleri olan 1 kullanılmış olup, MR sıvılar için Lord firmasının 122 EG, 132 DG ve 140 CG kodlu sıvılarının B-H eğrilerinden yararlanılmıştır [43-45].



Şekil 2.4. 132 DG sıvısının B-H eğrisinin yazılıma aktarılması

2.2.2. Modelin oluşturulması ve mesh edilmesi

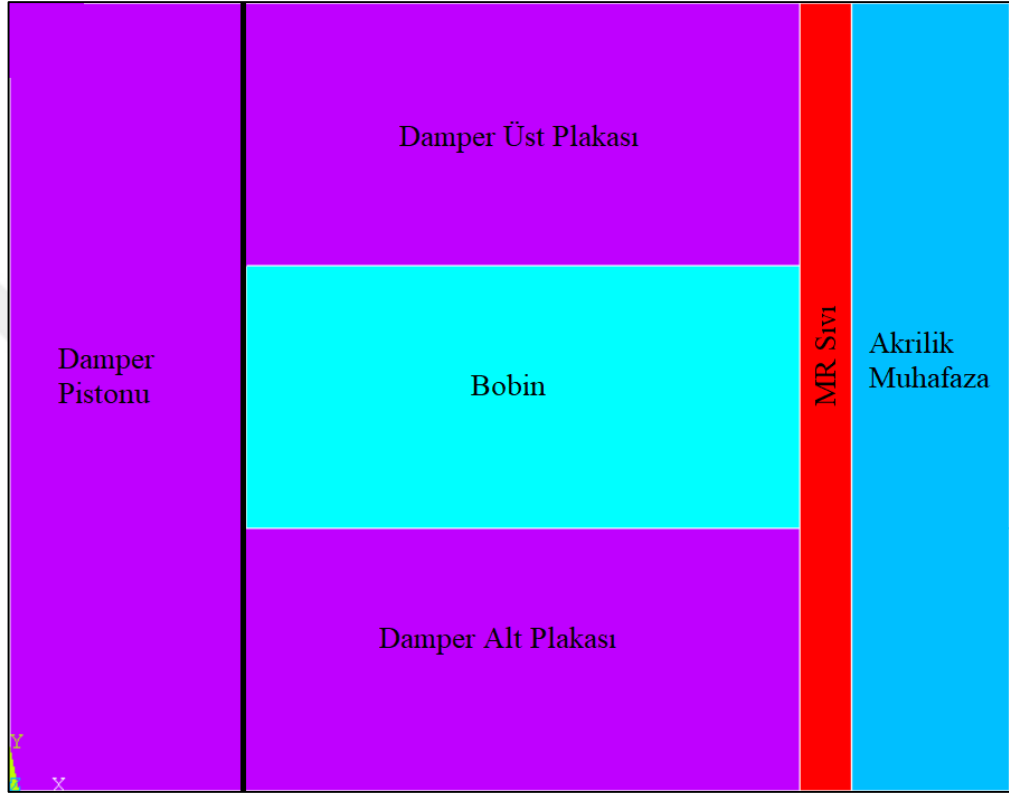
Modelin oluşturulması sırasında bobin elemanı merkezinde bir ortam oluşturularak daha sonrasında oluşturulacak alanların birbiri üzerine binme sorununu yaşamamak için önce noktalar belirlenmiş, ardından bu noktalar birleştirilerek çizgiler ve son olarak alanlar oluşturulmuştur.

Bu işlemler için sırasıyla; Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints → In Active CS rotası izlenerek tablodaki değerler yazılıma aktarılmıştır.

Tablo 2.2. Yazılıma girilen noktalar

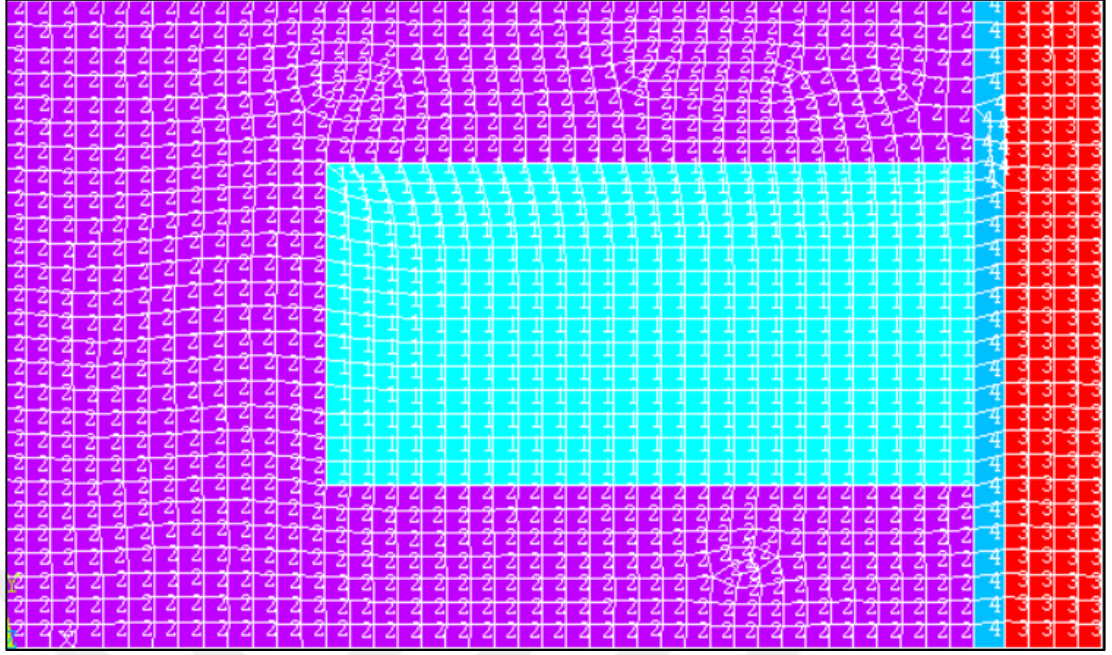
Key Points	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0,015	0	0
3	0,015	0,015	0
4	0	0,015	0
5	0,0045	0,015	0
6	0,015	0,005	0
7	0,015	0,01	0
8	0,0045	0,01	0
9	0,016	0	0
10	0,016	0,015	0
11	0,019	0	0
12	0,019	0,015	0

Noktaların oluşturulması işlemin ardından noktalar Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Straight Line rotası izlenerek birleştirilmiştir. Daha sonra çizgiler seçilerek alanların oluşturulması işlemi ise Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → By Lines rotası izlenerek gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde istenen model görüntüsü oluşturularak, modelin mesh edilmesi adımına geçilmiştir.



Şekil 2.5. Modellenmiş sistem görüntüsü ve bileşenlerin gösterimi

Modelin mesh edilmesi işlemi için; Preprocessor → Meshing → MeshTool rotası izlenerek Element Attributes bölümünden Areas seçilip set komutundan alanlar seçilerek önceki adımlarda bahsedilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Ardından mesh boyutu Size komutundan 1 olarak seçilerek daha gerçekçi sonuçların edinilmesi amaçlanmıştır. Bu aşamadan sonra Mesh → Pick All rotası izlenerek mesh etme işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 2.6. Mesh sonrası model görünümü

2.2.3. Sınır şartları ve yüklerin belirlenmesi

Mesh işleminin ardından sınır şartlarının belirlenmesi için Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Boundary → Vector Poten → Flux Par'1 → On Lines rotası izlenerek modelin en dış çizgileri seçilmiştir.

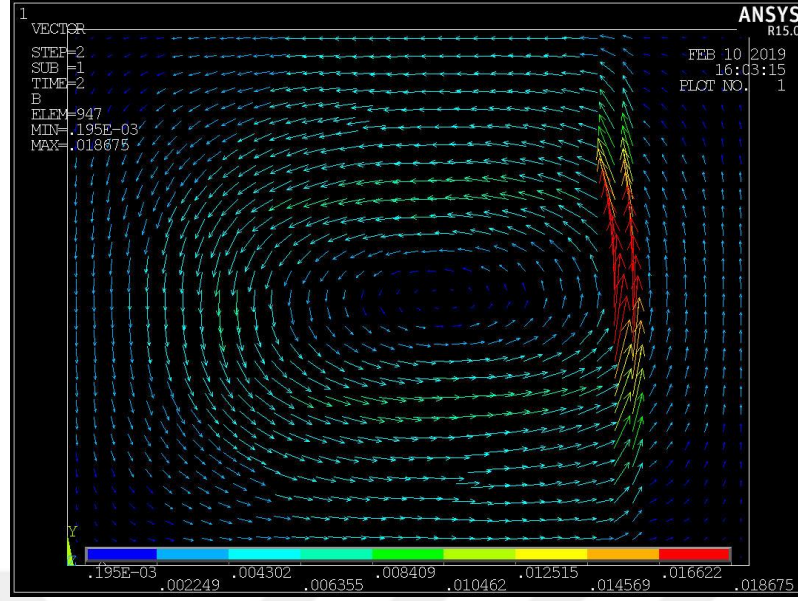
Modelde bobin elemanında oluşan manyetik akım yoğunluğunu eklemek için; Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Excitation → Curr Density → On Areas rotası izlenerek bobin alanına tablo X'deki akım yoğunluğu değerleri sırasıyla uygulanmıştır.

2.2.4. Modelin çözümü

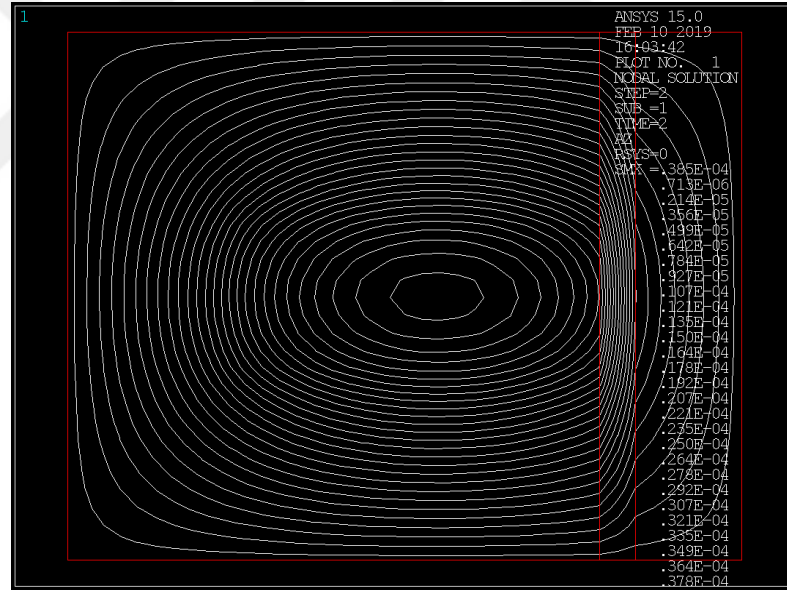
Modelin çözümlenmesi işlemi için; Solution → Solve → Electromagnet → Static Analysis → Opt&Solv rotası izlenmiştir.

Çözüm aşamasının ardından GeneralPostproc → Plot Results → Vector Plot → Predefined → Flux&Gradient rotası izlenerek B_{max} ve B_{min} değerleriyle manyetik akı yoğunluğunun yönü ve şiddeti gözlemlenmiştir.

GeneralPostproc → Plot Results → Contour Plot → 2D Flux Lines rotası izlenerek de manyetik alan çizgileri gözlemlenmiştir.



Şekil 2.7. 122 EG sıvısına 0,5 A uygulandığındaki manyetik akı yoğunluğu ve yönü



Şekil 2.8. 122 EG sıvısına 0,5 A uygulandığında manyetik alan çizgileri

2.3. İçi Boş Cam Kürelerin Kaplanması

Bu çalışmada kullanılmış olan içi boş cam küreler Q-Cel firmasından temin edilmiştir. Parçacık yoğunluğu $0,16 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, anlamlı parçacık boyutu $< 105 \mu\text{m}$ 'dir.

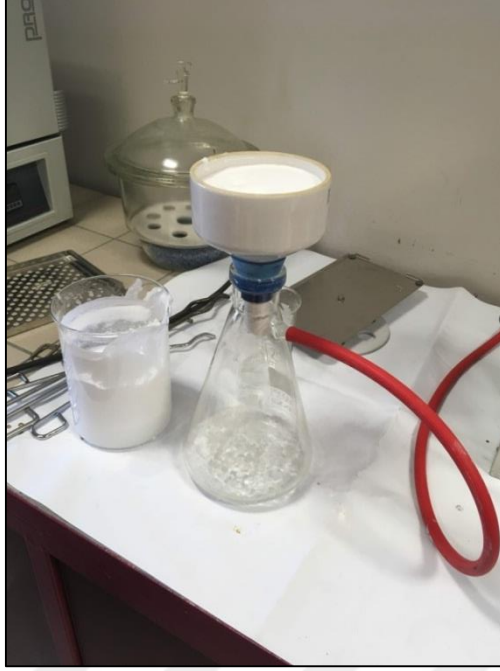
Kürelerin kaplama işlemlerinde kullanılan kimyasallar; demir (III) klorür hekza hidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum hidroksit (NaOH), amonyak ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (%25), etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ve deiyonize su olarak belirlenmiştir.

2.3.1. Ön işlemler

800 ml içi boş cam küre cam beherin içerisine alınıp, üzerine 800 ml etanol eklenerek 1000 devir/dakika değerinde oda sıcaklığında 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından vakum pompasından çift filtre kullanılarak üç kez geçirilerek küreler etanolden arındırılmıştır. Arındırma işlemi sonrasında küreler cam behere alınarak üzerine 800 ml deiyonize su eklenmiş ve 1000 devir/dakika değerinde 30 dakika karıştırılmıştır. Deiyonize su ile yıkama işleminden sonra yeniden filtreden geçirilen küreler 1 saat boyunca 80 °C fırında kurumaya alınmıştır. Kurutma işleminden sonra küreler 0,5 M NaOH çözeltisinde 30 dk karıştırıldıktan sonra 1 saat boyunca ultrasonik temizleyicide bekletilmişlerdir. Ultrasonik temizleyiciden alınan küreler 80 °C'de 1 saat kurumaya alınmıştır. Kurumuş küreler tartıldığında 22,73 gr değeri gözlemlenmiştir.



Şekil 2.9. İçi boş cam kürelerin etanolle yıkanması



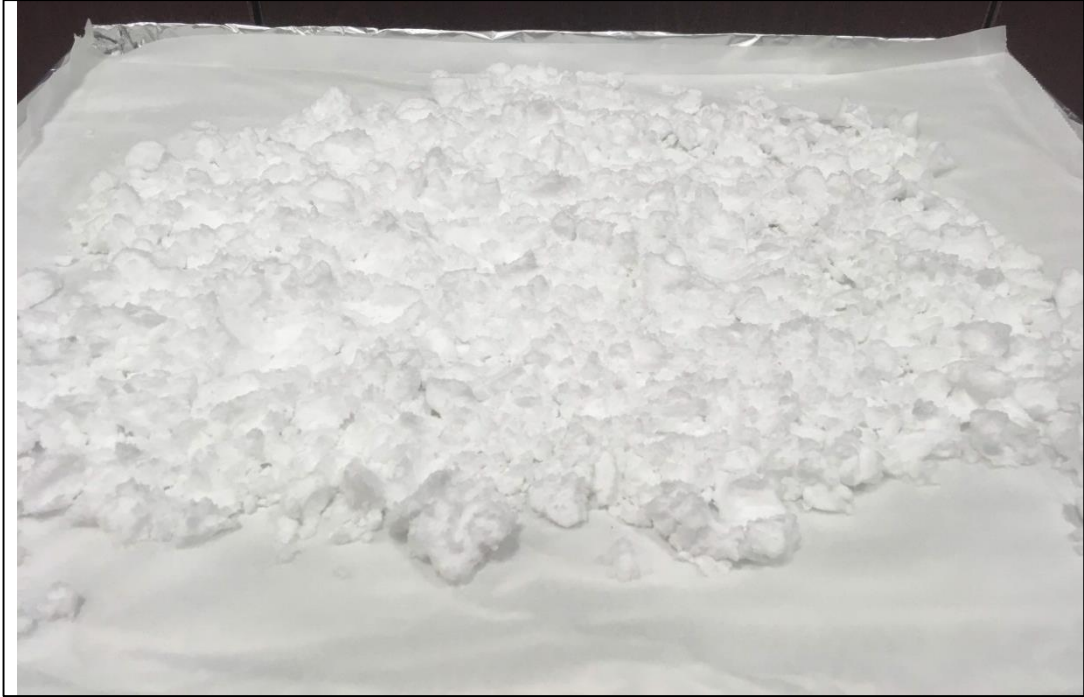
Şekil 2.10. Deiyonize suyla yıkanan kürelerin filtrelenmesi işlemi



Şekil 2.11. 0,5 M NaOH solüsyonunda içi boş cam kürelerin ultrasonik temizleyicide temizlenmesi işlemi



Şekil 2.12. Kurumaya alınmış cam küreler



Şekil 2.13. Kurutulmuş Küreler

2.3.2. Kaplama işlemi

22,73 gram içi boş cam küre için; 18,4133 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 113,65 mililitre deiyonize suda, 2,86 gr Na_2SO_3 , 113,65 mililitre suda çözülmüştür. Ardından bu iki

çözelti birbirine eklenmiştir. 1000 devir/dakika değerine bu iki karışım manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışımın rengi açık sarıdan kırmızıya, ardından kırmızıdan tekrar açık sarıya dönmüştür. Açık sarı rengi gözlemlendikten sonra karışımın üzerine 22,73 gram içi boş cam küreler eklenmiştir. Karıştırma devam ederken karışımın üzerine NH_3 , ph 12 olana kadar eklenmiştir. Karıştırma çeker ocakta 1 saat boyunca devam ettirilmiştir. Karıştırma işlemi sonucunda filtreden geçirilen küreler deiyonize su ile yıkanıp, tekrardan filtreden geçirilmiş ve oda sıcaklığında 12 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır.

12 saat sonunda kürelerin siyah/yeşil bir renk alması beklenirken, koyu sarı/kahverengi bir renk aldığı gözlemlenmiştir. Küreler manyetik alan altında test edilmiş ancak manyetik alan karşısında tepki vermedikleri görülmüştür. Böylece kürelerin manyetit değil de bir başka demir oksit türü olan hematit kaplandığına kanaat getirilmiştir.

Kürelerin manyetit değil de hematit kaplandığı gözlemlendikten sonra kaplanacak olan madde miktarı düşürülerek yeni bir deney gerçekleştirilmiştir. İkinci deney düzeneğinde kaplanacak olan küre miktarı 23,73 gram yerine 10 gr olarak belirlenmiştir. Önceki deney setinde uygulanan adımlar gerçekleştirilmiş ancak içi boş cam kürelerin yeniden hematit kaplandığı gözlemlenmiştir.

Çalışmanın bu aşamasından sonra hematit kaplı kürelerle devam edilerek farklı yağ viskozitelerinde farklı hematit oranlarında sıvılar hazırlanmıştır.



Şekil 2.14. FeCl_3 (solda) ve Na_2SO_3 çözeltilerinin hazırlanması



Şekil 2.15. Karışımın çeker ocakta karıştırılması



Şekil 2.16. Hazırlanan karışımın süzülmesi



Şekil 2.17. Hematit kaplanan kürelerin kuruduktan sonraki hali

2.4. Sıvıların Hazırlanması

2.4.1. Kürelerin silikon yağına daldırılması

Silikon yağları 100 Cst ve 350 Cst olarak temin edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında silikon yağı viskozitelerinin 200 ve 350 Cst arasında seçildiği görülmektedir. Bu nedenle, 200 Cst viskozite değerine sahip silikon yağı elde etmek için %45 hacim oranında 350 Cst, %55 hacim oranında 100 Cst viskozite değerine sahip silikon yağları karıştırılmıştır.

Kaplanan parçacıklar %5, %10, %20, %30, %40 olarak farklı hacim oranlarında, 200 cSt viskozite değerine sahip silikon yağına daldırılmıştır. Ardından sistemin yağsız olarak, saf silikon yağıyla, farklı oranlarda kaplanmamış kürelerin yağa daldırılması ve yine farklı oranlarda kaplanmış kürelerin yağa daldırılması olmak üzere devam edilecek olan testlerin yağ numuneleri hazırlanmıştır.

Küreler silikon yağına belirli oranlarda eklendikten sonra yoğun karıştırma altında 10 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 2.18. Hematit kaplanmış küre içeren (solda) ve kaplanmamış cam küre içeren (sağda) sıvıların damper içindeki görünüşü

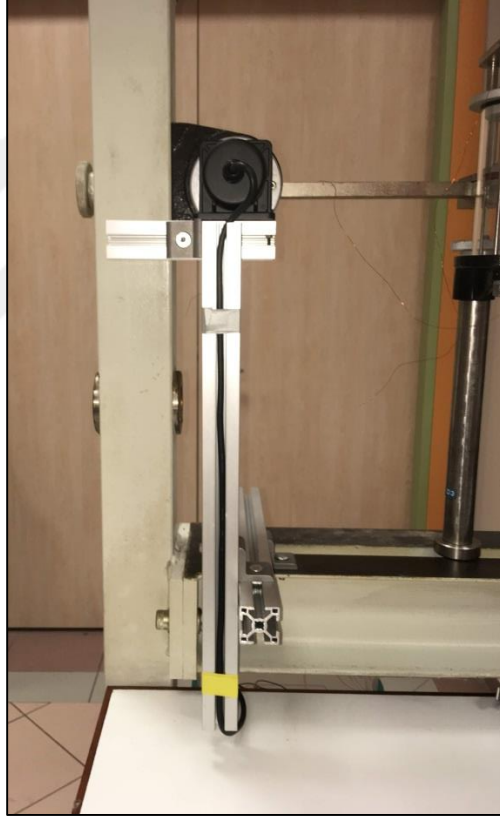
2.5. Sönüm Oranının (ξ) Hesaplanmasında Kullanılan Cihaz ve Yöntem

2.5.1. Deneysel test düzeneği

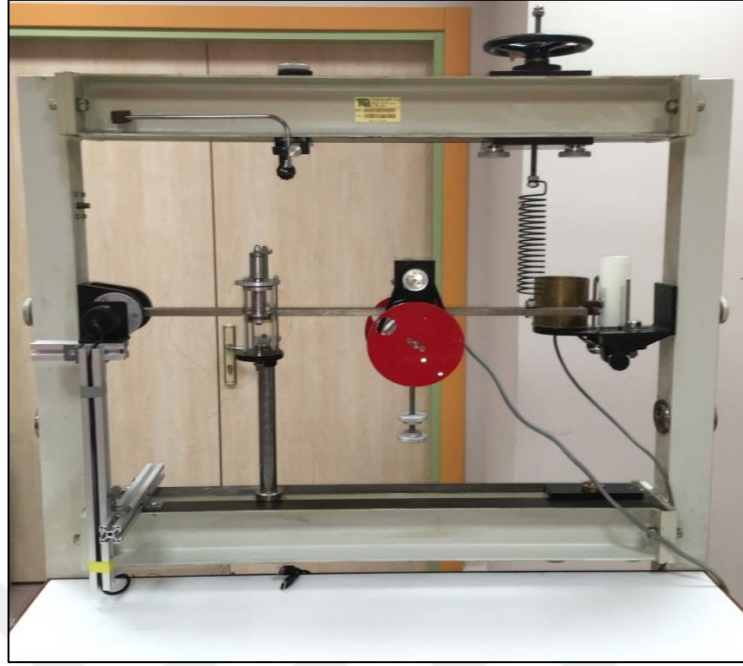
Tecquipment TM 16A cihazı bu çalışmada modifiye edilerek sönüm oranının hesaplanmasında kullanılmıştır. Cihaz bir tarafından rulmanlı yatakla mafsallı olup diğer tarafından bir yay ile tespit edilmektedir. Dikdörtgen kesitli bir mil ve bu mile bağlı devri ayarlanabilir bir elektrik motoru ayrıca atalet dengesizliği sağlamak üzere iki adet disk barındırmaktadır. Bu diskler, motorun çarkına kayışla bağlanarak motorun oluşturduğu moment disklerin bulunduğu çarka aktarılarak dönmektedirler. Burada motorun dönüş devri 0-3000 d/dk aralığında değiştirilebilmekte buna ek olarak disk sistemine ilave kütle eklenebilmektedir. Damper elemanı ise içi yağ dolu bir silindir ve bu silindir içinde hareket edebilen pistondan meydana gelmektedir. Cihazın mafsallı olmayan diğer ucunda dönen bir silindir kayıt elemanı görevi görmektedir. Bu silindir motor devrinin kontrol edildiği ilgili bölümden açılıp kapatılabilmektedir. Silindire bağlanan kağıt dönerken mile bağlanmış olan kalemle de genlik değeri ölçümü alınabilmektedir. Ancak çalışmada bu ölçüm sisteminin

sağlıklı olmayacağı düşünülerek, bir enkoder yardımıyla ölçüm yapılmış, enkoderi bağlayabilmek için cihazda bazı modifiyelere gidilmiştir.

Modifiye işlemi, cihaza enkoder bağlanabilmesi için yapılan işlemlerdir. Cihazın mafsal kısmında bulunan rulman ve kapak elemanlarına delik açılıp, ardından bu deliklere metrik 8 bir vida takılmıştır. Daha sonra bu vida ile enkoderin mili birbirine kaplin vasıtasıyla bağlanmıştır. Böylece mafsal kısmındaki açı değişimleri anlık olarak kaydedilmiş ve bu açıların mile bağlanmış kalemle ölçüm alınan kısımdaki genlik değerleri saptanmıştır. Bu sayede kalemin kâğıda sürtünmesiyle oluşan ölçüm yanlışlığı en aza indirgenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.19. Enkoder elemanının sisteme dahil edilmiş görüntüsü

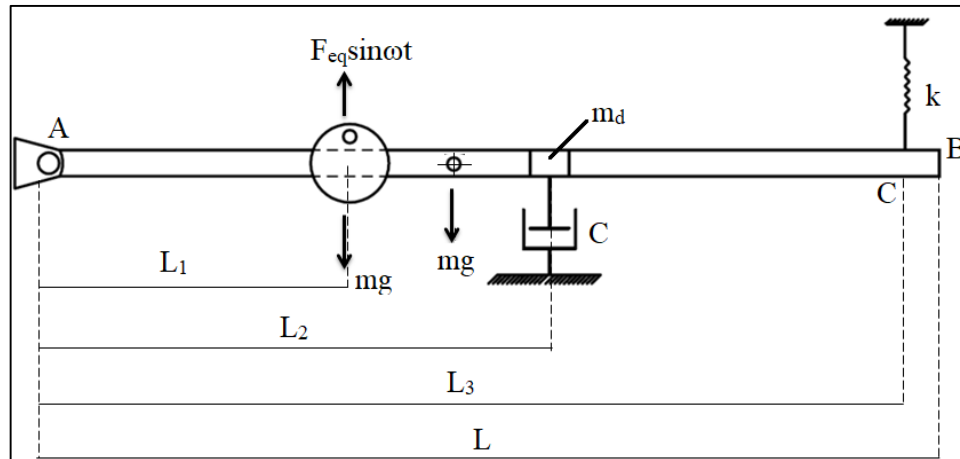


Şekil 2.20. Cihazın test için hazırlanmış halinin görünüşü

2.5.2. Matematiksel titreşim modelinin oluşturulması

Bu kısımda cihaz indirgenerek kütle, yay ve damperden oluşan ideal titreşim elemanları cinsinden modellenmiştir. Sistem atalet dengesizliği sağlayacak olan diskler yardımıyla zorlanmış titreşime maruz bırakılarak, serbest titreşim gibi zamanla titreşim hareketinin sönümlenmesiyle değil, sürekli titreşim altında incelenmiştir.

İlk olarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiş, ardından bu hareket denklemleri çözülerek sentezlenmiş olan sıvıların sönüm katsayısı (ξ) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2.21. İndirgenmiş sistem diyagramı

2.5.2.1. Hareket denklemlerinin çıkarılması

A noktasına göre moment alınırsa;

$$J_A \ddot{\theta} = \sum (\text{Moment})_A \quad (2.3)$$

$$J_A \ddot{\theta} = -(kL_3 \theta)L_3 - (cL_2 \dot{\theta})L_2 + (F_{eq} \sin \omega t)L_1 \quad (2.4)$$

$$J_A \ddot{\theta} + kL_3^2 \theta + cL_2^2 \dot{\theta} = F_{eq} \sin \omega t L_1 \quad (2.5)$$

Burada J_A ; sistemin A noktasına göre atalet momenti (kgm^2), $kL_3\theta$; yay kuvveti (N), $cL_2\dot{\theta}$; sönüm kuvveti (N), $F_{eq}\sin\omega t$; zorlayıcı kuvvet olarak tanımlanmaktadır.

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.6)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.7)$$

Denklem 2.6'da açısal hız (rad/s), 2.7'de ise açısal ivme (rad/s^2) tanımlanmaktadır. L_1, L_2, L_3 ise moment kolu uzaklıklarıdır (m).

Önceki kısımlarda Tecquipment TM16A cihazının modifikasyonu ile ilgili detaylı bilgi verilmişti. Genlik değeri üzerinden gidilerek sönüm faktörü hesaplanacağından dolayı hareket denklemlerinde B noktasındaki uzama değerleri referans alınacaktır. Bu sebeple bu kısımda koordinat dönüşümü yapmak yerinde olacaktır.

$L\theta = x$ olduğundan ve θ görülen yere x/L yazılırsa;

$$J_A \frac{\ddot{x}}{L} + cL_2^2 \frac{\dot{x}}{L} + kL_3^2 \frac{x}{L} = F_{eq} L_1 \sin \omega t \quad (2.8)$$

Denklemden her iki taraf da L_1 'e bölünürse;

$$J_A \frac{\ddot{x}}{LL_1} + cL_2^2 \frac{\dot{x}}{LL_1} + kL_3^2 \frac{x}{LL_1} = F_{eq} \sin \omega t \quad (2.9)$$

Sistem daha da basite indirildiğinde;

$$m_{eq} \ddot{x} + c_{eq} \dot{x} + kx = F_{eq} \sin \omega t \quad (2.10)$$

$$m_{eq} = \frac{J_A}{LL_1} : \text{Sistemin eşdeğer kütlesi (kg)} \quad (2.11)$$

$$c_{eq} = \frac{cL_2^2}{LL_1} : \text{Eşdeğer sönüm katsayısı (Ns/m)} \quad (2.12)$$

$$k_{eq} = \frac{kL_3^2}{LL_1} : \text{Eşdeğer yay katsayısı (N/m)} \quad (2.13)$$

$$F_{eq} = m_u e \omega^2 : \text{Eşdeğer kuvvet genliği (N)} \quad (2.14)$$

Denklem 2.11'de sistemin eşdeğer kütlesi (kg), 2.12'de eşdeğer sönüm katsayısı (Ns/m), 2.13'te eşdeğer yay katsayısı (N/m), 2.15'te ise eşdeğer kuvvet genliği (N) olarak verilmiştir. Ayrıca denklem 2.15'te; $m_u e$; disklerin dengesizliği (kgm), ω ise disklerin açısal hızıdır (rad/s).

2.5.2.2. Hareket denklemlerinin çözümü

Hareket denklemlerinin çözümü tamamlayıcı çözüm ve özel çözüm olmak üzere iki kısımdan elde edilmektedir. Tamamlayıcı çözüm geçici titreşim durumunu, özel çözüm ise sürekli titreşim durumuna cevap vermektedir. Sisteme zorlanmış titreşim uygulandığında, başka bir deyişle sürekli titreşim durumu inceleneceğinde sürekli titreşim kısmı, dolayısıyla özel çözüm cevabı aranmaktadır.

Harmonik zorlama durumunda sürekli titreşim cevabının da harmonik olacağı kabul edilerek aşağıdaki çözüm denkleme uygulanacaktır.

$$x(t) = X \sin(\omega t - \Phi) \quad (2.15)$$

Bu çözüm hareket denkleminde yerine konarak titreşim genliği (X) değeri elde edilir. Titreşimin faz açısı ölçülmediğinden ifade edilmemiştir.

$$\frac{X}{F_{eq}/k_{eq}} = \frac{X}{X_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.16)$$

$$X_{st} = \frac{F_{eq}}{k_{eq}} : \text{Statik yer değiştirme} \quad (2.17)$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} : \text{Frekans oranı} \quad (2.18)$$

$$\omega : \text{Zorlayıcı kuvvetin Frekansı} \quad (2.19)$$

$$\omega_n = \sqrt{k_{eq}/m_{eq}} : \text{Sistemin doğal frekansı (rad/s)} \quad (2.20)$$

$$\xi = c_{eq}/2m_{eq} \omega_n : \text{Sistemin sönüm faktörü} \quad (2.21)$$

R: Dinamik büyütme faktörü olarak tanımlanmaktadır.

2.5.2.3. Sönüm faktörü tayini

Sönüm faktörü tayini için sistem serbest titreşime geçirildikten sonra kayıt sistemi devreye alınıp “Logaritmik Azalma” hesaplanır. Logaritmik azalmadan da sönüm katsayısı (ξ) tayin edilir.

Logaritmik azalma şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{X_0}{X_n} \right) \quad (2.22)$$

Burada X_0 ; başlangıç yer değiştirmesi, X_n ; n. salınım sonundaki titreşim genliği δ ; logaritmik azalma olarak tanımlanmaktadır.

Sönüm faktörü ile logaritmik azalma arasındaki ilişki ise şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{X_0}{X_n} \right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.23)$$

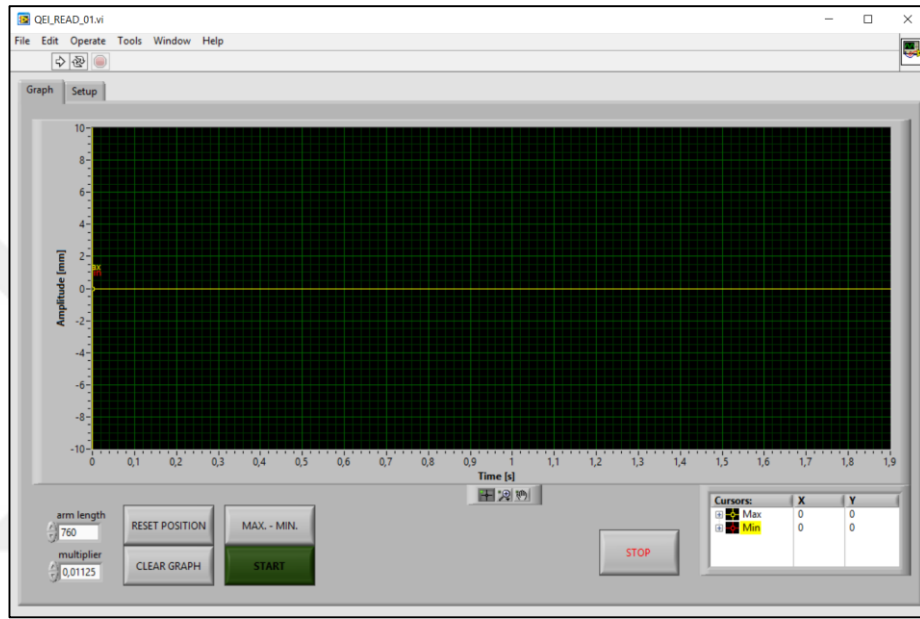
Burada logaritmik azalmanın bulunmasının ardından, ξ değerinin çekilmesi yoluyla sönüm faktörü tayin edilmektedir.

2.5.3. Düzeneğin çalışması ve veri toplama yazılımıyla verilerin eldesi

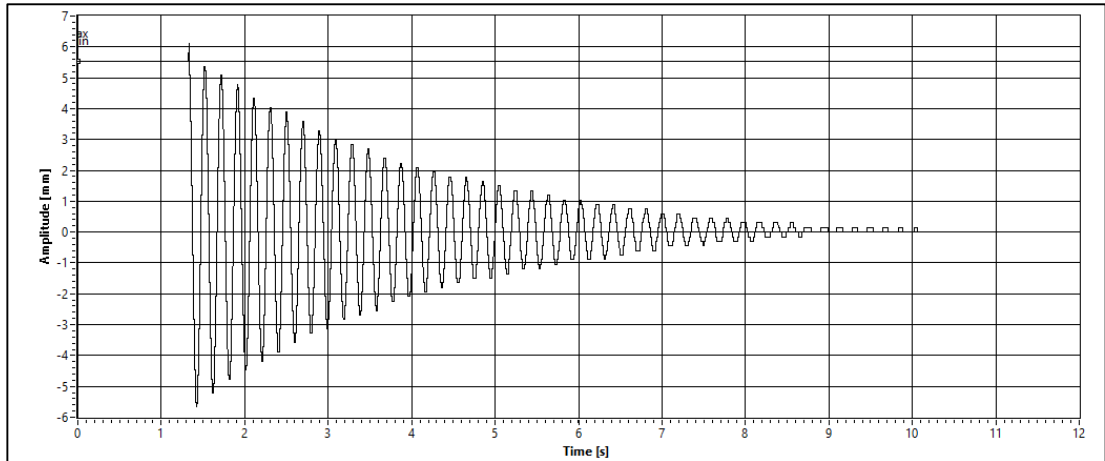
Düzenek sağ uç tarafından özdeş elastomer elemanlar yardımıyla belirli bir yükseklikteki sabit çengele tutturulmuş, ardından bu elastomer eleman tek hamlede kesilerek düzeneğe zorlayıcı kuvvet uygulanmıştır. Bu işlem tek elastomer, çift elastomer ve üç elastomer olarak üç farklı şekilde tüm deney setine beşer deneme yapılmak suretiyle uygulanmıştır.

Bu işlem sırasında veri toplama yazılımı kullanılarak dikdörtgen kesitli milin sağ ucundaki hareketi hassas bir şekilde kaydedilerek sönüm oranı belirlenmek üzere grafik olarak çıktısı alınmıştır.

Sönüm oranının belirlenmesi için gerekli olan X_0 , X_n ve n değerleri bu grafiklerden edinilmiş, sonrasında bu değerler excel ortamına aktarılarak sönüm oranı tayin edilmiştir.



Şekil 2.22. Veri toplama yazılımı ekran görüntüsü



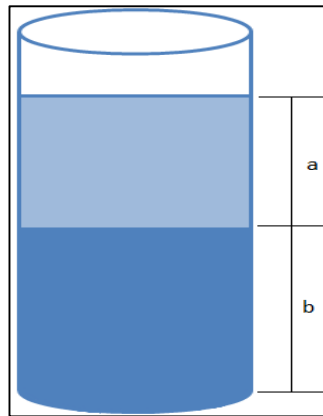
Şekil 2.23. %5 saf 6014 %95 200 cSt silikon yağı karışımının tek elastomer kullanılarak oluşturulmuş genlik-zaman grafiği



Şekil 2.24. Kaplanmış küre ihtiva eden sıvı içeren damperin sistemdeki görüntüsü

2.6. Çökelme Oranlarının Belirlenmesi

Sentezlenen sıvıların çökelme oranının belirlenmesi için sentezlenen sıvılar farklı yüzey gerilmelerine maruz kalmaması ve daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için akrilik damper muhafazası ile aynı malzeme ve boyutsal özelliklere sahip kaplarda ölçümlenmiştir. Sıvılar bu kaplara alındıktan sonra üç saat boyunca gözlemlenmiştir. % çökelme oranını belirlemek için denklem X kullanılmıştır. Bu denklemde a ile berrak sıvı, b ile koyu sıvı yükseklikleri belirtilmiştir.



Şekil 2.25. Çökelme oranının belirlenmesinde kullanılan yöntemin şematığı

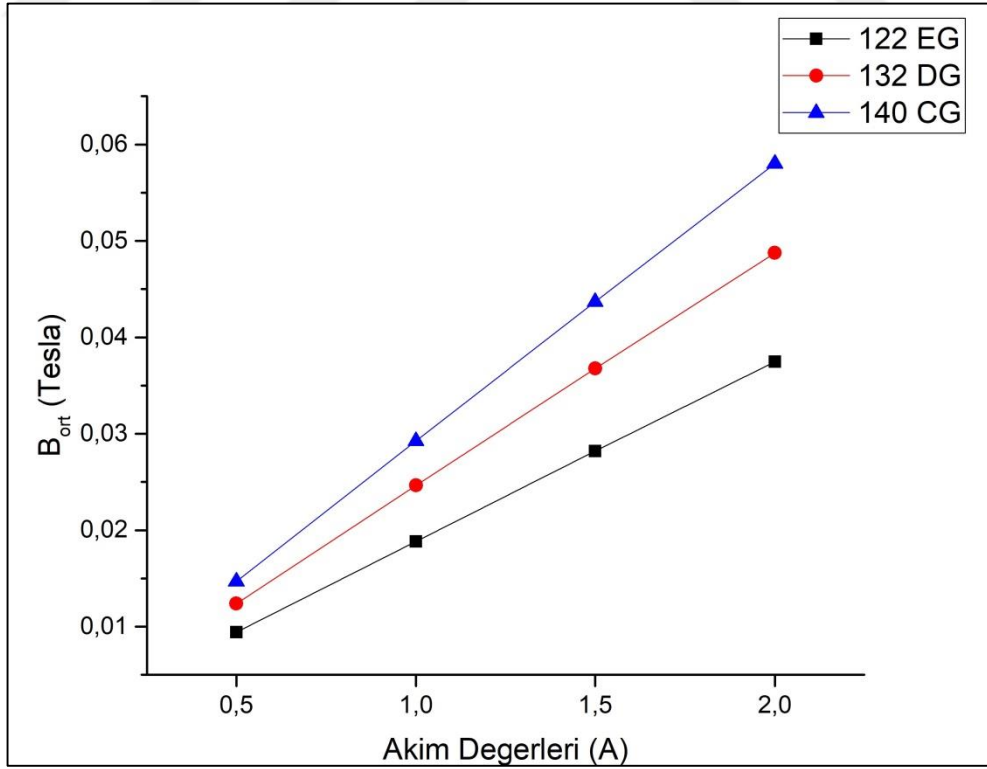
$$\text{Çökelme Oranı} = \frac{a}{a+b}$$

(2.24)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 3.1. Farklı MR Sıvılarının Farklı Akım Değerlerindeki B değerleri

Sıvı Türü	Akım Değeri (A)	B_{\min} (Tesla)	B_{\max} (Tesla)	B_{ort} (Tesla)
122 EG	0,5	0,000195	0,018675	0,009435
	1	0,000391	0,037269	0,01883
	1,5	0,000586	0,055782	0,028184
	2	0,000782	0,074192	0,037487
132 DG	0,5	0,000164	0,024594	0,012379
	1	0,000322	0,048966	0,024644
	1,5	0,000485	0,073036	0,0367605
	2	0,000684	0,096816	0,04875
140 CG	0,5	0,000133	0,029225	0,014679
	1	0,000266	0,058219	0,0292425
	1,5	0,0004	0,086974	0,043687
	2	0,000535	0,115479	0,058007



Şekil 3.1. Farklı MR sıvılarının, farklı akım değerlerindeki ortalama manyetik akı yoğunlukları

Artan akım değeriyle birlikte artan manyetik akım yoğunlukları analiz sonucunda gözlemlenmektedir. Farklı B-H eğrilerine sahip ve dolayısıyla farklı manyetik özellik gösteren sıvılar arasında manyetik alandan en çok etkilenen sıvının 140 CG olduğu, en az etkilenen sıvının ise 122 EG olduğu grafikten de açıkça görülebilmektedir.

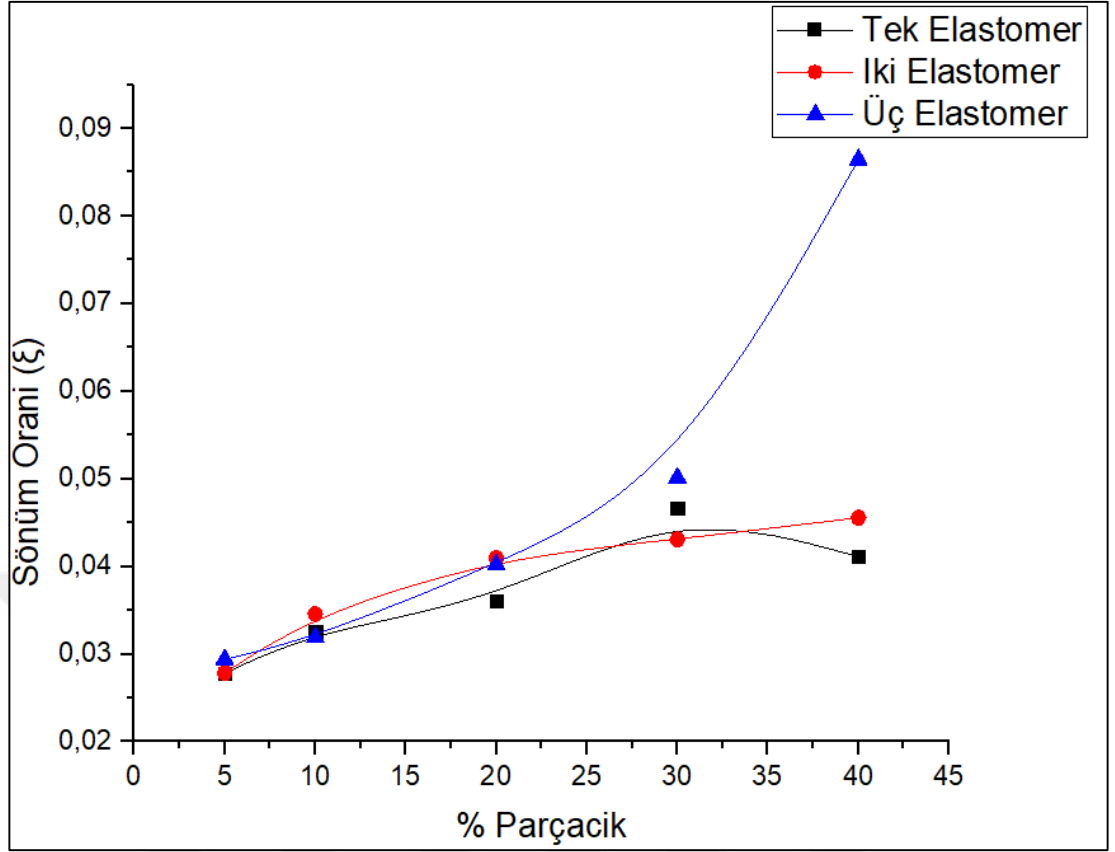
Değişen akım değerleriyle birlikte manyetik akı yoğunluğu doğrusal bir şekilde artarken farklı sıvılarda bu doğrusal artışın farklı eğim değerlerinde gerçekleştiği analiz sonucunda belirlenmiştir.

FEM analizi sonucunda ortalama manyetik akı yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Analiz sonucuna dayanarak B-H eğrileri farklılık gösteren, dolayısıyla farklı MR davranış sergileyen sıvıların farklı akım değerlerine verdiği tepkiler incelenmiştir. İncelenen üç sıvıda da akım değeri arttıkça manyetik akı yoğunluğunun lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda alınan sonuçlar Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

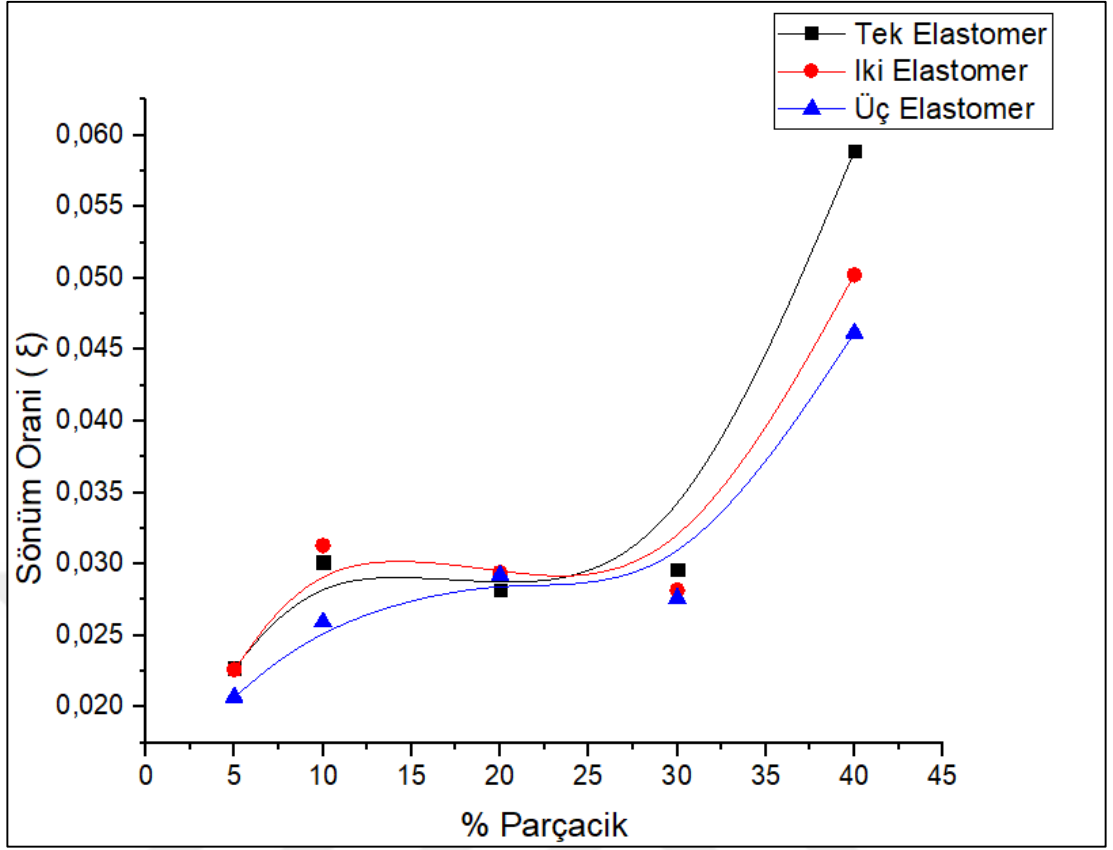
Tablo 3.1. Deneyler sonucunda elde edilen sönüm oranı değerleri

% Parçacık	Bir Elastomer	İki Elastomer	Üç Elastomer	Ortalama
Yağsız	0,013204043	0,015616195	0,014838365	0,0145529
200 cSt	0,026665499	0,027055325	0,025076543	0,0262658
%5 6014	0,0278175	0,027862632	0,029408387	0,0283628
%10 6014	0,032629168	0,034548449	0,031896285	0,0330246
%20 6014	0,03604678	0,040952859	0,04019602	0,0390652
%30 6014	0,046703242	0,043086309	0,050110663	0,0466334
%40 6014	0,041112914	0,045578444	0,086445373	0,0577122
%5 7019	0,0232985	0,023725971	0,022742836	0,0232558
%10 7019	0,023410023	0,027692892	0,027576632	0,0262265
%20 7019	0,028342821	0,025088046	0,027018272	0,0268164
%30 7019	0,028153439	0,035331222	0,034830145	0,0327716
%40 7019	0,045576478	0,048031763	0,055742582	0,0497836
%5 Hematit	0,022738451	0,022614363	0,020691265	0,0220147
%10 Hematit	0,030114483	0,031308153	0,025942575	0,0291217
%20 Hematit	0,028190646	0,029422072	0,029214154	0,0289423
%30 Hematit	0,029619052	0,028170435	0,027601369	0,0284636
%40 Hematit	0,058906215	0,050245123	0,046169565	0,0517736



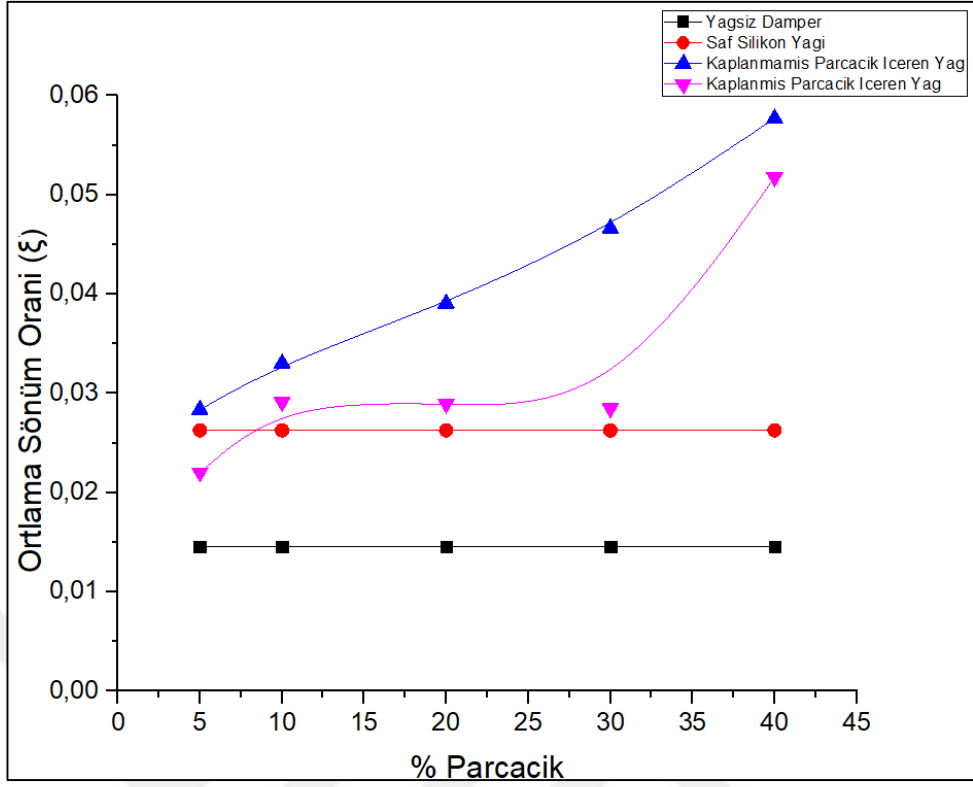
Şekil 3.2. Kaplanmamış küre içeren sıvıların sönüm oranlarının karşılaştırılması

Kaplanmamış küreler kullanılarak üretilen sıvılarda parçacık yüzdesi arttıkça sönüm oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tek, iki ve üç adet elastomer elamanın kullanılarak titreşim kuvvetinin üretildiği testlere bakıldığında sönüm oranları sırasıyla artmıştır. Ancak üç elastomer kullanılan ve %40 oranında parçacık içeren sıvıda sönüm oranının ciddi bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



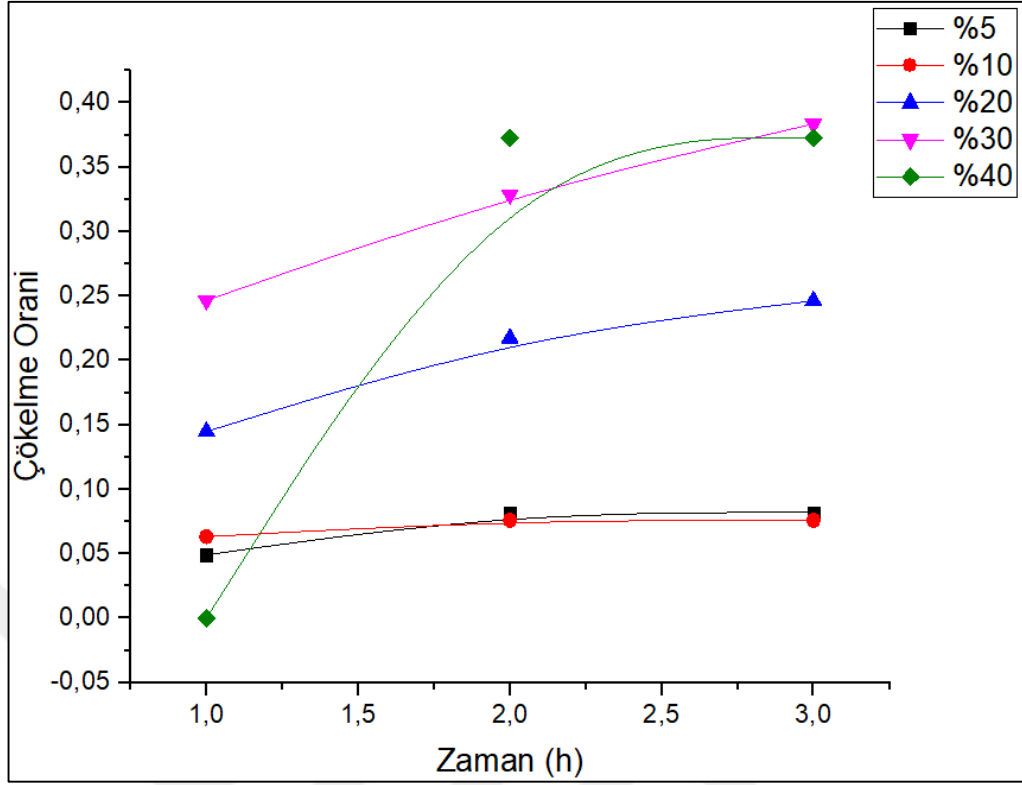
Şekil 3.3. Kaplanmış küre içeren yağların sönüm oranlarının karşılaştırılması

Hematit kaplanmış küreler kullanılarak üretilen sıvılarda parçacık yüzdesi artıka sönüm oranlarında bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tek, iki ve üç adet elastomer kullanılarak titreşim kuvvetinin oluşturulduğu testlere bakıldığında sönüm oranlarında sırasıyla artış meydana gelmiştir. Öte yandan %40 parçacık oranına gelindiğinde üç farklı kuvvet için de sönüm oranında ciddi bir artış meydana geldiği görülmüştür.

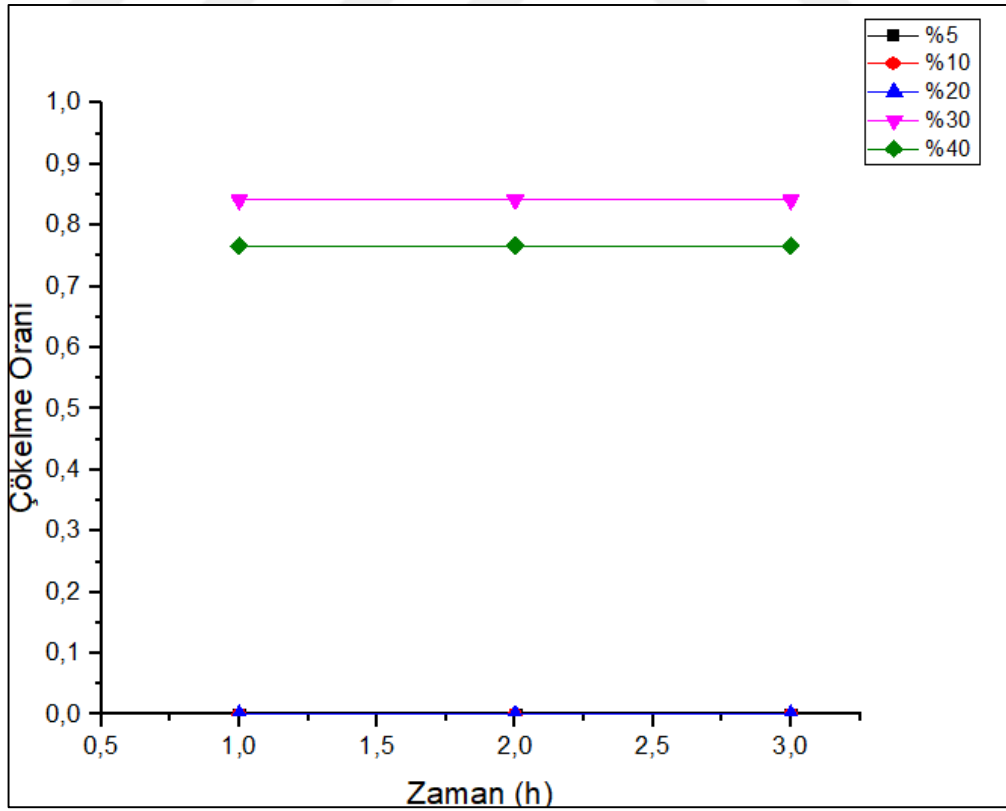


Şekil 3.4. Yağların ortalama sönüm oranlarının karşılaştırılması

Ortalama sönüm oranları değeri dikkate alındığında ve kaplanmış/kaplanmamış kürelerin parçacık yüzdesi dikkate alınarak karşılaştırılması sonucunda; kaplanmamış kürelerin sönüm oranında sürekli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın hematit kaplanmış kürelerde %10, %20, %30 parçacık oranlarında ciddi bir sönüm oranı artışı gözlemlenmemiştir. Ancak hematit kaplanmış kürelerde parçacık oranı %40 seviyesine geldiğinde sönüm oranında ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Saf silikon yağı kullanıldığında, sistemin yağsız durumuna göre ortalama sönüm oranında artış gözlemlenmiştir. Parçacık oranı arttığında sönüm oranında artış meydana gelmektedir. Kaplanmış kürelerin ortalama sönüm oranı kaplanmamış kürelere nazaran düşük seyretmektedir.



Şekil 3.5. Kaplanmamış kürelerin çökme oranlarının karşılaştırılması



Şekil 3.6. Kaplanmış kürelerin çökme oranlarının karşılaştırılması

ökölme oranları karşılaştırıldığında kaplanmamış küre içeren sıvılarda parçacık oranı arttıkça çökölme oranının da zamanla arttığı gözlemlenmiştir. Hematit kaplı küre içeren sıvıların çökölme oranı incelendiğinde %5, %10 ve %20 parçacık içeren sıvılarda gözlem yapılamamıştır. %30 ve %40 hematit kaplı parçacık içeren sıvılarda çökölme oranları büyük bir değişim göstermemiştir .



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada MR sıvıların üretiminde karşılaşılan zorluklar ele alınmış ve bu sorunları aşmak için en yaygın yöntem olan çekirdek/kabuk yaklaşımı benimsenerek yeni bir tür parçacık elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple içi boş cam küreler manyetit kaplanmak amacıyla bir dizi kimyasal işlem uygulanmış ancak sonuç olarak küreler hematit kaplanmıştır. Hematit kaplanan kürelerin normal kürelerle sönüm oranları arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Üç farklı damper sıvısı için de yapılan FEM analizi sonuçlarında manyetik alan çizgileri görselleştirilmiş ve gözlemlenmiştir. Ayrıca manyetik akı yoğunluklarıyla akım arasındaki lineer ilişki doğrulanmıştır. Bu ilişkinin farklı B-H eğrilerine sahip sıvılarda farklı eğim oranlarında meydana geldiği belirlenmiştir.

Kaplanmamış parçacık içeren yağlar, kaplanmış parçacık içeren yağlara göre daha yüksek bir sönüm oranı sergilemiştir. Parçacık yüzdesindeki artış, sönüm oranında da bir artış meydana getirmiştir. Dampere saf silikon yağı eklenmesiyle sönüm oranında gözlenen artışın, parçacık eklenmesiyle daha da arttığı gözlemlenmiştir.

Kaplanmamış parçacıklarda çökme oranı daha iyi gözlemlenebilmiştir. Kaplanmamış parçacık eklenen sıvılarda çökme oranı, eklenen parçacık yüzdesi arttıkça artış eğilimi göstermiştir. Kaplanmış parçacıkların çökme oranına bakıldığında ise %5 ve %10 parçacık oranlarında herhangi bir gözlem yapılamazken, %30 ve %40 parçacık oranında çökme oranları zamanla artış göstermiştir. %40'lık parçacık oranına sahip sıvıda %30 parçacık oranına sahip sıvıya göre daha az bir çökme oranı gözlemlenmiştir.

İleriki çalışmalarda kürelerin manyetit yerine hematit kaplanmasının kimyasal nedenleri araştırılabilir ve manyetit kaplı yeni bir küre sentezi gerçekleştirilebilir. Buna ek olarak damperin manyetik tasarımına farklı bir yaklaşım getirilebilir ve ayrıca sıvı filmi boşlukları değiştirilerek damperin sönüm oranı ve kuvvet analizi

irdelenebilir. Yeni bir tür MR sıvı sentezlenerek çeyrek, yarım ve tam taşıt modelleri ile matematiksel ve deneysel olarak karşılaştırmaları uygulanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Raibow J., The Magnetic Fluid Clutch, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1948, **67**(2), 1308-1315.
- [2] Kciuk M., Turczyn R., Properties and Application of Magnetorheological Fluids, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, **18**(1-2), 127-130.
- [3] Carlson J. D., Jolly M. R., MR Fluid, Foam and Elastomer Devices, *Mechatronics*, 2000, **10**(4-5), 555-569.
- [4] Huang J., Zhang J. Q., Yang Y., Wei Y. Q., Analysis and Design of A Cylindrical Magneto-Rheological Fluid Brake, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **129**(1-3), 559-562.
- [5] Shimada K., Wu Y., Matsuo Y., Yamamoto K., Float Polishing Technique Using New Tool Consisting of Micro Magnetic Clusters, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **162-163**, 690-695.
- [6] Ashitiani M., Hashemabadi S. H., Gaffari A., A Review on the Magnetorheological Fluid Preparation and Stabilization, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, **374**, 716-730.
- [7] Rosenfeld N. C., Wereley N. M., Volume-Constrained Optimization of Magnetorheological and Electrorheological Valves and Dampers, *Smart Materials and Structures*, 2004, **13**, 1303-1313,
- [8] Xu Z., Guo Y., Zhu J., Xu F., *Intelligent Vibration Control in Civil Engineering Structures*, 1st ed., Elsevier Inc., London, 87-94, 2017.
- [9] Aslam M., Xiong-liang Y., Zong-chao D., Review of Magnetorheological (MR) Fluids and Its Applications in Vibration Control, *Journal of Marine Science and Application*, 2006, **5**(3), 17-29.
- [10] Vincente J., Klingenberg D. J., Hidalgo-Alvarez R., Magnetorheological Fluids: A Review, *Soft Matter*, 2011, **7**, 3701-3710.
- [11] Calarcq J., Sarrazin J., Montfort J. -P., Viscoelastic Properties of Magnetorheological Fluids, *Rheologica Acta*, 2004, **43**(1), 38-49.

- [12] Wereley N. M., Chaudhuri A., Yoo J. -H., John S., Kotha S., Suggs A., Radhakrishnan R., Love B. J., Sudarshan T. S., Bidisperse Magnetorheological Fluids Using Fe Particles at Nanometer and Micron Scale, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, **17**(5), 393-40
- [13] Iglesias G. R., López-López M. T., Durán J. D. G., González-Caballero F., Delgado A. V., Dynamic Characterization of Extremely Bidisperse Magnetorheological Fluids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, **377**(1), 153-159.
- [14] Jiang W., Zhang Y., Xuan S., Guo C., Gong X., Dimorphic Magnetorheological Fluid With Improved Rheological Properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, **323**(24), 3246-3250.
- [15] Cho M. S., Lim S. T., Jang I. B., Choi H. J., Jhon M. S., Encapsulation of Spherical Iron-Particle With PMMA and Its Magnetorheological Particles, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, **40**(4), 3036-3038.
- [16] Jun J. B., Uhm S. J., Ryu J. H., Suh K. D., Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetic Composite Particles for Magnetorheological Fluid Materials, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, **260**(1-3), 157-164.
- [17] Choi H. J., Jang I. B., Lee J. Y., Pich A., Bhattacharya S., Adler H. -J., Magnetorheology of Synthesized Core-Shell Structured Nanoparticle, *IEEE Transactions on Magnetis*, 2005, **41**(10), 3448-3450.
- [18] Fang C., Zhao B. Y., Chen L. S., Wu Q., Liu N., Hu K. A., The Effect of the Green Additive Guar Gum on the Properties of Magnetorheological Fluid, *Smart Materials and Structures*, 2005, **14**, N1-N5.
- [19] Wu W. P., Zhao B. Y., Wu Q., Chen L. S., Hu K. A., The Strengthening Effect of Guar Gum on the Yield Stress of Magnetorheological Fluid, *Smart Materials and Structures*, 2006, **15**(4), N94-N98.
- [20] Choi J. S., Park B. J., Cho M. S., Choi H. J., Preparation and Magnetorheological Characteristics of Polymer Coated Carbonyl Iron Suspensions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **304**(1), 374-376.
- [21] Gu R., Gong X., Jiang W., Hao L., Xuan S., Zhang Z., Synthesis and Rheological Investigation of A Magnetic Fluid Using Olivary Silica-Coated Iron Particles as A Precursor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, **320**(21), 2788-2791.
- [22] Fan L., Luo Y., Chen Y., Zhang C., Wei Q., Preparation and Characterization of Fe₃O₄ Magnetic Composite Microspheres Covered by a P(MAH-co-MAA) Copolymer, *J Nanopart Res*, 2009, **11**(2), 449-458.

- [23] Fang F. F., Yang M. S., Choi H. J., Novel Magnetic Composite Particles of Carbonyl Iron Embedded in Polystyrene and Their Magnetorheological Characteristics, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, **44**(11), 4533-4536.
- [24] Cheng H. B., Wang J. M., Zhang Q. J., Wereley N. M., Preparation and Characterization of Composite Magnetic Particles and Aqueous Magnetorheological Fluids, *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, **149**(1), 1-6.
- [25] Yuan J., Zhang X., Qian H., A Novel Approach to Fabrication of Supermagnetite Hollow-Silica/Magnetite Composite Spheres, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, **332**(15), 2172-2176.
- [26] Xiaojuan L., Haiquan X., Jing C., Juncai S., Yuxiang Y., Xiangnong L., Research of Mica/Fe₃O₄ Pearlescent Pigment by Co-Precipitation, *Glass, Physics and Chemistry*, 2011, **37**(13), 330-342.
- [27] Liu Y. D., Choi H. J., Choi S. -B., Controllable Fabrication of Silica Encapsulated Soft Magnetic Microspheres With Enhanced Oxidation-Resistance and Their Rheology Under Magnetic Field, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, **403**, 133-138.
- [28] Galindo-Gonzalez C., Lopez-Lopez M. T., Duran J. D. G., Magnetorheological Behavior of Magnetite Covered Clay Particles in Aqueous Suspensions, *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(4), 043917.
- [29] Fang F. F., Liu Y. D., Choi H. J., Carbon Nanotube Coated Magnetic Carbonyl Iron Microspheres Prepared by Solvent Casting Method and Their Magneto-Responsive Characteristics, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, **412**, 47-56.
- [30] Mrlík M., Ilčíková M., Pavlínek V., Mosnáček J., Peer P., Filip P., Improved Thermooxidation and Sedimentation Stability of Covalently-Coated Carbonyl Iron Particles With Cholesteryl Groups and Their Influence on Magnetorheology, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, **396**, 146-151.
- [31] Agustin-Serrano R., Donado F., Rubio-Rosas E., Magnetorheological Fluid Based on Submicrometric Silica-Coated Particles Under an Oscillatory Magnetic Field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **335**, 2013, 149-158.
- [32] Dong Q., Kumada N., Yonesaki Y., Takei T., Kinomura N., Preparation and Characterization of Hollow Magnetite Spheres via a Template-Free Route, *Journal of the Ceramic Society*, 2010, **118**(4), 272-277.
- [33] Wang G., Zhao D., Ma Y., Zhang Z., Che H., Mu J., Zhang X., Tong Y., Dong X., Synthesis of Calcium Ferrite Nanocrystal Clusters for Magnetorheological Fluid with Enhanced Sedimentation Stability, 2017, *Powder Technology*, **322**, 47-53.

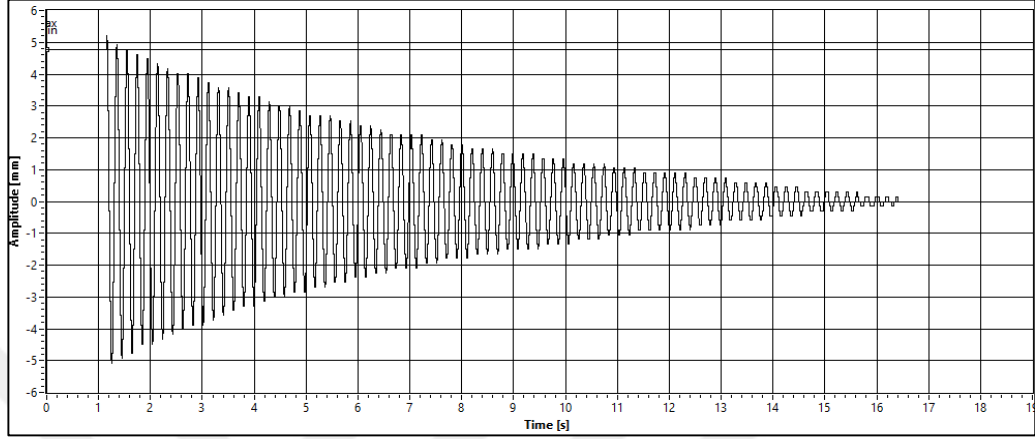
- [34] Esmaeilnezhad E., Choi H. J., Schaffie M., Gholizadeh M., Ranjbar M., Polymer Coated Magnetite-Based Magnetorheological Fluid and its Potential Clean Procedure Applications to Oil Production, *Journal of Cleaner Production*, 2018, **171**, 45-46.
- [35] Zhao H., Ma R., Zhang G., Xiao X., Preparation and Electromagnetic Properties of Composites of Hollow Glass Microspheres Coated with NiFe₂O₄, *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2007, **20**(6), 801-805.
- [36] An Z., Zhang J., Pan S., Fabrication of Glass/Ni-Fe-P Ternary Alloy Core/Shell Composite Hollow Microspheres Through a Modified Electroless Plating Process, *Applied Surface Science*, 2008, **225**(5), 2219-2224,
- [37] An Z., Zhang J., Pan S., Facile Preparation and Characterization of Glass/Fe₃O₄ Core/Shell Composite Hollow Spheres, *Dalton Transactions*, 2009, **19**, 3664-3667.
- [38] Carvalho M. D., Henriques F., Ferreira L. P., Godinho M., M. M., Cruz, Iron Oxide Nanoparticles: the Influence of Synthesis Method and Size on Composition and Magnetic Properties, *Journal of Solid State Chemistry*, 2013, **201**, 144-152.
- [39] Wang X., Liang X., Pi N., Yang H., Liu X., Yang Y., Effects of Pretreatment for Micron Glass on Its Nano-Fe₃O₄ Coating Layer, *Glass Physics and Chemistry*, 2015, **41**(2), 163-174.
- [41] Callister W. D., Rethwisch D. G., Wiley, Editör: Kenan Genel, *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 1.Basım, Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul, 801-815, 2015.
- [42] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, 1.Basım, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [43] URL-1: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/mrf-122eg-magneto-rheological-fluid>, (Ziyaret Tarihi: 19 Nisan 2018).
- [44] URL-2: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/mrf-132dg-magneto-rheological-fluid>, (Ziyaret Tarihi: 19 Nisan 2018).
- [45] URL-3: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/mrf-140cg-magneto-rheological-fluid>, (Ziyaret Tarihi: 19 Nisan 2018).
- [46] Kumar A., Mangal S. K., Finite Element Analysis of Magneto-Rheological Damper, *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2014, **3**, 42-46.



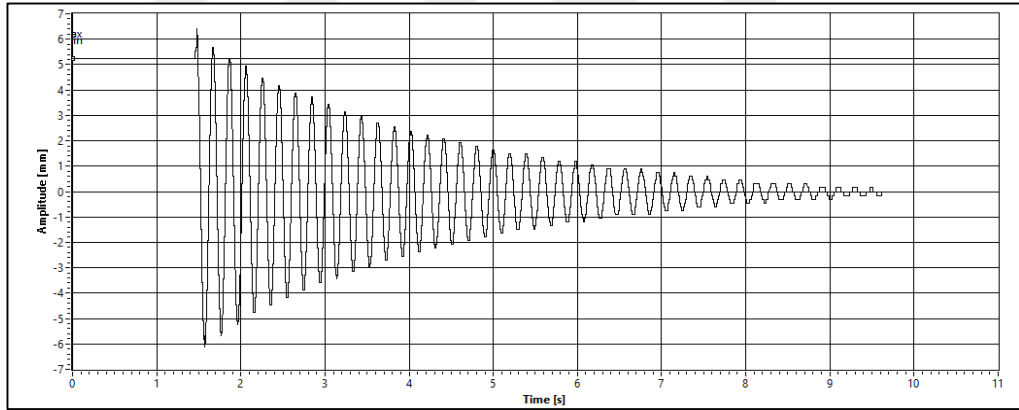
EKLER

Ek A.

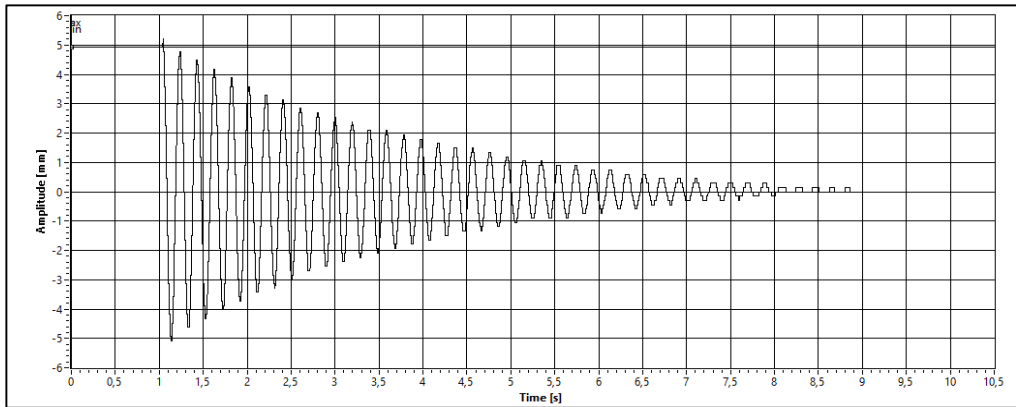
Tek Elastomer Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneylerin Genlik-Zaman Grafikleri



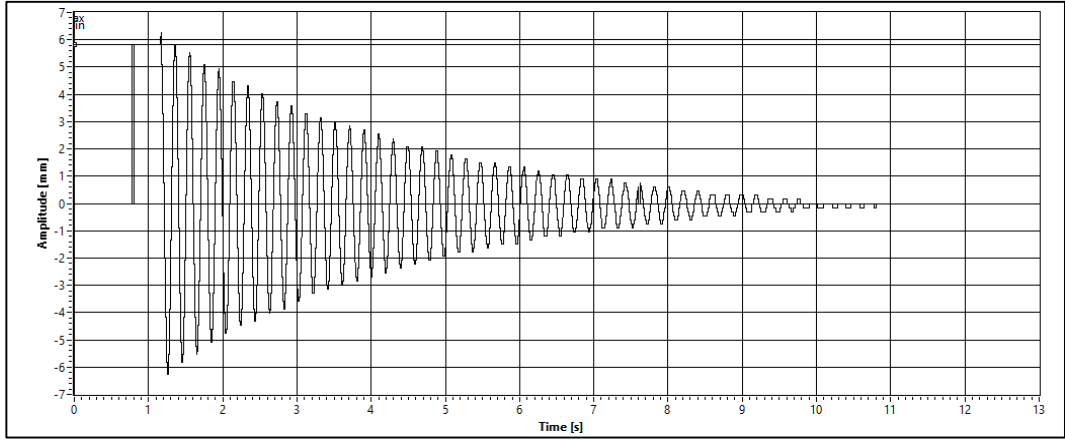
Şekil A.1. Sistemde sönümleyici yağ kullanılmadan oluşturulan genlik-zaman grafiği



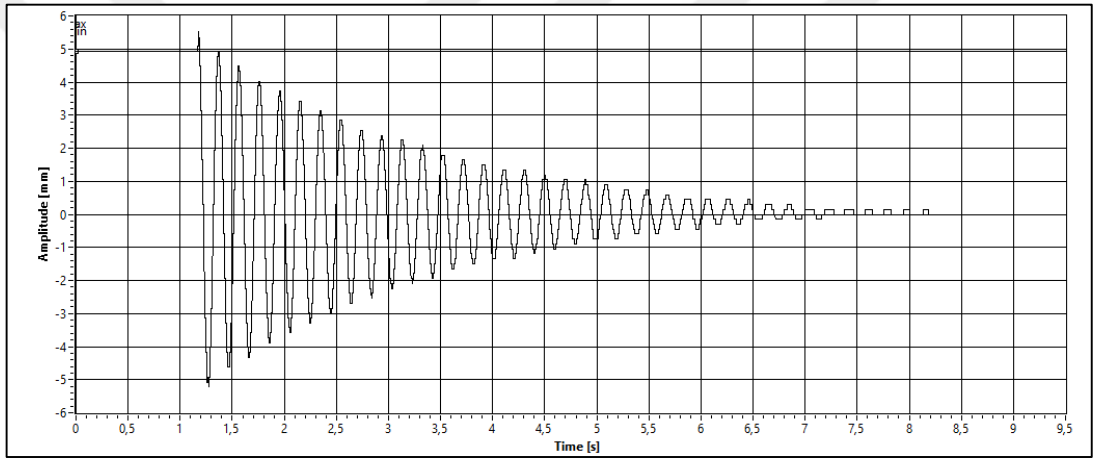
Şekil A.2. Sistemde 200 cSt yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



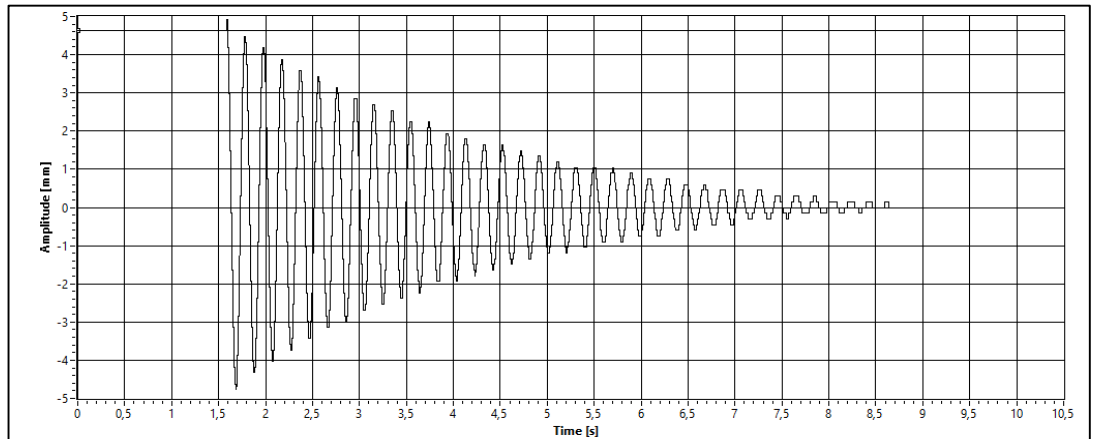
Şekil A.3. Sistemde %5 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



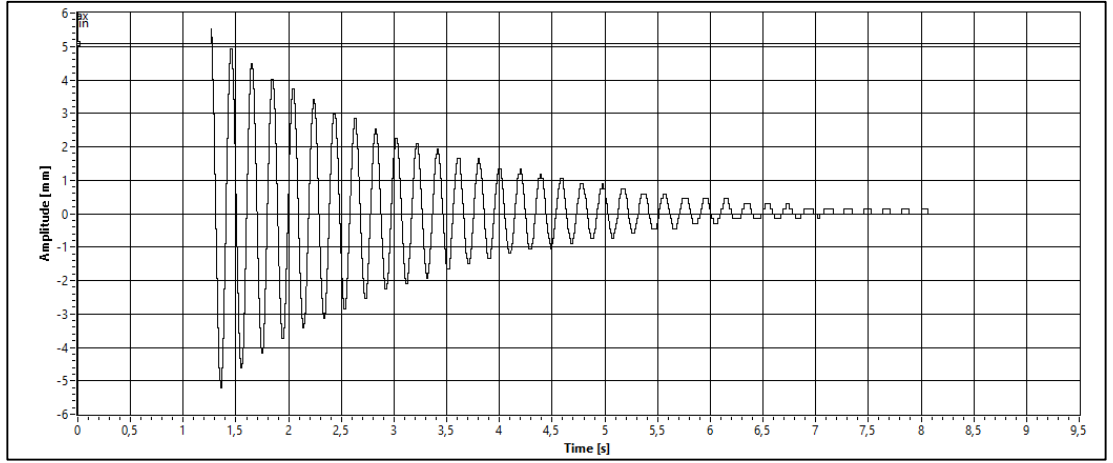
Şekil A.4. Sistemde %5 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



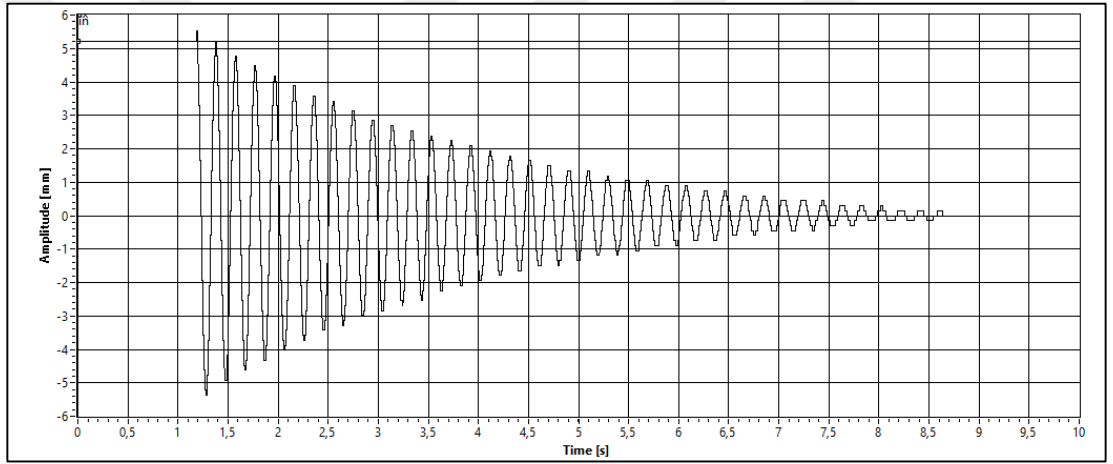
Şekil A.5. Sistemde %10 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



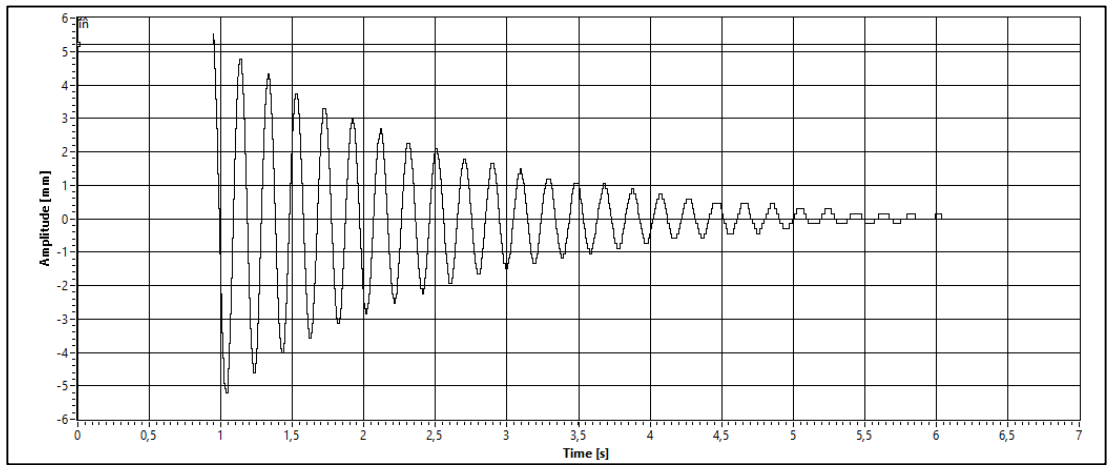
Şekil A.6. Sistemde %10 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



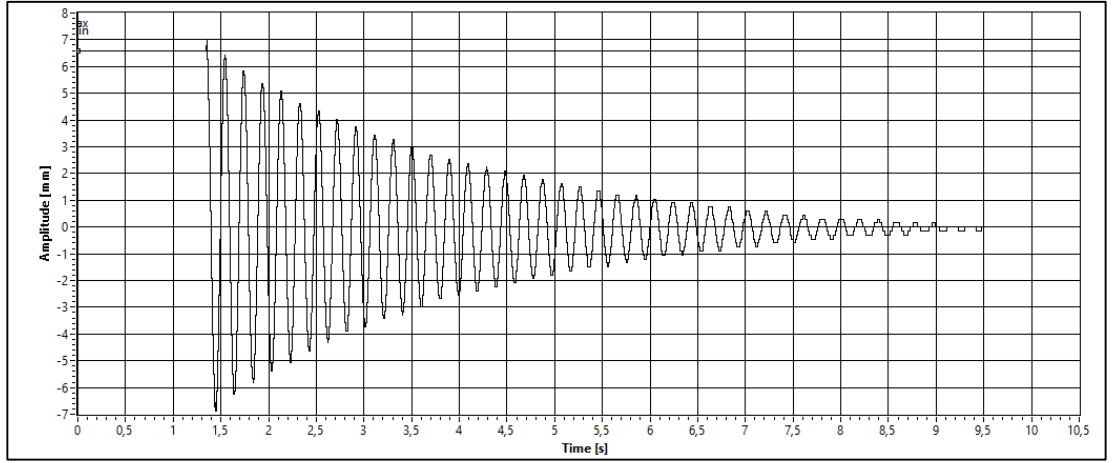
Şekil A.7. Sistemde %20 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



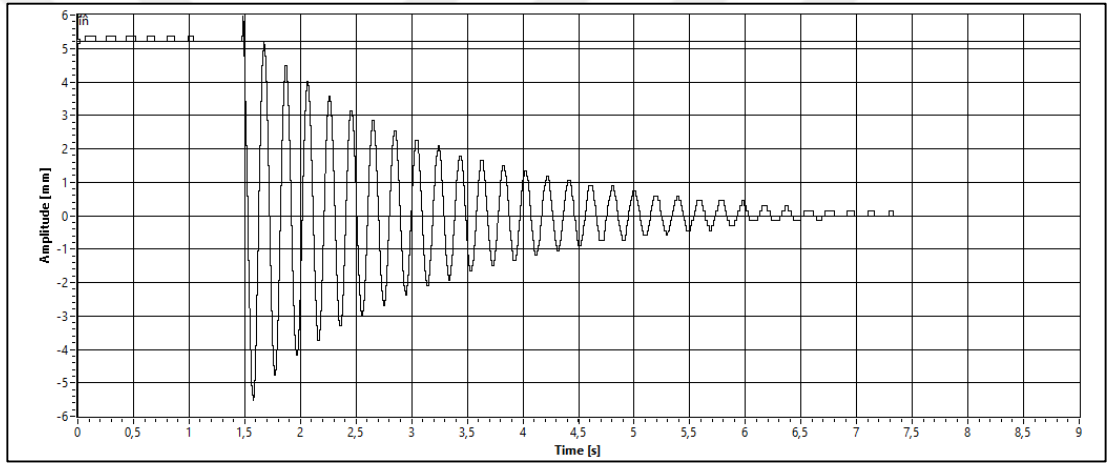
Şekil A.8. Sistemde %20 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



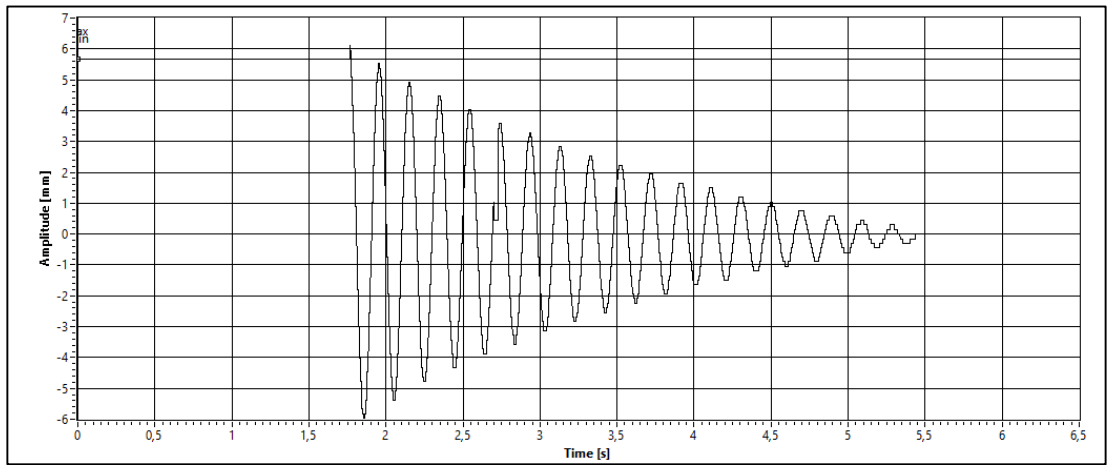
Şekil A.9. Sistemde %30 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



Şekil A.10. Sistemde %30 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



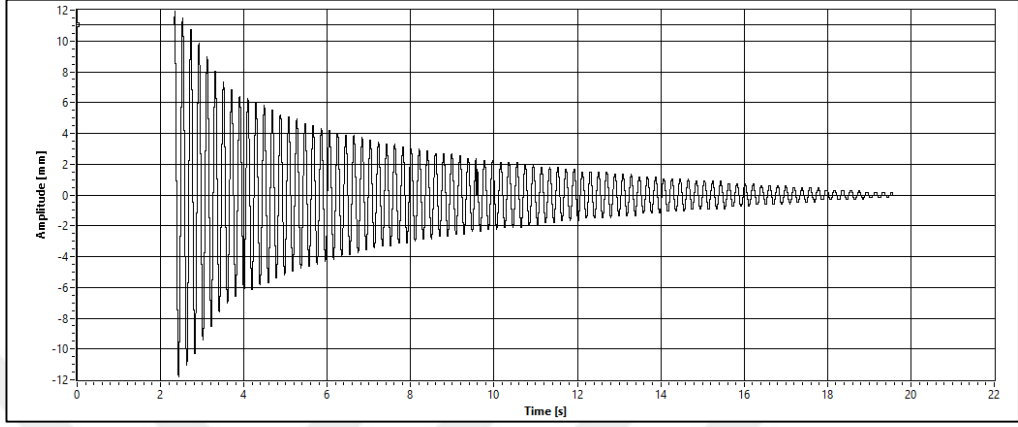
Şekil A.11. Sistemde %40 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



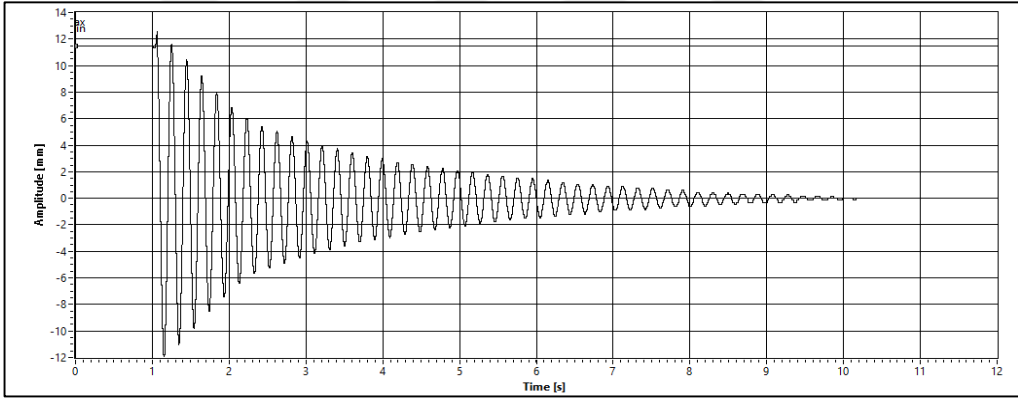
Şekil A.12. Sistemde %40 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği

Ek B.

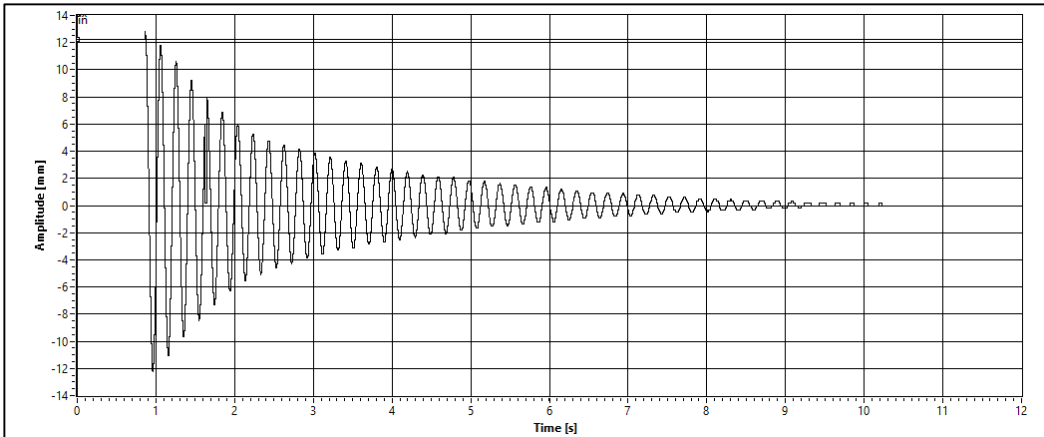
İki Elastomer Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneylerin Genlik-Zaman Grafikleri



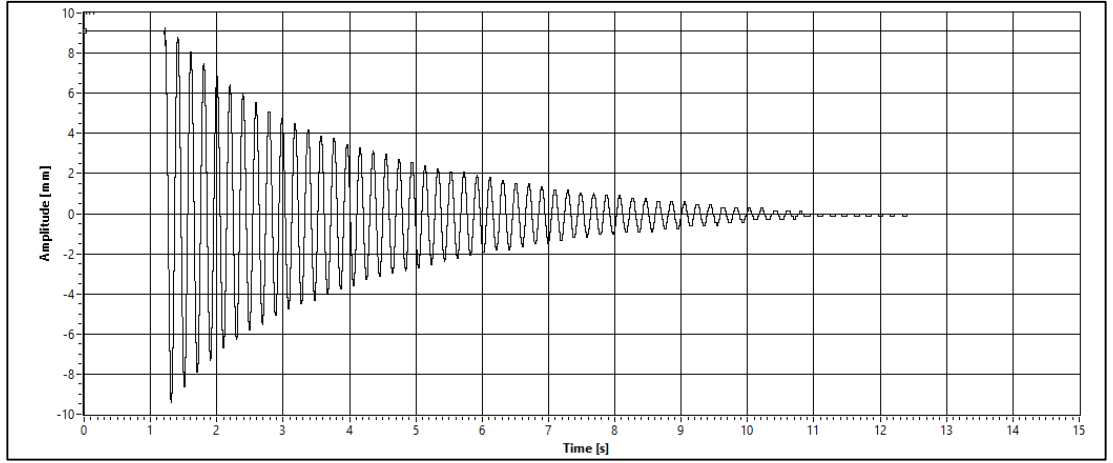
Şekil B.1. Sistemde sönümleyici yağ kullanılmadan oluşturulan genlik-zaman grafiği



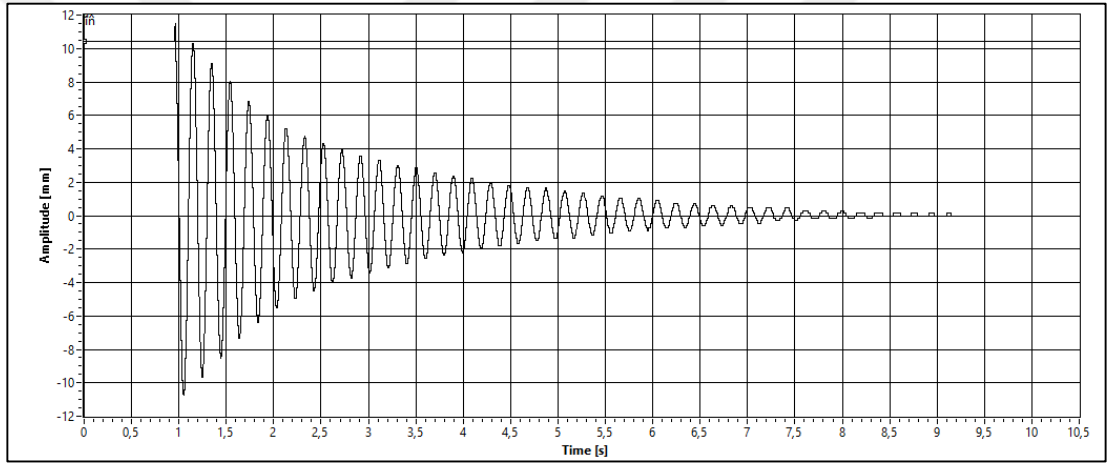
Şekil B.2. Sistemde 200 cSt yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



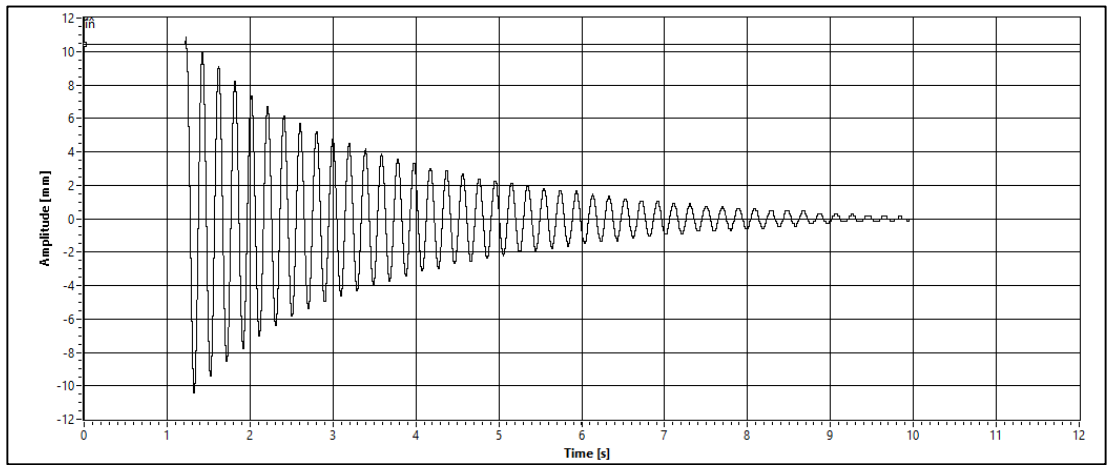
Şekil B.3. Sistemde %5 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



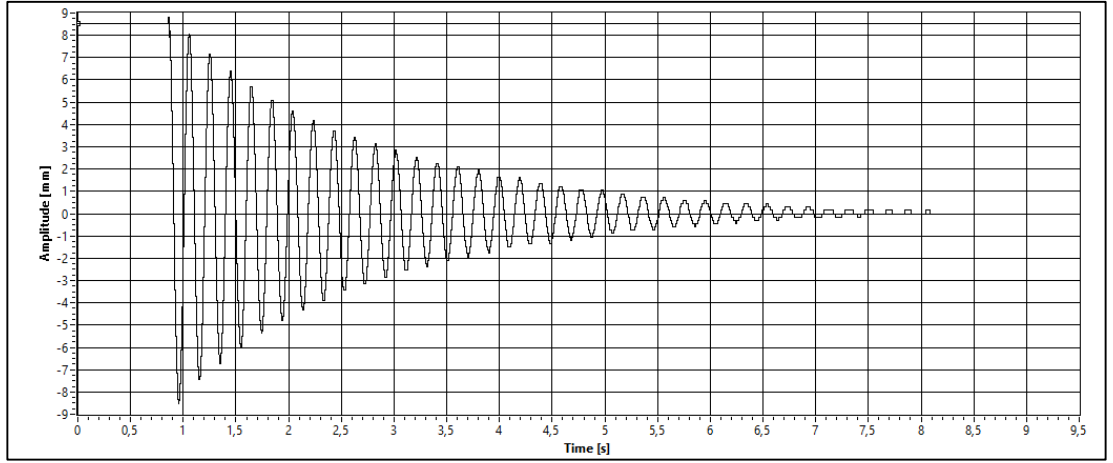
Şekil B.4. Sistemde %5 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



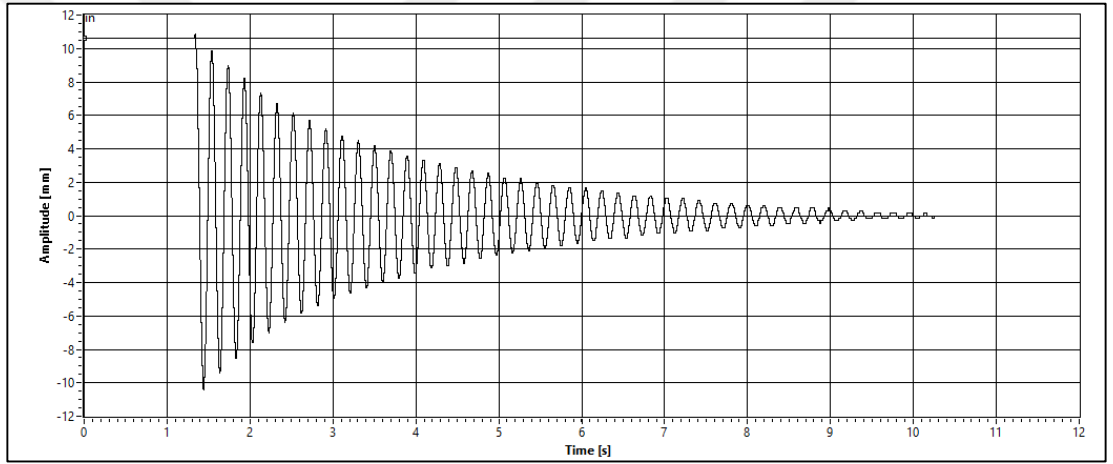
Şekil B.5. Sistemde %10 kaplanmamış parçacık kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



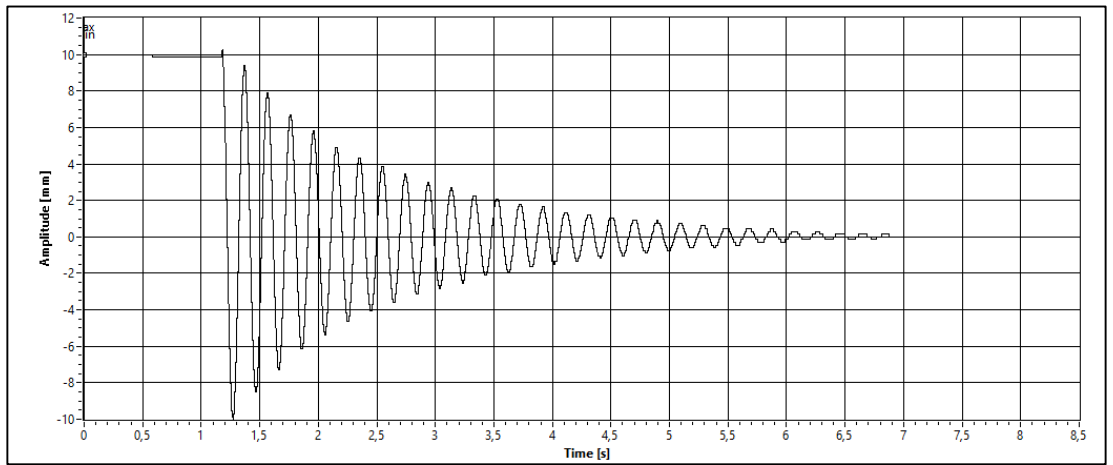
Şekil B.6. Sistemde %10 kaplanmış parçacık kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



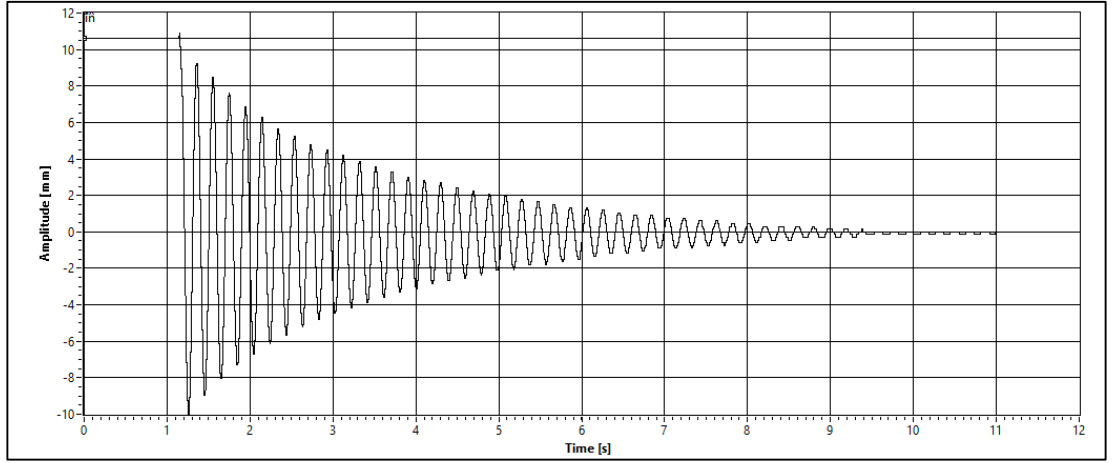
Şekil B.7. Sistemde %20 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



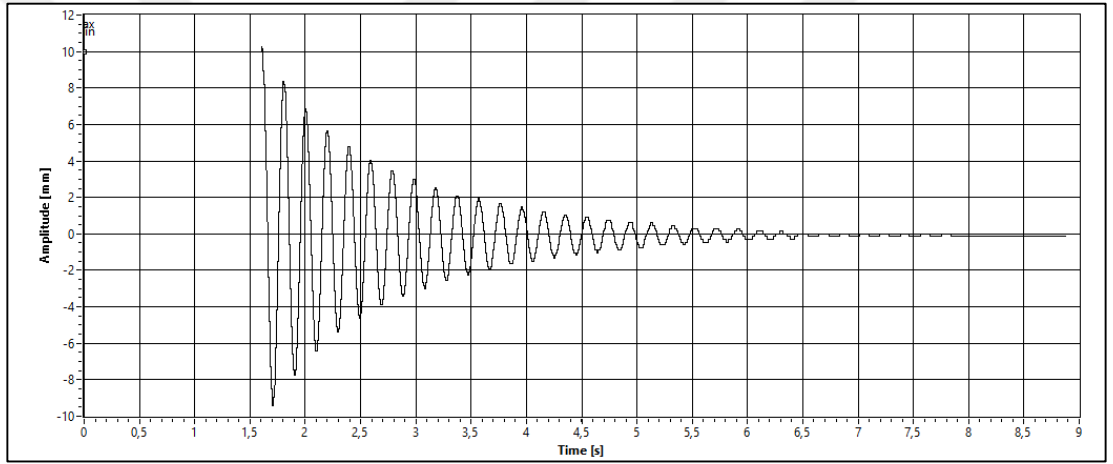
Şekil B.8. Sistemde %20 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



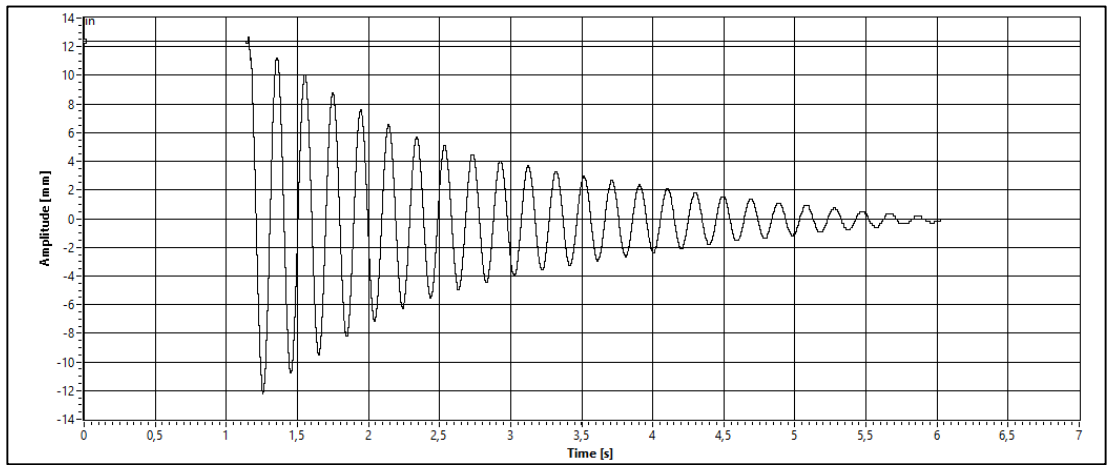
Şekil B.9. Sistemde %30 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



Şekil B.10. Sistemde %30 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



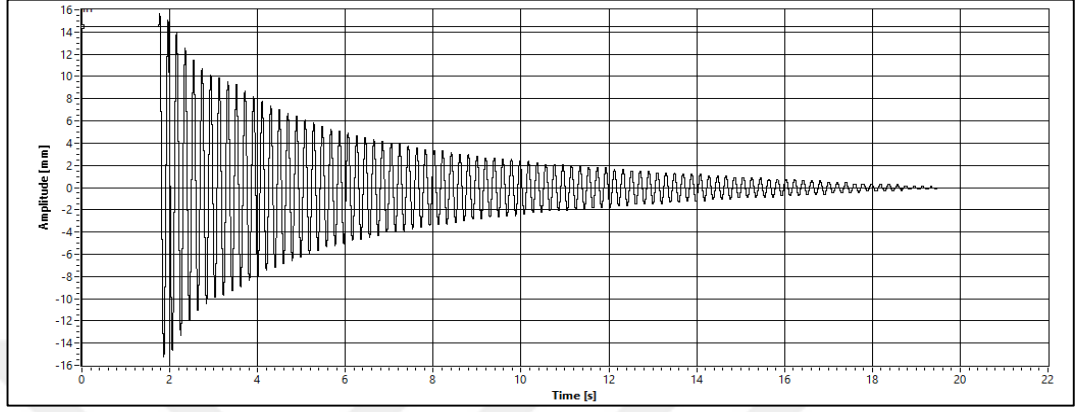
Şekil B.11. Sistemde %40 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



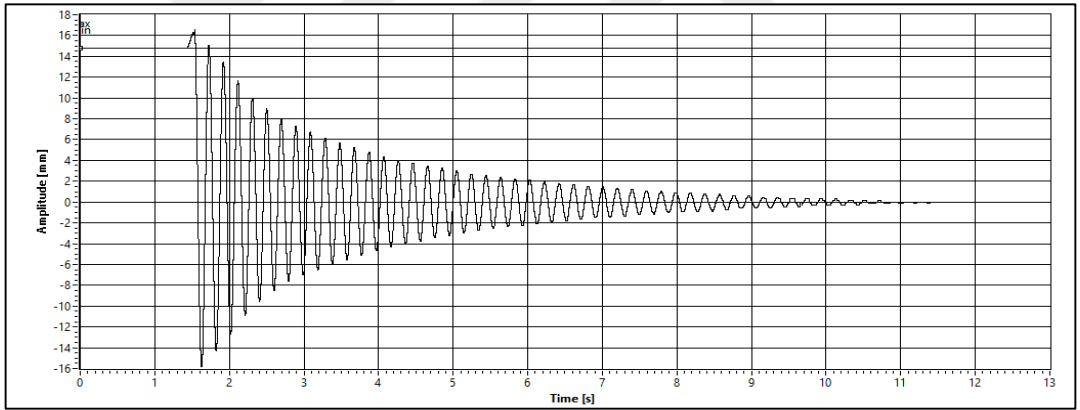
Şekil B.12. Sistemde %40 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği

Ek C.

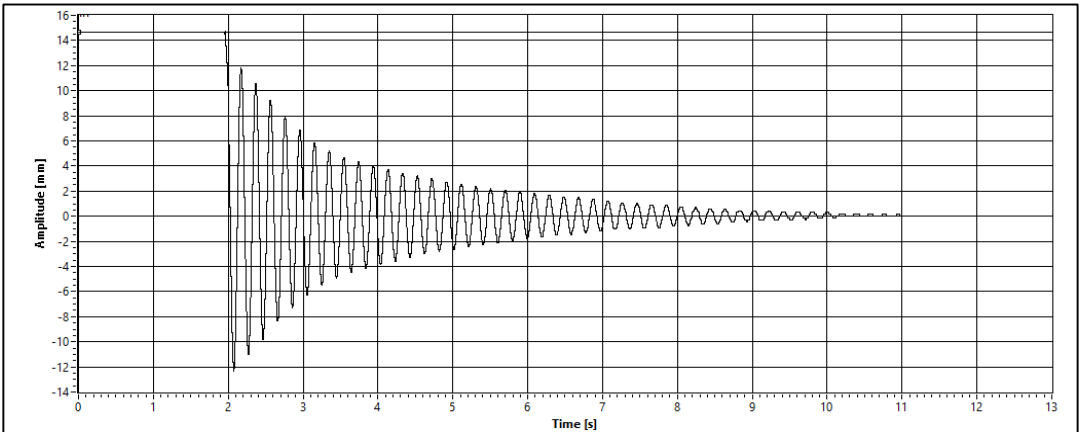
Üç Elastomer Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneylerin Genlik-Zaman Grafikleri



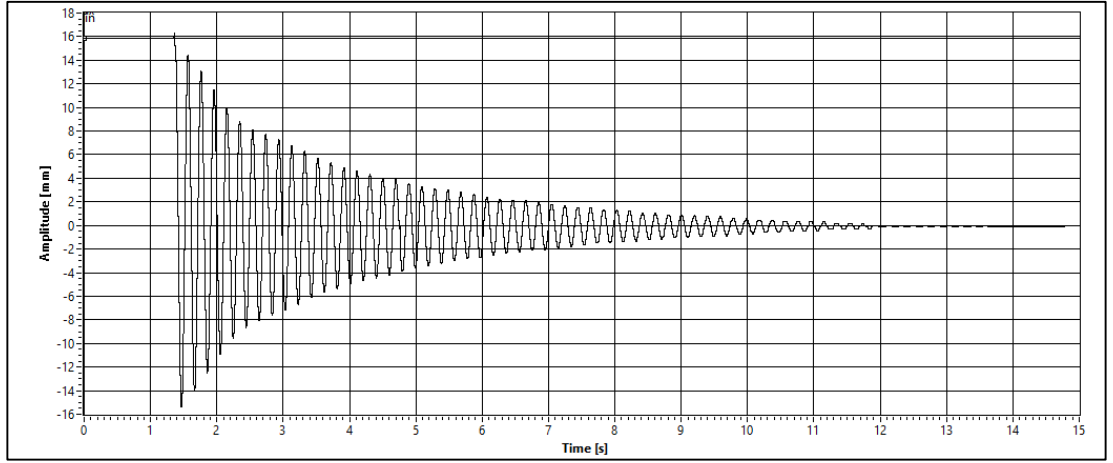
Şekil C.1. Sistemde sönümleyici yağ kullanılmadan oluşturulan genlik-zaman grafiği



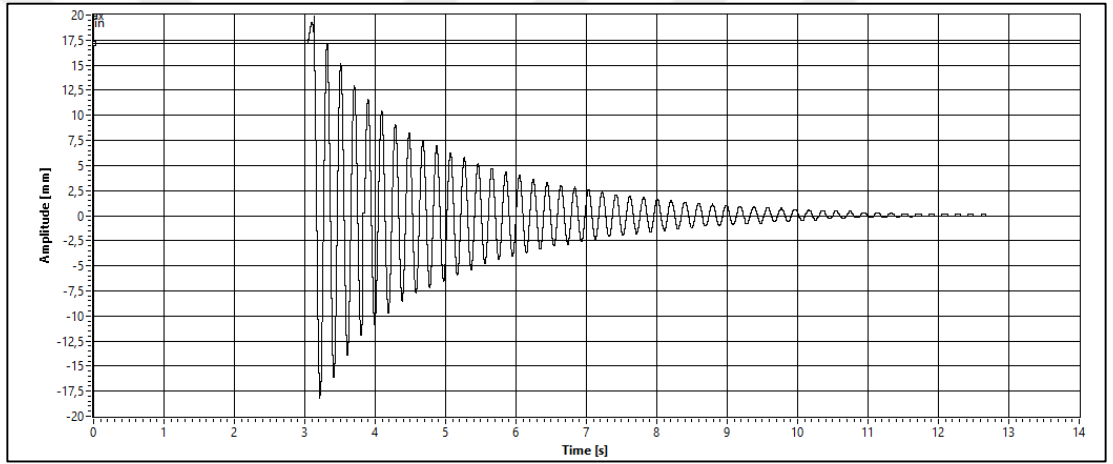
Şekil C.2. Sistemde 200 cSt yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



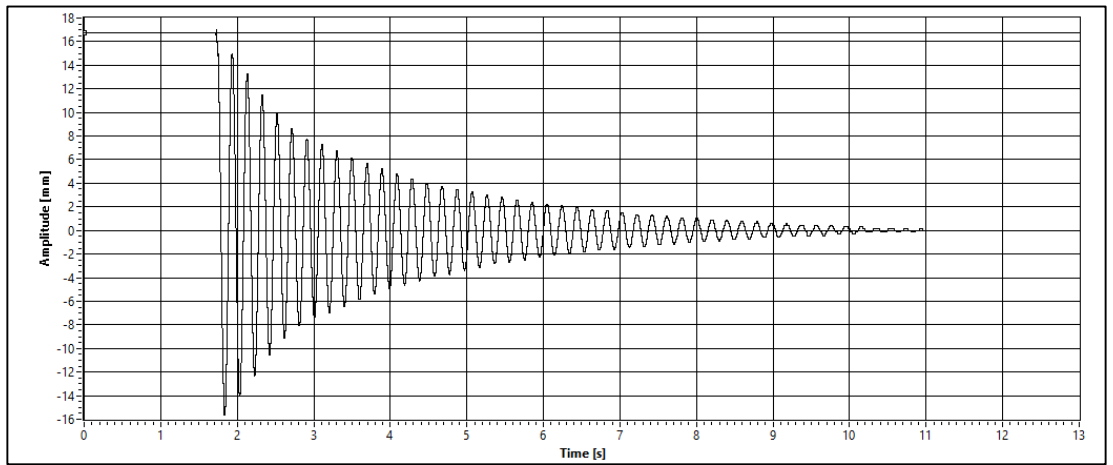
Şekil C.3. Sistemde %5 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



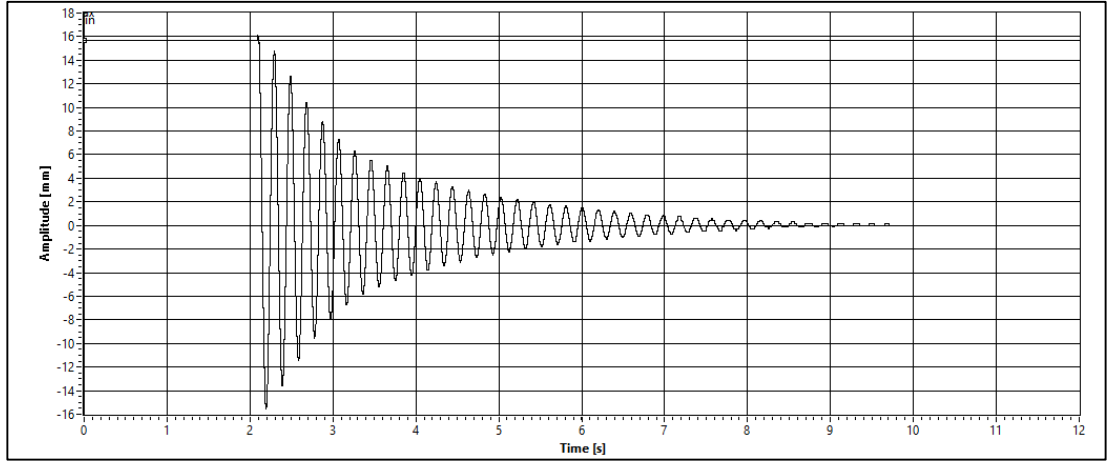
Şekil C.4. Sistemde %5 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



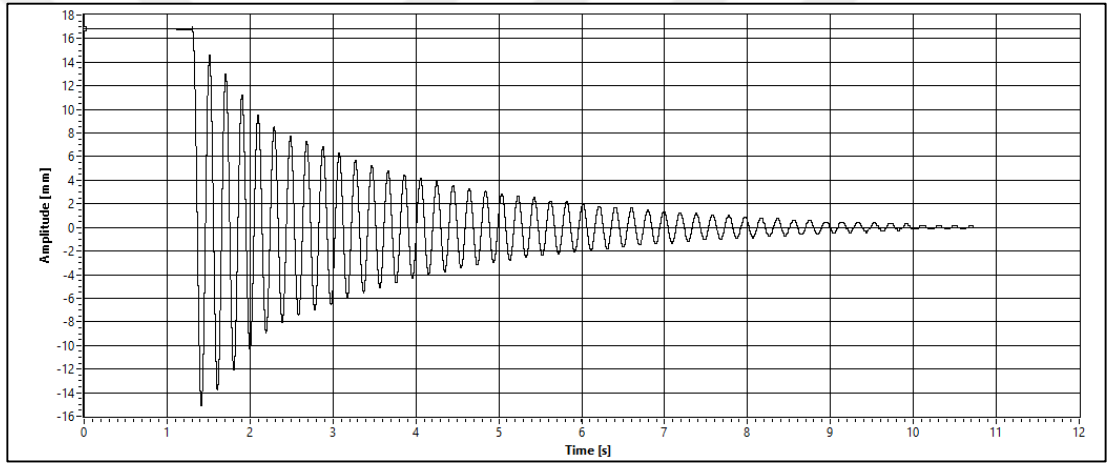
Şekil C.5. Sistemde %10 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



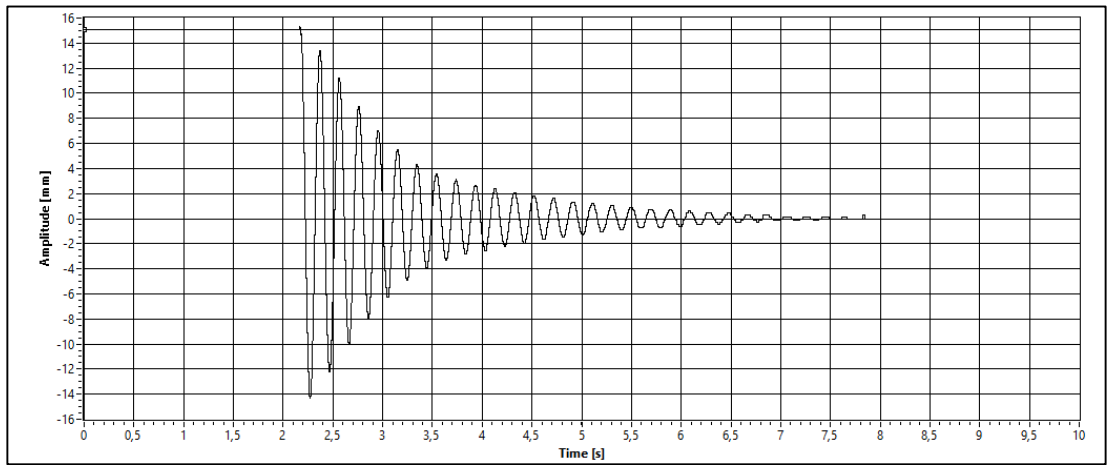
Şekil C.6. Sistemde %10 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



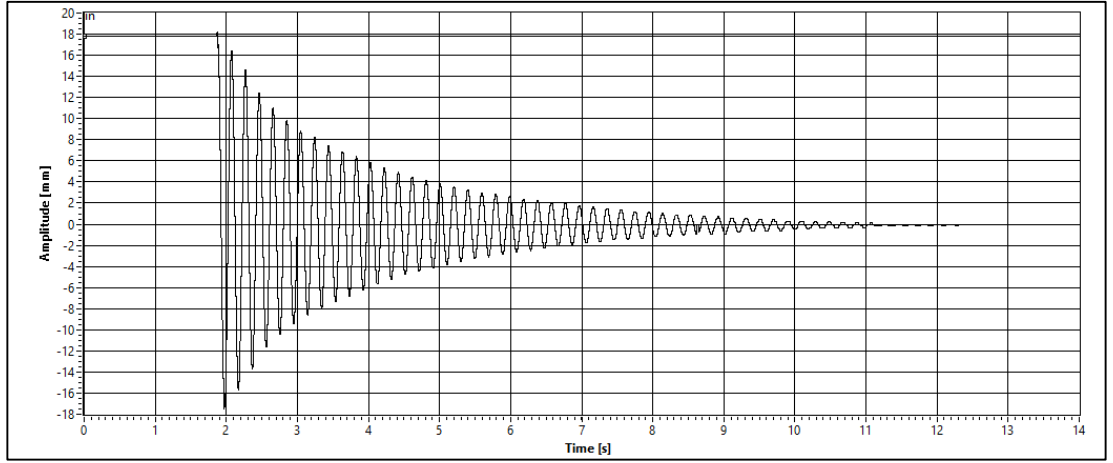
Şekil C.7. Sistemde %20 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



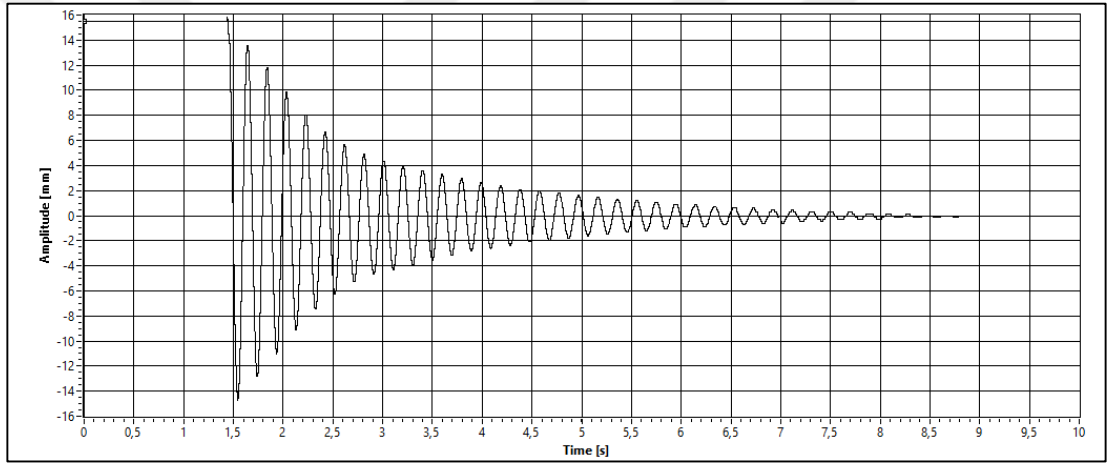
Şekil C.8. Sistemde %20 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik- zaman grafiği



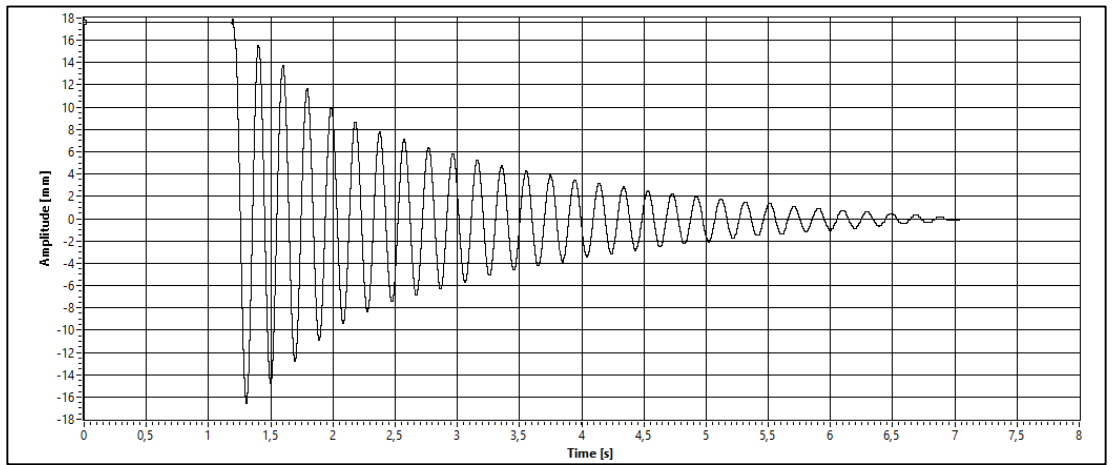
Şekil C.9. Sistemde %30 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



Şekil C.10. Sistemde %30 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



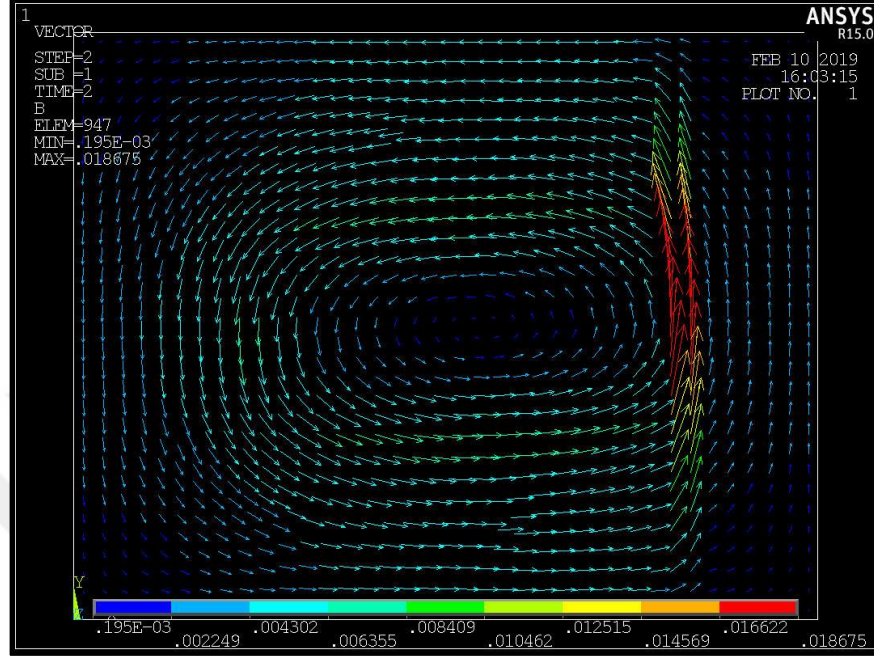
Şekil C.11. Sistemde %40 kaplanmamış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği



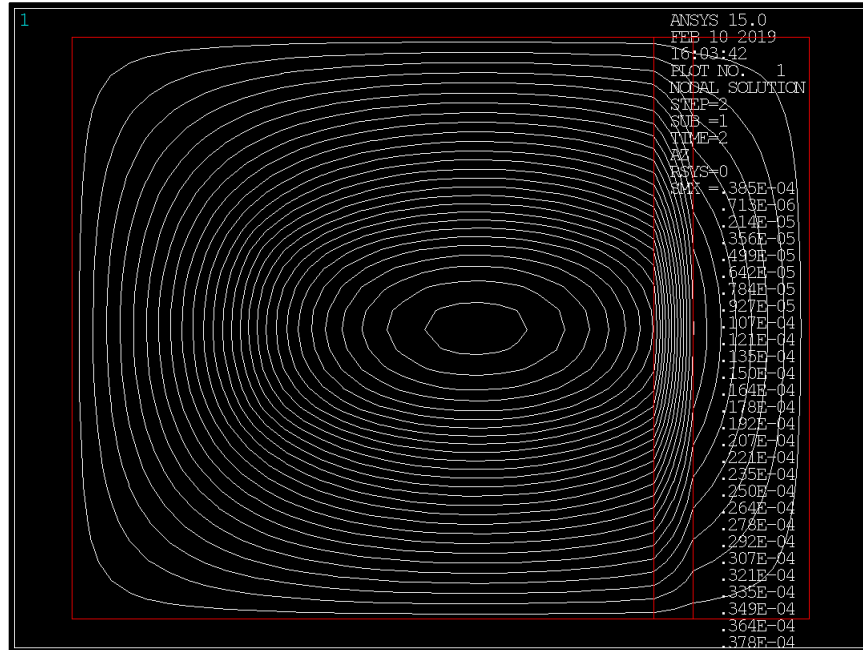
Şekil C.12. Sistemde %40 kaplanmış parçacık takviyeli yağ kullanılarak oluşturulan genlik-zaman grafiği

Ek D.

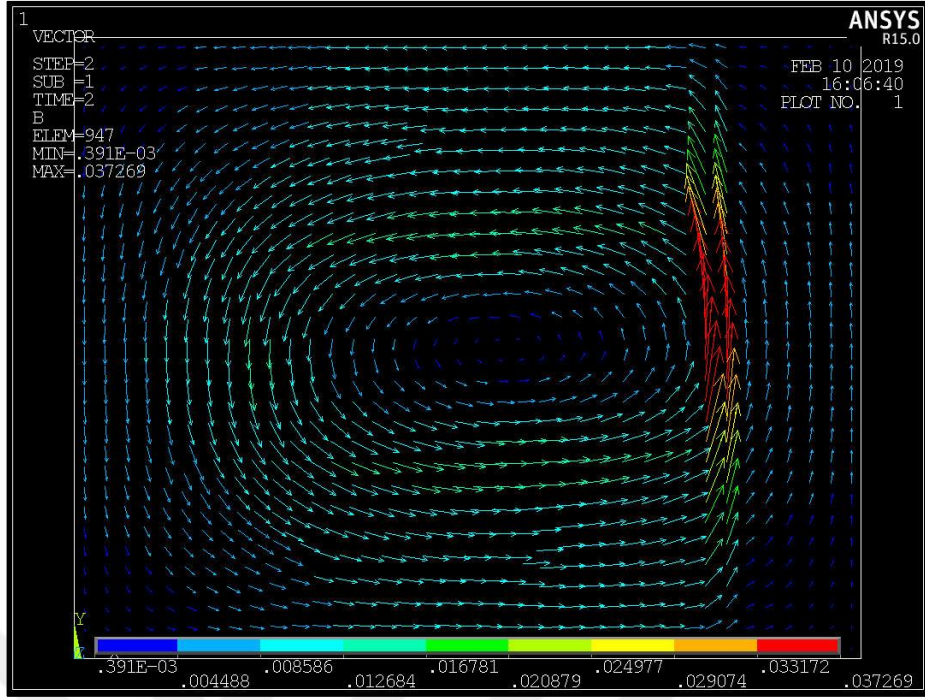
122 EG Sıvısına Yapılan Analiz Sonuçları



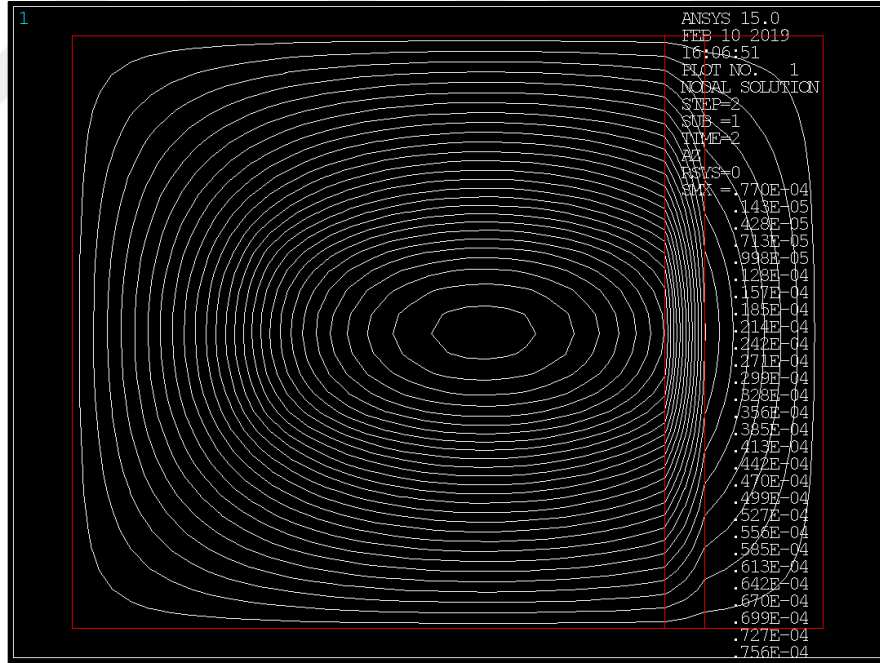
Şekil D.1. 0,5A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



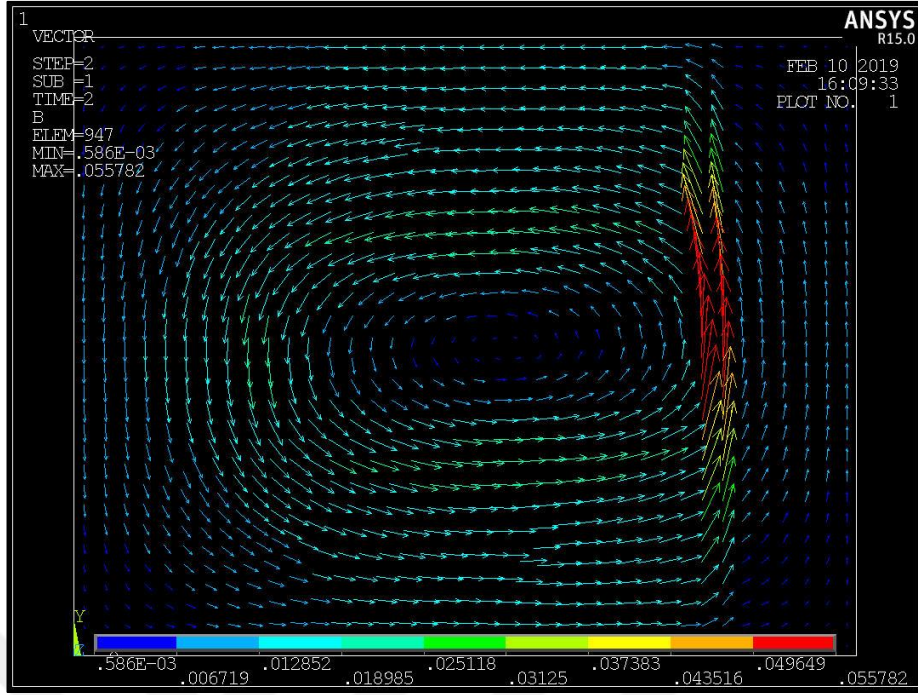
Şekil D.2. 0,5 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



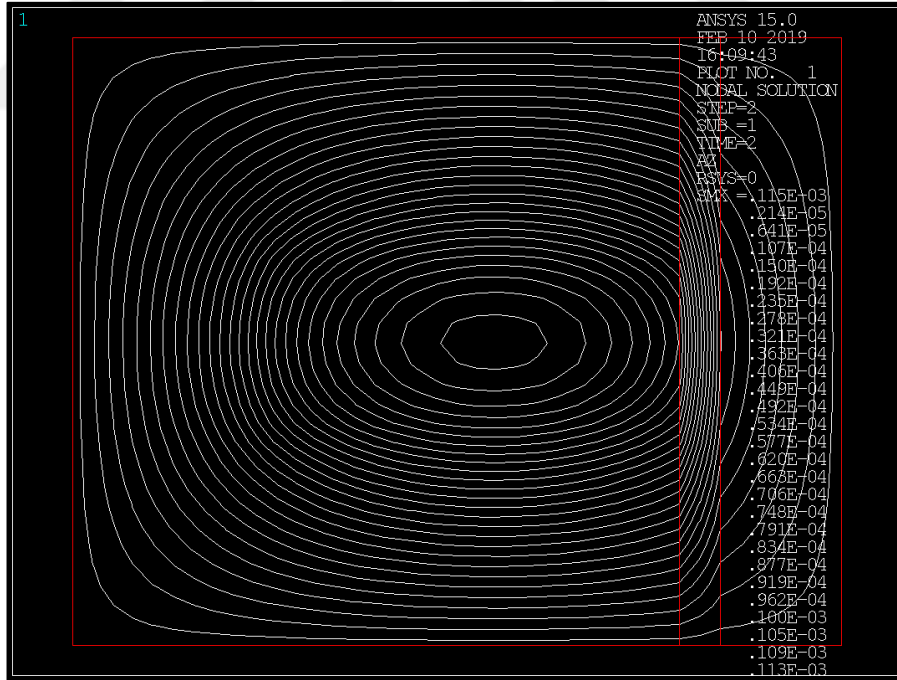
Şekil D.3. 1 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



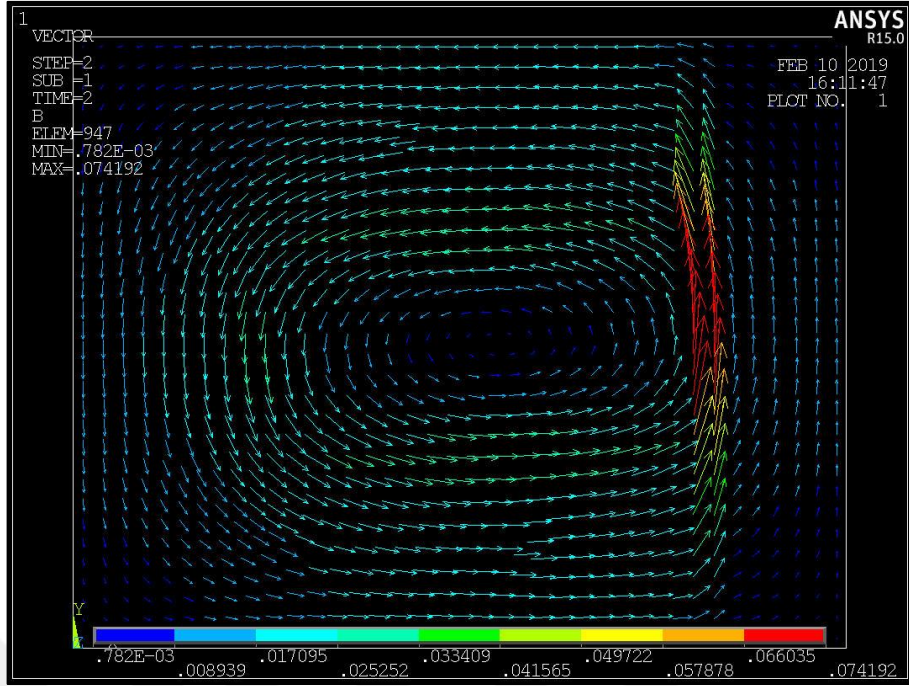
Şekil D.4. 1 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



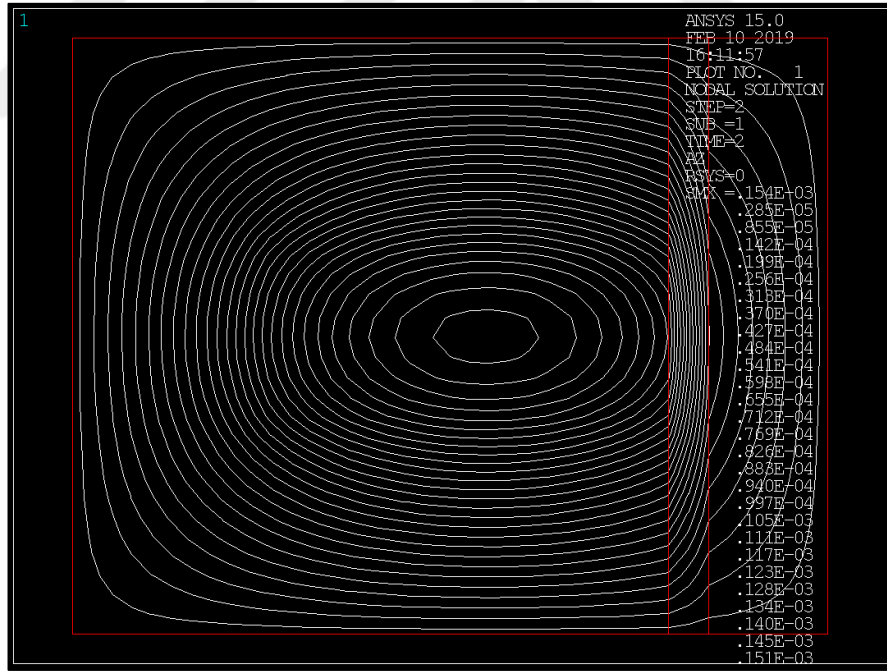
Şekil D.5. 1,5 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



Şekil D.6. 1,5 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



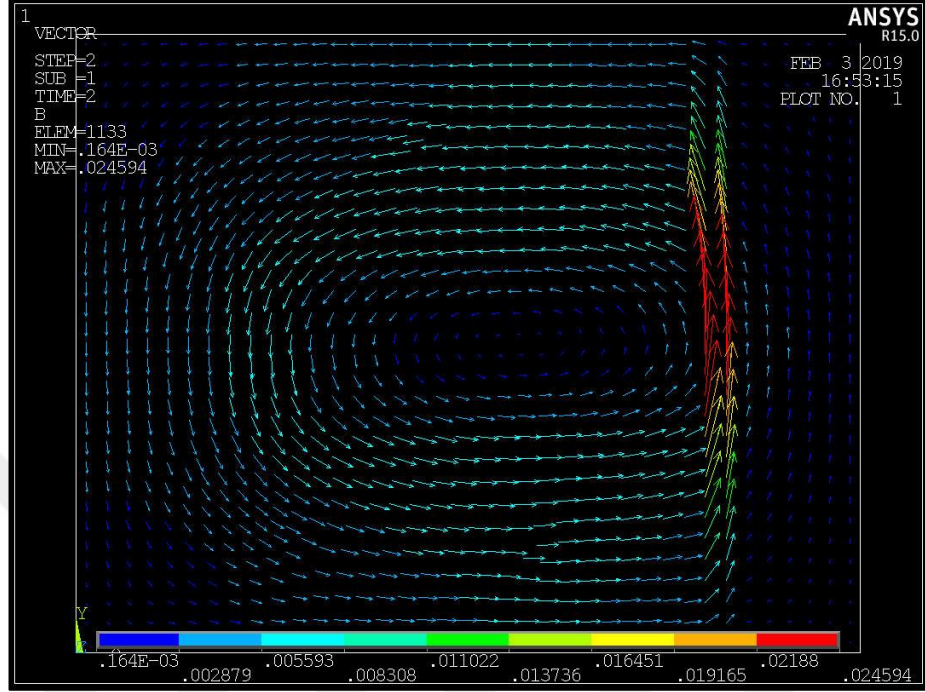
Şekil D.7. 2 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



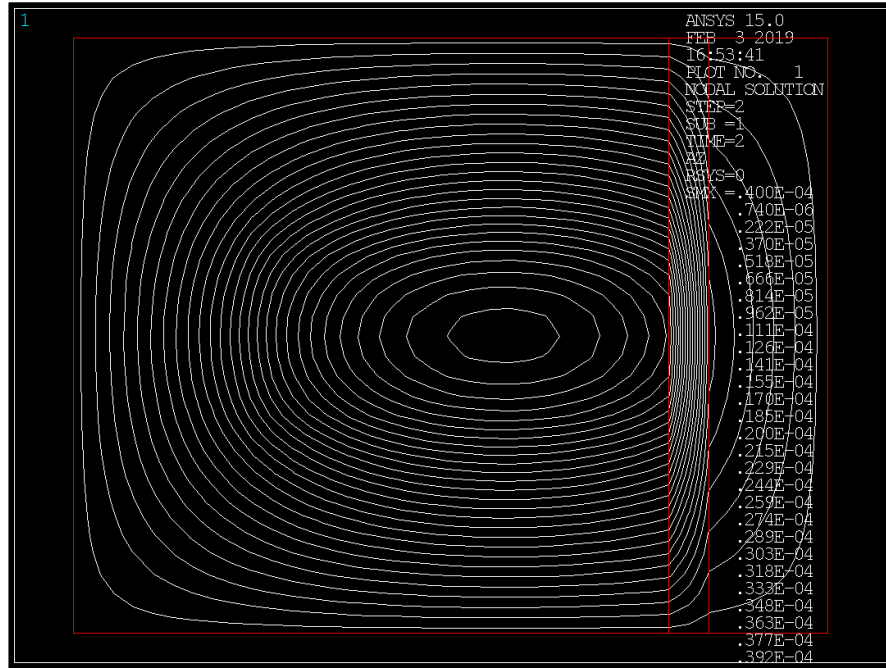
Şekil D.8. 2 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi

Ek E.

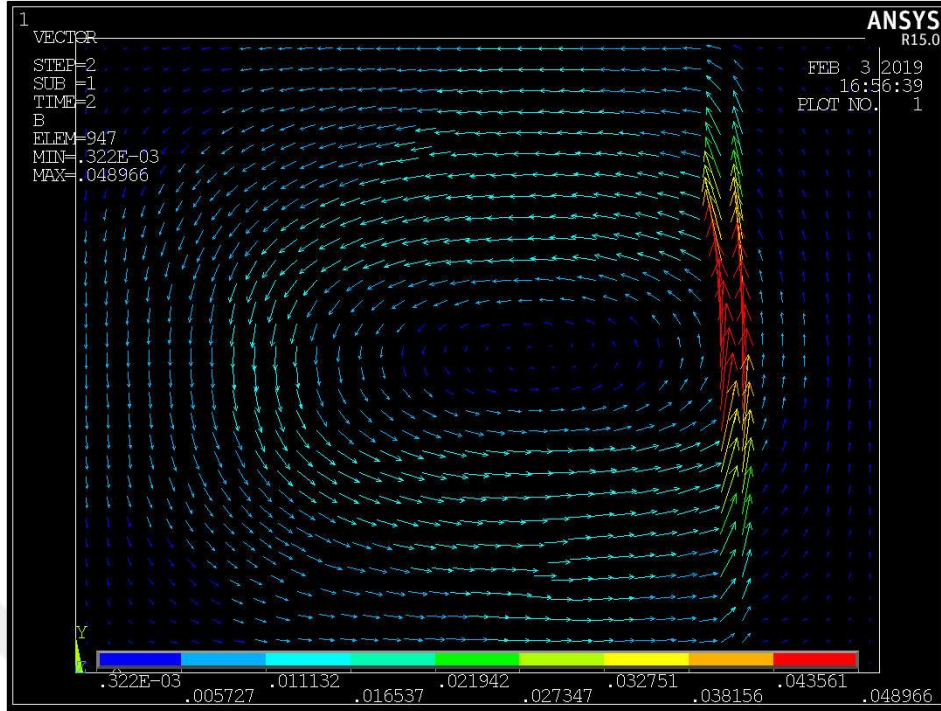
132 DG Sıvısına Yapılan Analiz Sonuçları



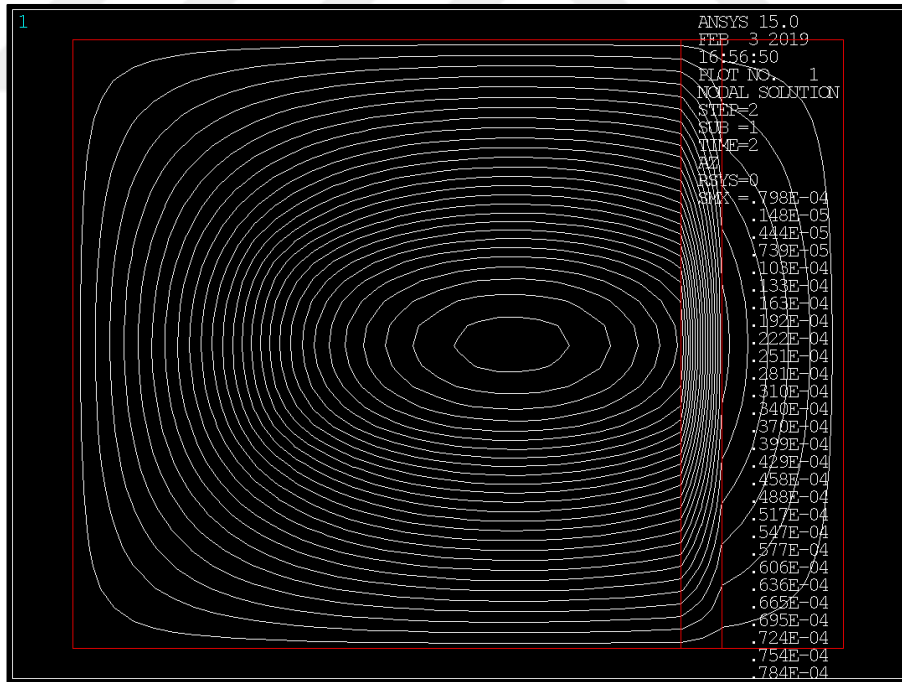
Şekil E.1. 0,5 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



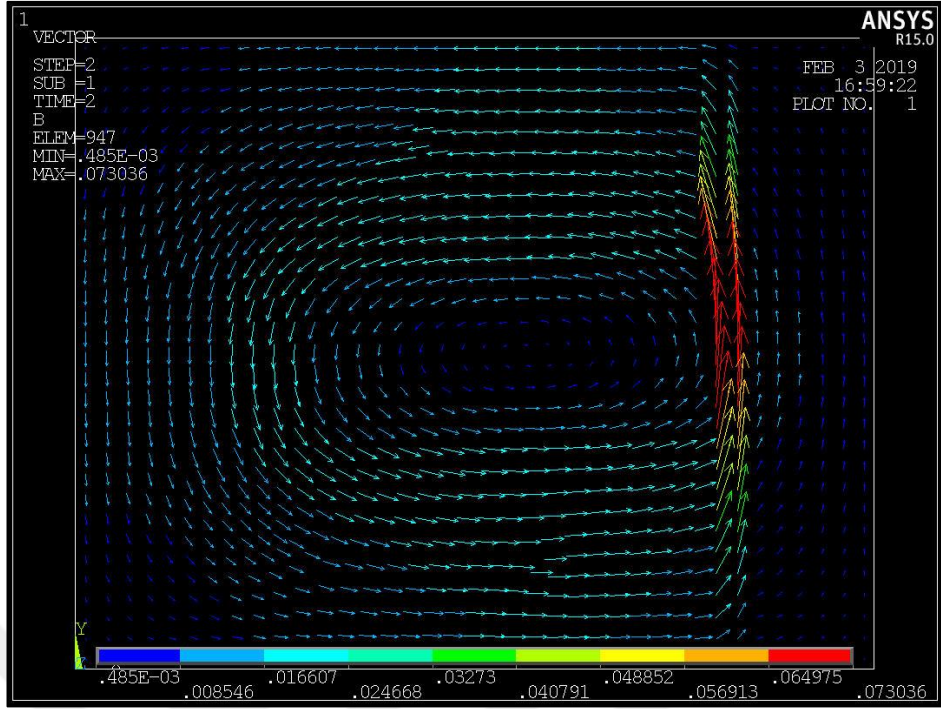
Şekil E.2. 0,5 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



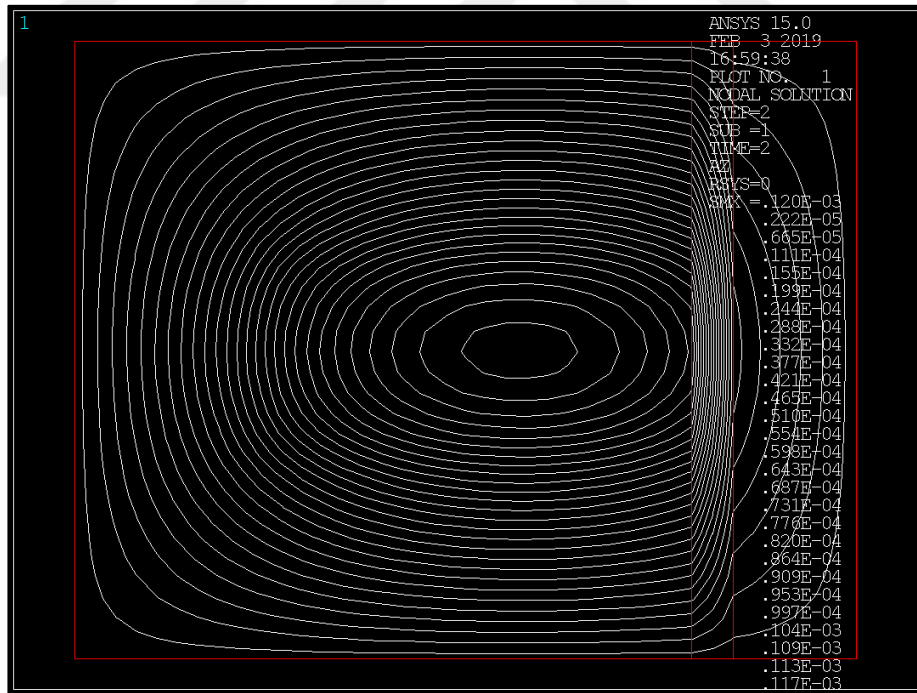
Şekil E.3. 1 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



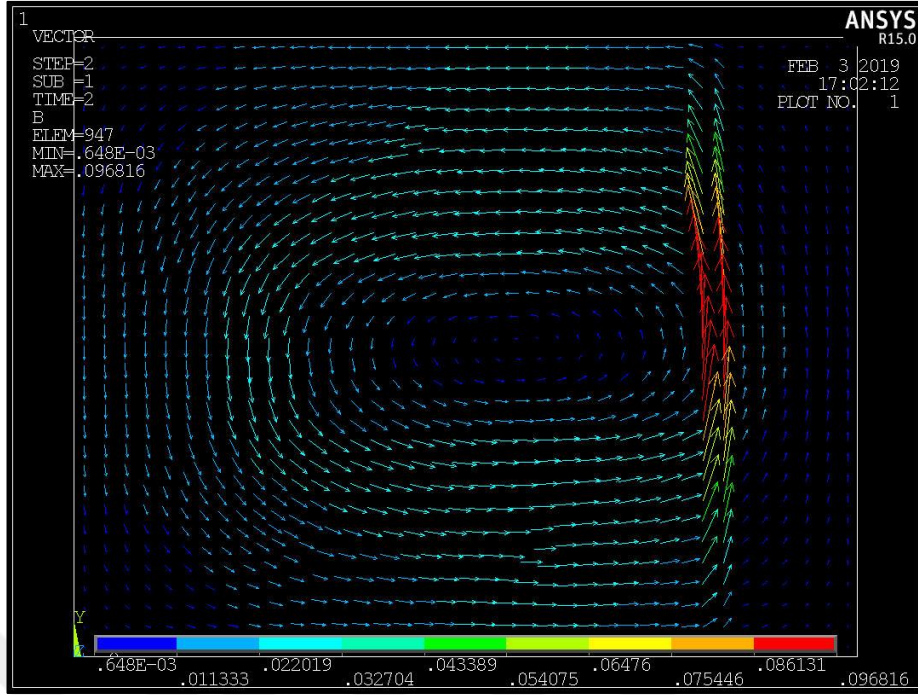
Şekil E.4. 1 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



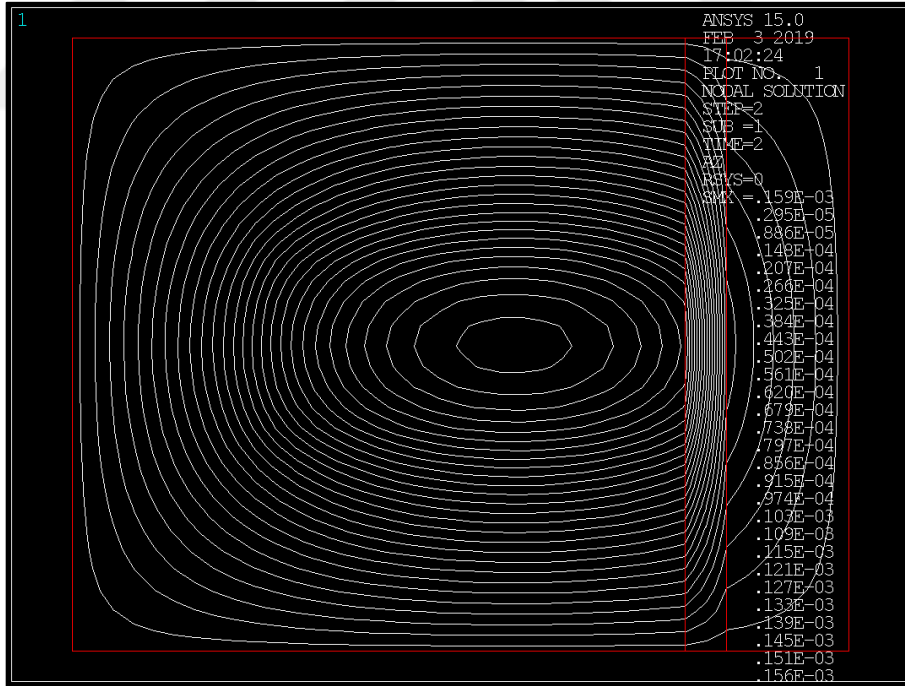
Şekil E.5. 1,5 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



Şekil E.6. 1,5 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



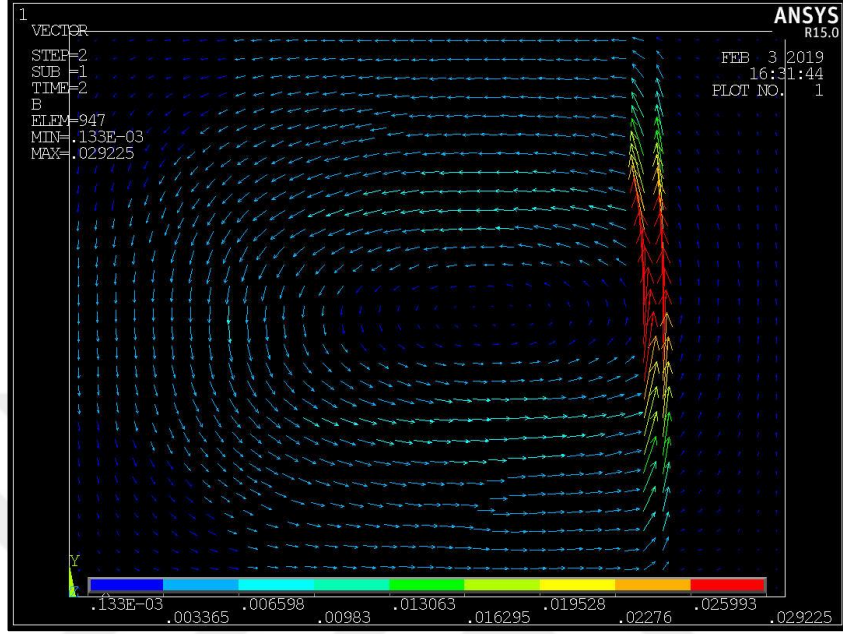
Şekil E.7. 2 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



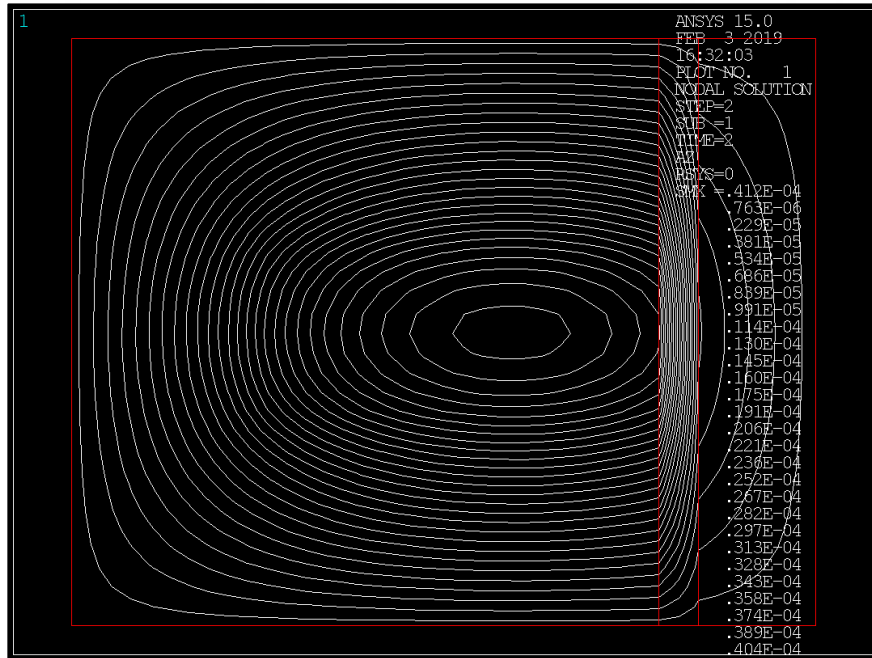
Şekil E.8. 2 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi

Ek F.

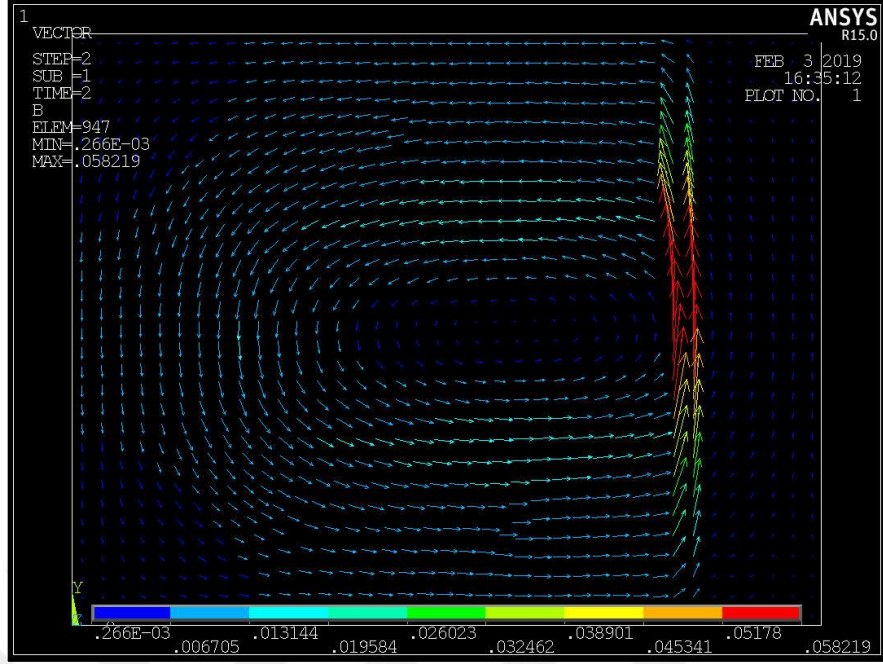
140 CG Sıvısına Yapılan Analiz Sonuçları



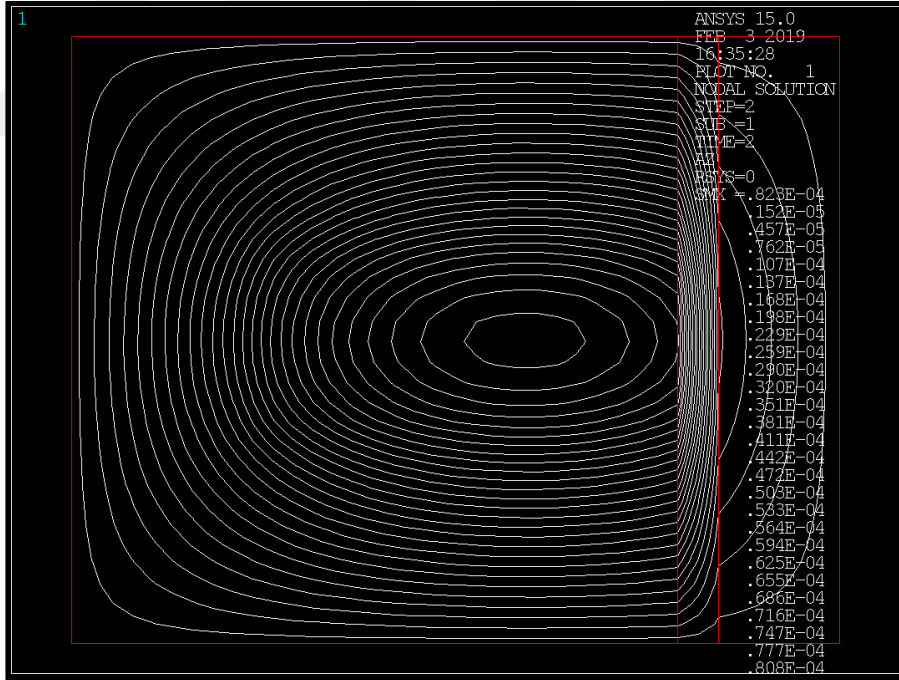
Şekil F.1. 0,5 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



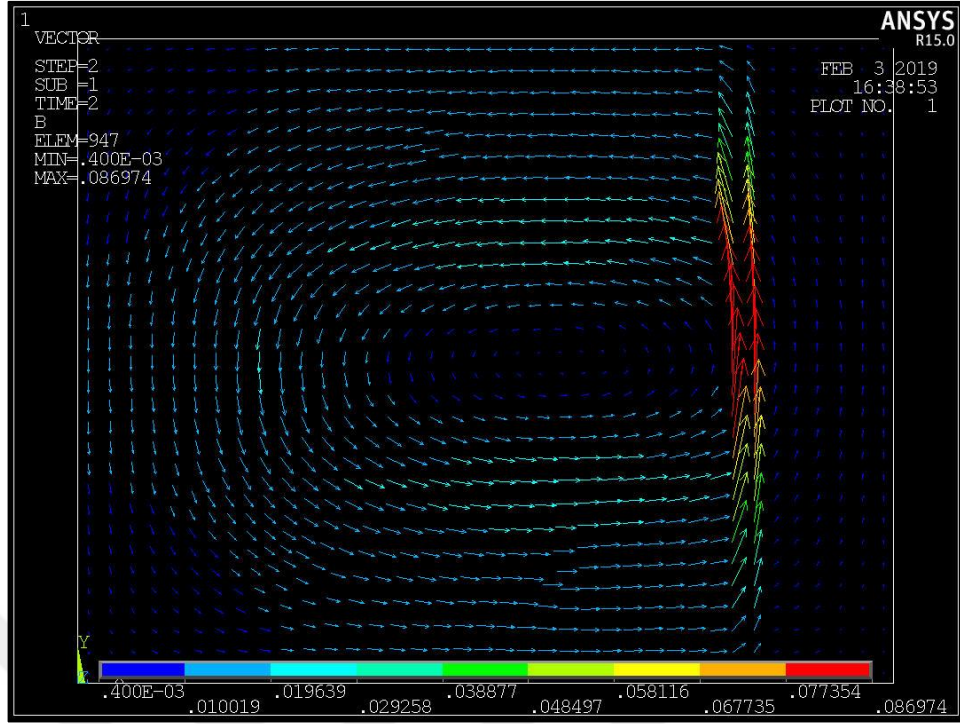
Şekil F.2. 0,5 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



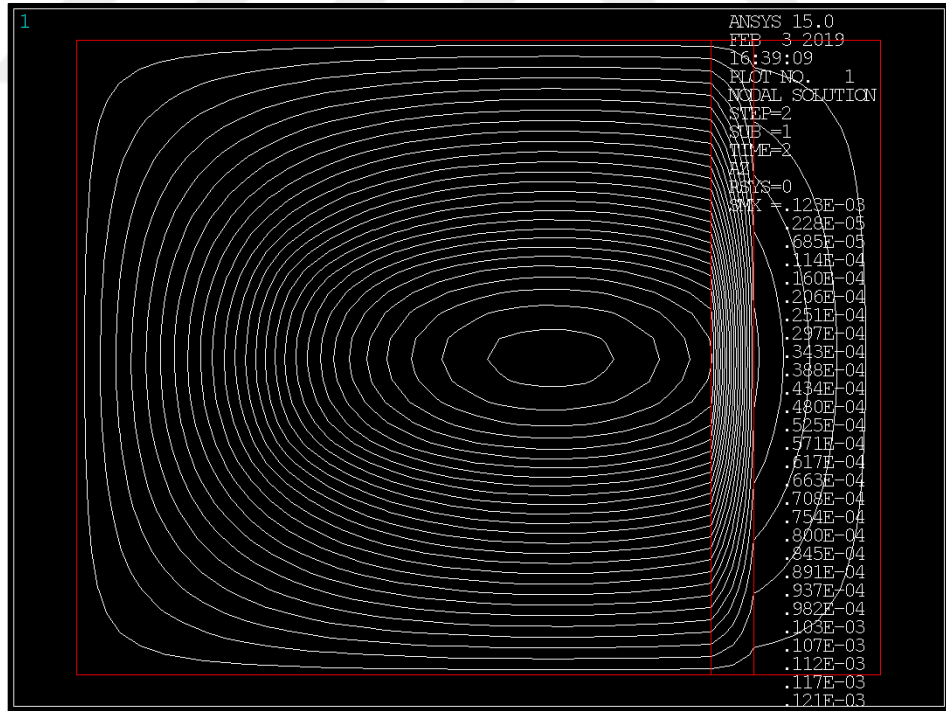
Şekil F.3. 1 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



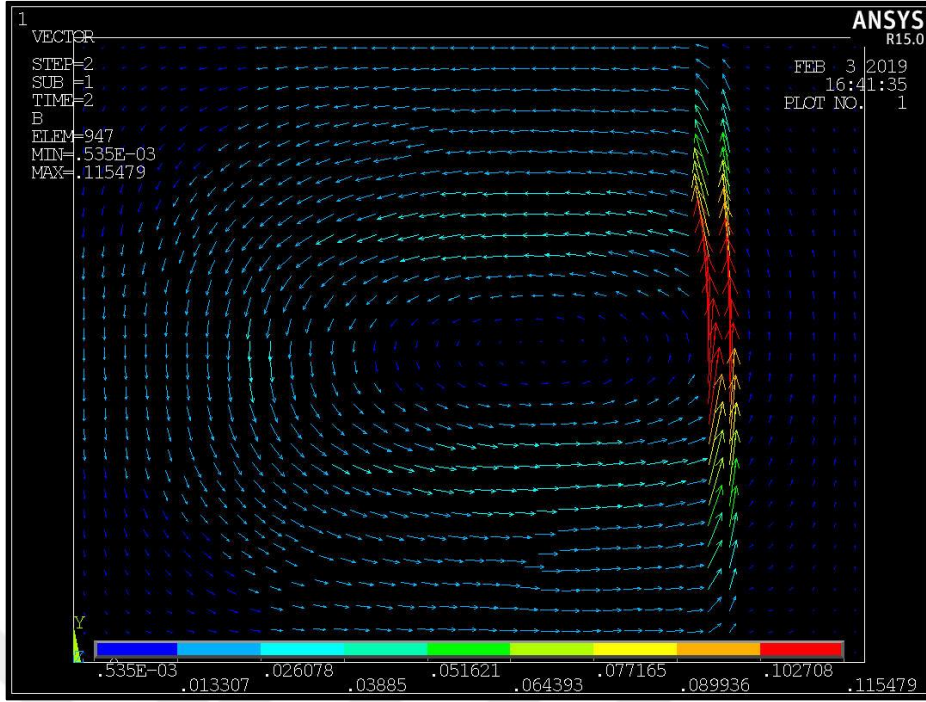
Şekil F.4. 1 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



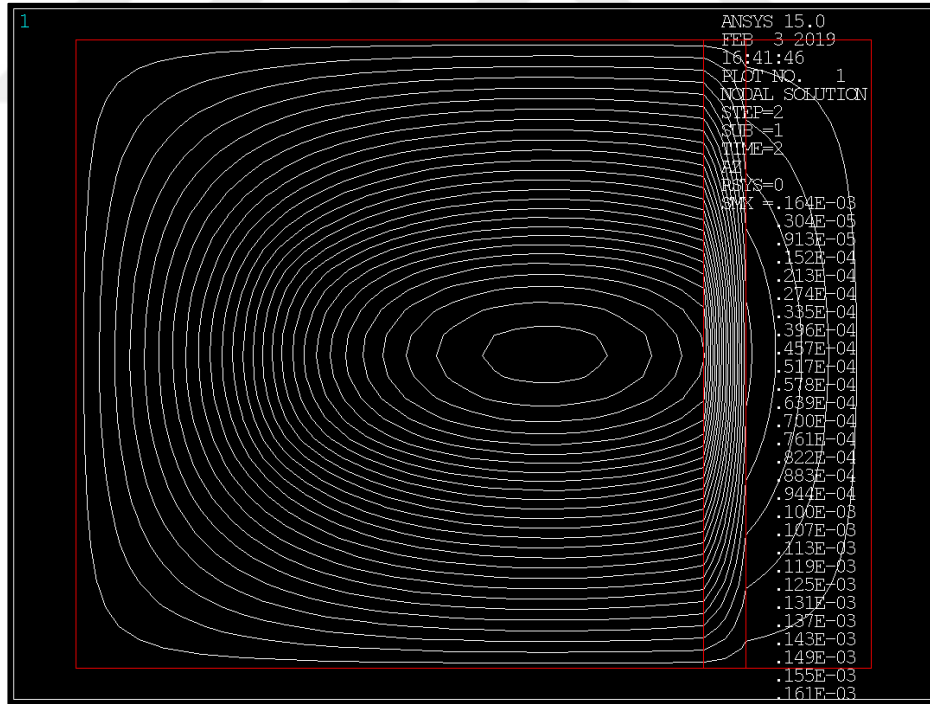
Şekil F.5. 1,5 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



Şekil F.6. 1,5 A A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi



Şekil F.7. 2 A akım değerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi



Şekil F.8. 2 A akım değerinde oluşan manyetik alan çizgilerinin gösterimi

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Olçay E.**, Ertürk A.T., Vatansever F., Karabay S., Design and Analysis of a Magnetorheological Damper, *3rd International Energy & Engineering Congress Proceedings Book*, Gaziantep, Türkiye, 18-19 October 2018.



ÖZGEÇMİŞ

Ercan OLCAY 1991 yılında Kırklareli’nde dünyaya geldi. İlk, orta, lise öğrenimini Kırklareli’nde tamamladıktan sonra 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.

