

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKAN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serhat GÜLER**

Anabilim Dalı : Kimya Mühendisliği

Programı : Kimya Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüsnü ATAÖL

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKAN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serhat GÜLER
(506081020)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. F. Seniha GÜNER (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Manyetoreolojik akışkanlar, titreşimleri sönümleme yeteneğine sahip son yılların en gözde akışkanlarıdır. Manyetik alan altında akış özelliklerinin kontrol edilebilmesi, reolojik özelliklerinin manyetik alan ile tersinir değişebilmesi ve bu değişimlerin milisaniyeler mertebesinde gerçekleşmesi ve yeni kullanım alanları yaratılması ile daha da çekici hale getirmektedir. Ülkemizde ve dünyada MR akışkanlar ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmış olmakla beraber, bu çalışmalar ile birlikte farklı kullanım alanları yaratılmaktadır. Ülkemizde bu konu ile ilgili yeterince çalışma halen bulunmamaktadır.

MR akışkanların laboratuvar ortamında ekonomik olarak üretilmesi ve geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen projede, bir çok MR akışkan sentezlenerek özellikleri incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen, gelecek kariyerimin temelini oluşturan çok saygıdeğer danışmanım ve kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Hüsnü ATAÜL'e, çalışmamın her basamağında katkıda bulunan çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Seniha GÜNER, Sayın Prof. Dr. Birgül TANTEKİN-ERSOLMAZ, ve Sayın Prof. Dr. Ata MUGAN'a teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar ekipmanlarını kullanmama izin veren Sayın Doç. Dr. Ahmet SİRKECİOĞLU'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sevgili dostum, kıymetli arkadaşım Özge GÖNEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmayı 90186 no'lu proje çerçevesinde maddi olarak destekleyen Devlet Planlama Teşkilatı'na ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana destek olan, inanan ve güvenen çok sevdiğim anneme, bana örnek olarak günlere gelmemi sağlayan babama, canım kadar sevdiğim ablama ve saygıdeğer eşine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2010

Serhat Güler
(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BÖLÜM	5
2.1 Manyetoreolojik Akışkanlar	5
2.1.1 Manyetik malzemeler	6
2.1.2 Taşıyıcı faz	9
2.1.3 Katkı maddeleri	10
2.2 Manyetoreolojik Akışkanların Elektoreolojik Akışkan ve Ferro Akışkanlar ile Karşılaştırılması.....	11
2.3 Reoloji	12
2.3.1 Reolojik sınıflandırma	12
2.3.1.1 Newtonian akışkanlar	12
2.3.1.2 Newtonian olmayan akışkanlar	14
2.4 Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özellikleri	16
2.5 Manyetoreolojik Akışkanların Kararlılığı	21
2.6 Manyetoreolojik Akışkanların Uygulama Alanları	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1 Malzeme ve Materyal	27
3.1.1 Manyetik malzeme	27
3.1.2 Yağ	27
3.1.3 Katkı maddeleri	27
3.2 Malzeme ve Maddelerin Karakterizasyonu	28
3.3 Manyetik Taneciklerin Polimer ile Kaplanması	28
3.4 Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi	29
3.5 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özelliklerinin Belirlenmesi	30
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	31
4.1 Demir Taneciklerinin Polimer ile Kaplanması	31
4.2 MR Akışkanların Sentezi	33
4.3 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri	35
4.3.1 Manyetik tanecik çeşidinin reolojik özelliklere etkisi	36
4.3.2 Katkı maddelerinin reolojik özelliklere etkisi	38
4.3.3 Manyetik Tanecik Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi	42
4.3.4 Katkı maddesi oranının reolojik özelliklere etkisi	43

4.4 Manyetoreolojik Akışkanların Manyetoreolojik Özellikleri	45
4.4.1 Manyetik tanecik çeşidinin manyetoreolojik özelliklere etkisi	45
4.4.2 Katkı maddesi çeşidinin manyetoreolojik özelliklere etkisi	47
4.4.3 Manyetik tanecik oranının manyetoreolojik özelliklere etkisi	50
4.4.4 Katkı maddesi oranının manyetoreolojik özelliklere etkisi.....	52
4.5 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özellikleri	53
4.5.1 Manyetik tanecik çeşidinin çökme oranına etkisi	55
4.5.2 Katkı maddesi çeşidinin çökme oranına etkisi.....	57
4.5.3 Manyetik tanecik oranının çökme oranına etkisi.....	59
4.5.4 Katkı maddesi oranının çökme oranına etkisi.....	59
5. VARGILAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

DMF	: Dimetilformamit
ER	: Elektoreolojik
FTIR	: Fourier Transform Infra-Red
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
MR	: Manyetoreolojik
PU	: Poliüretan
rpm	: Revolutions Per Minute
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
PMMA	: Polimetil Metakrilat
COP	: Dairesel Olefin Polimer
PC	: Polikarbonat
DBS	: Dodesil-benzen-sülfonik Asit
ISP	: International Specialty Products
PS	: Polisitren
Oe	: Oersteds
kPa	: Kilopascal
T	: Tesla
Fe	: Demir
Co	: Kobalt
Ni	: Nikel
K	: Kelvin
C	: Karbon
Mn	: Mangan
Zn	: Çinko
V	: Volt
A	: Amper

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : MR akışkanların sentezinde kullanılan manyetik taneciklerin özellikleri	27
Çizelge 3.2 : MR akışkanların sentezinde kullanılan katkı maddelerinin özellikleri	28
Çizelge 4.1 : Hazırlanan MR akışkanların Bileşimlerinin Kütlesek Oranları....	34
Çizelge 4.2 : Ticari Akışkanların özellikleri.....	35

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 :	MR akışkanların manyetik alan altındaki davranışları 6
Şekil 2.2 :	Paralel iki plaka arasındaki akış 13
Şekil 2.3 :	Newtonian olmayan akışkanların akış davranışları 15
Şekil 2.4 :	Manyetoreolojik akışkanlarda uygulanan gerilme modeli 17
Şekil 2.5 :	Kontrol edilebilir akışkanlar için temel çalışma prensipleri 20
Şekil 2.6 :	Manyetik etkileşim enerjisinin, van der Waals etkileşim enerjisinin, sterik itme enerjisinin ve net potansiyel enerjinin, değişik uzunluktaki moleküller (δ) için gösterimi 22
Şekil 2.7 :	Otomobillerde MR akışkan süspansiyonlarının kullanımı 24
Şekil 2.8 :	Binalarda MR damperlerin kullanımı ve Japonya Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi uygulaması 24
Şekil 2.9 :	Köprülerde MR damperlerin kullanımı ve Çin'deki The Dong Ting Lake köprüsü uygulaması 25
Şekil 2.10 :	MR akışkan damperi ile imal edilen protez diz 26
Şekil 2.11 :	MR akışkan damperi ile tasarlanmış çamaşır makinesi 26
Şekil 3.1 :	Manyetik taneciklerin polimer ile kaplanma süreci 29
Şekil 4.1 :	Polimer ile kaplanmış ve kaplanmamış demir taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 31
Şekil 4.2 :	Polimer kaplı demir taneciklerinin FTIR spektrometresindeki analiz sonucu 32
Şekil 4.3 :	Demir taneciklerinin TGA sonuçları 33
Şekil 4.4 :	Manyetik alanın bulunmadığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi 36
Şekil 4.5 :	Manyetik alanın bulunmadığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi 37
Şekil 4.6 :	Manyetik alanın bulunmadığı durumda, katkı maddelerinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi 39
Şekil 4.7 :	Manyetik alanın bulunmadığı durumda, katkı maddelerinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi 39
Şekil 4.8 :	Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda T-4 taneciği ile hazırlanmış akışkanlarda katkı ilavesinin MR akışkanların reolojik özelliklerine etkisi 41
Şekil 4.9 :	Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda manyetik tanecik oranının akışkanların viskozitelerine etkisi 42
Şekil 4.10 :	Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda manyetik tanecik oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi 43
Şekil 4.11 :	Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda katkı oranının akışkanların viskozitelerine etkisi 44
Şekil 4.12 :	Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda katkı oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi 44

Şekil 4.13 :	Manyetik alanın uygulandığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi	46
Şekil 4.14 :	Manyetik alanın uygulandığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	47
Şekil 4.15 :	Manyetik alanın varlığında, katkı maddelerinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi	48
Şekil 4.16 :	Manyetik alanın varlığında, katkı maddelerinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	49
Şekil 4.17 :	Manyetik alan koşullarında, katkı maddelerinin T-4 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların reolojik özelliklerine etkisi ...	49
Şekil 4.18 :	Manyetik alanın varlığında, manyetik tanecik oranlarının akışkanların viskozitelerine etkisi	51
Şekil 4.19 :	Manyetik alanın varlığında, manyetik tanecik oranlarının akışkanların kayma gerilmesine etkisi	51
Şekil 4.20 :	Manyetik alanın varlığında, katkı maddesi oranının akışkanların viskozitelerine etkisi	52
Şekil 4.21 :	Manyetik alanın varlığında, katkı maddesi oranının akışkanların kayma gerilmesine etkisi	53
Şekil 4.22 :	Çökme Oranı Tanımı	54
Şekil 4.23 :	Bazı MR akışkanların çökme oranlarının zamanla değişimi	55
Şekil 4.24 :	Manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların çökme oranına etkisi	56
Şekil 4.25 :	Katkı maddesinin MR akışkanların çökme oranlarına etkisi....	58
Şekil 4.26 :	Polimer kaplı tanecikler ve katkı malzemesi kullanımının MR akışkanların çökmelerine etkisi	58
Şekil 4.27 :	Manyetik tanecik oranının MR akışkanların çökme oranlarına etkisi	59
Şekil 4.28 :	Katkı maddesi oranının MR akışkanların çökme oranlarına etkisi	60
Şekil A.1 :	Polimer kaplama süreci 2	71
Şekil A.2 :	Polimer kaplama süreci 3	71
Şekil B.1 :	T-2 ve T-4 taneciklerinin taneciklerinin SEM-2500X görüntüleri	72
Şekil B.2 :	T-2 ve T-4 taneciklerinin taneciklerinin SEM-5000X görüntüleri	72
Şekil C.1 :	%5 w/w polimer çözeltisi ile kaplama süreci TGA sonucu	73
Şekil C.2 :	%17 w/w polimer çözeltisi ile kaplama süreci TGA sonucu	73
Şekil D.1 :	Kullanılan yağ ile ticari MR akışkan yağlarının FT-IR analiz sonuçları	74
Şekil E.1 :	T5K56035 akışkanının viskozitesinin tekrarlanabilirliği	75
Şekil E.2 :	T5K56035 akışkanının kayma gerilmesinin tekrarlanabilirliği	75
Şekil E.3 :	Katkı çeşidinin T-2 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi	76
Şekil E.4 :	Katkı çeşidinin T-3 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi	76
Şekil E.5 :	Katkı çeşidinin T-5 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi	77
Şekil E.6 :	Katkı çeşidinin T-2 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmesine etkisi	78

Şekil E.7 :	Katkı çeşidinin T-3 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmesine etkisi	78
Şekil E.8 :	Katkı çeşidinin T-5 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmesine etkisi	79
Şekil E.9 :	Manyetik tanecik oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan olmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında)	80
Şekil E.10 :	Manyetik tanecik oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan olmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında)	80
Şekil E.11 :	Katkı maddesi oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan bulunmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında)	81
Şekil E.12 :	Katkı maddesi oranı ile kayma gerilmesi değişimi (manyetik alan bulunmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında)	81
Şekil E.13 :	%10 katkı oranının MR akışkanların viskozitelerine olan etkisi	82
Şekil E.14 :	%10 katkı oranının MR akışkanların kayma gerilmelerine olan etkisi	82
Şekil F.1 :	SiO_2 'nin kendi arasında oluşturduğu ağ yapısı	83
Şekil G.1 :	T5K56035 akışkanının manyetik alan koşullarında viskozitesinin tekrarlanabilirliği	84
Şekil G.2 :	T5K56035 akışkanının manyetik alan koşullarında kayma gerilmesinin tekrarlanabilirliği	84
Şekil G.3 :	Katkı maddesi çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi	85
Şekil G.4 :	Katkı maddesi çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi	85
Şekil G.5 :	Katkı maddesi çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi	86
Şekil G.6 :	Katkı maddesi çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	87
Şekil G.7 :	Katkı maddesi çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	87
Şekil G.8 :	Katkı maddesi çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	88
Şekil G.9 :	Manyetik tanecik oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında)	89
Şekil G.10 :	Manyetik Tanecik oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında)	89
Şekil G.11 :	Katkı maddesi oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında)	90
Şekil G.12 :	Katkı oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında)	90
Şekil G.13 :	Manyetik alan koşullarında, %10 katkı maddesi oranının akışkanların viskozitelerine etkisi	91
Şekil G.14 :	Manyetik alan koşullarında, %10 katkı maddesi oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi	91
Şekil H.1 :	MR akışkanların çökme özelliklerinin tekrarlanabilirliği	92
Şekil H.2 :	Katkı çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi	93
Şekil H.3 :	Katkı çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi	93

Şekil H.4 :	Katkı çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi	94
Şekil H.5 :	%10 katkı oranının MR akışkanların çökmelerine etkisi	95

SEMBOL LİSTESİ

M	: Doygunluk Manyetizasyonu
H	: Manyetik Alan Şiddeti
B	: Manyetik Akı
τ	: Kayma gerilmesi $[\text{N}/\text{m}^2]=[\text{Pa}]$
γ	: Kayma hızı $[\text{1}/\text{s}]$
T	: Sıcaklık $[\text{K}]$
F	: Kuvvet $[\text{N}]$
v	: Hız $[\text{m}/\text{s}]$
A	: Alan $[\text{m}^2]$
μ	: Viskozite $[\text{N.s}/\text{m}^2]=[\text{Pa.s}]$
G	: Elastisite modülü $[\text{Pa}/\text{s}]$
h	: Yükseklik $[\text{cm}]$
ϕ	: Hacim fraksiyonu
τ_y	: Akma gerilmesi $[\text{N}/\text{m}^2]=[\text{Pa}]$
B	: Manyetik akı $[\text{T}]$
Q	: Hacimsel akış hızı $[\text{m}^3/\text{s}]$
t	: Zaman $[\text{s}]$
V	: Hacim $[\text{m}^3]$
R	: Tanecik yarıçapı $[\mu\text{m}]$
P	: Basınç $[\text{Pa}]$

MANYETOREOLOJİK AKIŞKAN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Manyetoreolojik (MR) akışkanlar, manyetik alan uygulandığında reolojik özellikleri milisaniyeler mertebesindeki sürede önemli ölçüde tersinir değişebilen akışkanlardır. Bu özelliklerinden dolayı bir çok uygulama alanı bulmakta ve büyük ilgi çekmektedirler. Bu akışkanların titreşim ve darbelerden kaynaklanan hareketleri mükemmel bir şekilde sönümlene özellikleri vardır. Bu özelliklerinden dolayı, otomobil, uzay ve havacılık, inşaat mühendisliği... gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. Gelecekte, bu uygulama alanlarına robotik uygulamalarının da katılması beklenmektedir.

Bu çalışmada, orijinal ve polimer kaplanmış manyetik özelliğe sahip metal tanecikler kullanılarak MR akışkanlar sentezlenmiştir. Çalışmada, polimer kaplamanın çökme davranışına olan etkisi ve akışkanların manyetik alan olmaksızın ve manyetik alan altındaki reolojik özellikleri incelenecektir. Katkı malzemeleri akışkanlarda çökme özelliklerini engellemek için kullanılmıştır. Çeşitli katkı, katkı oranları, manyetik tanecik ve manyetik tanecik oranları kullanılarak toplam 41 çeşit MR akışkan hazırlanmıştır. Sentezlenen akışkanların manyetik alan varlığında ve yokluğundaki reolojik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar LORD firmasından temin edilen 2 farklı ticari MR akışkan ile kıyaslanmıştır. Manyetik tanecik oranı ve katkı oranının MR akışkanların reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği göstermiştir. Artan manyetik tanecik oranı ve katkı oranı ile akışkan viskozitesinin arttığı gözlemlenmektedir.

Çalışmada MR akışkanların çökme özellikleri belirlenmiştir. Katkı kullanılarak MR akışkanların çökme özellikleri önemli ölçüde engellenmektedir. Manyetik tanecik oranı ve katkı oranı artırılarak akışkanların çökme özelliğinin geliştirmektedir. Ayrıca manyetik tanecikleri polimer ile kaplamak akışkanların çökmelerini yavaşlatmaktadır. Çökme özellikleri ticari akışkanların çökme özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan polimer kaplı manyetik tanecikler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve ısı gravimetrik analiz (TGA) teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

SUMMARY

Magnetorheological (MR) fluids are attractive because of their significantly changeable rheological properties within milliseconds by application of an external magnetic field. Because of their properties, MR fluids are used in various area. Thus, they are excellent in damping the vibration. MR fluids are used in the automotive, aerospace, and civil engineering. They are also expected to be widely used in the area of robotics in the future.

In this study, MR fluid samples will be prepared by using polymer coated and uncoated magnetic particles and the carrier fluid. The effect of polymer coating on sedimentation behavior of magnetic particles and on rheological behaviour in both magnetic field and in the absence of magnetic field will be investigated. Additives are used for prevent the magnetic particles settling. 41 MR fluids are prepared with using various additives, additives ratio, magnetic particles and magnetic particle ratio. The rheological properties in magnetic field and in absence of magnetic field of these fluids are established. The results are compared with 2 diffirent industrial MR fluids which are provided from LORD company. The rhological properties change due to magnetic particle ratio and additive ratio. The viscosity of the MR fluids increase with incresing magnetic particle ratio and additive ratio.

The settling properties of the MR fluids are investigated in this study. Additives improve the fluids settling properties. Additives are used for prevent the magnetic particle settling. The settling properties of the MR fluids are improved by using higher ratio magnetic particle and additive. The polymer coating are also imroved the settling. The settling properties of the synthesised fluids are compared with the settling porperties of the industrial MR fluids.

The polymer coated magnetic particles are characterized by using thermal gravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscope (SEM).

1. GİRİŞ

Manyetoreolojik (MR) akışkanların ilk keşfi Jacob Rainbow tarafından yapılmıştır. Bu çalışmayı daha sonra Winslow'un elektoreolojik (ER) akışkanlar çalışması izlemiştir. 1990'lı yıllara kadar ER akışkanlar hakkında MR akışkanlara göre daha fazla çalışma yapılmıştır. MR akışkanlar kolloid olmayan, yumuşak manyetik taneciklerin organik bir sıvı ya da su ile karıştırılması ile hazırlanmaktadır. Kullanılan katı taneciklerin boyutu, boyut dağılımı, şekli, manyetik doygunluğu ve manyetik alanın giderilmesi (koersivite) özellikleri MR akışkanların hazırlanmasında göz önüne alınması gereken parametrelerdir. Manyetik taneciklerin yanı sıra taşıyıcı faz, kullanılan yüzey aktif maddeler ve aşındırıcı olmayan katkı maddeleri de akışkanın reolojik özelliklerini, kararlılığını ve çökme/tekrar karışma özelliğini etkileyen önemli parametrelerdir.

MR akışkanlar, manyetik özellik taşıyan metal taneciklerin uygun bir taşıyıcı sıvı içerisinde dağıtılmasıyla elde edilmektedirler. Bu akışkanlar, manyetik alana maruz kaldıklarında viskoziteleri çok kısa zamanda önemli artış göstermekte ve adeta "katı" gibi davranmaya başlamaktadırlar. Manyetik alanın kaldırılmasıyla, aynı hızda eski özelliklerini geri kazanmaktadırlar. Bundan dolayı sarsıntıları kısa sürede sönümleyebilme özelliklerine sahiptirler ve önemli uygulama alanları bulmaktadırlar. Bunun yanı sıra, enerji tüketimlerinin düşük olması, uzun ömürlü olmaları, reolojik özelliklerinin manyetik alan ile kontrol edilebilme gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Günümüzde MR akışkanlı damperler otomobillerde ve ağır yük taşıtlarında kullanılmaya başlanmış bulunmaktadır.

Maddeler viskoz, elastik ya da bu iki davranış arasında viskoelastik davranış göstermektedirler. Günümüzde, MR akışkanlar ile ilgili araştırmalar arttıkça, MR akışkanlar ile çalışan cihaz türleri de artmıştır. Farklı tür cihazlarda kullanılan akışkanların reolojik özellikleri de farklı olmalıdır. Bu sebepten sentezlenen MR akışkanın reolojik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. MR akışkanların reolojik özellikleri; manyetik taneciğin boyutuna, şekline, boyut ve şekil dağılımına,

derişimine, yoğunluğuna, taşıyıcı fazın özelliğine, akışkan içerisindeki katkı maddelerine, uygulanan manyetik alana, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır.

MR akışkanların kullanım amacı, mekanik sistemi mümkün olan en kısa sürede kontrol altına alabilmektir. MR akışkanlar, elektronik kontrol ve mekanik sistem arasındaki koordinasyonu sağlar. MR akışkanların kullanıldığı cihazlar temelde “sabit kutuplu cihazlar” ve “birbirine göre hareketli kutuplu cihazlar” olmak üzere iki grupta toplamaktadır. MR akışkanların günümüzde en yaygın kullanım alanı otomobillerdir. Bunun yanında bina ve köprülerde de kullanılmaktadır. Medikal alanda ise MR akışkanın protez eklemlerde kullanılması mümkündür.

Otomobillerde kullanılan pasif süspansiyon sistemleri klasik yay ve damperden oluşmaktadır. Aktif sistemler ise, hidrolik aktüatörler vasıtasıyla yola göre kuvvet kontrolünün sağlandığı süspansiyon sistemlerdir. Bunların yanı sıra, pasif süspansiyon sistemlerinin yalınlığını ve aktif süspansiyon sistemlerinin yüksek performansını bir araya getiren, başka bir ifadeyle, her iki süspansiyon sisteminin özelliklerini taşıyan yarı aktif süspansiyon sistemleride vardır. Bu sistemler yol koşullarına göre yalnızca damper katsayısının değiştirilmesi prensibine dayanırlar. Yarı aktif süspansiyon sistemleri önceleri valf kontrollü damperler ile kullanılmışlardır.

MR damperlerin kullanıldığı çok önemli diğer bir alan inşaat endüstrisidir. Bazı ülkelerde MR damperler, bina, köprü, viyadük gibi sistemleri depreme karşı daha dayanıklı hale getirmek amacıyla kullanılmaktadır. MR damperler binalarda olası deprem ve rüzgar kaynaklı sarsıntıları sönümlendirmek amacı ile kullanılmaktadır. Bir deprem bölgesi olan ülkemizde bu teknolojinin kullanılmaya başlaması hayati önem taşımaktadır.

Bu projede, değişik malzemeler kullanılarak MR akışkanlar sentezlenecek ve değişik çalışma şartlarında bunların reolojik karakterizasyonları yapılarak üretim parametreleri optimize edilecektir. Çalışma 3 kademede gerçekleştirilecektir.

1. Manyetik özellik gösteren parçacıkların seçimi, polimer ile kaplanması ve karakterize edilmesi
2. MR akışkanların çökmelerini yavaşlatan katkı maddelerinin seçimi
3. Hazırlanan MR akışkanların sentezi, karakterizasyonu ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi.

Manyetik özellik taşıyan 4-9 mikron boyutlarında tanecikler uygun bir taşıyıcı akışkan içinde dağıtılacaktır. Süspansiyon hazırlamadan önce organik fazda homojen boyut dağılımının sağlanması için ön işlemler gereklidir. Katı taneciklerin çökmesini önlemek ve kararlı süspansiyonlar hazırlayabilmek için çeşitli katkı maddeleri eklenecek ve/veya tanecikler polimerle kaplanacaktır. Çalışmanın her kademesinde süspansiyonu oluşturan her bir maddenin cinsinin ve miktarının MR akışkanının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılacak ve en iyi şartları sağlayan akışkan(lar) belirlenecektir. İkinci aşamada, MR akışkanlar için özel tasarlanmış bir reometre kullanılarak manyetik alan almaksızın ve manyetik alan altında sentezlenen MR akışkanların reolojik özellikleri ve bu akışkanların çökme performansları belirlenecektir. Bu çalışmalar İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilecektir. Elde edilen sonuçlar, ticari örneklerin test sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

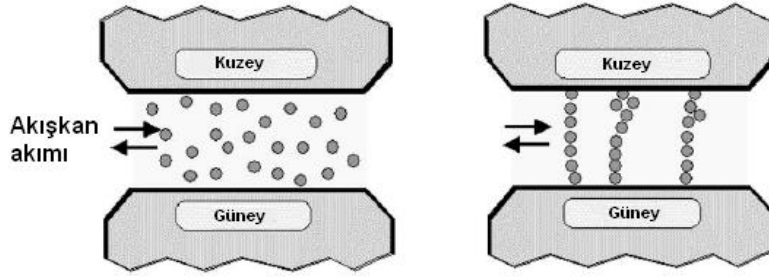
2. TEORİK BÖLÜM

2.1 Manyetoreolojik Akışkanlar

Manyetoreolojik (MR) akışkanlar, silikon yağı veya su gibi bir taşıyıcı ortam içerisinde dağılmış, mikron boyutlarındaki (0,05-10 μ m) yumuşak manyetik taneciklerden oluşurlar. Bu akışkanlar; öncelikle, kullanılan katı tanecik boyutu, boyut dağılımı, tanecik şekli, taşıyıcı faz özellikleri, manyetik doygunluk ve koersivite (manyetik alanın giderilme) özellikleri göz önüne alınarak hazırlanırlar. Bunun yanı sıra, kullanılan yüzey aktif maddeler ve katkı maddeleri de akışkanın özelliklerini etkiler. Taşıyıcı sıvı, genel olarak dağılma ortamı olarak kullanılır ve akışkan içerisindeki taneciklerin homojen bir şekilde dağılmalarını sağlar. Katkı maddeleri ise; akışkanın ve kullanıldığı cihazın ömrünü uzatan, karışımın kararlılığını arttıran ve taneciklerin yüzey korumasını sağlayan korozyon ve oksidasyon önleyen/geciktiren stabilizatörler gibi maddeler ile yüzey aktif maddelerini kapsar. Stabilizatörler, taneciklerin akışkan içerisinde asılı kalmalarını sağlarken; yüzey aktif maddeler ise, manyetik taneciklerin yüzeyine tutunarak uygulanan manyetik alan ile tanecikler arasındaki kutuplaşmayı (polarizasyon) geliştirir. En çok kullanılan MR akışkanlar, karbonil demiri ve silikon yağı kullanılarak hazırlananlardır [1–4].

MR akışkanlar, 1940'ların sonuna doğru Jacob Rabinow tarafından bulunmuş ve reolojik özelliklerinin, manyetik alan uygulaması ile milisaniye mertebesinde tersinir olarak değişebilmesi nedeniyle, “alan ile kontrol edilebilen akışkanlar” olarak sınıflandırılmışlardır. Manyetik alan uygulandığı zaman, MR akışkanlarda MR etki ile sonuçlanan kutuplaşma meydana gelir ve MR etki, doğrudan MR akışkanın mekanik özelliklerini etkiler. Akışkanın viskozitesi, manyetik alan altında milisaniyeler mertebesinde 10^5 - 10^6 kat artar ve sıvı, ideal bir katı gibi davranmaya başlar. MR akışkanların davranışları Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmektedir. MR akışkanının içindeki asılı manyetik tanecikler manyetik alan doğrultusunda manyetize olarak düzgün zincirler oluştururlar. Oluşan bu zincir yapısı, MR akışkanın hareketini kısıtladığından; MR akışkanın akma gerilmesi artar. Tanecikler,

manyetik alan varlığında, belirli bir kritik kayma gerilmesine kadar zincir dizilimlerini korurlar; ancak, bu değer aşıldığında, zincir yapı bozulur ve madde dağılmaya/akmaya başlar. Akışkanların akmaya başladığı bu kayma gerilmesine “akma gerilmesi” de denir. Bu değişim; hızlı ve tersinirdir. Manyetik alan şiddeti ile kontrol edilebilir. MR akışkanların etkinliği, öncelikle akma gerilmesine göre değerlendirilir. Manyetik alanın bulunmadığı durumda ise, MR akışkan içerisindeki tanecikler rastgele dağılmış halde bulunur ve akışkan, Newtonian akışkan gibi davranır.



Şekil 2.1 : MR akışkanların manyetik alan altındaki davranışları.

MR akışkanlara ait yayınlar ve patentler, 1940’ ların sonlarında ve 1950’ lerin başlarında ortaya çıkmıştır. Uygulama tekniklerinin ve verimli akışkanların eksikliklerinden dolayı MR akışkanlara ait az miktarda yayın bulunsa da, son yıllarda MR akışkanlara olan ilgi ve yeni buluşların sayısı oldukça artmıştır. MR akışkanların reolojik özelliklerinin uygulanan manyetik alan ile kontrol edilebilmesi, elektromekanik cihazların kontrollerinde kullanılmasına olanak sağlamıştır [5–6].

2.1.1 Manyetik Malzemeler

MR akışkanlarda, malzemenin manyetik alana bağlı olarak en hızlı biçimde katı hale geçmesi ve manyetikliğini yok etmesi istendiğinden; malzemenin düşük koersivite ve yüksek manyetizasyon özelliklerine sahip olması istenir. Koersivite; maddeye uygulanan manyetik alanın geri döndürülebilirliğine, maddenin göstermiş olduğu direnç [7] olup malzemenin, sert mi yumuşak mı olduğunu belirlemek için kullanılan en önemli kriterdir. Malzeme, 50 Oersteds (Oe)’ den az bir koersiviteye sahip ise, “yumuşak malzeme”; 100 Oe’den büyük bir koersiviteye sahip ise, “sert malzeme” olarak nitelendirilir [8]. Kolayca manyetize ve demanyetize olabilen yumuşak malzemeler, sert malzemelere kıyasla, MR akışkanların reolojik özelliklerinde tersinir bir değişim yaratmak için daha üstün özelliklere sahiptirler [9].

MR akışkan tanecikleri, genelde 0.1 μm ' den büyük ferromanyetik veya paramanyetik taneciklerdir. Manyetik taneciklerin boyutları küçüldükçe, Brownian hareketi çökmeyi ve aglomerasyonu engeller ve zincir yapısını yok eder. Brownian hareketi, akışkan içerisindeki katı taneciklerin rastgele hareketi olup aynı zamanda bu modeli tanımlayan matematiksel modelin de ismidir [10]. Diğer yandan, tanecik boyutunun 10 μm ' yi geçmesi, MR akışkanı çökmeye karşı zayıf kılmasına rağmen; Lemaire [11] tarafından yapılan çalışmada, tanecik boyutundaki artış ile beraber akma gerilmesinin de arttığı gözlenmiştir. Taneciklerin, kabul edilebilir boyutta ve şekil dağılımında seçilebilmesi, MR akışkanlar için en önemli avantajdır [12].

MR akışkanların hazırlanmasında en çok kullanılan malzemeler; polimer kaplı demir nano tanecikleri [13], demir-kobalt alaşımı [14], karbonil demiri ve nikel-çinko alaşımıdır. Yüksek MR performansı için en çok kullanılan manyetik malzemeler, güçlü bir manyetik alan etkisinde 10–100 kPa akma gerilmesine sahip demir esaslı taneciklerden oluşan MR süspansiyonlarıdır. Mikron boyutundaki taneciklerden oluşan MR akışkanlarda karşılaşılan sorunlar, çökme, kekleşme gibi aglomerasyon olaylarıdır. Aglomerasyon dönüşü olmayan bir olaydır. Bu sorunları gidermek ve kararlılığı arttırmak için MR akışkanlara çeşitli katkı maddeleri katılmaktadır [15].

MR akışkanlarda çökme ve MR akışkanların kullanılması sırasında demir taneciklerinden kaynaklanan erozyon ve oksidasyon problemlerini engellemek için, demir taneciklerinin polimer ile kaplaması yoluna gidilmiştir [16]. Bu amaçla, “manyetik taneciklerin polimer ile kaplanması” ve “monomer polimerizasyonu” olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. İkinci yöntem ise daha yaygın bir şekilde kullanılmıştır [17]. Ayrıca, emülsiyon polimerizasyonu [17], dispersiyon polimerizasyonu [18], süspansiyon polimerizasyonu [18], mikroemülsiyon polimerizasyonu [19] gibi polimerizasyon teknikleri de kullanılabilmektedir.

Karbonil demir, düşük koersivite ve yüksek manyetizasyon özelliklerine sahip olması nedeniyle birçok MR akışkanın manyetik fazı olarak kullanılmaktadır. Demir karbonil, demir penta karbonilin ($\text{Fe}(\text{CO})_5$), elektrolitik veya spray atomizasyon yerine kimyasal olarak bozundurulması yoluyla elde edilir. Buna göre; demir pentakarbonil, yüksek değerlikli demirin, yüksek basınç altında, karbon monoksit ile reaksiyona sokulması ile elde edilmektedir [20–21]. Demir pentakarbonil' in mikrodalga plazma sentezi ile 700 °C'da kontrollü olarak bozundurulması yoluyla da karbonil demiri elde edilir. Piroforik oksidasyonu engellemek için, karbonil demiri

sentezlendiği gibi sıvı nitrojen ile beslenmektedir. Bu sayede, kimyasal olarak daha saf ve küre şeklinde bir malzeme elde edilebilmektedir. Metallerde manyetik sertliğe yol açan safsızlıklar, aynı zamanda mekanik sertliğe de yol açtıklarından ve MR akışkanların kullanıldığı cihazlarda tercih edilir. Aşınma meydana gelmesi istenmediğinden malzemenin küresel olması tercih edilir. Yüksek saflıktaki küresel taneciklerin tercih edilmesinin bir diğer nedeni ise, bunların MR akışkan uygulamaları açısından daha uygun olmalarıdır [22–23].

Diğer yumuşak malzemeler arasında yer alan Fe-Co alaşımları (ağırlıkça %50 Fe içeren), ortalama 2.34 T doygunluk manyetizasyonuna sahiptirler. Birçok araştırmacının Fe-Co esaslı akışkanlarda akma gerilmesinin geliştiği yönündeki görüşlerine rağmen; demire göre daha yüksek yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle bu akışkanlarda çökme daha hızlı olmaktadır. Bunun yanı sıra bu malzemeler daha pahalıdır. Bu alaşımların MR akışkanlarda kullanımları tercih edilmemektedir. Carlson yaptığı çalışmalarda [24], Fe-Co alaşımlarının yanı sıra, kütlece 90:10 ile 99:1 arasında değişen Fe-Ni alaşımlarının da aynı şekilde akma gerilmesini arttırdığını kanıtlamıştır.

Suh vça [25], çekirdeği polimerden ve kabuğu manyetik demir oksitten oluşan manyetik tanecikler üretmişlerdir. Bu kompozit malzemeler, demir oksitin polimer yüzeyindeki makro gözeneklere in-sitü tekniği ile çökertilmesi yoluyla sentezlenmiştir. Elde edilen kompozit tanecikler, özkütlelerinin düşük olması nedeniyle, yüksek çökme direnci göstermiştir. Bunun yanı sıra bu tanecikler homojen boyutlarda da üretilabilmektedirler. Bütün bu nedenlerden dolayı, ideal reolojik özelliklere sahiptirler.

Wereley vça'nın [26] yapmış oldukları çalışmada, kimyasal olarak çökeltme ile elde edilen nano boyutlardaki kobalt, manyetik tanecik olarak kullanılmış ve kobalt nanotaneciklerinin akma gerilmesinin, mikron boyutundaki taneciklere sahip MR akışkanların akma gerilmesine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Ramanujan vça [27], Co ve Fe taneciklerini, polimer poli-L-laktik asit kullanarak, basit ve ucuz bir teknik olan çözücü evaporasyonla kaplamış ve mikro-küresel tanecikler hazırlanabilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, taneciklerin manyetik özelliklerinde polimer kaplama sebebiyle düşüş gözlenmiştir. Ding vça [28], Fe₃O₄ taneciklerini sitren ve metakrilik asit kullanarak mikroemülsiyon yolu ile kaplamış ve elde edilen taneciklerin yüksek manyetik duyarlılığa sahip ve korozyon ve

oksidasyona karşı dirençli olduğunu belirlemişlerdir. Lu vça [29], glisidil metakrilat monomeri, polivinil alkol ve lauril alkol karışımı kullanarak, demir oksit taneciklerinden 4.5 µm boyutunda, yüksek doygunluk manyetizasyonuna sahip polimer kaplı tanecikler elde etmişlerdir.

Wu vça [30], ıslak kimyasal metot kullanarak, Co taneciklerini yüzey aktif madde olarak oleik asit kullanarak sentezlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, oleik asit karboksilat olarak Co tanecikleri üzerine tutunmuş ve Co-O bağı oluşturarak Co atomları arasında koordinasyonu sağlamıştır. Co kolloidlerinin kararlılığının arttığı gözlenmiştir.

Vekas vça [31], manyetik tanecikleri, çift kat dodesil-benzen-sülfonik asit (DBS) ile kaplayarak, değişik taşıyıcı sıvılar ile gelişmiş özelliklere sahip MR akışkanlar elde etmiş ve kolloidal kararlılığı arttırmışlardır. Kimata vça [32], demir alkoksitten sentezlenen demir oksitin 573 K'de indirgenmesi ile elde ettikleri γ -Fe₂O₃ manyetik taneciklerin, endüstriyel manyetik taneciklere göre daha yüksek doygunluk manyetizasyonuna sahip olduklarını ve daha yüksek manyetik hassasiyet gösterdiklerini saptamışlardır.

2.1.2 Taşıyıcı Faz

MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan taşıyıcı fazın görevi, kullanılan manyetik tanecikler, stabilizatörlere ve yüzey aktif maddelere akışkanlık kazandırmak ve akışkanın çökme-tekrar dağılma özelliğini kazandırmak ve kararlılığını sağlamaktır. Kullanılan taşıyıcı fazın, kaynama noktası yüksek olmalı; fakat, reaktif ve zehirleyici olmamalıdır. Düşük buhar basıncına sahip taşıyıcı faz ile hazırlanan MR akışkanların kullanıldığı cihazlarda, sızdırma problemi daha az karşılaşılmaktadır. Taşıyıcı faz viskozitesinin sıcaklıkla değişimi, MR akışkanın uygulama sıcaklığını belirleyen en önemli faktördür. MR akışkanın hazırlanmasında çoğunlukla organik sıvılar kullanılmaktadır. Silikon ve hidrokarbon esaslı yağlar en çok kullanılan yağlardır [4].

Vékás vça [33], yaptıkları çalışmalarda taşıyıcı faz olarak polar bileşenler içeren yüksek vakum yağları, polaritesi zayıf sentetik yağlar, parafin yağını, alkolleri, ketonları ve aminleri kullanmışlardır. C₃-C₁₀ alkol esaslı MR akışkanların yüksek manyetik doygunluk ve mükemmel kolloid kararlılığı sağladığı gözlenmiştir.

Kordonsky [34] ise, taşıyıcı faz olarak aromatik alkol karışımları, vinil ester ve kerosen kullanmıştır. Ayrıca, silikon yağının zayıf kayganlaştırıcı özelliği nedeni ile kayganlaştırıcı ve mineral yağ ile karıştırılarak kullanılmasını önermiş ve silikon yağının yüksek sıkıştırılabilirlik özelliği ile sistemin manyetik alan altında cevap süresini arttırdığını gözlemlemiştir.

Weiss [35], doğal yağ, mineral yağı, polifenil eter, dibasik asit esterleri, neopentilpoliol esterleri, fosfat esterleri, sentetik hidrokarbon yağı, silikon yağı ve bunların karışımını kullanarak MR akışkanın maksimum akma gerilmesini ve kullanıldıkları cihazlardaki çıkış gücünü arttırmıştır.

2.1.3 Katkı Maddeleri

MR akışkanın tasarımında göz önünde bulunan temel parametrelerden biri de çökme kararlılığıdır. MR akışkanlar, düşük yoğunluktaki taşıyıcı faz içinde daha yüksek yoğunluktaki manyetik taneciklerin dağıtılması yoluyla meydana gelirler. Depolama veya hareketsizlik sırasında, MR akışkandaki manyetik tanecikler çökerek tabanda sert bir kekleşme oluştururlar. Bu olaydan sonra, taneciklerin sıvı içerisinde yeniden dağılmaları oldukça zordur. Manyetik tanecikler çöktüklerinde aralarındaki mesafeleri azalmakta ve kalan çok az miktardaki manyetizasyon bile onların aglomerasyonuna neden olmaktadır. Bundan dolayı, katkı maddelerinin çoğunun görevi, taşıyıcı faza tiksotropik veya plastik özellik kazandırarak taneciklerin çökmesini ve aglomerasyonunu engellemektir. Diğer bazı katkı maddeleri ise, MR akışkanın aşınma direncini düşürerek, manyetik malzemelerin kimyasal çözünme ve korozyon özelliklerini geliştirirler [36–37].

López-López vça [38], MR akışkanlarda çökme ve yeniden dağılma özellikleri için oleik asitin, alüminyum stearatın ve silika nanotaneciklerinin etkilerini incelemişlerdir. Oleik asit ve alüminyum stearat eklenmesi, taneciklerin çökmesini engelleyememiş; fakat, yeniden dağılma özelliklerini geliştirmiştir. Silika nanotanecikleri ise, çökmeyi engellemiş; ancak, kayma–çökme ardından tekrar dağılma özelliğini zorlaştırmıştır.

Nano boyutlardaki silika veya polimer gibi diğer katkılar, tanecik yüzeyini kaplar veya tiksotropik ağ yaratırlar [39]. Carlson [40], tiksotropik ağ yaratan su gibi bazı düşük molekül ağırlığına sahip hidrojen bağlı moleküller ve diğer hidroksil, karbonil veya amin işlevselliğini içeren moleküller kullanarak çökme özelliğini azaltmıştır.

Carlson [41] ayrıca, MR akışkanların çökme özelliğini, viskozitede büyük bir artış yaratmadan, azaltmak ve MR akışkanların performanslarını arttırmak için boya veya pigmentler, kayganlaştırıcılar, pH değiştiriciler, korozyon önleyiciler, yüzey aktif maddeler ve dağıtıcılar kullanmıştır. Borrduz [42] ise, MR akışkanlarda dağıtıcı olarak siyah karbon kullanmıştır. Podszun [43], MR akışkanlardaki manyetik tanecikleri polimer ile kaplayarak, aşındırıcılığı düşürmüş ve çökmeye karşı olan kararlılığı arttırmıştır.

2.2 Manyetoreolojik Akışkanların Elektoreolojik Akışkan ve Ferro Akışkanlar ile Karşılaştırılması

Elektoreolojik akışkanlar (ER), elektriksel alan uygulandığında, viskozitesinde değişimler gözlenebilen akışkanlardır. ER akışkanlar, yalıtkan bir yağ içerisinde 0.1-100 μm tanecik boyutuna sahip polarize olabilen taneciklerin dağıtılması ile elde edilmektedirler. Bu tanecikler; mısır nişastası, silika, baryum nitrat ya da yarı iletken malzemeler olabilirler. Elektoreolojik etki yaratmak için, silika gibi taneciklere, suyun taneciklerin üzerinde tutunmasını sağlayan polielektrolitler ilave edilmektedir. Elektriksel alan uygulandığında; bu tanecikler, elektrodlar arasında zincirsel bir yapı oluşturmakta ve ER akışkanın reolojik özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenmektedir [3, 44].

MR akışkanlar, ER akışkanların manyetik benzeridir. Her iki akışkan da, birkaç mikron boyutlarındaki polarize olabilen taneciklerin bir sıvı içinde dağılması ile elde edilir ve şok emiciler, damperler, valfler ile fren sistemleri gibi sistemlerde kullanılırlar [45–46]. MR akışkanlar, ER akışkanlara göre daha yüksek akma gerilmesine sahiptirler (MR akışkanlar için 100 kPa, ER akışkanlar için 3 kPa). MR akışkanlar, düşük voltaj (12 V) elektromanyetik bobin ile aktif hale gelebilirken; ER akışkanlar, yüksek voltaj (5000 V) güç kaynağı ile aktif hale gelebilirler. MR akışkanlar, geniş sıcaklık aralıklarında daha kararlı ve ER akışkanlara göre safsızlıklara daha az duyarlıdır [39].

Ferro akışkanlar, ER ve MR akışkanların aksine, nano boyutlardaki manyetik taneciklerin, yüzey aktif maddeler yardımı ile çeşitli taşıyıcı sıvılar içerisinde kararlı dağılımı yoluyla elde edilirler. Bu tanecikler; Demir oksit, Mn, Zn ferritler ve Co gibi maddelerden yapılmaktadır [47–48]. Ferro akışkanlar, manyetik alan altında Brownian hareketlerinin etkisiyle, viskozitelerinde artış gösterirler; fakat, akışkan

içerisindeki taneciklerde akma gerilmesi göstermezler [45]. Ferro akışkanlar, sıvı mıknatıs gibi davranarak, MR akışkanlardan ayırt edilebilirler [39]. Ayrıca, ferro akışkanlar, kolloid manyetik taneciklerle hazırlandığı için, MR akışkanlara göre daha kararlıdır. Ferro akışkanlar, döner sızdırmazlık sistemlerinde, vakum geçiş besleyicilerinde, manyetik yataklarda ve motor damperlerinde kullanılmaktadırlar [48–50].

2.3 Reoloji

Reoloji, 60 yıl önce ortaya çıkan, doğal bilimlerin bağımsız bir dalıdır. Reoloji terimi ilk olarak, Easton Lafayette Koleji’nde Profesör Bingham tarafından bulunmuştur. Reoloji, Yunanca “akma” anlamına gelen “*rheo*” kökünden gelir. Reolojinin temeli, iyi bilinen malzemelerin normal olmayan davranışlar sergilemesine dayanır. Reoloji için bir takım tanımlamalar bulunmaktadır [51–52]:

1. Reoloji, yapısı değişen gerçek bir malzeme ile ilgilenen doğal bir bilim dalıdır.
2. Reoloji, maddelerde kayma gerilmesi sonucu meydana gelen deformasyonu inceleyen bilim dalıdır.
3. Reoloji, bir malzemenin bir güç etkisinde ve sonrasında nasıl deforme olduğu ile ilgilenen bir bilim dalıdır.
4. Reoloji, gerçek taşıyıcı ortamların davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır.

Reoloji tanımlamaları içinde geçen “deformasyon” kelimesi, “uzatma, sıkıştırma, kayma gibi kuvvetler uygulanması sonucunda, malzemenin şeklinde meydana gelen değişiklik”; “davranış” kelimesi ise, “sonlu bir kütle için, kütleyle etkiyen kuvvet ile kütlenin şekil değiştirmesi arasındaki ilişki” anlamlarında kullanılmıştır.

2.3.1 Reolojik Sınıflandırma

Newtonian ve Newtonian olmayan akışkan olmak üzere iki tür akışkan vardır.

2.3.1.1 Newtonian Akışkanlar

Newtonian akışkanlarda;

- Kayma viskozitesi, kayma gerilmesi ile değişmez.

- Viskozite, kayma zamanından bağımsız ve sabittir. Kayma durduğunda, akışkan içerisindeki gerilme sıfır değerine düşer.
- Değişik deformasyon koşullarında ölçülen viskoziteler arasında, daima bir oran bulunur.
- Basit kayma akışı ile oluşan gerilme, sadece kayma gerilmesidir. İki normal gerilme farkı sıfıra eşittir.

Newtonian akışkanlar, yukarıdaki maddelere tamamen uyan ideal akışkanlardır [52]. Newton ilk olarak, sıvı akışkanın tank içinde dönen bir silindire gösterdiği direnç üzerine yoğunlaşmış ve bu düşüncesi “Genel Sıvı Tipi Akışkan Formülü” türeten Stoke’s tarafından daha doğru bir biçime çevrilmiştir. Bu türetilen formüle, “Newton–Stoke’s Eşitliği” denmektedir. Newton–Stoke’s Eşitliği’nin iki boyuttaki biçimi, (2.1) no’lu eşitlikte gösterilmiş olup denklemdeki “ τ ” kayma gerilmesi, “ $\dot{\gamma}$ ” deformasyon hızı ve “ μ ” orantı sabiti olan viskozitedir [51].

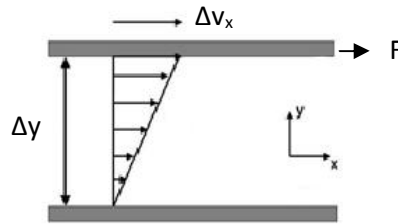
$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Sıvılarda viskozite sıcaklık arttıkça düşmektedir. Sıvılar sıkıştırılmaz kabul edildikleri için basınçtan etkilenmezler [53].

Newtonian akışkanlarda viskozite (η) ile sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius Bağıntısı ile ilişkilendirilmiştir. (2.2) no’lu eşitlikle ifade edilen bu bağtıda, A ve B akışkanlara ait birer katsayılarıdır [52].

$$\eta = Ae^{B/T} \quad (2.2)$$

Newton’un viskozite fikri, Şekil 2.2 ile daha nicel olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.2 : Paralel iki plaka arasındaki akış.

Sonsuz boyutlardaki plakaların arasında akışkan bulunmaktadır. Üst plakanın, sabit bir F kuvveti uygulanarak sabit bir hız (Δv_x) ile taban plakaya paralel olarak çekildiğini farz edelim. Paralel iki plaka arasındaki uzaklığın Δy olduğunu ve sıvının her bir tabakasının x doğrultusunda hareket ettiğini düşünelim. Sıvının her bir tabakasının hızı sabit olan plakaya yaklaştıkça düşmektedir ve iki plaka arasındaki hız profili doğrusaldır. Birçok akışkan için deneysel olarak uygulanan kuvvetin (F , N), hız (Δv_x , m/s) ve plakaların alanı (A , m²) ile doğru orantılı; iki plaka arasındaki uzaklık (Δy , m) ile ters orantılı olduğu bulunmuştur. Bu yaklaşım, Akışın laminar olduğu koşullarda, Newton'un Viskozite Kanunu olarak ifade edilir. Bu kanun formül olarak eşitlik 2.3'te gösterilmektedir.

$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{\Delta v_x}{\Delta y} \quad (2.3)$$

Eğer iki plaka arasındaki uzaklık sıfıra yaklaştırılır ise, türev şeklindeki (2.4) no'lu denklem elde edilir. Bu denklemde, akışkana birim alan başına uygulanan kuvvet ($\tau_{yx}=F/A$), “kayma gerilmesi (N/m²)” olarak tanımlanır.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2.4)$$

Viskozite, akışkanlarda akmaya karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Katılarda ise, bu tanıma denk gelen orantı sabiti “elastisite modülü (G)” katı malzemenin sertliği ile ilgilidir [53]. Eşitlik 2.5'te elastisite modülü denklemi verilmiştir.

$$G = \tau / \gamma \quad (2.5)$$

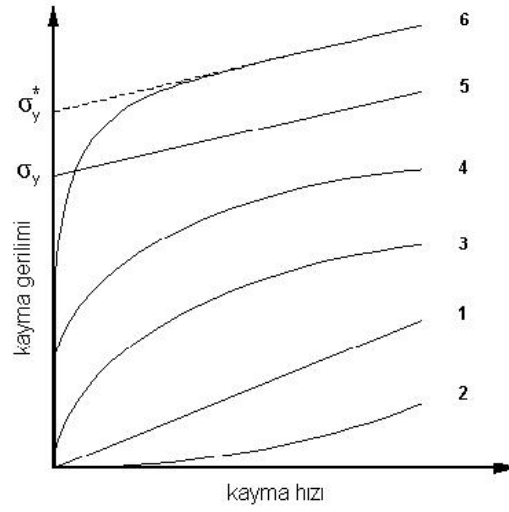
Denklemdeki “ τ ” kayma gerilmesi, “ $\dot{\gamma}$ ” deformasyon hızıdır.

2.3.1.2 Newtonian Olmayan Akışkanlar

Newton-Stoke's Kuralı'na uymayan veya Newtonian akışkanlar için verilen dört maddeden herhangi birine uymayan akışkanlar, “Newtonian olmayan akışkanlar” olarak tanımlanırlar. Newtonian olmayan akışkanlar, kayma gerilmesi/kayma hızı davranışlarına göre zamana bağımlı olan veya olmayan akışkanlar olmak üzere iki

temel sınıfa ayrılırlar. Zamana bağımlı olan akışkanlar; tiksotropik akışkanlar ve reopektik akışkanlar iken; zamana bağımlı olmayan akışkanlar ise, Bingham plastikler, sahte plastikler ve dilatantlardır. Tiksotropi; akışkanın viskozitesinin, kayma gerilmesi altında kademeli olarak azalmasına ve gerilme kaldırıldığında, kademeli olarak tekrar eski haline dönmesine denir [51–53].

Akışkan davranışlarına göre kayma hızı–kayma gerilmesi eğrileri Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Newtonian olmayan akışkanların akış davranışları (1. Newtonian akışkanlar, 2. Dilatantlar, 3–4. Sahte plastikler, 5. Bingham plastik davranışı gösteren akışkanlar, 6. İdeal olmayan Bingham plastik davranışı gösteren akışkanlar).

- 1. Newtonian Akışkanlar:** Su, benzen, gliserol, zeytin yağı, silikon yağları bu gruba girerler.
- 2. Dilatantlar:** Kayma kalınlaşması (*shear thickening*) davranışı gösterirler. Mısır unu–şeker çözeltileri, su–nişasta, potasyum silikat ve yüksek konsantrasyonlardaki pudra–su çözeltileri bu grupta yer alırlar. Bu akışkanlarda, sahte plastiklerin aksine, kayma hızı arttıkça görünür viskozite değeri de artar.
- 3. Sahte Plastikler:** Kayma incelmesi (*shear thinning*) davranışı gösterirler. Polimer çözeltileri veya eriyikleri, nişasta süspansiyonları, mayonez, biyolojik akışkanlar ve boyalar bu grupta yer alırlar. Bu akışkanların görünür viskozite değerleri, artan kayma hızı ile azalır.

4. **Akışkanın Akması için Belirli Bir Akma Gerilmesine İhtiyaç Duyan Sahte Plastikler.** Sahte plastiklerden farklı olarak akışkanın akması için bir başlangıç gerilmesi (akma gerilmesi) gereklidir.
5. **Bingham Plastik Akışkanlar (İdeal):** Newtonian akışkanlarda görülen doğrusal ilişkiye sahiptirler. Ancak, Newtonian akışkanlardan farklı olarak akışkanın akması için bir başlangıç gerilmesi (akma gerilmesi) gereklidir. Bu nedenle; doğrusal çizgi, orijinden geçmez. Margarin, çikolata karışımları, sabun ve diş macunu bu akışkanlara örnektir.
6. **Bingham Plastik Akışkanlar (İdeal olmayan):** Akışkan viskozitesi, akma gerilmesinden sonra sabit bir değere ulaşana kadar düşer [53].

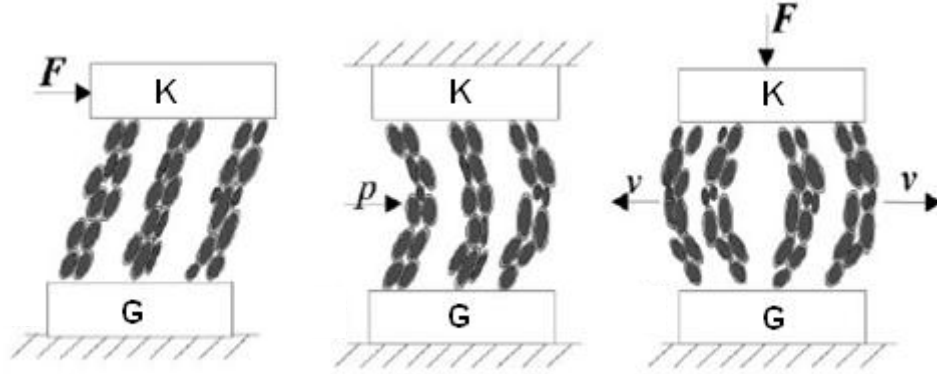
2.4 Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özellikleri

Kontrol edilebilir akışkanların reolojik özellikleri; taneciklerin yoğunluğuna, konsantrasyonları ile boyut ve şekil dağılımlarına, taşıyıcı akışkanın özelliklerine, katkı maddelerine, uygulanan alana, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır. Manyetik alan etkisi olmadığında; akışkanın viskozitesi çoğunlukla, taşıyıcı akışkanın, katkı maddelerinin ve kullanılan taneciklerin miktarına bağlıdır ve kullanılan katkı maddelerine bağlı olarak birçok MR akışkan, kayma boyunca reolojik olarak sahte plastik özelliği gösterir. Tüm MR akışkanların reolojik özellikleri kullanılacakları alana göre formülize edilir [54].

MR akışkanların görünür viskoziteleri, uygulanan alan ile milisaniyeler mertebesinde (10^5 - 10^6 kat) tersinir olarak değişir. MR akışkanlarda tanecikler, manyetik alan sayesinde bir arada durur ve oluşan tanecik zincirleri belirli bir seviyeye kadar kayma gerilmesine karşı direnç gösterir. Bu da, onların katı gibi davranmalarını sağlar. Kayma gerilmesi, kritik değeri aştığında ise; yapı kırılır ve akışkan akmaya başlar [55].

Manyetik tanecikler, manyetik alan altında dağılmış olarak bulunurlar; ancak, manyetik bir alan uygulandığında, manyetik tanecikler zincir şeklini alırlar. Bu davranışa “manyetoreolojik etki” denir. Eğer bir dış güç veya basınç uygulanırsa, zincir yapı deformasyona uğrar, Şekil 2.4. Uygulanan dış güç, bir kayma etkisi olduğunda zincir yapı, tabakaların yer değiştirmesine karşı direnç gösterir; uygulanan dış güç, akmaya neden olan bir basınç etkisi olduğunda zincir yapı, deformasyona

uğrar ve uygulanan basınca karşı direnç gösterir. Uygulanan dış güç, bir sıkıştırma etkisi olduğunda ise zincir yapı, akışkanın akmasına karşı koyar [56].



Şekil 2.4 : Manyetoreolojik akışkanlarda uygulanan gerilme modeli.

MR akışkanların manyetoreolojik tepkisi, uygulanan manyetik alan ile sıvı içinde asılı tanecikler arasındaki mıknatıslanmanın iletimi ile gerçekleşir. Bu iletim sonucunda dipoller, taneciklerin uygulanan alan doğrultusunda ve birbirlerine paralel zincir yapı oluşturmalarını sağlar. Oluşan zincir ağ yapısı, akışkanın hareketini kısmen engellediğinden; süspansiyonun viskoz özelliği artar. Uygulanan alanın şiddeti ile akışkanın akması için gereken mekanik enerji de artar.

Manyetik alan etkisi bulunmadığında; MR akışkan, Newtonian akışkan davranışı gösterir. Uygulanan gerilme ile akışkanın reolojik özellikleri değiştiğinden; kontrol edilebilir akışkanların davranışı genelde, değişen akma gerilmesine sahip olan Bingham Plastik Modeli ile ifade edilir. Bu modelde kayma gerilmesi, aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\tau = \tau_y + \mu_0 \gamma \quad \tau \geq \tau_y \quad (2.6)$$

Bu denklem, kayma gerilmesinin, akma gerilmesinden büyük olduğu durumlarda kullanılmakta olup “ τ_y ”, manyetik alan şiddetine bağlı akma gerilmesini; “ μ_0 ”, görünür viskoziteyi; “ γ ” ise, incelen bölgedeki deformasyon hızını gösterir.

Kayma gerilmesinin, akma gerilmesinden küçük olduğu durumlarda ise; (2.7) no’lu denklem geçerlidir. Burada, “ G ”, malzemenin elastisite modülünü ifade eder [54].

$$\tau = G\gamma \quad \tau \leq \tau_y \quad (2.7)$$

Akma gerilmesi, MR akışkanların viskoelastik özelliklerini belirlemede anahtar parametredir. MR akışkan, uygulanan manyetik alan arttıkça kolon tipi zincirlerin oluşması nedeniyle, zayıf viskoelastik katı halini alır ve bunun sonucunda, malzemenin reolojik özellikleri değişir. Zincir tip yapının bozulması için gereken enerji, uygulanan alan arttıkça artar. Bundan dolayı; akma gerilmesi, uygulanan alana bağlıdır.

ER akışkanlar için düşük manyetik alanlarda kullanılan birçok model MR akışkanlar için de geçerlidir. Ancak, yüksek manyetik alanlarda, doğrusallıktan sapması ve parçacıkların manyetik doygunluğa ulaşması sebebiyle, ER akışkanlarda kullanılan lineer modeller, MR akışkanlar için artık geçerli değildir [57–58].

Ginder vça. [57], statik akma gerilmesini, küresel taneciklerin sonsuz lineer zincirinin kayma doğrultusundaki gerilme bileşeni ile modellenen “maksimum kayma gerilmesi” ni tanımlamışlardır. Akma gerilmesini, çok küçük manyetik alanlarda ortalama manyetik akı yoğunluğunun karesi (B_{ave}^2) ile ve manyetik alan arttıkça $B_{ave}^{3/2}$ ile orantılı olarak bulmuşlardır. Ayrıca, manyetik doygunluğun rolü ihmal edildiğinde, MR akışkanın akma gerilmesi, manyetik alan şiddeti karesi (H_0^2) ile orantılı olarak belirlenmiştir.

Çok küçük manyetik alanlarda manyetik doygunluk, kutuplarda ve taneciklerin birleşim bölgelerinde gözlenmeye başlar. Orta seviye manyetik alanda ise, bu bölgesel doygunluk maksimuma ulaşır ve akma gerilmesi, aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\tau_y = \sqrt{6}\phi\mu_0 M_s^{1/2} H^{3/2} \quad (2.8)$$

Burada, H = uygulanan manyetik alanı; M_s = doygunluk manyetizasyonunu; ϕ = manyetik taneciklerin hacim fraksiyonunu ifade eder.

Alan yeterince yüksek olduğunda, tam doygunluğa ulaşılır ve dipollerin etkisi ele alınabilir. Bu noktada, akma gerilmesi uygulanan manyetik alandan (H) bağımsız hale gelir ve yüksek manyetik alan rejimindeki akma gerilmesi aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\tau_y^{sat} = \frac{4}{5^{5/2}} \xi \phi \mu_0 M_s^2 \quad (2.9)$$

Bu denklemde, $\xi = 1.212$, bir sabittir [57].

Ginder vça [57], orta ve yüksek manyetik alan için elastisite modülü (G) ile ilgili birer analitik yaklaşımda bulunmuşlardır. Buna göre; orta ve yüksek seviyede manyetik alanlar için elastisite modülleri aşağıdaki denklemlerle tanımlanmışlardır.

Orta seviyede elastisite modeli;

$$G \propto \phi \mu_0 M_s H_0 \quad (2.10)$$

Yüksek seviyede elastisite modeli;

$$G^{sat} = \frac{\xi}{4} \phi \mu_0 M_s^2 \quad (2.11)$$

Burada, H_0 = uygulanan manyetik alan; μ_0 = manyetik geçirgenlik; ϕ = manyetik fazın hacim fraksiyonu; $\xi = 1.02$, bir sabittir [57].

Kullanılan birçok MR akışkan, yüksek hacim fraksiyonuna sahiptir ($\phi \geq 0.3$). Carlson [59] birçok endüstriyel MR akışkanın akma gerilmesi ve hacim fraksiyonu arasındaki ilişkiyi “ $\tau_y \sim \phi^n$ Üst Kuralı” ile ifade etmiş ve manyetik tanecik fraksiyonu yüksek olan MR akışkanlar için kayma gerilmesini aşağıdaki denklem ile tanımlamıştır.

$$\tau_{MR} = C x 271700 x \phi^{1.5239} x \tanh(6.33 x 10^{-6} x H) \quad (2.12)$$

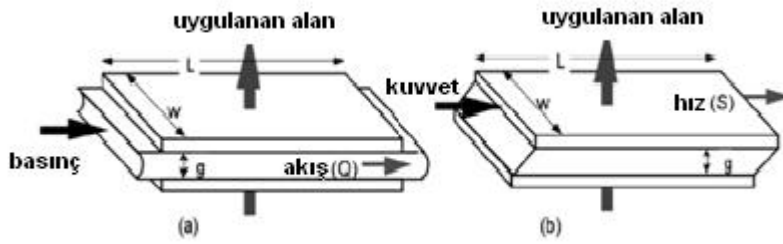
Burada; C , taşıyıcı akışkanın hidrokarbon yağı, su ve silikon yağı olması durumunda sırası ile 1.0, 1.16 ve 0.95 değerini almaktadır.

MR akışkanlarda; tanecik yoğunluğunun, tanecik boyutu dağılımının, yüzey aktif maddenin, katkı maddelerinin ve taşıyıcı sıvının bir fonksiyonu olan off-state viskozitesi, manyetik alan olmaksızın elde edilen değerdir. Birçok MR akışkan, katkı maddeleri ve yüzey aktif maddeler sebebi ile deformasyon boyunca reolojik olarak sahte plastik davranışı ve tiksotropik davranış gösterirler. MR akışkanların reolojik

olarak sahte plastik davranışı göstermelerinin temel nedeni, zayıf aglomerasyonların veya bağların deformasyona uğrayarak kırılmasıdır [60–61].

Plastik viskozite, Bingham Plastik Modeli'nde kayma gerilmesinin kayma hızı ile doğrusal değişimindeki eğim ile belirlenmektedir. Tasarım uygulamalarında MR akışkanların plastik viskozitesi, 0,1-0,7 Pa.s arasında olmalıdır [62].

MR akışkan uygulamalarında, çift kutuplu (akma için basınç gereken), bağlı hareketli kutuplar (direk kayma modu) veya sıkıştırma modu ile çalışan birçok alet kullanılmaktadır. Bu aletlerden iki tanesi şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Basıncın akma yaratmak için itici güç olarak kullanıldığı aletler; servo valfler, damperler ve sarsıntı emicilerdir. Direk kayma modu ile çalışan aletler ise; debriyaj sistemleri, fren sistemleri ve kilitleme sistemleridir. Sıkıştırma modu ile çalışan aletler, yavaş hareket eden ve yüksek güç gerektiren aletlerdir [54, 63].



Şekil 2.5 : Kontrol edilebilir akışkanlar için temel çalışma prensipleri. a) basınç ile akış sağlanan sistem, b) direk kayma modu [54].

Phillips [54] sabit çift kutuplu cihazlar için yaptığı araştırmada, cihaz içindeki basınç düşüşü ile akma gerilmesi arasında bir bağıntı elde etmiştir. Buna göre; cihazdaki basınç düşüşü, viskoz bileşimlerin (ΔP_η) ve alan şiddetine bağımlı bileşimlerin (ΔP_τ) toplamından oluşmaktadır ve aşağıdaki bağlantıyla tanımlanmaktadır.

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau(H) = \frac{12\eta QL}{g^3 w} + \frac{c \tau_y(H)L}{g} \quad (2.13)$$

Burada; L , g ve w sırası ile iki kutup arasındaki kanalın uzunluğu, yüksekliği ve genişliği, Q =hacimsel akış hızı; η =manyetik alanın bulunmadığı durumdaki viskozite ve τ_y =uygulanan alanın şiddeti ile oluşan akma gerilmesidir. c =akış hızı profilinin bir

fonksiyonu olup en az 2 ($\Delta P_t / \Delta P_\eta < 1$) ve en fazla 3 ($\Delta P_t / \Delta P_\eta > 100$) değerlerini alır [54].

2.5 Manyetoreolojik Akışkanların Kararlılığı

MR akışkanların kararlılığı, kararlılığı bozan birçok faktöre rağmen uzun bir zaman dilimi sonrasında akışkanın ilk özelliklerini koruma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. MR akışkanlarda kararlılık ve yeniden dağılma özelliği, bu malzemenin en önemli özelliklerinden biridir. Kararlı MR akışkanlarda, tanecik çökmesi hiç gözlenmez veya çok az miktarda gözlenir. Seyretilik sistemler için, küresel taneciklerin çökme hızı Stoke Eşitliği ile elde edilir.

$$v = \frac{2}{9} \frac{R_s^2 (\Delta \rho) g}{\eta} \quad (2.14)$$

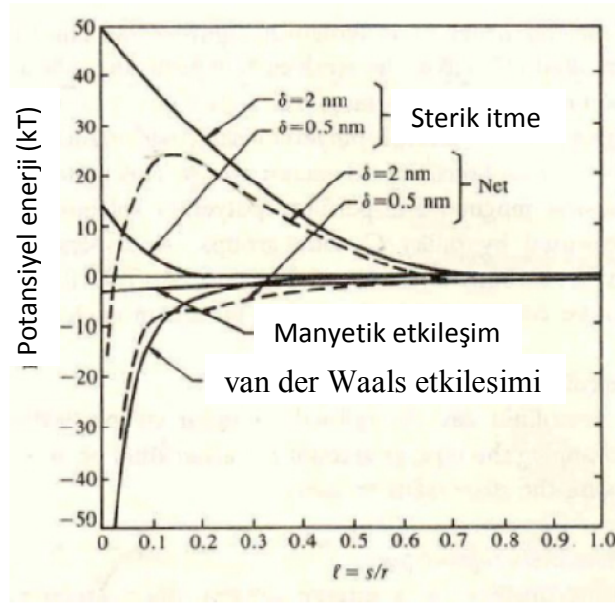
Bu denklemde; R_s = tanecik yarı çapı; $\Delta \rho$ = taşıyıcı sıvı ile manyetik taneciklerin yoğunlukları arasındaki fark; η = taşıyıcı sıvının viskozitesi; g = yerçekimi ivmesini ($9,8 \text{ m/s}^2$) gösterir [64, 65].

Düşük viskozitedeki taşıyıcı sıvılar, taneciklerin çökme hızını daha da arttıırırlar. Bundan dolayı; Rankin vça [66], taneciklerin çökmesini engellemek için, viskoplastik taşıyıcı faz içeren süspansiyonlar hazırlamışlardır. Viskoplastik ortamın akma gerilmesi, her bir tanecik ve tanecik yarı çapı için elde edilen kritik akma gerilmesinden yüksek olduğunda; tanecikler askıda durmaktadırlar. Fren sistemleri gibi birçok uygulama için, MR akışkanların off-state viskozitelerinin olabildiğince düşük olmaları istense de; sismik titreşimlerin kontrolü gibi uygulamalarda, çökmenin geniş zaman aralığında engellenmesi için pasta tipi MR akışkanlar daha uygundur.

Çökmüş taneciklerin, çok küçük manyetik alan, karıştırma veya çalkalama ile yeniden dağılılabilmesi, akışkanın yeniden dağılma özelliği gösterdiği anlamına gelir. Bazı akışkanlar, çok az miktarda yeniden dağılma özelliği göstermekte ve buna bağlı olarak da, akışkanın tabanında manyetik tepkiyi bozan kekleşme meydana gelmektedir. Taneciklerin büyük aralıklarındaki manyetik etkileşimi ve küçük aralıklarındaki van der Waals, manyetik süspansiyonlarda aglomerasyona ve

taneciklerin çökmesine kuvvetle bağlıdır. Manyetik etkileşim enerjisinin çeşitli faktörlerle değişimi Şekil 2.6’da gösterilmiştir [67–68].

MR akışkanlar ile çalışan birçok alette kararlılığı bozan en önemli etken eş olmayan manyetik alandır. Eş olmayan manyetik alan, tanecikleri maksimum iletimli alana yeniden dağıtır. Manyetik momentin bu farklı alanlardaki kararlılık mekanizmasının kalitesi ne kadar fazlaysa, tekdüze olmayan manyetik alandaki taneciklerin yeniden dağılım oranı o kadar az; manyetik akışkanın kullanıldığı alandaki tekdüze manyetik tanecik konsantrasyonu ise, o kadar fazladır.



Şekil 2.6 : Manyetik etkileşim enerjisinin, van der Waals etkileşim enerjisinin, sterik itme enerjisinin ve net potansiyel enerjinin, değişik uzunluktaki moleküller (δ) için gösterimi.

Manyetik akışkanların manyetik çökme kararlılığı katsayısı, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [65].

$$K_s = (M_t - M_0) / M_0 \quad (2.15)$$

Bu denklemde, M_0 = başlangıç manyetizasyonu; M_t = t zamanındaki manyetizasyondur.

MR akışkanlar, kullanım durumlarına göre bazı bozulmalar gösterebilirler. Bozulma miktarı genellikle kayma gerilmesine, süresine ve sıcaklığına bağlıdır. MR

akışkanların tahmin edilen kullanım zamanları (*Lifetime Dissipated Energy*, LDE), aşağıdaki eşitlik ile bulunmaktadır [69].

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{life} P \cdot dt \quad (2.16)$$

Burada V= MR akışkan hacmi, P= MR cihazda anlık ısıya dönüşen mekanik güçtür.

2.6 Manyetoreolojik Akışkanların Uygulama Alanları

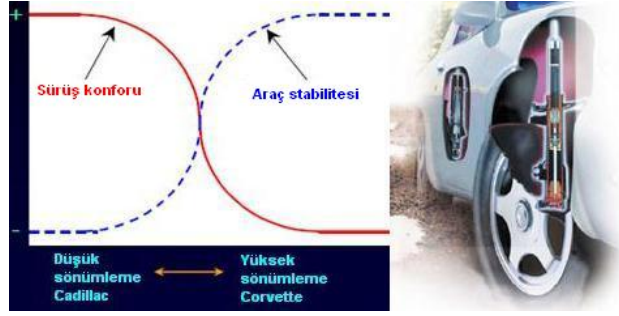
MR akışkanlar, modern kontrol sistemleri ile birlikte, otomotiv parçaları, debriyaj sistemleri ve motor parçaları [54, 15], optik lens ağartma [61], depreme dayanıklı bina uygulamaları [45], tork transfer sistemleri [70–71] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

MR akışkanların en çok kullanıldığı alan otomotiv sektörü olup bu akışkan, otomobillerin süspansiyon sistemlerinde, yolcu güvenlik sistemlerinde ve fren sistemlerinde kullanılmaktadır. MR akışkan, otomobil süspansiyon sistemlerinde amortisörlerdeki hidrolik akışkanın yerini almış ve sensörler aracılığı ile otomobilin ve yolun durumuna göre düşük enerji ile yüksek sönüm ve titreşim kontrolü sağlamakta; sessiz çalışması ile 5 yıla varan bir çalışma ömrü sunmaktadır. Cadillac, Chevrolet, Ferrari, Audi ve daha birçok marka, bu teknolojiyi günümüz otomobillerinde kullanmaktadır [72].

Otomobillerde MR akışkan süspansiyonlarının kullanımı Şekil 2.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi; düşük sönümleme, konforlu otomobillerde rahat kullanım özelliği ve yüksek sönümleme; spor otomobillerde ise, yola tutunma özelliği sağlamaktadır.

MR akışkan frenleri, MR akışkanın kayma gerilmesi ile tork transferini gerçekleştiren cihazlardır. MR döner freni, uygulanan manyetik alan şiddeti sonucu tork frenlemesi özelliğine sahiptirler [73].

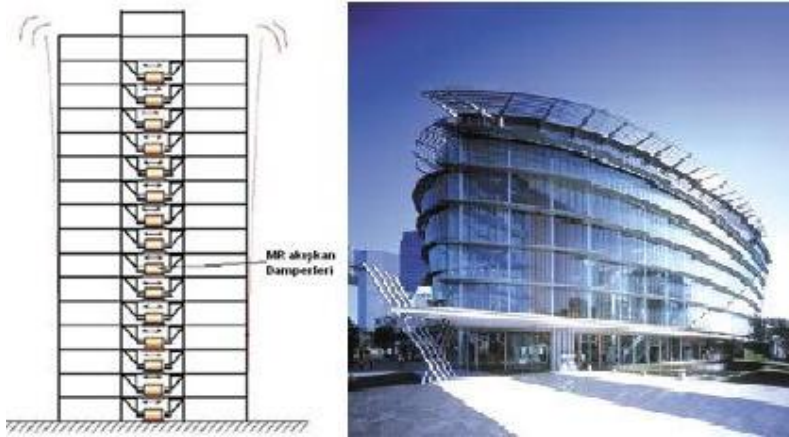
Motorsiklet direksiyonlarında kullanılan MR damperler, istenmeyen motorsiklet direksiyonu hareketlerini sönümlemek için kullanılırlar. Damper, yağlı valf damper sistemi ve kayan milleri içeren silindirik bir tüpten meydana gelir [74].



Şekil 2.7 : Otomobillerde MR akışkan süspansiyonlarının kullanımı.

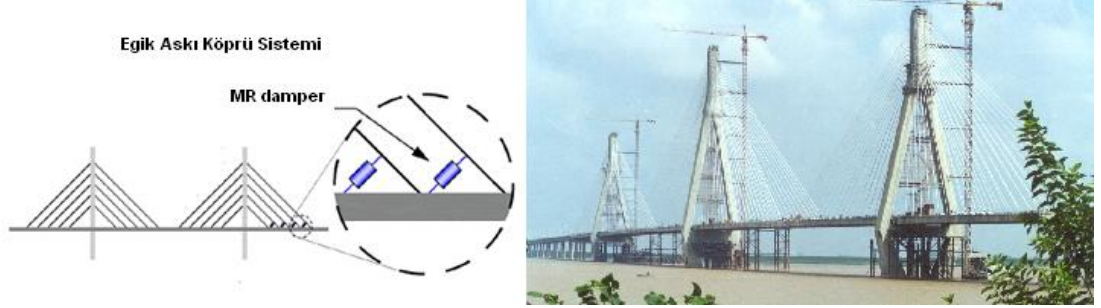
Kamyonlardaki birçok sürücü koltuğu günümüzde, güvenlik tehlikesi taşıyan ve sürücü sağlığını olumsuz yönde etkileyen hava veya pasif süspansiyon sistemi bulundurmaktadır. Ancak, Lord firmasının geliştirdiği MR akışkan temelli bir sistem olan “*The Motion Master Ride System*”, pasif süspansiyon sistemlerinin kısıtlamalarını ortadan kaldırarak, pasif sistemlere göre değişen titreşim özelliğini tanımış ve anlık sönümlenme kuvveti uygulayarak farklı yol koşulları ve sürücü ağırlıkları için etkili titreşim sönümlemesi ve şok koruması sağlamıştır [75].

Son yıllarda depremlere, fırtınalara ve afetlere karşı binaların verdiği tepkilerin azaltılmasını sağlayan “yarı-aktif titreşim kontrol sistemleri” üzerine artan çalışmalar, özellikle yüksek kapasitedeki damperler gibi MR akışkan içeren yarı aktif kontrol sistemlerinin 300 kN maksimum sönümlenme kuvveti sağladığını göstermiştir. MR akışkanlar, yarı aktif kontrol sistemi teknolojisini, sivil mühendislik yapıları ve gerçek binalar gibi büyük ölçekteki yapılar için etkin olarak sağlamaktadırlar [76–79]. Binalarda MR damperlerin kullanımına ilişkin bir örnek Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Binalarda MR damperlerin kullanımı ve Japonya Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi uygulaması.

MR akışkan damperleri binalarda şiddetli rüzgarların ve depremlerin yarattıkları sarsıntıları asgari düzeye indirir. Şekil 2.9’da gösterilen The Dong Ting Lake köprüsü, MR damperlerin kullanılması yoluyla Çin’de inşa edilmiş bir köprüdür.



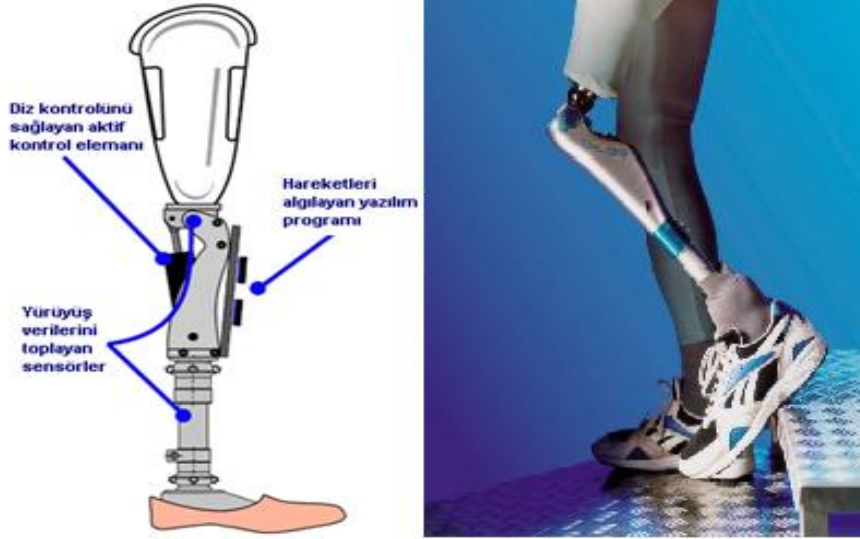
Şekil 2.9 : Köprülerde MR damperlerin kullanımı ve Çin’deki The Dong Ting Lake köprüsü uygulaması.

MR akışkanların kullanımları, uzay uygulamalarını da kapsamaktadır. Uydular için tasarlanan bir cihaz, uyduları, kalkış sırasında oluşan titreşimler ve şoklar nedeniyle meydana gelebilecek zararlardan korumakta ve yörünge momentumu sayesinde oluşan çalkalanmaları yalıtılmaktadır [80].

MR akışkanlar, medikal alanda da kullanılmaktadır. MR akışkanların kanser tedavisi amacıyla kullanılması son yıllarda gündemdedir. Bu amaçla; tümöre giden kan, seyreltik MR çözeltisi verilerek ve tümörün önüne bir mıknatıs konularak bloklanmakta; kan beslemesinin kesilmesiyle de, tümör dokusu kısa zaman içerisinde ölmektedir [81]. MR akışkan damperlerinin kullanıldığı bir başka alan da, protezlerdir. Şekil 2.10’da görülen protez diz, çok yavaş hareketlerde bile anlık hareket kontrolünü sağlamaktadır.

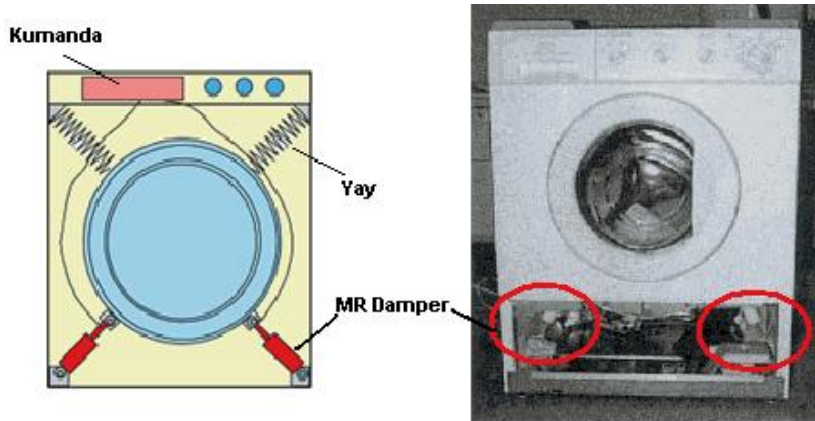
MR akışkan uygulamaları, bulunan ve geliştirilen en yeni optik parlatma yöntemidir. Polimetil metakrilat (PMMA), dairesel olefin polimer (COP), polikarbonat (PC) ve polistiren (PS) içeren MR akışkan malzemeler, optik parlatmak için en iyi adaylardır. Ancak, tüm polimerleri parlatmakta tek bir MR akışkan işe yaramadığı için, MR akışkan ve polimer kombinasyonları ile yürütülen çalışmalar halen devam etmektedir [82].

“Seal-Less” titreşim damperleri, endüstriyel uygulamalarda sönümlenmenin aktif olarak kontrolü için kullanılan damperlerdir. Su bazlı MR akışkanların da kullanılabildiği bu damperler, kilit sistemlerinde kullanılabilmektedirler [54].



Şekil 2.10 : MR akışkan damperi ile imal edilen protez diz.

Düşük kuvvet MR akışkan damperleri yıkama döngüsü yavaş; fakat, sıkma döngüsü hızlı olan ön yüklemeli çamaşır makinelerinin yatay eksenine konularak makine, yıkama modundan sıkma moduna geçerken, farklı hızlara göre farklı sönümlendirme uygular ve yüksek devirde ortaya çıkan ses ile titreşimi azaltır [83]. Şekil 2.11’de MR akışkan damperleri ile tasarlanan çamaşır makinesi örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : MR akışkan damperi ile tasarlanmış çamaşır makinesi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzeme ve Materyal

Bu çalışmada, manyetoreolojik (MR) akışkan sentezlemek için manyetik tanecik olarak demir tanecikleri, taşıyıcı faz olarak hidrokarbon yağ ve akışkan özelliklerini iyileştirmek amacı ile çeşitli özelliklerde katkı maddeleri kullanılmıştır.

3.1.1 Manyetik Malzeme

MR akışkanların sentezinde kullanılan manyetik malzemeler International Specialty Products (ISP) firmasından sağlanmıştır. Kullanılan tanecikler T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 olarak kodlanmış olup bu çalışmada, bu kod isimleri kullanılacaktır. Manyetik taneciklerin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : MR akışkanların sentezinde kullanılan manyetik taneciklerin özellikleri.

Kodu	Tanecik Boyutu (µm)	Demir İçeriği (%)	Yoğunluk (kg/m ³)	Polimer Kaplama
T-1	4 – 6	97,0 – 97,6	7750	–
T-2	7 – 8	97,0 – 97,6	7690	–
T-3	4 – 6	99,5 – 99,6	7700	–
T-4	7 – 9	97,0 – 97,6	4480	+
T-5*	4 - 6	97 – 97,3	7500	–

*Yüzeyi silikayla muamele edilmiştir.

3.1.2 Yağ

Çalışmada, piyasadan alınan alınan 63,5 MPa.s viskoziteye ve 825 kg/m³ yoğunluğa sahip, şeffaf renkte aromatik bir yağ kullanılmıştır.

3.1.3 Katkı Maddeleri

MR akışkanların sentezinde kullanılan ve bu akışkanların özelliklerini iyileştiren katkı maddeleri piyasadan temin edilmiştir. Kullanılan katkı maddeleri K-1, K-2, K-3, K-4, K-5 ve K-6 olarak kodlanmış olup bundan sonra, metinde bu kod isimleriyle kullanılacaktır. Katkı maddelerinin özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : MR akışkanların sentezinde kullanılan katkı maddelerinin özellikleri.

Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	SiO ₂ İçeriği (%)	Ortalama Tanecik Boyutu (µm)
K-1	2200	93 – 95	9,0
K-2	2200 – 2400	71 – 75	53,8
K-3	500 – 1000	60 – 75	27,8
K-4	220	70 – 75	37,9
K-5	1000	54,5	71,3
K-6	210	73,8	13

3.2 Malzeme ve Maddelerin Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan MR akışkan unsurları çeşitli teknikler kullanılarak karakterize edilmişlerdir.

Polimer kaplı manyetik taneciklerin şekil ve morfolojisi Philips marka *Jeol JSM-T330* model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Mikroskobun bir parçası olan pirinç blok üzerine çift taraflı karbon bandı yapıştırılıp, üzerini altın ile kaplanarak iletkenliği mutlak olarak sağlanmış ve ardından, kaplanan toz numune analizlenmiştir.

Polimer kaplı manyetik taneciğin sıcaklığa karşılık yüzde kütle kaybı *Perkin Elmer Diamond TG/DTA* model termogravimetrik analiz (TGA) cihazı ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, manyetik taneciklerin taşıdığı polimer miktarı (%) belirlenmiştir.

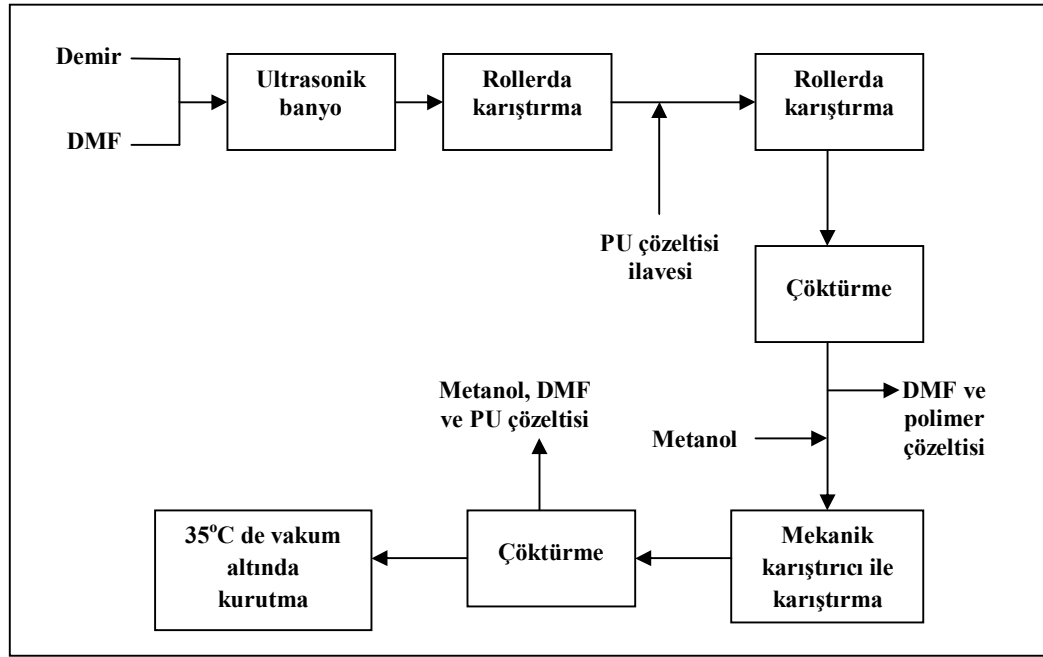
Yağların kimyasal yapısının belirlenmesi ve polimer kaplamanın teyit edilmesi için *Perkin Elmer Spectrum One* model Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spektrometresi kullanılmıştır.

3.3 Manyetik Taneciklerin Polimer ile Kaplanması

MR akışkanların sentezinde kullanılan manyetik tanecikler, özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla poliüretan (PU) ile kaplanmışlardır.

Kaplama sürecinde manyetik tanecikler, FLUKA N-N Dimetilformamit (DMF) ile birlikte 15 dakika süresince ultrasonik banyoda tutulmuş ve ardından, 3 saat boyunca *STUART SRTI* model karıştırıcıyla karıştırılmışlardır. Daha sonra, üzerlerine %40'lık PU çözeltisi eklenerek 3 saat daha rollerde karıştırılmış ve oluşan süspansiyon çökmeye bırakılarak DMF'in ve fazla polimerin ortamdan ayrılması sağlanmıştır. Üzerlerinde kalan DMF ile fazla polimerin uzaklaştırılması amacıyla

taneciklere, metanol ilave edilmiş ve bir mekanik karıştırıcıda 1,5 saatlik süreyle karıştırılarak yıkanmışlardır. Yıkama işlemi 3 kez tekrarlanmış ve polimer kaplı manyetik tanecikler daha sonra bir vakum etüvde (*Vacucell* model) 0 bar vakum altında 35°C’da 2 gün süreyle kurutulmuşlardır. Polimer kaplama süreci Şekil 3.1’de özetlenmiştir. Polimer kaplama için 2 farklı süreç daha denenmiştir. Ancak elde edilen tanecikler kullanım için ideal olmadığı gözlemlenmiştir. Bu 2 sürecin şemaları EK-A’da verilmiştir.



Şekil 3.1 : Manyetik taneciklerin polimer ile kaplanma süreci.

3.4 Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Sentezlenen MR akışkanların reolojik özellikleri, manyetik alan etkisi altında ve manyetik alan etkisi olmaksızın, *Anton Paar Physica MCR 301* model reometre ve 20 mm çaplı paralel plaka geometrisi kullanılarak belirlenmiştir.

Manyetik alan konumu (on-state durumu), MR akışkanın manyetik alan etkisi altındayken gösterdiği reolojik davranışın; manyetik alan olmayan konum (off-state durumu) ise, MR akışkanın manyetik alanın bulunmadığı durumdaki reolojik davranışının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Cihaz, manyetik alan konumundayken; manyetik alanın dışarı sızmasını engelleyerek kapalı alanda belirli bir yörünge çizmesini sağlayan kapakçıklar, numune haznesi

üzerine kapatılmış ve 1 A'lık sabit akım varlığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her ölçümden sonra manyetik etkileri ortadan kaldırmak amacı ile iki ayrı manyetik etki giderme (demanyetizasyon) işlemi uygulanmıştır. Aynı cihazda, manyetik alan olmaksızın yapılan ölçümler için de kullanılmıştır.

MR akışkan, ilk olarak homojen tanecik dağılımının elde edilmesi amacıyla 1 saat boyunca model dijital bir çalkalayıcıda (*IKA-WERKE HS 501*) 165 rpm'de karıştırılmış ve ardından, yaklaşık 0,30 ml numune reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla numune haznesine konulmuştur. Uç etkilerinin ortadan kaldırılması için numunenin hazneden taşmamasına dikkat edilmiş ve cihaz, ölçüm vaziyetine (1 mm ölçme mesafesi) getirildikten sonra, 0,1-100 s⁻¹ aralığındaki kayma hızı (*shear rate*) değerleri için, 25°C'da 19 noktada ölçüm yapılarak grafiğe aktarılmıştır.

Doğru sonuçlar elde etmek için cihaza ayda en az bir kez motor ayarı ve kalibrasyon yapılarak cihazın konumu ile ilgili ortaya çıkabilecek ölçüm hataları otomatik olarak düzeltilmiştir.

3.5 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özelliklerinin Belirlenmesi

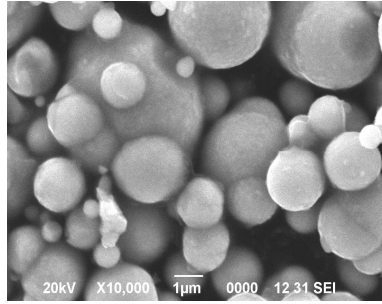
Hazırlanan akışkanlar yukarıda belirtildiği şekilde 1 saat boyunca karıştırıldıktan sonra dinlenmeye bırakılmış ve çökme özellikleri gözlenmiştir. Bu amaçla, akışkanın alt seviyesinden üstte kalan berrak yağ fazına kadar olan yüksekliği, bir cetvel yardımıyla 102 dakika boyunca her 6 dakikada bir kaydedilmiş ve demir içeren fazın tüm faza oranının yüzdesel olarak ifade edilmesi yoluyla çökme oranı değerleri hesaplanmıştır. Zamana karşılık gelen çökme oranı değerlerinin grafiğe geçirilmesi yoluyla, çökme grafikleri elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

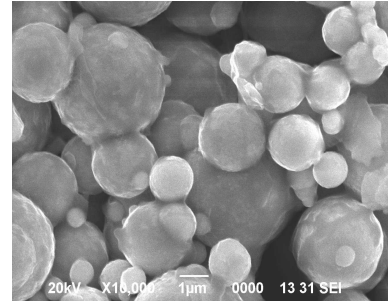
4.1 Demir Taneciklerinin Polimerle Kaplanması

Çalışmada manyetik taneciklerin oksidasyon ve korozyondan koruyarak ömrünü uzatmak için polimer kaplaması yapılmıştır. Polimerle kaplamanın diğer bir amacı, manyetik taneciklerin yağ içerisindeki çökmelerini yavaşlatmaktır. Bu amaçla, T-2 manyetik tanecikleri polimer ile kaplanarak T-4 olarak kodlanan manyetik tanecikler hazırlanmıştır.

T-2 ve T-4 manyetik taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM)'ndaki 10000 kez büyütülmüş görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekiller kıyaslandığında iki tanecik yüzeyi arasında farklılıklar olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4.1.b'de polimer ile kaplanmış T-4 tanecikleri yüzeyindeki polimer tabakası net olarak görülebilmektedir. T-2 manyetik taneciklerinin yüzeyi daha pürüzlü ve mat görünmektedir. Taneciklerin 2500 ve 5000 kez büyütülmüş halleri EK-B'de verilmiştir.



(a)

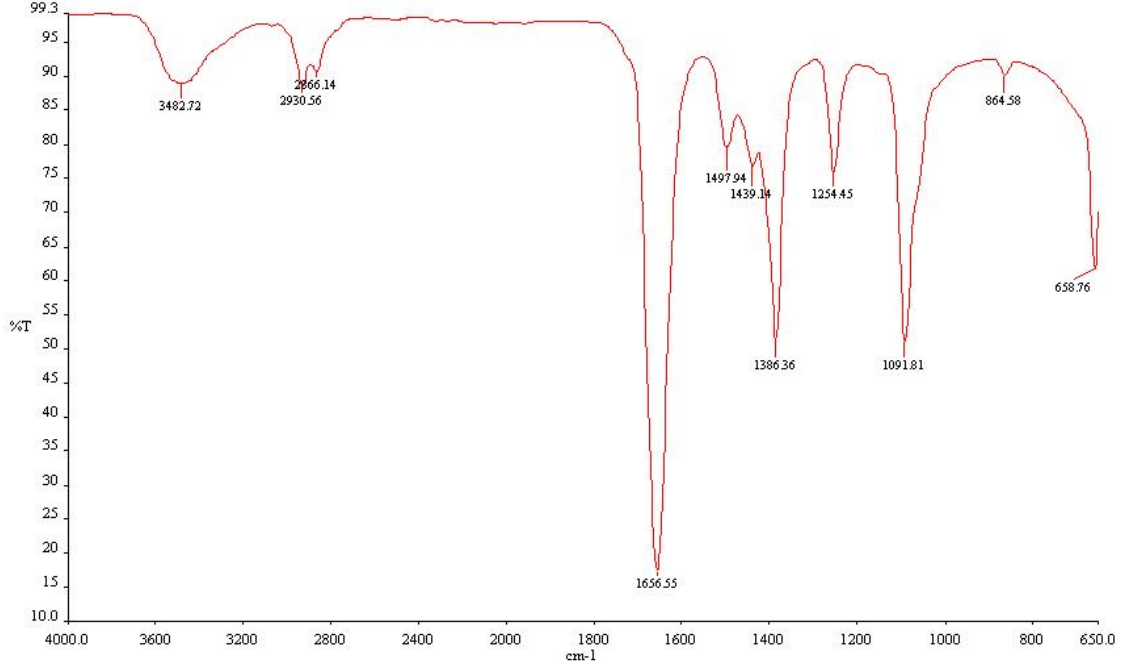


(b)

Şekil 4.1 : Polimer ile kaplanmış ve kaplanmamış demir taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri: a) Polimer ile kaplanmamış tanecik (T-2), b) polimer kaplanmış tanecik (T-4).

Manyetik taneciğinin polimer ile kaplandığının teyit edilmesi için Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spektrometresi ve termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarından da yararlanılmıştır.

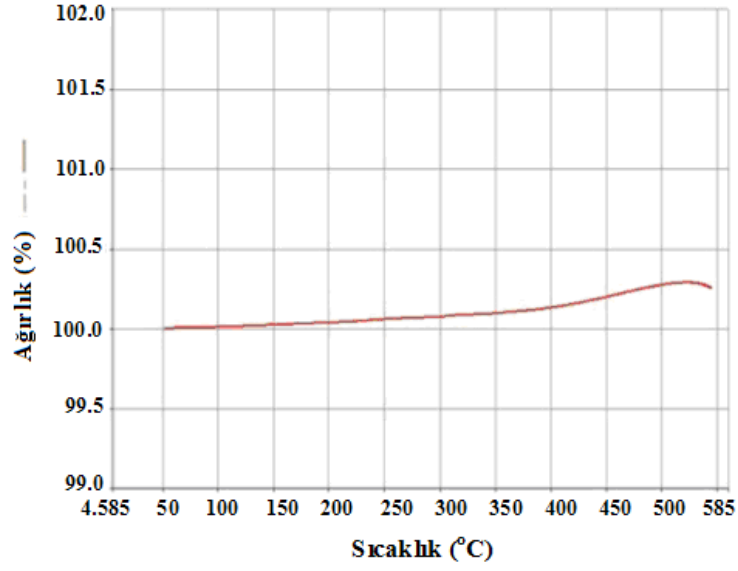
T-2 manyetik taneciklerinin yüzeyini kaplayan polimer, DMF çözücüsü içinde çözülmüş, elde edilen çözeltinin FTIR spektrofotometresi ile analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.2’de görülmektedir. FTIR grafiğinde polimeri temsil eden pik 3482 cm^{-1} de açık bir şekilde gözlenmektedir. Buda manyetik taneciklerin polimerle kaplandığını göstermektedir.



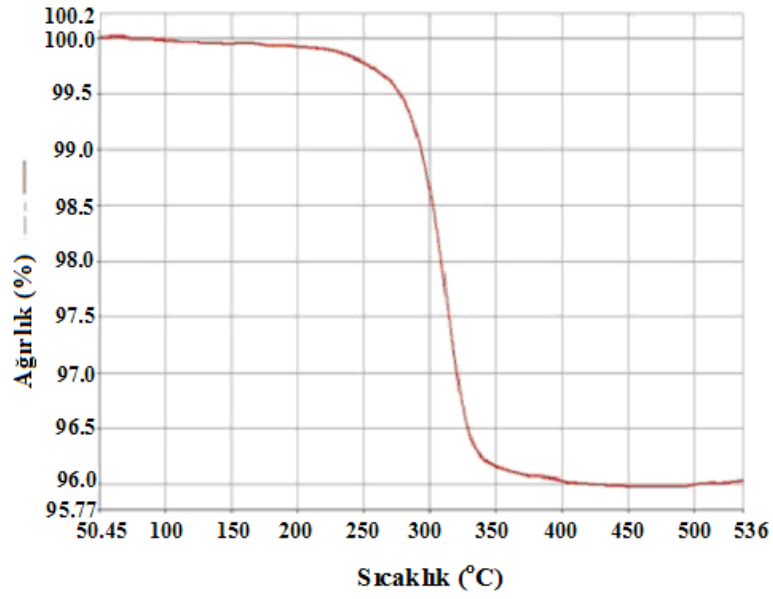
Şekil 4.2 : Polimer kaplı demir taneciklerinin FTIR spektrometresindeki analiz sonucu.

T-2 ve T-4 manyetik taneciklerinin TGA sonuçları ise, Şekil 4.3’te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, T-2 taneciklerinin ağırlığında önemli bir değişiklik göze çarpmazken, T-4 taneciklerinde %4’e varan bir ağırlık kaybı görülmektedir. Bu durum bu tanecikleri kaplayan polimerin yüksek sıcaklıklarda bozunarak tanecik yüzeyinden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. T-2 taneciğinin ağırlığında TGA analizi sırasında görülen küçük artışın oksitlenmeden kaynaklandığı sanılmaktadır. Polimer kaplamanın bu oksitlenmeyi önlediği anlaşılmaktadır

Kaplama verimi, Şekil 4.3’te gösterilen TGA sonucundan yararlanılarak %4,6 olarak belirlenmiştir. Kaplama sürecinde eklenen polimerin miktarı arttırılarak kaplama verimi de arttırılabilir. EK-C’de çeşitli kütle oranlarında polimer çözeltisi ile kaplanan manyetik taneciklerin TGA sonuçlarından anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.3 : Demir taneciklerinin TGA sonuçları: a) orijinal demir tanecikleri (T-2), b) polimer kaplı demir tanecikleri (T-4).

4.2 MR Akışkanların Sentezi

Bu çalışmada MR akışkan numuneleri, Bölüm 3'te özellikleri verilen manyetik tanecikler, katkı maddeleri ve yağ kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan MR akışkan numuneleri, raporun bundan sonraki bölümlerinde “AABBCCDD”

biçiminde kodlanacaktır. Burada; “AA”, MR akışkanın hazırlandığı manyetik tanecik çeşidini; “BB”, MR akışkanda kullanılan katkı maddesi çeşidini belirtmektedir eğer katkı kullanılmamış ise bu kod kullanılmayacaktır; “CC”, MR akışkandaki manyetik taneciklerin kütleli karışım oranını; “DD”, MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan yağın kütleli karışım oranını ifade etmekte olup bu kodların açıklamaları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Hazırlanan MR akışkanların bileşimlerinin kütleli oranlarının kodları.

Karışım oranı kodu (ZZ)	Manyetik tanecik, oranı (% , ağırlıkça)	Katkı maddesi, oranı (% , ağırlıkça)	Yağ oranı (% , ağırlıkça)
T16040	T1,60	YOK,0	40
T26040	T2,60	YOK,0	40
T36040	T3,60	YOK,0	40
T46040	T4,60	YOK,0	40
T56040	T5,60	YOK,0	40
T1K16730	T1,67	K1,3	30
T1K26730	T1,67	K2,3	30
T1K36730	T1,67	K3,3	30
T1K46730	T1,67	K4,3	30
T1K56730	T1,67	K5,3	30
T1K66730	T1,67	K6,3	30
T2K16035	T2,60	K1,5	35
T2K26035	T2,60	K2,5	35
T2K36035	T2,60	K3,5	35
T2K46035	T2,60	K4,5	35
T2K56035	T2,60	K5,5	35
T2K66035	T2,60	K6,5	35
T3K16730	T3,67	K1,3	30
T3K26730	T3,67	K2,3	30
T3K36730	T3,67	K3,3	30
T3K46730	T3,67	K4,3	30
T3K56730	T3,67	K5,3	30
T3K66730	T3,67	K6,3	30
T5K16035	T5,60	K1,5	35
T5K26035	T5,60	K2,5	35
T5K36035	T5,60	K3,5	35
T5K46035	T5,60	K4,5	35
T5K56035	T5,60	K5,5	35
T5K66035	T5,60	K6,5	35

Çizelge 4.1 (devam): Hazırlanan MR akışkanların bileşimlerinin kütle oranlarının kodları.

T2K26039	T2,60	K2,1	39
T2K26038	T2,60	K2,2	38
T2K26037	T2,60	K2,3	37
T2K26036	T2,60	K2,4	36
T2K44055	T2,40	K4,5	55
T2K44550	T2,45	K4,5	50
T2K45045	T2,50	K4,5	45
T2K45540	T2,55	K4,5	40
T1K36020	T1,60	K3,10	20
T1K46020	T1,60	K4,10	20
T4K16035	T4,60	K1,5	35
T4K26035	T4,60	K2,5	35

LORD firmasından temin edilen ticari MR akışkanların özellikleri çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Yağ ile ticari MR akışkanların yağ fazının FTIR analizi sonuçları EK-D’de verilmiştir. Analiz sonuçları yağların farklı yapılaraya sahip olduğunu göstermektedir. Laboratuvar ortamında elde edilen akışkanlar, reolojik, manyetoreolojik ve çökme özellikleri açısından ticari MR akışkanlar ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2 : Ticari akışkanların özellikleri

Akışkan Kodu	Katı faz oranı (%,ağırlıkça)	Yağ oranı (%,ağırlıkça)
MRF 122EG	72	28
MRF 140CG	85,44	14,66

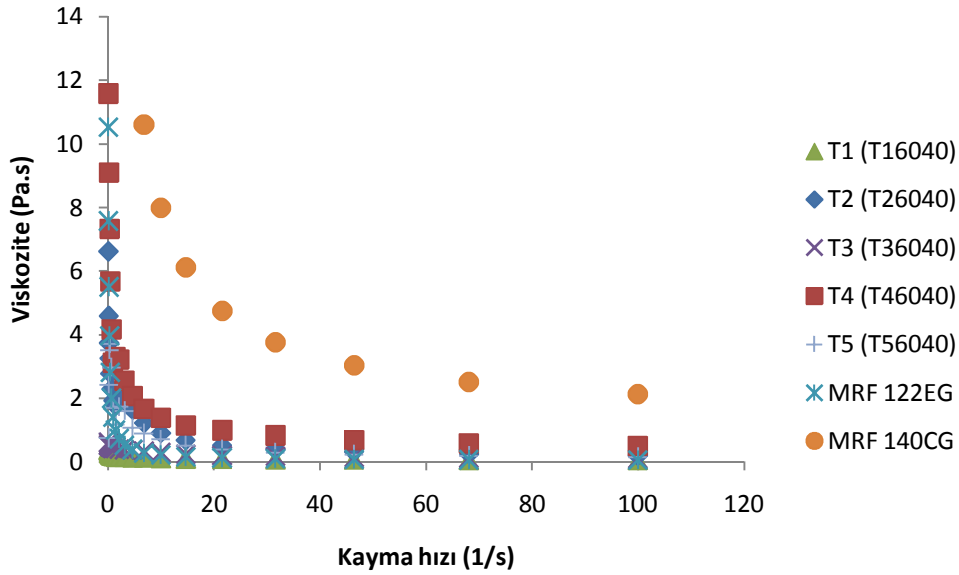
4.3 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri

Laboratuvar ortamında hazırlanan MR akışkanlar ile ticari akışkanların reolojik özellikleri, Bölüm 3.4’te açıklanan yöntem kullanılarak manyetik alanın bulunmadığı koşullarda incelenmiş ve bu akışkanların viskoziteleri ile kayma gerilmeleri, 0,1–100 s⁻¹ aralığında değişen kayma hızının fonksiyonu olarak grafiklere geçirilmiştir. Kullanılan manyetik tanecik ile katkı maddelerinin çeşitlerinin ve akışkan içerisindeki kütle oranlarının, reolojik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Reoloji sonuçlarının tekrarlanabilirliğini gözlemlemek için aynı akışkan ile değişik zamanlarda 3 farklı ölçüm alınmış ve reoloji sonuçlarının

değişmediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada verilen sonuçlar bu ölçümlerin ortalama değerleridir. Sonuçlar EK-E.1’de verilmiştir.

4.3.1 Manyetik Tanecik Çeşidinin Reolojik Özelliklere Etkisi

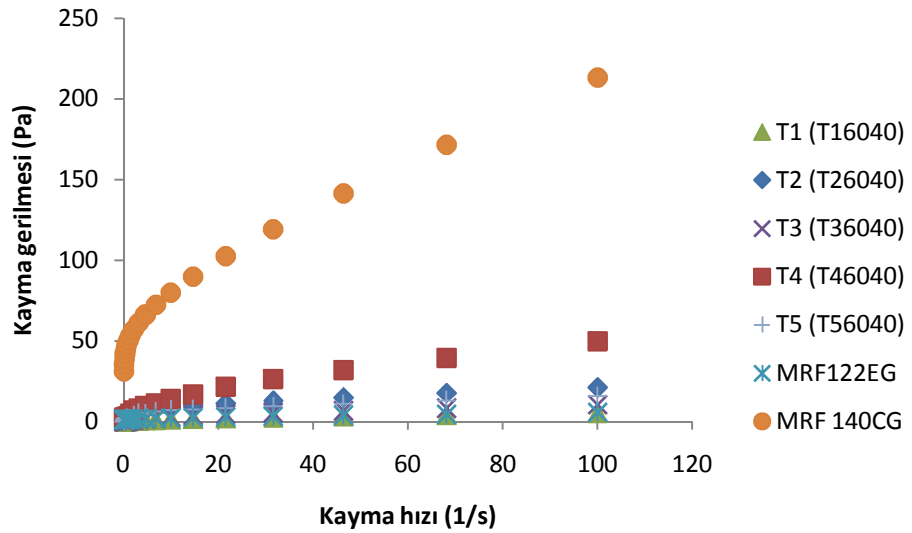
Manyetik taneciklerin, akışkanların manyetik alanın mevcut olmadığı durumdaki reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla, yağ ile manyetik taneciğin kütesel oranları sabit tutularak beş çeşit MR akışkan hazırlanmış ve reolojik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada Taneciklerin ağırlıkça oranı %60 olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan MR akışkanların kayma hızlarına karşılık gelen viskozite ve kayma gerilmesi değerleri, sırasıyla, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ te kayma hızının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Kıyaslama amacıyla ticari MR akışkanların değerleride aynı grafiklere konulmuştur.



Şekil 4.4 : Manyetik alanın bulunmadığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların viskozitelerine olan etkisi.

Farklı manyetik tanecikler ile hazırlanan MR akışkanların viskozitelerinin kayma hızıyla değişimleri incelendiğinde kayma hızına bağlı olarak başlangıçta hızla düştüğü kayma hızı 5 s^{-1} ’den sonra ise viskozitelerindeki azalmanın önemli ölçüde yavaşladığı görülmektedir. Böylece 5 s^{-1} kayma hızı değerinde bir kırılma meydana geldiği ve bu değer üzerindeki kayma hızlarında viskozitedeki değişimin, bu değer altındaki kayma hızlarına kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, tanecik boyutları ve yoğunlukları birbirine yakın olan T-1 ve T-3 manyetik

tanecikleri ile hazırlanmış akışkanların viskoziteleri benzer olduğu görülmektedir. Bu iki manyetik taneciğe kıyasla daha büyük tanecik boyutuna sahip olan T-2 taneciği ile hazırlanmış akışkan viskozitesinin, T16040 ve T36040 akışkanlarına kıyasla daha yüksek olmuştur. T-2 taneciğinin polimer ile kaplanması sonucu elde edilen T-4 tanecikleriyle hazırlanan akışkan, diğer taneciklerle hazırlanmış akışkanların viskozitelerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu tanecikler diğer taneciklere kıyasla daha büyük tanecik boyutuna sahiptir. Ayrıca, tanecik yüzeyindeki poliüretan tabakalarının kendi aralarında hidrojen bağları oluşturması viskozitelerinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. T-5 taneciğinin benzer özellik taşıyan T-1 taneciğine göre yüksek viskozite değerlerine sahip olmasının esas nedeni yüzeyinin silika ile muamele edilmiş olmasıdır. Silikalı T-5 tanecikleri arasındaki etkileşim viskozite değerlerini yükseltmiştir.



Şekil 4.5 : Manyetik alanın bulunmadığı koşullarında, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların kayma gerilmelerine olan etkisi.

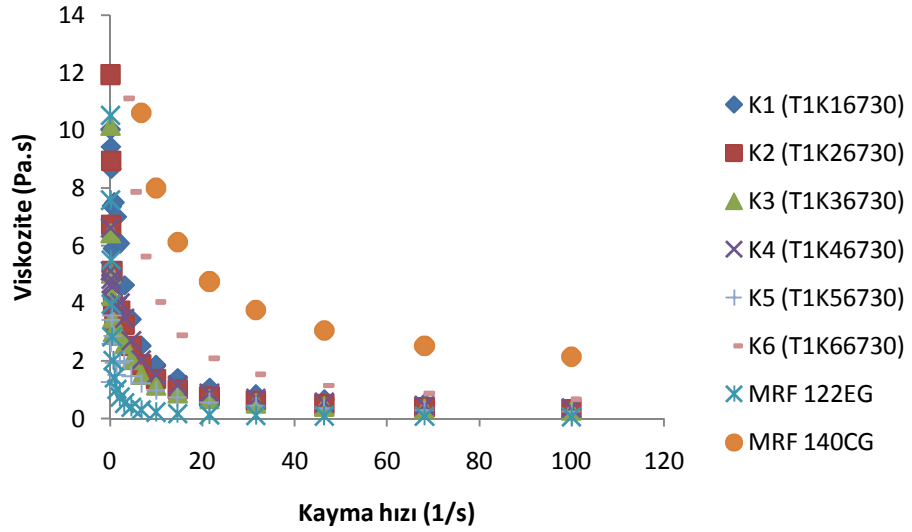
Farklı manyetik tanecikler ile hazırlanan MR akışkanların kayma gerilmelerinin kayma hızıyla değişimleri, Şekil 4.5, incelendiğinde, MRF 140 CG kodlu ticari MR akışkan dışındaki diğer MR akışkanların kayma gerilmelerinin 5 s^{-1} kayma hızı değerine kadar hızlı bir şekilde arttığı; bu değer üzerinde ise, doğrusal ama daha yavaş bir şekilde arttığı dikkat çekmektedir. Kayma hızı ile kayma gerilmesi arasında doğrusal bir ilişki bulunması Newtonian akışkan davranışını yansıtmaktadır. Dolayısıyla katkı maddesi kullanılmadan hazırlanan bu MR akışkanların 5 s^{-1} kayma

hızı üzerinde Newtonian akışkan özelliği gösterdiği söylenebilir. MRF 140 CG ticari akışkanın hem bu çalışmada hazırlanan hem de yine aynı firmadan sağlanan diğer ticari akışkandan (MRF 122 EG) daha yüksek bir kayma gerilmesine sahiptir. 5 s^{-1} kayma hızının üstündeki hızlarda bu akışkan içinde kayma gerilmesi ile kayma hızı arasında doğrusal bir ilişki göze çarpmaktadır.

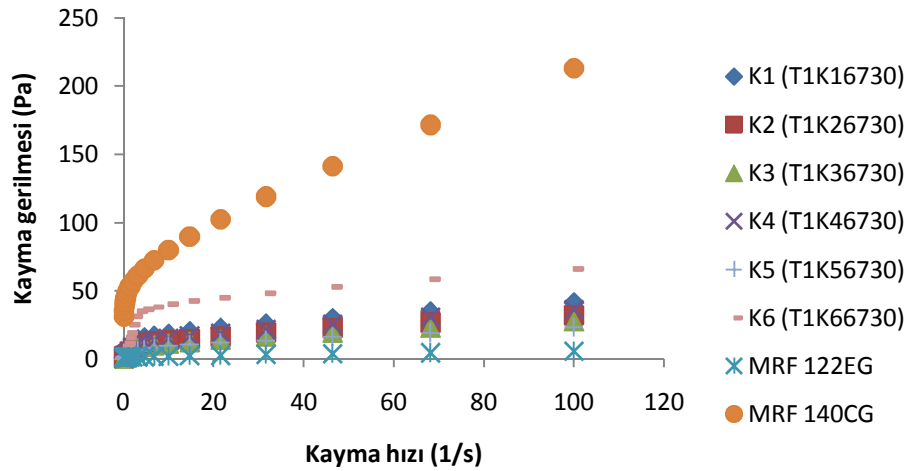
4.3.2 Katkı Maddelerinin Reolojik Özelliklere Etkisi

Bu çalışmada, hazırlanan MR akışkanların reolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi bu katkı maddeleri K-1, K-2, K-3, K-4, K-5 ve K-6 olarak kodlanmıştır ve özellikleri bölüm 3.1’ de verilmiştir. Bu katkıların manyetik alanın mevcut olmadığı koşullarda akışkanların reolojik özelliklerine olan etkileri incelencektir. Bu bölümde T-1, T-2, T-3 ve T-5 manyetik tanecikleri kullanılarak 24 farklı MR akışkan elde edilmiştir.. Belirtilen katkı maddeleri ile T-1 manyetik taneciğinin sırasıyla kütlece %3 ve %67 oranlarında karıştırılarak elde edilen 6 farklı MR akışkanın (T1K16730, T1K26730, T1K36730, T1K46730, T1K56730 ve T1K66730) çeşitli kayma hızlarına karşılık gelen viskozite değerleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. T-2 manyetik taneciğinin kütlece %60 ve katkı maddelerinin %5 oranında karıştırılarak elde edilen MR akışkanların (T2K16035, T2K26035, T2K36035, T2K46035, T2K56035 ve T2K66035), kütlece %67 T-3 manyetik taneciğinin, kütlece %3 katkı maddeleri ile karıştırılarak hazırlanan MR akışkanların (T3K16730, T3K26730, T3K36730, T3K46730, T3K56730 ve T3K66730), yüzeyi silika ile muamele edilmiş olan T-5 manyeticiğinin %60 oranında ve katkı maddelerinin %5 oranında karıştırılarak elde edilen MR akışkanların (T5K16035, T5K26035, T5K36035, T5K46035, T5K56035 ve T5K66035) viskozite değerleri EK-E.2’de verilmiştir.

Katkısız MR akışkanlarda olduğu gibi, viskozitenin kayma hızındaki artışa bağlı olarak önce hızla düştüğü, sonra bu düşüşün oldukça yavaşladığı görülmektedir. Bu genel davranış ticari akışkanlarda dahil bütün MR akışkanlar için geçerlidir. Bu grafiklerde 10 s^{-1} kayma hızı bir kırılma noktası gibi görünmektedir. Bu noktadan önce hızlı, sonra oldukça yavaş bir değişme (düşme) gerçekleşmektedir. Sentezlenen tüm akışkanlarının kayma hızlarına karşılık gelen kayma gerilmesi değerleri, sırasıyla, Şekil 4.7 ve EK-E.3’te gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, katkı maddelerinin değiştirilmesi kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkinin şeklini temelde çok fazla etkilememektedir.



Şekil 4.6 : Manyetik alanın bulunmadığı durumda, katkı maddelerinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi. Manyetik tanecik; T-1



Şekil 4.7 : Manyetik alanın bulunmadığı durumda, katkı maddelerinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi. Manyetik tanecik; T-1

Kayma gerilmesi başlangıçta hızla artmakta, ancak kayma hızının 10 s^{-1} olduğu noktadan sonra değişim yavaşlamaktadır. Ancak, viskozite değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu çalışmada hazırlanan MR akışkanların viskoziteleri ve kayma gerilmeleri, ticari akışkanlardan birininkinden (MRF 140CG) daha düşük, diğerininkinden (MRF 122EG) daha yüksek olmuştur. Ancak T2K66035 ile T5K66035 akışkanlarının viskozite ve kayma gerilmesi değerleri MRF 140CG kodlu ticari akışkan ile 35 s^{-1} kayma hızına kadar yaklaşık aynı değerlerde olduğu

gözlemlenmiştir. Bu hızdan sonra ise T2K66035 ile T5K66035 akışkanlarının kayma gerilmesi değişiminde yavaşlama gözlemlenmiştir.

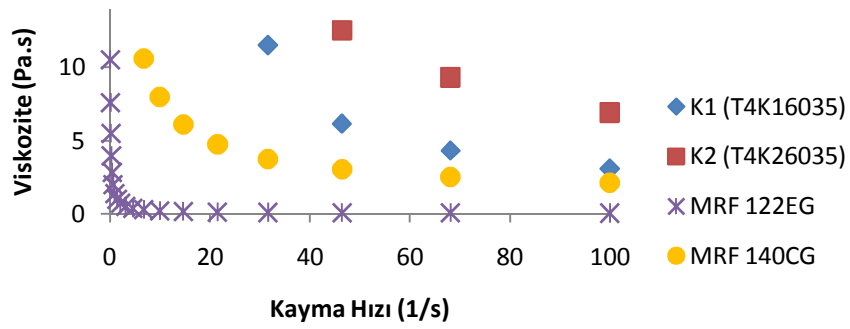
K-6 katkısı kendi özelliklerinden dolayı akışkan viskozitesini en fazla etkilemektedir. Kullanılan katkı maddelerinin yapısında SiO_2 bulunmaktadır. SiO_2 organik ortam içerisinde dağıldığında tiksotropik jel yapma ve kendi içinde ağ yapısı oluşturma özelliğine sahiptir. SiO_2 'in organik ortam içerisinde dağılarak kendi içinde oluşturduğu ağ yapısı EK-F'de gösterilmiştir. Oluşan ağ yapısı, kayma hızı etkisi ile bozulduğundan; viskoziteyi ve kayma gerilmesini artırır. Dört farklı manyetik tanecik kullanılarak hazırlanan akışkanlarla yapılan ölçümlerde, K-1 isimli katkı maddesinin, MR akışkanların viskozite ve kayma gerilmelerini diğer dört katkı maddelerine kıyasla daha çok değiştirdiği belirlenmiştir. Bunun nedeni; K-1 katkı maddesinin, SiO_2 içeriğinin ve yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır. Bu durum; katkı maddelerinin tanecik boyutları ve yoğunluğu kadar içeriklerindeki SiO_2 miktarlarının da MR akışkanların reolojik özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi katkı maddesi ilavesi olmadan hazırlanmış olan MR akışkanlarda, kayma gerilmesi değerlerindeki artış bu kadar büyük olmadığı gibi; kırılma noktası da bu kadar keskin değildir.

Katkı çeşidinin viskozite ve kayma gerilmesine olan etkileri T-1, T-2 ve T-5 taneciklerinde sistematik biçimde değişmektedir. K-6 katkısının viskozite ve kayma gerilmesi değerlerine etkisinin büyük olduğu gözlenmiştir. K-6 katkısı piyasada viskozite arttırıcı ajan olarak da bilinmektedir. T-3 taneciğinde K-1 katkısının K-6 katkısına baskınlığı göze çarpmıştır. T-3 taneciği diğer taneciklere göre yüksek saflıktadır. Yüksek saflık elde edilebilmek için T-3 taneciği diğer taneciklerden farklı olarak hidrojen ile indirgenmiş ve içeriğindeki karbon, oksijen ve nitrojen oranı azaltılmıştır. T-3 taneciğinin bu yapısal farklılığı neticesinde K-1 katkısı viskozitesini daha fazla arttırdığı sanılmaktadır.

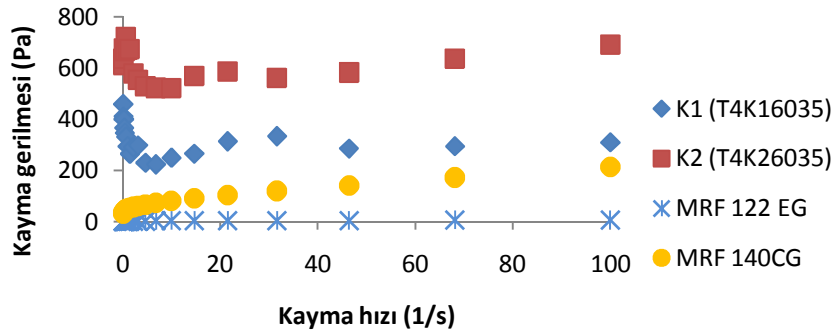
Ticari iki akışkan ile kıyaslandığında, hazırlanan akışkanların reolojik değerlerinin, alt ve üst sınırları bu iki ticari akışkanın reolojik özelliklerinin çizdiği bölge içinde kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.6 ve EK-E.2'de görüldüğü gibi hazırlanan tüm akışkanların viskoziteleri MRF 122EG isimli ticari akışkanın viskozitesinden büyük, MRF 140CG isimli ticari akışkanın viskozitesinden ise küçüktür. Ancak akışkanların viskoziteleri, MRF 122EG akışkanın değerlerine çok daha yakın değerlerde olmuştur. En yakın değerler, T-1 ile hazırlanan T1K36730 akışkanına aittir. Özellikle

30 s^{-1} 'nin üzerindeki kayma hızı değerlerinde, T-1 manyetik taneciği ile hazırlanan MR akışkanlar ile ticari akışkanın reolojik değerleri birbirine oldukça yakındır.

T-4 taneciği, MR akışkanın çökme performansını iyileştirmek amacıyla T-2 taneciğinin polimer kaplanmasıyla elde edilmiştir. Akışkanlarda katkı kullanmanın esas amacı akışkanların çökme performanslarını iyileştirmektir. Bu çalışmada kütlece %60 oranında polimer kaplanmış taneciklerle, %5 oranında katkı maddesi içeren akışkanların reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de verilmiştir.



(a)



(b)

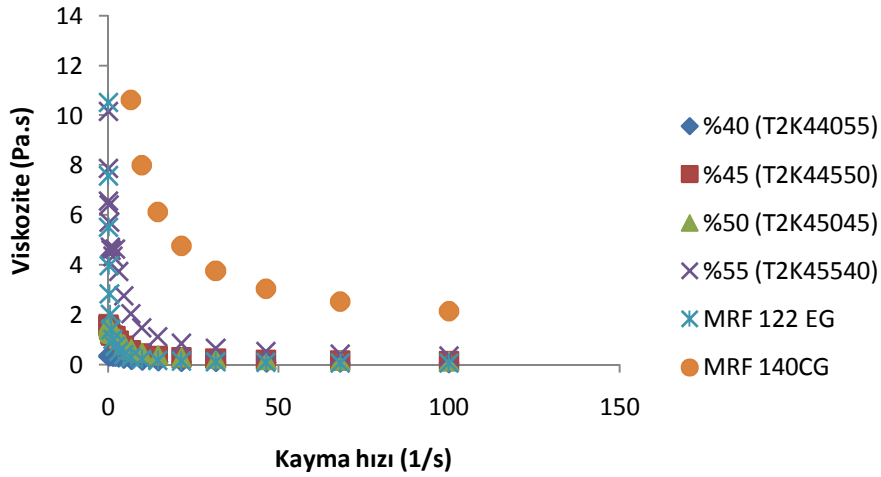
Şekil 4.8 : Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda T-4 taneciği ile hazırlanmış akışkanlarda katkı ilavesinin MR akışkanların reolojik özelliklerine etkisi; a) Viskozitenin kayma hızıyla değişimi, b) Kayma gerilmesinin kayma hızıyla değişimi.

Akışkanların viskozite değerleri her iki ticari akışkandan yüksek oldukları gözlemlenmiştir. Bu durum; poliüretanın kendi arasında kolaylıkla hidrojen bağı oluşturmasından ve katkı maddelerinin kendi aralarında ağ yapısı oluşturmasından

kaynaklanmaktadır. Hidrojen bağları, polimerle kaplı tanecikleri bir arada tutarak akışı zorlaştırmaktadır ve akışkanların viskozitelerini arttırmaktadır. Silika içeren katkı maddeleri kendi aralarında ağ yapısı oluşturmaktadır. Bu yapı sayesinde akışkanın viskozitesi artmaktadır. Ayrıca, katkı maddesi ile polimer arasındaki etkileşim de viskoziteyi arttırmaktadır. Şekil 4.8.b’de $0-10 \text{ s}^{-1}$ kayma hızı aralığında hidrojen bağlarının kırıldığı ve böylece kayma gerilmesinin düştüğü gözlenmektedir. Her iki akışkanın da kayma gerilmesi değerleri ticari akışkanlara göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir

4.3.3 Manyetik Tanecik Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi

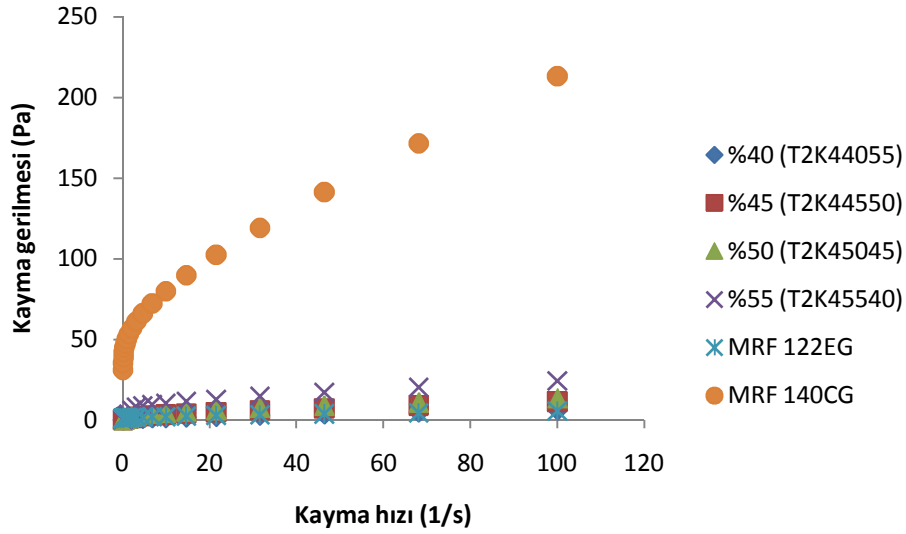
Manyetik tanecik oranının, MR akışkanların reolojik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla, manyetik tanecik ağırlıkça oranı %40 ile %55 arasında değişen 4 adet akışkan hazırlanmıştır. Bu akışkanların hazırlanmasında katkı maddesi olarak K-2 kullanılmış ve bunun ağırlıkça oranı %5’ de sabit tutulmuştur. Böylece hazırlanan MR akışkanlardaki katkı madde miktarı toplam olarak %45 ile %60 arasında değişmiştir. Akışkanların reolojik özellikleri ölçülmüştür. Bulunan sonuçlar Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulmuştur. 10 s^{-1} kayma hızında manyetik tanecik oranına göre viskozite ve kayma gerilmesi değişimleri EK-E.4’te verilmiştir.



Şekil 4.9 : Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda manyetik tanecik oranının akışkanların viskozitelerine etkisi.

Şekillerden görüldüğü gibi tanecik oranındaki değişme, akışkanların reolojik özelliklerini etkileyebilmektedir. Tanecik oranı arttığında, hem viskozite hem kayma

gerilmesinde bir artış meydana gelmektedir, ancak bu artışın sınırlı kaldığını gözden kaçırmamak gerekir.

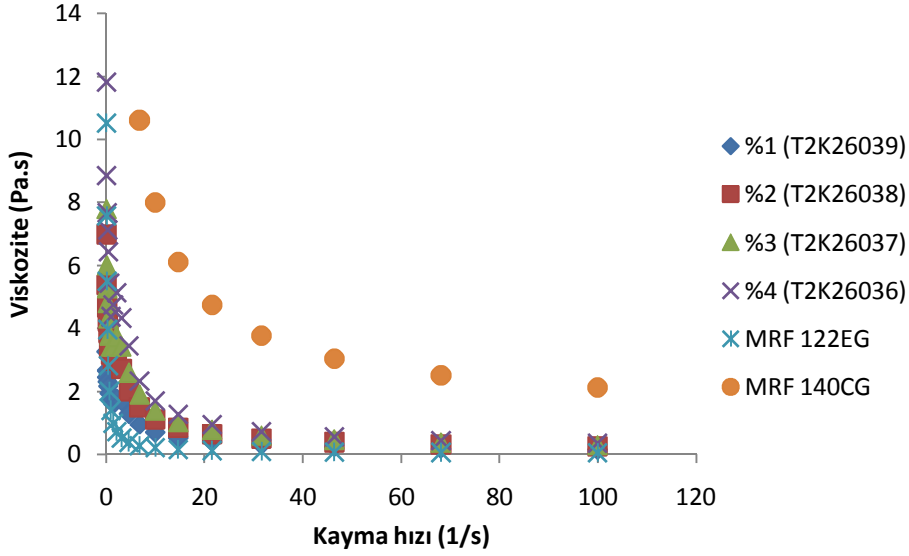


Şekil 4.10 : Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda manyetik tanecik oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

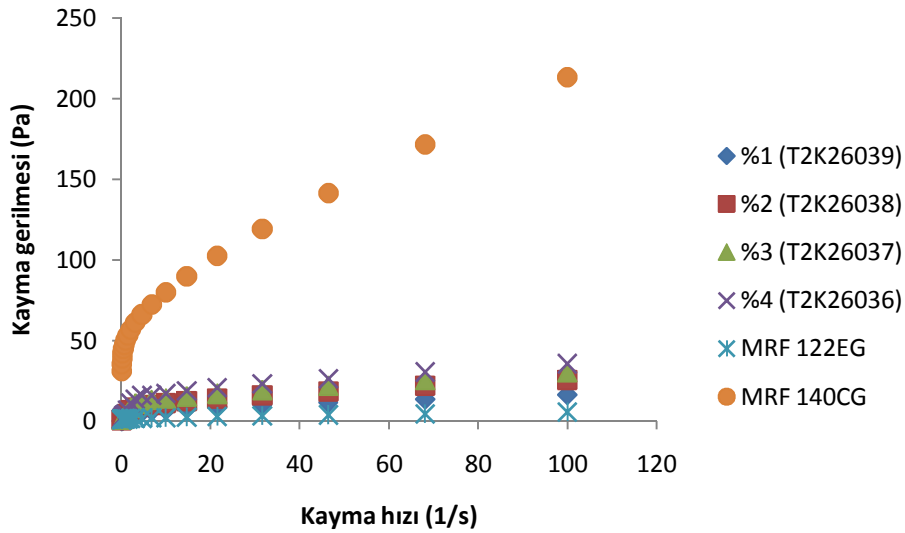
Reolojik özelliklerdeki bu artışın esas nedeni akışkan içerisindeki katı madde miktarının artmasıdır. Ticari akışkanlarla kıyaslandığında, daha önce tartışıldığı gibi, akışkanlar reolojik değerleri ve değişimleri MRF 122 EG isimli ticari akışkanlarınkine çok benzediği görülmektedir.

4.3.4 Katkı Maddesi Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi

Katkı maddesi oranının MR akışkanların reolojik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla K-2 katkı maddesi oranı %1 ile %4 arasında değişen 4 farklı MR akışkan hazırlanmıştır. Hazırlanan akışkanlarda T-2 taneciği oranı %60 da sabit tutulmuştur. Akışkanların içeriğindeki katı madde miktarı toplam %61 ile %64 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sunulmuştur. 10 s^{-1} kayma hızında Katkı maddesi oranı ile reolojik özelliklerin değişimi EK-E.5’te sunulmuştur. Şekillerde görüldüğü gibi katkı oranındaki değişim akışkanların reolojik özelliklerini etkilemiştir. Katkı oranı arttığında hem viskozite hemde kayma gerilmesinde artış olduğu görülmektedir. Bu artışın nedeni katı madde miktarının artması ve katkı maddelerinin kendi aralarındaki etkileşimleridir.



Şekil 4.11 : Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda katkı oranının akışkanların viskozitelerine etkisi.



Şekil 4.12 : Manyetik alanın uygulanmadığı koşullarda katkı oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

Akışkanlar $5s^{-1}$ kayma hızı üzerindeki hızlarda Newtonian akışkan özelliği göstermektedir. Ticari akışkanlar ile kıyaslandığında akışkanların reolojik değerleri MRF 122 EG kodlu ticari akışkanınkine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Ancak MRF 140 CG kodlu ticari akışkanın reolojik değerleri arasında büyük farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Katkı oranı yeterince arttırıldığında MRF 140CG kodlu

akışkan ile benzer viskozite ve kayma gerilmesi değerleri elde edilebilmektedir. EK-E.6'da %10 katkı oranı ile hazırlanan akışkanların reolojik özellikleri verilmiştir.

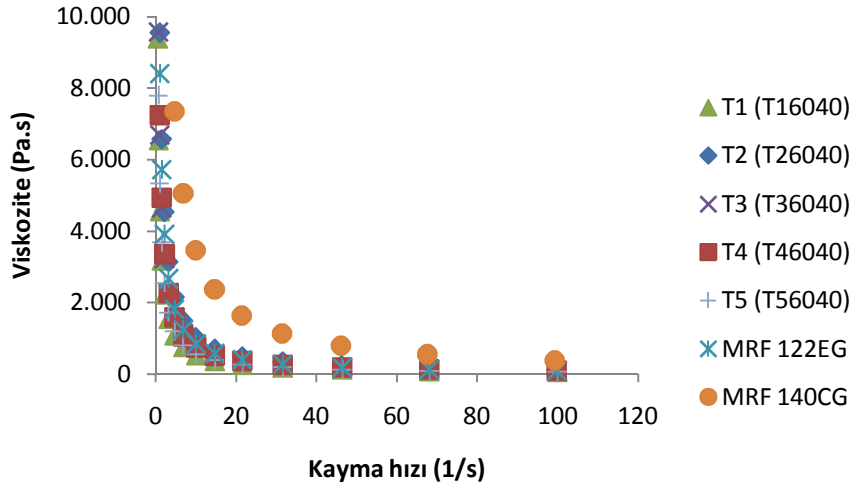
4.4 Manyetoreolojik Akışkanların Manyetoreolojik Özellikleri

Manyetoreolojik özellikler, manyetik alanın uygulandığı koşullarda ölçülen özellikler anlamında kullanılmaktadır. Hazırlanan MR akışkanlar ile ticari akışkanların manyetoreolojik özellikleri, Bölüm 3.4'te açıklanan yöntem kullanılarak manyetik alan mevcudiyetinde incelenmiş ve bu akışkanların viskoziteleri ile kayma gerilmeleri, $0,1-100 \text{ s}^{-1}$ aralığında değişen kayma hızının fonksiyonu olarak grafiklere geçirilmiştir. Çalışmada manyetik tanecik ve katkı maddesi çeşitleri ile bunların oranlarının manyetoreolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Manyetoreolojik özelliklerin tekrarlanabilirliğini gözlemek amacıyla manyetik alan koşullarında aynı akışkan ile üç farklı ölçüm alınmış ve manyetoreolojik özelliklerinin yaklaşık aynı oldukları gözlemlenmiştir. Bu çalışmada verilen sonuçlar bu ölçümlerin ortalama değerleridir. Sonuçlar EK-G.1'de verilmiştir.

4.4.1 Manyetik Tanecik Çeşidinin Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

Manyetik tanecik oranının, akışkanların manyetoreolojik özelliklerine etkisini incelemek için T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 tanecikleri kullanılarak 5 farklı MR akışkan hazırlanmıştır. Tanecik oranı %60 olarak sabit tutulmuştur. Sentezde tek taşıyıcı sıvı kullanılmıştır. Akışkanların manyetoreolojik ölçüm sonuçları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Aynı şekillerde, kıyaslama amacıyla iki ticari akışkanın (MRF 122EG ve MRF 140CG) özellikleri de konulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde tanecik çeşidinden bağımsız olarak akışkanların benzer bir davranım gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi kayma hızındaki artışa bağlı olarak viskozite $0-30 \text{ s}^{-1}$ aralığında hızla düşmüş, daha sonra çok yavaş bir şekilde düşmeye devam etmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gözlenen manyetik alanın mevcut olduğu koşullardaki akışkanların reolojik özelliklerindeki değişimin benzer olduğu gözlemlenmiştir. T5 taneciği ile hazırlanan akışkanın viskozite değerleri manyetik alan koşullarında azalma gözlenmiştir. Manyetik alan koşullarında 10 s^{-1} kayma hızında T26040 akışkanının viskozitesi manyetik alan bulunmadığı koşullardaki viskozitesine göre 10^3 kat artarken, T46040 akışkanının viskozitesi

$5,4 \times 10^2$ kat artmıştır. Bu sonuçlara göre polimer kaplama işlemi, korozyon ve oksidasyonu önlerken, taneciğin manyetik özelliklerini azaltmıştır.



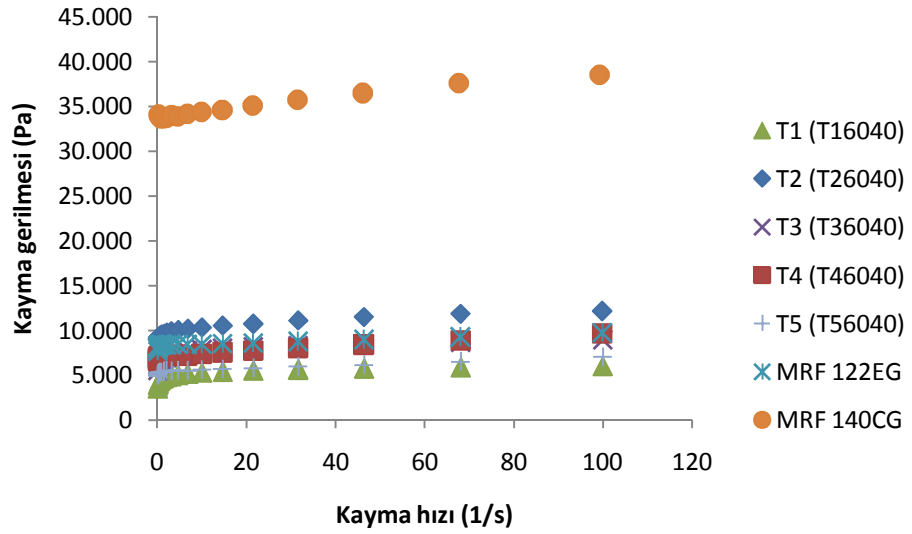
Şekil 4.13 : Manyetik alanın uygulandığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi.

T56040 akışkanının viskozitesi manyetik alan koşullarında manyetik alan bulunmadığı koşullara göre 8×10^2 kat artmıştır. T-5 tanecikleri yüzeylerinin silika ile muamele edilmesi bu artışın diğer taneciklere göre düşük kalmasının nedenidir. T16040 ve T36040 akışkanlarının viskoziteleri manyetik alan koşullarında ve 10 s^{-1} kayma hızında sırasıyla $4,5 \times 10^3$ ve $2,7 \times 10^3$ kat artış göstermiştir. En fazla değişim T-1 taneciği ile hazırlanan T16040 akışkan viskozitesinde meydana gelmiştir ancak manyetik alan altında en düşük viskozite değerine de bu akışkan sahiptir.

T-3 manyetik taneciği ile hazırlanan MR akışkanın viskozitesinin, manyetik alanın bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda MRF 122 EG kodlu ticari akışkanın viskozitesine oldukça benzer olduğu gözlemlenmiştir. 10 s^{-1} kayma hızında, MRF 140 CG kodlu ticari akışkanın viskozitesinin T36040 akışkanın viskozitesine göre sırasıyla, manyetik alanın bulunduğu durumlarda 4,4 ve bulunmadığı durumlarda 27 katı olduğu belirlenmiştir. Aynı kayma hızında MRF 140 CG kodlu ticari akışkanın viskozitesinin T26040 akışkan viskozitesine göre, manyetik alanın bulunduğu durumda 3,3 ve bulunmadığı durumda 8,7 katı olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, T36040 ve T46040 akışkanlarının viskoziteleri, 20 s^{-1} kayma hızında ve manyetik alan mevcudiyetinde, MRF 122 EG kodlu ticari akışkanın viskozitesi ile

eşleşmişlerdir. T56040 akışkanı ile T16040 akışkanının viskoziteleri yakınlık göstermiştir.

Farklı manyetik tanecikler ile hazırlanan MR akışkanların manyetik alan mevcudiyetindeki kayma gerilmelerinin kayma hızıyla değişimleri incelendiğinde T36040 ve T46040 akışkanların kayma gerilmesi değerlerinin, MRF 122 EG kodlu ticari akışkanınkiyle oldukça benzer olduğu Şekil 4.14’ den gözlemlenmiştir. T16040 ve T56040 akışkanlarının kayma gerilmesi değerleri, diğer üç akışkanın kayma gerilmesi değerlerinden daha düşük olduğu; T26040 akışkanının kayma gerilmesi değerlerinin ise, diğer dört akışkanın kayma gerilmesi değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Buna göre; polimer ile kaplama işlemi manyetik etkiyi azaltmıştır. Ayrıca, tüm akışkanların birbirinden farklı akma gerilmesi değerlerine sahip oldukları ve manyetik alan koşullarında Bingham plastik davranışı gösterdikleri gözlenmiştir.



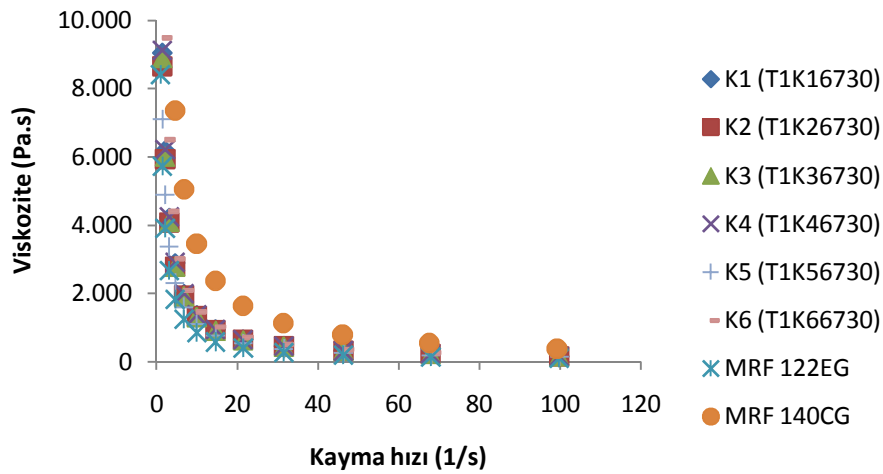
Şekil 4.14 : Manyetik alanın uygulandığı koşullarda, manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

4.4.2 Katkı Maddesi Çeşidinin Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

Bu çalışmada, özellikleri daha önce verilmiş katkı maddeleri (K-1, K-2 K-3, K-4 ve K-5) ile 24 çeşit akışkan hazırlanmıştır. Bu akışkanlar hazırlanırken dört farklı tanecik (T-1, T-2, T-3 ve T-5) kullanılmıştır. T-1 ve T-3 manyetik taneciği ile hazırlanan tüm akışkanların ağırlıkça katkı oranı %3 olup toplamda %70 katı tanecik içermektedir. T-2 ve T-5 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların katkı oranı %5 olup

toplam katı maddesi oranı %65 olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan akışkanların manyetik alanın mevcut olduğu koşullardaki manyetoreolojik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar T-1 taneciği için Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’ da sunulmuştur. Diğer tanecikler için elde edilen sonuçlar EK-G.2 ve EK-G.3’te verilmiştir.

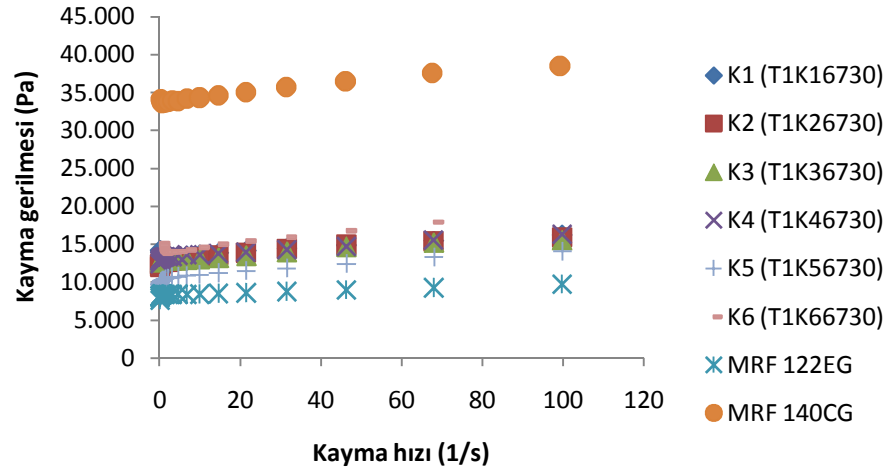
Şekil 4.15 ve EK-G.2’de katkı maddelerinin farklı manyetik tanecikler kullanılarak hazırlanan akışkanların manyetoreolojik özelliklerine olan etkisi görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi katkı maddeleri akışkanın viskozitesinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Sentezlenen akışkanlarla ticari akışkanların birisinin (MRF 122 EG) viskoziteleri birbirine çok yakın olduğu dikkat çekmektedir. Kayma hızının 40 s^{-1} üstüne çıktığında fark iyice küçülmüştür. İkinci ticari akışkanın (MRF 140 CG) viskoziteleri bütün akışkanların viskozite değerlerinden daha büyüktür. katkı maddelerinin tanecik boyutları ile SiO_2 içeriklerinin viskozite üzerindeki etkileri ise, bu tanecikler için gözlenememiştir. T-2 taneciği ile hazırlanan akışkanlarda, 10 s^{-1} kayma hızında, katkı maddesi akışkan viskozitesini ortalama 1,35 kat artmaktadır.



Şekil 4.15 : Manyetik alanın varlığında, katkı maddelerinin MR akışkanların viskozitelerine etkisi. Manyetik tanecik; T-1

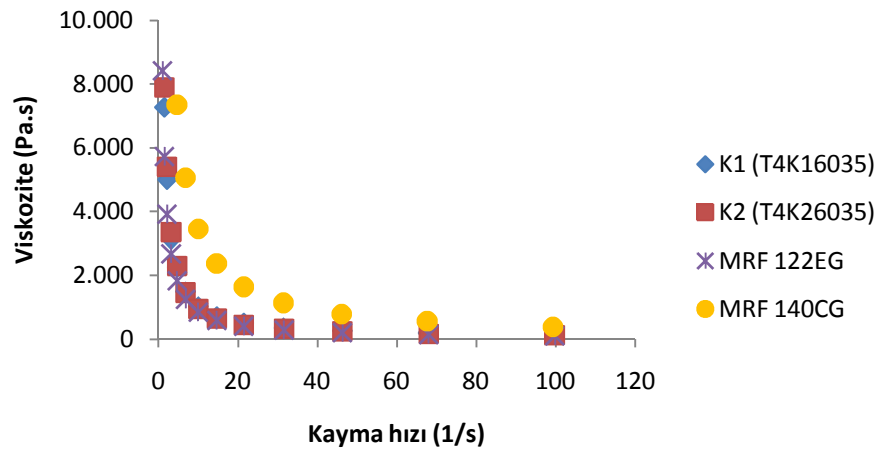
Bu çalışmada hazırlanan MR akışkanların kayma hızlarına karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 4.16 ve EK-G.3’te verilmiştir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi, katkı maddelerinin MR akışkanların kayma gerilmelerine önemli bir etkisi olmamıştır. Katkılı akışkanların kayma gerilmelerinin kayma hızıyla değişimi katkısız MR

akışkanlarınkine benzerdir. Kullanılan katkı ve manyetik taneciklere akışkanların kayma gerilmesinde farklılıklar göze çarpmamaktadır.



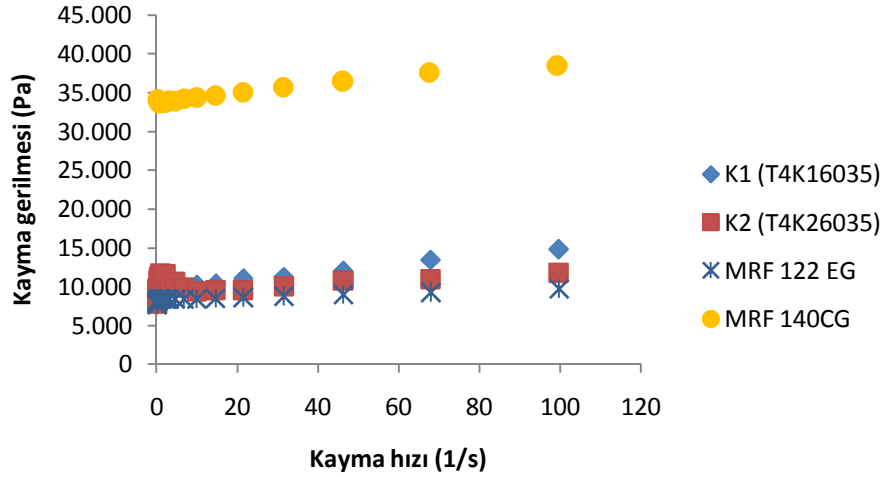
Şekil 4.16 : Manyetik alanın varlığında, katkı maddelerinin MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi. Manyetik tanecik; T-1

Polimerle kaplama ve katkı ilavesi akışkanların çökme özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Kütlece %60 oranında T-4 taneciğine, %5 oranında katkı maddesi eklenerek hazırlanan akışkanların manyetoreolojik özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.17’de verilmiştir.



(a)

Şekil 4.17 : Manyetik alan koşullarında, katkı maddelerinin T-4 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların reolojik özelliklerine etkisi; a) viskozitenin kayma hızıyla değişimi, b) kayma gerilmesinin kayma hızıyla değişimi.



(b)

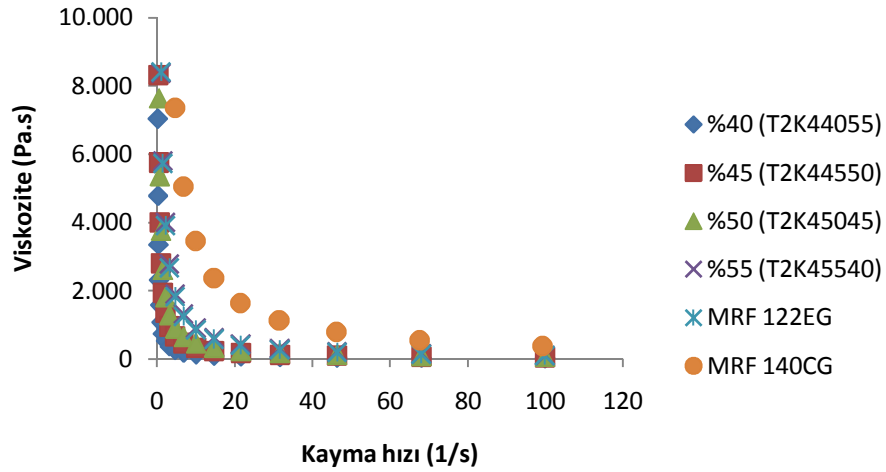
Şekil 4.17 (devam): Manyetik alan koşullarında, katkı maddelerinin T-4 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların reolojik özelliklerine etkisi; a) viskozitenin kayma hızıyla değişimi, b) kayma gerilmesinin kayma hızıyla değişimi.

Polimerle kaplama MR etkiyi azaltmaktadır. Manyetik alanın bulunmadığı koşullarda, akışkanların reolojik özellikleri her iki ticari akışkandan yüksek iken; manyetik alan koşullarında, manyetik etkinin azalması sonucu akışkanların reolojik özellikleri azalmıştır. Şekil 4.17’de her iki akışkanın kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin MRF 122EG kodlu akışkan ile benzer olduğu ve MRF 140CG kodlu akışkandan düşük olduğu gözlenmiştir.

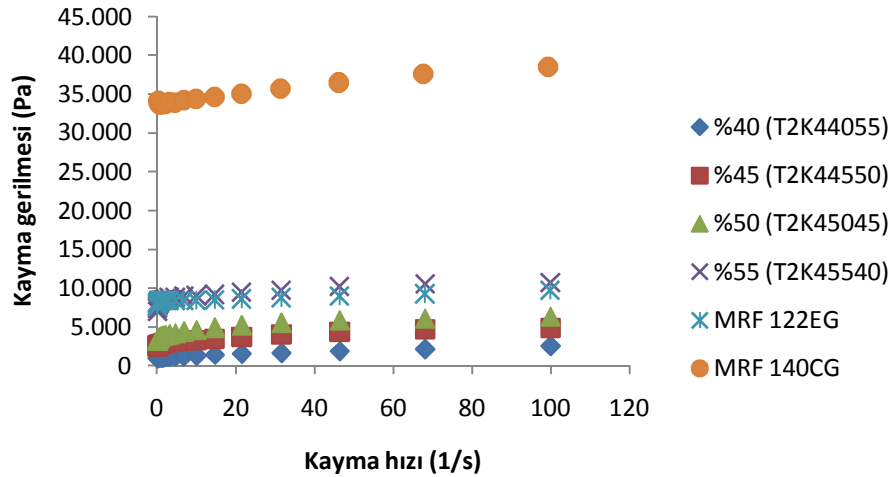
4.4.3 Manyetik Tanecik Oranının Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

Manyetik tanecik oranının sentezlenen akışkanların manyetoreolojik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, manyetik taneciklerin oranları değiştirilerek akışkanlar hazırlanmıştır. Akışkanları hazırlamak için T-2 manyetik taneciği ve K-4 katkı maddesi kullanılmıştır. Manyetik taneciklerin oranı %40 ile %55 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir. Manyetik tanecik derişimindeki değişim, viskozite - kayma hızı ilişkisindeki genel davranımını değiştirmedeği görülmektedir. Bütün akışkanların viskozitesi kayma hızı ile düşmektedir. Kayma hızı 20 s⁻¹ olduğu noktadan sonra, viskozitedeki düşme/değişme oldukça yavaşlamakta ve ihmal edilecek değerlere inmektedir.

10 s⁻¹ kayma hızında Manyetik tanecik oranı ile manyetoreolojik özelliklerinin değişimi EK-G.4’te verilmiştir. Tanecik oranı arttıkça viskozite de önemli miktarlarda artış gözlenmektedir. Bunun nedeni tanecik sayısı arttıkça, manyetik alan varlığında taneciklerin oluşturduğu zincir sayısının artmasıdır. Ticari akışkanlar ile kıyaslandığında, sentezlenen akışkanların viskozite-kayma hızı ilişkisi MRF 122EG ticari akışkanlarına oldukça benzer olduğu, buna karşı MRF 140CG’ den bir hayli farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18 : Manyetik alanın varlığında, manyetik tanecik oranlarının akışkanların viskozitelerine etkisi

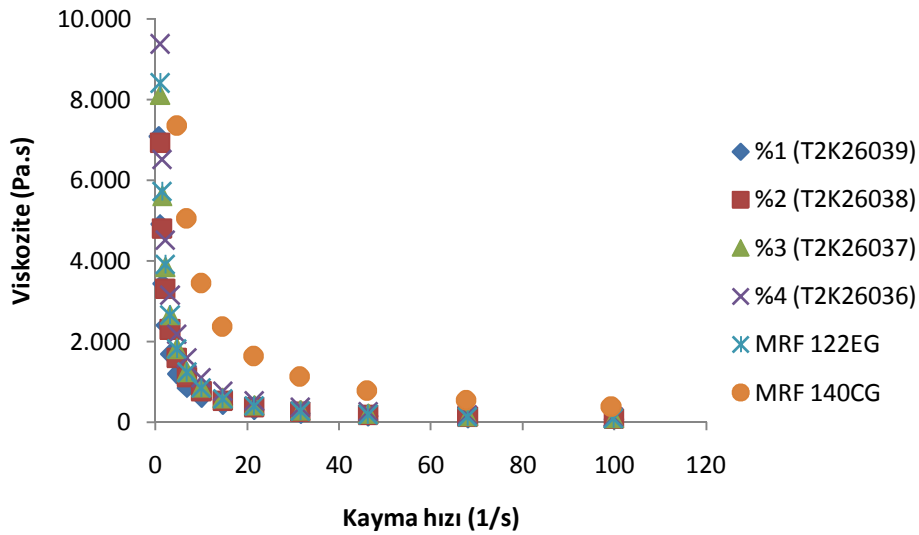


Şekil 4.19 : Manyetik alanın varlığında, manyetik tanecik oranlarının akışkanların kayma gerilmesine etkisi

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, manyetik tanecik oranı MR akışkanların kayma gerilmesi davranımını değiştirmemektedir. Kayma hızındaki artışa bağlı olarak, kayma gerilmesinde hafif bir artış bütün akışkanlarda görülmektedir. Yüksek kayma hızlarında, akışkanların kayma gerilmelerinin büyüklükleri arasındaki fark gittikçe kaybolmuştur.

4.4.4 Katkı Maddesi Oranının Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

Katkı maddesi oranının sentezlenen akışkanların manyetoreolojik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla katkı oranları %1 ile %4 arasında değişen akışkanlar hazırlanmıştır. Akışkanların hazırlanmasında T-2 manyetik taneciği ile K-2 katkı maddesi kullanılmıştır. Hazırlanan MR akışkanların kayma hızlarına karşılık gelen viskozite ve kayma gerilmesi değerleri, sırasıyla, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

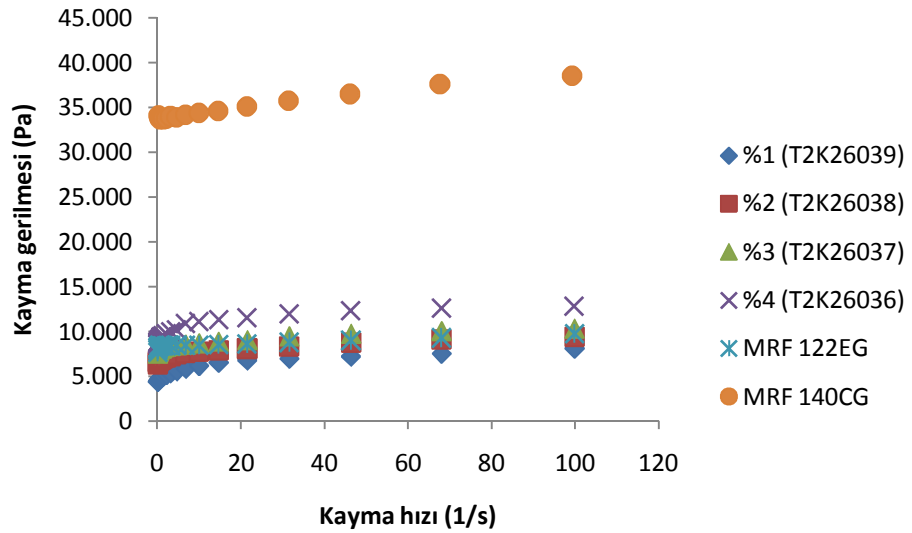


Şekil 4.20 : Manyetik alanın varlığında, katkı maddesi oranının akışkanların viskozitelerine etkisi

Katkı maddesi oranındaki değişim viskozite- kayma hızı ilişkisindeki genel davranışı değiştirmemiştir. Sentezlenen akışkanların viskoziteleri kayma gerilmesi ile azalmakta olup bu değişim 40 s^{-1} kayma hızına kadar hızlı bu noktadan sonra daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. 10 s^{-1} kayma hızında katkı oranı ile manyetoreolojik özelliklerin değişimi EK-G.5’te verilmiştir. Katkı maddesi arttıkça akışkan viskozitesi de artmaktadır. Sentezlenen akışkanların viskozite kayma hızı arasındaki değişim MRF 122EG kodlu ticari akışkan ile çok benzer olduğu ancak MRF 140CG

kodlu ticari akışkandan düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca T2K26037 kodlu akışkan ile MRF 122EG kodlu akışkanların aynı kayma hızlarında eş viskozite değerlerine sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi kayma hızı ile kayma gerilmesi başlarda biraz daha hızlı değişmekte olup 10 s^{-1} kayma hızından sonra değişmemektedir. MRF 122EG kodlu ticari akışkan ile T2K26037 kodlu akışkanın manyetoreolojik özellikleri aynı kayma hızlarında eş olduğu gözlemlenmiştir. Katkı oranı %10’a çıkarıldığında, manyetik alanın bulunmadığı koşullarda akışkanların viskozite ve kayma gerilmesi değerleri MRF 140CG kodlu akışkanına yaklaştığı gözlemlenmiştir. %10 katkı oranının akışkanların manyetoreolojik özelliklerine etkisi EK-G.6’da verilmiştir. Akışkanların akma gerilmelerinin 20-25 kPa arasında yer aldığı ve katkı oranı %4 T2K26036 akışkanın akma gerilmesinin iki katına ulaştığı gözlemlenmiştir.

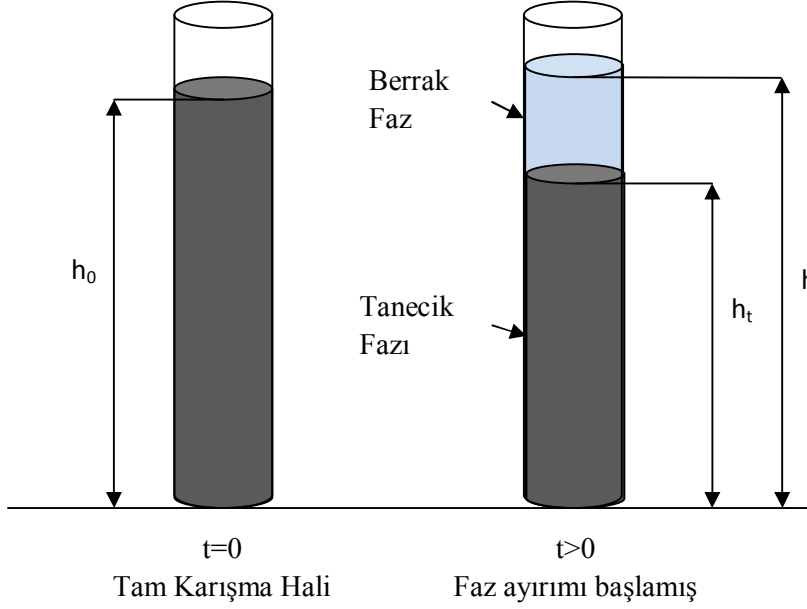


Şekil 4.21 : Manyetik alanın varlığında, katkı maddesi oranının akışkanların kayma gerilmesine etkisi

4.5 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özellikleri

MR akışkanların bileşenlerinin yoğunlukları birbirlerinden çok farklıdır. Manyetik tanecik yoğunluğu, kullanılan yağın yoğunluğuna göre daha fazla olduğundan; akışkan kendi haline bırakıldığında, faz ayrımı gözlenir. Bu faz ayrılması süreci, çökme oranı temel alınarak irdelenir. Bu çalışmada çökme oranı, katı tanecik içermeyen berrak fazın oluşma hızı olarak tanımlanmış ve katı tanecikler içeren fazın

yüksekliğinin, akışkan yüksekliğine oranı olarak formüle edilmiştir. Bu durum Şekil 4.22’de şematik olarak gösterilmiştir.



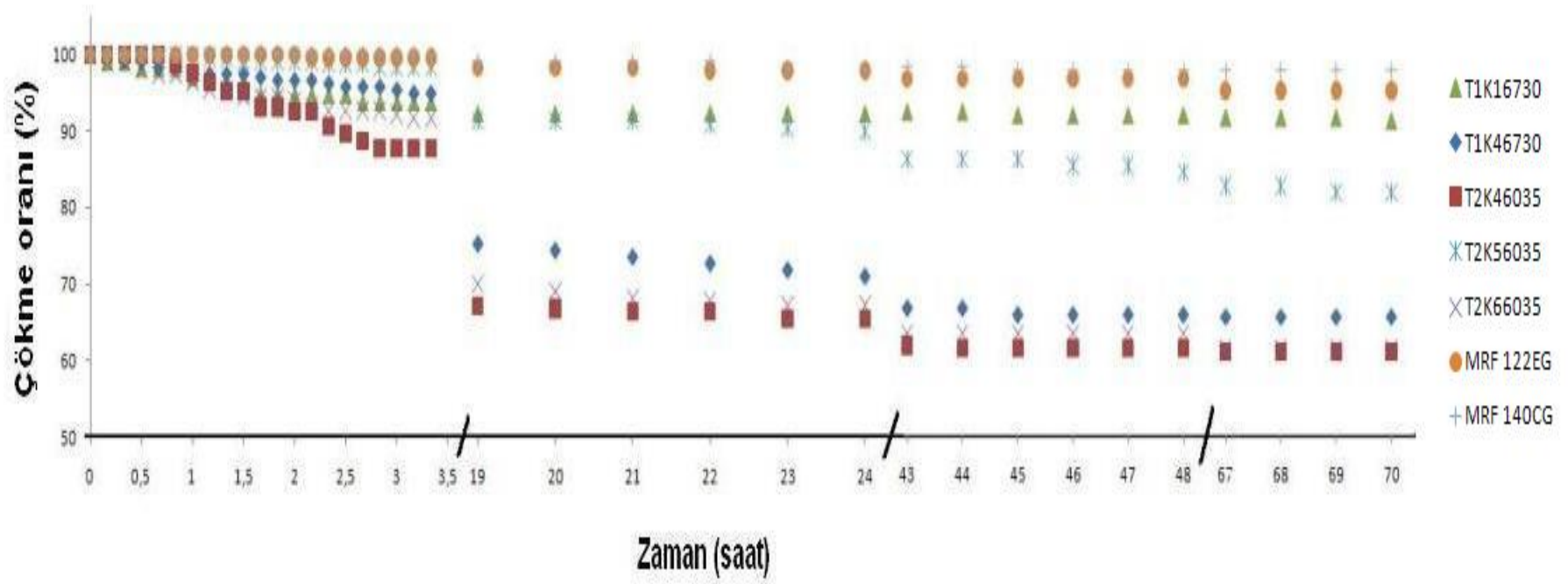
Şekil 4.22 : Çökme Oranı Tanımı.

$$\text{Çökme Oranı} = \frac{h_t}{h} \times 100$$

4.1

Denklemden h_t, t anındaki katı faz yüksekliği h, akışkan yüksekliği olarak tanımlanmıştır. h₀ başlangıç anındaki akışkan yüksekliğidir.

Laboratuvar ortamında hazırlanan MR akışkanlar ile ticari akışkanların çökme özellikleri, Bölüm 3.5’te açıklanan yöntem kullanılarak incelenmiş ve bu akışkanların çökme oranları, 0–102 dak. aralığında değişen zamanın fonksiyonu olarak incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan manyetik tanecik ve katkı maddesinin tipi ve akışkan içerisindeki kütle oranlarının, çökme özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çeşitli katkı maddeleri ve manyetik tanecikler ile oluşturulan bazı akışkanların 70 saat boyunca çökmeleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.23’te verilmiştir. T1K16730 kodlu akışkan hariç akışkanların ilk 3 saat boyunca gözlenen çökme oranları sıralaması, 70 saat sonunda da değişmemiştir. Bu akışkan 20 saat sonraki çökme oranı ticari akışkanlara en yakın değerdedir ve bu durumun 70 saate kadar aynı kaldığı gözlenmiştir. K-1 katkısı diğer katkı maddeleri arasında en yüksek SiO₂ oranına ve en düşük tanecik boyutuna sahiptir.

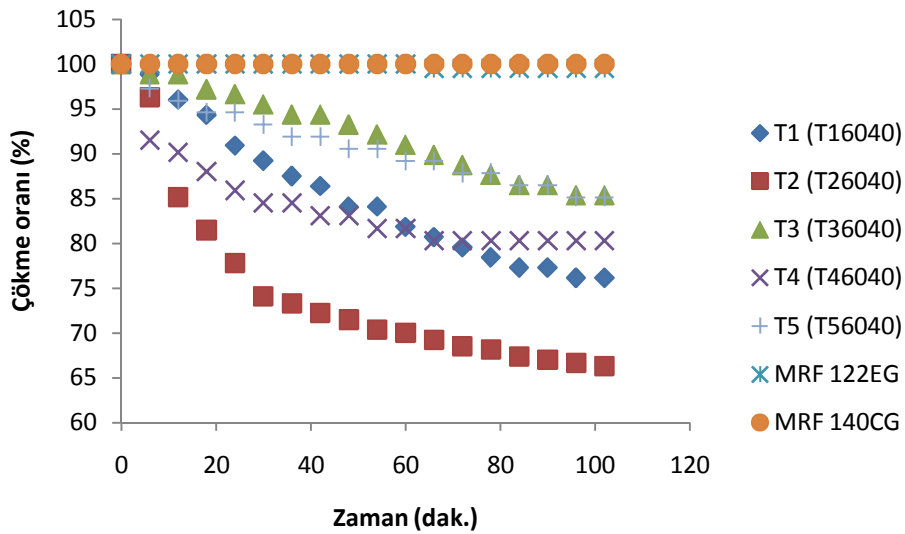


Şekil 4.23 : Bazı MR akışkanların çökme oranlarının zamanla değişimi.

Tanecik boyutu çökme özelliğini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. SiO_2 'in oluşturduğu ağ yapı akışkanların çökmelerini yavaşlatmaktadır. K-6 katkısı piyasada çökme önleyici ve viskozite artırıcı olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen K-6 katkısı ile hazırlanan T2K66035 akışkanı 70 saat sonunda en fazla çöken akışkanlar arasında yer almaktadır. T2K56035 akışkanının 70 saatin sonunda %82 çökme oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Akışkanların uzun süreli çökmesinde katkı ve tanecik çeşidinin önemi görülmüştür. K-1 ve K-5 katkılarının oluşturduğu güçlü jel yapı sonucunda bu katkıların kullanıldığı akışkanların en az çökme oranına sahip olduğu görülmektedir. Çökme sonuçlarının tekrarlanabilirliğini gözlemlemek için T16040 akışkanı ile değişik zamanlarda üç farklı ölçüm alınmıştır. Sonuçlar EK-H.2'de verilmiştir. Bu çalışmada verilen sonuçlar bu ölçümlerin ortalama değerleridir.

4.5.1 Manyetik Tanecik Çeşidinin Çökme Oranına Etkisi

Manyetik taneciklerin, MR akışkanların çökme özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, kütle oranları sabit tutularak, beş farklı tanecik ile MR akışkanlar hazırlanmış ve çökme özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.24'te verilmiştir. Kıyaslama amacıyla 2 adet ticari MR akışkanın çökme hızları da aynı grafikte gösterilmiştir. MR akışkanların yoğunlukları ile tanecik boyutları, çökme özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadırlar.



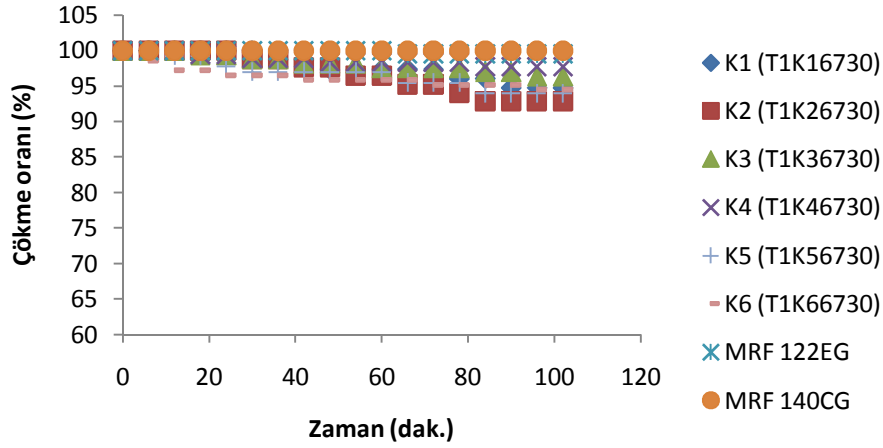
Şekil 4.24 : Manyetik tanecik çeşidinin MR akışkanların çökme oranına etkisi.

Farklı manyetik tanecikler ile hazırlanan MR akışkanların çökme oranlarının zamanla değişimleri incelendiğinde, yoğunluğu ve tanecik boyutu diğer taneciklerden daha küçük olan T-3 ve T-5 manyetik tanecikleri ile hazırlanan T36040 ve T56040 akışkanların çökme hızlarının, diğer akışkanlara kıyasla daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yandan, T-2 manyetik taneciği ile hazırlanan T26040 akışkanının çökme özelliklerinin, hazırlanan diğer akışkanlara kıyasla daha kötü olduğu; ancak, bu taneciğin polimer ile kaplanması yoluyla elde edilen T-4 manyetik taneciği ile hazırlanan T46040 akışkanının çökme özelliklerinin ise, T26040 akışkanının çökme özelliklerinden daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bunun olası nedeni, polimer kaplamadan sonra taneciklerin yoğunluklarının düşmesidir. Daha önce tartışıldığı gibi, polimer kaplama akışkanların manyetik alan altında viskozite ve kayma gerilmelerini düşürmüş olmasına karşı çökme sürecini yavaşlamıştır. MRF 140CG kodlu ticari akışkanın bu zaman dilimi içerisinde hiç çökmediği, MRF 122EG kodlu akışkanı ise düşük oranda çöktüğü gözlemlenmiştir. T36040 ve T46040 kodlu akışkanların çökme özelliklerinin ticari akışkanlara en yakın oldukları gözlemlenmiştir.

4.5.2 Katkı Maddesi Çeşidinin Çökme Oranına Etkisi

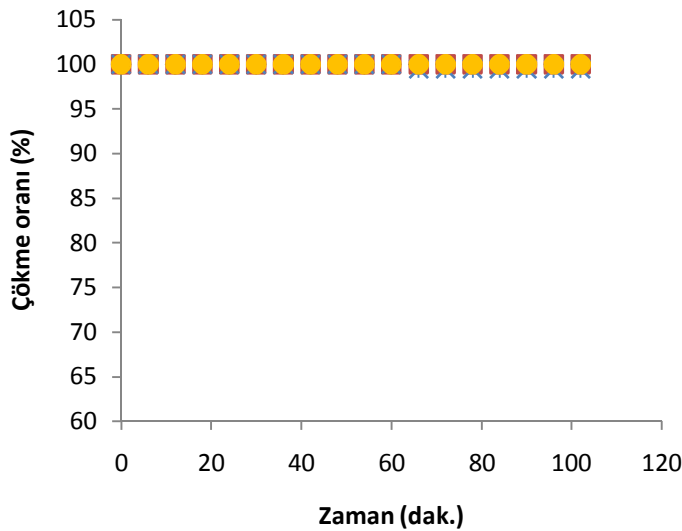
Katkı maddelerinin, akışkanların çökme özelliklerine olan etkisini incelemek için altı farklı katkı maddesi ve dört farklı manyetik tanecikle (T-1, T-2, T-3 ve T-4) hazırlanmış MR akışkanların çökme oranları Şekil 4.25 ve EK-H.3'te verilmiştir. Yine kıyaslama amacıyla iki ticari akışkanın çökme oranları aynı grafiklerde verilmiştir. T-1 manyetik taneciği ve %3 oranında katkı maddeleri ile hazırlanan akışkanlar Şekil 4.25'te verilmiştir. Diğer manyetik taneciklerle hazırlanan akışkanlar EK-H.3'te verilmiştir.

Şekiller incelendiğinde, katkı maddelerinin MR akışkanların çökme özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Katkı malzemesinin tanecik boyutu azaldıkça akışkanın çökmesini engellemektedir. Ayrıca katkı malzemesinin yoğunluğu ne kadar az ise manyetik taneciklerin çökmesinde azalmaktadır. T2K56035 ve T5K66035 akışkanlarının çökme özelliklerinin, ticari akışkanlar ile aynı olduğu gözlenmiştir. Bunun; katkı ile manyetik tanecik arasındaki etkileşim ile ilintili olduğu sanılmaktadır. T-5 manyetik tanecikleri silika ile muamele edilmiş tanecikler olduklarından; silika oranı yüksek olan K-6 ile K-1 katkı malzemeleri arasındaki etkileşimin baskınlığı çökme performanslarında dikkati çekmektedir.



Şekil 4.25 : Katkı maddesinin MR akışkanların çökme oranlarına etkisi Manyetik tanecik; T-1

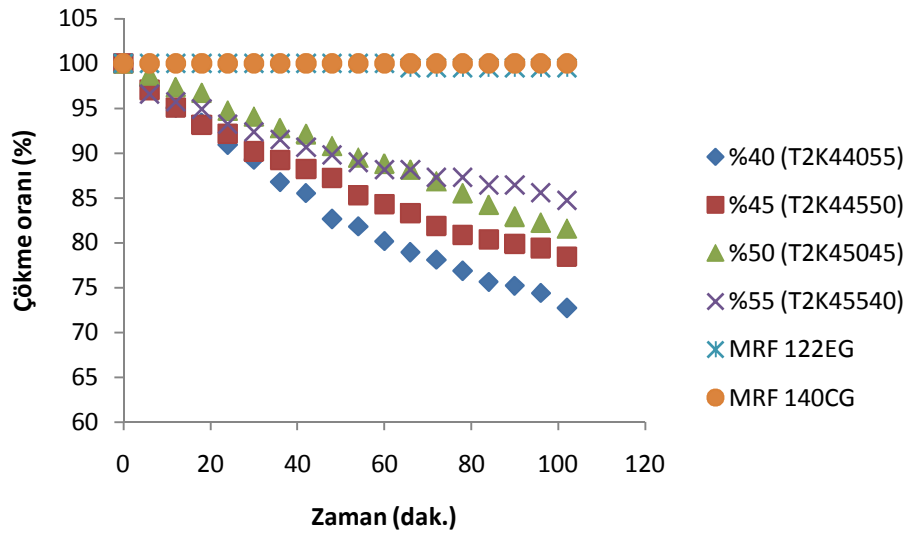
Tanecikleri polimerle kaplamanın veya katkı maddesi ilave etmenin çökme performanslarını önemli ölçüde geliştirdiği gözlemlenmiştir. Polimerle kaplanmış taneciklerle hazırlanan akışkanlara katkı maddesi eklenerek çökme performansları gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.26’da verilmiştir. Poliüretanın hidrojen bağı yapabilme özelliği, katkı maddelerinin ağ yapı oluşturma özelliği ve katkı maddeleri ile polimerin etkileşimi tanecikleri bir arada tutarak akışkanların çökmelerini engellemiştir.



Şekil 4.26 : Polimer kaplı tanecikler ve katkı malzemesi kullanımının MR akışkanların çökmelerine etkisi.

4.5.3 Manyetik Tanecik Oranının Çökme Oranına Etkisi

Manyetik tanecik oranının çökme özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla, Manyetik tanecik oranı değiştirilerek hazırlanan akışkanların çökme süreçleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.27’de sunulmuştur. Bu akışkanlar T-2 manyetik tanecikleri ve K-4 katkı maddesi kullanılarak hazırlanmıştır. Akışkanlarda katkı maddesi oranı %5 olarak sabit tutulmuştur. Tanecik oranı %40 ile %55 arasında değişmektedir.



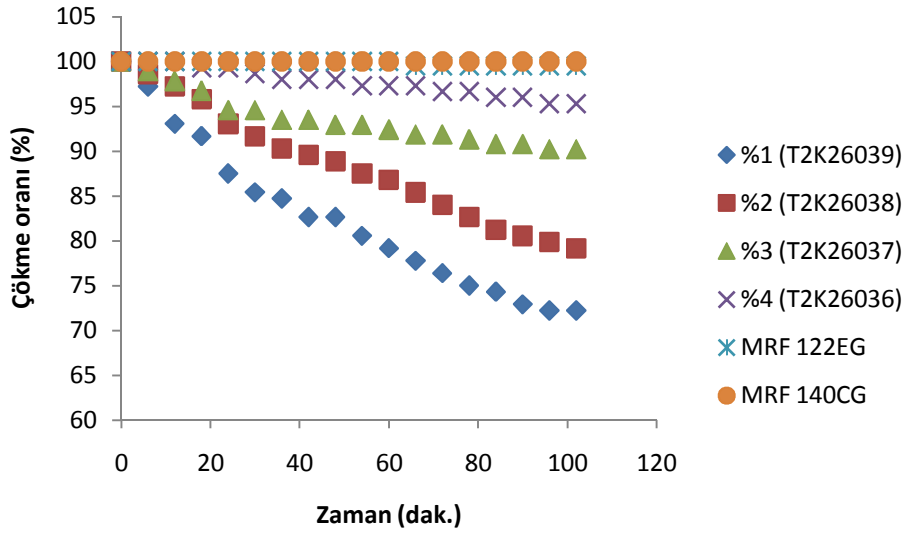
Şekil 4.27 : Manyetik tanecik oranının MR akışkanların çökme oranlarına etkisi.

Manyetik tanecik oranı arttıkça akışkanların çökmelerinin yavaşladığı gözlemlenmiştir. Akışkanın manyetik tanecik oranı %40 iken çökme süreci sonundaki çökme oranı olan %72,72, tanecik oranı %55’ e arttırıldığında %84,74’ e yükselmiştir. Önceki bölümlerde tartıştığımız gibi akışkanın tanecik oranı arttırıldığında viskozitesi ve kayma gerilmesi artmaktadır. Akışkanlarda tanecik oranı arttırılarak hem manyetik özelliklerini hem de çökme özelliklerini arttırmak mümkündür. Ayrıca sentezlenen akışkanlarda tanecik oranı arttığında çökme özelliklerinin ticari akışkanlarınkine yaklaştığı gözlemlenmiştir.

4.5.4 Katkı Maddesi Oranının Çökme Oranına Etkisi

Katkı maddesi oranının çökme özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla, katkı maddesi oranı değiştirilerek MR akışkanlar sentezlenmiş ve çökme süreçleri incelenmiştir. Akışkanlar T-2 manyetik tanecikleri ve K-2 katkı maddesi kullanılarak

hazırlanmıştır. Tanecik oranı %60 olarak sabit tutulmuş, katkı maddesi oranı %1 ile %4 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28 : Katkı maddesi oranının MR akışkanların çökme oranlarına etkisi.

K-2 katkı maddesinin çeşitli oranlarda kullanarak hazırlanan akışkanların sonuçları incelendiğinde katkı maddesi arttıkça çökmenin önemli ölçüde yavaşladığı gözlemlenmiştir. T-2 taneciğinin katkısız çökme oranı %66,30 olduğunu gözlemlemiştik. K-2 katkısı %1 oranında kullanıldığında çökme oranı %72,22’ye yükseldiği, %4 oranında kullanıldığında ise %95’e yükseldiği gözlemlenmiştir. Katkı maddesi oranı arttıkça akışkanların çökme özellikleri, ticari akışkanlarınkine çok yaklaştığı gözlemlenmiştir. Katkı malzemeleri kullanılırken akışkan içerisindeki oranının, akışkanın tekrar karışma özelliğini engellemeyecek olmasına dikkat edilmelidir.

Ticari akışkanların çökme süreci boyunca hiç çökmediği veya çok az çöktüğü gözlemlenmiştir. Ticari akışkanların çökme performanslarına yaklaşmak için akışkanlarda katkı oranı %10’a çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlar, EK-H.4’te gösterilmiştir. Bu durumda; akışkanlar, ticari akışkanlar ile benzer çökme oranları göstermişlerdir. Buna göre; katkı oranı ayarlanarak akışkanların performansının artırılabilmesi ve maliyetinin düşürülebilmesi mümkündür.

5. VARGILAR VE ÖNERİLER

1. Yapılan çalışmada Manyetik taneciklerin cinsi, Katkı maddesi cinsi ve bunların kütlece oranları değiştirilerek farklı özelliklerde 41 adet MR akışkan üretilmiştir. Bu amaçla 5 farklı manyetik tanecik çeşidi, 6 farklı katkı maddesi ve tek tip yağ kullanılmıştır.
2. Manyetik taneciklerin oksidasyon ve korozyondan koruyarak, ömrünü uzatmak ve akışkanların çökme özelliklerini iyileştirmek amacıyla tanecikler polimer ile kaplanmıştır. Kaplama sürecinde polimer miktarının artırılması ile kaplama veriminin arttığı gözlemlenmiştir. 3 farklı kaplama yöntemi denenmiş ve bunlardan bir tanesi ile MR akışkan sentezinde kullanmak için ideal tanecik elde edilmiştir.
3. Sentezlenen akışkanların reolojik özellikleri incelenmiş ve ticari akışkanların reolojik özellikleri ile kıyaslanmıştır. Akışkan içerisindeki tanecik oranı artması ve/veya katkı oranının artması MR akışkanın viskozite ve kayma gerilmesi değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Çökme ve korozyonu önlemek, akışkan ömrünü uzatmak amacıyla tanecikler polimer ile kaplanmıştır. Polimer kaplı tanecikler ile hazırlanan akışkanların, kaplı olmayan taneciklerle hazırlanan akışkanlara göre viskozite ve kayma gerilmesi değerlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Kullanılan katkı çeşidinin reolojik özelliklerde önemli bir değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. K-6 katkısının kendi özelliklerinden dolayı diğer katkılara göre reolojik özelliklere daha fazla etki ettiği gözlemlenmiştir. Akışkanların reolojik özelliklerinin manyetik taneciklerin yoğunluk ve boyutuna birlikte bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Sentezlenen akışkanların viskozite ve kayma gerilmesi değerlerinin MRF 122EG kodlu ticari akışkaninkine daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Çok az sayıdaki akışkanın reolojik özellikleri MRF 140CG kodlu akışkana benzer olduğu gözlenmiştir.
4. Hazırlanan MR akışkanların manyetik alan varlığında manyetoreolojik özellikleri incelenmiş ve ticari akışkanlar ile kıyaslama yapılmıştır. polimer kaplanmış tanecikler ile hazırlanmış akışkanın manyetik alan koşullarında viskozite ve kayma gerilmesi değerlerinin aynı taneciklerin polimer kaplanmamış durumu ile hazırlanan

akışkanlara göre düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni polimer kaplamanın manyetik etkiyi azaltmasıdır. T-1 ve T-4 taneciklerinin viskozite ve kayma gerilmesi değerleri MRF 122EG kodlu ticari akışkan ile benzerliği dikkat çekmiştir. Katkı çeşidi değiştirilerek hazırlanan akışkanlarda, manyetik alan olmayan koşullardaki reolojik özelliklerde olan K-6 katkısının etkisi bu bölümde gözlenmemiş ve katkı çeşidinin manyetoreolojik özelliklere etki etmediği gözlemlenmiştir. Katkı oranı ve manyetik tanecik oranı arttıkça akışkanların viskozite ve kayma gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür.

5. Çökme özelliklerinin, akışkanlarda manyetik tanecik oranı ve katkı oranı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Taneciklerin yoğunlukları ve tanecik boyutlarının çökme özelliklerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Katkı kullanılması akışkanın çökmesini yavaşlattığı ve kullanılan katkıların kendi özelliklerinin akışkanların çökme özelliklerini etkilediği görülmüştür. Taneciklerin polimer ile kaplamanın çökmeyi; kaplı olmayan tanecikler ile hazırlanan akışkanlara göre yavaşlattığı görülmüştür.

6. Çökme önleyici olarak daha sonraki çalışmalarda arap sakızı (arabic gum) kullanılabilir. Arap sakızı bir çok proseste kullanılmakta olup tekstil ve boya endüstrisinde viskozite ayarlayıcı olarak ve bir çok endüstride stabilizatör olarak kullanılmaktadır. Karbon nanotüp uygulamalarında, arap sakızı sterik kararlılık vasıtasıyla kolloidal kararlılığa önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

7. Kobalt, Nikel, Demir gibi maddeler ferromanyetik maddelerdir ve bu maddelerin manyetik geçirgenlikleri 1'den çok büyüktür. Bir sonraki çalışmada bu maddelerin çeşitli oranlardaki alaşımları olan taneciklerle elde edilen akışkanların özellikleri incelenebilir.

8. Daha sonraki çalışmalarda sentezlenen akışkanların damper performansları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Bossis, G., Lacis, S., Meunier, A., and Volkova, O.,** 2002. Magnetorheological fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **252**, 224-228.
- [2] **Ashour, O., and Craig, A.,** 1996. Magneto-rheological fluids: materials, characterization and devices, *Journal of Intelligent Materials System Structure*, **7**, 123-130.
- [3] **Genç, S.,** 2003. Synthesis and properties of magnetorheological fluids, *PhD Thesis*, University of Pittsburgh, USA.
- [4] **Xin, M.,** 2003. Development of novel magnetorheological polymer gels and magnetorheological fluids, *Master's Thesis*, University of Nevada, Reno, USA.
- [5] **Bossis, G., and Lemaire, E.,** 1991. Yield stresses in magnetic suspensions, *Journal of Rheology*, **35**, 1345-1354.
- [6] **Janocha, H., and Rech, B.,** 1994. Measurements of MR-fluids using rotational viscometers, *Applied Rheology*, **94**, 198.
- [7] **9th International Specialty Products,** 2002. *Carbonyl Iron Powders Brochure*.
- [8] **Chen, C.,** 1986. Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials, 2nd edition, Dover Publications.
- [9] **Lim, S.T., Cho, M.S., Jang, I.B., and Choi, J.H.,** 2004. Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **282**, 170-173.
- [10] **Url-1** <<http://www.wikipedia.org/>>, alındığı tarih 08.10.2009.
- [11] **Bossis, G., Lemaire, A., and Meunier, G.,** Influence of the particle size on the rheology of magnetorheological fluids, *Journal of Rheology*, **39**, 1011-1020.
- [12] **Kimata, M., Nakagawa, D., and Hasegawa, M.,** 2003. Preparation of monodisperse magnetic particles by hydrolysis of iron alkoxide, *Journal of Powder Technology*, **132**, 112-118.
- [13] **Kormann, C., Laun, H.M., and Richter, H.J.,** 1996. MR fluids with nano-sized magnetic particles, *Journal of Modern Physics*, **10**, 3167-3172.
- [14] **Margida, A.J., Weiss, K.D., and Carlson, J.D.,** 1996. Magnetorheological materials based on iron alloy particles, *Journal of Modern Physics*, **10**, 23-24.

- [15] **Phulé, P.P., and Ginder, J.M.,** 1999. Synthesis and properties of novel magnetorheological fluids having improved stability and redispersibility, *Journal of Modern Physics*, **13**, 2019-2017.
- [16] **Denkbaz, E.B., Kilicay, E., Birlikseven, C., and Ozturk, E.,** 2002. Magnetic chitosan microspheres: preparation and characterization, *Reactive and Functional Polymers*, **50**, 225-232.
- [17] **Kondo, A., Kamura, H., and Higashitani, K.,** 1994. Development and application of thermo-sensitive magnetic immunomicrospheres for antibody purification, *Applied Microbiology and Biotechnology*, **41**, 99-105.
- [18] **Cocker, T.M., Fee, C.J., and Evans, R.A.,** 1997. Preparation of magnetically susceptible polyacrylamide/magnetite beads for use in magnetically stabilized fluidized bed chromatography, *Biotechnology and Bioengineering*, **53**, 79-87.
- [19] **Zaitsev, V.S., Filimonov, D.S., and Presnyakov, I.A.,** 1999. Physical and chemical properties of magnetite and magnetite-polymer nanoparticles and their colloidal dispersions.
- [20] **Japka, J.E.,** 1988. Microstructure and properties of carbonyl iron powder, *Journal of Metals*, **40**, 18-21.
- [21] **Japka, J.E.,** 1991. Iron powders for meat injection molding, *Journal of Powders Metallurgy*, **27(2)**, 107-114.
- [22] **Kalyanaraman, R., Yoo, S., Krupashnkara, M.S., Sudarshan, T.S., and Dowding, R.J.,** 1998. Synthesis and consolidation of iron nanopowders, *Nanostructured Materials*, **10(8)**, 1379-1392.
- [23] **Bozorth, R.M.,** 1978. Ferromagnetism, New York: IEEE Press.
- [24] **Carlson, J.D., and Weiss, K.D.,** 1995. Magnetorheological materials based on alloy particles, *US Patent*, No: 532373, Lord Corporation, USA.
- [25] **Jun, J.B., Uhm, S.Y., Ryu, J.H., and Suh, K.D.,** 2005. Synthesis and characterization of monodisperse magnetic composite particles for magnetorheological fluid materials, *Colloids and Surfaces: Physicochemistry Engineering Aspects*, **260**, 157-164.
- [26] **Chanudhuri, A., Wereley, N.M., Kotha, S., Radhakrisnan, R., and Sudarshan, T.S.,** 2005. Viscometric characterization of cobalt nanoparticle-based magnetorheological fluids using genetic algorithms, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **293**, 206-214.
- [27] **Ramanujan, R.V., and Yeow, Y.Y.,** 2005. Synthesis and characterisation of polymer coated metallic magnetic materials, *Journal of Material Science and Engineering*, **25**, 39-41.
- [28] **Liu, Z.L., Ding, Z.H., Yao, K.L., Tao, J., Du, G.H., Lu, Q.H., Wang, X., Gong, F.L., and Chen, X.,** 2003. Preparation characterization of polymer-coated core-shell structured magnetic microbeads, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **265**, 98-105.

- [29] **Lu, M., Bai, S., Yang, K., and Sun, Y.,** 2007. Synthesis and characterization of magnetic polymer microspheres with a core-shell structure, *China Particulology*, **5**, 180-185.
- [30] **Wu, N., Fu, L., Su, M., Aslam, M., Wong, K.C., and Dravid, V.P.,** 2004. Interaction of fatty acid monolayers with cobalt nanoparticles, *Nano Letters*, **4**, 383-386.
- [31] **Vékás, L., Bica, D., Marinica, O., Raşa, M., Socoliuc, V., and Stoian, F.D.,** 2005. Concentrated magnetic fluids on water and short chain length organic carriers.
- [32] **Kimata, M., Nakagawa, D., and Hasegawa, M.,** 2003. Preparation of monodisperse magnetic particles by hydrolysis of iron alkoxide, *Powder Technology*, **132**, 112-118.
- [33] **Vékás, L., Bica, D., and Raşa, M.,** 2002. Preparation and magnetic properties of concentrated magnetic fluids on alcohol and water carrier liquids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **252**, 10-12.
- [34] **Kordonsky,** 1996. Magnetorheological fluid and methods of making thereof, *U.S. Patent*, No: 5525249.
- [35] **Weiss,** 2000. Method and magnetorheological fluid formulations for increasing the output of a magnetorheological fluid, *U.S. Patent*, No: 6027664.
- [36] **Phule, P.P.,** 1998. Synthesis of novel magnetorheological fluids, *MRS Materials Research Society*, 23-25.
- [37] **Munoz,** 1998. Organomolybdenum-containing magnetorheological fluid, *U.S. Patent*, No: 5705085.
- [38] **Lopez-Lopez, M.T., Zugaldia, A., and Gonzalez-Caballero, F.,** 2006. Sedimentation and redispersion phenomena in iron-based magnetorheological fluids, *Journal of Rheology*, **50(4)**, 543-560.
- [39] **Phule,** 1999. Magnetorheological fluid, *U.S. Patent*, No: 5985168.
- [40] **Carlson,** 1995. Magnetorheological fluid devices, *U.S. Patent*, No: 5398917.
- [41] **Carlson,** 1997. Aqueous magnetorheological fluid devices, *U.S. Patent*, No: 5670077.
- [42] **Borrdutz,** 1987. Low viscosity, electrically conductive ferrofluid composition and method of making and using same, *U.S. Patent*, No: 4687596.
- [43] **Podszun,** 1999. Magnetorheological liquids, a process for producing them and their use, and a process for producing magnetizable particles coated with an organic polymer, *U.S. Patent*, No: 5989447.
- [44] **Weiss, K.D., and Duclos, T.G.,** 1994. Controllable fluids: the temperature dependence of post-yield properties, *International Journal of Modern Physics*, **8**, 3015-3032.
- [45] **Phule, P.P., and Ginder, J.M.,** 1998. The materials science of field-responsive fluids, *MRS Bulletin*, 19-21.
- [46] **Weiss,** 1997. Temperature independent magnetorheological materials, *U.S. Patent*, No: 5599474.

- [47] **Auzans, E.**, 1999. Synthesis and properties of Mn-Zn ferrite ferrofluids, *Journal of Material Science*, **34**, 1253-1260.
- [48] **Ginder**, 1996. Magnetic fluid-based magnetorheological fluids, *U.S. Patent*, No: 5549837.
- [49] **Berkovsky, B.M., Medvedev, V.F., and Krakov, M.S.**, 1993. Magnetic fluids: engineering applications, Oxford University Press, New York.
- [50] **Raj, K., and Moskowitz, R.**, 1990. Commercial applications of ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **85**, 233-245.
- [51] **Malkin, A.Y.**, 1994. *Rheology Fundamentals*, Chemtec Publishing, Canada.
- [52] **Barnes, H.A., Hutton, J.F., and Walters, K.F.R.S.**, 1989. An introduction to rheology, Elsevier Science Publisher, Netherlands.
- [53] **Geankoplis, C.J.**, 2003. *Transport process and separation process principles*, 4th edition, Prentice Hall Professional Technical Reference, New Jersey.
- [54] **Jolly, M.R., Bender, J.W., and Carlson, J.D.**, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, Thomas Lord Research Center, Lord Corporation..
- [55] **Mascosko, C.W.**, 1994. *Rheology: principles, measurements and applications*, VCH Publishers, Inc. New York.
- [56] **Zipser, L., Richter, L., and Lange, U.**, 2001. Magnetorheologic fluids for actuators, *Sensors and Actuators*, **92**, 318-325.
- [57] **Ginder, J.M., and Davis, L.C.**, 1994. Shear stress in magnetorheological fluids: role of magnetic saturation, *Applied Physics*, **65**, 3410-3412.
- [58] **Jolly, M.R., Bender, J.W., and Mathers, R.T.**, 1997. Indirect measurements of microstructure development in magnetorheological fluids, *Int. Conferance on ER Fluids, MR Suspensions and Applications*, July 22-25, Yonezawa , JP.
- [59] **Carlson, J.D.**, 2005. MR fluids and devices in the real world, *Journal of Modern Physics*, **19**, 1463-1470.
- [60] **Potantin, A.A.**, 1998. Rheological probing of structure and pigment resin interactions in magnetic paints, *Rheologica Acta*, **37**, 89-96.
- [61] **Ginder, J.M.**, 1998. Behaviour of magnetorheological fluids, *MRS Bulletin*, **23**, 26-28.
- [62] **Carlson, J.D., and Weiss, K.D.**, 1994. A growing attraction to magnetic fluids, *Machine Design*, 61-64.
- [63] **Jolly, M.R., and Carlson, J.D.**, 1996. Controllable squeeze film damping using magnetorheological fluid, actuators, *5th International Conference on New Actuators*, Germany.
- [64] **Hiemenz, P.C.**, 1986. Principle of colloid and surface chemistry, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [65] **Bolshakova, I., Bolshakov, M., Zaichenko, A., and Erogov, A.**, 2005. The investigation of the magnetic fluid stability using the devices with

magnetic field microsensors, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **289**, 108-110.

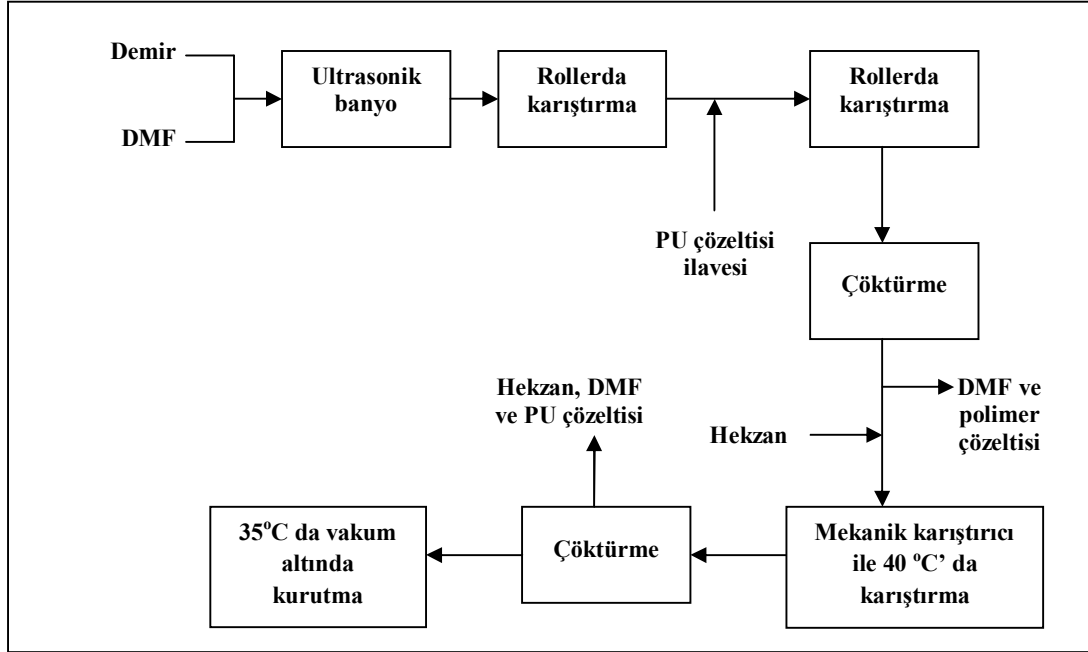
- [66] Rankin, P.J., Horvarth, A.T., and Klingenberg, D.J., 1999. Magnetorheology in viscoplastic media, *Rheological Acta*, **38**, 471-477.
- [67] Svoboda, J., 1982. Magnetic flocculation and treatment of fine weakly magnetic minerals. *IEEE Transactions on Magnetism*, **18**, 796-801.
- [68] Ozaki, M., Suzuki, H., Takahashi, K., and Matijevic, E., 1986. Reversible ordered agglomeration of hematite particles due to weak magnetic interactions, *Journal of Colloid and Interface Science*, **113**, 76-80.
- [69] Carlson, J.D., 2001. What makes a good MR fluid? *8th International conference on electrorheological fluids and magnetorheological suspensions*, Nice.
- [70] Ashour, A., Rogers, C.A., Kordonsky, W., 1996. Magnetorheological fluids: materials characterization and devices, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 123-130.
- [71] Kordonsky, W., 1993. Elements and devices based on magnetorheological effect, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 65-69.
- [72] Url-2 <<http://www.lord.com/>>, alındığı tarih 08.10.2009.
- [73] Huang, J., Wang, H.P., Ling, J., Wei, Y.Q., and Zhang, J.Q., 2001. Research on chain-model of the transmission mechanical properties of the magneto-rheological fluids, *Machine Design Manufacturing Engineering*, **30**, 3-7.
- [74] Li, W.H., Du, H., Guo, and N.Q., 2003. Design and testing of an MR steering damper for motorcycles, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **22**, 288-294.
- [75] Motion Master Ride Management System, Vibration and seat design, Lord Corporation.
- [76] Sodeyama, H., Suzuki, K., and Sunakoda, K., 2004. Development of large capacity semi-active seismic damper using magneto-rheological fluid, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **126**, 105-109.
- [77] Occhiuzzi, A., Spizzuoco, M., and Serino, G., 2003. Experimental analysis of magnetorheological dampers for structural control, *Smart Material Structure*, **12**, 703-711.
- [78] Oh, H.U., 2004. Experimental demonstration of an improved magneto-rheological fluid damper for suppression of vibration of a space flexible structure, *Smart Material Structure*, **13**, 1238-1244.
- [79] Qing, S., Ling, Z., Jinxiong, Z., and Qingxuan, S., 2003. Experimental study of the semi-active control building structures using the shaking table, *Earthquake Engineering Structure Dynamic*, **32**, 2353-2376.
- [80] Oh, H.U., 2004. Characteristics of a magneto-rheological fluid isolator obtained by permanent magnet arrangements, *Smart Materials and Structure*, **13**, 29-35.

- [81] **Liu, J.**, 2002. Magnetorheological fluids: from basic physics to application, *International Journal*, **45**, 55-60.
- [82] **Aydar, G., Evrensel, C.A., Gordaninejad, F., and Fuchs, A.**, 2007. A low-force magneto-rheological (MR) fluid damper: design, fabrication and characterization, *Journal of Intelligent Systems and Structures*, **18**, 1155-1160.

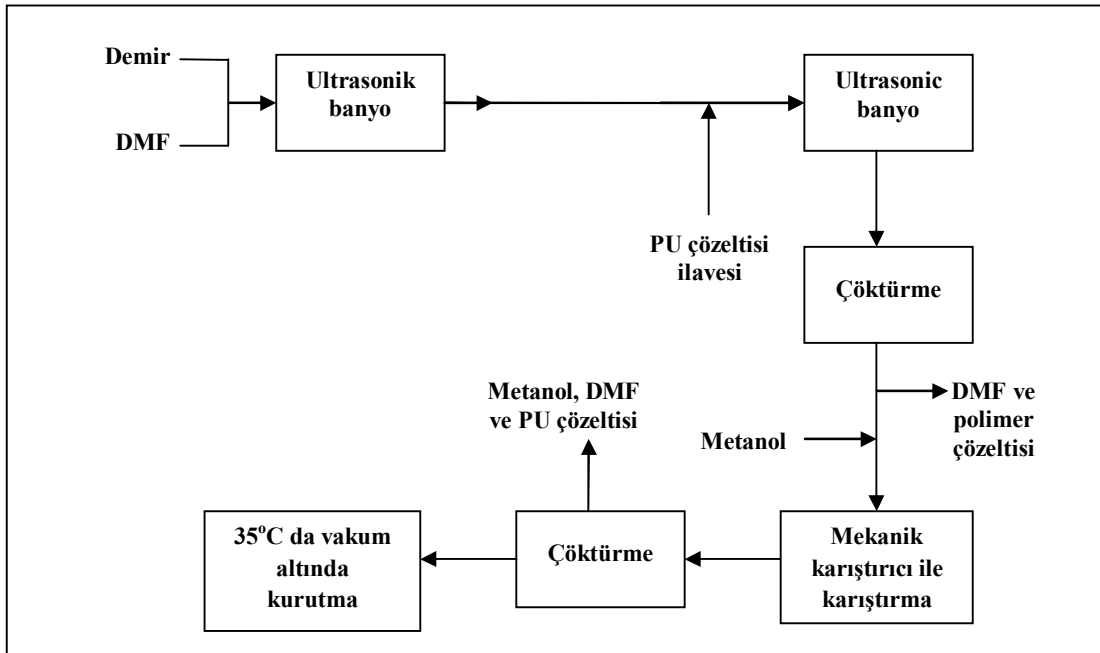
EKLER

- EK-A** : Polimer Kaplama Süreci
- EK-B** : Manyetik Taneciklerin SEM Görüntüleri
- EK-C** : Farklı Polimer Konsantrasyonları ile Kaplanan taneciklerin TGA Sonuçları
- EK-D** : Yağların FT-IR Analiz Sonuçları
- EK-E.1** : Reolojik Özelliklerin Tekrarlanabilirliği
- EK-E.2** : Katkı Maddesi Çeşidinin MR Akışkanların Viskozitelerine Etkisi
- EK-E.3** : Katkı Maddesi Çeşidinin MR Akışkanların Kayma Gerilmelerine Etkisi
- EK-E.4** : Manyetik Tanecik Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi
- EK-E.5** : Katkı Maddesi Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi
- EK-E.6** : %10 Katkı Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi
- EK-F** : SiO₂'nin Kendi Arasında Oluşturduğu Ağ Yapı
- EK-G.1** : Manyetoreolojik Özelliklerin Tekrarlanabilirliği
- EK-G.2** : Manyetik Alan Koşullarında Katkı Maddesi Çeşidinin MR Akışkanların Viskozitelerine Etkisi
- EK-G.3** : Manyetik Alan Koşullarında Katkı Maddesi Çeşidinin MR Akışkanların Kayma Gerilmelerine Etkisi
- EK-G.4** : Manyetik Alan Koşullarında Manyetik Tanecik Oranının MR Akışkanların Manyetoreolojik Özelliklerine Etkisi
- EK-G.5** : Manyetik Alan Koşullarında Katkı Maddesi Oranının MR Akışkanların Manyetoreolojik Özelliklerine Etkisi
- EK-G.6** : %10 Katkı Oranının Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi
- EK-H.1** : Akışkanların Çökme Özelliklerinin Tekrarlanabilirliği
- EK-H.2** : Katkı Çeşidinin MR Akışkanların Çökmelerine Etkisi
- EK-H.3** : %10 Katkı Oranının Çökme Özelliklerine Etkisi

EK-A

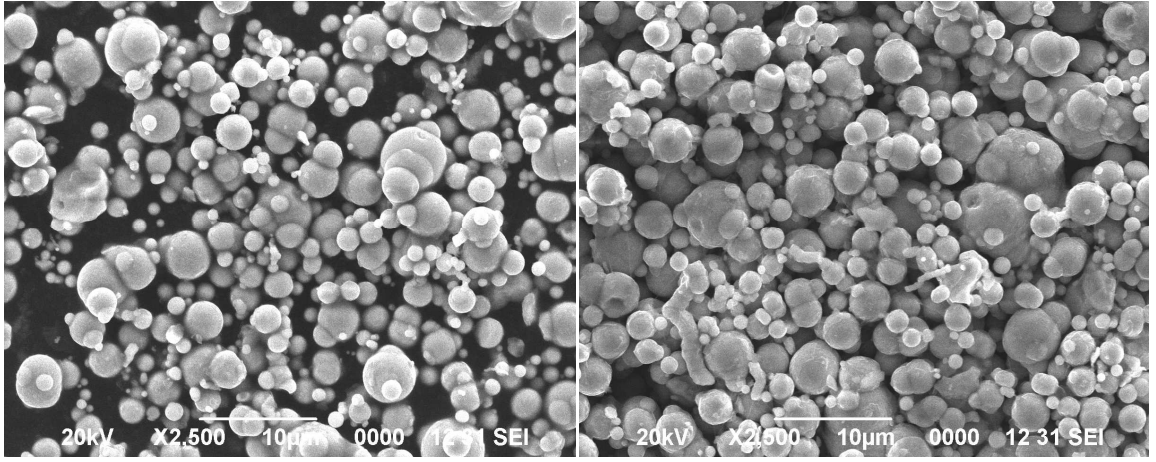


Şekil A.1 : Polimer kaplama süreci 2.



Şekil A.2 : Polimer kaplama süreci 3.

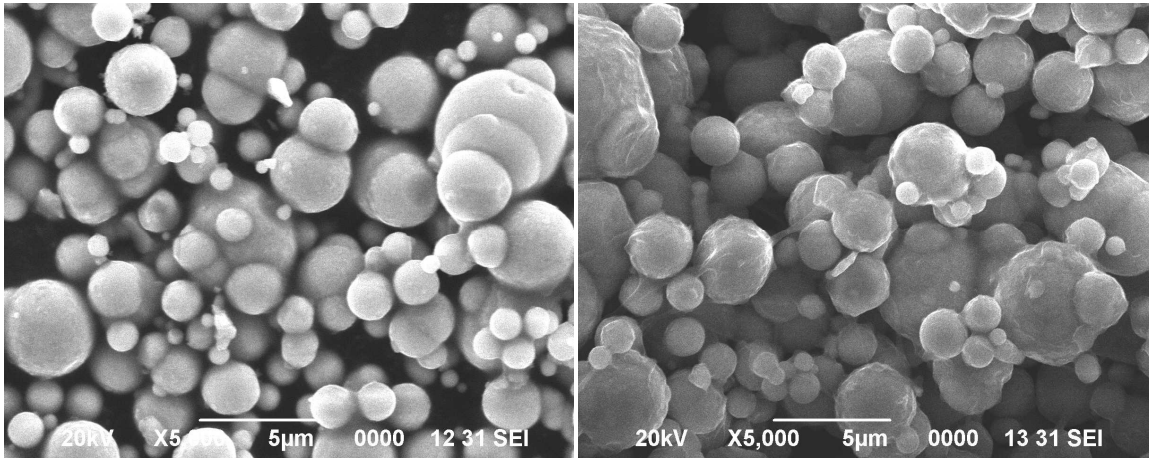
EK-B



(a)

(b)

Şekil B.1 : T-2 ve T-4 taneciklerinin taneciklerinin SEM-2500X görüntüleri; a) T-2 taneciği, b) T-4 taneciği).

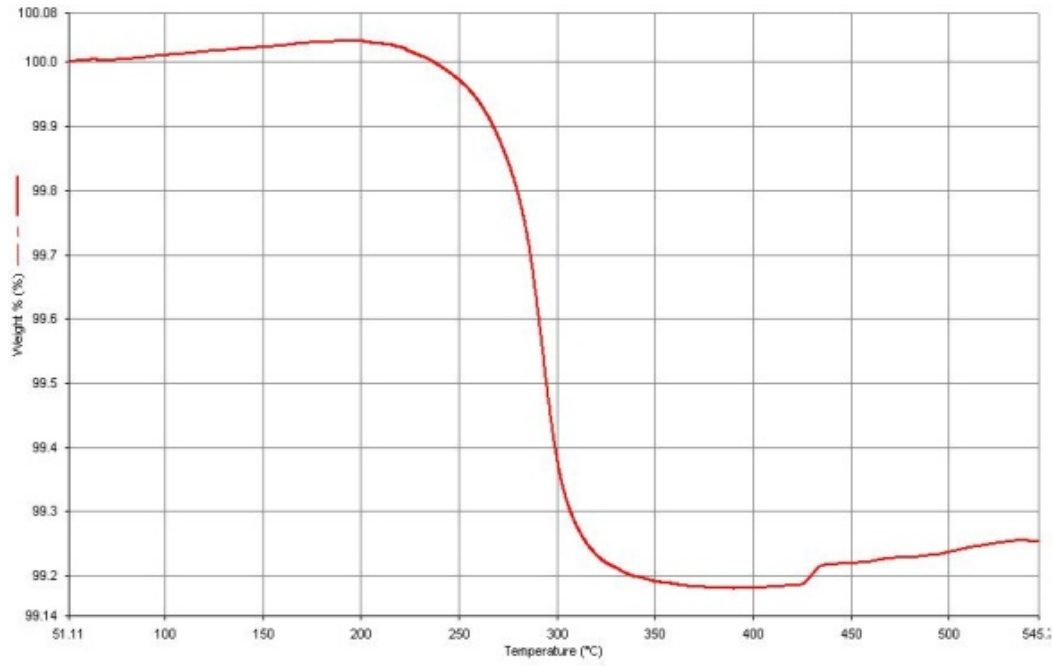


(a)

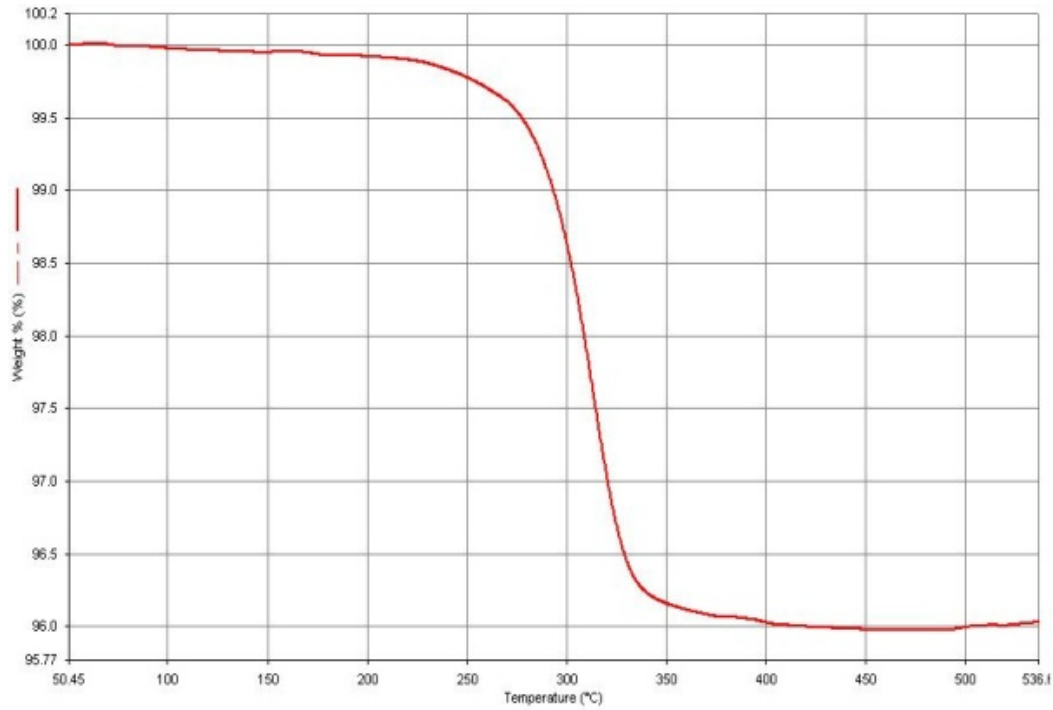
(b)

Şekil B.2 : T-2 ve T-4 taneciklerinin taneciklerinin SEM-5000X görüntüleri; a) T-2 taneciği, b) T-4 taneciği).

EK-C

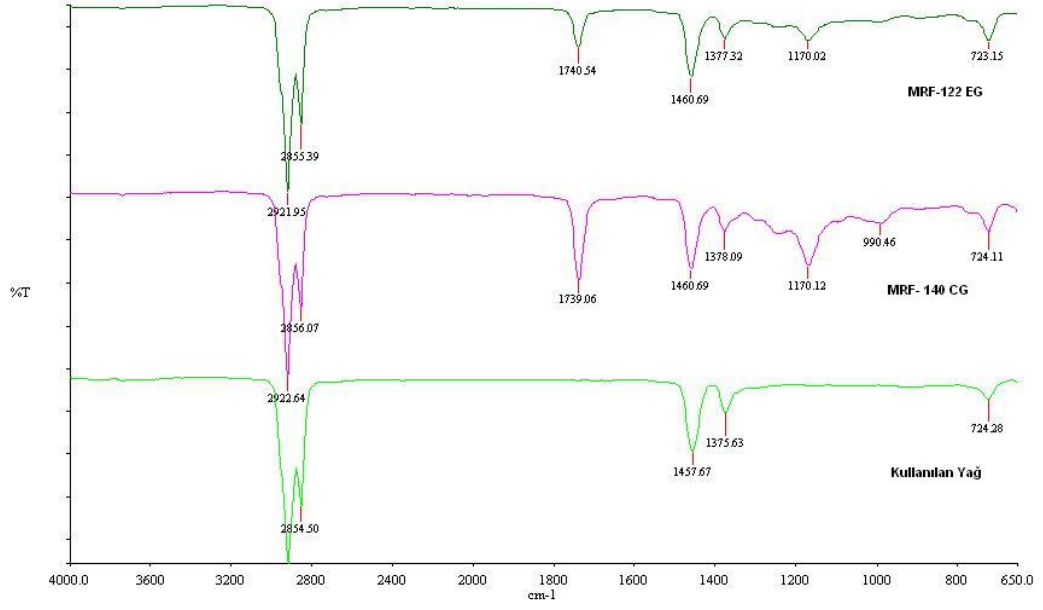


Şekil C.1 : %5 w/w polimer çözeltisi ile kaplama süreci TGA sonucu.



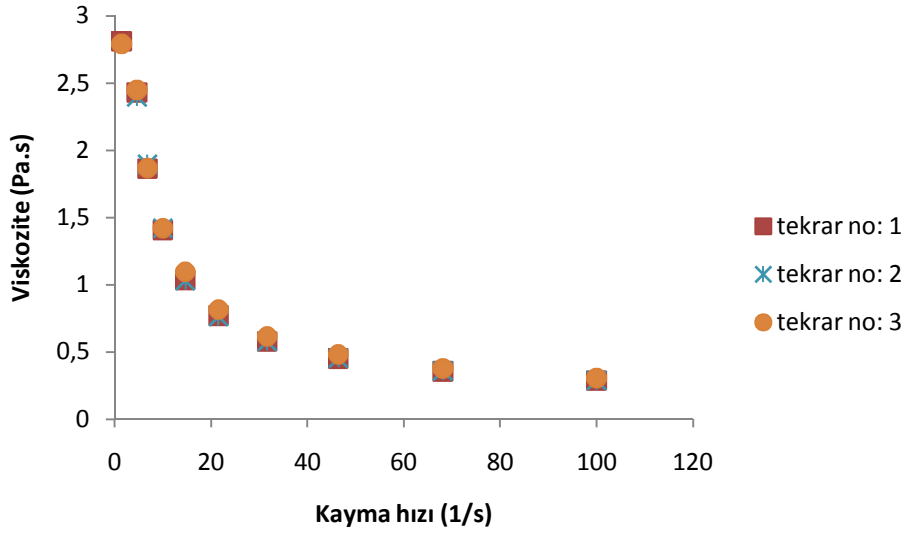
Şekil C.2 : %17 w/w polimer çözeltisi ile kaplama süreci TGA sonucu.

EK-D

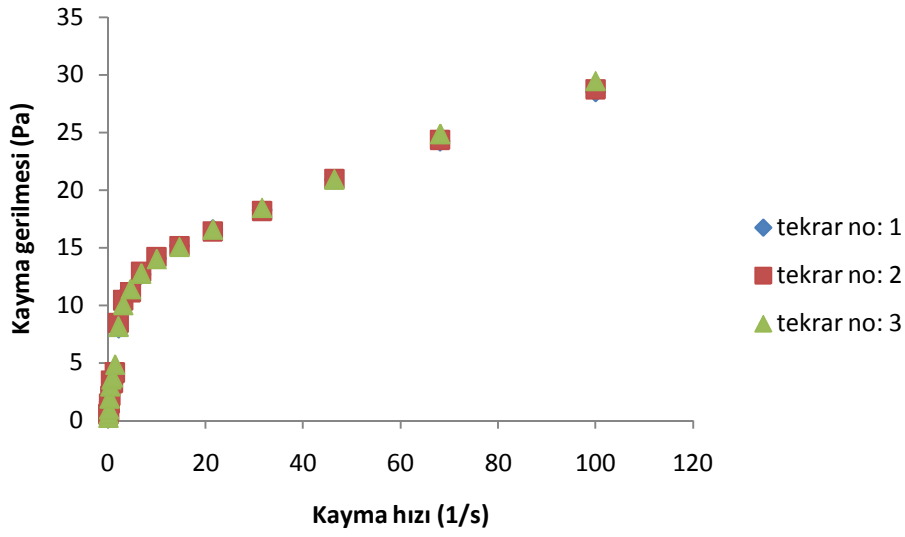


Şekil D.1 : Kullanılan yağ ile ticari MR akışkan yağlarının FT-IR analiz sonuçları.

EK-E.1

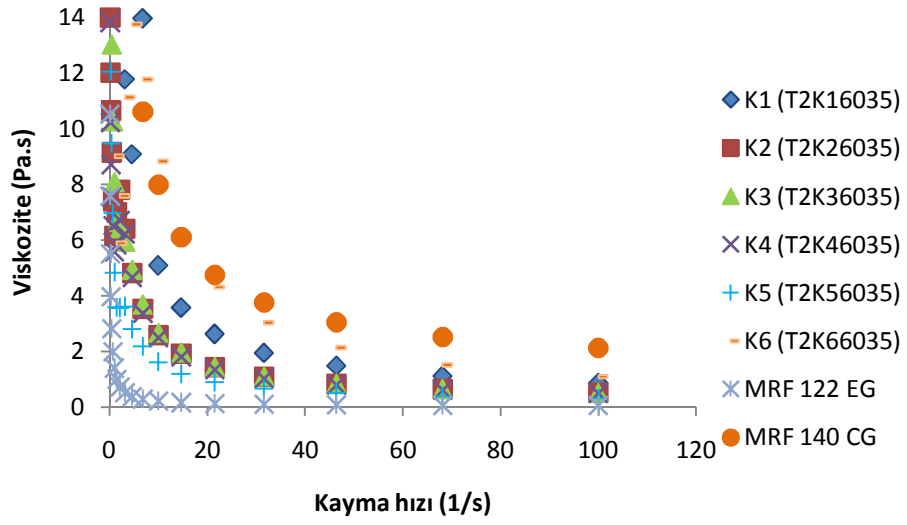


Şekil E.1 : T5K56035 akışkanının viskozitesinin tekrarlanabilirliği.

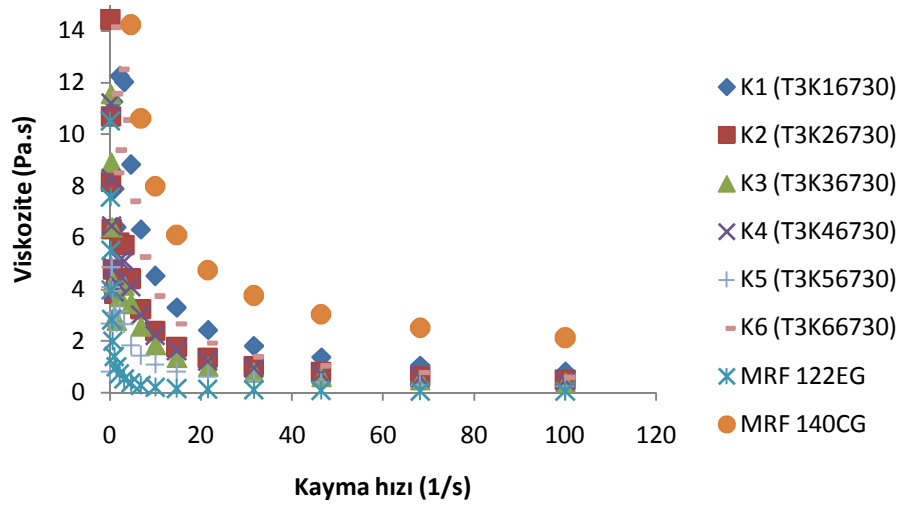


Şekil E.2 : T5K56035 akışkanının kayma gerilmesinin tekrarlanabilirliği.

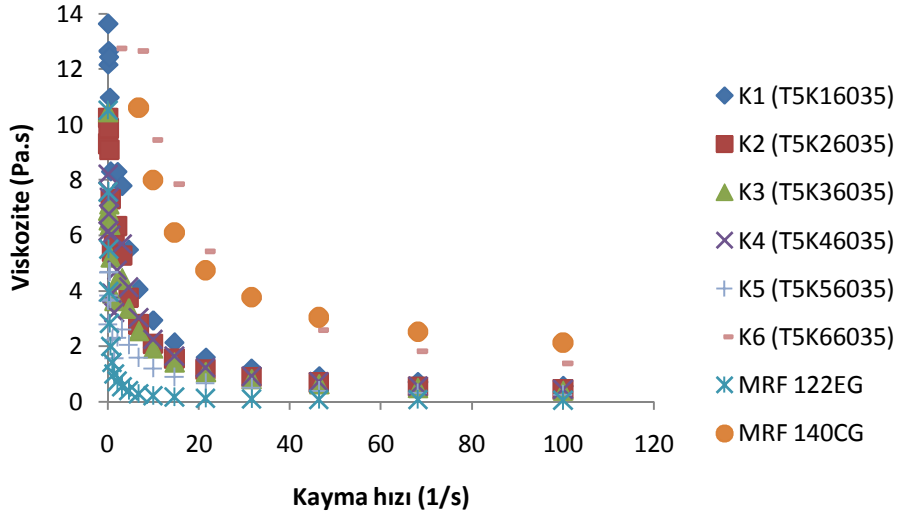
EK-E.2



Şekil E.3 : Katkı çeşidinin T-2 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi.

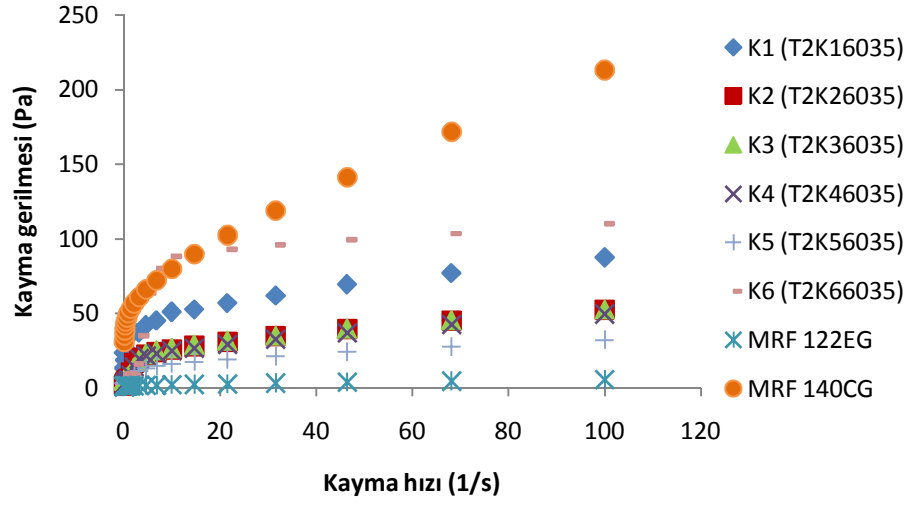


Şekil E.4 : Katkı çeşidinin T-3 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi.

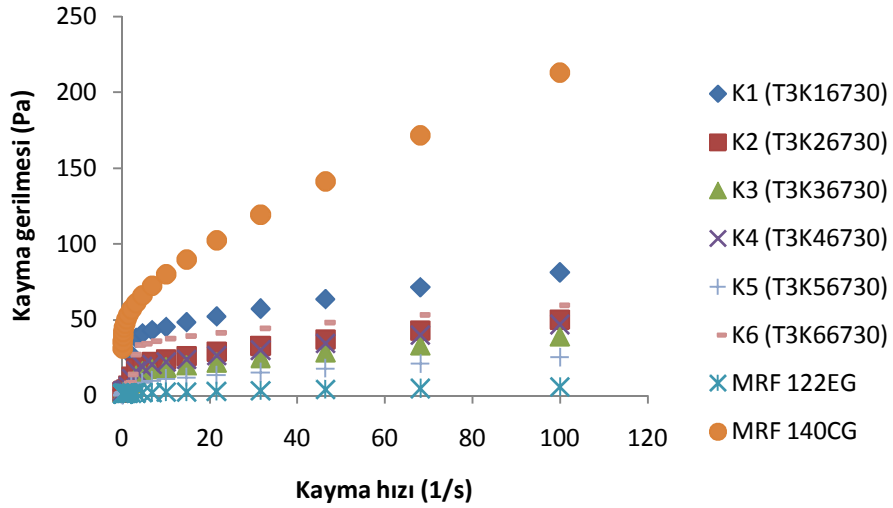


Şekil E.5 : Katkı çeşidinin T-5 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların viskozitelerine etkisi.

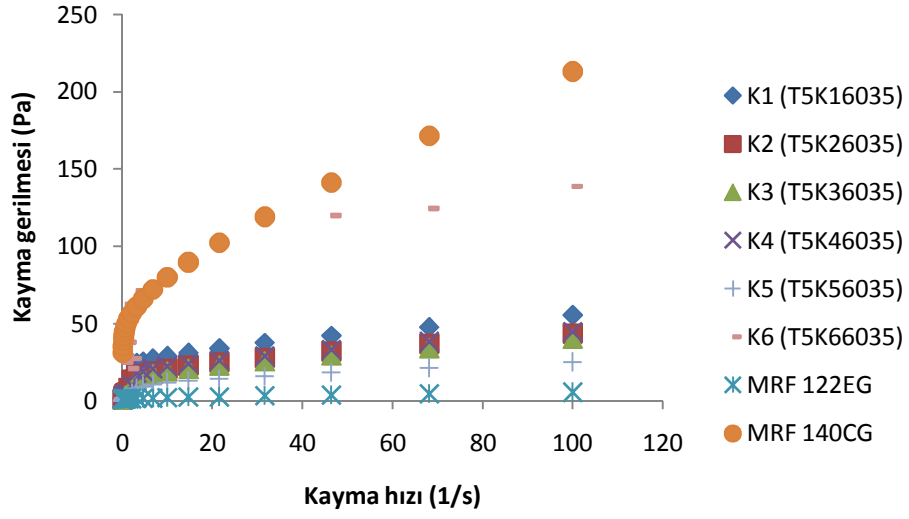
EK-E.3



Şekil E.6 : Katkı çeşidinin T-2 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

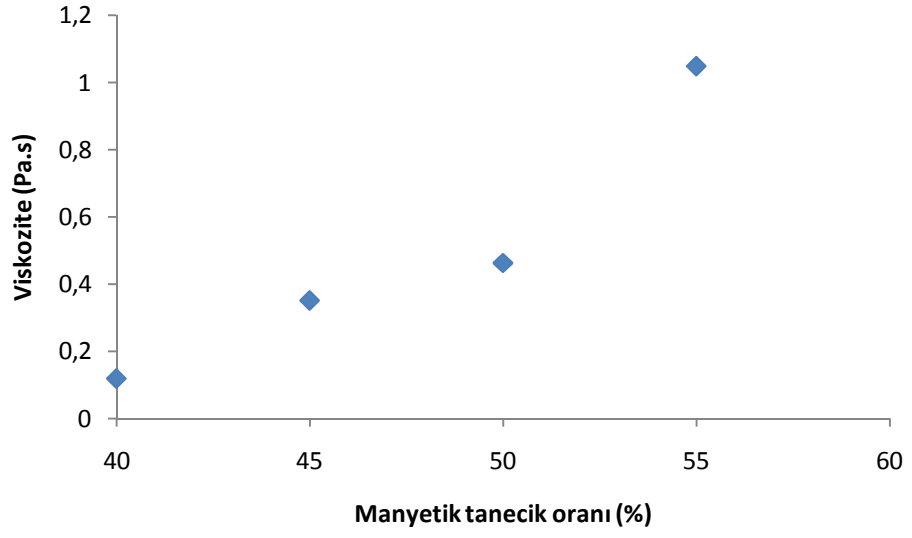


Şekil E.7 : Katkı çeşidinin T-3 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

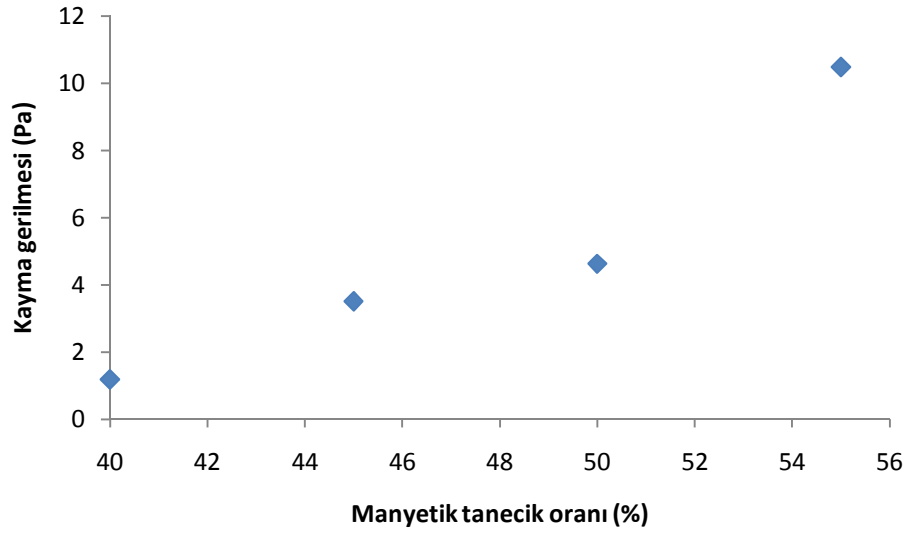


Şekil E.8 : Katkı çeşidinin T-5 tanecikleri ile hazırlanan akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

EK-E.4

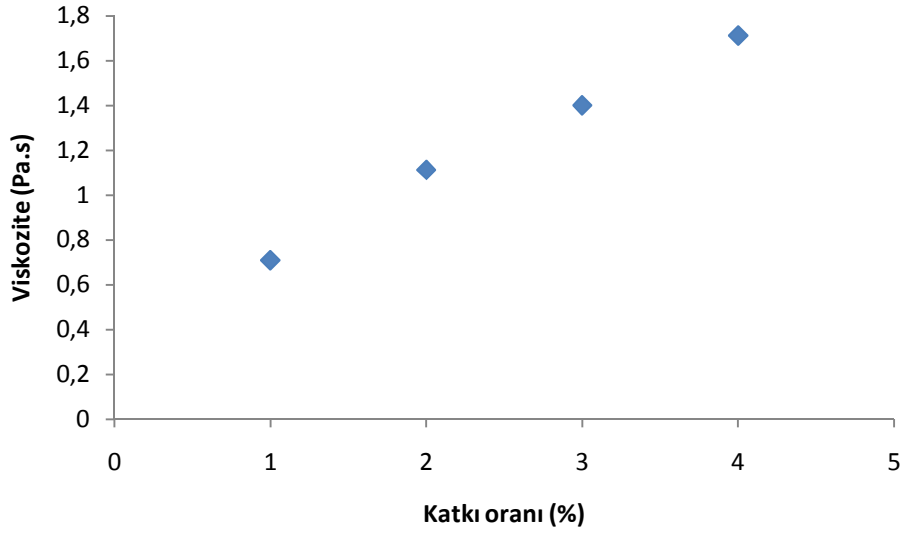


Şekil E.9 : Manyetik tanecik oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan olmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında).

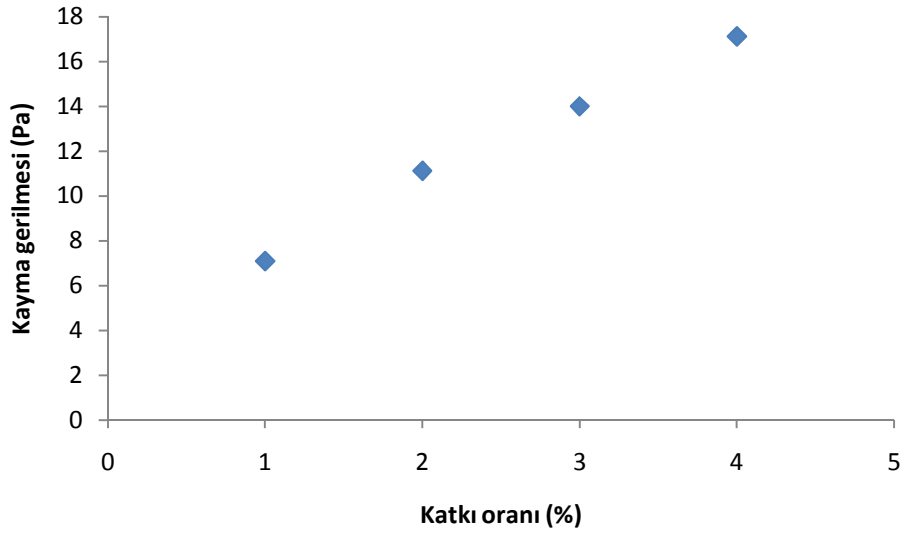


Şekil E.10 : Manyetik tanecik oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan olmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında).

EK-E.5

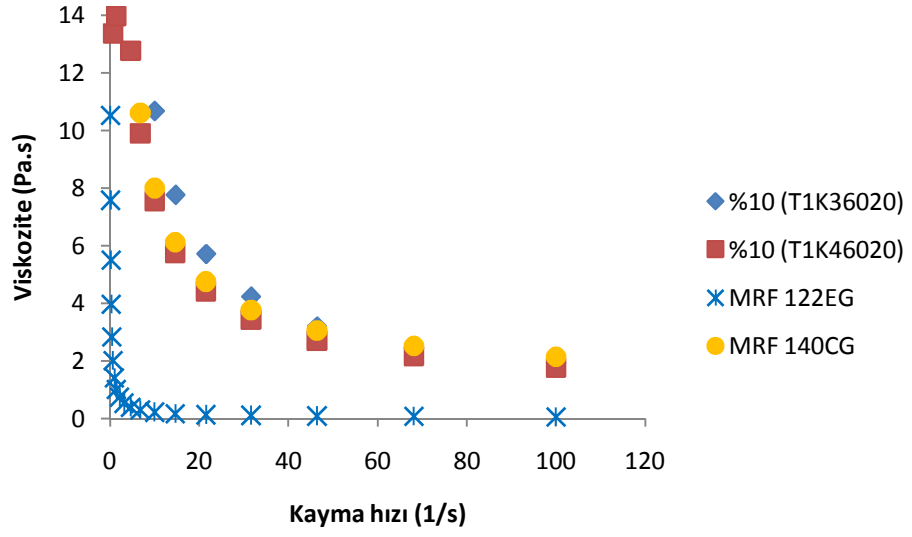


Şekil E.11 : Katkı maddesi oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan bulunmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında).

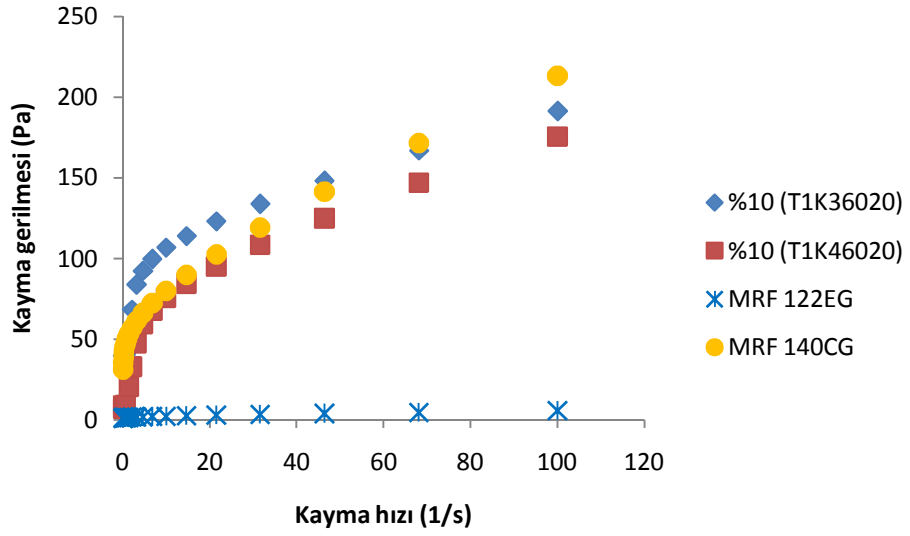


Şekil E.12 : Katkı maddesi oranı ile kayma gerilmesi değişimi (manyetik alan bulunmadığı koşullarda, 10 s^{-1} kayma hızında).

EK-E.6

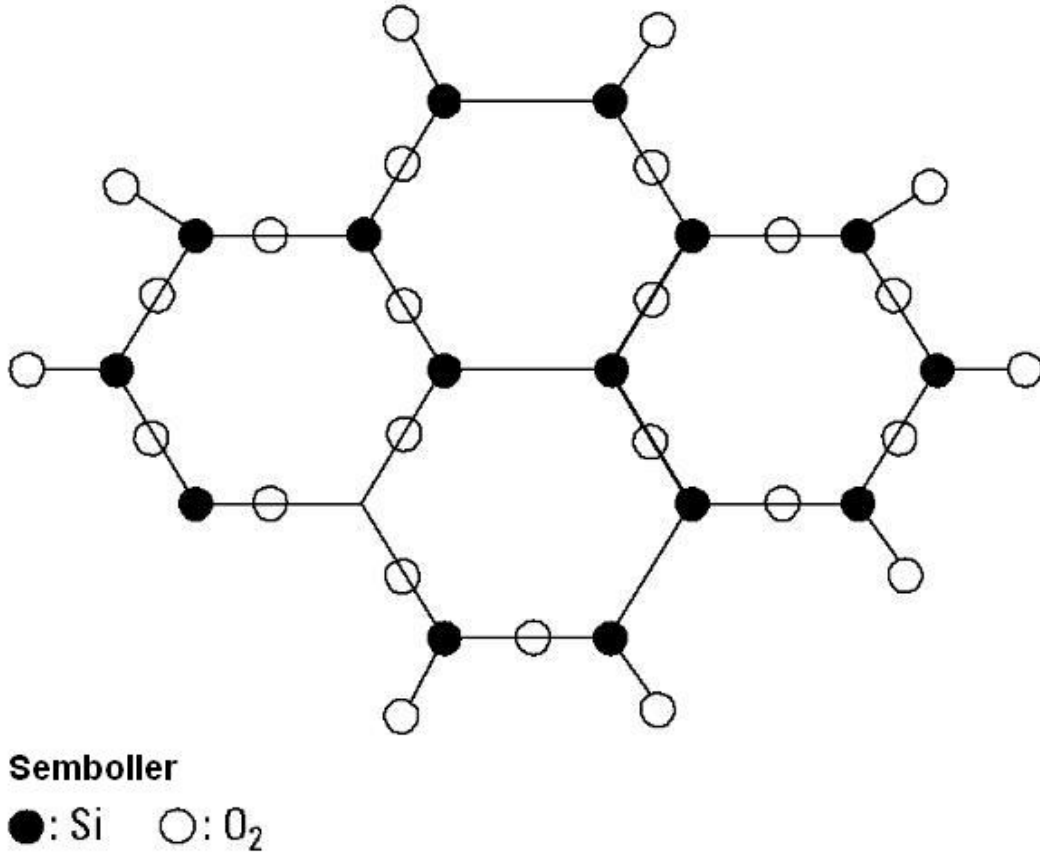


Şekil E.12 : %10 katkı oranının MR akışkanların viskozitelerine olan etkisi.



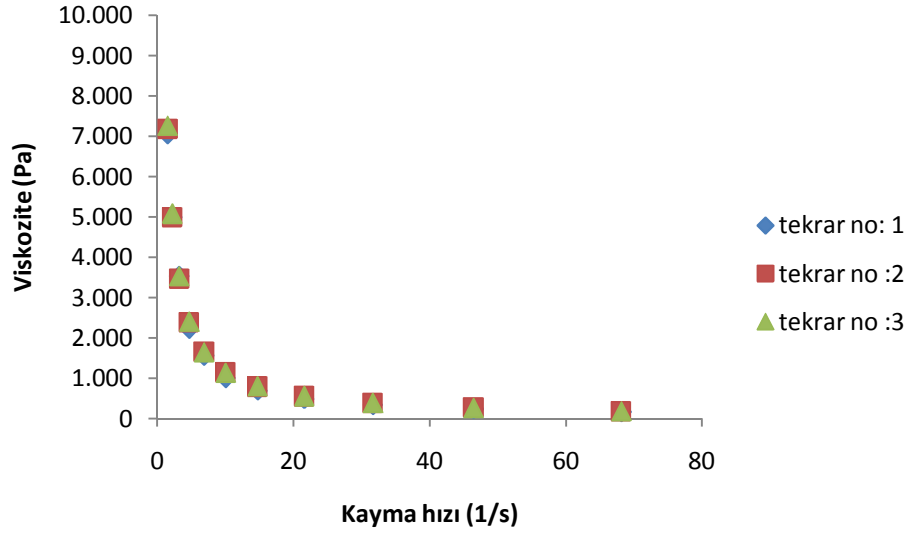
Şekil E.13 : %10 katkı oranının MR akışkanların kayma gerilmelerine olan etkisi.

EK-F



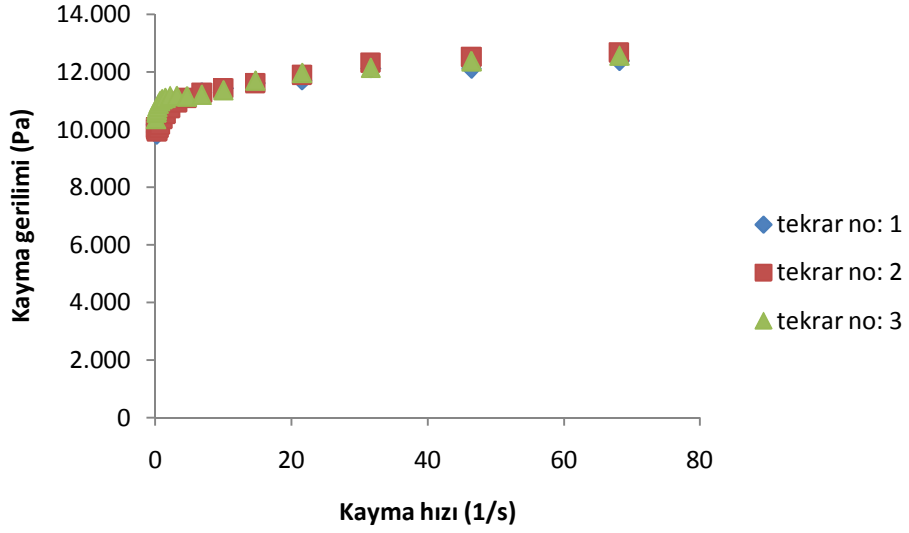
Şekil F.1 : SiO₂'nin kendi arasında oluşturduğu ağ yapısı.

EK-G.1



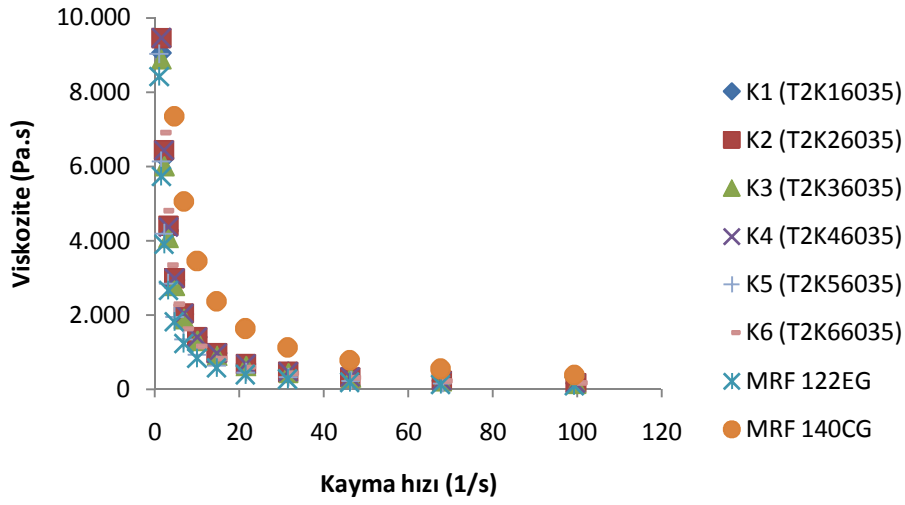
Şekil G.1 : T5K56035 akışkanının manyetik alan koşullarında viskozitesinin tekrarlanabilirliği.

Şekil G.1 :

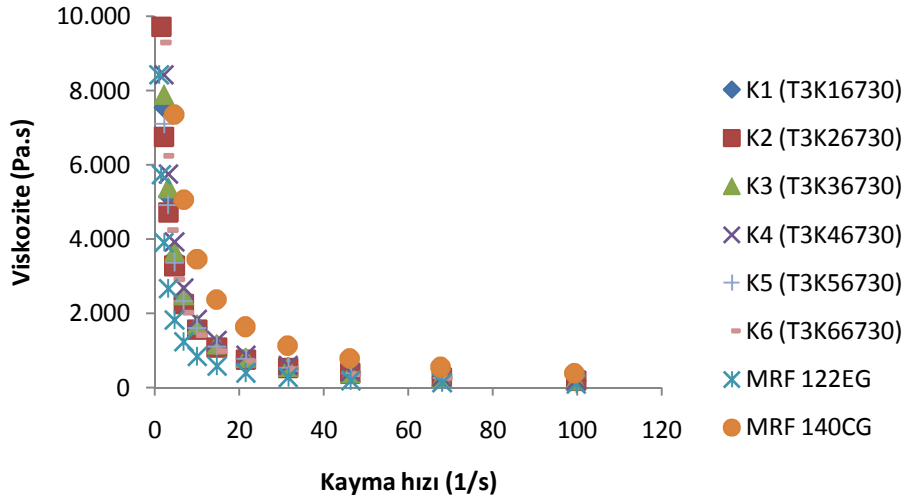


Şekil G.2 : T5K56035 akışkanının manyetik alan koşullarında kayma gerilmesinin tekrarlanabilirliği

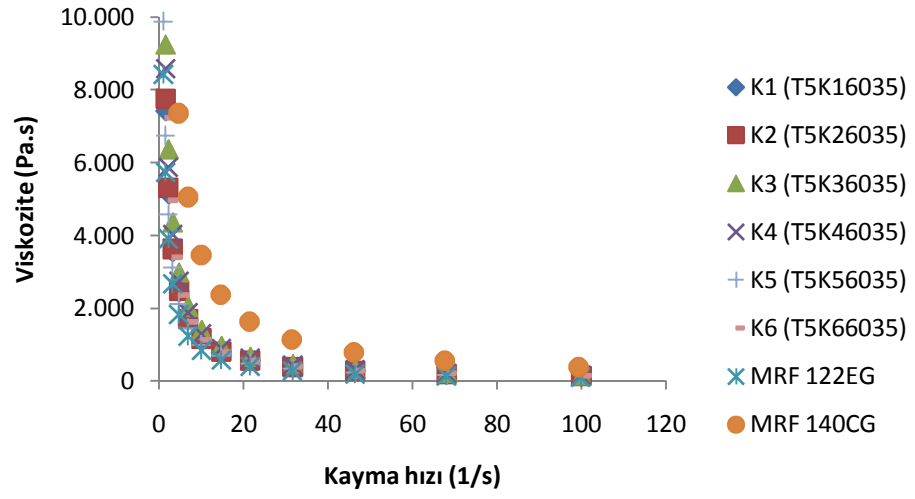
EK-G.2



Şekil G.3 : Katkı maddesi çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi.

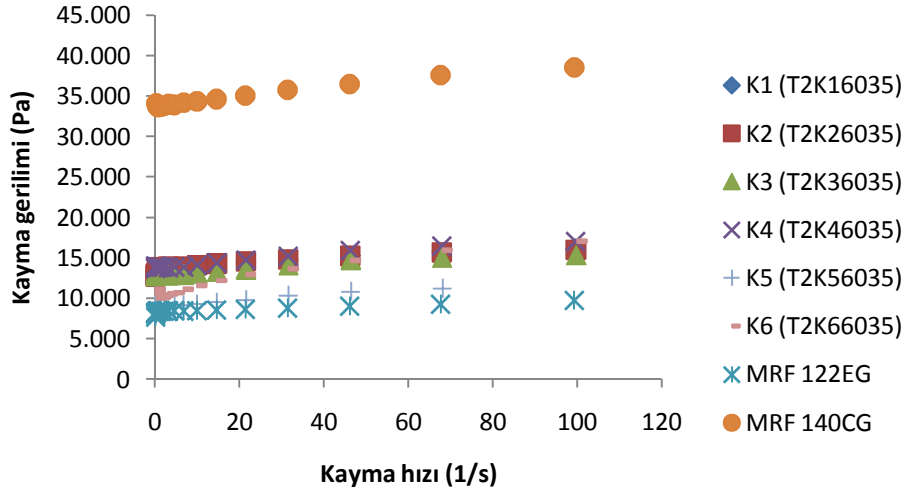


Şekil G.4 : Katkı maddesi çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi.

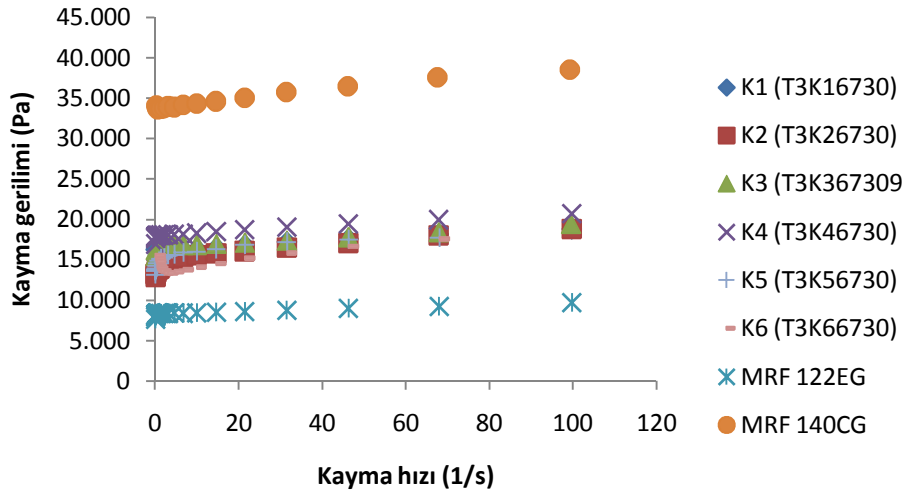


Şekil G.5 : Katkı maddesi çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların viskozitelerine etkisi.

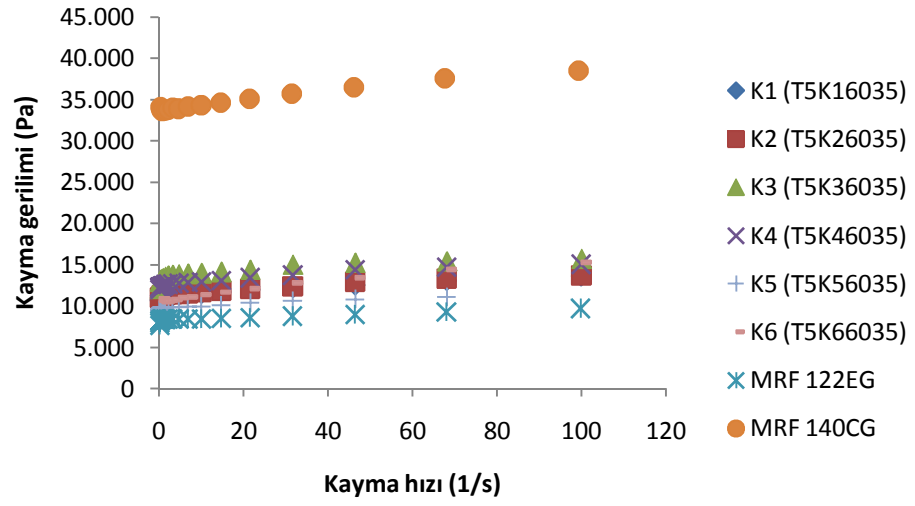
EK-G.3



Şekil G.6 : Katkı maddesi çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

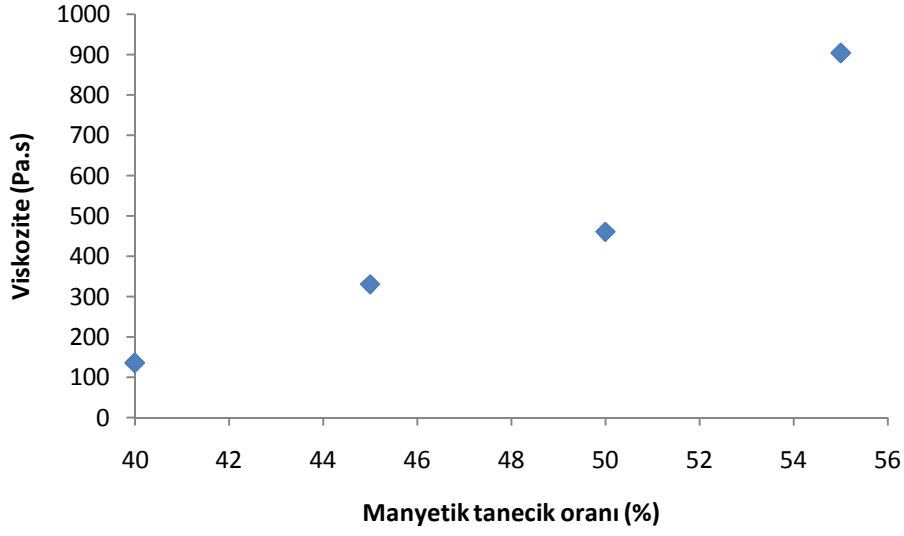


Şekil G.7 : Katkı maddesi çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

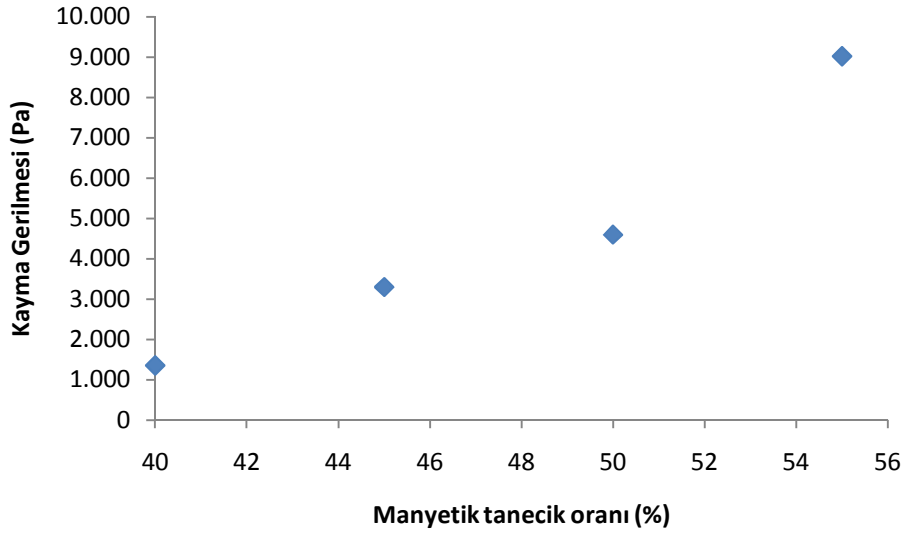


Şekil G.8 : Katkı maddesi çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

EK-G.4

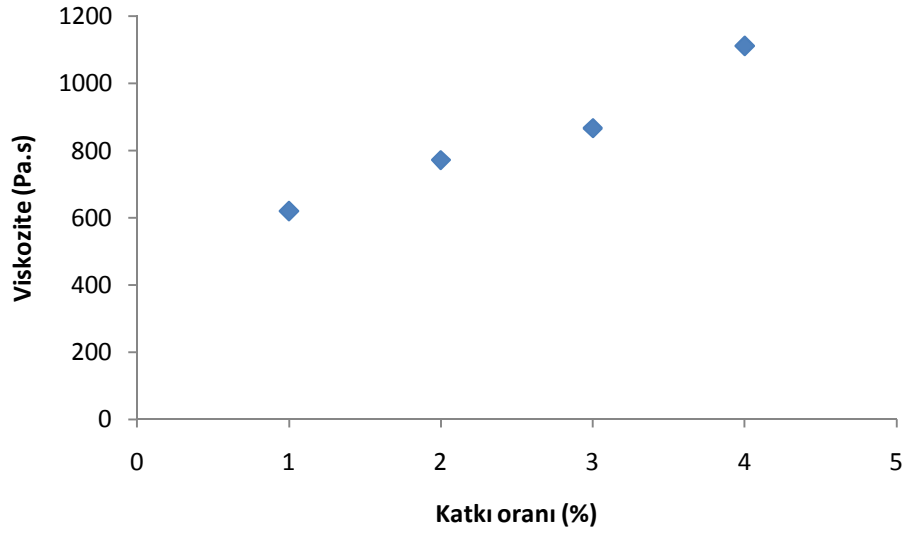


Şekil G.9 : Manyetik tanecik oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında).

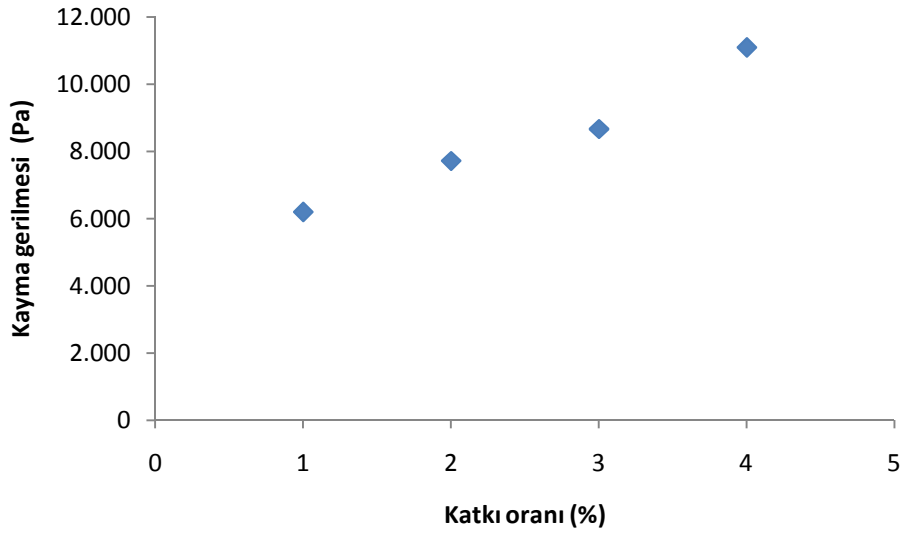


Şekil G.10 : Manyetik Tanecik oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında).

EK-G.5

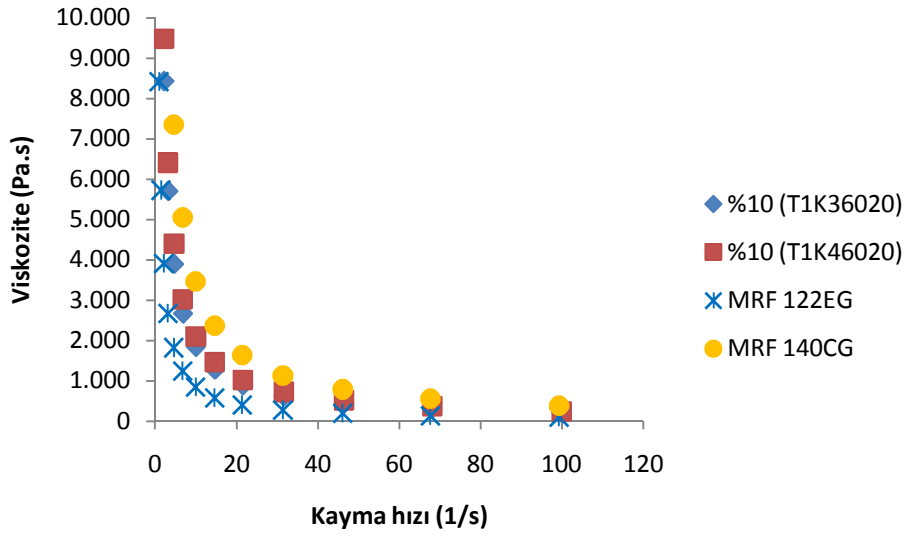


Şekil G.11 : Katkı maddesi oranı ile viskozitenin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında).

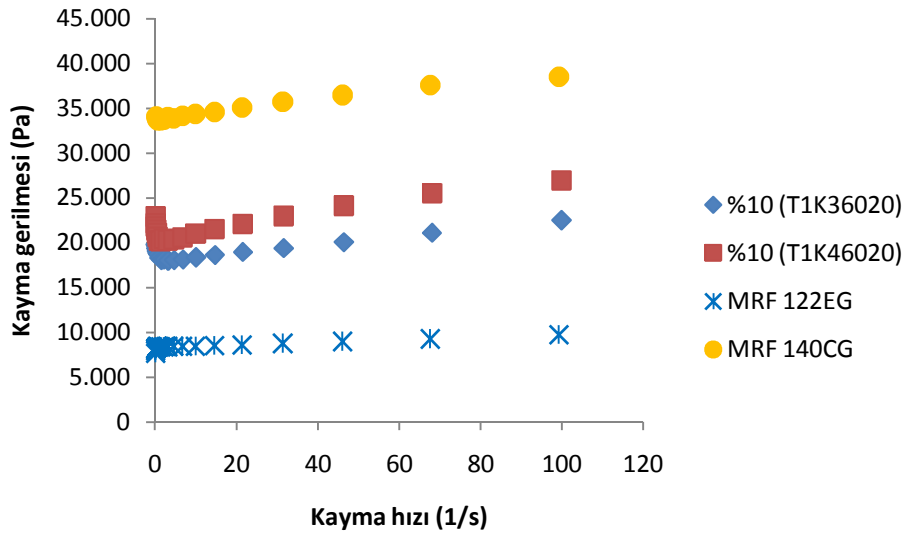


Şekil G.12 : Katkı oranı ile kayma gerilmesinin değişimi (manyetik alan koşullarında, 10 s^{-1} kayma hızında).

EK-G.6

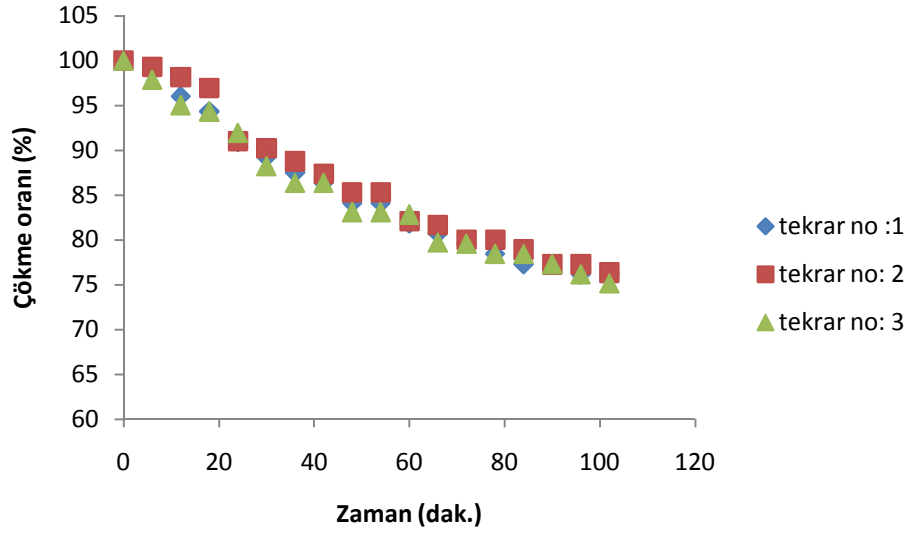


Şekil G.13 Manyetik alan koşullarında, %10 katkı maddesi oranının akışkanların viskozitelerine etkisi.



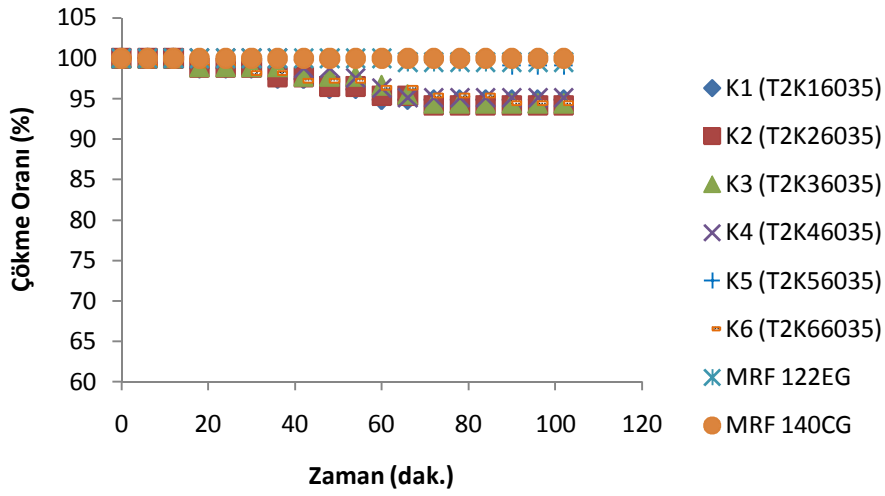
Şekil G.14 Manyetik alan koşullarında, %10 katkı maddesi oranının akışkanların kayma gerilmelerine etkisi.

EK-H.1

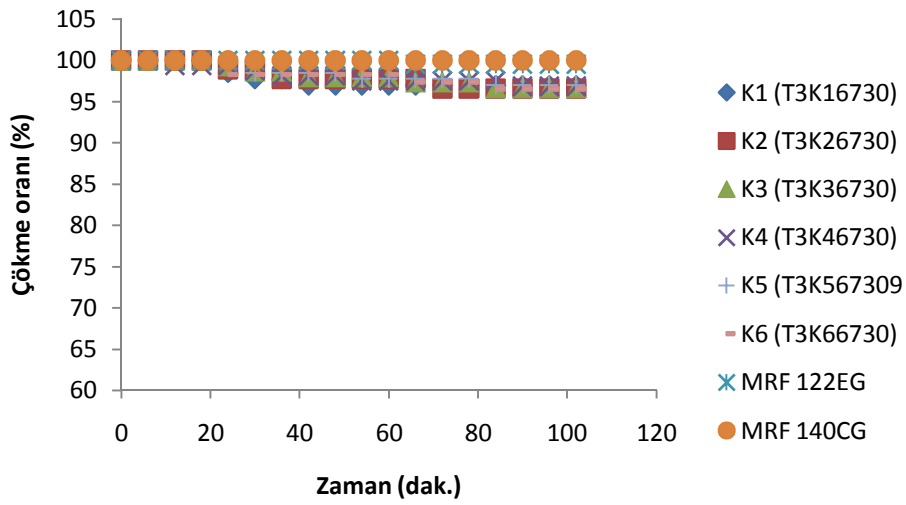


Şekil H.1 : MR akışkanların çökme özelliklerinin tekrarlanabilirliği.

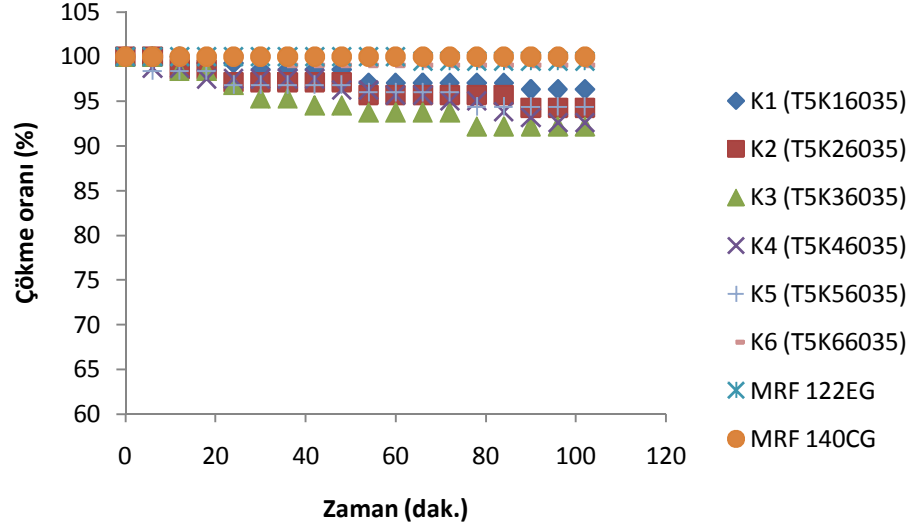
EK-H.2



Şekil H.2 : Katkı çeşidinin T-2 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi.

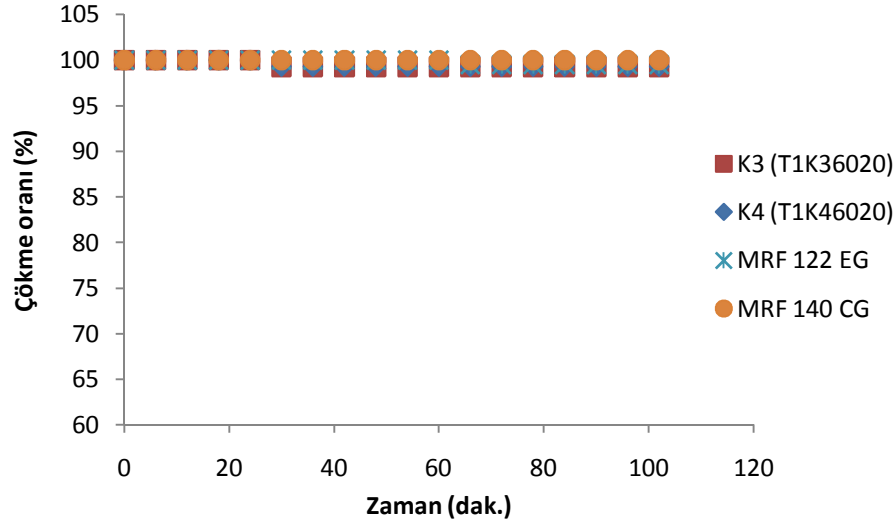


Şekil H.3 : Katkı çeşidinin T-3 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi.



Şekil H.4 : Katkı çeşidinin T-5 taneciği ile hazırlanmış MR akışkanların çökmelerine olan etkisi.

EK-H.3



Şekil H.5: %10 katkı oranının MR akışkanların çökmelerine etkisi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Serhat Güler

Doğum Yeri ve Tarihi: Çorlu – 08.11.1985

Adres: İçerenköy Mah. Şükran Sok. No: 02 D: 13 Ataşehir/İSTANBUL

Lisans Üniversite: Hacettepe Üniversitesi