İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kim. Müh. H. Ebru UZUN

Anabilim Dalı : Kimya Mühendisliği

Programı : Kimya Mühendisliği

OCAK 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kim. Müh. H. Ebru UZUN
506051012

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2008

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL**

Diğer Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. F. Seniha GÜNER(İ.T.Ü.)**

Doç. Dr. Ata MUGAN(İ.T.Ü.)

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Manyetoreolojik akışkanlar, özellikle otomotiv sektöründe gün geçtikçe önemi artan akıllı akışkanlardır. Manyetik alan altında reolojik özelliklerindeki inanılmaz değişim, hızlı cevap süresi ve geri döndürülebilirliğinin yanı sıra akış özelliklerinin manyetik alanla kontrol edilebilmesi de onları dikkat çekici yapmaktadır. Ülkemizde bu konuda yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır.

MR akışkanların laboratuarda üretilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli manyetoreolojik akışkanlar sentezlenerek birtakım özellikleri incelenmiştir.

Çalışmalarımda beni destekleyen değerli bilim insanları; danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL' e, Sayın Prof. Dr. Birgül TANTEKİN-ERSOLMAZ'a ve Sayın Prof. Dr. F.Seniha GÜNER'e teşekkür ederim. Damper deneylerim sırasında ve sonrasında bana yardımcı olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ata MUGAN'a teşekkürlerimi sunarım. ROTAM laboratuarlarında damper performans testlerini gerçekleştirmemize olanak tanıyan İ.T.Ü Uçak-Uzay Fakültesi'ne ve bu testleri gerçekleştirmemizi sağlayan teknisyen Müslüm Çakır'a teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında bana destek olan kıymetli arkadaşım Hepşen Sade ve ailesine teşekkürü borç bilirim.

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

Beni her zaman anlayan ve bana hep inanan anneme, babama, ağabeyime ve ablama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ARALIK, 2007 **Hatice Ebru UZUN**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **iv**
TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **viii**
ÖZET **x**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. TEORİK KISIM **3**
2.1 MR Akışkanlar 3
2.1.1 Taşıyıcı Faz 4
2.1.2 Manyetik Malzemeler 4
2.1.3 Katkı Maddeleri 7
2.2 Manyetoreolojik Akışkan-Elektroreolojik Akışkan-Ferro Akışkanların Kıyaslanması 8
2.3 Reoloji 9
2.3.1 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri 13
2.3.1.1 Bingham Plastik Model 13
2.4 MR Akışkan Uygulamaları 14

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 19
3.1 Malzeme ve Materyal 19
3.1.1 Manyetik Malzeme 19
3.1.2 Yağlar 19
3.1.3 Silika 20
3.2 Malzeme ve Maddelerin Karakterizasyonu 20
3.3 MR Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Ölçülmesi 20
3.4 Çökme Testi 22
3.5 Damper Performans Testleri 22

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 24
4.1 MR Akışkanların Sentezi 26
4.2 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri 26
4.2.1 Taşıyıcı Fazın Reolojik Özelliklere Etkisi 26
4.2.2 Manyetik Taneciklerin Reolojik Özelliklere Etkisi 28
4.2.3 Manyetik Tanecik Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi 29
4.3 Manyetoreolojik Akışkanların Manyetoreolojik Özelliklerinin Belirlenmesi 31
4.3.1 Taşıyıcı Fazın Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi 31
4.3.2 Manyetik Taneciklerin Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi 33

4.3.3 Manyetik Tanecik Oranının Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi 34
4.3.4 Manyetik Alan Altında Manyetoreolojik Özelliklerde Meydana Gelen Değişimler 35
4.4 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özellikleri 36
4.5 Damper Performans Testleri 37
4.5.1 Taşıyıcı Fazın Sönüm Katsayısına Etkisi 38
4.5.2 Manyetik Taneciklerin Sönüm Katsayısına Etkisi 39
4.5.3 Manyetik Tanecik Oranının Sönüm Katsayısına Etkisi 39
4.6 Matematik Model 41

5. VARGILAR 46

6. ÖNERİLER 48

KAYNAKLAR 49

EKLER 52

ÖZGEÇMİŞ 63

KISALTMALAR

MR **:** Manyetoreolojik

ER **:** Elektroreolojik

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Maddelerin reolojik davranışlarına göre sınıflandırılması 10

Tablo 3.1: MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan taneciklerin özellikleri 19

Tablo 3.2: MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan yağlar 19

Tablo 4.1: Hazırlanan MR akışkanların özellikleri 26

Tablo 4.2: B akışkanının manyetik alan varlığında ve yokluğunda viskozite değerleri 36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	**:** Paralel iki plaka arasında akış	10
Şekil 2.2	**:** Akış davranışları	12
Şekil 2.3	**:** Akma gerilimi	13
Şekil 2.4	**:** Bingham plastik modeli şematik gösterimi	15
Şekil 2.5	**:** Yapılarda MR damperlerin kullanılması	16
Şekil 2.6	**:** Köprülerde MR damperlerin kullanılması	16
Şekil 2.7	**:** The Dong Ting Lake Köprüsü, Çin	17
Şekil 2.8	**:** Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi, Japonya	17
Şekil 2.9	**:** Lord'da Dizayn Edilen Çamaşır Makinesi	18
Şekil 2.10	**:** Protez Diz	18
Şekil 3.1	**:** MR Akışkanların Reolojik Özelliklerini Ölçmede Kullanılan Anton Paar Physica MCR 301 Model Reometre	21
Şekil 3.2	**:** Damper performans testlerinin gerçekleştirildiği Üniversal Yorulma Test Sistemi	23
Şekil 4.1	**:** MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan demir taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	24
Şekil 4.2	**:** MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan yağların FTIR pikleri	25
Şekil 4.3	**:** Taşıyıcı fazın *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi	27
Şekil 4.4	**:** Taşıyıcı fazın *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi	27
Şekil 4.5	**:** Manyetik taneciklerin *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi	29
Şekil 4.6	**:** Manyetik taneciklerin *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi	29
Şekil 4.7	**:** Manyetik tanecik oranının *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi	30

Şekil 4.8 **:** Manyetik tanecik oranının *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi 31

Şekil 4.9 **:** Taşıyıcı fazın *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi 32

Şekil 4.10 **:** Taşıyıcı fazın *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi 32

Şekil 4.11 **:** Manyetik taneciklerin *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi 33

Şekil 4.12 **:** Manyetik taneciklerin *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi 34

Şekil 4.13 **:** Manyetik tanecik oranının *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi 35

Şekil 4.14 **:** Manyetik tanecik oranının *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi 35

Şekil 4.15 **:** Manyetoreolojik akışkanların çökmesinin zamanla değişimi 37

Şekil 4.16 **:** MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi 40

Şekil 4.17 **:** Matematik model yardımıyla B akışkanı için elde edilen sönüm hız grafiği 42

Şekil 4.18 **:** Matematik model yardımıyla B akışkanı için elde edilen kuvvet-hız- sönüm grafiği 43

Şekil 4.19 **:** B akışkanı için matematik model yardımıyla ve damper testleriyle elde edilen kuvvet-hız grafikleri 44

Şekil 4.20 **:** Sıcaklığın manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi 45

SEMBOL LİSTESİ

A : Kayan alan [m^2]

F : Kayma kuvveti [N]

G : Elastisite modülü [Pa/s]

L : Damper uzunluğu [mm]

Q : Hacimsel akış hızı [mm^3/s]

U : Piston hızı [mm/s]

V : Akışkanın plakalar arasından akma hızı [m/s]

c : Sönüm katsayısı(yalnızca denklem 4.1'de hız dağılımına bağlı boyutsuz değişken) [N/m/s]

c_0 : Sönüm katsayısı [N/m/s]

g : Akışkanın damper içerisinde aktığı aralık [mm]

h : Plakalar arası açıklık [m]

r : Yarıçap [mm]

w : Damperin çevresi [mm]

x : Piston tarafından kat edilen yol [mm]

ΔP : Damperdeki toplam basınç düşüşü [Pa]

ΔP_μ : Viskoziteden kaynaklanan basınç düşüşü [Pa]

ΔP_τ : Uygulanan manyetik alana bağlı olarak değişen akma noktasından kaynaklanan basınç düşüşü [Pa]

γ : Kayma hızı [1/s]

μ : Viskozite [$N.s/m^2$]= [Pa.s]

τ : Kayma gerilimi [N/m^2]= [Pa]

τ_0 : Akma noktası [N/m^2]= [Pa]

τ_y (H) : manyetik alanın fonksiyonu olan akma noktası [Pa]

t : Zaman [s]

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZİ

ÖZET

Manyetoreolojik akışkanlar, manyetik alan etkisine tabi tutulduklarında milisaniyeler gibi kısa sürelerde viskozitelerinde meydana gelen çok büyük artışlardan dolayı son yıllarda ilgi çekmeye başlamışlardır. Bu özellikleri sayesinde, mekanik hareketleri(sarsıntıları) sönümlendirme konusunda eşsiz akışkanlar haline gelmişlerdir. MR akışkanlar otomobillerde başta sarsıntı söndürücü olarak kullanılan damperler olmak üzere; fren, debriyaj, yolcu güvenlik sistemleri vs. sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca bina ve köprülerde de kullanımına başlanan MR akışkanların uzay çalışmalarında ve robotlarda kullanılması gündemdedir. Ülkemizde henüz bu konuda yapılmış bir çalışma bulunmazken dünyada otomobil üreticileri MR akışkanlar üzerine Ar-Ge çalışmaları yapmaktadırlar. MR akışkanlar, öneminin anlaşılmasına karşın yeterince yaygın olarak üretilmemektedirler. Bu nedenle ekonomik oldukları söylenemez. Bu da bizi laboratuar ortamında bu akışkanı üretmeye yönlendirmiştir.

Bu çalışmada çeşitli MR akışkanlar sentezlenerek reolojik özellikleri incelenmiş ve ticari MR akışkanla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla manyetik özelliklere sahip dört farklı tanecik, üç farklı yağ, değişik tanecik oranları ve silika dumanı kullanılarak toplam sekiz adet MR akışkan numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin manyetik alan varlığında ve yokluğunda reolojik ve manyetoreolojik özellikleri belirlenmiştir. Bu akışkanların özellikleri halen ticari olarak satılmakta olan bir MR akışkanın özellikleriyle kıyaslanmıştır. Çalışmalar sırasında, yağın viskozitesi, tanecik tipi, karışım içindeki tanecik oranı parametre olarak seçilmiş ve bu parametrelerin akışkanların reolojik ve manyetoreolojik özelliklerine olan etkisi irdelenmiştir. Tanecik oranı ve yağın viskozitesinin akışkan özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği anlaşılmıştır. Artan tanecik oranı ve yağ viskozitesi, hazırlanan MR akışkanın viskozitesini artırmaktadır.

Hazırlanan MR akışkanların damper performansları da incelenmiştir. Bu amaçla akışkanlar bir damper içerisine doldurularak ve bir yorulma test cihazı kullanılarak test edilmişlerdir. Bu testlerde akışkanlara farklı değerlerde gerilim uygulanarak, farklı şiddette manyetik alana maruz bırakılmışlardır. Laboratuar deneyleri ve damper testleri birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. Sonuçlar arasında paralellikler gözlenmiştir. Tıpkı laboratuar deneylerinde olduğu gibi damper testlerinde de yüksek viskoziteli yağ ile hazırlanan akışkanlar ve yüksek tanecik oranına sahip olan akışkanlar yüksek viskoziteye sahiptir. Bu da yüksek sönüm katsayısı anlamına gelmektedir. Ayrıca sentezlenen akışkanların çökme özellikleri incelenmiştir. Genel olarak akışkanların çökmelerinin önlenemediği söylenebilir. Fakat damper içerisinde test edilen akışkanlardan biri 24 saat bekletilerek tekrar test edilmiştir ve bekletilen akışkanın sönüm kabiliyetinde herhangi bir azalma gözlenmemiştir. Bundan başka bir matematik model yardımıyla akışkanların manyetik alan olmayan durumdaki akma özellikleri belirlenerek sönüm eğrisi çıkarılmıştır ve damper test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçların düşük hız bölgesi dışında uyumlu olduğu görülürken matematik modelden kaynaklanan olası hataların sebepleri sorgulanmıştır. Ayrıca matematik model yardımıyla aynı akışkanın çeşitli şiddetteki manyetik alan altında olası üç boyutlu hız-kuvvet–akma noktası grafikleri çıkarılmıştır.

SYNTHESIS OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS

SUMMARY

Nowadays magnetorheological fluids are attractive because of their significantly changeable rheological properties within miliseconds by the application of an external magnetic field. Thus, they are excellent in damping the vibration. MR fluid devices are being used in automotive industry basically as shock absorbers, then used in brakes, clutches, passenger belt systems etc. Moreover, they are being used in buildings to control of seismic vibrations and will be used in aerospace engineering and robots in the future. There isn't any accomplished investigation ever known in Turkey about MR fluids. But in contrast there are many research and developments have been performed all over the world. However, the mass production of MR fluids is still limited, that makes them expensive.

In this study, MR fluids have been synthesized in the laboratory and their rheological properties were investigated and compared with a commercial MR fluid. Eight MR fluid samples were prepared by using four different magnetic particles, three different carrier fluids and fumed silica. The percentage of magnetic particles in the MR fluids ranged from 50 to 70%. Their rheological and magnetorheological properties were determined with and without an external magnetic field. The viscosity of the carrier fluid, type of particles and particle percent were chosen as the basic parameters and their effects on rheological and magnetorheological properties were investigated.

The experimental results showed that particle percent and the viscosity of the carrier fluid significantly affect the fluid properties. The viscosities of MR fluids increase with increase in the particle percentage and viscosity of the carrier fluid.

The prepared MR fluids were also tested in a damper to investigate their damping characteristics. In the tests, magnetic field of different intensity were applied to the damper by changing the voltage between 0 and 10 V. The result obtained from these

tests showed that the MR fluids prepared with high viscosity carrier fluid and high particle percentages have higher damping coefficients. The damping coefficients of the MR fluids are strongly dependent on the piston speed and quickly decrease at speed smaller than 2 mm/s, after that it attains almost an asymptotic profile change rather slowly. The sedimentation properties of the synthesized fluids were also investigated. The sedimentation problem could not be prevented. A fluid, left for 24 hour to sediment, was also test in damper and no deterioration was observed in the performance of the fluid in comparison with the well-mixed case, indicating that fluid is redispersible. Moreover, rheological properties of the fluids were determined with a mathematical model and compared with damper test results. The results are fit except the low velocity values. For the same fluid, three dimensional velocity-force-yield point graphics were also determined with the mathematical model under different external magnetic field.

1. GİRİŞ

Ülkemizde otomotiv sektörü sanayileşmiş ve sanayileşmekte olan birçok ülkede olduğu gibi, ekonominin lokomotif sektörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bunun nedeni, otomotiv sektörünün diğer sanayi kollarıyla olan yakın ilişkisidir. Otomotiv sektörü, demir-çelik, petro-kimya gibi temel sanayi kollarının temel müşterisi ve bu sektörlerdeki teknolojik gelişimlerin sürükleyicisidir. Ayrıca tüm sanayi sektörlerinin ihtiyaç duyduğu motorlu araçları sağlayan da otomotiv sektörüdür. Bu sektördeki gelişim ve yenilikler, ekonominin tümünü yakından etkilemektedir.

Ekonomiyi bu kadar yakından etkileyen bir sektörün gelişimi ve pazardaki yoğun rekabetin de gerektirdiği müşteri tatmini, yoğun Ar-Ge çalışmalarını gerektirir. Bu nedenle otomotiv sektörü yeniliğe açık ve sürekli gelişen bir sektördür.

Otomobillerde kullanılan pasif süspansiyon sistemler klasik yay ve damperden oluşurlar. Aktif sistemler ise hidrolik aktüatörler vasıtası ile yola göre kuvvet kontrolünün sağlandığı süspansiyon sistemleridir. Bir de pasif süspansiyon sistemlerinin yalınlığı ve aktif süspansiyon sistemlerinin yüksek performansını bir arada taşıyan yarı aktif süspansiyon sistemleri vardır. Bu sistemler yol koşullarına göre yalnızca damper katsayısının değiştirilmesi prensibine dayanırlar. İki sistemin avantajını bir arada bulunduran yarı aktif süspansiyon sistemler önce valf kontrollü damperler ile kullanılmışlardır. Daha sonra bu sistemlerde Elektroreolojik (ER) akışkanların kullanılması için araştırmalar yapılmış, son yıllarda ise Manyetoreolojik (MR) akışkanların üstün özellikleri fark edilerek araştırmalar MR akışkanlara doğru kaymıştır ve uygulamalar bu doğrultuda olmuştur. MR akışkanlar taşıyıcı bir faz içerisine, mıknatıslanma özelliği gösteren belirli oranda katı taneciklerin konulmasıyla elde edilen özel akışkanlardır. Bu akışkanlar manyetik alana maruz bırakıldıklarında çok kısa zaman aralıklarında viskozitelerinde önemli artış olur ve katı gibi davranmaya başlarlar. Manyetik alanın sona ermesiyle ise aynı hızda eski hallerine dönerler. MR akışkanların tercih edilme sebeplerinin başında sarsıntıları zaman gecikmesi olmadan, eşsiz bir şekilde söndürmeleri gelir. Ayrıca düşük enerji tüketmeleri, uzun ömürlü olmaları, reolojik özelliklerinin manyetik alanla kontrol

edilebilmesi de onları çekici yapar. Bugün bazı otomobil firmaları, otomobillerde sarsıntı sönümünü sağlayan, MR akışkanlarla çalışan MR damperler kullanmaktadırlar. MR damperler, otomobillerde sarsıntıyı söndürmekten başka debriyaj, fren sistemlerinde hatta yolcu güvenlik sistemlerinde kullanılmaktadır. Otomobiller dışında inşaat sektöründe de kullanılmaktadırlar. Özellikle Japonya'da binalarda kullanılmaya başlanan MR damperler, olası deprem ve rüzgar kaynaklı sarsıntıları sönümlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Deprem gerçeği ile karşı karşıya olan ülkemizde ilerleyen yıllarda bu uygulamanın yapılabilmesinin hayati önemi tartışılamaz.

Ayrıca çamaşır makinelerinde, uzay mekiklerinde kullanılması planlanan MR akışkanların robotlarda kullanılmasıyla el ve kollarını insan kadar doğal kullanabilen robotlar yapılabilecektir.

Her yeni teknolojide olduğu gibi MR akışkanlarda da temel güçlük akışkanın yaygın olarak üretilmemesi dolayısıyla pahalı olmasıdır. Ayrıca ülkemizde bu konuda bilinen bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada MR akışkanın laboratuarda üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilecek olan akışkanların reolojik ve manyetoreolojik özellikleri belirlenerek karakterize edileceklerdir. Ayrıca farklı özellikte akışkanlar hazırlanarak tanecik tipi, yağ viskozitesi, tanecik derişimi gibi bazı temel parametrelerin akışkanın manyetik alan varlığında ve yokluğundaki akış özelliklerine etkisi incelenecektir. Yine bu çalışma çerçevesinde bu akışkanların damper performansları incelenecektir.

2. TEORİK KISIM

2.1 MR Akışkanlar

Manyetoreoloji, manyetik alan etkisine tabi tutulmuş olan maddelerin akma ve deformasyon özelliklerini incelemektedir [1]. Manyetoreolojik akışkanlar, dışarıdan manyetik alan uygulandığında viskozitelerinde çabuk, tersinir ve önemli değişikliklerin meydana geldiği akışkanlardır [2]. MR akışkanların ilk keşfi 1940'lı yılların sonunda Jacob Rabinow (Rabinow, 1948a, 1948b, 1951) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmayı daha sonra Winslow'un elektroreolojik akışkanlar çalışması izlemiştir. ER ve MR akışkanların keşfinden sonra 1990'lı yıllara kadar ER akışkanlar hakkında, MR akışkanlardan daha fazla çalışma yapılmıştır. 1990'lı yıllardan sonra ise MR akışkanlar üstün özellikleri sayesinde önem kazanmışlardır [3]. MR akışkanlar kolloid olmayan (0,05-10μm), çok odacıklı yapıda, yumuşak-manyetik taneciklerin organik sıvı ya da su ile karıştırılmasıyla hazırlanmaktadır. Kullanılan katı taneciklerin boyutu, boyut dağılımı, şekli, manyetik doygunluk ve manyetik alanın giderilmesi (koersivite) özellikleri MR akışkanların hazırlanmasında göz önüne alınması gereken önemli parametreleridir. 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 [1].

MR akışkanlar; manyetik alan olmayan koşullarda Newtonian akışkan gibi davranmaktadırlar. Bu koşullarda manyetik tanecikler sıvı faz içerisinde rastgele dağılmaktadırlar. Manyetik alan uygulandığında ise, manyetik tanecikler polarize olmakta ve manyetik alan yönüne paralel düzgün çizgiler halinde yeniden konumlanmaktadırlar. Bu sırada milisaniyeler mertebesindeki kısa süreler içinde akışkanın viskozitesi 10^5-10^6 kat kadar artmakta ve sıvı adeta bir katı madde gibi davranmaya başlamaktadır [1]. Manyetik alanın artmasıyla akışkan adeta zayıf viskoelastik bir katı haline gelmektedir [4]. Manyetik alan uygulanmasına son verildiğinde ise akışkan aynı hızla eski haline dönmektedir. Akışkanın eski haline dönmesi için gerekli olan enerji, uygulanan manyetik alanın şiddetiyle artar ve akışkan viskozitesi, manyetik alanın şiddetiyle değişir [1,4]. MR akışkanların

reolojik özelliklerinin manyetik alan ile kontrol edilebilmesi, bazı elektromekanik cihazlarda kullanımına olanak sağlamıştır [4].

Manyetik alanın varlığı, belli kayma gerilimine kadar tanecikleri bir arada tutarak oluşan zincir yapının bozulmasını engeller fakat belirli bir kritik kayma gerilimi değeri aşıldığında zincir yapı bozulur ve madde akmaya başlar. Akışkanların akmaya başladığı bu kayma gerilimi değeri akışkanın *akma noktası*dır. MR akışkanın manyetik alan altındaki davranışı Bingham plastik modeline uymaktadır [1].

2.1.1 Taşıyıcı faz

Taşıyıcı faz, MR akışkan içerisindeki manyetik taneciklere ve katkı maddelerine akışkan ortam sağlamaktadır. MR akışkanın hazırlanmasında kullanılan taşıyıcı fazın kaynama noktası yüksek olmalıdır. Ayrıca, reaktif ve zehirleyici olmamalıdır. Ucuz ve kolay bulunabilir olmalıdır. MR akışkanın çökme tekrar karışma özelliğini ve kararlılığını sağlamak ta taşıyıcı fazın görevidir. Düşük buhar basıncına sahip taşıyıcı faz ile hazırlanan MR akışkanların kullanıldığı cihazlarda sızdırma problemi daha az olmaktadır. Taşıyıcı faz viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi, MR akışkanın kullanıldığı cihazlarda uygulama sıcaklığını belirleyen en önemli faktördür. MR akışkanın hazırlanmasında çoğunlukla organik sıvılar kullanılmaktadır. En çok kullanılanları ise istenen taşıyıcı faz özelliklerinin çoğunu sağladıkları için silikon yağı ve hidrokarbon yağlarıdır [2].

Bica'nın [5] yaptığı çalışmada, hazırlanan MR akışkanda taşıyıcı faz olarak silikon yağı ve stearik asit birlikte kullanılmıştır. Stearik asit kullanılmasının sebebi, demir atomlarıyla bağ oluşturması ve manyetik tanecik yüzeyinin bir tabakayla kaplanmasıdır. İlk kez Park vd. [6] çalışmalarında, kararlılığı artırmak için su-yağ emülsiyonunu taşıyıcı faz olarak kullanmışlardır. Lord'da yapılan bir çalışmada ise hidrokarbon yağı, silikon yağı ve su ile farklı MR akışkanlar hazırlanmıştır ve MR akışkan viskozitesinin büyük ölçüde taşıyıcı fazın bir fonksiyonu olduğu görülmüştür [4].

2.1.2 Manyetik malzemeler

MR akışkan hazırlanırken seçilecek taneciklerin, demir, nikel, kobalt gibi manyetik özellik gösterebiliyor olması gerekir. Bunlardan demir en çok tercih edilenidir. Bunun sebeplerinden biri demirin yüksek manyetik doygunluğa (saturation magnetization) sahip olmasıdır. Manyetik doygunluk, maddeye uygulanan bir manyetik alandan elde edilebilecek maksimum manyetik momenti sağlamaktır. Manyetik moment; manyetik alan yaratan kaynağın şiddetinin ölçüsüdür. Manyetik

doygunluk, maddenin doğasından kaynaklanan bir özelliktir ve demirde yüksektir [7]. Diğer bir önemli özellik ise, koersivite özelliğidir. *Koersivite (coersivity)*; bir maddeye uygulanan manyetik alanın geri döndürülebilirliğine, maddenin göstermiş olduğu dirençtir. Pratikte, manyetik alan uygulanmasına son verildiğinde MR akışkanın en kısa sürede eski haline dönmesi istendiği için koersivitenin de düşük olması istenmektedir. Demir taneciklerinin koersivitesi düşüktür. Koersivite, küçük taneciklerde, tanecik boyutuna bağlıdır. Tanecik boyutunun azalması koersiviteyi artırırken, tanecik boyutunun artması koersiviteyi azaltmaktadır [1].

MR akışkanın içerisindeki demir taneciklerinin hacimce oranı, manyetik alanın varlığında ve yokluğunda akışkanın reolojik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Demir taneciklerinin akışkan içerisindeki oranının artırılması, MR akışkanın maksimum akma noktasını yükseltmekte ve MR akışkanın manyetik alan olmayan durumdaki viskozitesini artırmaktadır. MR akışkanlar hazırlanırken genellikle hacimce %30 ve %50 arasındaki demir taneciği oranları kullanılmaktadır. Bu oran, akışkana makul bir akma noktası ve manyetik alan olamayan durumda makul bir viskozite değeri sağlamaktadır.

Tanecik boyutunun da akışkanın manyetik alan varlığında ve yokluğundaki viskozitesine etkisi bulunmaktadır. Tanecik boyutu, tanecikler manyetik alan altındayken çok odacıklı olacak şekilde seçilmelidir [2]. Çok odacıklı taneciklerde manyetik alan altındaki davranış maddelerin dış yüzey hareketleriyle ve rotasyonuyla kontrol edilmektedir. Tek odacıklı olanlarda ise bu davranış, taneciğin toplam manyetik momentin yüksek olduğu tarafa yönelmesiyle sağlanmaktadır [1].

Ayrıca, demir taneciklerinin küresel yapısı, taneciklere izotropik özellik kazandırmaktadır. Bu da uygulamada yön parametresinden bağımsız olmayı sağlamaktadır. Küresel demir taneciklerinin boyutu 1-10 μm' dir. Aynı demir oranında, daha büyük boyuttaki taneciklerle hazırlanmış MR akışkanın akma noktası, küçük boyuttaki taneciklerle hazırlanan MR akışkanın akma noktasından daha yüksek olmaktadır. Tanecik boyutu 10 μm'yi geçtiğinde ise çökme hızı artacaktır. Bu da MR akışkanın kararlılığını düşürecektir. Tanecik boyutunun 1 μm' den küçük olduğu durumda ise Brownian hareketinden dolayı tanecikler sıcaklığa daha duyarlı hale gelecektir [2]. Brownian hareketi, akışkan içerisindeki katı taneciklerin rastgele hareketi ve aynı zamanda bu hareketi tanımlayan matematik modelin adıdır [8]. Bunun yanı sıra küçük taneciklerde aglomerasyon eğilimi daha yüksek olmaktadır [2].

MR akışkan hazırlanırken demir tanecikleri demir karbonil şeklinde kullanılmaktadır. Demir karbonil, demir penta karbonilin $Fe(CO)_5$ kimyasal olarak bozundurulmasıyla elde edilir. Bu yolla demir tanecikleri, eser miktarda karbon, oksijen ve azot içeren düzgün küresel tanecikler şeklinde elde edilebilmektedir. Bu malzemeyi elde etmek için yüksek değerlikli demir, karbon monoksit ile yüksek basınç altında reaksiyona sokulmakta, böylece demir pentakarbonil elde edilmektedir [9].

Bica'nın yaptığı çalışmada $Fe_2(CO)_9$'un termal bozundurulmasıyla elde edilen tanecikler kullanılmıştır [5]. Elde edilen tanecik özelliklerinin proses şartlarına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Park vd yaptığı çalışmada, kararlılığı artırmak için su-yağ emülsiyonu taşıyıcı faz olarak kullanıldığından, manyetik taneciklerin hidrofobluğunu sağlamak için Tween-80 ile kimyasal adsorpsiyon gerçekleştirilmiştir [6]. Xin'in çalışmasında, silika kaplı nano tanecikler alev sentezi ile elde edilmişlerdir ve bu yöntemle sentezlenen taneciklerin paramanyetik davranış gösterdiği, yani uygulanan manyetik alanla orantılı olarak manyetik özellik kazandığı belirlenmiştir [10]. Ayrıca, elde edilen bu nano tanecikler silanla yüzey modifikasyonundan sonra ferro akışkanlar için kullanılmaktadır. Kroell vd. çalışmasında silika katılarak hazırlanan ferro akışkan ile tanecik boyutunun MR özelliklere etkisi incelenmiştir. Çok küçük boyuttaki taneciklerle hazırlanan ferro akışkanların MR özelliklerinin tanecik boyutuyla arttığı gözlenmiştir. Fakat belli boyuttan sonra tanecik büyüklüğünün artması akışkanın MR özelliklerini fazla etkilememiştir [11]. Jang vd. [12] çalışmasında, demir karbonil tanecikleri polivinilbütiral ile, Cho vd. [13] yaptığı çalışmada ise polimetilmetakrilat ile kaplanmıştır. Her iki çalışmada da akışkanın MR özelliklerindeki çok az değişime karşın, kaplama sayesinde taneciklerin yoğunluğunun düşmüş olması, çökme hızını azaltmıştır. Zhang vd. [14] çalışmalarında, demir oksit nano taneciğini oleik asitle kaplamışlardır. Buna göre, oleik asit moleküllerinin demir oksit taneciğine kimyasal adsorpsiyon ile tek tabakalı olarak adsoplandığı belirlenmiş, adsorpsiyon miktarı ve kaplama yoğunluğunun tanecik boyutuyla ters orantılı olarak değiştiği saptanmıştır. Kaplanan taneciklerin birbirleriyle olan etkileşimleri azalmıştır. Jun vd. [15] çalışmasında demir oksitlere polimer kaplama yapılarak manyetik kompozit tanecikler hazırlanmıştır. Bu tanecikler ve silikon yağı ile hazırlanan MR akışkanın kayma geriliminin kompozitteki demir içeriği arttıkça artığı, akma geriliminin ise kompozitin ağırlık oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir [15]. Pu vd. [16]

çalışmasında, Fe_3O_4 ve karbon nano tüpleriyle nano kompozitler hazırlanmıştır. Kompozitlerle hazırlanan MR akışkanda çökme hızının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

2.1.3 Katkı maddeleri

MR akışkanlar hazırlanırken, manyetik tanecikler ve taşıyıcı faz yanında bazı katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Bunun sebebi, manyetik tanecikler ve taşıyıcı faz arasındaki yoğunluk farkının büyük olmasıyla taneciklerin çökmesidir. Çökme istenen bir durum değildir. Akışkanın mümkün olduğu kadar kararlı olması istenir. Ayrıca çökme üzerinden belirli zaman geçmesiyle oluşabilecek kekleşmenin bozulması ve akışkanın tekrar eski haline gelmesi de gerekmektedir [12]. Tanecikler çöktüğü zaman aralarındaki mesafe azalmakta ve akışkan üzerinde kalan çok küçük bir manyetikleşme etkisi (remnant magnetization) bile taneciklerin aglomerasyonuna sebep olmaktadır [2]. MR akışkanların kullanıldığı cihazlarda, akışkanın temas ettiği yüzeylerde aşınma meydana gelmesi veya demir taneciklerinin oksitlenmesi nedeniyle yüzeylerde korozyon oluşması gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilmektedir [12]. İşte bu nedenlerle çeşitli katkı maddeleri taşıyıcı faz ile karıştırılarak adeta bir ağ yapı oluşturur. Bu durum sıvıyla manyetik tanecikler arasındaki yoğunluk farkını bir ölçüde dengeler. Chin vd. [1] silikon yağı ve demir karbonil ile hazırladıkları MR akışkan içerisine Co-γ-Fe_2O_3 ve Cr_2O_2 katkı maddelerini katarak demir tanecikleri arasında sterik itme etkisi oluşturmuşlardır [1].

MR akışkanların kararlılığı ve taneciklerin taşıyıcı faz içerisinde dağılımında, tanecikler üzerinde manyetik alan uygulandıktan sonra kalan düşük manyetikleşme etkisinden kaynaklanan van der Waals etkileşimi ve manyetik etkileşim de önemli yer tutar. Bu etkileşimlerin azaltılması için manyetik tanecikler arası ortalama uzaklık artırılmalıdır. MR akışkanın derişimini azaltmak, tanecikler arasındaki mesafeyi azaltmakta buna karşın akışkanın özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle katkı maddeleri kullanılarak taneciklere sterik ya da elektrosterik itme etkisi yaratılması, kararlığı ve taneciklerin taşıyıcı faz içerisinde dağılımını sağlarken, akışkan özelliklerini de koruduğundan daha uygun bir yoldur [1].

Lim vd. çalışmasında, MR akışkan içerisine organokil katılarak, taneciklerin çökme hızı azaltılmış, tanecikler arası temas engellenerek akışkanın tekrar özgün haline dönme özelliği sağlanmıştır [17]. Aynı araştırmacılar başka bir çalışmada ise, MR akışkan içerisine silika dumanı katmışlardır. Bu işlemin çökme hızını düşürdüğü ve taneciklerin yüzme kararlılığını sağladığı görülmüştür [18]. Lopez vd.

çalışmalarında; oleik asit, alüminyum stearat ve silika nano tanecikleri ayrı ayrı ilave edilerek hazırlanan MR akışkandaki çökme, aglomerasyon ve çökme sonrası tekrar karışabilme davranışları gözlenmiştir [19]. Buna göre, oleik asit ve alüminyum stearat çökmeyi önleyememiş fakat aglomerasyonu önleyerek, çökme tekrar karışma özelliğini sağlayabilmiştir. Silika nano tanecikleri ise çökmeyi önleyebilmiş fakat uygulanan kayma gerilimi sonrası çökme oluşmuş ve bundan sonra çökme tekrar karışma özelliği sağlanamamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda bu katkı maddelerinin birlikte kullanılması faydalı olabilir. Lopez başka bir çalışmasında ise silikon yağı, demir tanecikleri ve silika nano tanecikleri ile hazırladığı MR akışkanda, silika ve silikon yağı arasında jelsi bir ağ yapı oluştuğunu fakat kararlılığın sağlanabilmesi için silika tanecik derişiminin belli bir değer üzerinde olması gerektiğini belirlemiştir [20]. Winslow, hazırladığı MR akışkanda demir karbonil ve mineral yağı ile seyreltici olarak ferro-naftenat ve ferro-oleat, tiksotropik madde olarak da lityum stearat ve sodyum stearat gibi metal sabunlarını kullanmıştır [21].

2.2 Manyetoreolojik Akışkan- Elektroreolojik Akışkan-Ferro Akışkanların Kıyaslanması

Elektroreolojik akışkanlar (ER); elektrik alan altında polarize olabilen taneciklerin yalıtkan bir yağ içerisinde süspansiyon şeklinde dağılmasıyla elde edilmektedirler. ER akışkanların sentezinde kullanılan katı tanecikler; 0,5-100μm boyutlarında mısır nişastası, silika, baryum titanat ya da yarı iletken malzemeler olabilmektedir. Elektroreolojik etkiyi sağlamak için silika gibi taneciklere polielektrolitler ilave edilmektedir. Su da içerisinde bulunan iyonlar nedeniyle taneciklerin üzerinde iletken bir tabaka oluşturur. Fakat elektroreolojik etki adsorplanan su miktarıyla birlikte azalmaktadır. 50° C sıcaklıkta elektroreolojik etki önemli ölçüde azalmaktadır, bu da ER akışkanların kullanımını sınırlandırmaktadır. Bunun yanı sıra ferroelektrikler, inorganikler, yarı iletken polimerler, metaller, iletken kaplı maddeler ile susuz ER süspansiyonlar hazırlanabilir ve bu maddeler kendiliğinden elektroreolojik özellik taşımaktadırlar. Bu maddeler bulk polarizasyonu ya da ara yüzey polarizasyonu ile elektroreolojik etki göstermektedirler. Ayrıca termal iletkenlikleri daha düşüktür ve bu da 50° C üzerinde elektroreolojik özellikleri önemli ölçüde düşen ER akışkanların kısıtlı olan kullanım aralığını az da olsa genişletmektedir. MR akışkanlara benzer şekilde, elektrik alan uygulandığında tanecikler kutuplaşmaktadırlar. Bu kutuplaşma tanecikler arasında dipol etkileşimine

yol açmakta ve elektrik alan yönünde zincir yapı oluşmaktadır. ER akışkanlar Bingham plastik modeliyle incelenmektedirler. ER akışkanlar en çok valfler, debriyaj, fren ve damperlerde kullanılmak için incelenmiş fakat fazla geliştirilmemişlerdir [1].

Ferro akışkanlar; manyetik sıvılar olarak da bilinmektedirler. Çok küçük (5-10nm), tek odacıklı manyetik taneciklerin sulu ya da susuz süspansiyonlarıdır. Bu tanecikler demir oksit, Mn ve Zn ferritler, Fe ve Co gibi maddeler olabilir. Tanecik boyutu çok küçük olduğundan dolayı, manyetik alan etkisi altında sıcaklık değişimiyle Brownian kuvvetleri ortaya çıkmaya başlar. Bu da taneciklerin dipol kuvvetinden dolayı oluşturdukları zincir dizilmeyi ortadan kaldırmaktadır. Ferro akışkanların davranışları manyetik alan altında viskoziteye bağlı olarak değişebilmesine karşın belli bir akma noktasına sahip değildirler. Ferro akışkanlar, döner sızdırmazlık sistemleri, manyetik yataklar ve motor damperlerinde kullanılmaktadırlar [1].

MR akışkanlar, benzerleri olan ER akışkanlardan daha popülerdir. MR akışkanların akma noktası ER akışkanlarınkinden yüksektir. Bunun sebebi MR akışkanların manyetostatik enerji yoğunluğunun, ER akışkanların elektrostatik enerji yoğunluğundan daha yüksek olmasıdır. Daha düşük voltajlı güç kaynağıyla ve -40 - 150° C sıcaklık aralığında çalışılabilmesi MR akışkanları ER akışkanlardan daha üstün kılar. Ferro akışkanlar akma noktası değerine sahip olmamalarına rağmen viskoziteleri yaklaşık iki kat artabilmektedir. Ayrıca ferro akışkanlar kolloid manyetik taneciklerle hazırlandıkları için MR akışkanlardan daha kararlıdırlar [1].

MR akışkanların reolojik özellikleri; derişime, tanecik yoğunluğuna, tanecik boyutuna, tanecik boyutu dağılımına, taşıyıcı fazın özelliklerine, katkılara, uygulanan manyetik alana, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir [4]. Bossis vd. [24] ER ve MR akışkandan farklı olarak elektro yapılı kompozitler diye adlandırdıkları yeni bir akışkan sentezlenmesini önermişlerdir. Bu akışkanda taşıyıcı fazın yerini elastomer ya da reçine almaktadır.

2.3 Reoloji

Akışkanlar, kayma gerilimi altında sürekli şekil değiştirmektedirler. Reoloji, kayma gerilimi sonucu maddelerin deformasyonunu inceler [25].

Maddeler; viskoz, elastik ya da bu iki davranış arasında viskoelastik davranış göstermektedirler. Tablo 2.1' de bu maddelerin örnekleri görülmektedir.

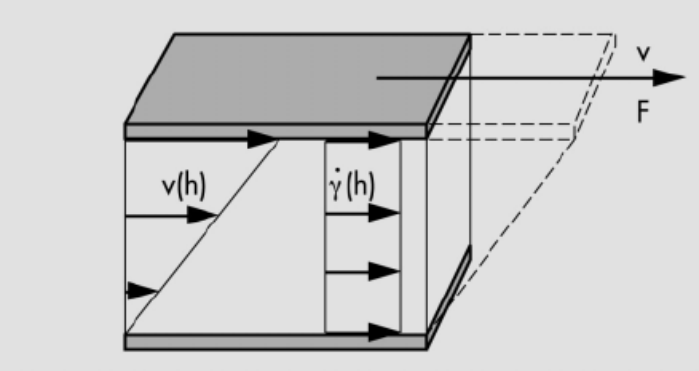
Tablo 2.1: Maddelerin Reolojik Davranışlarına Göre Sınıflandırılması [26]

Davranış	Viskoz	Viskoelastik	Elastik
Madde	Akışkanlar(sıvılar, gazlar)	Viskoelastik sıvılar, viskoelastik katılar	Katılar
Örnek	Mineral yağlar, su…	Polimer çözeltileri, eriyikler, yapıştırıcılar…	Taş, çelik…
Yasa	Newton viskozite yasası	-	Hooke elastisite yasası

Aralarında çok küçük h aralığı bulunan, yüzey alanları A olan büyük iki paralel plaka arasında hareketsiz duran bir akışkanı düşünelim, Şekil 2.1. Sistem başlangıçta hareketsizdir, t=0 anında üstteki plaka değişmez bir v hızıyla sağa doğru harekete geçirilmekte ve zaman ilerledikçe akışkan momentum kazanmaktadır ve Şekil 2.1'de gösterilen yatışkın durum hız profili oluşmaktadır. Yatışkın duruma erişildiğinde, üstteki plakanın hareketini sürdürebilmesi için sabit bir F kuvveti gerekmektedir. Akışkanın laminer koşullarda aktığı durumlarda bu kuvvet aşağıdaki denklemle ifade edilebilir;

$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{dV_x}{dh} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bu ifadede; F kuvveti (N), A alanı (m^2), h plakalar arası mesafeyi (m), V hızı (m/s) göstermektedir. Orantı katsayısı μ akışkanın viskozitesini ($N.s/m^2$) göstermektedir. *Newton viskozite yasası* olarak bilinen bu denkleme uygun davranan akışkanlar Newtonian akışkanlar olarak isimlendirilmektedir. Gazların tümü ve basit sıvıların çoğu bu denklemle tanımlanır. Bu yasaya uymayan akışkanlar Newtonian olmayan akışkanlardır [25,27].



Şekil 2.1: Paralel İki Plaka Arasında Akış

Üst plaka ve akışkanın ara yüzeyi olan A yüzeyine uygulanan F kuvveti akışkanın akmasını sağlar. Akışkanın F kuvveti altında v olan akma hızı, akışkanın iç direnciyle kontrol edilmektedir. Akışkana birim alan başına uygulanan kuvvet kayma gerilimi (shear stres) olarak aşağıdaki ifadeyle tanımlanmaktadır:

kayma gerilimi: $\tau = \frac{F}{A}$ = kayma kuvveti / kayan alan **(2.2)**

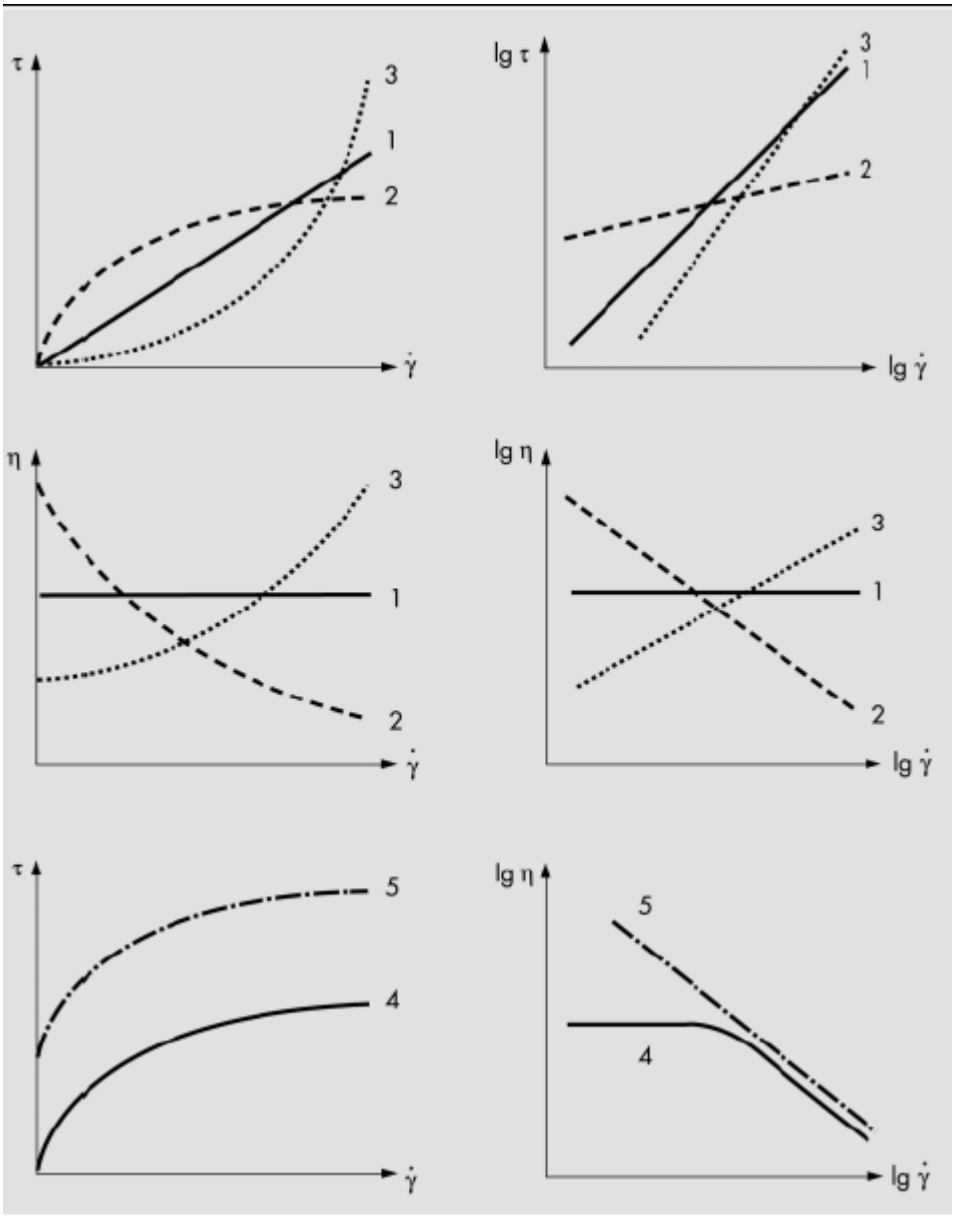
İki plaka arasında akan akışkanın hızı üst plaka sınırında maksimuma ulaşmaktadır. Hız h aralığı boyunca aşağıya inildikçe düşer ve alt plaka sınırında minimum hızına ulaşır, 0 olur. Laminer akış koşullarında akışkan tabakalarının birbiri üzerinden düzgün bir şekilde kaydığı düşünülebilir. Bir akışkan tabaka, kendisine komşu olan diğer tabaka üzerinden, iki plaka arasında bulunan akışkanda meydana gelen toplam yer değiştirme ile orantılı olarak kaymaktadır. Buna kayma hızı (shear rate) denmekte ve aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır:

kayma hızı (shear rate): $\gamma = \frac{V}{h}$ = hız / plakalar arası açıklık **(2.3)**

Akışkanlarda akmaya karşı gösterilen direnç viskozitedir, katılarda ise 'elastisite modülü (G)' dür. Elastisite modülü, katının sertliğiyle ilgilidir ve aşağıdaki ifadeyle tanımlanır:

$G = \tau / \gamma$ **(2.4)**

Şekil 2.2' de çeşitli akışkanların reolojik ölçümler sonucu elde edilmiş akış davranışlarını gösteren eğriler görülmektedir. Soldaki eğriler lineer, sağdakiler de logaritmik eğrilerdir. Akış davranışını gösteren eğriler iki çeşittir; akış eğrisi ve viskozite eğrisi. Akış eğrisi, kayma hızına karşı kayma gerilimini veren eğridir. Viskozite eğrisi ise kayma hızına karşı viskoziteyi gösterir [25,27].



Şekil 2.2: Akış Davranışları

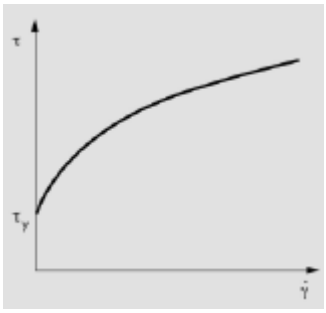
Akışkan davranışına göre eğrileri incelersek;

1) Newtonian akışkanlar; mineral yağlar, silikon yağları, su bu gruba girmektedir.

2) Sahte plastikler; kayma incelmesi (shear thinning) davranışı göstermektedirler; artan kayma hızıyla viskozitelerinde azalma görülmektedir. Polimerik çözeltiler ve eriyikler bu gruba girmektedir.

3) Dilatantlar; kayma kalınlaşması (shear thickening) davranışı göstermektedirler; artan kayma hızıyla viskozitelerinde artma görülmektedir. Yüksek derişimdeki dispersiyonlar (süspansiyon, emülsiyon, köpükler) dilatant maddelerdir. Akma noktası (yield point): Maddenin yer değiştirmeye başladığı kayma gerilimi

değeridir. Bir maddenin akma noktası sabit bir değer değildir, ölçüm şartlarına ve analiz metoduna göre değişmektedir [26].



Şekil 2.3: Akma Gerilimi

Buna göre Şekil 2.2'deki 4 numaralı eğri, akma noktası olmayan bir akışkanı, 5 numaralı eğri ise bir τ_0 akma noktası olan bir akışkanı belirtiyor. Şekil 2.3'teki akış eğrisinde gösterilen akışkanın akma geriliminin τ_y olduğu görülmektedir.

2.3.1 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri

Günümüzde MR akışkanlar hakkında yapılan çalışmalar çoğaldıkça, MR akışkanlarla çalışan cihaz türleri de artmıştır. Farklı tür cihazlarda kullanılan MR akışkanların özellikleri de farklı olmaktadır. Bu nedenle sentezlenen MR akışkanın reolojik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikler; dinamik kayma-akma gerilimi, statik kayma-akma gerilimi, plastik viskozitesi ve kararlılık özelliğidir. Bunlardan dinamik kayma-akma gerilimi ve plastik viskozitesi, MR akışkanın kullanılacağı cihazın boyutunu ve şeklini etkiler [2].

2.3.1.1 Bingham Plastik Model

MR akışkanların reolojik özellikleri; manyetik taneciklerin boyutuna, şekline, boyut ve şekil dağılımına, derişimine, yoğunluğuna, taşıyıcı fazın özelliğine, akışkan içerisindeki katkı maddelerine, uygulanan manyetik alana, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır. Bu maddelerin birbirlerine bağlılığı ise karmaşıktır [4].

Literatürde MR akışkanların davranışını tanımlayabilmek için çeşitli modeller araştırılmıştır. Dışarıdan uygulanan manyetik alan altındaki davranışlarını tanımlamada yaygın olarak kullanılan Bingham plastik model, non-lineer sıvıları tanımlamada uzun yıllar kabul görmüştür [28]. Bu modelde kayma gerilimi aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır:

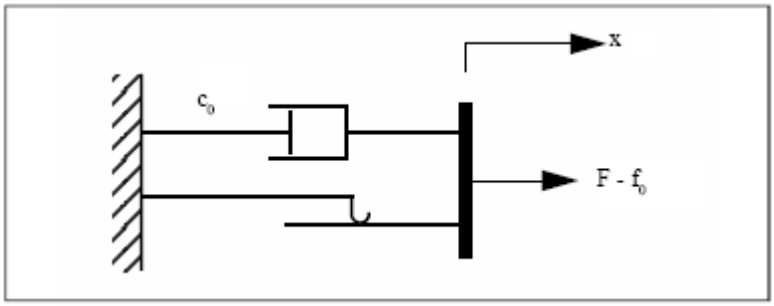
$$\tau = \tau_y + \mu_0 \gamma \qquad \tau \geq \tau_y \qquad \textbf{(2.5)}$$

Bu denklemde τ_y manyetik alan şiddetine bağlı akma gerilmesi, μ_0 görünür viskozite ve γ ise incelen bölgedeki deformasyon hızını belirlemektedir. Bu denklem kayma gerilimi, akma geriliminin üstünde bir değerse geçerlidir. Eğer kayma gerilimi, akma geriliminden düşükse;

$$\tau = G\gamma \qquad \tau \le \tau_y \tag{2.6}$$

eşitliği geçerlidir. Burada G malzemenin elastisite modülüdür.

Bingham plastik modeli Şekil 2.4'te gösterilen paralel yerleştirilmiş bir damper ve sürtünme elemanıyla açıklanacaktır.



Şekil 2.4: Bingham plastik modeli şematik gösterimi

Bu modelde, sıfırdan farklı hızlarda üretilen tepki kuvveti,

$$F = f_c \, \mathrm{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} \tag{2.7}$$

olarak verilmektedir. Denklemdeki c_0 sönüm katsayısı ve fc sürtünme katsayısıdır. Ancak Bingham plastik denklemi, MR akışkanlarda görülen kayma incelmesi veya kayma kalınlaşması durumlarında MR damperi tam olarak modelleyememektedir. Bu olgu, Herschel-Bulkley denklemi ile ifade edilebilmektedir [28].

2.4 MR Akışkan Uygulamaları

MR akışkanların kullanımındaki amaç, mekanik sistemi zaman gecikmesi olmadan kontrol edebilmektir. MR akışkan, elektronik kontrol ve mekanik sistem arasındaki koordinasyonu sağlamaktadır [29].

MR akışkanların kullanıldığı cihazlar temelde iki tiptedir:

- Sabit kutuplu cihazlar: valf moduyla çalışır, akışkan bir orifisten akar. Burada itici güç basınçtır. Bu moda göre çalışan cihazlar; servo-valfler, damperler ve amortisörlerdir.

- Birbirine göre hareketli kutuplu cihazlar: kayma modu ile çalışır; akışkan birbirine göre hareketli iki yüzey arasından akar. Bunlar; fren, debriyaj, açma-kilitleme cihazlarıdır.

Bundan başka üçüncü bir mod daha vardır: sıkıştırma-film modu. Bu da düşük hareketli fakat yüksek kuvvet gerektiren sistemler içindir [4].

Manyetik alan yokken akışkan paralel yüzeyler arasında tutulmakta ve orada serbest olarak hareket etmektedir. Manyetik alan uygulanmasıyla, manyetik tanecikler akış yönü boyunca dizilmektedirler. Bu tanecik zincirlerinin oluşumu iki tabaka arasından akışkanın hareketini engellemektedir. Tanecikler arası çekim gücünün değiştirilmesi, manyetik alan şiddetinin artırılıp azaltılmasıyla kontrol edilebilmektedir. Taneciklerin kontrolü, aynı zamanda kullanıldığı cihazın kontrolü anlamına da gelir [22].

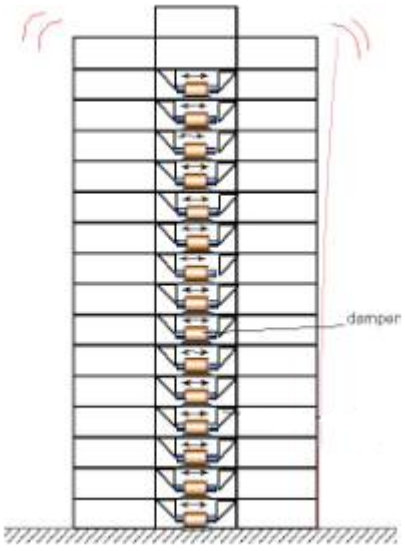
Hareketi söndürme, MR teknolojisinin bugün en çok kullanılan şeklidir. Nasa'dan Alice Gast'a göre MR akışkanlar ile çok daha fazlasını yapmak mümkün olacaktır. Örneğin, MR akışkanların robotlarda kullanılmasıyla el ve kollarını insan kadar doğal kullanabilen robotlar yapılabilecektir. Fakat daha fazlasını yapmak için MR akışkanların temel fiziğiyle ilgili daha fazlasını bilmek gerekmektedir. MR akışkanların uzay çalışmalarında kullanılabilmeleri için Nasa'da InSPACE (Investigating the Structure of Paramagnetic Aggregates from Colloidal Emulsions) isimli bir proje üzerinde çalışılmaktadır [23].

Araştırmalar, MR akışkan teknolojisini daha ileriye taşımak içindir. Fakat şu unutulmamalıdır ki, 'MR akışkanı başarılı yapacak olan nedir?' sorusunun cevabı yoktur. Çünkü MR akışkanın performansı, MR akışkanın kullanılacağı cihaza, akışkanın maruz kalacağı koşullara, akışkanın kullanılacağı süreye göre değişir. Bir uygulamada başarılı görülen bir akışkan, bir başka cihaz için uygun olmayabilir. Örneğin olası bir depreme kadar sabit duracak olan bina yapımında kullanılan MR akışkanla, her gün birçok kez katı haline dönüşen otomobil damperinde bulunan MR akışkanın özellikleri elbette birbirinden farklı olacaktır [21].

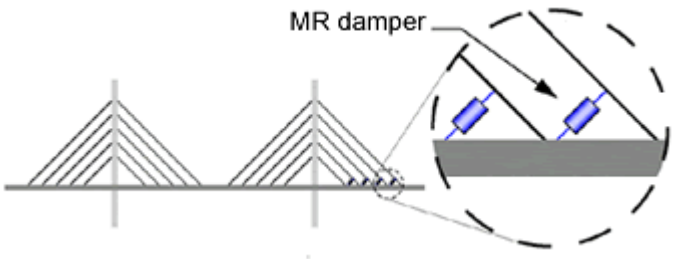
MR akışkanların günümüzde en yaygın kullanım alanı otomobillerdir. Otomobillerde MR teknolojisi süspansiyon sistemlerde, yolcu güvenlik sistemlerinde ve frenlerde kullanılmaktadır. Süspansiyon sistemlerde MR akışkan her amortisörde tipik hidrolik akışkanın yerini almaktadır. Sensörler sayesinde aracın ve yolun durumuna göre bir kontrolör vasıtasıyla söndürme karakteristiğini saniyede bin katına kadar çıkarmaktadır. Bu durum, yol tutuşu ve kullanım açısından çok önemlidir. Bu

teknoloji Cadillac, Chevrolet, Ferrari, Audi ve daha birçok araçta kullanılmaktadır. Bu sistemin avantajları ise; eşsiz sönüm ve titreşim kontrolü, daha az karmaşık bir sistem oluşu, düşük enerji tüketimi, sessiz çalışmaları, beş yıldan daha uzun süre kullanım ömrüdür. Yolcu koruma sistemlerinde ise MR teknolojisinin gelişmiş sensörlerle birleştirilmesiyle şiddetli çarpışmalarda, her ağırlıktaki yolcu için koruma sağlamaktadır. Bu sistem olası darbelerde en uygun tepkiyi göstererek mükemmel koruma sağlamakta, birkaç milisaniyelik cevap süresine sahip ve otomobilde minimum boyutta yer kaplamaktadır. Fren sistemlerinde MR teknolojisinin kullanılması, düzgün ve verimli tork transferi sağlamaktadır. Dizayn ve üretim kolaylığı, düzgün güç transferi, minimum boyutta yer kaplaması da MR teknolojisinin fren sistemlerinde kullanılmasının avantajlarıdır [22].

MR akışkanlar Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bina ve köprülerde de kullanılmaktadır. Şiddetli rüzgar ve depremlerde yapıda bulunan MR akışkan damperleri devreye girerek sarsıntıyı minimuma indirirler.



Şekil 2.5: Yapılarda MR Damperlerin Kullanılması



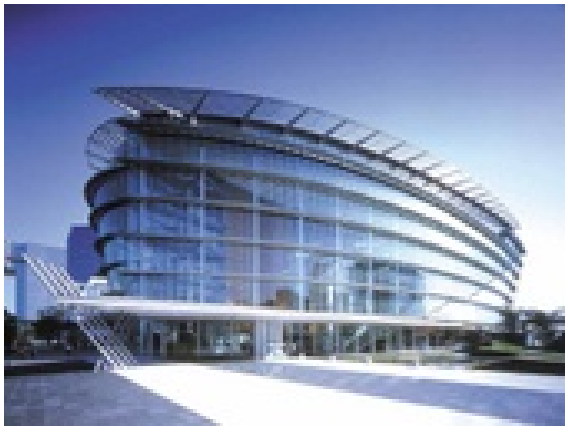
Şekil 2.6: Köprülerde MR Damperlerin Kullanılması

Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de ise MR akışkanın günümüzde kullanıldığı örnekler görülmektedir. Şekil 2.7' deki Çin'de bulunan The Dong Ting Lake Köprüsü'dür. Bu köprü rüzgarlı havalarda sarsıntıyı önlemesi için MR akışkan kullanılan damperlerle inşa edilmiştir [30].



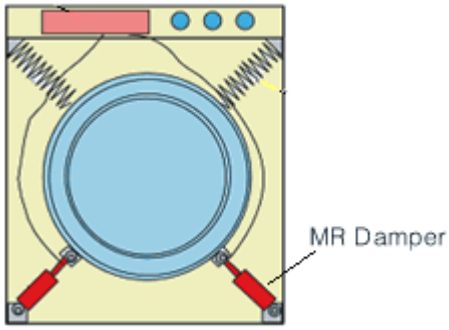
Şekil 2.7: The Dong Ting Lake Köprüsü, Çin

Şekil 2.8'de görülen yapı Japonya'da bulunan Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi'dir. Yapı, depremde oluşabilecek sarsıntıları önlemek için MR akışkan kullanılan damperlerle yapılmıştır [31].



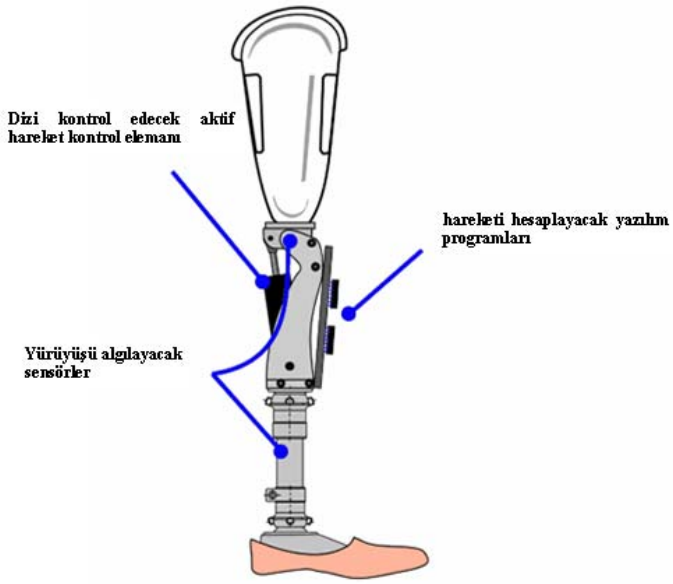
Şekil 2.8: Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi, Japonya

Bundan başka, Şekil 2.9'da, içerisinde MR damperler bulunan Lord'un tasarladığı çamaşır makinesi bulunmaktadır. Bu makinede bulunan damperler sesi ve titreşimi azaltarak enerji tasarrufu yapmaktadır.



Şekil 2.9: Lord'da Dizayn Edilen Çamaşır Makinesi

Medikal alanda ise MR akışkanın protez eklemlerde kullanılması mümkündür. Şekil 2.10'da görülen protez dize kamyon koltuklarında kullanılan bir damper yerleştirildiğinde çok yavaş hareketlerde bile dizde neredeyse anlık hareket kontrolü sağlanmaktadır [22].



Şekil 2.10: Protez Diz

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Malzeme ve Materyal

Bu çalışmada manyetoreolojik akışkan sentezlemek için demir tanecikleri, taşıyıcı faz olarak aromatik yağlar ve katkı maddesi olarak silika dumanı kullanılmıştır.

3.1.1 Manyetik Malzeme

Çalışmalarda manyetik malzeme olarak ISP firmasından sağlanan dört farklı tanecik kullanılmıştır. Bu tanecikler T-1, T-2, T-3, T-4 olarak kodlanmıştır ve bundan sonra bu kod isimleriyle kullanılacaklardır. Tanecik özellikleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Bu taneciklerin demir oranı % 97-99 arasında, tanecik boyutları ise 4-11µm arasında değişmektedir. T-4 taneciğinin yüzeyi silika ile muamele edilmiştir.

Tablo 3.1: MR Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Taneciklerin Özellikleri

Tanecik kodu	Tanecik boyutu (µm)	Taneciklerin demir içeriği (%)	Taneciklerin yoğunluğu (kg/m^3)
T-1	10-11	99,5-99,6	7860
T-2	4-6	97-97,6	7690
T-3	7-8	97-97,6	7640
T-4*	4-6	97-97,3	7500

* Yüzeyi silikayla muamele edilmiştir.

3.1.2 Yağlar

Çalışmada, piyasadan sağlanan ve farklı viskozitelere sahip üç ayrı aromatik yağ kullanılmıştır. Bu yağlar Y-1, Y-2 ve Y-3 olarak kodlanmıştır ve bundan sonra metin içinde bu kod isimleriyle kullanılacaklardır. Yağların yoğunlukları piknometre ile ölçülerek belirlenmiştir. Kullanılan yağlar ve özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: MR Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Yağlar

Yağ kodu	Viskozite(mPa.s)	Yoğunluk (kg/ m^3)	Koku	Renk
Y-1	63,5	863	+	Sarı
Y-2	25	825	-	Şeffaf
Y-3	4,5	810	-	Şeffaf

3.1.3 Silika

MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan silika dumanı Antalya Ferrokrom Tesisleri' nden temin edilmiştir.

3.2 Malzeme ve Maddelerin Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan malzeme ve maddeler ile hazırlanan MR akışkanlar çeşitli teknikler kullanılarak karakterize edilmiştir.

Manyetik demir taneciklerinin şekil ve morfolojisi Jeol JSM-T330 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Bunun için pirinç blok üzerine çift taraflı karbon bandı yapıştırılarak, bandın üzerini kaplayacak şekilde toz numune dökülmüştür. Numune toz halde olduğu için iletkenliğinin mutlak olarak sağlanması açısından üzeri altınla kaplanmıştır. Ticari MR akışkanda kullanılan taneciklerin de SEM görüntüsü alınmıştır. Bunun için, ticari MR akışkandan bir miktar alınıp, petrol eteriyle yıkanarak yağdan arındırılmıştır. Daha sonra tanecikler bir süre etüvde tutularak çözücü uzaklaştırılmıştır. Temizlenen taneciklerin SEM görüntüsü alınmıştır.

Çalışmada kullanılan yağların yoğunlukları piknometre, viskoziteleri ise Brookfield RVDV II+ model viskozimetre kullanılarak ölçülmüştür. Yağların kimyasal yapısı Perkin Elmer Spectrum One model Fourier Transform Infra Red Spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir.

3.3 MR Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Ölçülmesi

Hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri hem manyetik alan etkisi altında, hem de manyetik alan olmaksızın ölçülmüştür. Bunun için Şekil 3.1' de görülen Anton Paar Physica MCR 301 model reometre cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde *20 mm çaplı paralel plaka* geometrisi kullanılmıştır. Cihazın kullanılması aşağıda kısaca açıklanmıştır.



Şekil 3.1: MR Akışkanların Reolojik Özelliklerini Ölçmede Kullanılan Anton Paar Physica MCR 301 Model Reometre

Manyetik alan konumu (On state durumu), MR akışkanın manyetik alan altında tutulduğu durumudur. MR akışkan, cihaza yerleştirmeden önce üniform tanecik dağılımı sağlamak için 1 saat boyunca çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra cihazın numune haznesine 0,30 ml numune koyulup uç etkilerini ortadan kaldırmak için dışarı taşan akışkan spatül yardımıyla temizlenmiş, cihaz ölçüm pozisyonuna getirildikten sonra, manyetik alanın dışarıya sızmasını engelleyerek kapalı alanda belli yörünge çizmesini sağlayan kapakçıklar numune haznesi üzerine kapatılmıştır. Ölçümler, 1 A'lik sabit akım varlığında ve (sıcaklık belirtilmeyen deneyler) 25 º C' da gerçekleştirilmiştir. 0,1-100 sn^{-1}'lik kayma hızı (shear rate) aralığında 19 noktada ölçüm alınarak grafiğe aktarılmıştır. Her ölçümden sonra akışkan etrafında kalmış olması muhtemel manyetik etkileri ortadan kaldırmak için 2 ayrı manyetik etkiyi giderme (demagnetizasyon) işlemi uygulanmaktadır.

Normal konum (Off state durumu), MR akışkanın manyetik alan olmayan normal koşullardaki davranışını ölçme konumudur. MR akışkan, cihaza yerleştirmeden önce üniform tanecik dağılımı sağlamak için 1 saat boyunca çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra cihazın numune haznesine 0,30 ml numune koyulup uç etkilerini ortadan kaldırmak için dışarı taşan akışkan spatül yardımıyla temizlenmiş, daha sonra ölçümler alınmıştır.

Kalibrasyon için cihaza ayda bir kez motor ayarı yaptırılmaktadır ve yine ayda bir kez geometrinin takılı olduğu durumda 1 mm ölçme mesafesinde hafif bir salınım

yaptırılarak inertia kaydedilmektedir. Bu da cihazın konumuyla ilgili ortaya çıkabilecek ölçüm hatalarının otomatik olarak düzeltilmesini sağlar.

3.4 Çökme Testi

Hazırlanan MR akışkanların çökme özellikleri incelenmiştir. Bunun için hazırlanan akışkanlar IKA-WERKE HS 501 model dijital çalkalayıcıda 1 saat boyunca 165 rpm' de karıştırıldıktan sonra dinlenmeye bırakılmış ve çökmeleri gözlenmiştir. Bu sırada her 6 dakikada bir cetvelle akışkanın alt seviyesinden üstte kalan berrak kısma kadarki yükseklik ölçülmüştür. Daha sonra yükseklikler grafiğe geçirilerek çökme grafikleri elde edilmiştir.

3.5 Damper Performans Testleri

Hazırlanan MR akışkanların damperdeki performanslarını belirlemek için damper testleri gerçekleştirilmiştir. Damper testleri Şekil 3.2' de görülen İTÜ Uçak-Uzay Fakültesi, ROTAM laboratuarlarında bulunan *Üniversal Yorulma Test Sistemi*nde yapılmıştır. Bunun için hazırlanan MR akışkanlar, büyük hacimli bir şırınga yardımıyla Lord firmasından temin edilen damperin içine doldurulmuştur. Daha sonra damper, 25 KN masa üstü sisteme eksenel olarak yerleştirilmiştir. Bu sistemde çekme-basma yüklemeleri yapılabilmektedir. Şekil 3.2' de görüldüğü gibi damper içindeki bobine sarılı olan ve uçları dışarıda bulunan kablolar güç kaynağına bağlandıktan sonra çeşitli voltaj değerlerinde ölçümler alınmıştır.

Piston hareket alanı, 55 mm olan stroke uzunluğundan ötürü emniyet payı düşünülerek 45 mm olarak ayarlanmıştır. Pistonun frekansı 0,05-5 Hz, manyetik alan voltajı 0-10 V arasında değiştirilerek MR akışkanların davranışları ölçülmüştür.

Üniversal yorulma cihazı, sisteme bağlı bir bilgisayar yardımıyla kontrol edilmektedir. Damper yerleştirilip, voltaj istenen değere ayarlandıktan sonra, cihaz çalıştırılıp pistonu ileri ve geri hareket ettirmesi sağlanmıştır. Bu sırada pistonun yer değiştirmesi ve itme sırasında akışkan tarafından pistona uygulanan kuvvet cihaz tarafından kaydedilmektedir. Pistonun aldığı yol ve zaman ölçülerek piston hızı aşağıdaki basit bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$u = \frac{x}{\mathrm{t}} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada,

u = piston hızı (mm/s) ,

x = piston tarafından kat edilen yol (mm),

t = zaman (s) 'dir.

Bulunan hız değerleri kullanılarak aşağıdaki denklem yardımıyla sönüm katsayısı(c) hesaplanabilmektedir.

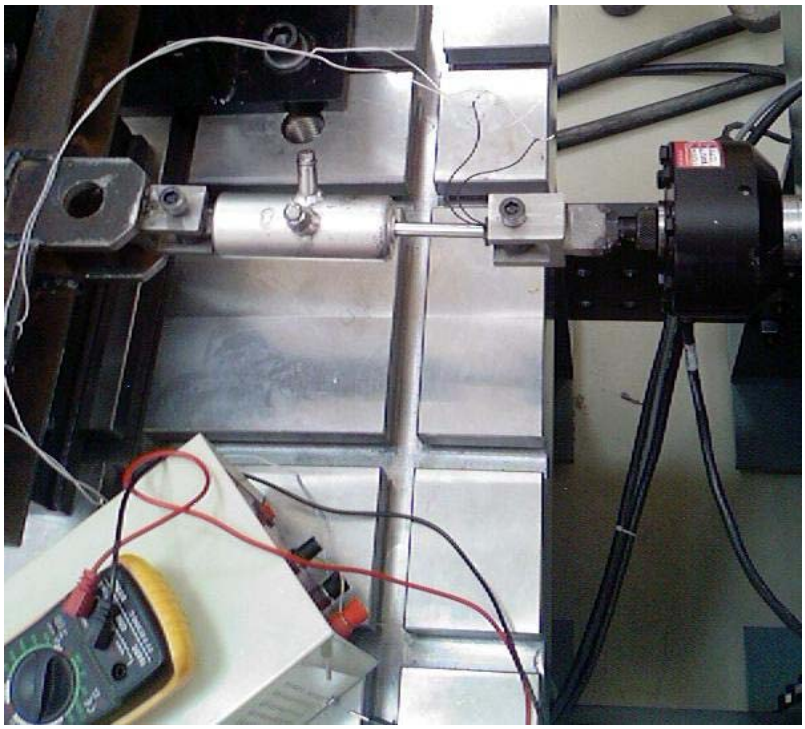
$$F = c \times V \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada,

F = akışkan tarafından pistona uygulanan kuvvet (N)

V = piston hızı(mm/s)

c = damper sönüm katsayısı(N/mm/s)'dır. Sönüm katsayısı, damperin karakteristiğini belirler.

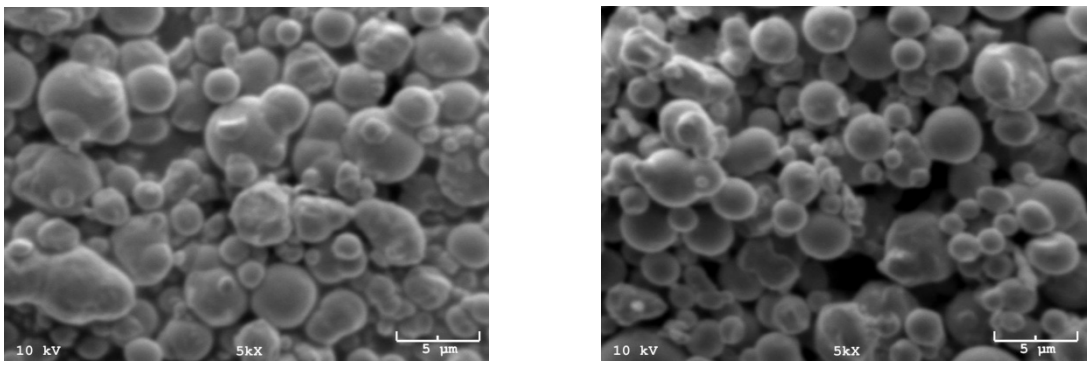


Şekil 3.2: Damper Performans Testlerinin Gerçekleştirildiği Üniversal Yorulma Test Sistemi

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

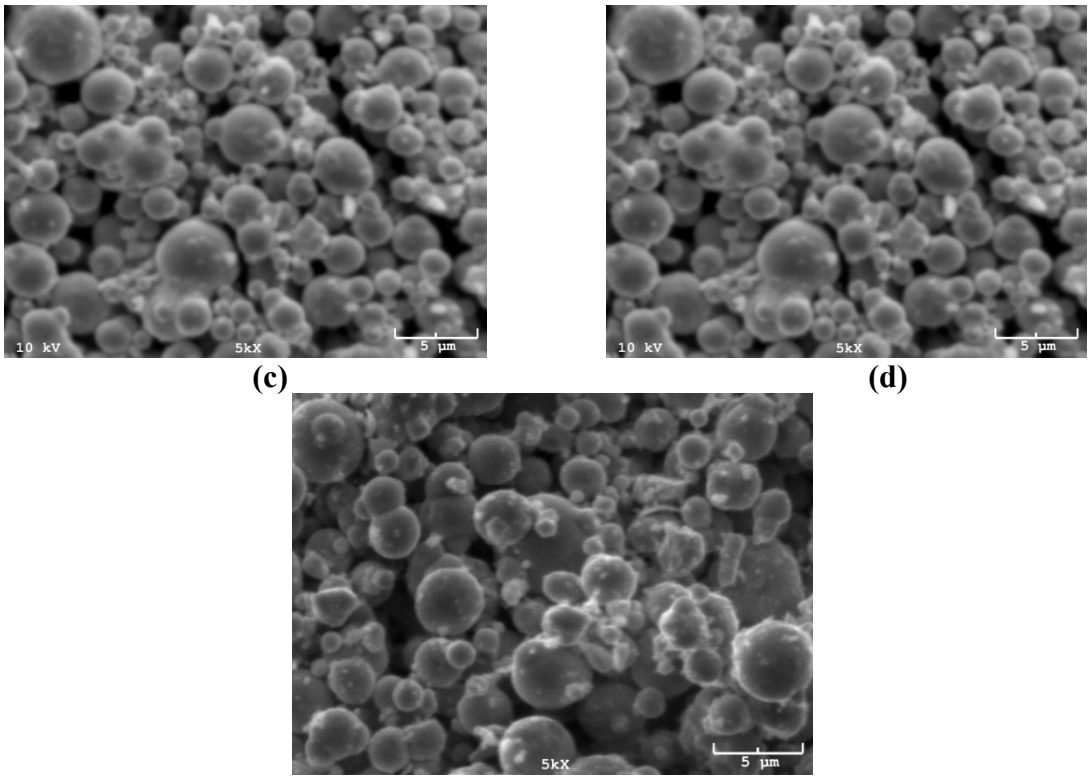
Çalışmada kullanılan manyetik demir taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları Şekil 4.1'de verilmiştir. Kıyaslama yapmak amacıyla Lord firmasından temin edilen ticari MR akışkanın içerdiği demir taneciklerinin fotoğrafları da aynı şekilde verilmiştir. Şekilde taneciklerin 5000 kez büyütülmüş görüntüleri görülmektedir. Aynı taneciklerin 2000 kez büyütülmüş görüntüleri ise EK-1'de verilmiştir.

Şekillerde görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan manyetik taneciklerle, Şekil 4.1 b-e, ticari taneciklerin, Şekil 4.1 a, SEM görüntüleri arasında büyük benzerlik dikkat çekmektedir. Buna karşın çalışmada kullanılan taneciklerin, ticari taneciklere kıyasla görece daha geniş bir tanecik boyutu aralığına sahip olduğu gözlenmektedir. Morfolojik açıdan incelendiğinde ise çalışmada kullanılan taneciklerle ticari tanecikler arasında önemli bir fark göze çarpmamaktadır.



(a) **(b)**

Şekil 4.1 a-b: MR Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Demir Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri: a) Ticari Tanecik b) T-1 Taneciği

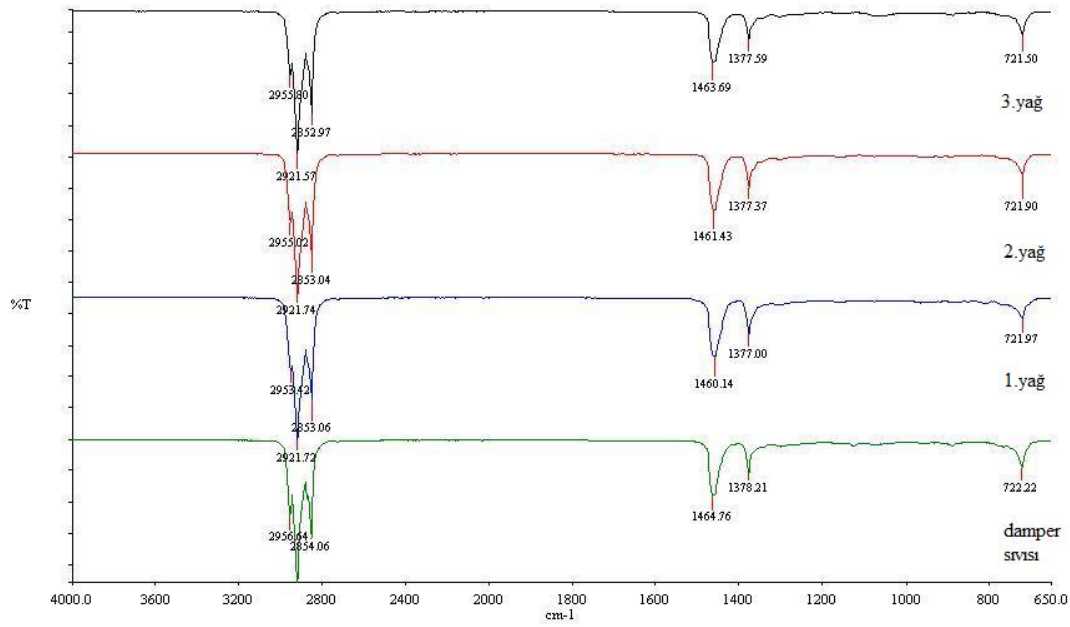


(c) **(d)**

(e)

Şekil 4.1 c-e: MR Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Demir Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri: c) T-2 Taneciği d) T-3 Taneciği, e) T-4 Taneciği

Çalışmada kullanılan ticari yağlar ile Lord'dan temin edilen MR akışkan içeren damperde bulunan yağ FTIR yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 3.6'da toplu olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan yağlarla Lord firması damperi içerisinde kullanılan yağ benzer piklere sahiptir. Bu sonuçlar bu yağların benzer bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2:MR Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Yağların FTIR Pikleri

4.1 MR Akışkanların Sentezi

Daha önceki bölümlerde tanıtılan, manyetik özelliklere sahip dört değişik tanecik, üç değişik yağ ve silika dumanı kullanılarak çeşitli MR akışkanlar hazırlanmıştır. Çalışma sırasında katı taneciklerin tipi, taşıyıcı fazın tipi ve katı taneciklerin karışım içindeki oranları değiştirilerek toplam sekiz adet MR akışkan numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Hazırlanan MR akışkanların özellikleri

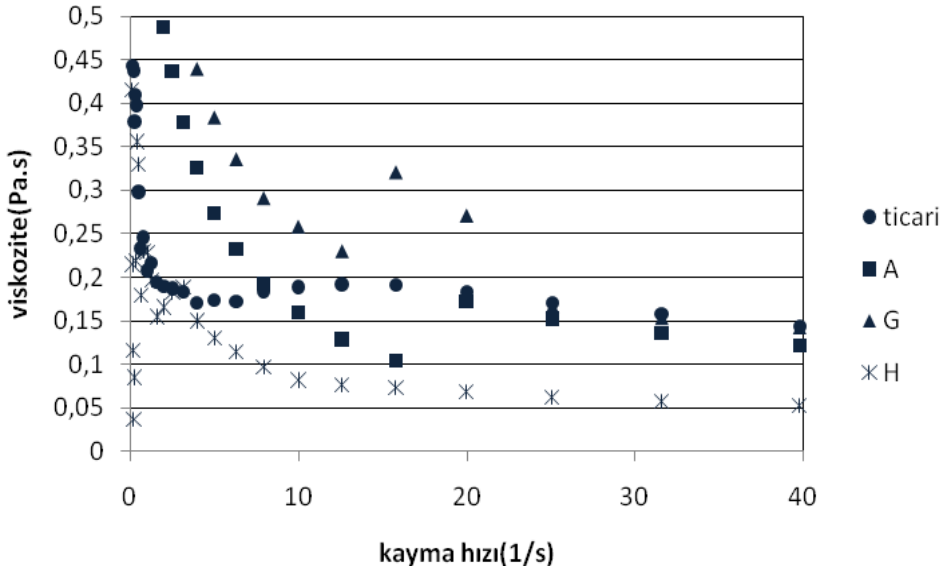
MR Akışkan Kodu	MR akışkanın sentezinde kullanılan malzeme ve maddeler			
	Tanecik	Yağ cinsi	Tanecik yüzdesi (% wt)	Silika yüzdesi (% wt)
A	T-2	Y-2	60	3
B	T-4	Y-2	60	3
C	T-4	Y-2	50	3
D	T-4	Y-2	70	3
G	T-2	Y-1	60	3
H	T-2	Y-3	60	3
I	T-3	Y-2	60	3
J	T-1	Y-2	60	3

4.2 MR Akışkanların Reolojik Özellikleri

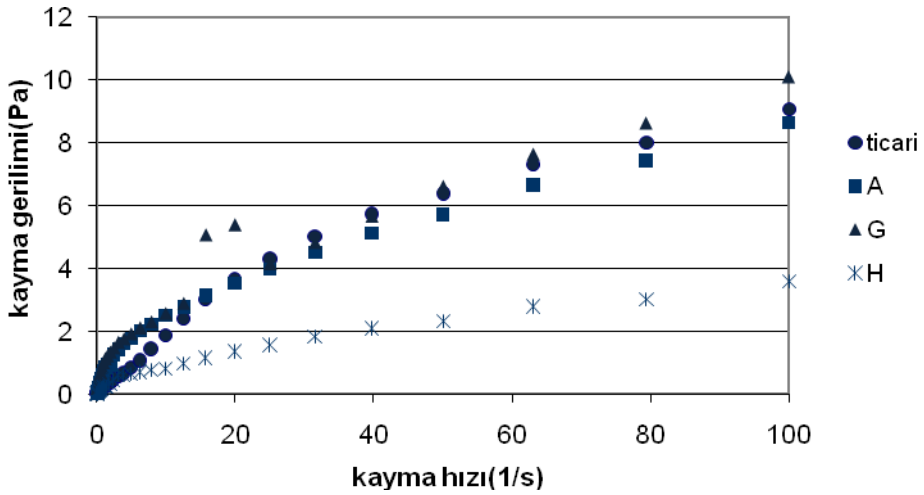
Hazırlanan manyetoreolojik akışkanların akış davranışlarının belirlenebilmesi için Bölüm 3.3'de açıklanan yöntem kullanılarak bu akışkanların reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3-Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu grafiklerde numunelerin viskoziteleri ve kayma gerilimleri kayma hızının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Kayma hızı 10^{-1} sn^{-1} ve 10^{2} sn^{-1} aralığında değişmektedir.

4.2.1 Taşıyıcı Fazın Reolojik Özelliklere Etkisi

Taşıyıcı faz olarak kullanılan yağların MR akışkanların reolojik özelliklerine olan etkisini ölçmek amacıyla üç değişik yağ kullanılarak hazırlanan A, G ve H kodlu numunelerin reolojik özellikleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.3: Taşıyıcı fazın *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



Şekil 4.4: Taşıyıcı fazın *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, farklı özellikteki taşıyıcı fazlarla hazırlanan MR akışkanlar viskozitenin kayma hızıyla değişimi açısından benzer davranımlar göstermektedir. Kayma hızının artmasıyla bütün numunelerin viskozitesinin başlangıçta hızlı bir şekilde düştüğü, kayma hızı belirli bir değere ulaştıktan sonra ise viskozitedeki değişimin oldukça yavaşladığı görülmektedir. Bu grafikler, beklendiği üzere taşıyıcı fazın viskozitesiyle MR akışkanın viskozitesi arasında bir paralellik olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin en yüksek viskoziteye sahip yağ ile hazırlanmış olan G akışkanı bütün kayma hızı aralığında yine en yüksek viskozite

sahip olmuştur. Aynı grafikte ticari MR akışkanın davranımı da verilmiştir. Ticari akışkanın viskozitesinin 5 s^{-1} 'den düşük kayma hızı bölgesinde, bu çalışmada sentezlenen akışkanlardan H, 15 s^{-1} değerinden sonra ise A ve G akışkanlarının viskozitelerine çok benzer bir davranım gösterdiği görülmektedir. Ancak 5-15 s^{-1} aralığında tümüyle farklı bir profil izlemektedir.

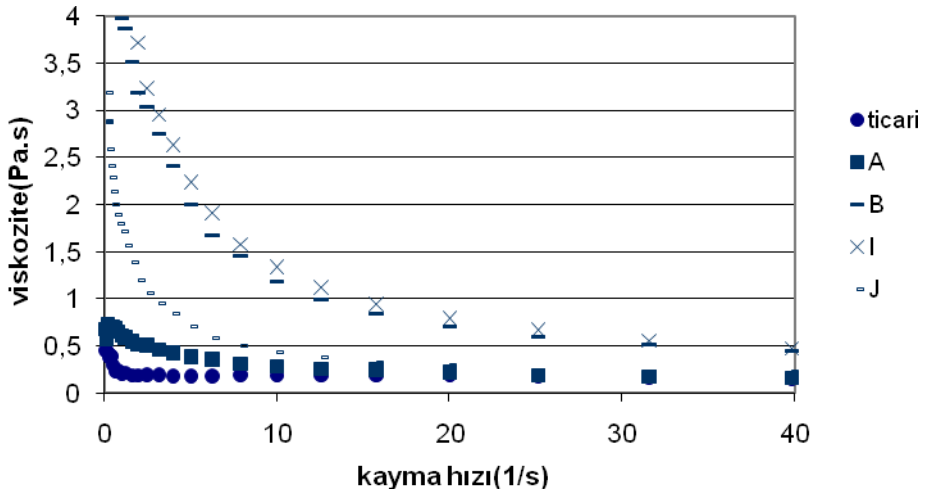
Şekil 4.4'de ise aynı numunelerin kayma gerilimlerinin kayma hızıyla değişimleri görülmektedir. Her üç MR akışkan da genel olarak benzer bir davranım içinde olmuştur. Ancak diğer iki numuneye kıyasla daha düşük viskoziteli bir yağla hazırlanmış olan H numunesinin kayma geriliminin bir hayli düşük kaldığı görülmektedir.

4.2.2 Manyetik Taneciklerin Reolojik Özelliklere Etkisi

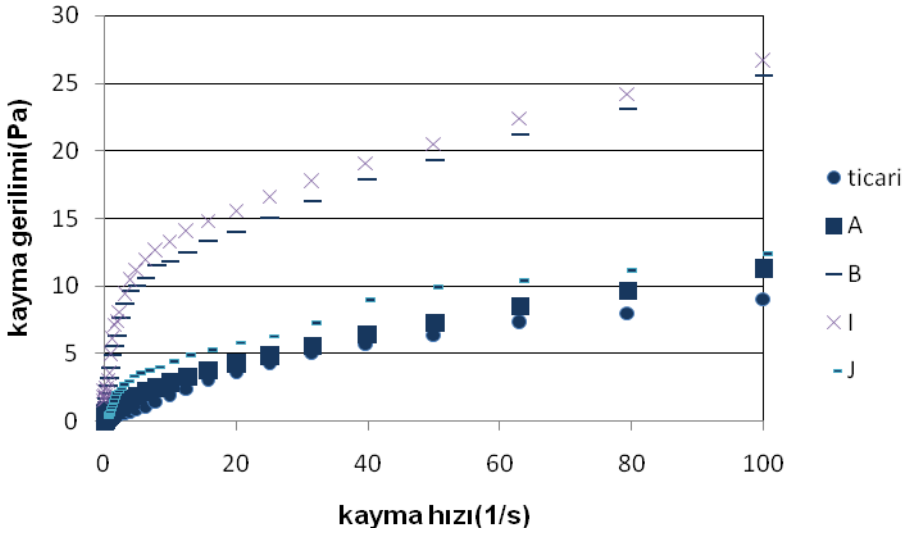
Manyetik taneciklerin MR akışkanların özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, aynı yağ ve tanecik oranı kullanılarak, tanecik çeşidi değiştirilerek hazırlanan dört adet MR akışkanın reolojik özellikleri incelenmiştir. Bu akışkanların viskozitelerinin kayma hızıyla değişimi Şekil 4.5'de, kayma gerilimlerinin kayma hızıyla değişimi ise Şekil 4.6'da sunulmuştur. Kıyaslama amacıyla aynı grafiklerde ticari MR akışkanın viskozite ve kayma gerilimi değerleri de verilmiştir.

Şekil 4.5'den anlaşıldığı gibi, tanecik boyutu 7-8 µm olan T-3 taneciğiyle hazırlanan I akışkanı ve tanecik boyutu 4-6 µm olan silika ile muamele edilmiş T-4 taneciğiyle hazırlanan B akışkanı en yüksek viskozite değerlerine sahiptir. Buna karşın, tanecik boyutu yine 4-6 µm olan T-2 ile hazırlanan A akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahiptir. Bu durum tanecik boyutuyla MR akışkanın viskoziteleri arasında sistematik bir ilişkinin olmadığını ortaya koymaktadır. Göze çarpan diğer bir nokta ise, ticari akışkanın bu çalışmada sentezlenen bütün akışkanlardan daha düşük bir viskozite değerine sahip olmasıdır. Ancak A akışkanına çok yakın değerlere sahiptir.

Şekil 4.6 incelendiğinde, bütün MR akışkanların kayma gerilimlerinin, kayma hızıyla arttığı görülmektedir. Ancak, viskozite-kayma hızı ilişkisinde olduğu gibi burada da sistematik bir ilişkiden söz etmek mümkün değildir. Kayma gerilimi-kayma hızı davranımı açısından yine A akışkanıyla ticari akışkanın çok benzer olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.5: Manyetik taneciklerin *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



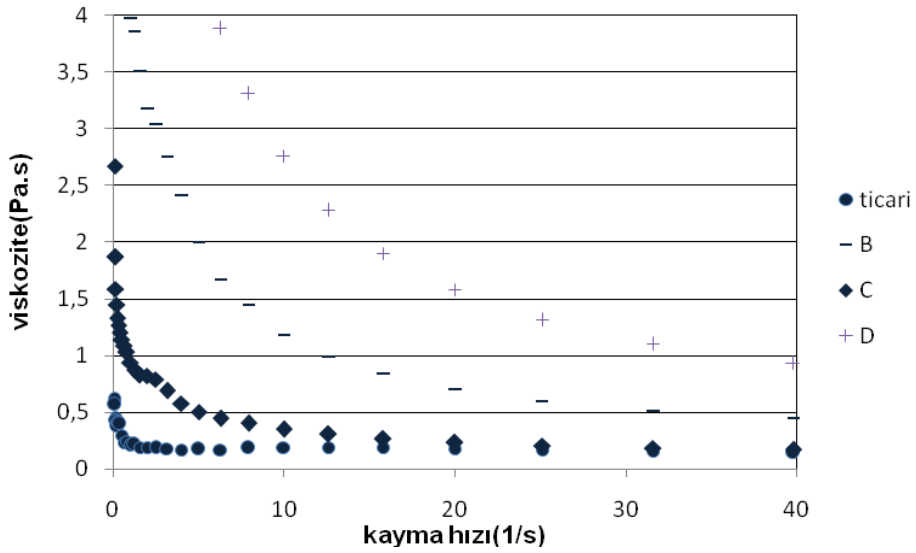
Şekil 4.6: Manyetik taneciklerin *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi

4.2.3 Manyetik Tanecik Oranının Reolojik Özelliklere Etkisi

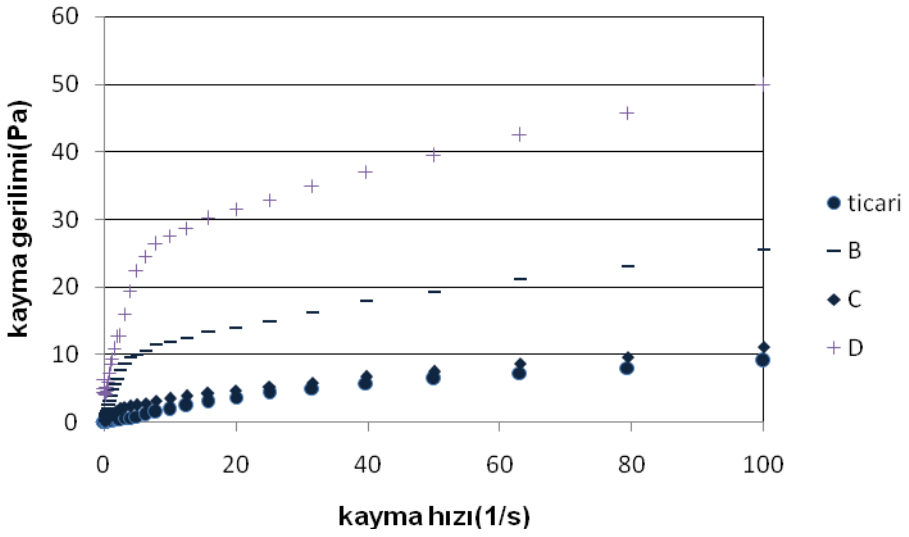
Manyetik tanecik oranının MR akışkanların reolojik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla, değişik tanecik oranlarına sahip karışımlar hazırlanmış ve bunların reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu şekillerde sırasıyla MR akışkanların viskozite ve kayma gerilimi değişimleri, kayma hızı ve taneciklerin bir fonksiyonu olarak grafiklenmiştir. Ayrıca bu grafiklerde ticari MR akışkanın viskozite ve kayma gerilimi değerleri de verilmiştir. Şekil 4.7'den anlaşıldığı gibi, % 50 tanecik oranına sahip olan C akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahiptir. Buna karşın, tanecik

oranı % 70 olan D akışkanı en yüksek viskozite değerlerine sahiptir. MR akışkanın manyetik tanecik oranının artması, akışkanın viskozitesini de artırmaktadır. Ticari akışkan ise % 50 tanecik oranına sahip olan C akışkanından bile daha düşük viskozite değerlerine sahiptir. Kayma hızı 20 sn^{-1} üzerine çıktığında ise C akışkanıyla çok benzer kayma gerilimi değerleri vermektedir.

Şekil 4.8'de ise, farklı tanecik oranlarında hazırlanan akışkanların ve ticari akışkanın kayma gerilimleri, kayma hızlarına karşılık verilmiştir. Burada da tıpkı viskozite-kayma hızı eğrilerinde olduğu gibi MR akışkanın manyetik tanecik oranının artmasının, akışkanın kayma gerilimini de artırdığını söyleyebiliriz. Ticari akışkan ise % 50 tanecik oranına sahip olan C akışkanından bile düşük viskozite değerlerine sahiptir. Fakat kayma hızı 20 sn^{-1} üzerine çıktığında C akışkanıyla benzer kayma gerilimi değerleri vermektedir.



Şekil 4.7: Manyetik tanecik oranının *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



Şekil 4.8: Manyetik tanecik oranının *manyetik alan olmayan durumda* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi

4.3 Manyetoreolojik Akışkanların Manyetoreolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

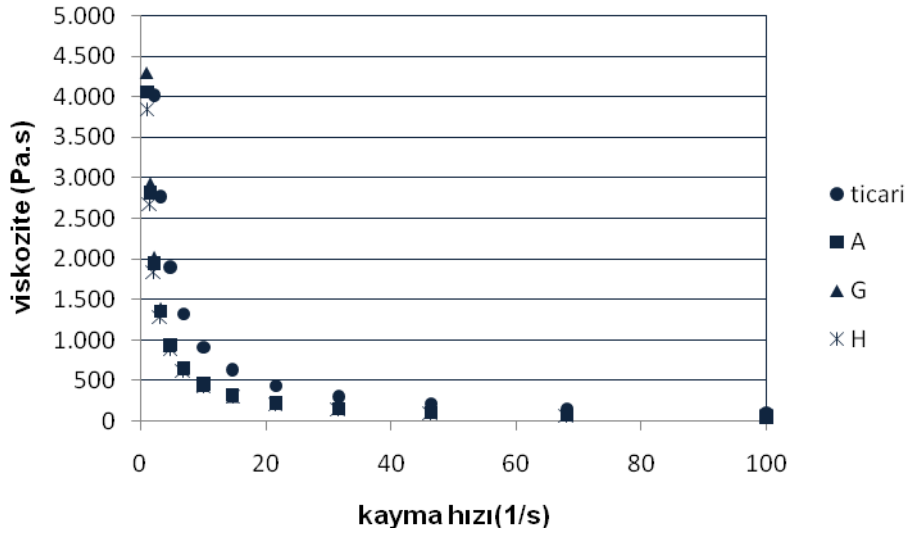
Bu bölümde hazırlanan manyetoreolojik akışkanların manyetik alan altındaki davranışlarının belirlenmesi için yapılan çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Numunelerin manyetoreolojik davranımını belirlemek için Bölüm 3.3'de belirtilen yöntemle 1 A'lik akım şiddetine karşılık gelen manyetik alan uygulanmış ve akışkanların reolojik özellikleri ölçülmüştür. Numune cihaza koyulduktan sonra, homojen bir manyetik alan oluşmasını sağlayan kapaklar kapatılmış, 1 A'lik akım şiddetinde 10^{-1} sn^{-1} ve 10^{2} sn^{-1} arasındaki kayma hızlarında, akışkanın kayma gerilimi ve viskoziteleri kaydedilmiştir. Daha sonra sonuçlar grafiğe aktarılmıştır. Akışkanlar farklı yağlar, farklı tanecikler ve farklı tanecik yüzdesine göre gruplandırmış, karşılaştırma yapılmıştır

4.3.1 Taşıyıcı Fazın Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

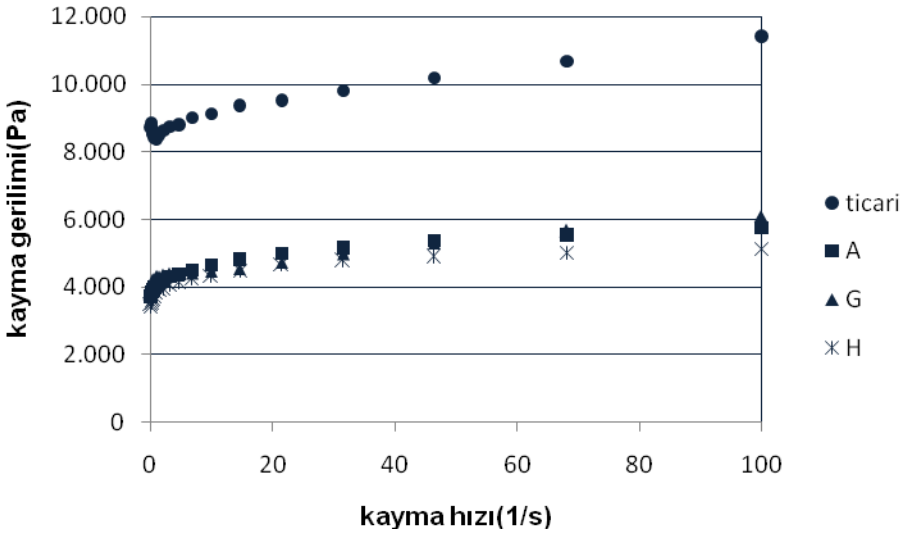
Farklı yağların kullanılmasıyla hazırlanan akışkanların manyetoreolojik özellikleri Şekil 4.9'da, Şekil 4.10'da ve Ek 3'te sunulmuştur. Şekil 4.9'da ve EK 3'teki büyütülmüş grafikten de görüldüğü gibi, kayma hızının artmasıyla bütün numunelerin viskozitesinin başlangıçta hızlı bir şekilde düştüğü, kayma hızı belirli bir değere ulaştıktan sonra ise viskozitedeki değişimin oldukça yavaşladığı görülmektedir. Bu grafikler, özellikle EK 3' teki grafikten görüldüğü gibi taşıyıcı fazın viskozitesiyle MR akışkanın viskozitesi arasında bir paralellik olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin en yüksek viskoziteye sahip yağ ile hazırlanmış olan G akışkanı bütün kayma hızı aralığında yine en yüksek viskozite sahip olmuştur fakat aralarında manyetik alan olmayan durumdaki kadar fark olmadığına, hatta bu farkın

grafik büyütülmeden kolay anlaşılamadığına dikkat edilmelidir. Ayrıca ticari akışkanın, çalışmada hazırlanan diğer üç akışkandan daha yüksek viskoziteye sahip olduğu (neredeyse 2 katı), kayma hızının 50 sn^{-1} üzerine çıktığında farkın giderek azaldığı yine grafiklerden görülmektedir.

Şekil 4.10'da ise aynı numunelerin kayma gerilimlerinin kayma hızıyla değişimleri görülmektedir. Burada da yine hazırlanan diğer üç akışkanın aralarında mertebe farkı olmaksızın taşıyıcı fazlarının kayma gerilimiyle orantılı kayma gerilimine sahip olduğunu söyleyebiliriz. Ticari akışkanın kayma gerilimi, çoğu kayma hızında bu çalışmada hazırlanan diğer üç akışkanın kayma geriliminin neredeyse 2 katıdır.



Şekil 4.9: Taşıyıcı fazın *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



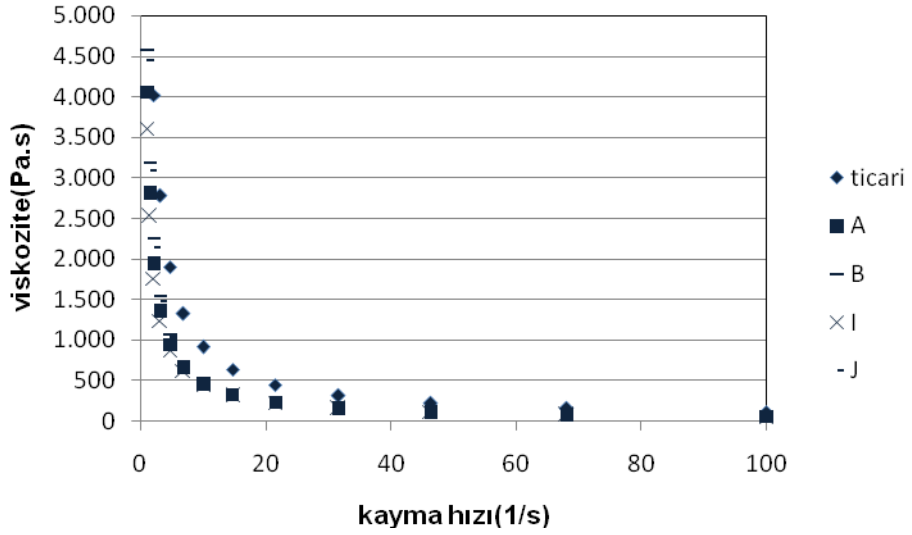
Şekil 4.10: Taşıyıcı fazın *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi

4.3.2 Manyetik Taneciklerin Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

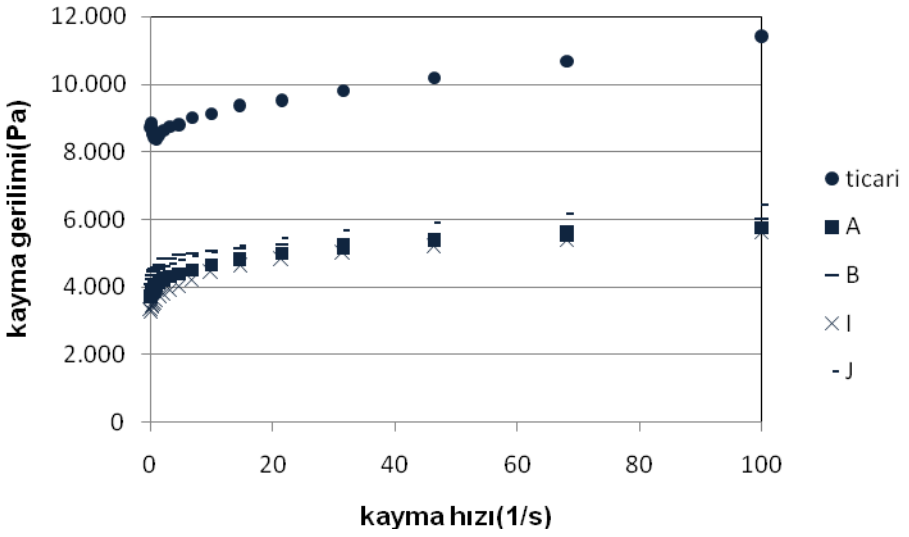
Bu çalışmada manyetik taneciklerin MR akışkanların özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, aynı taşıyıcı faz ve tanecik oranı kullanılarak, farklı taneciklerle dört adet MR akışkan hazırlanmıştır. Bu akışkanların ve ticari akışkanın viskozitelerinin kayma hızıyla değişimi Şekil 4.11 ve EK 3' de, kayma gerilimlerinin kayma hızıyla değişimi ise Şekil 4.12'de sunulmuştur.

Bu grafiklere bakıldığında mertebe farkı olmaksızın tanecik boyutu 10-11 µm olan T-1 taneciğiyle hazırlanan J ve tanecik boyutu 4-6 µm olan silika ile muamele edilmiş T-4 taneciğiyle hazırlanan B akışkanı yüksek viskozite değerlerine sahiptir. Tanecik boyutu 7-8 µm olan T-3 taneciğiyle hazırlanan I akışkanı ise nispeten düşük viskozite değerlerine sahiptir. Bu durumda tanecik boyutuyla MR akışkanın viskoziteleri arasında sistematik bir ilişkinin olmadığı, bu açıdan sonuçların Bölüm 4.2.2'deki sonuçlarla paralellik gösterdiğini söylenebilir. Ayrıca tüm kayma hızlarında ticari akışkan bu çalışmada sentezlenen bütün akışkanlardan daha yüksek viskozite değerine sahiptir.

Şekil 4.12 incelendiğinde, viskozite-kayma hızı ilişkisinde olduğu gibi burada da sistematik bir ilişkiden söz etmek mümkün değildir. Kayma gerilimi-kayma hızı davranımı açısından yine ticari akışkanın yüksek değerlere sahip olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.11: Manyetik taneciklerin *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



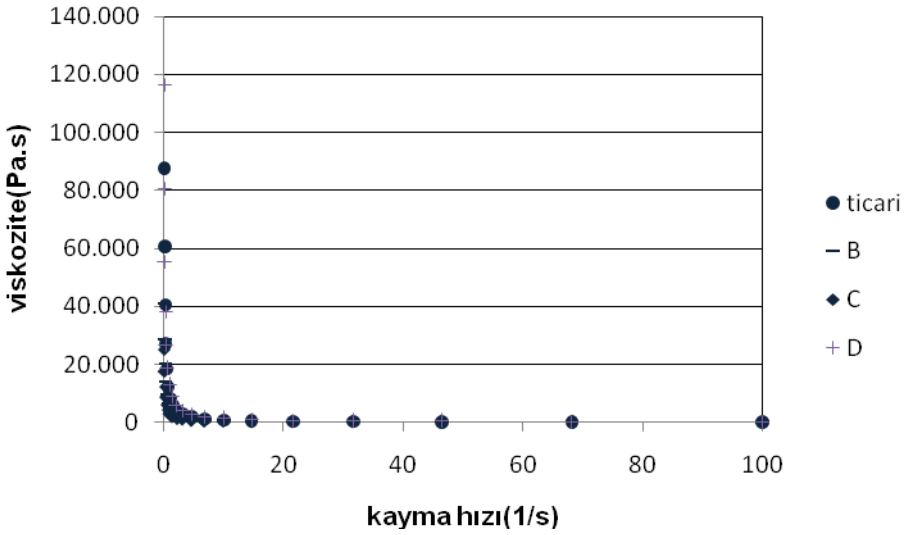
Şekil 4.12: Manyetik taneciklerin *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi

4.3.3 Manyetik Tanecik Oranının Manyetoreolojik Özelliklere Etkisi

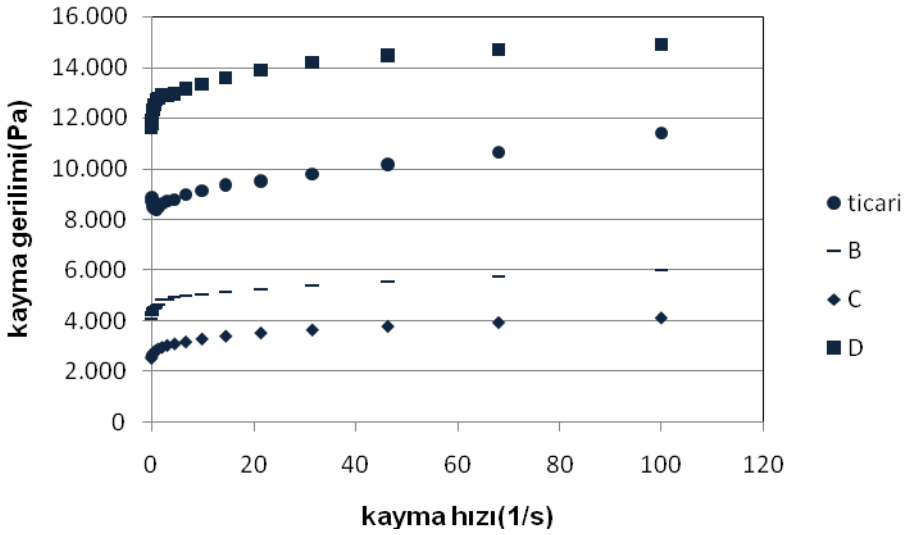
Manyetik tanecik oranının MR akışkanların özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla, aynı yağ ve tanecik tipi fakat farklı tanecik oranı ile hazırlanan üç adet MR akışkanın reolojik özellikleri incelenmiştir. Bu akışkanların viskozitelerinin kayma hızıyla değişimi Şekil 4.13'de, kayma gerilimlerinin kayma hızıyla değişimi ise Şekil 4.14'de sunulmuştur. Ayrıca bu grafiklerde ticari MR akışkanın viskozite ve kayma gerilimi değerleri de verilmiştir.

Şekil 4.13 ve özellikle EK-3'den anlaşıldığı gibi, % 50 tanecik oranına sahip olan C akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahiptir. Buna karşın, tanecik oranı % 70 olan D akışkanı en yüksek viskozite değerlerine sahiptir. MR akışkanın manyetik tanecik oranının artması, akışkanın viskozitesini de artırmaktadır. Ticari akışkan ise % 60 tanecik oranına sahip olan B akışkanı ve % 70 tanecik oranına sahip D akışkanının arasında davranım göstermektedir.

Şekil 4.14'de ise, farklı tanecik oranlarında hazırlanan akışkanların ve ticari akışkanın kayma gerilimleri, kayma hızlarına karşılık verilmiştir. Burada da MR akışkanın manyetik tanecik oranının artması, akışkanın kayma gerilimini artırmaktadır. Ticari akışkan tanecik oranı % 60 olan B akışkanı ve tanecik oranı % 70 olan D akışkanının arasında davranım göstermektedir.



Şekil 4.13: Manyetik tanecik oranının *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



Şekil 4.14: Manyetik tanecik oranının *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların kayma gerilimine etkisi

4.3.4 Manyetik Alan Altında Manyetoreolojik Özelliklerde Meydana Gelen Değişimler

Bu çalışmada sentezlenen akışkanlar ile piyasadan sağlanan bir ticari akışkanın manyetik alanın yokluğunda ve varlığında reolojik/manyetoreolojik davranışları sırasıyla Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3'te tartışılmıştı. Manyetik alanın etkisini daha net görebilmek amacıyla, bu çalışmada sentezlenen B akışkanı ve ticari akışkanın viskozitelerinde meydana gelen değişimler Tablo 4.2'de sayısal olarak kıyaslanmıştır.

Tablo 4.2: B akışkanının manyetik alan varlığında ve yokluğunda viskozite değerleri

MAY*			MAV*		
Kayma hızı(1/s)	**Viskozite(Pa.s) B Akışkanı**	**Viskozite(Pa.s) Ticari Akışkan**	**Kayma hızı(1/s)**	**Viskozite(Pa.s) B Akışkanı**	**Viskozite(Pa.s) Ticari Akışkan**
0,100	12,200	0,609	0,099	41.010	87.690
0,158	5,950	0,443	0,146	28.800	60.680
0,200	5,120	0,438	0,215	20.240	40.740
0,316	4,350	0,410	0,315	14.080	27.180
0,398	4,200	0,398	0,463	9.712	18.410
0,631	4,100	0,233	0,680	6.647	12.410
1	3,980	0,208	0,998	4.580	8.425
1,580	3,510	0,194	1,466	3.178	5.820
2	3,180	0,190	2,152	2.252	4.020
3,160	2,750	0,183	3,159	1.535	2.775
5,010	2	0,174	4,636	1.072	1.904
6,310	1,67	0,172	6,805	733,100	1.327
10	1,18	0,189	9,989	506,700	916,5
15,800	0,837	0,191	14,660	351,500	641,4
20	0,703	0,183	21,520	244	443,9
31,600	0,514	0,158	31,590	170,700	311,2
50,100	0,386	0,127	46,370	119,900	220,3
63,100	0,336	0,116	68,070	84,880	157,3
100	0,256	0,090	99,910	60,100	114,6

***MAY:** Manyetik alan yok**, MAV:** Manyetik alan var

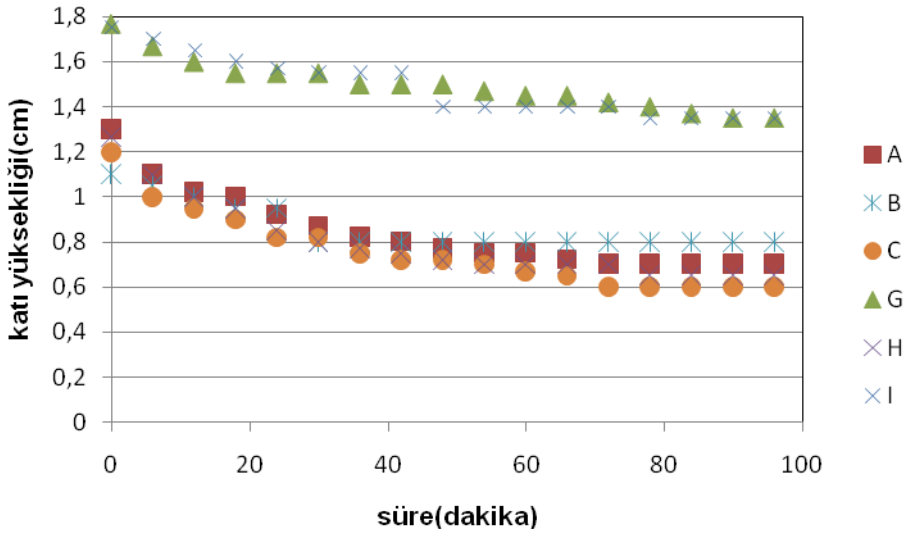
Bu tablo incelendiğinde manyetik alanın uygulanmasıyla, bu çalışmada sentezlenmiş olan B akışkanının viskozitesinin düşük kayma hızlarında 3500 kat kadar arttığı görülmektedir. Kayma hızı 1 sn^{-1}' in üzerine çıktığında akışkan viskozitesi 1000 katına çıkmaktadır. Kayma hızı 100 $sn^{-1'}$ e yaklaştığında ise viskozitenin 200 kat kadar arttığı görülmektedir. Kayma hızının artmasının, manyetik alan altındaki akışkan viskozitesindeki artışı azalttığını söyleyebiliriz. Ticari akışkandaki değişime baktığımızda ise, düşük kayma hızlarında viskozitesi 140000 katına çıkmıştır. Kayma hızı 1 $sn^{-1'}$ in üzerine çıktığında akışkan viskozitesi 40000 katına çıktığı görülmektedir. Kayma hızı 100 $sn^{-1'}$ e yaklaştığında ise viskozitenin 1200 kat kadar arttığı görülmektedir. B akışkanında olduğu gibi ticari akışkanda da kayma hızının artmasının, manyetik alan altındaki akışkan viskozitesindeki artışı azalttığını söyleyebiliriz. Ticari akışkanın manyetik alan altındaki viskozitesi, sentezlenen B akışkanından çok daha yüksek olmaktadır.

4.4 Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Özellikleri

MR akışkanlar, yoğunlukları birbirinden çok farklı bir taşıyıcı faz, yağ ve katı taneciklerden oluşmaktadır. Bu bileşimdeki akışkanlar, kendi hallerine

bırakıldıklarında katı tanecikler kabın dibine çökerek taşıyıcı fazdan ayrılabilmektedirler. Böylece 2 fazdan oluşmuş bir yapı söz konusu olabilmektedir. MR akışkanın kullanılabilmesi için, tekrar homojen bir karışım haline gelmesi gerekmektedir. Bu bölümde, sentezlenen MR akışkanların çökme özellikleri ile ilgili çalışmanın sonuçları verilmiştir. Çökme deneylerinde, MR akışkanlar, dijital çalkalayıcıda 1 saat boyunca 165 rpm hızla karıştırıldıktan sonra cam bir beherde çökmeye bırakılmıştır. Çökme süreci boyunca her altı dakikada bir alt taraftaki koyu renkli tanecik fazının yüksekliği ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.15' de sunulmuştur.

Şekilde görüldüğü gibi hazırlanan MR akışkanlar ilk dakikadan itibaren çökmeye başlamaktadır. Genel olarak çökme başlangıçta görece daha hızlı gerçekleşirken, zamanla gittikçe yavaşladığı ve sönümlendiği görülmektedir. Özellikle A, G, H eğrilerinde 2 kırılma noktası dikkat çekmektedir. Bunlardan birincisi katı fazın büyük ölçüde çöktüğü yaklaşık 30. dakika noktası, diğeri ise akışkanın çökmesinin neredeyse sona erdiği 65. dakika noktasıdır.



Şekil 4.15: Manyetoreolojik akışkanların çökmesinin zamanla değişimi

4.5 Damper Performans Testleri

Damper pistonunun belirli frekanslarda yer değiştirme yapması suretiyle damper içerisinde bulunan akışkanın gösterdiği tepki kuvvetinin, yer değiştirme miktarının zamana göre türevi olan piston hızına karşı çizilecek doğrunun eğimi damper sönüm katsayısını, c, vermektedir. Damper sönüm katsayısı, damperlerin karakteristiğini belirlemektedir. c, damper içerisinde kullanılan akışkanın özelliklerine, dampere uygulanan manyetik alanın şiddetine ve pistonun hareket hızına göre değişir.

Çalışmalar sırasında hazırlanan MR akışkanların bir damperin pistonunun mekanik hareketlerinin sönümlendirme performanslarını belirlemek amacıyla *damper performans testleri* yapılmıştır. Bu bölümde bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

Damper performans testleri İTÜ Uçak-Uzay Fakültesi ROTAM laboratuarlarında bulunan ve Şekil 3.2'de fotoğrafı verilen *Üniversal Yorulma Test Sistemi'*nde gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneği Bölüm 3.5'te detaylı olarak anlatılmıştır. Deneyler sırasında 0,05-5 Hz frekans aralığında sinüzoid dalga şeklinde yer değiştirme uygulanarak, kuvvet-yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Voltaj değerleri ise 1-10 V arasında değiştirilerek akışkanın uygulanan gerilime bağlı davranışı gözlenmiştir. 0.1 Hz frekansında A, B, C, D, G, H, I akışkanlarının gerilime ve pistonun yer değiştirmesine bağlı davranımları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. I akışkanı hem normal haliyle hem de dinlendirilmiş haliyle incelenmiştir.

Damper pistonunun yer değiştirmesinden Denklem 3.1'de gösterildiği gibi piston hızına geçilmiştir. Elde edilen sönüm-hız grafikleri 0-7 mm/s hız aralığı için Şekil 4.16 a-f ve EK-4'te verilmiştir. EK-2'deki grafikler 0-25 mm/s hız aralığı için çizilmiştir. Bu grafiklerde damperin sönüm katsayısı piston hızı ve uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak grafiğe geçirilmiştir. Şekildeki grafikler gözden geçirildiğinde, genel olarak, bütün akışkanlar için hız arttıkça damper sönüm katsayısı düştüğü görülmektedir. Özellikle 0-2 mm/s hız aralığında sönüm katsayısının hızla düştüğü, bu değerden sonra çok daha yavaş bir şekilde değiştiği dikkat çekmektedir. Buna karşın uygulanan gerilim değeri arttıkça, damperin sönüm katsayısı artmaktadır. Bu artış 0-3 mm/s hız aralığında çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Piston hızı 3 mm/s' nin üstüne çıktığında sönüm katsayısının gerilim tarafından daha az etkilendiği gözlenmiştir.

4.5.1 Taşıyıcı Fazın Sönüm Katsayısına Etkisi

Hazırlanan G, A, H akışkanlarının içerdiği tanecik tipi ve tanecik oranları aynıdır fakat Tablo 4.1'den de görüleceği üzere farklı viskoziteli yağlarla hazırlanmışlardır. G akışkanı en yüksek, H akışkanı ise en düşük viskoziteye sahip taşıyıcı faz ile hazırlanmıştır. Manyetik alan olmayan durumda Şekil 4.4'te ve manyetik alan olan durumda Şekil 4.10'da görüldüğü gibi akışkanlar taşıyıcı fazlarıyla benzer şekilde davranmakta, G akışkanı en yüksek ve H akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahip olmaktadır. Şekil 4.16' daki grafiklere bakıldığında ise, damper testlerinde elde

edilen sönüm katsayılarıyla bu akışkanların sentezinde kullanılan yağların ve/veya akışkanların viskoziteleri arasında bir paralellik göze çarpmaktadır. Genel olarak, en yüksek sönüm katsayıları G akışkanı için ve en düşük sönüm katsayıları H akışkanı için elde edilmiştir.

4.5.2 Manyetik Taneciklerin Sönüm Katsayısına Etkisi

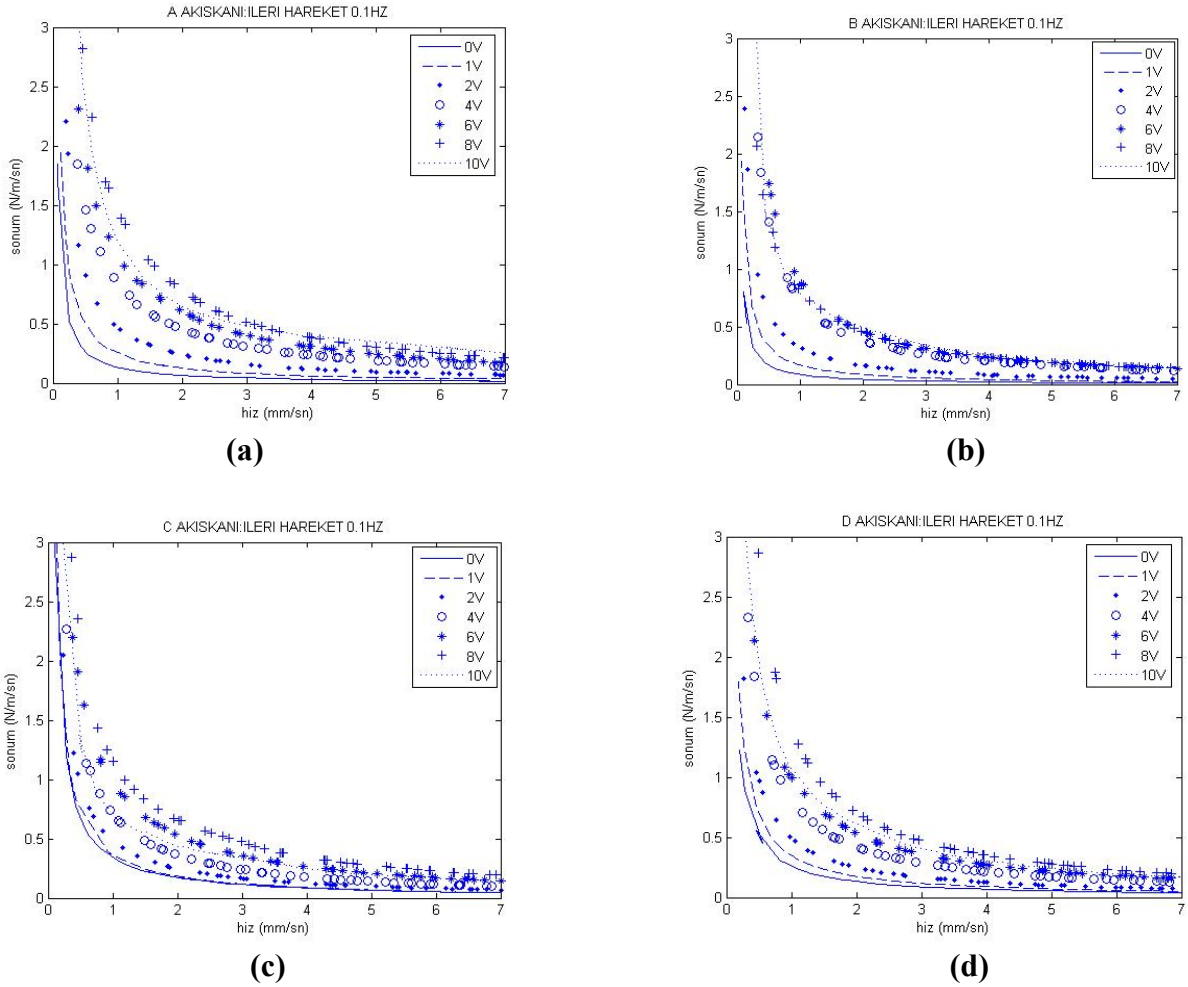
Tablo 4.1'de belirtildiği gibi, A, B ve I akışkanlarının yağ tipi ve tanecik oranı aynıdır. Fakat A akışkanı T-2, B akışkanı T-4, I akışkanı T-3 tanecikleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu 3 akışkanın sönüm katsayılarına bakıldığında, Şekil 4.16 a-b ve EK-4, T-4 taneciği içeren B akışkanı ve T-3 taneciği içeren I akışkanlarının kullanıldığı durumda sönüm katsayıları birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu iki akışkan için elde edilen sönüm katsayıları A akışkanının kullanıldığı durumda elde edilen sönüm katsayılarından daha düşüktür. Oysa Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, manyetik alan yokluğunda A akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahip olan akışkandır. Manyetik alan uygulanan durumlarda da Şekil 4.11'den de görüldüğü gibi A akışkanı yine düşük viskoziteye sahip olan akışkanlardan biridir. Bu nedenle akışkanların hazırlanmasında kullanılan tanecik tipi açısından laboratuar deneyleri ve damper deneyleri arasında bir paralellik bulunamamıştır.

EK-4'te normal ve çökmeye bırakılmış I akışkanıyla elde edilen damper testlerinin sonuçları görülmektedir. Bunun için I akışkanı damper içerisine koyulup test edildikten sonra 24 saat bekletilip tekrar test edilmiştir. Bunun sebebi bekleme sonucu akışkanın davranışında herhangi bir değişiklik olup olmayacağını gözlemektir. Damper performans sonuçları kıyaslandığında, normal ve dinlenmiş akışkanlar için elde edilmiş sönüm katsayıları arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Yüksek gerilimlerde ise fark neredeyse kaybolmaktadır.

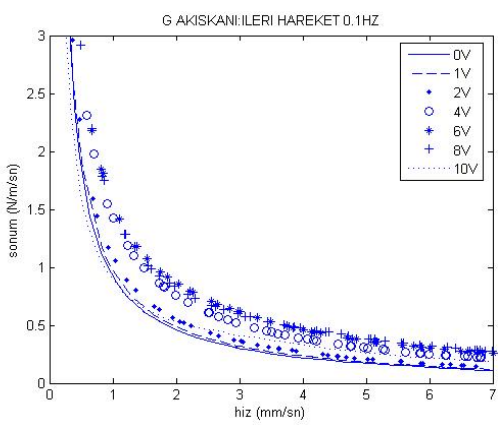
4.5.3 Manyetik Tanecik Oranının Sönüm Katsayısına Etkisi

Tablo 4.1'de belirtildiği gibi C, B ve D akışkanları aynı tip yağ ve aynı tip manyetik tanecikler kullanılarak sentezlenmişlerdir. Aralarındaki fark manyetik tanecik oranlarıdır. C, B ve D tanecikleri sırasıyla % 50, % 60 ve % 70 oranında manyetik tanecik içermektedirler. Şekil 4.16 b-d'de görüldüğü gibi, D akışkanının kullanıldığı damperde sönüm katsayısı gerilimle artmaktadır. Gerilimin 4 V'u aştığı durumlarda bu artış daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. B akışkanı için elde edilen sönüm katsayıları da C akışkanı için elde edilenlerden daha yüksektir. Bu sonuçlar akışkanların, viskozite değerleriyle uyumlu olarak sönümlendirme yaptıklarını

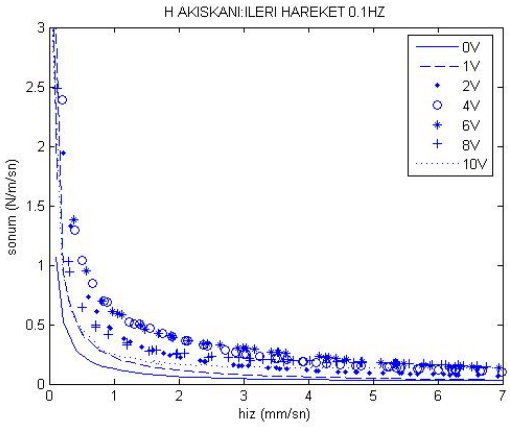
gösterir. Reometre deneyleri sonuçlarına baktığımızda; manyetik alan olmayan durumlarda Şekil 4.8'den görülebileceği gibi D akışkanı en yüksek viskozite değerlerine, C akışkanı ise en düşük viskozite değerlerine sahiptir. Manyetik alan uygulanan durumda da Şekil 4.13'den görülebileceği gibi yine en yüksek tanecik yüzdesine sahip olan D akışkanı en yüksek, en düşük tanecik oranına sahip C akışkanı en düşük viskozite değerlerine sahiptir. Sentezlenen MR akışkanların reolojik ve manyetoreolojik davranımlarıyla damper performansları bir bütün olarak göz önüne alınıp kıyaslandığında, akışkan içerisindeki manyetik tanecik oranının artması viskoziteyi artırmakta, viskozitenin artması ise gerilim altında sönüm katsayısını artırmakta sonucuna varmak mümkündür.



Şekil 4.16 a-b: MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi a) MR akışkan A, b) MR akışkan B, c) MR akışkan C, d) MR akışkan D



(e)



(f)

Şekil 4.16c-f: MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi. e) MR akışkan G, f) MR akışkan H

4.6 Matematik Model

Bu çalışmada bir matematik model yardımıyla, laboratuarda hazırlanan MR akışkan için simülasyon yapılarak manyetik alanın uygulanmadığı durum için performans eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler reometre ile laboratuarda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen eğrilerle karşılaştırılmıştır. Matematik model yardımıyla akışkanın 3 boyutlu kuvvet-hız-sönüm karakteristik grafiği de elde edilmiştir. Kullanılan model denklemi aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir [4]:

$$\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{\tau}(H) = \frac{12\,\eta\,Q\,L}{g^{3}\,w} + \frac{c\,\tau_{y}(H)\,L}{g} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Burada;

ΔP :Damperdeki toplam basınç [Pa]

ΔP :Damperdeki toplam kuvvet x alan [Pa]

ΔP_{μ} :Viskoziteden kaynaklanan basınç düşüşü [Pa]

ΔP_{τ} :Uygulanan manyetik alana bağlı olarak değişen akma noktasından kaynaklanan basınç düşüşü [Pa]

Q : Hacimsel akış hızı [mm^3/sn]

L : Damper uzunluğu [mm]

c :2-3 arasında değişen, hız dağılımına bağlı değişken

g : Akışkanın aktığı aralık [mm]

w : Damperin çevresi [mm]

μ : Viskozite [Pa]

τ_y (H) : manyetik alanın fonksiyonu olan akma noktası

Deneylerde kullanılan dampere ait parametreler aşağıda verilmiştir:

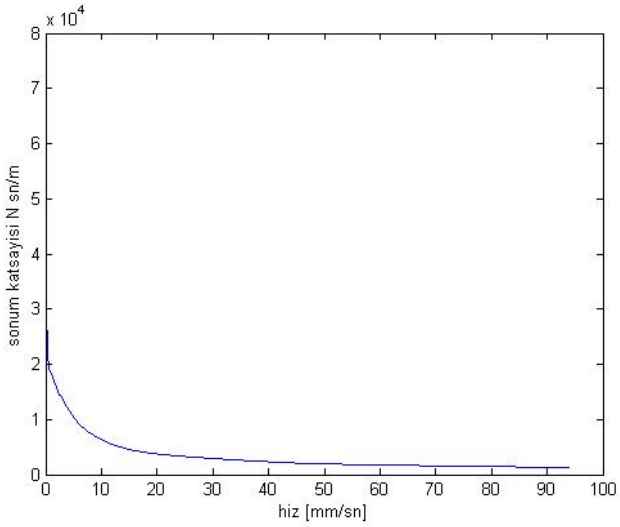
L = 20 mm

g = 0.2 mm

r = 18.75 mm

4.1 denklemiyle tanımlanan matematik modelde damper içindeki iki basınç düşüşü bileşeni göz önüne alınmaktadır: 1. Viskoz kayıplar, 2. Manyetik alan uygulandığında ortaya çıkan ve akma noktasındaki artışla kendini gösteren kuvvetler. Bu deneysel çalışmada elektro mıknatısın akma noktasını nasıl etkilediği yani $c*\tau_y$ değeri bilinmediğinden bu denklem yalnızca manyetik alanın uygulanmadığı durumlar için kullanılmıştır. Dolayısıyla denklemin sağ tarafındaki 2. terim göz önüne alınmamıştır. Buna karşın $c*\tau_y$ büyüklüğüne rastgele değerler atamak yoluyla sentezlenen B akışkanı için 3 boyutlu kuvvet-hız-sönüm grafiği çıkarılmıştır.

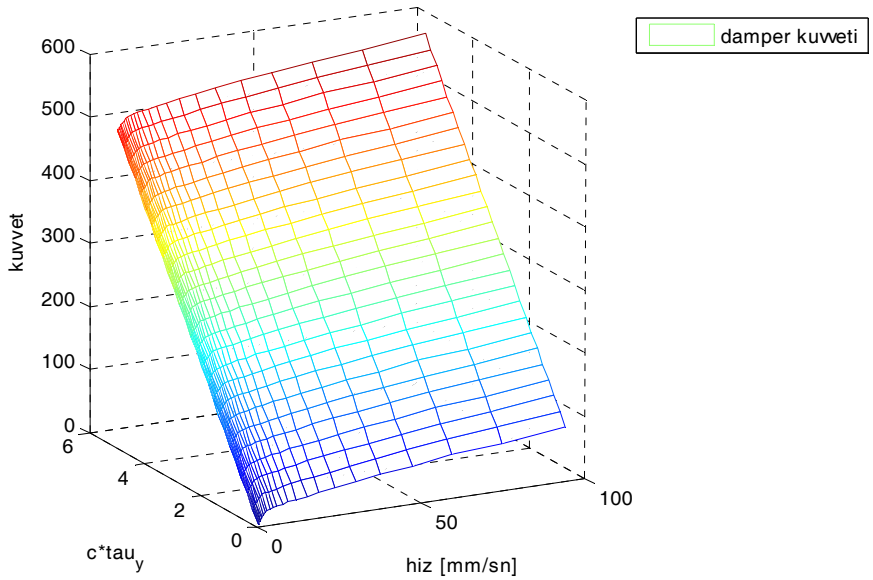
Şekil 4.17'de 4.1 denklemi kullanılarak, B akışkanı için üretilmiş olan hız-sönüm grafiği görülmektedir. Grafik, düşük hızlarda, sönüm katsayısının, hız tarafından kuvvetle etkilendiğini ve büyük düşüş gösterdiğini, hızın artmasıyla bu etkinin gittikçe zayıfladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.17: Matematik model yardımıyla B akışkanı için elde edilen sönüm hız grafiği

Şekil 4.18'de ise yukarıda belirtildiği üzere, $c*\tau_y$ büyüklüğüne rastgele değerler atanarak, B akışkanı için elde edilmiş 3 boyutlu kuvvet-hız-sönüm yüzeyi görülmektedir. Grafik eksenleri, kuvvet, $c*\tau_y$ ve hızdan oluşmaktadır. Bu grafikte

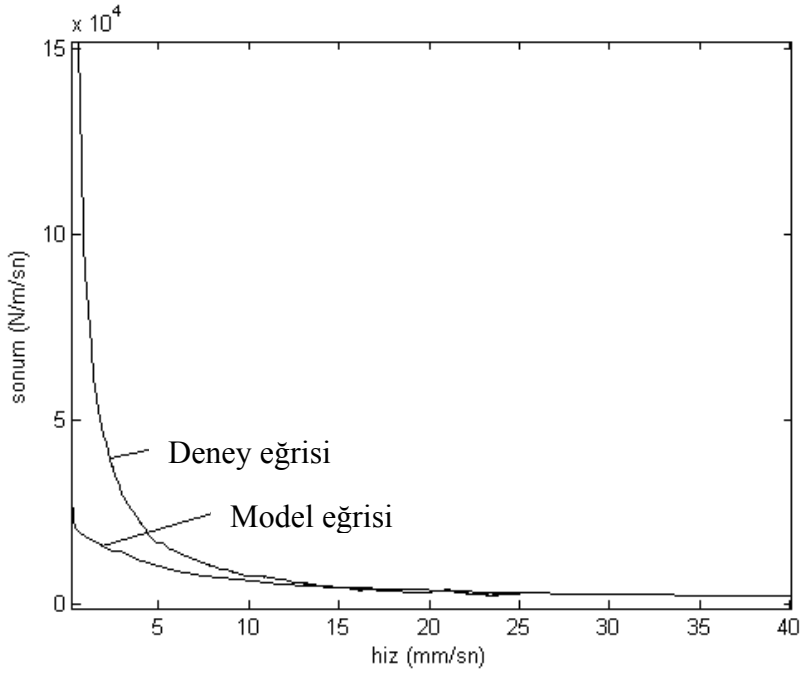
kuvvet terimi 4.1 nolu denklemde tanımlanan viskoz ve manyetik alan kuvvet bileşenlerinin her ikisini de kapsamaktadır. $c*\tau_y$ ise akışkanın akma noktasının 2-3 arasında değişen bir c sabitiyle çarpılmış halidir. Akma noktası, viskoziteye bağlı bir özellik olup manyetik alanla birlikte değişmektedir. Voltaj değeri yükseldikçe, akma noktası da yükselmektedir. Akışkanın akma noktasının yüksek olması, yüksek bir viskozite değerine sahip olması anlamına gelmektedir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi akışkanın damper içerisinde hızının artması damper kuvvetinin artmasına başka bir ifadeyle sönüm katsayısının yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.18: Matematik model yardımıyla B akışkanı için elde edilen kuvvet-hız-sönüm grafiği

Şekil 4.19'da B akışkanının manyetik alan olmayan durum için matematik model sonucu elde edilen sönüm-hız eğrileriyle damper performans testleri sonucu elde edilen eğrileri karşılaştırılmıştır. Damper deneyine ait detaylı bilgi Bölüm 3.5'te yer almaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, düşük hızlarda model ile deneysel sonuçlar arasında büyük farklar ortaya çıkmasına karşın, hızın 10 mm/s ve üzerinde olduğu durumda matematik model ve deneysel sonuçlar tam bir uyum içinde görülmektedir. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir; 3.1 numaralı denklemden hatırlanacağı gibi düşük hız, damper pistonunun az yer değiştirme yapması anlamına gelmektedir. Piston yeterince hızlı ilerlemediği zaman piston etrafında oluştuğu varsayılan yağ filmi kaybolmaktadır. Bu da viskozitenin, dolayısıyla sönümün yüksek olması anlamına gelmektedir. Böylece deney eğrisi düşük hızlarda matematik model eğrisinden

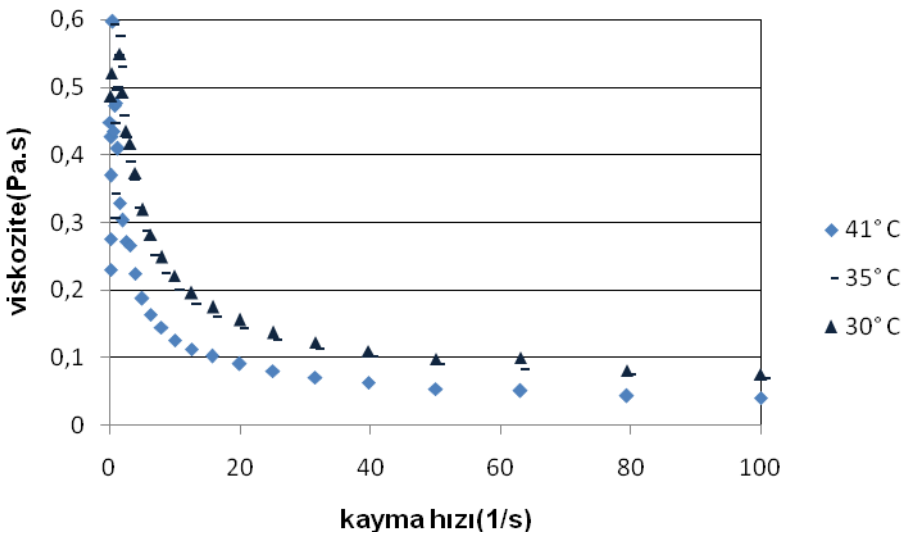
yukarda çıkmıştır. Damper hareket ettikçe yağ filmi tekrar oluşmaktadır. Diğer akışkanların grafikleri EK-5'de verilmiştir.



Şekil 4.19: B akışkanı için matematik model yardımıyla ve damper testleriyle elde edilen kuvvet-hız grafikleri

Deneysel sonuçlar ve matematik model sonuçları arasında ortaya çıkan farkların çeşitli nedenlerden kaynaklanması mümkündür. Olası nedenler şunlardır:

a) *Sıcaklık değişimi:* Damper performans testleri, akışkan 25°C sıcaklıktayken gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Deneyler sona erdiğinde, sürtünmeden dolayı ısınan akışkanın 41°C'ye çıktığı gözlenmiştir. Bu da damper performans test sonuçlarını dolayısıyla da model-test karşılaştırmasını etkileyebilir. Şekil 4.20'de 30°C - 41°C sıcaklıklarındaki B akışkanının davranışı görülmektedir. Sıcaklığın artması viskoziteyi düşürmektedir. Matematik modelde kullanılan viskozite değerleri, oda sıcaklığında yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerlerdir. Dolayısıyla sıcaklıktan dolayı deney ve matematik model sonuçlarında farkların oluşması muhtemeldir.



Şekil 4.20: Sıcaklığın manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi

b) *Reometreden kaynaklanan hatalar*: Deneylerde kullanılan reometrede viskozite ölçümü için dönen bir disk kullanılmaktadır ve bu diskin merkezinde hız 0 iken diskin çevresine doğru hız artmakta ve diskin kenarlarında maksimuma ulaşmaktadır. Dolayısıyla diskin her noktasında farklı bir hız söz konusudur. Diskle yapılan ölçümlerde ortalama bir hız kullanılarak hesaplar yapılmıştır.

c) *Viskozite ölçümleri*: Deney sırasında yukarıda anlatıldığı üzere ölçme diskinin her noktasında farklı bir hız olduğundan ölçülen viskozite değeri ortalama bir viskozite değeridir.

d) *Damperdeki sürtünmeler*: Düşük hızlarda yağ filmi oluşması kabulüyle yapılan sönüm hesapları deneysel ölçümlerden düşük kalmaktadır. Bu sapmanın sebebi olarak düşük hızlarda sürtünmenin önem kazanması düşünülmektedir.

5. VARGILAR

1. Yapılan çalışmada 8 adet farklı özellikte MR akışkan üretilmiştir. Bu akışkanların farkları hazırlandıkları taneciğin cinsi, karışıma katılan taneciğin oranı ve karışımda kullanılan taşıyıcı fazdan kaynaklanmaktadır. Bu amaçla 4 farklı manyetik tanecik, 3 yağ kullanılarak 3 farklı tanecik oranında karışımlar hazırlanmıştır.

2. Hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri incelenmiş, birbirleriyle ve ticari akışkanla karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre karışım içerisindeki tanecik oranının artması, MR akışkanın viskozite ve kayma gerilimi değerlerinin artmasına yol açmaktadır. Benzer şekilde, akışkanın hazırlanmasında kullanılan taşıyıcı fazın viskozitesinin artması da MR akışkanın viskozite ve kayma gerilimi değerlerini artırmaktadır. Buna karşın ticari akışkanın en düşük tanecik oranından bile daha düşük viskozite ve kayma gerilimi değerlerine sahip olması, taşıyıcı faz açısından da düşük viskoziteli yağ ile hazırlanan MR akışkana benzer davranışlar göstermesi de dikkat çekicidir. Tanecik tipi değişiminin ise reolojik özelliklerde tutarlı bir davranımı bulunmamaktadır. Bu nedenle tanecik tipi ve reolojik özellikler arasında bir paralellik kurulamamıştır.

3. Hazırlanan MR akışkanların manyetik alan varlığında manyetoreolojik özellikleri incelenip, karşılaştırma yapılmıştır. Burada da manyetik alan olmayan durumla benzer davranımlar görülmüş, viskozite ve kayma gerilimi değerlerinin tanecik oranı ve taşıyıcı faz viskozitesiyle arttığı gözlenmiştir. Fakat burada bir fark dikkat çekicidir. Ticari akışkan, manyetik alan söz konusu olduğu zaman yüksek viskozite ve kayma gerilimi davranımı göstermiştir. Taşıyıcı faz eğrilerinde sentezlenen MR akışkanlardan bir hayli yüksek davranım gösteren ticari akışkan, tanecik oranı grafiklerinde yüksek tanecik oranına sahip sentezlenen diğer 2 akışkan arasında davranım göstermiştir. Tanecik tipi ve manyetoreolojik özellikler arasında bir paralellik kurulamamıştır.

4. Bu çalışma çerçevesinde laboratuarda üretilmiş olan MR akışkanlar ticari bir damper içerisine koyularak, belirli voltajlarda akışkanın sönüm katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Buna göre manyetik alan yaratan voltajın artmasının, sönüm katsayısını artırdığı gözlenmiştir. Ayrıca damper testlerinden elde edilen sonuçların,

reometre ölçümleriyle paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Damper performans testlerinde sönüm katsayılarının, tanecik oranı ve taşıyıcı faz viskozitesiyle arttığı gözlenmiştir. Tanecik tipi ve sönüm katsayıları arasında bir paralellik kurulamamıştır.

5. Üretilen MR akışkanlar için literatürde yer alan bir denklem yardımıyla manyetik alan olmayan durum için matematik model oluşturulmuştur. Daha sonra bu model, akışkanın laboratuar ortamında ölçülen akış özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre akışkanın düşük hız bölgesi dışında her 2 durumda da benzer sönümlendirme yaptığı, dolayısıyla matematik modelle belirlenen akışkan özelliklerinin akışkanın sahip olduğu özelliklere yakın olarak belirlendiği söylenebilir.

6. Matematik model denklemi yardımıyla, sentezlenen akışkanlardan bir tanesi için manyetik alan altında olası 3 boyutlu kuvvet-hız-sönüm yüzeyi belirlenmiştir. Manyetik alan etkisi altındaki akma noktası için rastgele değerler atanarak belirlenen yüzey, akışkanın damper içerisinde hızının artmasının damper kuvvetini artmasına ve sönüm katsayısının yükselmesine neden olduğunu belirtmektedir.

6. ÖNERİLER

Bu çalışmada, kullanılan manyetik taneciklerin kristal yapıları üzerinde durulmamıştır. Manyetik taneciklerde mümkün olduğunca çelikteki alaşım elementlerinden % 18'den az krom içeren martensitik kullanılmalıdır. Çünkü martensitik elementinin mıknatıslanma özelliği yüksektir. Eğer taneciklerde büyük oranda, alaşım elementlerinden % 16-26 oranında krom içeren östenitik kullanılmışsa sentezlenen akışkanın manyetik alan altında viskozite artışı daha az olacaktır. Çünkü östenitik elementinin mıknatıslanma özelliği düşüktür. Bundan sonraki çalışmalarda manyetik taneciklerin kristal yapıları üzerine yoğunlaşılabilir. Büyük oranda martensitik elementi içeren taneciklerin kullanılmasıyla, manyetik alan altındaki viskozite artışı, ticari akışkanlara daha yakın olan MR akışkanlar sentezlenebilir [32].

KAYNAKLAR

[1] **Genç, S.,** 2002. Synthesis and properties of magnetorheological fluids, *PhD Thesis,* University of Pittsburgh, USA.

[2] **Xin, M.,** 2003. Development of novel magnetorheological polymer gels and magnetorheological fluids, *Master Thesis,* University of Nevada, Reno, USA.

[3] **Bica, D., Vekas, L., 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.

[4] **Jolly, M.R., Bender, J.W. and Carlson, J.D.,** Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, *Thomas Lord Research Center, Lord Corporation*.

[5] **Bica, I.,** 2003. The obtaining of magneto-rheological suspensions based on silicon oil and iron particles, *Materials Science and Engineering,* **B98,** 89-93.

[6] **Park, J.H., Chin, B.D., and Park, O.O.,** 2001. Rheological properties and stabilization of magnetorheological fluids in a water-in-oil emulsion, *Journal of Colloid and Interface Science,* **240,** 349-354.

[7] www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_b/hg2m_b.html Temmuz 2007.

[8] http://www.wikipedia.org/ Temmuz 2007.

[9] **International Specialty Products, 2002.** Carbonyl Iron Powders brochure.

[10] **Kroell, M., Pridoehl, M., Zimmermann, G., Pop, L., and Odenbach, S.,** 2005. Magnetic and rheological characterization of novel ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* **289,** 21-24.

[11] **Gans, B.J., Duin, N.J., Ende, D., and Mellema, J.,** 2000. The influence of particle size on the magnetorheological properties of an inverse ferrofluid, *Journal of chemical physics,* **113-5,** 2032-2042.

[12] **Jang, I.B., Kim, H.B., Lee, J.Y., You, J.L., Choi, H.J. and Jhon, M.S.,** 2005. Role of organic coating on carbonyl iron suspended particles in magnetorheological fluids, *Journal of Applied Physics,* **97,** 1-3.

[13] **Cho, M.S., Lim, S.T., Jang, I.B., Choi, H.J. and Jhon, M.S.,** 2004. Encapsulation of spherical iron-particle with PMMA and its magnetorheological particles, *IEEE Transaction On Magnetics,* **40-4,** 3036-3038.

[14] **Zhang, L., He, R. and Gu, H.C.,** 2006. Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles, *Applied Surface Science,* **253,** 2611-2617.

[15] **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 A: Physicochem. Eng. Aspects,* **260,** 157-164.

[16] **Pu, H. and Jiang, F.,** 2005. Towards high sedimentation stability: magnetorheological fluids based on CNT/Fe_3O_4 nanocomposites, *Nanotechnology,* **16,** 1486-1489.

[17] **Lim, S.T., Choi, H.J. and Jhon, M.S.,** 2005. Magnetorheological characterization of carbonyl iron-organoclay suspensions, *IEEE Transaction On Magnetics,* **41-10,** 3745-3747.

[18] **Lim, S.T., Cho, M.S., Jang, I.B., and Choi, H.J.,** 2004. Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* **282,** 170-173.

[19] **Lopez-Lopez, M.T., Zugaldia, A., and Gonzalez-Caballero, F.,** 2006. Sedimentation and redispersion phenomena in iron-based magnetorheological fluids, *J. Rheol.,* **50(4),** 543-560.

[20] **Lopez-Lopez, M.T., Vicente, J., Gonzalez-Caballero, F., and Duran, J.D.G.,** 2005. Stability of magnetizable colloidal suspensions by addition of oleic acid and silica nanoparticles, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects,* **264,** 75-81.

[21] **Carlson, J.D.,** 2001. What makes a good MR fluid? *8th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Nice.*

[22] www.lord.com

[23] http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr_robotblood.htm

[24] **Bossis, G., Lacis, S., Meunier, A., and Volkova, O.,** 2002. Magnetorheological fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* **252,** 224-228.

[25] **Schramm, G.,** 1994. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*, Gebrueder Haake GmbH, Karlsruhe.

[26] **Anton Paar Germany GmbH,** Physica Rheometer uygulama notları, Ostfildern (bei Stuttgart), Germany.

[27] **Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N.,** 2002. *Transport Phenomena,* Second Edition, John Wiley & Sons Inc. USA.

[28] **Şahin, İ., Öz, H.R., Engin, T., İlhan, A., ve Akpolat, A., 2005.** Manyetik sıvılı damperlerin analizi, *Mühendis ve Makina,* **46-551,** 41-50.

[29] **Wollny, K., Lauger, J., and Huck, S.,** 2002. Magneto sweep-a new method for characterizing the viscoelastic properties of magneto-rheological fluids, *Applied Rheology,* **12, 1,** 25-31.

[30] science.nasa.gov/.../y2002/23aug_MRfluids.htm

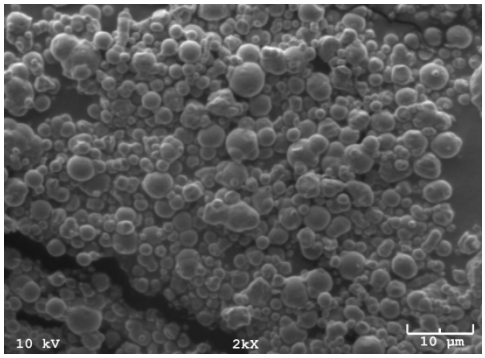
[31] www.tokyoartbeat.com/venue/22002A30.en

[32] http://www.materialsengineer.com/E-Stainless-Steel.htm Şubat 2008.

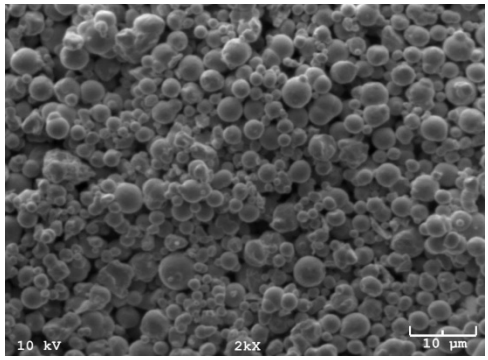
EKLER

EK-1

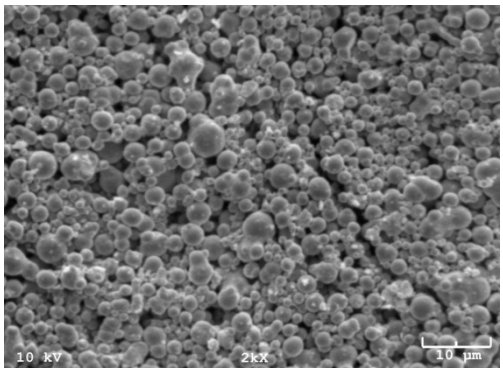
Demir taneciklerinin SEM-2000x görüntüleri



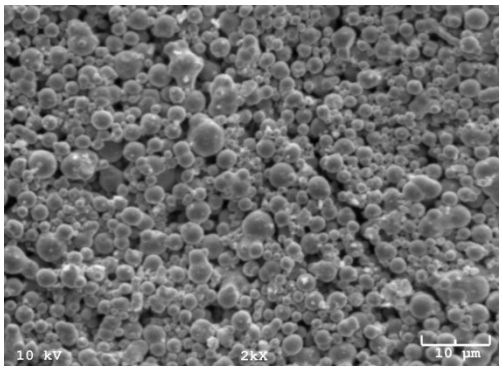
a) Ticari tanecik



b) T-1 taneciği



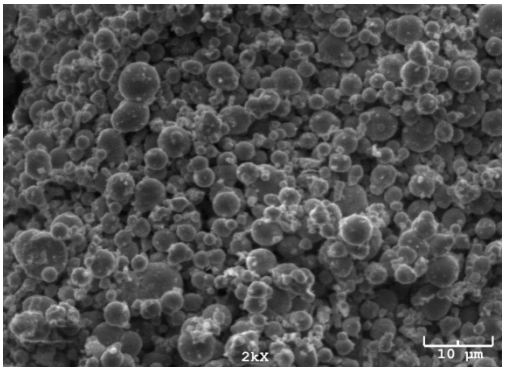
c) T-2 taneciği



d) T-3 taneciği

EK-1 (devam)

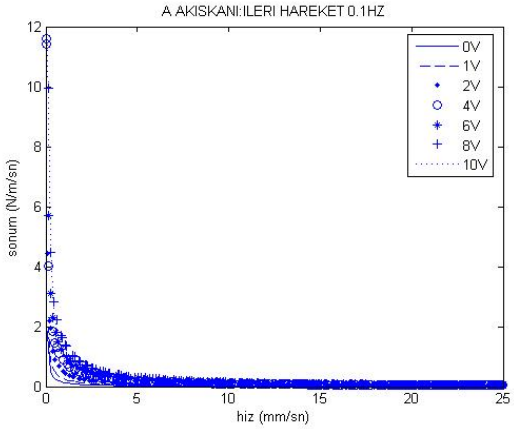
Demir taneciklerinin SEM-2000x görüntüleri



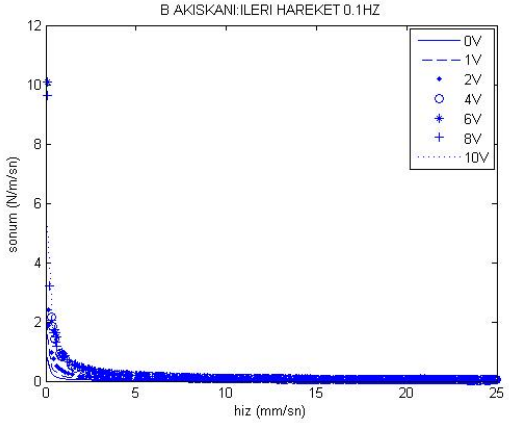
e) T-4 taneciği

EK-2

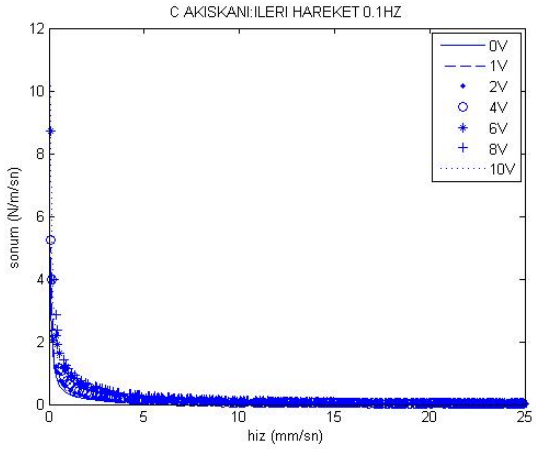
MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi



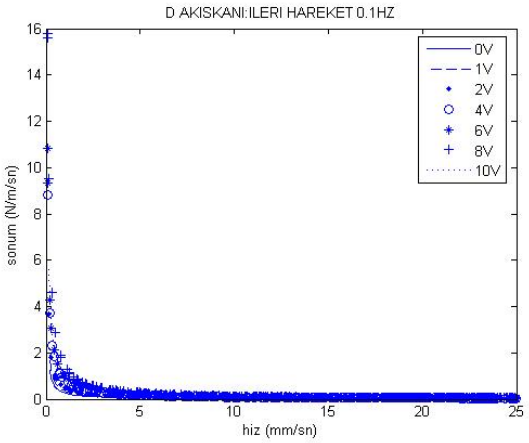
a) A akışkanı



b) B akışkanı



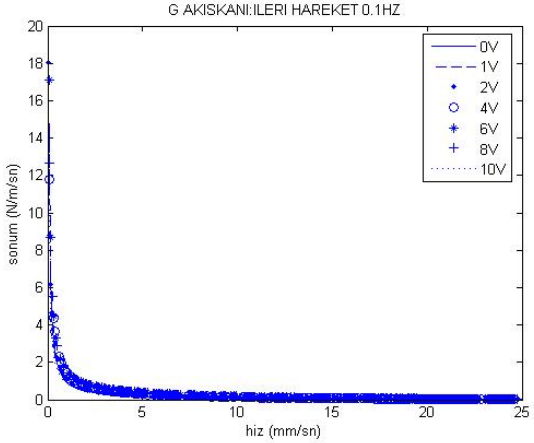
c) C akışkanı



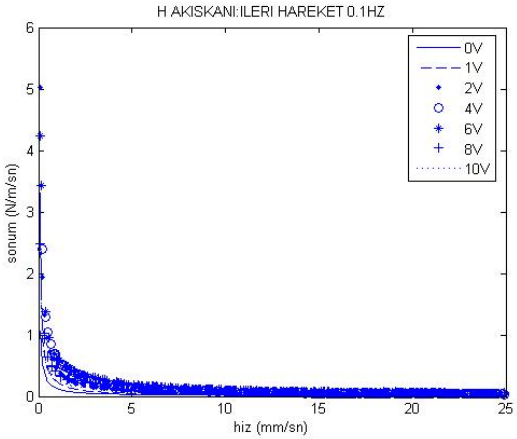
d) D akışkanı

EK-2 (devam)

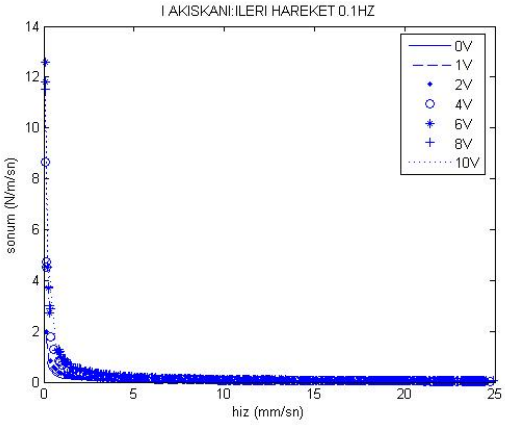
MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi (0-25 mm/s hız aralığında)



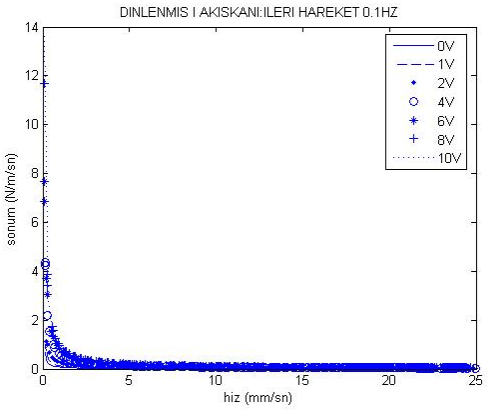
e) G akışkanı



f) H akışkanı



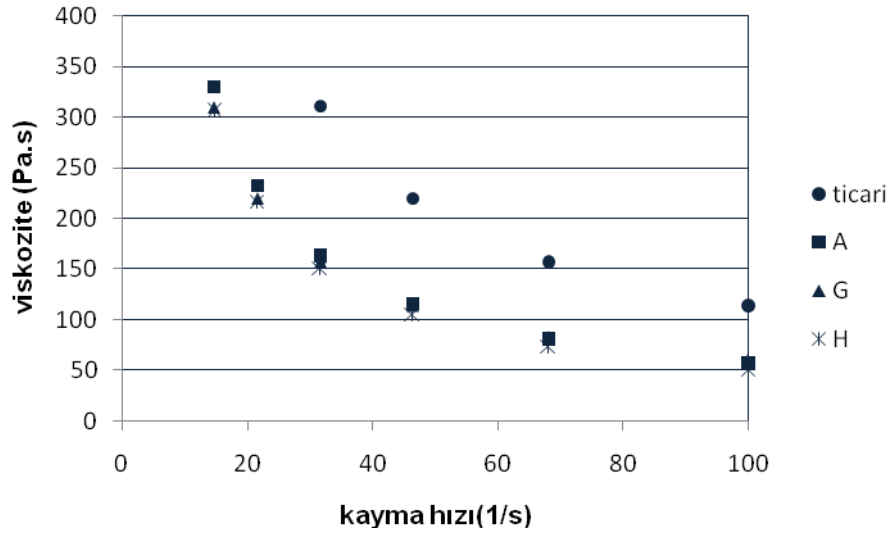
g) I akışkanı



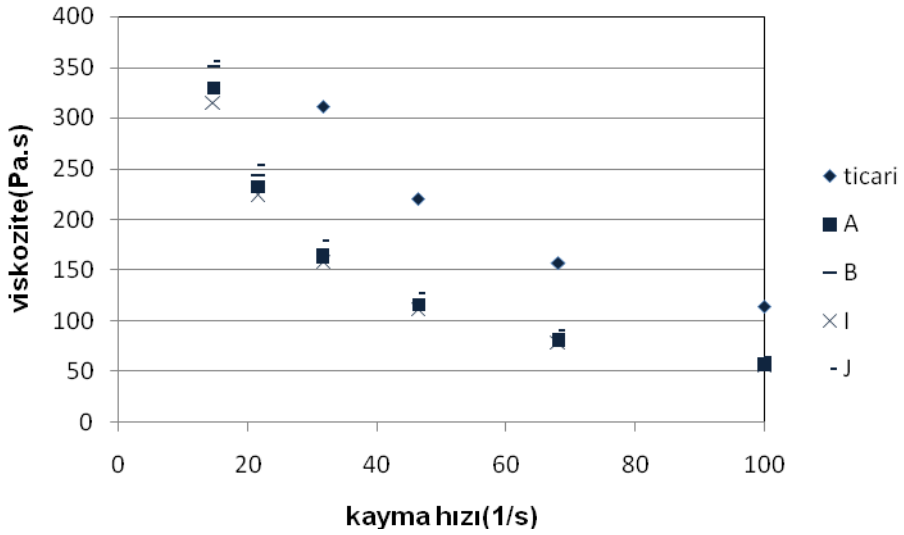
h) Dinlenmiş I akışkanı

EK-3

Taşıyıcı fazın *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi

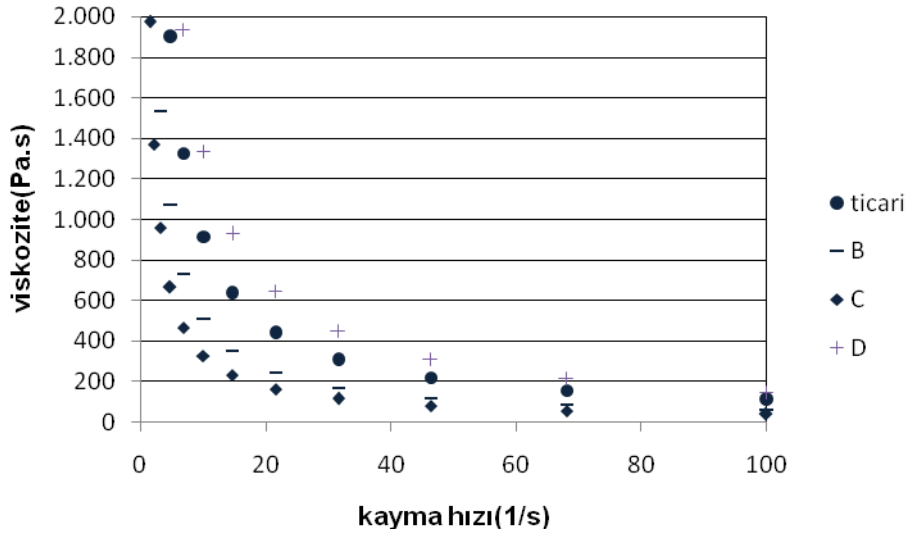


Manyetik taneciklerin *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi



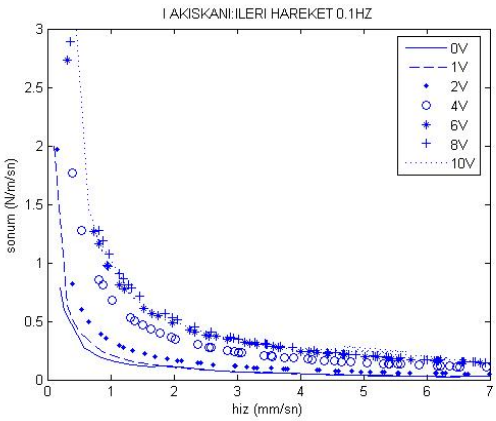
EK-3 (devam)

Manyetik taneciklerin oranının *manyetik alan varlığında* manyetoreolojik akışkanların viskozitesine etkisi

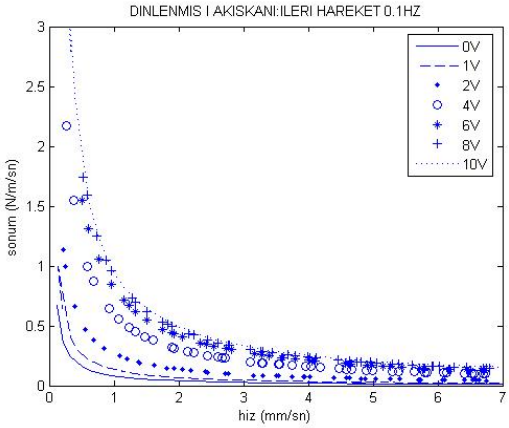


EK-4

MR akışkanlar için damper sönüm katsayısının piston hızı ve gerilimle değişimi (0- 7 mm/s hız aralığında)



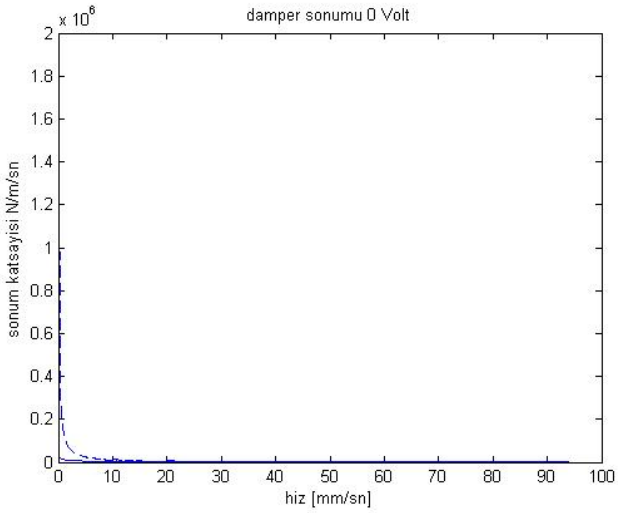
a) I akışkanı



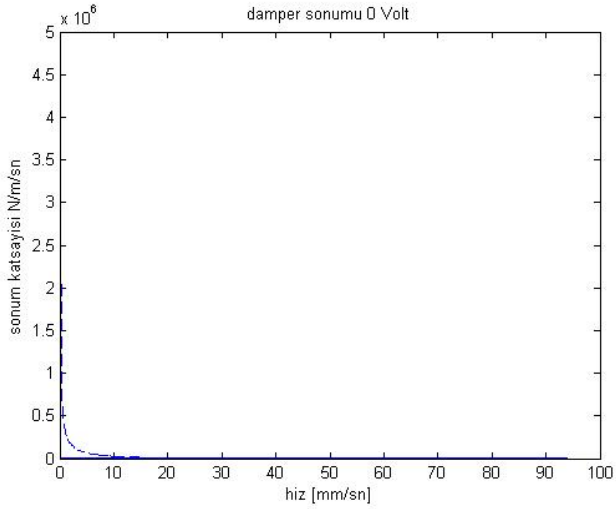
b) Dinlenmiş I akışkanı

EK-5

MR akışkanlar için matematik model yardımıyla ve damper testleriyle elde edilen kuvvet-hız grafikleri



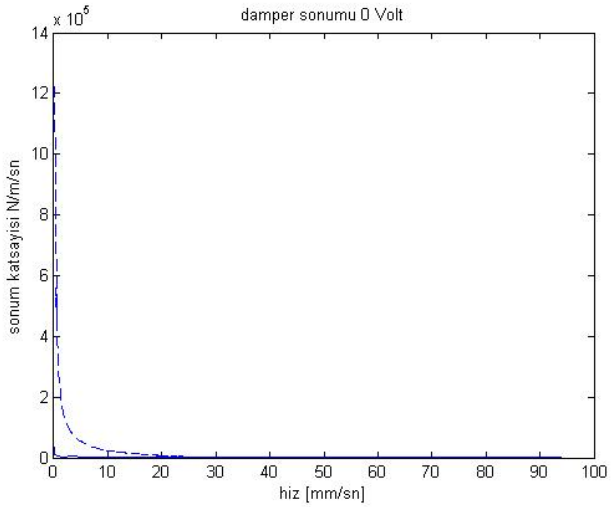
a) A akışkanı



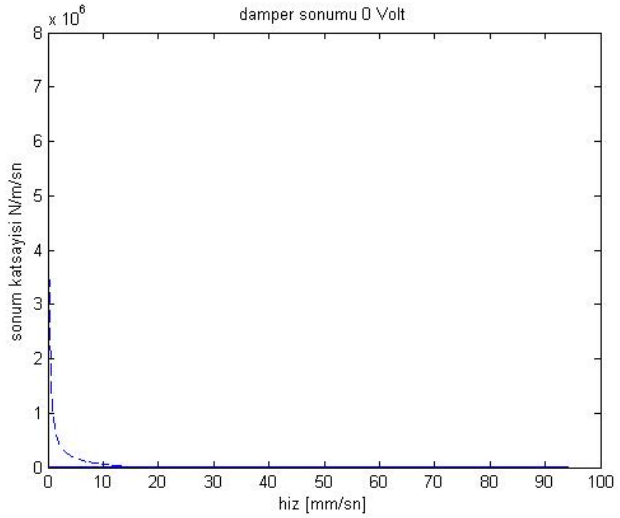
b) C akışkanı

EK-5 (devam)

MR akışkanlar için matematik model yardımıyla ve damper testleriyle elde edilen kuvvet-hız grafikleri



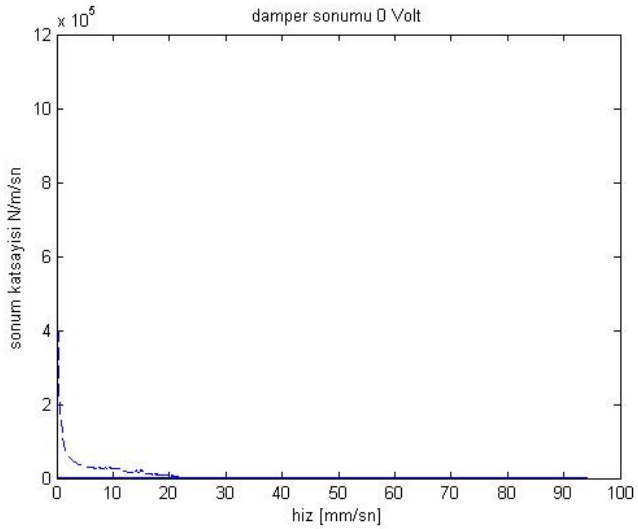
c) D akışkanı



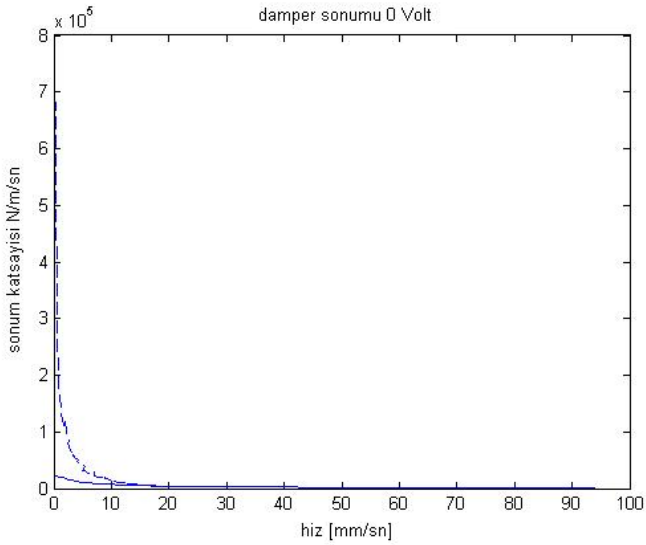
d) G akışkanı

EK-5 (devam)

MR akışkanlar için matematik model yardımıyla ve damper testleriyle elde edilen kuvvet-hız grafikleri



e) H akışkanı



f) I akışkanı

ÖZGEÇMİŞ

Hatice Ebru UZUN 1983 yılında Samsun'da doğdu. İlköğrenimini Çarşamba Yeşilırmak İlkokulu ve Eskişehir Murat Atılgan İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini ise Eskişehir Kılıçoğlu Anadolu Lisesi ve Çorum Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünü bitirdikten sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimine devam etmektedir.