

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK BİTKİSEL YAĞ METİL ESTERLERİNİN YAĞLAMA YAĞI  
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Güler ÖNCÜ**

**Danışman  
Prof. Dr. Ertuğrul DURAK**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Güler ÖNCÜ]

## TEZ ONAYI

**Güler ÖNCÜ** tarafından hazırlanan " **Atık Bitkisel Yağ Metil Esterlerinin Yağlama Yağı Olarak Değerlendirilmesi** " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

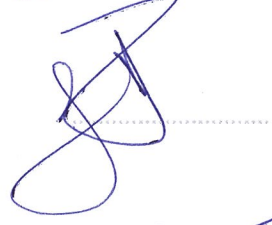
**Danışman**

**Prof. Dr. Ertuğrul DURAK**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



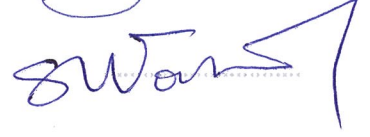
**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU**  
İstanbul Teknik Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Remzi VAROL**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Recai Fatih TUNAY**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Nihat YILMAZ**  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



**Enstitü Müdürü**

**Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR**



## TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Güler ÖNCÜ



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Genel Bilgiler .....	2
1.1.1. Triboloji .....	2
1.1.2. Sürtünme .....	5
1.1.2.1. Kuru Sürtünme .....	7
1.1.2.2. Sınır Sürtünme .....	8
1.1.2.2.1. Yarı kuru sürtünme .....	8
1.1.2.2.2. Yarı sıvı sürtünme .....	8
1.1.2.2.3. Sıvı Sürtünme .....	8
1.1.3. Aşınma ve aşınma mekanizmaları .....	10
1.1.3.1. Aşınmayı etkileyen faktörler .....	12
1.1.3.2. Aşınma Çeşitleri .....	12
1.1.3.2.1. Adezif aşınma .....	12
1.1.3.2.2. Abrazif aşınma .....	14
1.1.3.2.3. Yorulma aşınması .....	17
1.1.3.2.4. Koroziyon aşınması .....	17
1.1.3.3. Archard's eşitliği .....	18
1.1.4. Yağlama ve yağlayıcı maddeler .....	20
1.1.4.1. Bitkisel yağlar ve mineral yağlar .....	20
1.1.4.2. Çevre dostu yağlayıcılar .....	22
1.1.4.3. Biyoyağlayıcılar .....	23
1.1.4.4. Biyoyağlayıcı uygulamaları ve kullanımları .....	24
1.1.4.5. Baz yağ .....	24
1.1.4.6. Metil ester .....	26
1.1.4.7. Yağlayıcıların biyolojik parçalanabilirliği ve ekotoksik özellikleri .....	28
1.1.4.8. Katkı maddeleri .....	28
1.1.4.9. Standart yağlayıcı test yöntemleri .....	34
1.2. Temas açısı .....	34
1.2.1. Temas açısı ve yüzey gerilimi belirleme yöntemleri .....	35
1.2.1.1. Sessile(Durağan) ve Pendant(Asılı) damla metotları .....	36
1.3. Zaman – Frekans dağılımı .....	37
1.3.1. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) ve spektrogram .....	39
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	41
2.1. Sürtünme ve aşınma üzerine literatür taraması .....	41
2.2. Bitkisel Esaslı Yağ ve Yağlayıcılar Üzerine Literatür Taraması .....	43
2.3. Frekans Analizi Üzerine Literatür Taraması .....	51
2.4. Titreşim Analizi Üzerine Literatür Taraması .....	53
2.5. Oksidasyon Kararlılığı Üzerine Literatür Taraması .....	56
2.6. Döngüsel Ekonomi Üzerine Literatür Taraması .....	58

2.7. Atık Yönetimi Üzerine Literatür Taraması .....	58
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	61
3.1. Deney Malzemeleri .....	62
3.2. Pim disk Aşınma Test Cihazı (PDATC) .....	66
3.3. Deney Şartları .....	67
3.4. Numunelerin Yüzey İncelemeleri.....	69
3.5. Temas açısı Ölçümü .....	69
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	71
4.1. Sürtünme Katsayısı Deney Sonuçları.....	71
4.1.1. Kuru (yağsız) sürtünme katsayısı deney sonuçları .....	71
4.1.2. Sınır - karışık YAME sürtünme katsayısı deney sonuçları .....	74
4.1.3. Sınır - karışık BY sürtünme katsayısı deney sonuçları .....	77
4.1.4. Sıvı sürtünme YAME sürtünme katsayısı deney sonuçları .....	79
4.1.5. Sıvı sürtünme BY sürtünme katsayısı deney sonuçları .....	82
4.2. Kütle Kaybı.....	87
4.3. Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları.....	90
4.4. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) Uygulaması.....	97
4.5. Numunelerin SEM ve EDS Analizleri.....	106
4.5.1. Kuru deney şartlarında numunelerin SEM analizleri .....	107
4.5.2. Sınır - karışık YAME deney şartlarında numunelerin SEM analizleri .....	110
4.5.3. Sınır - karışık BY deney şartlarında numunelerin SEM analizleri .....	113
4.5.4. Sıvı YAME deney şartlarında numunelerin SEM analizleri.....	116
4.5.5. Sıvı BY deney şartlarında numunelerin SEM analizleri.....	118
4.5.6. Tüm deney şartlarında numunelerin EDS analizleri.....	126
4.6. Aşınma Miktarı Ölçüm Sonuçları Archard's Eşitliği.....	127
4.7. Temas Açısı Ölçümleri .....	129
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	132
6. KAYNAKLAR .....	136
ÖZGEÇMİŞ.....	144

## ÖZET

Doktora Tezi

### ATIK BİTKİSEL YAĞ METİL ESTERLERİNİN YAĞLAMA YAĞI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Güler ÖNCÜ

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul DURAK

Gelişen çevre bilinci ve ortaya çıkan çevresel tehditler, biyokökenli ürünlerin geri dönüşümünü zorunlu hale getirmiştir. Bu tez çalışması, biyokökenli endüstriyel atık olarak nitelendirilen kullanılmış atık yağlardan elde edilen ve biyodizel üretiminde kullanılan yağ asiti metil esterlerinin (YAME) tribolojik özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan malzemeler kullanılmış kızartma yağı yağ asiti metil esteri ve mineral esaslı baz yağdır (BY). Deneyler, standartlara uygun biçimde; kuru, sıvı - karışık, sıvı yağlayıcı ortamlı şartlarda, farklı yük (5N,10N ve 15N) ve farklı kayma hızlarında (100, 300, 600 d<sup>-1</sup>) ve 1000 m kayma mesafesinde 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Pim-Disk Aşınma Test Cihazında (PDATC) diske bağlanan numune olarak CuSn8Ni1 alaşımlı yatak malzemesi, karşı yüzey olarak da çelik bilye kullanılmıştır. Aşınan numunelerin yüzey pürüzlükleri Ra, Rz ve Rt deney öncesi ve deney sonrası ölçülmüştür. Numunelerin aşınma miktarları kütle kaybı metodu ile belirlenmiş, Archard aşınma indeksleri hesaplanarak aşınma özellikleri yorumlanmıştır. Yağlama parametresi hesaplanarak yağlama rejimi belirlenmiştir. Tribolojik davranışları incelenen numunelerin görsel analizi için SEM yüzey görüntüleri ve kimyasal analizi için EDS'den yararlanılmıştır. Ayrıca yağlayıcı numunelerin yüzey temas açıları ve yüzey gerilimleri de deneysel olarak ölçülmüştür. Seçilen iki farklı yağlayıcı numune için PDTAC'den elde edilen sürtünme katsayıları ( $\mu$ ), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü(KZFD) ile zaman-frekans analizi kullanılarak modellenmiştir. Özellikle kuru deney şartlarında KZFD'deki sürtünme katsayısının temel frekansındaki yüksek genlik, partikül transfer oluşumu ve plastik deformasyonu işaret etmektedir. KZFD, bu yönüyle tribolojik davranışların sayısal olarak modellenmesinde de çözüm üreten bir yöntem olarak kullanılabilirliği görülmüştür.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, kullanılmış kızartma yağı YAME'nin sürtünme, aşınma ve yüzeye tutunma gibi tribolojik özelliklerinin tüm yağlama şartlarında BY'ye göre genelde daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Biyokökenli, geri kazanılmış ve çevre dostu bir ürün olan YAME, yağlama yağı ve/veya yağ katkı maddesi adayı olarak gösterilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Yağlama yağı, yağ asiti metil ester, atık bitkisel yağ, sürtünme, aşınma, triboloji, kısa zamanlı fourier dönüşümü.

2019, 144 sayfa

## **ABSTRACT**

### **PhD. Thesis**

## **EVALUATION OF WASTE VEGETABLE OIL METHYL ESTERS AS LUBRICATION OIL**

**Güler ÖNCÜ**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ertuğrul DURAK**

With increasing awareness of environmental and emerging environmental threats have made recycling of bio-origin products mandatory. This thesis study was investigated the tribological properties of fatty acid methyl esters used in the production of biodiesel and obtained from used waste oils which are considered as bio-origin waste. In this study, used frying oil fatty acid methyl ester (FAME) and mineral based base oil (BO) were used. Tests were carried out by the lubrication conditions such as dry, boundary – mixed, and environment with fluid lubricant, with different loads (5N, 10N and 15N), at different sliding speeds (100,300,600 rpm), and 1000 m sliding distance in accordance with the standards, and repeated 3 times. A Pin-Disk Wear tribo-tester (PDWT) was used to conduct the sliding tests between steel ball and CuSn8Ni1 alloy bearing material. The roughness (Ra, Rz and Rt) of the wearing surfaces of the specimens were measured before and after the test. Wear characteristics were determined by mass loss method and were discussed by Archard's wear indexes. The lubrication regime was determined by calculating the lubrication parameter. SEM was used for surface analysis and EDS was used for chemical analysis. Surface contact angles and surface tensions were also measured experimentally.

The friction coefficients ( $\mu$ ) obtained from tests with two different lubricant specimens were modeled using the Short Time Fourier Transform (STFT) and time-frequency analysis. In particular, it indicates high amplitude, particle transfer formation and plastic deformation formation by at the fundamental frequency of the coefficient of friction by the STFT under dry test conditions. In this respect, STFT is seen as a solution method that may be used in numerical modeling of tribological behaviors.

When all the results were evaluated, it was determined that used waste frying oil YAME's tribological properties such as friction, wear and surface adhesion generally give better results than BO in all lubrication conditions. YAME is a bio-origin, recycled and environmentally friendly product, and can be shown as a lubricant and / or lubricant additive candidate.

**Keywords:** Waste vegetable oil, fatty acid methyl ester, lubricant, friction, wear, lubrication, tribology, short-time fourier transform

**2019, 144 pages**

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen, beni yönlendiren ve her aşamada destek olan değerli Danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ertuğrul DURAK'a şükranlarımı arz ederim.

Atık yağlar, bitkisel yağlar konusunda ve yağ karışımının temini konusunda destek veren ve aynı zamanda Tez İzleme Komitesi Üyesi Sayın Prof. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU'na ve atık bitkisel esaslı metil ester yağlayıcıları hibe yolu ile destek sağlayan DB Tarımsal Enerji San. ve Tic. A.Ş. Firması'na, baz yağı yine hibe yolu ile destek sağlayan Tüpraş Türkiye Pertol Rafineleri A.Ş. firmasına ve çalışmada kullanılan yatak malzemesi numunelerini hibe ederek çalışmamı destekleyen Şahin Motor Yatakları A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Tez İzleme Komitesi diğer üyesi hocam Sayın Doç. Dr. Recai Fatih TUNAY'a, S.D.Ü. Makine Mühendisliği Laboratuvarındaki tüm teknik kadroya, temas açısı ölçümlerine imkan tanıyan Maden Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Emin Cafer ÇİLEK'e, numunelerin yüzey incelemelerini yapan Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM'de görev yapan Sayın Öğr.Gör. Salih AKYÜREKLİ'ye teşekkür ederim.

Çalışma sürecimde her zaman desteklerini esirgemeyen aileme de sevgi ve saygılarımı sunarım.

Güler ÖNCÜ  
ISPARTA, 2019

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sürtünme enerjisinin dağılımı.....	3
Şekil 1.2. Sürtünme esasında aşınan yüzeyde meydana gelen yapı değişikliği .....	4
Şekil 1.3. Yağlama sınırları.....	6
Şekil 1.4 Tribo sistem arayüzeyinde yağlama biçimleri.....	7
Şekil 1.5 Kuru sürtünme modeli .....	7
Şekil 1.6. Mil ve Radyal Kaymalı Yatakta Çevresel ve Eksenel Basınç Dağılımları .....	9
Şekil 1.7. Hidrostatik yağlamanın şematik gösterimi .....	10
Şekil 1.8. Aşınma mekanizmaları.....	10
Şekil 1.9. Zamanla oluşan aşınma.....	11
Şekil 1.10. Adhezif aşınma.....	13
Şekil 1.11. Adhezif aşınma testleri .....	14
Şekil 1.12. Abrazif aşınma .....	15
Şekil 1.13. Kauçuk tekerlekle abrazif aşınma testi .....	15
Şekil 1.14. Abrazif aşınmaya ait bir test düzeneği .....	15
Şekil 1.15. Yorulma aşınması .....	17
Şekil 1.16. Korozyon aşınma .....	18
Şekil 1.17. Archard aşınma teorisi .....	19
Şekil 1.18. Mineral yağ bileşimleri .....	25
Şekil 1.19. Transesterifikasyon reaksiyonu .....	27
Şekil 1.20. Kanatlı bir pompanın veriminin VI ile değişimi.....	31
Şekil 1.21. Polimerik VI çözünürlük ve sıcaklığın etkisi.....	31
Şekil 1.22. Su damlasının yüzeye tutunmasına göre değişen temas açısı.....	35
Şekil 1.23. Gonyometre cihazı.....	36
Şekil 1.24. Pendant (asılı) ve Sessile (durağan) damla .....	37
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan malzemeler.....	64
Şekil 3.2. Deney numunelerinin temizlendiği ultrasonik kurutma cihazı ....	65
Şekil 3.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve örnek ölçüm .....	66
Şekil 3.4. Pim disk aşınma test cihazı(PDATC).....	67
Şekil 3.5. Aşındırma deneyi öncesi ve sonrası yatak numunelerinin genel görüntüsü.....	67
Şekil 3.6. Yağlama Şartları.....	68
Şekil 3.7. SEM cihazı.....	69
Şekil 3.8. Yüzey geriliminin ölçümü .....	70
Şekil 4.1. Kuru sürtünmeli deneylerde bütün yüklerdeki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi.....	72
Şekil 4.2. Kuru sürtünmeli deneylerde bütün hızlardaki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi.....	73
Şekil 4.3. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki $\mu$ -kayma mesafesi değişimi .....	75
Şekil 4.4. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME deneylerine ait bütün hızlardaki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi .....	76
Şekil 4.5. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY deneylerine ait bütün yüklerdeki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi .....	77
Şekil 4.6. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY deneylerine ait bütün hızlardaki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi .....	78

Şekil 4.7. Sıvı YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi.....	80
Şekil 4.8. Sıvı YAME deneylerine ait bütün hızlardaki $\mu$ - kayma mesafesi değişimi.....	81
Şekil 4.9. Sıvı BY deneylerine ait bütün yüklerdeki $\mu$ -kayma mesafesi değişimi.....	82
Şekil 4.10. Sıvı BY deneylerine ait bütün hızlardaki $\mu$ -kayma mesafesi değişimi.....	83
Şekil 4.11. Tüm deneylere ait bütün yüklerdeki $\mu$ ortalama değişimi .....	84
Şekil 4.12. Tüm deneylere ait bütün hızlardaki $\mu$ ortalama değişimi.....	85
Şekil 4.13. Kuru, sıvı, sınır-karışık, sürtünmeli BY ve YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki kütle kaybı değişimi.....	88
Şekil 4.14. Kuru, sıvı, sınır-karışık sürtünmeli BY ve YAME deneylerine ait bütün hızlardaki kütle kaybı değişimi .....	89
Şekil 4.15. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası $R_a$ , pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri .....	92
Şekil 4.16. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası $R_z$ , pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri .....	93
Şekil 4.17. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası $R_t$ , pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri .....	94
Şekil 4.18. Kuru sürtünmeli deneye ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim .....	98
Şekil 4.19. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim.....	99
Şekil 4.20. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim.....	100
Şekil 4.21. Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları YAME yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim .....	101
Şekil 4.22. Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları BY yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim ..	102
Şekil 4.23. Kullanılmamış aşındırıcı bilye ve yatak malzemesinin SEM görüntüsü .....	107
Şekil 4.24. Kuru (yağsız) yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü.....	108
Şekil 4.25. Kuru yapılan deneylerde ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri değerleri.....	109
Şekil 4.26. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü.....	110
Şekil 4.27. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü.....	111
Şekil 4.28. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü.....	111
Şekil 4.29. YAME ile yapılan sınır-karışık yağlama şartlarındaki deneylere ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri değerleri.....	112
Şekil 4.30. BY yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak ve	

bilye malzemesinin SEM görüntüsü.....	114
Şekil 4.31. BY yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki deneye ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri.....	115
Şekil 4.32. YAME ile sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki yatak malzemesinin SEM görüntüsü.....	117
Şekil 4.33. YAME ile sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri.....	117
Şekil 4.34. BY ile sıvı yağlayıcı yağlama şartlarındaki malzemenin SEM görüntüsü .....	118
Şekil 4.35. BY ile sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri.....	119
Şekil 4.36. YAME ve BY yağlayıcı ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait tüm yüklerdeki hız- $\mu$ grafiği.....	121
Şekil 4.37. Sürtünme katsayısının ( $\eta_n / P$ ) parametresi ile değişimi.....	123
Şekil 4.38. Tüm yağlama şartlarında Archard's denklemi aşınma indeksi ...	128
Şekil 4.39. Su damlasına ait temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri.....	129
Şekil 4.40. Deneylerde kullanılan yağlara ait temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri.....	130



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Katkı maddeler ve etkileri .....	29
Çizelge 3.1. Deney numunesi BY analiz değerleri .....	62
Çizelge 3.2. Deney numunesi YAME analiz değerleri.....	63
Çizelge 3.3. CuSn8Ni1 alaşımlı yatağın özellikleri .....	64
Çizelge 3.4. AISI 52100 100Cr6 aşındırıcı küresel bilyenin teknik ve mekanik özellikleri .....	65
Çizelge 4.1. Pürüzlülük(Ra) değerlerine göre oluşturulan Anova tablosu ....	91
Çizelge 4.2. Tüm deney şartlarında sürtünme katsayısının yatak parametreleri ile değişimi .....	125
Çizelge 4.3. Tüm deney şartlarında belirlenen deneylere ait EDS değerlerine göre elementlerin % ağırlık, % atomik değerleri..	126



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Sıcaklık
AFM	Atomik kuvvet mikroskopi
ASTM	American Society for Testing Materials
d <sup>-1</sup>	Devir/dakika
F	Kuvvet
F <sub>N</sub>	Cisminin temas yüzeylerine etki eden normal kuvvet
F <sub>s</sub>	Sürtünme kuvveti
H	Sertlik
L	Kayma mesafesi
n	Devir
h	Film kalınlığı
R <sub>a</sub>	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
R <sub>t</sub>	Değerlendirme uzunluğundaki en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki yükseklik
R <sub>z</sub>	En yüksek ve en derin on noktanın ortalama pürüzlülüğü
SEM	Taramalı elektron mikroskopi
EDS	Enerji Dağılımlı Spektrometre
V	Hacim
P	Basınç
w	Açısal hız
KZFD	Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
YAME	Yağ Asiti Metil Esteri
BY	Baz Yağ
PDATC	Pim Disk Aşınma Test Cihazı
AW	Aşınma önleyici katkı maddeleri
VI	Viskozite indeksi geliştiriciler
FM	Sürtünme modife edici katkı maddeleri
EP	Yüksek basınç (Extremum Pressure, ) katkı maddesi
JY	Jatropha yağı
ρ	Yoğunluk
μ	Sürtünme katsayısı

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel atıklara ve bunların neden olduğu çevresel problemlere çözüm aramak günümüzde zorunluluk haline gelmiştir. Atıkların azaltılması ve geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılması ve endüstriyel yan ürünlerin sürdürülebilir kullanımının artırılması, ülke ekonomisi ve yaşanılabilir bir dünya için oldukça önemlidir. Ürünlerin geri dönüşümünün sağlanması, mümkün olduğunca daha az kayıpla üretim ve tüketim, sıfır atık, döngüsel ekonomi, biyolojik bozunabilirlik ve ekolojik ürünler sürekli gündemde yer almaktadır. Çevresel etkileri nedeni ile sürekli gündemde olan atık yağlar, gliserol ve biyoyağlayıcılar, gresler ve poliüretan gibi katma değerli ürünlerin hammaddesi olarak, büyük bir pazar potansiyeline de sahiptir. Bu tür yağların uygun şekilde toplanması, taşınması, arıtılması ve kullanılması, onu bir atıktan ziyade potansiyel geri dönüşebilir bir ürün haline getirmektedir. Biyolojik olarak parçalanabilen polimerler, reçineler ve gresler gibi ürünlerin sentezi için bitkisel yağ kullanımı da, atık yağların kullanılması ile azaltılacaktır.

Türkiye’de yaklaşık 950 bin ton sıvı, 550 bin ton margarin, 200 bin ton civarında da yem, boya ve sabun sanayi olmak üzere 1.7 milyon ton bitkisel yağ tüketimi bulunmaktadır (Yanmaz, 2016). Yağın rafinasyonu ve elde edilen yağın tüketimi sonucu yaklaşık 350 bin ton bitkisel atık yağ oluşmaktadır.

Petrolden sonra en büyük ithalat kalemini yağlar oluşturmaktadır. 2018 yılı mayıs ayı veri bültenine göre; ithal edilen mineral yakıtlar, mineral yağlar ve bunların damıtılmasından elde edilen ürünler, en çok ithal edilen ürünlerin başında yer almakta ve ithalat değeri yaklaşık 4 milyar \$ olarak görülmektedir. Bu yağlayıcı ürünlerin yıllık tüketim miktarının çok fazla olması ve bu yağların kontrolsüz olarak doğaya atılması ekonomik ve çevresel kayıplara neden olmaktadır.

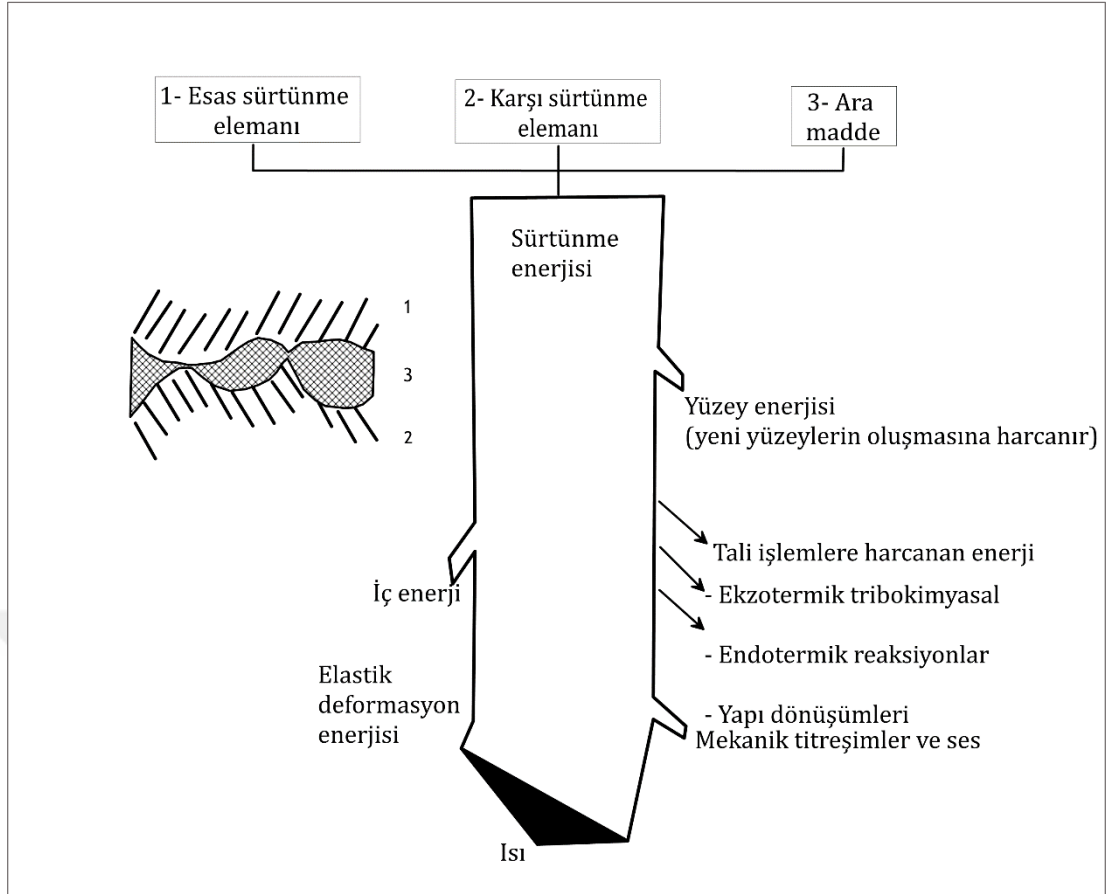
Bu tez çalışması, çeşitli bitkisel atık kızartma yağlardan elde edilen yağ asiti metil esterlerin(YAME), yağlama yağı ve/veya performans geliştirici olarak kullanılan katkı maddelerinin yerine kullanım olanaklarının incelenmesini esas almıştır.

Bitkisel esaslı YAME'nin, yağlama yağı adayı olarak, farklı çalışma şartlarında sürtünme ve aşınma testleri yapılarak, elde edilen değerler mineral baz yağ (BY) ile karşılaştırılmıştır. Bu yağların, yağlayıcı adayı olarak; kuru(yağsız), sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki tribolojik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen zamana bağlı sürtünme katsayıları ( $\mu$ ) verilerinin yorumlanmasında Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) kullanılmıştır. Ortaya çıkan fiziksel sürtünme hasarının detaylı incelenebilmesi amacı ile test numunelerinin temas yüzeylerinin SEM ve EDS görüntüleri ile metalografik incelemesi de çalışmada yapılmıştır. Ayrıca yağlayıcıların yüzey temas açıları ve yüzey gerilimleri de incelenmiştir.

## **1.1. Genel Bilgiler**

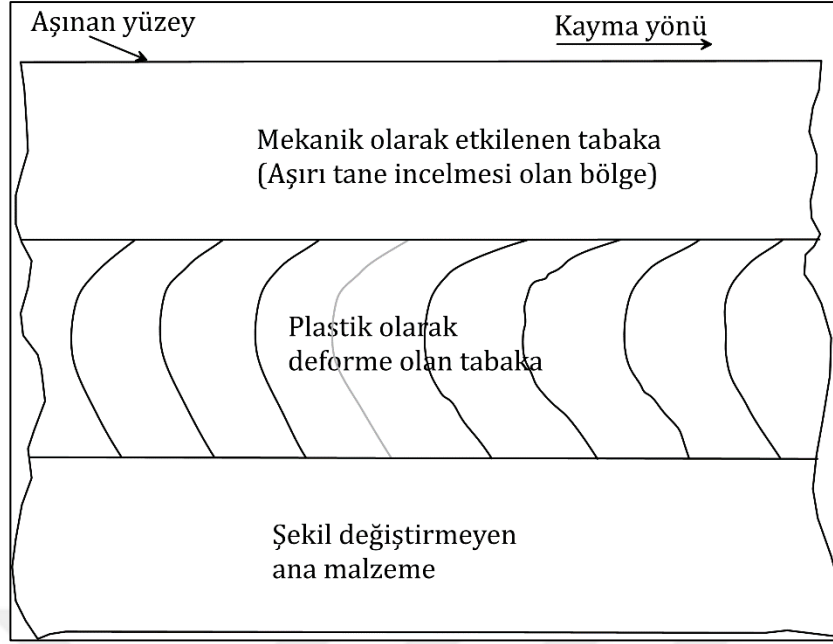
### **1.1.1.Triboloji**

Triboloji kelimesi, Yunanca'da kayma anlamına gelen *tribos*'tan türetilmiştir. İlk olarak 1966 yılında İngiltere'de Dr. H. Peter Jost tarafından sürtünme, aşınma ve yağlama konularını tanımlamak için kullanılmıştır. Triboloji, karşılıklı etkileşim halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan yüzeyler (malzemeler) arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama olayları ile bu olaylar arasındaki ilişkilerin bilimi, teknolojisi ve mühendisliği şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 1.1). Triboloji biliminin hedefi, izafi hareket halinde olan yüzeylerin ekonomik, ekolojik ve fonksiyonel optimizasyonunu sağlamaktır. Bu durum pratikte, sürtünme ve aşınmanın olduğu yerde kontrolü ve yönetimi anlamına gelmektedir. Dolayısı ile triboloji, çok disiplinli bir çalışma alanıdır. Tribolojik çalışma alanları, fizik, kimya, uygulamalı matematik, katı mekanik, akışkanlar mekaniği, termodinamik, ısı transferi, malzeme bilimi, reoloji, yağlama, makine tasarımı, performans ve güvenilirlik konularında önemli yere sahiptir (Bhushan, 2013).



Şekil 1.1. Sürtünme enerjisinin dağılımı (Uetz ve Föhl, 1978)

Bir tribolojik sistemde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylara ait enerji dağılımı Şekil 1.1'de görülmektedir. Bu şekilden, yaklaşık bir tahminle, sürtünme enerjisinin % 75-80'inin ısı enerjisine, % 4-5'inin kırılma enerjisine, % 4-5'inin mekanik titreşim ve ses enerjisine, % 7- 8'inin iç enerji ve % 4-5'inin ise tribo-kimyasal reaksiyonlara, yapı dönüşümlerine, artık gerilmelere ve diğer bir takım tribolojik olaylara dönüştüğü anlaşılmaktadır (Şekil 1.2). Sürtünme ısısı sürtünen elemanların temas yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana getirerek malzemelerin mekanik ve metalürjik özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Quinn, 1996).



Şekil 1.2. Sürtünme esnasında aşınan yüzeyde meydana gelen yapı değişikliği (Rigney ve Hirth, 1979)

**(1.) Mekanik olarak etkilenen bölge:** Bu bölge aşınan yüzeyin hemen altında çok aşırı tane incelmesinin olduğu bir tabakadır. Sürekli kayma sürtünmesi yapan sistemlerde plastik olarak deforme olan bu bölgenin tabaka kalınlığının belli bir sürtünme süresinden sonra sabit kaldığı tespit edilmiştir (Rigney ve Hirth, 1979). Aynı zamanda bu bölgeye “mikronize olmuş tabaka” adı da verilmektedir (Tsuya, 1976).

**(2.) Plastik olarak deforme olan bölge:** Mekanik olarak etkilenen tabakanın altında yer alan bu bölgede malzeme kayma ve ikiz teşekkülü ile plastik olarak şekil değiştirerek taneler kayma yönüne paralel olarak uzanır. Tane boyutu da bir miktar azalmaktadır. Fakat bu tabakanın kalınlığı uygulanan yük ve kayma hızı değerlerine göre değişir.

**(3.) Orijinal çekirdek yapı:** En altta bulunan ve plastik deformasyondan etkilenmeyen esas malzeme bölgesi (Odabaş ve Karamiş, 1998).

### 1.1.2. Sürtünme

Dönen millerin sabit bir gövdede yataklanması veya sabit aks üzerine bir döner elemanın (taşıyıcı teker, kasnak) yataklanması ve bu yataklardaki sürtünme aşınma problemlerinin kökleri çok eskiye dayanmaktadır. Daha tekerleğin icadından önce çok ağır yükleri silindirik kalas veya taşlar üzerinde kaydırarak taşımak, yuvarlanan silindirleri su ile ıslatarak sürtünmeyi azaltmak bu alanda bilinen ilk öncü faaliyetlerdir. Ortaçağda Leonardo da Vinci, 17. yüzyıl sonunda Fransız mühendis Amantons, 18. yüzyıl sonunda da Coulomb sürtünmeyle ilgili temel kurallar üzerine çalışmışlar ve bugün bilinen;

$$F_s = \mu F_N \quad (1.1.)$$

$F_s$ : Sürtünme kuvveti,

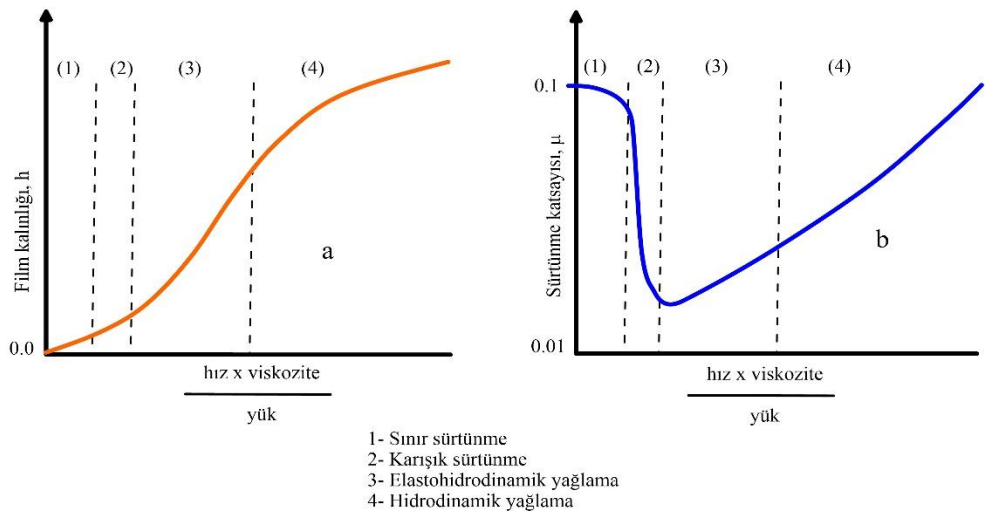
$\mu$ : Sürtünme katsayısı,

$F_N$ : Sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvvet

olarak 19. yüzyıldan itibaren Coulomb-Amontons sürtünme kanunu olarak genel kabul görmeye ve bu isimle anılmaya başlamıştır. Daha sonraki yıllarda ise Newton, Navier, Poiseuille, Hagen, Stokes ve Reynold sıvı sürtünme üzerinde çalışarak sürtünme konusunda temel kuralları oluşturmuşlardır. Coulomb'un 1785'de ifade ettiği kurallar:

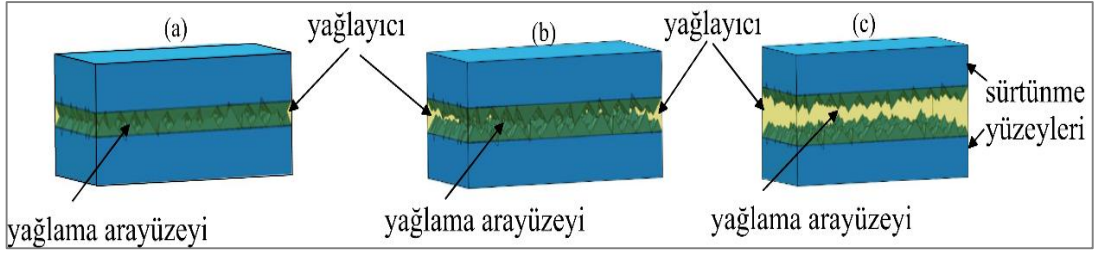
- a) Sürtünme kuvveti, temas yüzeylerine etkiyen normal kuvvetle doğru orantılıdır.
- b) Temas yüzeyinin büyüklüğünün sürtünme kuvvetine etkisi yoktur.
- c) Hareket halindeki sürtünme kuvveti (dinamik sürtünme), temas yüzeylerinin birbirlerine göre hızlarından bağımsızdır.
- d) Statik sürtünme, diğer koşullar değişmiyorsa dinamik sürtünmeden büyüktür. Statik sürtünmede, birbirlerine temas eden elemanlar arasında bir izafi hareket yoktur; (dış kuvvet veya momentler varsa da, sürtünme kuvveti veya momentlerini yenemediklerinden) iki elemanın birbirine göre konumları değişmektedir.

Dinamik sürtünmede (kinetik sürtünme) temas eden yüzeyler birbirlerine göre hareket halindedir. Dinamik sürtünmede birbirine temas eden yüzeylerden en az biri öteleme hareketi yapıyorsa ve birbirleri üzerinde kayıyorsa kayma sürtünmesinden bahsetmek mümkündür. Eşleşen cisimler birbirleriyle nokta ya da çizgisel temas halinde olup birbirleri üzerinde kaymaksızın yuvarlanıyorsa bu kez de yuvarlanma sürtünmesinden bahsetmek mümkündür. Yuvarlanma sürtünmesinde, elemanların temas noktaları eşit zamanda eşit yaylar oluştururlar. Elemanların dönme eksenleri, temas noktalarındaki iki elemana teğet olan düzleme diktirler. Eğer eşleşen cisimler birbiri üzerinde sadece dönme hareketi yapmıyor, küçük de olsa bir de kayma hareketi yapıyorlarsa bu durum, kayma ve yuvarlanmanın birleşimi olarak tanımlanır. Rulmanlarda bilezik ve yuvarlanma elemanları arasındaki sürtünme bu türden bir sürtünmeye en iyi örnektir. Bu şekilde bir sürtünme halinde, temas halindeki iki cismin sırayla temas ettikleri noktaların oluşturduğu yaylar birbirlerine eşit değildir. Sürtünme katsayısı genellikle yuvarlanma halinde kayma halindekiinden daha küçüktür(Babalık ve Çavdar, 2014). Temasta olan ve bağıl hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri direnç sürtünme olarak tarif edilmektedir(Koç, 2009). Sürtünme; Kuru, Sınır, Karışık (Yarı-sıvı ), Sıvı (hidrodinamik) olarak sınıflandırılmaktadır(Şekil 1.3, Şekil 1.4).



Şekil 1.3. Yağlama sınırları. a) Film kalınlığı, b) Sürtünme katsayısı (Stribeck eğrisi) (Reeves, 2013)

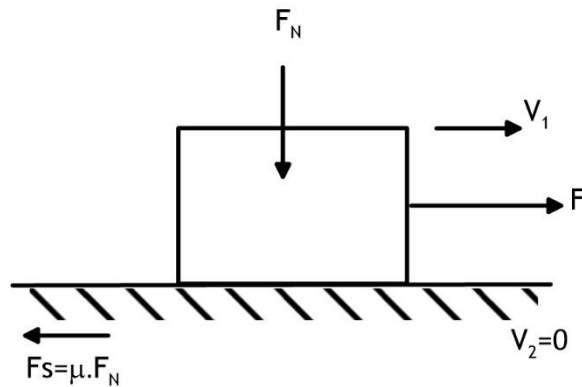




Şekil 1.4. Tribo sistem arayüzünde yağlama biçimleri a) Sınır yağlama, yüzeylerin tam etkileşimi ile yağlama sağlanır. b) Karışık / elastohidrodinamik yağlama. c) Hidrodinamik yağlama, arayüzeyler arasına yağ filmi kaplanarak tam yağlama sağlanır (Reeves, 2013)

### 1.1.2.1. Kuru sürtünme

Kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 1.5'te gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_N$ ) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı  $F_s = \mu \cdot F_N$  değerinde bir sürtünme kuvveti oluşmaktadır. Bu sürtünmede temizlenmiş yüzeyler birbirlerine göre hareket etmektedir. Hareket sırasında sürtünme, kayma ve yuvarlanma sürtünmesi olarak iki şekilde görülebilmektedir. Kayma sürtünmesinde temas yüzeysel; yuvarlanma sürtünmesinde ise noktasal ve çizgisel olarak görülmektedir. Elemanların yüzeylerindeki pürüzlerin birbirine geçmesi ve birbirine kenetlenmesi söz konusudur. Sivri tepeliklerin birbirini aşındırması yanında, ortamın sıcaklığı da artarak zamanla bölgesel erime sıcaklığına kadar çıkabilmektedir.



Şekil 1.5. Kuru sürtünme modeli

### **1.1.2.2.Sınır sürtünme**

Yüzeyler arasında metalik temasın en az, yağlama maddesi kayma gerilmesi  $\tau$  değerinin de küçük olduğu sürtünme şeklidir. Kuru sürtünmede olduğu gibi temas yüzeyleri tamamen metal değildir. Kuru ve sıvı sürtünme arasında bir ara sürtünme şeklidir.  $F_s = \mu F_N$  bağıntısı geçerlidir. Bu sürtünmede de temas yüzeyleri çabuk ısınabilmektedir(Şekil 1.3, Şekil 1.4).

#### **1.1.2.2.1.Yarı kuru sürtünme**

Birbirlerine göre hareket eden yüzeylerde büyük miktarlarda metalin metale teması vardır. Bu sürtünme bir geçiş sürtünmesidir. Çalışma süresi azdır. Hızlı olmayan hareketlerde çalışma süresi uzundur(Şekil 1.3, Şekil 1.4).

#### **1.1.2.2.2.Yarı sıvı sürtünme**

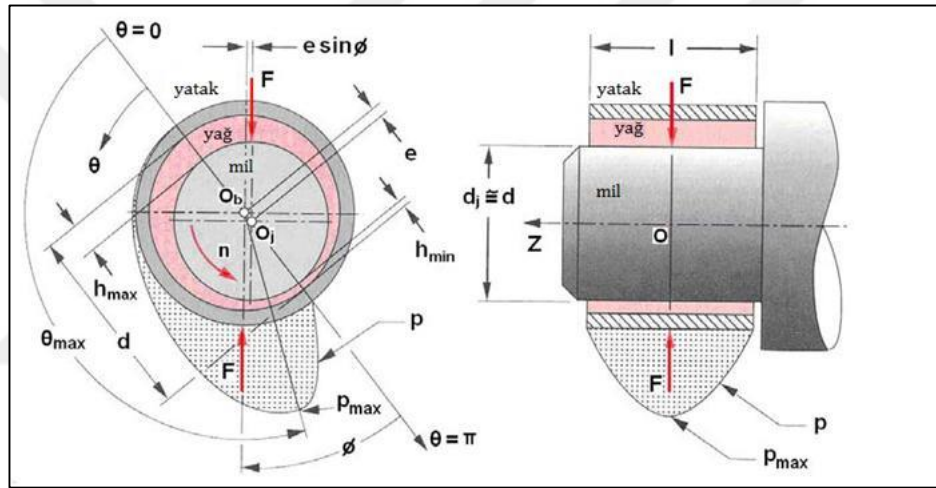
Hareket halinde, metallerin temas yüzeyleri arasında birbirine kuru sürtünmesini önleyen yağ maddesi bulunmaktadır. Yağ, metalik yüzeyler arasında kayma gerilmesi küçük olan bir film tabakası oluşturmaktadır. Film tabakası, başlangıçta yüzeyi çepeçevre kaplamasa da metalin metale temasını önlemektedir. Yağ maddesi olarak gres, polarize hayvansal yağlar vb. katkı yağlar kullanılmaktadır. Fosfor (P), kükürt (S), Klor (Cl), Kurşun (Pb) gibi katkılar, yağlama maddesini yarı sıvı sürtünmeye karşı dayanıklı yapmaktadır. Temas halinde birbirlerine göre hareket eden metal yüzeyler arasında, sürtünme değeri küçük olan mükemmel bir yağ filmi teşekkül etmektedir. Metalin metale teması söz konusu değildir. Yüzeyde yağ filmi hidrodinamik, hidrostatik veya gazodinamik, gazostatik oluşmaktadır(Kurbanoglu, 2009).

#### **1.1.2.2.3. Sıvı sürtünme**

Bu sürtünmede, iki katı eleman arasında hiçbir yüzey pürüzü karşı tarafa temas etmeyecek şekilde bir yağ filmi oluşturulmuştur. Yağ filmi elemanların hareketleri sayesinde oluştuysa hidrodinamik, dışarıdan bir pompa vasıtasıyla

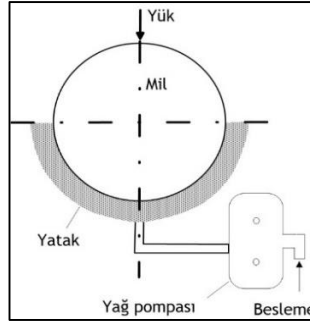
sağlanıyorsa hidrostatik yağlama söz konusudur(Şekil 1.3, Şekil 1.4). Bu durumlarda sürtünmeyi oluşturan faktör kullanılan yağın viskozitesidir(Babalık ve Çavdar, 2014).

**Hidrodinamik Yağlama:** Hidrodinamik yağlamanın oluşması için yüzeyler arasında izafi hareket bulunmalıdır. Yüzeyle etki eden kuvvet, yüzeyler arasında eksantriklik (mil merkezi ile yatak merkezi arasındaki kaçıklık) ile daralan bir yağ kaması ve sıkışan yağ kaması nedeniyle yağ filminde oluşan basınç türüdür. İki yüzey arasında yağlama maddesi sürekli beslenmelidir. Yağ filmindeki basınç, elemanların izafi hareketinden doğar (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Mil ve Radyal Kaymalı Yatakta Çevresel ve Eksenel Basınç Dağılımları (Gopinath ve Mayuram, 2009)

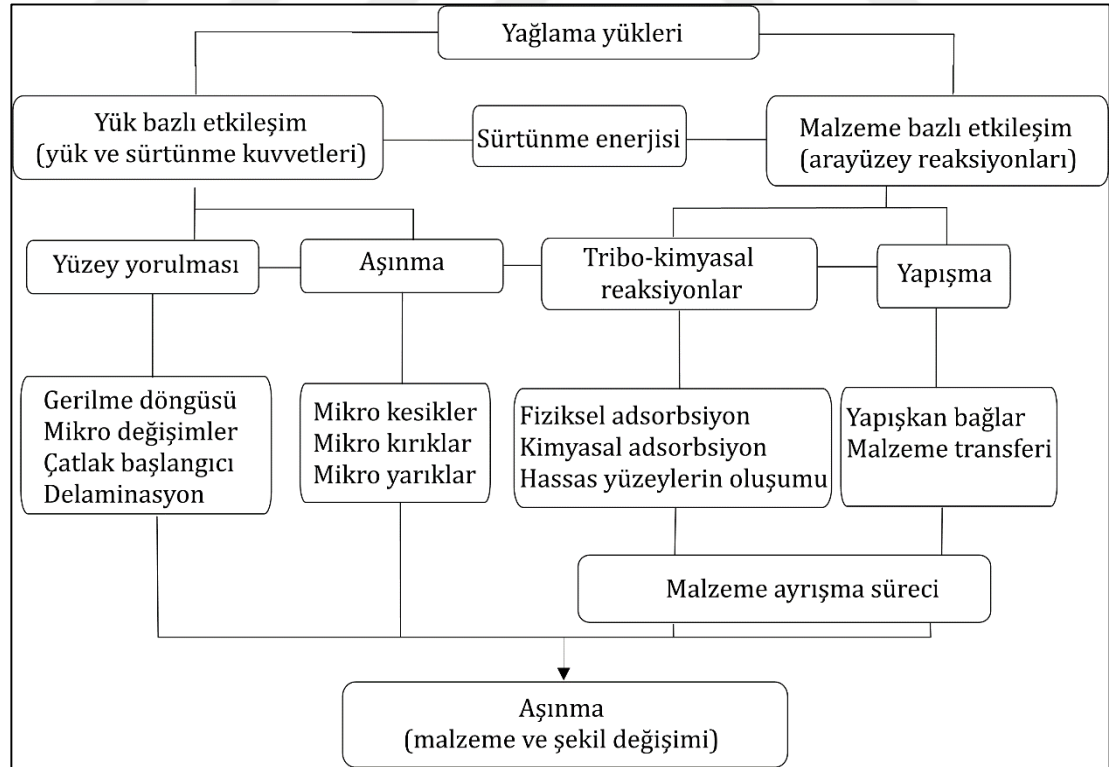
**Hidrostatik Yağlama:** Yüzeyler yeterli izafi hareket büyüklüklerine sahip değilse (örneğin hız çok düşük, yük çok büyük değere sahip ise, mil sık sık durup tekrar çalışılırsa, sık sık mil dönme yönü değiştiriyorsa vb.) hidrodinamik etki ile yağ filmi oluşturmak mümkün olamamaktadır. Bunun için de dışardan bir pompa vasıtasıyla yağ gerekli basınçta yüzeyler arasında gönderilerek yüzeyleri birbirinden ayırabilmektedir (Şekil 1.7). Hidrostatik yağlamada pompa, yağ basıncı yeterli yağ basıncına ulaştıkça film teşekkül eder. Pompa çalışmazsa yataklarda sınır ve/veya karışık ve/veya kuru sürtünme oluşur. Pompa çalışmadan devam edilirse yatak sarması olarak adlandırılan hasarın oluşması kaçınılmazdır (Kurbanoğlu, 2009).



Şekil 1.7. Hidrostatik yağlamanın şematik gösterimi (The McGraw-Hill Companies, 2003)

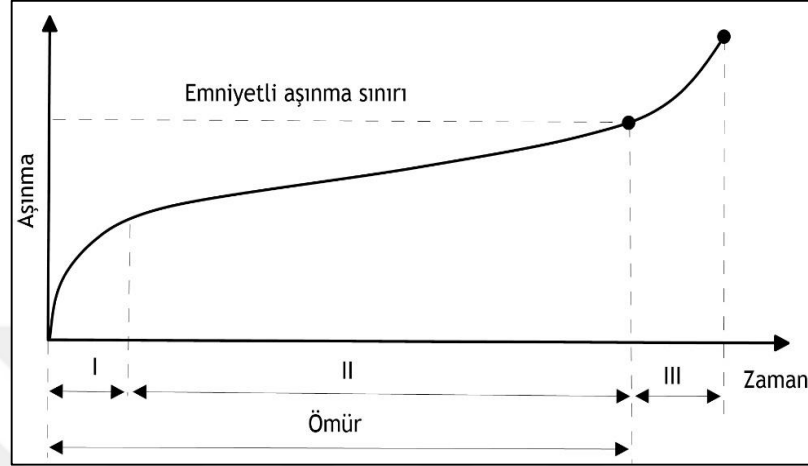
### 1.1.3. Aşınma ve aşınma mekanizmaları

Aşınma, sürtünen yüzelerde malzemenin, mekanik etkilerle istenmeyen bir şekilde kopması ve ana parçalardan ayrılması şeklinde tanımlanabilmektedir. Böylece yüzeyler ilk şekillerini bozarlar, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve istenilen fonksiyonu yerine getiremezler. Geri dönüşümü olmayan bir malzeme kaybıdır. Tribolojik yüklenmeye bağlı malzeme ve biçim değiştirme süreçlerinde ortaya çıkan yıpranma şekilleri Şekil 1.8’de verilmiştir (Mang vd., 2011).



Şekil 1.8. Aşınma mekanizmaları. Tribolojik yüklenmeye bağlı malzeme ve biçim değiştirme süreçleri ve ortaya çıkan yıpranma şekilleri (Mang vd., 2011)

Aşınma, zamanla gelişen ve aniden oluşan olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Zamanla oluşan aşınma Şekil 1.9'da gösterildiği gibi bir değişim gösterebilmektedir. Burada aşınma zamana göre değişmekte olup üç bölge söz konusudur.



Şekil 1.9. Zamanla oluşan aşınma (Koç, 2008)

**Birinci bölgede (I):** Parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli aşınma meydana gelmektedir. Rodaj denilen bu bölge parçaların birbirine alıştırmalarını karakterize etmektedir. Genellikle rodaj bölgesinde, çalışmalar yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılmaktadır. Bunun için genellikle daha düşük viskoziteli özel yağlar kullanılır.

**İkinci bölgede (II):** Makine elemanlarının esas çalışma sırasındaki aşınma durumu söz konusudur.

**Üçüncü bölgede (III):** Aşınma hızının fazla olduğu bölge olup şiddetli aşınma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Elemana ait çalışma şartlarına bağlı olarak emniyetli aşınma veya emniyet sınırı ( $A_{em}$ ) belirlenirse, bu diyagramdan elemanın çalışma zamanı veya ömrü tayin edilebilir. Aşınma temas yüzeylerinde dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişimin sonucunda ortaya çıktığına göre çok çeşitli aşınma şekilleri tarif edilebilmektedir (Koç, 2008).

### 1.1.3.1. Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörleri birçok farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Bu faktörler dört grup halinde tanımlanabilir;

**1. Ana malzemeye bağlı faktörler:** Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, Elastisite (Young) modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlüğü ve malzemenin boyutu ana malzemeye bağlı faktörlerdir.

**2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi:** Karşı malzemeye ait olan tüm malzeme iç yapı ve mekanik özellikler

**3. Ortamın etkisi:** Sıcaklık, nem ve atmosfer aşınmayı etkiler.

**4. Çalışma koşulları:** Basınç, hız, kayma mesafesi ve süresi aşınmada etkilidir (Ulutan, 2007).

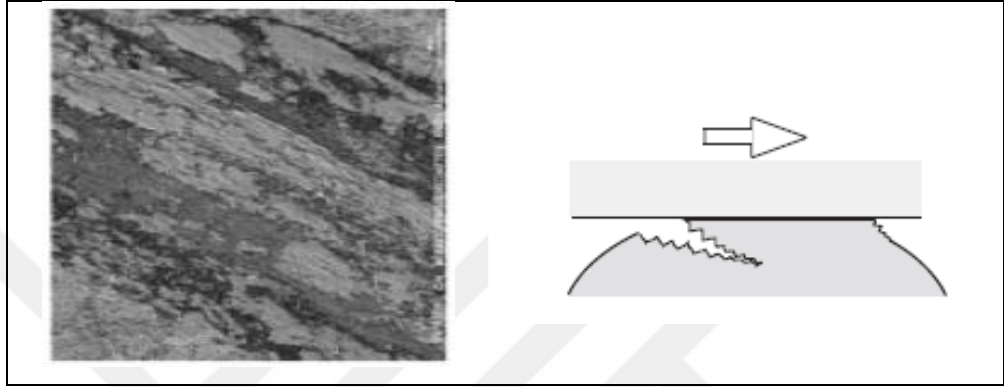
### 1.1.3.2. Aşınma Çeşitleri

Elemanların aşınması malzemenin cinsine, birbirleri ile temas şekline ve yüzeylerin pürüzlülük durumlarına göre değişmektedir. Genellikle elemanların yüzeyleri kimyasal bir absorpsiyon tabakası ile kaplıdır. Temas eden yüzeyler arasında bu tabaka devamlı vardır. Yük altında, bu tabakaların temas yüzeylerinde kaynamalar meydana gelir. Sürtünme ve aşınma sonucunda elemanların yüzeylerinde malzeme kayba uğrar. Malzeme yüzeylerinde ortaya çıkan aşınmalar aşağıdaki şekilde gruplandırılmaktadır (Kurbanoglu, 2009).

#### 1.1.3.2.1. Adhezif aşınma

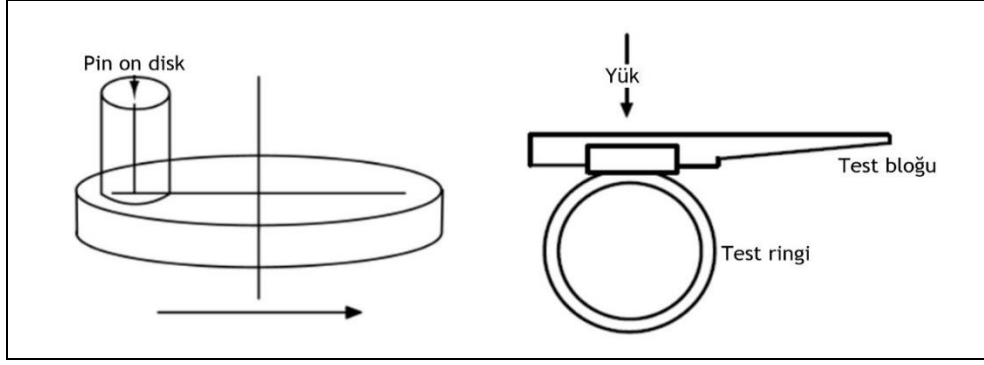
Adhezif aşınma teknik uygulamada en yaygın karşılaşılan aşınma türüdür. Genel anlamda aşınma kavramı, bu aşınma için kullanılmaktadır. Birbirine karışabilen ve birbirlerine yakın olan malzemelerin yüzeyleri arasında kuvvetli bir kaynaşma bağı olabilmektedir (Şekil 1.10). Yüzey pürüzleri, özellikle çok büyük şiddetteki dış kuvvet etkisiyle akma sınırının aşılmasıyla plastik deformasyona uğrar, yüzeyde absorbe edilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları bu zorlama altında parçalanmaktadır. Temas noktalarında özellikle bu büyük pürüz tepelerinde mikro kaynak bağları oluşmaktadır. Temas yüzeyleri birbirine göre

bağlı hareket ederlerse, bu bağlar kırılarak malzeme kaybı oluşmaktadır. Yüzeyle yapışan yağ tabakası adhezif aşınmayı önlemektedir. Adhezif aşınma benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında kolay bir şekilde meydana gelebilmektedir. Bu nedenle malzeme çiftlerinin birisi sert (çelik gibi) diğeri daha yumuşak (bronz, alüminyum gibi) bir malzeme seçilmektedir (Koç, 2008).



Şekil 1.10. Adhezif aşınma (Mang vd., 2011)

Yüzeyde absorbe halde olan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları bu basınç ile parçalanarak malzemelerin moleküllerinin direkt temas haline geçmelerine olanak sağlar. Böylelikle bölgesel kaynak bağları meydana gelir. Bu sırada malzemelerin birbirine göre hareketi de söz konusu ise yüzeydeki sıcaklık yükselir, hatta ergime noktasına kadar ulaşabilir ve böylece kaynama bölgesinden veya metal yüzeyinden bir miktar parçacık kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest halde dolaşabilir veya metallere birisine bağlanabilirler. Burada aşınma, herhangi farklı bir malzeme olmaksızın sadece karşılıklı çalışan iki eleman arasındadır. Bu aşınma tipi test işlemi Şekil 1.11’de gösterilmiştir.

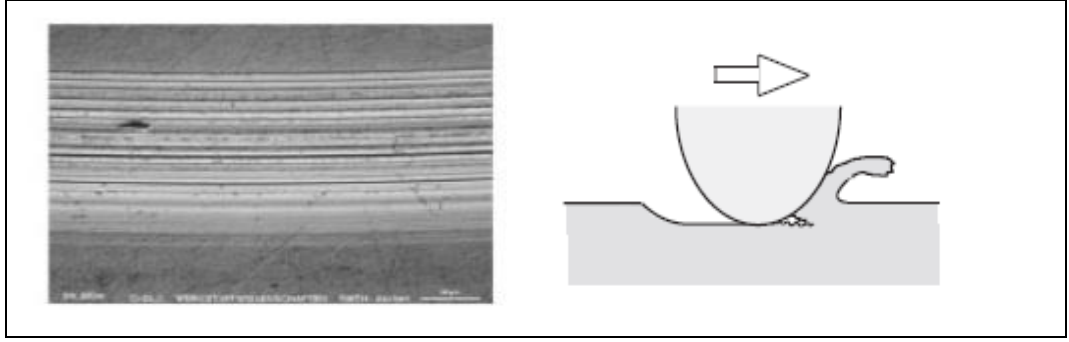


Şekil 1.11. Adhezif aşınma testleri (Chattopadhyay, 2001)

### 1.1.3.2.2. Abrazif aşınma

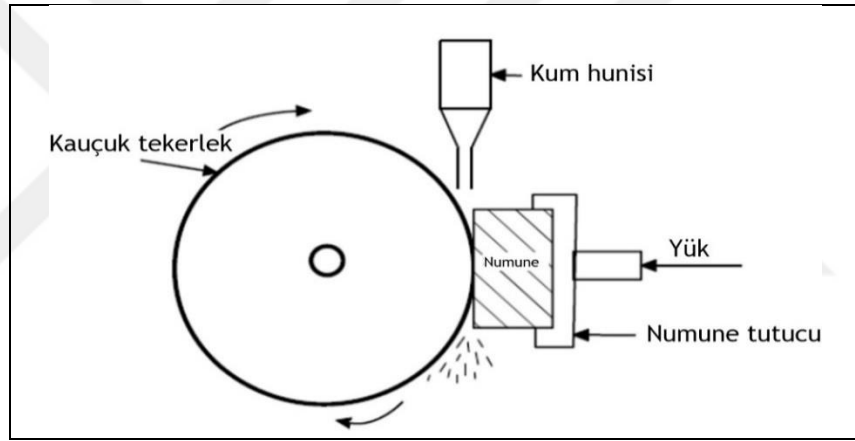
Abrazif aşınma sert malzemenin daha yumuşak malzeme üzerinden parça koparması şeklinde tanımlanabilir. Abrazif aşınma iki cisimli ve üç cisimli olmak üzere iki şekilde meydana gelebilmektedir. İki cisimli abrazif aşınma olayı sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak bir malzeme ile temas ettiği halde meydana gelmektedir. Kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde sert pürüz tepesinin yüzeye batması ile oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması (koparılması) suretiyle meydana gelen deformasyon türüdür. İki cisimli abrazif aşınmaya örnek olarak kazı makineleri, toprak işleme aletleri, eğeleme ve zımpara işlemi verilebilmektedir. Üç cisimli abrazif aşınma ise iki çalışma yüzeyleri arasında daha sert aşınma, oksidasyon ürünleri veya dışarıdan kum, metal talaş parçacıkları vb. gibi yabancı partiküllerin bulunması ile yüzeyden hareket sırasında malzeme koparılması şeklinde oluşmaktadır. Sert ve pürüzlü bir yüzey daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında abrazif aşınma ortaya çıkmaktadır. Abrazif aşınma Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Ayrıca abrazif aşınma biraz farklı bir durumda da sert abrazif partiküller, kayma yüzeyleri arasına girdiğinde ve malzemeyi aşındırdığında da meydana gelebilmektedir (Kuş, 2007).



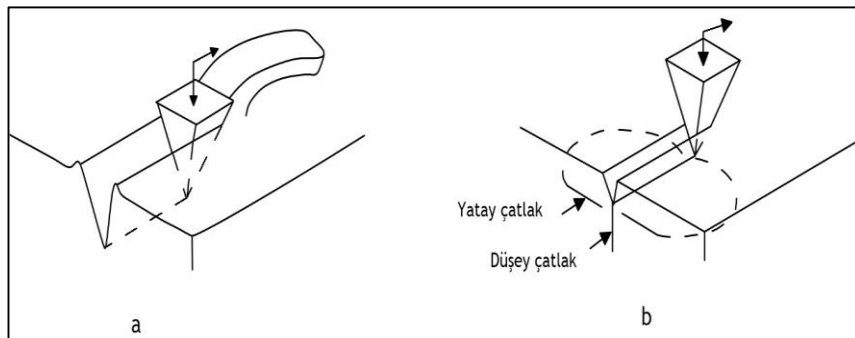


Şekil 1.12. Abrazif aşınma (Bhushan 2001)

Dış kaynaklı parçacık nedeniyle oluşan abrazif aşınma oranları genelde, iç kaynaklı parçacık nedeniyle oluşan abrazif aşınma oranlarından daha düşüktür. Abrazif aşınmaya ait örnek bir test düzeneği Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Kauçuk tekerlekle abrazif aşınma testi (Chattopadhyay, 2001)



Şekil 1.14. Abrazif aşınmaya ait bir test düzeneği (Bhushan, 2001)

Khrushchov ve Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde aşağıda verilen iki prosesin meydana geldiğini yaptığı incelemelerde fark etmişlerdir (Çetin, 2005).

- Çiziklerin oluşmasının sebebi basıncın yardımıyla plastik şekil değiştirmelerdir (metal kalkmadan yüzeyin plastik şekil değiştirmesi),
- Metal parçacıkların mikro talaş şeklinde ayrılması (yüzeyden mikro talaşların ayrılması) şeklindedir(Terkeşli,2017).

Talaşlı imalatta parça üretiminde son yüzey işlemi (finiş) olarak adlandırılan parlatma (polisaj) işlemi sırasında iki yüzey arasındaki etkileşim parlatma aşınması veya parlatma prosesi olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem yüzeylerin ışığı yansıtacak görünüme kavuşarak ayna gibi parlamasına imkan tanımaktadır. Abrasif etki parlatma aşınmanın en yaygın sebeplerinden biridir (Blau,1992).

Bu parlak yüzeyler, genellikle, 0.025  $\mu\text{m}$ 'den daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. İyi parlatılmış bir yüzey, 0.025  $\mu\text{m}$  Ra'dan daha düşük bir pürüzlülüğe sahip olduğundan, parlatılmış yüzeyi oluşturan sert aşındırıcınının 1  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük taneli olması gerekir. Bu nedenle parlatma aşınması genellikle çapı 1  $\mu\text{m}$ 'den az olan sert parçacık maddeler tarafından üretilir. Malzemenin aşamalı olarak uzaklaştırılması ve yüzey ile zorla temas altında ince sert maddelerin kaydırılmasıyla katı bir yüzey üzerinde yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, parlatma aşınması olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınma şekli, korozyon gibi birleşik bir kimyasal reaksiyonla desteklenebilir(Kenneth,2014).

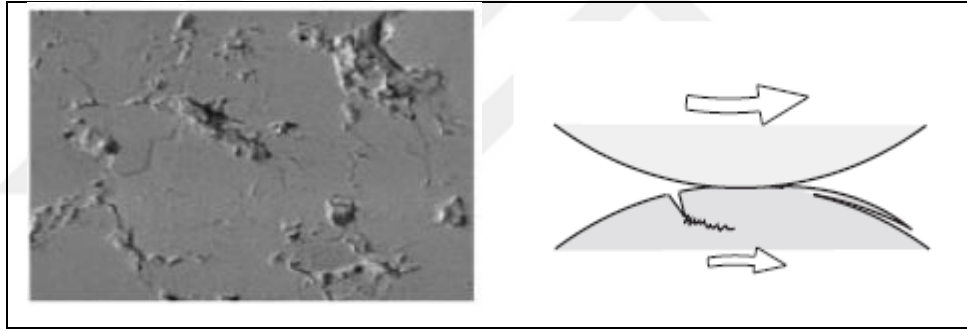
Ayrıca malzemeyi kopararak temas yüzeylerinden en az birinde parlatılmış (cilalanmış) bir yüzey oluşturan iki katı arasındaki etkileşimi parlatma aşınma olarak da tanımlamaktadır(Ekberg, 1997). Parlatma aşınması mekanik ve kimyasal olarak iki farklı etkileşimle gerçekleştirilebilmektedir. Yağlayıcı, yağlardaki katkı maddeleri, özel polisaj sıvıları kimyasal parlatmaya sebep olmaktadır.

Parlatma aşınması, malzeme yüzeyinin görülebilir seviyede çizilmeye, kırılmaya ya da plastik deformasyona uğramadan, diğer katı malzemelerle sürünmesi/sürtünmesi sonucunda malzeme yüzeyinde istem dışı sürekli olan

malzeme kaybıdır. Malzemede çizme ve chip (talaş, artık partikül) söz konusu olmayıp, abrazif parçacığın boyutu 3 µm'den küçüktür(Kaymaz,2018)

#### 1.1.3.2.3.Yorulma aşınması

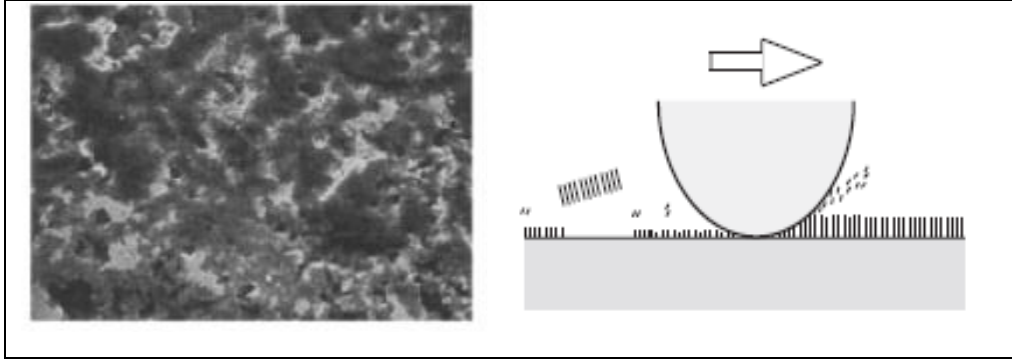
Makine parçalarında, tekrarlanan yüklere maruz kalmaları veya titreşimden dolayı, zamanla yorulma meydana gelmektedir. Özellikle yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 1.15). Bu mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek malzemenin yüzeyinden mikro parçaların kopmasına sebep olabilmektedir. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir. Yorulma aşınması yuvarlanma hareketi yapan rulmanlı yataklarda, dişli çarklar ve kam mekanizması gibi yüzeylerde oluşabilmektedir(Kuş, 2007).



Şekil 1.15. Yorulma Aşınması (Bhushan, 2001)

#### 1.1.3.2.4. Korozyif aşınma

Kimyasal veya elektrokimyasal etkisiyle metalik malzemelerin yüzeyinden kopan korozyon ürünlerinin mekanik etkenlerle taşınması bir aşınma olayıdır ve bu tip aşınmaya korozyif aşınma denir (Şekil 1.16). Korozyif aşınma, kayma yüzeyleriyle kimyasallarının karşılıklı olarak birbirlerini etkileyebildikleri bir ortamla çevrelenmiş olmaları durumunda meydana gelmektedir(Hurricks ve Peter.L. 1970).



Şekil 1.16. Korozyif aşınma (Bhushan, 2001)

### 1.1.3.3. Archard's eşitliği

1953 yılında J.F. Archard tarafından tanıtılan Archard aşınma yasası ya da Holm/Archard yasası, kayma aşınma hacmi ( $V$ ), normal yük ( $W$ ), toplam kayma mesafesi ( $L$ ) ve temas durumundaki iki yüzeyden daha yumuşak malzemenin sertliği ( $H$ ) arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

Aşınma hacmi;

$$V = K \frac{W L}{3 H} \quad (1.2.)$$

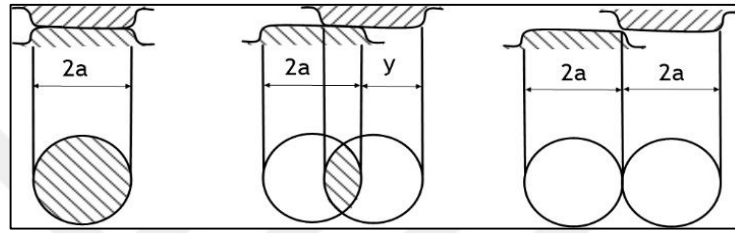
formülü ile tanımlanır ve burada  $W$ , yük (N),  $L$ , kayma mesafesi (m),  $H$ , sertlik ( $N/mm^2$ ),  $K$ , orantılılık sabiti, genellikle "Archard aşınma sabiti", "Archard aşınma katsayısı", "aşınma katsayısı" veya "aşınma sabiti" olarak adlandırılır. Archard, aşınma denklemindeki aşınma katsayısı  $K$  değerini üç aşınma rejimi cinsinden değerlendirilmektedir.

- $K$  değerleri  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  aralığında ise şiddetli aşınma,
- $K$  değerleri  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  aralığında ise orta aşınma,
- $K$  değerleri  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  aralığında ise parlatma aşınması şeklinde ifade edilebilmektedir(Challen vd., 1986). Ayrıca deneysel kanıtlara göre bu bir aşınma-yük ilişkisi veren mekanizmadır (Archard, 1953).

Gerçek temasın, eşit büyüklükteki  $n$  temas noktalarından oluştuğu ve eski olanın kaybolmasından sonra yeni bir temas noktasının oluşturulduğu varsayılırsa,

toplam temas sayısı  $n$ , kayma sırasında sabit kalır.  $a$  Yarıçapının dairesel bir temas alanı varsayılarak,  $2a$ 'nın mesafesinin kaydırılmasından sonra oluşabilecek muhtemel aşınma parçacıkları hacmi  $2\pi a^3/3$ 'te tarif edilen yarım küre hacmi olarak kabul edilir(Şekil 1.17) . Bu varsayımlara dayanarak,  $L$  mesafesini kaydandıktan sonra  $n$  kontak noktaları için olası aşınma hacmi  $V$ ;

$$V = \frac{n 2 \pi a^3 L}{3.2 a} \quad (1.3)$$



Şekil 1.17. Archard aşınma teorisi (Archard, 1953)

Plastik deformasyona sahip normal temas basıncı hemen hemen aşınma malzemesinin sertlik değerine eşit olduğu için,  $n\pi a^2$  temas noktaları için toplam gerçek temas alanı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n\pi a^2 = \frac{W}{H} \quad (1.4)$$

Denklem 1.3'den, Denklem 1.2.'e geçirilmesiyle, kayma mesafesi  $L$ , normal yük  $W$  altında olası aşınma hacmi  $V$  verilir:

$$V = \frac{W L}{3 H} \quad (1.5)$$

Denklem 1.5 adhezif aşınma hacminin normal yük ve kayma mesafesi ile orantılı olduğunu ve aşınma malzemesinin sertliği ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Denklem 1.3'nin ilişkisi dikkate alındığında, kayma sırasında toplam gerçek temas alanı ile orantılıdır. Bununla birlikte, uygulamada (Kayaba ve Kato, 1981), çeşitli çalışma koşullarında adhezif aşınmanın meydana gelebileceği ve aşınma parçacıklarının boyutunun sadece temas boyutuna karşılık gelmediği, ayrıca aşınma parçacığının her zaman yumuşak malzemeden oluşmadığı, her iki malzemeden de meydana gelebileceği de belirtilmiştir.

#### **1.1.4. Yağlama ve yağlayıcı maddeler**

Triboloji’de üçüncü aşama yağlama olup, eş çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek için yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddeler ayrıca sıcaklık yükselişini de önleyebilmektedirler. Yağlayıcılar temas yüzeylerine iyice yapışır, yüzeylerin pürüzlerini birbirinden ayırır, yüzeyleri korozyona karşı korur, sistemde oluşan ısıyı dışarı atar. Çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı ara maddenin değişik fonksiyonları yerine getirdiği görülmektedir. Sıvı sürtünmeli yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada yağın iç sürtünmesi veya viskozitesi çok önemli olmaktadır. Bundan dolayı tam sıvı sürtünmesinde genellikle sıvı (yağlama yağı), bazı hallerde de gaz yağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Sınır ve yarı sıvı sürtünmesinde yağlayıcı maddenin yüzeylere yapışma kabiliyeti ve kimyasal yapısı önemlidir. Bu sürtünme halinde katı ve katı sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır(Koç, 2008).

##### **1.1.4.1.Bitkisel yağlar ve mineral yağlayıcılar**

Bitkisel yağlar sıvı veya yarı katı trigliserid yağ asitleri ve gliseroldür. Yağ asitleri 8 ile 24 karbon atomlu (C) zincirlerine sahiptir. Rafine edilmemiş yağ digliserid, monogliserid, serbest yağ asidi, fosfolipid, serbest sterol, sterol ester ve yağda çözünen vitaminleri de ihtiva edebilir. Bitkisel yağların mineral yağlara kıyasla birçok avantajları vardır. Bunlar; yenilenebilir olmaları, toksik özellik taşımamaları, biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, yüksek parlama noktasına sahip olmaları, düşük buharlaşma kayıplarına ve iyi yağlama özelliklerine sahip olmaları en önemlileridir. Özellikle biyolojik bozunabilirliğin birincil gereklilik olduğu yerlerde öncelikli olarak tercih edilirler. Bununla birlikte, termal oksidatif stabilitesi zayıf olduğu için diğer uygulamalarda kullanımları sınırlıdır ve ömrü azalmaktadır.

Yağlayıcı madde, sürtünmeyi azaltarak hareketi kolaylaştırmak için kullanılan ve temas halindeki yüzeyler arasındaki aşınmayı azaltan bir malzeme olarak tanımlanır. Sürtünmeyi azaltmak için doğal ürünlerin kullanımı eski zamanlara

dayanmaktadır. En eski kanıtlar, Tehuti-Hetep'in Mısır mezarının (M.Ö. 1650) iç duvarlarındaki süslemelerde görülmektedir. Leonardo da Vinci'nin tasarımları, zamanında pek çok uygulamada don yağı kullanımını da göstermektedir. Bu kanıtlardan, en erken kayganlaştırıcıların biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel yağlardan ya da hayvansal yağlardan oluştuğu görülmektedir. Endüstri Devrimi'nin başlamasıyla birlikte, yüksek performanslı yağlayıcılara olan talep artmıştır. Petrolün keşfi, madeni yağ formunda yağlayıcılar için yeni bir hammadde sağlamıştır. Mineral yağlar, parafinik, naftenik ve aromatik türler gibi çeşitli bileşikler içeren karmaşık hidrokarbon karışımlarıdır. Mineral yağlar daha ucuzdur, daha geniş viskozitelere sahiptirler ve doğal yağlardan daha kolay bulunurlar. Ayrıca, rafineri teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, mineral baz yağının bileşiminde daha iyi kontrol mümkün olmuştur.

Bir yağlayıcı maddenin büyük kısmını oluşturan baz yağ, esasen hareket eden yüzeyleri ayıran ve ısıyı bu bölgeden uzaklaştıran sıvı tabakayı meydana getirmektedir. Baz yağa karıştırılan, katkı maddeleri adı verilen diğer kimyasal bileşikler ise yağlayıcı maddenin farklı fonksiyonel gereksinimlerini karşılamaktadır. En yaygın kullanılan katkı maddeleri arasında; antioksidanlar, aşınmaya karşı koruyucu maddeler, korozyon önleyiciler, dispersanlar, donma noktası düşürücülü maddeler, deterjanlar, demulsifiye edici / emülsifiye edici maddeler, yüksek basınç katkı maddeleri (EP), sürtünme düzenleyici maddeler(FM), aşınma önleyici (AW) katkı maddeleri, metal deaktivatörler bulunmaktadır. Mineral yağları kullanmanın temel kısıtlamalardan biri, farklı kaynaklardan elde edilen yağların farklı özelliklere sahip olmasıdır. Düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin buharlaşması, karışımın kullanım sırasında kalınlaşmasına neden olabilmektedir. Düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin varlığı da parlama noktalarını azaltmaktadır. Bir madeni yağ esaslı yağlayıcı maddede karşılaşılan diğer sorunlar şunlardır (Gobinda vd., 2016);

- Biyolojik olarak parçalanmaz ve atılması halinde çevreye zarar verir,
- Karbon, azot ve diğer gazların oksitleri üretim sırasında çevre kirliliğine neden olmaktadır,

- Temas edildiğinde cilt tahrişine, sivilce, egzama ve tahrişe neden olmaktadır.

- Az miktarda mineral yağ ve katkı maddeleri bile sudaki yaşama toksik etki yapabilmektedir.

#### **1.1.4.2. Çevre dostu yağlayıcılar**

Günümüz dünyasının karşılaştığı en büyük zorluklardan biri, ister bilinçli olsun ister olmasın, çevreye zarar vermektir. Petrol bazlı yağlayıcılar da bu kategoriye giren ürünlerden bir tanesidir. Bu ürünler, toprak, su ve hava kirliliğine neden olabilmektedir. Buna ek olarak, yağlayıcıların sızıntısı gibi teknolojik eksiklikleri de bir kirlilik kaynağı haline gelebilmektedir. Bu sorunlar;

- Makine sistemlerinin ve fonksiyonel bütünlüğünün iyileştirilmesi,
- Yağlayıcı tüketiminin azaltılması ve yağlayıcı ömrünün uzatılması,
- Atık yağlayıcıların geri toplanması ve geri dönüştürülmesi,
- Petrol esaslı yağlayıcıların yerine çevre dostu yağların kullanılmasının özendirilmesi ile çözülmesi mümkündür.

Çevre dostu ürünlerin geliştirilmesine olan ilginin artması son otuz yılda yağlayıcıların kullanımına ve uygun şekilde geri dönüşümüne yönelik farkındalığın artmasına yol açmıştır. Buna ek olarak, çeşitli devlet kurumları yağlayıcıların kullanımı ve dönüşümü hakkında katı düzenlemeler uygulamaya başlamışlardır. Bu düzenlemeler yağlayıcı pazarının görünümünü değiştirerek yeni çevre dostu yağlayıcıların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Çevre dostu yağlayıcıların uygulandığı alanlara;

- Halat ve zincirli ağaç testere ve metal işleme yağları,
- Gıda makineleri için yağlayıcılar,
- Hidrolik sistem akışkanları ve iki zamanlı motor yağlayıcıları şeklinde örnek vermek mümkündür(Sharma ve Biresaw, 2016).



Çevre dostu yağlayıcı ürünlerin geliştirilmesine olan ilginin artması son otuz yılda yağlayıcıların kullanımına ve uygun şekilde geri dönüşümüne yönelik farkındalığın artmasına yol açmıştır. Ülkemizde de önem arz eden bu farkındalık “SIFIR ATIK YÖNETMELİĞİ” olarak 12 Temmuz 2019 Cuma tarihli Resmi Gazetede yayımlanmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, sıfır atık yönetim sisteminin kurulmasına, yaygınlaştırılmasına, geliştirilmesine, izlenmesine, finansmanına, kayıt altına alınarak belgelendirilmesine ilişkin ilke ve esasları belirleyip, atık yönetim felsefesi olarak tanımlanan “Sıfır Atık” projesinin hayata geçirilmesinde etkin rol üstlenmiştir.

Yönetmeliğin amacı, hammadde ve doğal kaynakların etkin yönetimi ile sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda atık yönetimi süreçlerinde çevre ve insan sağlığının ve tüm kaynakların korunmasını hedeflemektedir. Bu tez çalışması ülkemiz “SIFIR ATIK” projesinin yaygınlaşmasına katkı sağlar nitelikte olup, çalışma sonucunda elde edilen atık yağlara dayalı yağlayıcıların kullanımını, yaşam döngüsü boyunca, çevresel etkileri azaltılmış ürünleri teşvik etmek için önemli bir araştırma olduğunu ortaya koymaktadır. Az kayıplı bir üretim ve tüketim, israfı minimuma indirmeye ve kullanılmayan kısmı kaynağa çevirmeye yardımcı olacaktır (<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm>).

#### **1.1.4.3.Biyoyağlayıcılar**

Bir biyoyağlayıcı, belirli bir süre içerisinde mikrobiyal olarak ayrışabilen, biyolojik olarak parçalanabilen bir yağlayıcıdır. Genel olarak, biyolojik bozunabilirlik, bir yağlayıcı maddenin mikroorganizmalar tarafından bir yıl içinde parçalanmasıdır. Biyolojik bozunumun tamamlanması, yağlayıcı maddenin doğaya geri döndüğü; biyolojik bozunumun kısmen olması ise yağlayıcı maddenin bir veya daha fazla bileşeni parçalanmadığı anlamına gelmektedir. Çoğu bitkisel esaslı hidrolik akışkan biyolojik olarak kolayca parçalanabilir. Bitkisel yağlar kendiliğinden % 99, katkı maddeleri ile karıştırıldıktan sonra % 90-98 oranında biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Diğer yandan, mineral yağların biyolojik olarak parçalanabilirliği ise sadece % 20'dir. Toksikite ve biyolojik bozunabilirlik standartları her ülke için farklılık

göstermektedir. Biyoyağlayıcıların başlangıç teknolojisi, az kimyasal işlem görmüş ve performanslarını arttırmak için katkı maddeleri ile harmanlanmış ve bitkisel olarak piyasaya sürülmüş yağ teknolojisidir. Biyoyağlayıcı madde pazarının en önemli gelişimi 1990'ların başında Dupont Co.'nun yüksek oleik asit oranına sahip soya fasulyesi yağını piyasaya sürmesiyle başlamıştır. Genetik olarak değiştirilmiş soya fasulyesi yağı, geleneksel soya fasulyesi yağlarına göre oleik asit bakımından daha zengin yağ asitlerine sahiptir. Mutfaklarda kızartma işlemi için tasarlanan bu yağ, konvansiyonel yağdan yaklaşık 27 kat daha yüksek bir oksidatif stabilite göstermiştir. Bu özellik, çok sayıda yağlayıcı ve gresin geliştirilmesine yardımcı olmuştur. Kimyasal olarak modifiye edilmiş bitkisel yağlar, yağlayıcı baz yağ olarak oksidasyon kararlılığı veya akma noktası performansında iyileşme sağlanacak şekilde geliştirilmiştir(Sharma ve Biresaw, 2016).

#### **1.1.4.4. Biyoyağlayıcı uygulamaları ve kullanımları**

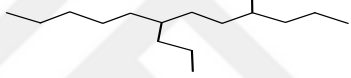
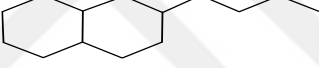
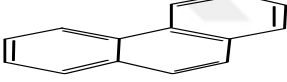
Yağlayıcıların ana fonksiyonları, sürtünmeyi kontrol etmek ve mekanik sistemlerin çalışması sırasında aşınma, korozyon, sıcaklık artışını kontrol etmek ve birikinti oluşumunu en aza indirmektedir. Dolayısıyla, yağlayıcı kalitesi, viskozite, akma noktası, kayganlık, termo-oksidasyon stabilitesi, hidrolitik stabilitesi ve ilave katkı maddesi gibi çeşitli fiziko-kimyasal özelliklere bağlıdır. Diğer yandan, aşınmaya karşı koruma, daha büyük yük kapasitesi, korozyon önleme, köpürme ve emülsiyonlaşma özelliği, mineral yağlara benzer ve katkı ilavesiyle de geliştirilebilirler.(Sharma ve Biresaw, 2016).

#### **1.1.4.5. Baz yağ**

“Baz yağ” terimi, teknolojik uygulamalarında kullanılan çeşitli yağları ifade etmektedir. Baz yağlar, yağlayıcı formülasyonlarında daha büyük oranda bulunan bileşendir ve çoğu petrolden türetilmektedir. Üretim geçmişine bağlı olarak mineral veya sentetik yağlayıcılar olarak sınıflandırılabilir. İnsanlar tarafından bilinen ilk yağlar, hayvansal ve bitkisel yağlardır. 19. yüzyılda, doğal trigliseritlerin yerini, mineral yağlayıcılar olarak adlandırılan, petrol bazlı

yağlayıcılar almıştır. Bazı yağlayıcı uygulamalarında, geleneksel mineral yağlayıcılarla karşılanamayan belirli performans standartları gereklidir. Bunun için genellikle daha fazla dayanıklı veya daha düşük çevresel etkili yağlayıcı üretimi için alternatif süreçler tasarlanmıştır.

Bitkisel yağlar mineraller yağlardan daha ucuzdur ve yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Mineral yağlayıcılar petrol damıtma ve rafinasyon yoluyla üretilmektedir. Bileşiminde baskın olan hidrokarbon tipine bağlı olarak parafinik, naftenik ve aromatik olarak sınıflandırılmaktadır. Molekül başına ortalama 20 ile 50 C atomuna sahiptirler ve bunlar Şekil 1.18'de gösterildiği gibi parafinik zincirler (lineer veya dallanmış alkanlar), naftenik zincirler (yan zincirlere sahip dikloalkanlar) veya aromatik zincirler (alkil benzenler) olabilir.

Yağ tipi	Hidrokarbon tipi
Parafinik	
Naftenik	
Aromatik	

Şekil 1.18. Mineral yağ bileşimleri

Esterler, kimyasal yapı bakımından trigliseritlere benzerler, baz yağlayıcıların mineral bazlı yağlayıcılara kıyasla avantajları;

- Düşük toksisite,
- Daha yüksek biyolojik bozunabilirlik,
- Yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmesi,
- Yüksek parlama noktası,
- Düşük uçuculuk,
- Yüksek katma değer,
- İyi yağlama (molekül polaritesinden dolayı),
- Yüksek viskozite indeksi (VI) şeklinde sıralanabilir.

Bu bileşiklerin başlıca dezavantajları ise;

- Oksidatif kararsızlık,

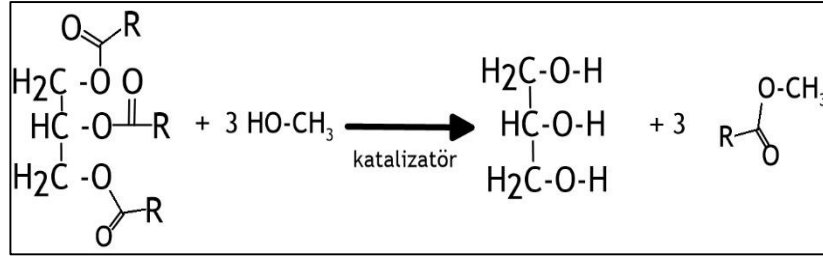
- Hidrolitik istikrarsızlık,
- Düşük sıcaklık özellikleri gibi özetlenebilir(Silva, 2011).

#### **1.1.4.6. Metil ester**

Yağlayıcıların viskozitelerini, dizel yakıtına yakın değerlere getirmek için kullanılan yaygın metot esterleştirme işlemidir. Genel anlamda alkollerle, organik veya inorganik asitlerin reaksiyona girmesi olayına esterleşme denir. Dolayısıyla esterleştirme, alkol ile bitkisel yağları tepkimeye sokarak gliserin ve yakıt elde etme işlemidir. Esterleştirmede en yaygın kullanılan alkoller metanol ve etanoldür. Metanol, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin (polar ve kısa alkol zinciri) avantajları ve düşük maliyet nedeni ile daha fazla tercih edilmektedir (Salman, 2011). Esterler genellikle geleneksel mineral yağlarda olmayan çoğu önemli özellikleri içermektedirler. Ester grubun varlığı ısıl denge, katkı maddesi çözünürlüğü, yağlayıcılık, bozunabilirlik ve düşük zehirlilik özelliklerinin geliştirilmesine imkan tanıyabilmektedir. Ester kutupları yağlayıcılık ve daha iyi katkı maddesi çözünürlüğü sağlamaktadır (Weller, 2000; Salman, 2011).

YAME, yağ asitlerinin esterleridir. Yağ asidi esterlerinin fiziksel özellikleri, saf bitkisel yağlardan fosil dizel yakıtlara daha yakın olmakla birlikte, özellikleri bitkisel yağın türüne bağlıdır. Farklı YAME'nin bir karışımı genellikle yenilenebilir alternatif bir yakıt olan biyodizel olarak adlandırılmaktadır. YAME, geleneksel dizel yakıtına benzer fiziksel özelliklere sahiptir. Ayrıca toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilir özelliklere sahiptir.

Transesterifikasyon tersine çevrilebilir bir reaksiyondur ve reaktanları karıştırarak gerçekleştirilir (Şekil 1.19). Güçlü bir baz veya güçlü bir asit katalizör olarak kullanılabilir. Endüstriyel ölçekte, daha çok sodyum veya potasyum metanolat kullanılmaktadır.



Şekil 1.19. Transesterifikasyon reaksiyonu

Biyodizel üretimi, teknik açıdan da oldukça basittir. Kolza, ayçiçeği, soya fasulyesi, palmye yağı, aspir, kanola ve hayvansal yağ biyodizel üretiminde kullanılan en yaygın ham maddelerdir. Transesterifikasyon işlemi metanolün kullanılması, gliserolün transesterifikasyon işlemi sırasında, aynı anda ayrılabilmesini sağlamaktadır. İşlem sırasında etanol kullanıldığında, etanolün sudan arındırılmış olması ve yağın, kolay bir gliserol ayırma elde etmek için düşük bir su içeriğine sahip olması gerekmektedir. Transesterifikasyon işlemi sonucunda, ham biyodizel ve ham gliserol meydana gelir. Son bir temizlik adımından sonra biyodizel üretilmektedir. Saflaştırılmış gliserol, gıda ve kozmetik endüstrilerinde ve aynı zamanda oleokimyasal endüstrisinde kullanılmaktadır. Gliserol, anaerobik sindirim için bir substrat olarak da kullanılabilir (European Biofuels Technology Platform, 2011).

Biyodizel üretiminde; verim artışı ve onun yanında maliyetlerin azaltılması en önemli kriterler olduğu düşünülürse, tarım sektöründe en pahalı girdilerden birisi, bu amaca yönelik mekanizasyon faaliyetleridir. Biyodizel maliyetinin % 84'ü hammadde olan yağa aittir. Yağı çıkarılacak ürünün fazlalığı biyodizelin enerji içeriğini daha da arttırmaktadır. Biyodizel üretimi amacıyla, bitkisel ürün tarladan hasat edildikten sonra saplar tarlada bırakıldığında bile biyodizel üretiminin enerji bilançosu pozitif olmaktadır. Biyodizelin sahip olduğu toplam enerji; gübreleme, ilaçlama, yağ eldesi, arıtma, kimyasal işlem ve biyodizelin taşınması dâhil harcanan enerjiden daha yüksektir. Amerika Enerji Dairesi'nin yayımladığı "Kentiçi ulaşım amaçlı kullanımda Biyodizel ve Petrodizel'in döngüleri" çalışmasında: Biyodizel, kendi üretim döngüsü içinde, tarımsal ürün yetiştiriciliğinden yakıt üretimi için gerekli 1 birim fosil yakıt tüketimi karşılığında 3,2 birim enerji çıktısı sağlar" bilgisi verilmektedir. Petrodizelin

üretim döngüsünde 1 birim fosil yakıt tüketimiyle sağlanan yakıt enerjisi 0.843 birim olmaktadır” şeklinde belirtilmektedir (İlhan, 2007).

#### **1.1.4.7. Yağlayıcıların biyolojik parçalanabilirliği ve ekotoksik özellikleri**

Sürtünmeyi azaltmak için bitkisel yağların kullanılması eski zamanlara kadar uzanmaktadır. Petrolün keşfi ve rafineri teknolojisi ile belirli performans gereksinimlerini karşılamak üzere geliştirilmiş çok yönlü ürünlerle sonuçlanmıştır. Farklı uygulamalar için kullanılan yağlayıcılar, kullanım sırasında ve kullanımdan sonra çevrede kaybolur veya yayılırlar ve büyük hasarlara neden olmaktadır. Çeşitli devlet kurumlarının uyguladığı sıkı düzenlemelere ek olarak, yağlayıcıların kullanımı konusundaki farkındalığın artması, yağlayıcı madde endüstrisinin işleyişini değiştirmiştir. Bununla birlikte, tamamen çevre dostu yağlayıcı geliştirmek, ekonomik olanaklar ile ekolojik gereksinimler arasında bir denge kurmayı gerektiren oldukça zorlu bir süreçtir. Geliştirilecek yağlayıcının çevre dostu olması için, ekolojik çevrede maruz kalan türler için ölümcül olmadığı gibi nötr de olması gerekir. Buna ek olarak, biyolojik olarak parçalanabilir olması ve diğer performans gereksinimlerini de yerine getirmesi gerekir (Sharma ve Biresaw, 2016).

#### **1.1.4.8. Katkı maddeleri**

Genel olarak; başlangıçta yağlayıcıda bulunmayan veya belli miktarda bulunan, yağlayıcılara istenen bazı özellikleri kazandırmak, mevcut özellikleri geliştirmek, yağlayıcının istenmeyen bazı özelliklerini de yok etmek veya en aza indirmek amacıyla yağlayıcılara üretim sırasında eklenen tüm ilave maddeler katkı maddesi olarak adlandırılmaktadır (Durak vd., 2001).

Yağlayıcı olarak kullanılan baz yağlayıcı, hareket eden yüzeyleri ayırmak ve hareket sırasında oluşan ısıyı iki yüzey arasından uzaklaştırmak için bir sıvı tabakasına ihtiyaç vardır. Baz yağlayıcılara karıştırılan bu katkı maddeleri diğer adı ile kimyasal bileşikler, yağlayıcı maddenin farklı gereksinimlerini

karşılıklıdır. En yaygın kullanılan katkı maddeleri Çizelge 1.1'de verilmiştir (Sharma ve Biresaw, 2016).

Çizelge 1.1. Katkı maddeler ve etki biçimleri (Sharma ve Biresaw, 2016)

Katkı maddeleri örnekleri	Etki biçimleri
Aşınma Önleyici	Katkı maddesi kimyasal olarak tepkimeye girerek metal yüzeylerde bir film oluşturmakta ve metal-metal temasının neden olduğu aşınmayı en aza indirmektedir.
Paslanma önleyici	Korozyon önleyici, demir esaslı metal parçalar yüzeyinde bir film oluşturur ve bu yüzeyleri yağlayıcıdaki kirleticiler tarafından saldırıya karşı korur.
Deterjan	Kimyasal reaksiyon, oksidasyon ürünlerinin yağlayıcıda çözünebilir kalmasına ve metal yüzeylerine yapışmamasına neden olmaktadır.
Dispersan (Dağıtıcı)	Oksidasyon ürünü parçacıkların, yağlayıcıda yüzmesini sağlayacak kadar küçük parçacıklar halinde olmasını sağlamaktadır.
Yüksek basınç(EP)	Metal-metal teması oluştuğunda, üretilen ısı katkı maddesinin metalle kimyasal reaksiyona girmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda da sürtünmeyi azaltan ve kaynak yapılmasını önleyen kayganlaştırıcı bir mekanizmanın oluşumuyla sonuçlanmaktadır.
Emülgatör	Emülgatör, ara yüzey gerilimini azaltarak yağlayıcı ve suyun karıştırılmasına izin vererek stabil bir emülsiyon oluşturmaktadır.
Köpük önleyicisi	Köpük önleyicisi, küçük kabarcıkların kombinasyonunu daha hızlı dağıtmaya ve daha fazla köpürmeyi önlemeye yardımcı olmaktadır.
Oksidasyon inhibitörü	Oksidasyon inhibitörü oksijen ile kolayca reaksiyona girer ve baz yağlayıcının oksidasyonunu geciktirmektedir.
Akma noktası düşürücü	Akma noktası düşürücü, kristalleşmeyi önlemekte ve düşük sıcaklıklarda yağlayıcı akışını kolaylaştırmaktadır.
Viskozite indeksi (VI) geliştirici	VI iyileştirici, sıcaklık artışı ile yağlayıcının viskozitesindeki azalma oranını düşürmektedir. Katkı maddesi, yağlayıcının sıcaklığı arttıkça çok hızlı bir şekilde incelmelerini önlemektedir.
Sürtünme Modife edici (FM)	Yüzeydeki pürüzleri kaplayarak sınır yağlama durumunda metal-metal temasını önleyerek daha düşük $\mu$ oluşmasını sağlamaktadırlar.

**Aşınma önleyici katkı maddeleri(Anti Wear AW):** Sıvı filmlili yağlamada, söz konusu yüzeyler, çok moleküllü bir yağlayıcı film ile korumaktadır. Yüzeyler temas etmezse, aşınma olmaz. Bununla birlikte, sıvı filmlili yağlama her zaman mümkün değildir. Yüzeye etki eden yükler yüksek olduğunda ya da yağlayıcı viskozitesi çok düşük olduğunda hareketli parçaların üzerindeki yüzey pürüzleri temas etmektedir. Yağlanmış yüzeyler arasındaki bu metalden metale temas, sınır yağlaması olarak adlandırılmaktadır. Bu koşullar altında sürtünme azaltma, AW, metal yüzeye yapışması ve kayganlaştırıcı katı bir filmin oluşturulmasıyla elde edilir.

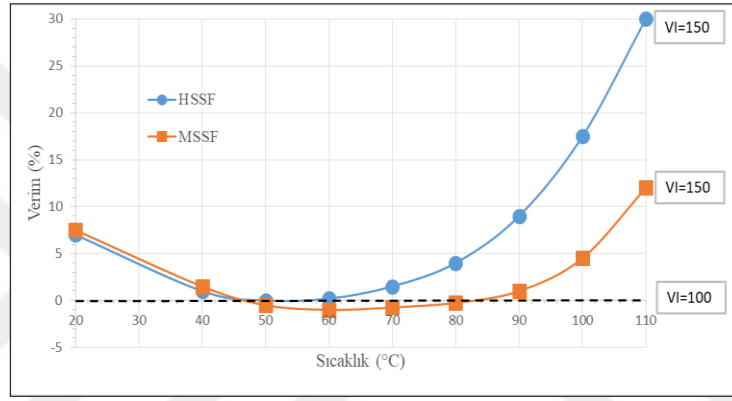
**Paslanma önleyici katkı maddeleri:** Pas oluşumu özellikle demir esaslı malzemelerde sıcaklık dalgalanmaları ve normal çalışma sıcaklıklarında nemin yoğunlaşması sonucunda ortaya çıkar ve hidrolik sistemlerde potansiyel bir problem oluşturmaktadır. Yağda çözülebilen belirli carboxylic asitler bu malzemelerin yüzeylerde kuvvetli adsorblanmış çoklu molekül tabakalarını düşük konsantrasyon oranlarında bile oluşturma kabiliyetine sahiptir. Bu molekül tabakaları güçlü elektrostatik kuvvetler tarafından yüzeye bağlanarak oksijen ve suyun penetrasyonuna karşı etkili bir engel oluştururlar. Yani elektrokimyasal reaksiyonlarla pas oluşumu için gerekli olan oksijen ve su engellenmiş olur. Makina elemanlarının paslanmasını önlemek amacıyla yağlayıcıya ilave edilen katkı maddeler polar organik bileşikler olup, metal yüzeyle kimyasal reaksiyona girmeden film oluşturarak, metal yüzeyin su ve hava ile temasını kesmektedirler. Böylece su buharı ve korozyon ortamındaki asitlerin, makina yüzeylerine zarar vermesi önlenmiş olmaktadır (Durak vd., 2001).

**Korozyon önleyici katkı maddeleri:** Bir yağlayıcının oksidasyonu sırasında çözünmez halde çamur veya kurum partikülleri oluşur ve bu partiküller parçalandıkça, yağlayıcının koyulaşmasına ve kalınlaşmasına yol açmaktadır. Örneğin korozyona neden olan demir dışı metallerle karşı aşırı derecede aşındırıcı olan organik asitler üretilir. Daha fazla oksidasyon, polimerik malzemenin birikmesine yol açmaktadır. Bu yüksek moleküler ağırlıklı oksijenli polimerler, pistonlarda ve diğer motor bileşenlerinde yağlayıcı kalınlaşmasının yanı sıra vernik ve zamların tortulaşmasına neden olmaktadır. İnhibitörler, bu çözünmeyen türlerin oluştuğu oksidatif sürecin zincir yayılma aşamalarını bozarak antioksidanlar olarak çalışmaktadırlar (Europe, 2016).

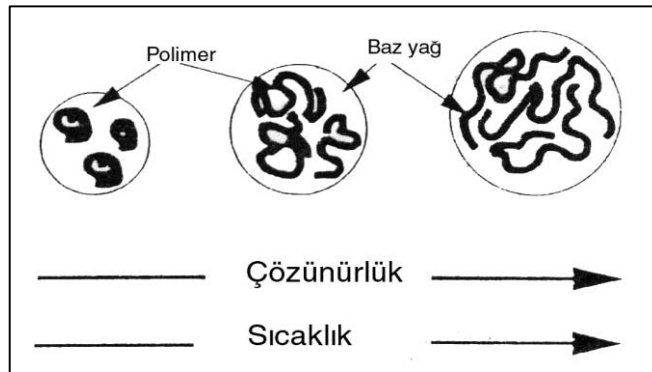
**Viskozite indeksi (VI) geliştiriciler:** Bu katkı maddeleri, uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir. VI geliştiricilerin fiziksel çalışma prensibi gerçekte tamamen bir çözünürlük olayıdır. Büyük polimer molekülleri düşük sıcaklıkta birbiri ile sıkı bir şekilde sarılmış haldedir. Sıcaklık arttıkça yavaş yavaş moleküller sargı halden çözülerek açılır ve daha büyük bir hidrodinamik hacim oluşturduğu kabul edilmektedir. Bu durumda baz yağlayıcıda polimer zincir ağı oluşmaktadır. Bu katıkların fonksiyonları; herhangi bir yağın düşük



sıcaklıklardaki viskozitelerini çok daha yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmektedir. Aynı zamanda, daha düşük sıcaklıklarda, iki sıvının düşük kinematik viskozitesi (MSSF = orta kaymaya dayanıklı sıvı ve HSSF = yüksek kaymaya dayanıklı sıvı), mekanik verimdeki artış nedeniyle toplam verimde de bir artışa neden olmaktadır. Çünkü MSSF ve HSSF, çalkalanma enerjisi etkilerinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil 1.20). Çok dereceli ISOVG 46 sıvısının iki farklı kaymaya dayanıklı katkı maddesiyle karşılaştırılmasının 250 bar'da sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ISO VG 46 monograd referans sıvıya göre ölçülen toplam pompa verim kazancının nasıl değiştiği görülebilmektedir (Mang vd., 2011).



Şekil 1.20. Kanatlı bir pompanın veriminin VI ile değişimi (Mang vd., 2011)



Şekil 1.21. Polimerik VI çözünürlük ve sıcaklığın etkisi (Durak, 2001)

Bu katkı maddeleri düşük sıcaklıklarda yağlayıcının viskozitesinde minimum, yüksek sıcaklıklarda maksimum bir artış sağlamaktadır (Şekil 1.21). Böylece hareketli parçalar üzerinde sıcaklıktan fazla etkilenmeyen kararlı bir yağ filmi oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki yağ molekülleri düz şekil almaya ve bu uzun moleküller arasında birbirleriyle etkileşmeye eğilimlidirler. Böylece yağlayıcı

daha çok koyulaştırıcı etki göstermektedir. Yağlayıcı ısındığında VI iyileştiricileri kabaran küçük bilyeler gibi hareket etmektedir. VI, polimerize edilmiş olefinler veya izoolefinler, butil polimerler, selüloz esterleri, hidrojenli kauçuk gibi bileşiklerden meydana gelmektedir. VI motor yağlarında, otomatik transmisyon akışkanlarında, çok amaçlı çekici akışkanlarda, hidrolik akışkanlarda, bazen de dişli çarkların yağlanması yaygın olarak kullanılmaktadır (Durak vd., 2001).

**Elastomerlerin (sızdırmazlık elemanlarının) şişirilmesi:** Hidrolik sistemlerin tasarımı ve geliştirilmesi özenle düşünülmelidir. Aşırı genişleme ve yumuşama sızdırmazlık elemanının şekil değişiminden dolayı aşınmaya ya da yağ kaçaıklarına neden olabilmektedir. Pek çok sistemde elastomer malzemenin aşırı sertleşme gerçekleştirmeden normal derecede genişlemesine izin verecek şekilde tasarlanmaktadır. Sızdırmazlık elemanlarının şişme (genişleme) karakteristikleri çoğunlukla baz yağlayıcıya bağlı olmaktadır. Çok az da olsa özel akışkanların kendi doğal yapısından yararlanılarak aşırı şişme özellikleri geliştirilebilmektedir. Bununla beraber, eğer baz akışkan sızdırmazlık elemanının malzemesini büzerse, ester, aromatik veya keton gibi uygun katı maddelerinin ilavesiyle bu durum düzeltilebilmektedir. Bu katı maddeleri özellikle nitril kauçuk (NBR) gibi sızdırmazlık elemanı ile poyalphaolefinler gibi sentetik esaslı yağlayıcılar için gereklidir(Durak vd., 2001).

**Yüksek basınç (Extremum Pressure, EP) katkı maddesi:** Bu grup tribolojik katkı maddeleri, ağır çalışma şartları altında çalışan metal yüzeyler arasında kaynamayı ve tutunmayı önlemektedirler. Genellikle bunlar metalik temas sayısının arttığı ve tutunmanın olduğu zaman meydana gelen hasarları kontrol etmektedir. Genellikle EP katkı maddeleri kimyasal reaksiyonla efektif olduğu bir gerçektir. Bu nedenle bunların kullanımları korozyon problemlerini içermektedir. Bu katkı maddeleri yük taşıma kapasitesini arttırmakta, sürtünmeyi azaltmakta, aşınmayı kontrol etmekte ve şiddetli yüzey bozulmalarını önlemektedir. EP katkı maddelerinde en çok sülfür, fosfor, klor, organik fosfat bileşikleri kullanılmaktadır. Metalik yüzeyler üzerinde kopma mukavemeti büyük ve kayma gerilmeleri küçük olan bir tabaka meydana getirilmesi amaçlanmaktadır. EP katkı maddeleri metal yüzeylerle çevre

sıcaklığında reaksiyona girmezler ve dolayısıyla reaksiyon sıcaklığından önce tesirli değildirler. Bu katkı maddeleri metal yüzeylerle yüksek basınçtan dolayı 500°C sıcaklıklarda kimyasal reaksiyona girerek kayma mukavemeti düşük, kurşun sülfür, demir klorür gibi tabakalar teşkil etmektedirler. Bu tabakanın mukavemetini artırmak için kullanılan en eski katkı maddeleri oleik asit, don yağı, domuz yağı, ispermeçet yağıdır. Son zamanlarda daha çok fosfor ve fosforik asitlerin esterleri ve polar gruplu oksitlenmiş organik bileşikleri kullanılmaktadır (Durak vd. 2001). Bu tip katkı maddeleri, stabil ve dayanıklı bir film tabakası oluşturabilecek uzunlukta karbon bağlarına sahip değildirler. Buna karşın doğal yağlar; doymamış yağ asitleri, oleik, stearik ve palmik asitlerine ait 18 veya 16 karbon atomundan oluşan bağlara sahiptir (Gresham, 2013).

**Sürtünme Modife Edici Katkı Maddeleri (FM):**Sürtünme modife edici katkı maddeleri (FM), yapış-kay (stick-slip)'sız, pürüzsüz bir çalışma elde etme gibi çalışma şartlarında kullanılması gerekli olan bir katık türüdür. Aşırı yüklenmiş eş yüzeyler arasındaki düşük hızlı kayma hareketi, malzemelerin kombinasyon zorluğu, nümerik kontrollü takım tezgahlarındaki gibi hassas doğruluk vb. durumlar bu çalışma şartlarını oluşturmaktadır. Sürtünme modife edici katıklar genellikle yağ filminin mukavemetini arttırmaktadır. Böylece de ayrı metal yüzeylerini koruyup, yağ filminin bozulmasını önlemektedir. Sürtünmeyi azaltan FM katkı maddeleri; oksijen, nitrojen, molibden, sülfür, bakır ve diğer birçok bileşik içermektedirler. Bu katkı maddeleri, genellikle fiziksel adsorpsiyonla yağ filmi mukavemetini arttırıp, sürtünmeyi azaltmaktadır. FM katkı maddeleri ilk önce bütün olarak metal yüzeye adsorblayarak eş çalışan iki yüzeyi birbirinden ayırmaktadır. Genellikle yağ filmi ile yüzey pürüzlerinin penetrasyonu çok şiddetli olmadıkları yüklem hallerinde etkili olmaktadır. Sınır yağlama şartları altında, katkı maddesinin konsantrasyonunun artmasıyla sürtünme katsayısı azalmakta ve yüksek konsantrasyon oranlarında ise minimum bir sürtünme katsayısına yaklaşılmaktadır. Sürtünme modife edici katıklar ayrıca hidrolik silindirlere kullanılan polyuretane sızdırmazlık elemanları ile ilgili aşınma problemlerini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Sürtünme modife edici katık kullanılmadığı zaman, hız, yük ve malzeme gibi şartların kombinasyonunda düzensiz bir çalışma ile sistem için ciddi bir risk oluşabilir. Nümerik kontrollü

takım tezgahları, tarım makinaları, taşıtlar için yağlı fren sistemleri ve otomatik transmisyonlarda sürtünme modife edicilerin kullanılması özellikle tercih edilmelidir(Durak vd., 2001).

#### **1.1.4.9. Standart yağlayıcı test yöntemleri**

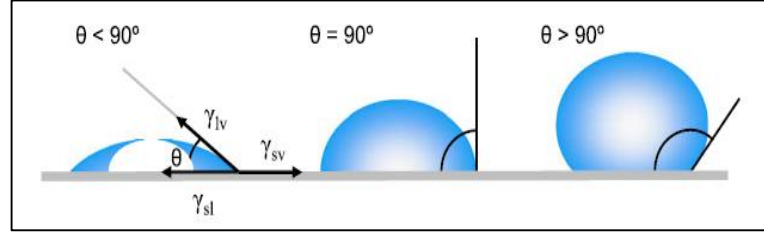
Yağlayıcı formülasyonlarını test etmek ve istenen özellikleri, amaçlanan uygulama için kullanılmadan önce temin etmelerini sağlamak önemlidir. Çoğu yağlayıcı test yöntemi aşağıdaki organizasyonlar tarafından geliştirilmiştir (Sharma ve Biresaw, 2016).

- ASTM Uluslararası-http: //www.astm.org
- Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü-http: //www.ansi.org
- API-http: //www.api.org
- İngiliz Standartları-http: //www.bsigroup.com/
- Hint Standartları Bürosu-http: //www.bis.org.in
- Koordinatörlük Araştırma Konseyi A.Ş.-http: //www.crcao.com
- Deutsches Institut für Normung e.V.-http: //www.normung.din.de
- Japon Endüstriyel Standartlar Komitesi-http: //www.jisc.go.jp/
- Rus Endüstri Standartları-http: //www.snip.com/
- Petrol Enstitüsü-http: //www.energyinst.org.uk
- ISO-http: //www.iso.org
- Ulusal Yağlama Gres Enstitüsü-http: //www.nlgi.org
- SAE-http: //www.sae.org

#### **1.2. Temas Açısı**

Yüzey özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemlerden biri de yüzeyin su tutma (hidrofob), su emme (hidrofil) gibi özelliklerinin belirlenmesidir. Malzemelerin hidrofob ya da hidrofil olduğunun belirlenmesi temas açısı ölçümü ile mümkün olmaktadır. Son yıllarda, malzemeler üzerine çeşitli fonksiyonları yerine getirmek amacıyla farklı özellik ve bileşenlerde birçok kaplama uygulaması gerçekleştirilmektedir. Bu kaplamaların birçoğu farklı karakterde olup,

kullanıldıkları uygulamaya göre farklı ihtiyaçlara cevap verebilmektedir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan kaplamalar suya karşı farklı şekillerde davranış gösteren kaplamalardır (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Su damlasının yüzeye tutunmasına göre değişen temas açısı

Temel olarak bu tip kaplamalar hidrofobik ve hidrofilik olarak 2 ana gruba ayrılmaktadır. Hidrofobik kaplamalı olan yüzeyler, yüzeye gelen su damlasını iterek su damlasının küre formuna yaklaşmasına neden olabilmektedir. Hidrofilik kaplamalar ise suyun yüzey üzerinde tutunması ve yayılmasını sağlamaktadır. Bir yüzeyin su ile yaptığı temas açısı;

- 0-90° arasında ise; hidrofilik,
- 90-180° arasında ise; hidrofobik olarak tanımlanmaktadır.

Söz konusu kaplamaların özelliklerini tespit etmek amacıyla en sık kullanılan yöntem, yüzeylerin farklı sıvılar ile (su dâhil) yaptıkları temas açılarını ölçme yöntemidir. Bu yöntem yardımı ile yüzeylerin ne tip kaplamaya veya karaktere sahip olduğu tespit edilebilirken, aynı zamanda yüzey kaplama kalitesi de değerlendirilebilmektedir. Bunların yanı sıra, farklı tipte yüzey kaplamaları ile birlikte nem tutmayan, iz bırakmayan/göstermeyen kaplamalar da yapılabilmektedir. Bu kaplamaların kullanım alanları da son yıllarda yaygınlaşmaktadır(Cengiz, 2010).

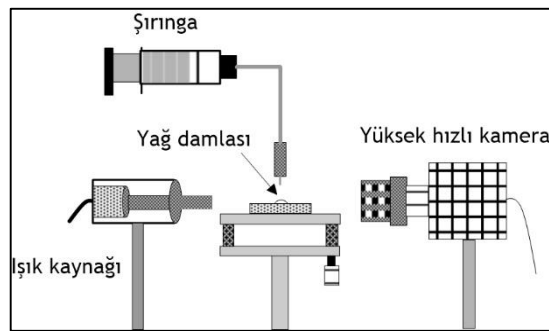
### 1.2.1. Temas açısı ve yüzey gerilimi belirleme yöntemleri

Yüzey ve yüzeyler arası gerilimin belirlenmesinde birçok yöntem vardır. Bu yöntemleri, DuNouy halka metodu, Wilhemny tabaka metodu, kapiler (kılcal) yükselme metodu, maksimum kabarcık metodu, Pendant damla ve Sessile damla metodu şeklinde sıralamak mümkündür. Tüm sistemler için ideal olan bir yüzey

gerilimi belirleme metodu bulunmamaktadır. Uygun yöntemin seçilmesinde numunenin miktarı ve özellikleri, ölçüm sıcaklığı, yüzey geriliminin mi yoksa yüzeyler arası gerilimin ölçülmesi hali, zaman parametresinin çalışma kapsamında olup olmadığı gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır (Gönül, 2000). Yüzey gerilimi yüksek olan bir yağlayıcı, etkili olduğu yüzey üzerinde daha az yayılacağı için yağlama işlevini tam olarak yerine getiremez. Bunun yerine; küçük temas açısına ve düşük yüzey gerilimine sahip olan bir yağlayıcı, yüzey üzerinde kolayca yayılabilir ve yağlama işlevini tam olarak yerine getirebilir. Bunun yanında, kullanılan yağlayıcının sıcaklığı da önemlidir, yüksek sıcaklıklarda yağlayıcılar ayrışarak bozulabilir, düşük sıcaklıklarda ise katılaşıp donabilir. Bunun sonucunda yağlayıcılar termal ve oksidatif bozunma sonucu ayrışabilirler. Yağın ayrışması yağlama yüzeylerinde ikincil hasarlara neden olabilir. Bu ikincil hasarlara örnek olarak, oksitlenmiş yağlayıcıların asitliğinden kaynaklanan korozyon etkisi verilebilir (Reeves, 2013).

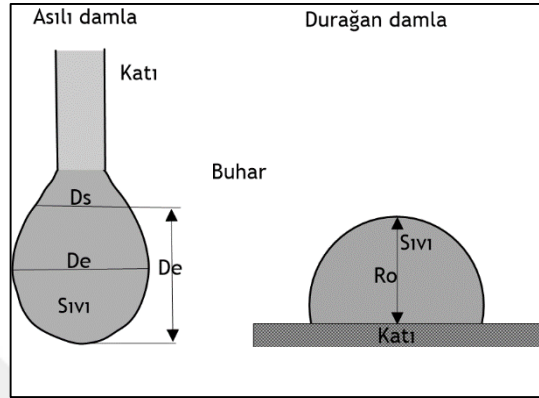
#### 1.2.1.1. Sessile (Durağan) ve Pendant (Asılı) damla metotları

Sıvıların temas açılarının tespitinde en sık kullanılan yöntem Sessile Damla Yöntemi olup bu yöntemle temas açısı tespitinde gonyometre cihazı kullanılmaktadır (Şekil 1.23). Temas açısı tespit edilmek istenen sıvı, bir mikropipet vasıtasıyla damla şeklinde katı bir yüzeye bırakılmaktadır. Bu mikro damlanın, yüksek çözünürlüklü bir kamerayla, görüntüleri ve fiziksel özellikleri, belirlenen süre boyunca, kaydedilip bilgisayara aktarılarak sıvının temas açıları hesaplanmaktadır (Aydar, 2012).



Şekil 1.23. Gonyometre cihazı

Gonyometre cihazı temel olarak damlanın bırakıldığı hücre, ışık kaynağı, mikro şırınga (mikro pipet), yüksek çözünürlüklü bir kamera ve bir bilgisayardan oluşur. Gonyometrede temas açısının yanı sıra yüzey gerilimleri de Pendant (asılı) Damla Yöntemiyle tespit edilebilmektedir. Pendant Damla Yönteminin Sessile Damla Yönteminden farkı yüzey gerilimi tespit edilecek sıvının sabit bir yüzeyde değil mikro şırınganın ucunda asılı durmasıdır (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Pendant (asılı) ve Sessile (durağan) damla ( $D_s$ : minimum çap,  $D_e$ : maksimum çap,  $R_o$ : Damla yüksekliği)

Gonyometre cihazında durağan (Sessile) ve asılı (Pendant) damla, eğimli (tilting) damla, sabit kabarcık, menisküs damla tipleri ile statik temas açıları sıvının ön tarafına ilerleyen “yayılma (advancing) temas açısı” ve sıvının geri tarafına ilerleyen “çekilme (receding) temas açısı” da belirlenebilmektedir (Aydar, 2012).

### 1.3. Zaman-Frekans Dağılımı

Tribolojik aşındırma çalışmalarında elde edilen sinyaller zamana göre değişmekte, meydana gelen bu anlık değişimler aşınma hareketi hakkında önemli bilgiler barındırabilmektedir. İşaretlerin zamanla değişimi temel bir gösterebilir, çünkü “zaman” temel bir gösterebilir. İşaretlerin değişik gösterimleri, işaretin doğasını anlamakta pek çok yararı olmaktadır. Bu gösterimler, elde edilen sinyal verisini, farklı fonksiyonların birleşimi ile tanımlayabilirler. Bir işareti temsil etmenin sayısız yolu vardır. Bir gösterimi diğerlerinden önemli hale getiren; o işaretin anlaşılmasında önemli olan fiziksel niceliğin, kullanılan gösterimle, diğer gösterimlere göre daha iyi temsil edilebilmesidir (Cohen, 1995).

Zamanın yanında en önemli niceliklerden bir tanesi de “frekans”tır. İşaretlerin, frekans gösteriminin matematiği Fourier tarafından tanımlanmıştır. Bu tanımlamada, işaretlerin, bir temel frekans ve bunun harmonik frekanslarının, değişik genliklerle bir doğrusal birleşimi şeklinde temsil edilebileceğini öne sürmüştür. Fourier analizinin gücü, işareti, onu oluşturan frekans bileşenlerine ayırması ve bunu o bileşenin gücü ile doğru orantılı olarak elde etmesidir. Fourier analizinden elde edilen matematiksel model o işaretin “izgesel” gösterimi olarak tanımlanır (işareti oluşturan frekans bileşenlerinin dağılımını gösteren grafiğe izge denir). Bu izge analizi ile durağan işaretlerin frekans analizi ya da güç spektrumu klasik Fourier dönüşümü ile elde edilebilir. Sinyal analizi için temel gösterimlerden biri, güç yoğunluğu spektrumudur. Wigner'a göre, bir sinyal  $s(t)$  'nin güç yoğunluğu fonksiyonu  $P(w)$  ve bu sinyalin otokorelasyon fonksiyonu  $R(\tau)$ , şu şekilde ifade edilebilmektedir (Menon ve Boutaghou, 1998).

Güç yoğunluğu spektrumu;

$$P(w) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jw\tau} R(\tau) d\tau \quad (1.6.)$$

Otokorelasyon fonksiyonu;

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s(t + \tau) dt \quad (1.7.)$$

Belirli bir  $T_d$  zaman aralığındaki güç spektrumu;

$$R(\tau) = \frac{1}{T_d} \int_{-T_d/2}^{T_d/2} s(t)s(t + \tau) dt \quad (1.8.)$$

$T_d$  zamanında sinyalin periyodik veya durağan olduğu durumlarda  $R(\tau)$  şu şekilde ifade edilir;

$$R(t, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s(t + \tau) dt = s(t)s(t + \tau) \quad (1.9.)$$



### 1.3.1. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) ve spektrogram

Zaman içinde istatistiksel özelliği değişen işaretler, durağan olmayan işaretler olarak bilinmektedir. Durağan olmayan işaretlerin analizi için Fourier Dönüşümü yetersiz kalmaktadır. Durağan olmayan işaretlerin analizinde en çok kullanılan yöntem, KZFD'dir (Cohen, 1995). KZFD'nin temel fikri, durağan olmayan işareti durağan olan küçük zaman parçalarına ayırmak ve bu zaman parçalarındaki frekansları belirlemek için bu aralıkların Fourier analizini yapmaktır. Fourier analizi yapılmış parçaların bir araya getirilmesi, işaretin izgesinin zaman içinde nasıl değiştiğini gösterecektir.

Bu parçalar içinde, işaretin istatistiklerinin yavaş değiştiği kabul edilir ve zaman bölümü içerisinde, işaret parçalara ayrılarak, bu işaretin izgesel analizi yapılır. Bilgi birbiri üzerinde örtüşen pencerelerin içine bölünerek konulur. Her alt bölümlenin analizi genelde zamandan bağımsız izge vermek için Fourier dönüşümü ile kestirilir. Bir işaretin  $x(t)$ , KZFD;

$$X(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - t)x(\tau)e^{-jw\tau} d\tau \quad (1.10.)$$

ile verilir, burada  $w(t)$  pencere fonksiyonudur.  $x(t)$ 'nin enerji yoğunluğu veya spektrogramı;

$$S_{KZFD}(t, w) = \frac{1}{2\pi} |X(t, w)|^2 \quad (1.11.)$$

denklemleri ile verilir. Zamandaki değişimleri yakalamak için zaman bölümlenmeleri yeteri kadar dar ve frekans bilgisini içerecek kadar da uzun olmalıdır. Bir başka deyişle iyi bir zaman yerleştirmesi isteniyorsa  $w(t)$ 'lik dar pencere kullanma zorunluluğu vardır. Eğer iyi bir frekans yerleştirmesi yapılmak isteniyorsa, bu defa da geniş bantlı bir pencere kullanma zorunluluğu vardır. Pencere aralığı, zamanda ve frekansta aynı anda dar aralıklı yapılamaz. Bunun sebebi de zaman ve frekans arasındaki belirsizlik prensibidir. Zaman frekans analizi içinde belirsizlik prensibi, işaretin enerjisinin zaman ve frekans içinde yayılımı için alt sınırları sağlar. İşaretin

zaman ve frekans içindeki yayılımını tanımlamak için, ilk olarak işaretin ortalama zaman ve ortalama frekansının tanımlanmasına ihtiyaç duyulur:

$$\mu_t = \int t|x(t)|^2 dt \quad (1.12.)$$

$$\mu_w = \int w|X(w)|^2 dw \quad (1.13.)$$

işaretin zaman (süre) ve frekans (bant genişliği) yayılımı:

$$\sigma_t^2 = \int (t - \mu_t)^2 |x(t)|^2 dt \quad (1.14.)$$

$$\sigma_w^2 = \int (w - \mu_w)^2 |X(w)|^2 dw \quad (1.15.)$$

şeklinde tanımlanır.

Belirsizlik prensibi  $\sigma_t \sigma_w \geq \frac{1}{2}$  ile ifade edilir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bitkisel esaslı atık yağların tekrar kullanılmasına yönelik çalışmaların büyük kısmı biyodizel üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla beraber bitkisel esaslı yağlar ve/veya atık bitkisel yağlardan elde edilen ürünlerin yağlayıcı adayı üzerine yapılan çalışmalar, aşağıdaki gibi alt başlıklar altında özetlenmeye çalışılmıştır.

### 2.1. Sürtünme ve Aşınma Üzerine Literatür Taraması

Amamoto ve Goto (2006) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme kuvveti veya katsayısının zamana göre analiz edilerek aşınma mekanizmalarında nasıl bir rol oynayabileceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kuru veya sınır yağlanmış tribo sistemlerdeki sürtünme davranışının genellikle zamana, sürtünme ve aşınma arasındaki ilişkinin ise kinetik enerjinin dönüşüm ve dağılımına bağlı olduğu belirtilmiştir. İyi yağlanmış tribo sistemlerin, daha az sürtünme enerjisi tükettiklerinden, daha az yüzey hasarı oluşturduklarını, bu enerjinin, tribo sistemin ve malzemelerin belirli niteliklerine bağlı ve genelleştirilemez olduğunu belirtmişlerdir. Bazı tribo sistemlerde  $\mu$  ve aşınma oranı arasında doğrudan bir oran olurken, bazılarında ise olmadığını vurgulamışlardır.

Gür ve Orhan (2008) tarafından yapılan çalışmada; yüksek Cr'lu FeCrC tozunu, St-37 çelik yüzeyine PTA (Plazma Tungsten Ark) yöntemiyle kaplamışlardır. PTA yöntemiyle alaşımlandırılmış kaplama tabakaların yüzeyleri SEM-EDS analizleri incelenmiş, abrazyon aşınma deneyleri Pim Disk aşınma deney aparatında farklı yüklerde yapılmıştır. Çalışma sonucunda; PTA yöntemi kullanılarak oluşturulan kaplama tabakalarında; karbür oranına bağlı olarak kaplama yüzeyinin sertliğinin ve aşınma direncinin önemli oranda arttığı görülmüştür.

Chowdhury ve Helali (2008) tarafından yapılan çalışmada ise; kayma hızı, pürüzlülük, normal yük ve sürtünme süresinin etkileri araştırılmış ve  $\mu$ 'nün, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı, titreşim genliği ile ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Kuru veya sınır yağlamalı tribo sistemlerdeki sürtünme davranışı zamana bağlı olarak değişmektedir. Rodaj (alıştırma), sürtünmeden dolayı aşınmanın başlaması, adhezif transferi, kaplama aşınması ve yağlayıcı eksikliği gibi olayların sürtünme davranışları arasında yer almaktadır. Sürtünme katsayısı belirlemede kullanılan temel modeller genellikle ya sabit bir değeri belirlemeye ya da tutma bırakma hareketi gibi periyodik davranışı tahmin etmeye odaklanmaktadır. Sürtünme, ısı üretmeye ek olarak, pürüzlülük değerlerinde ve geometrilerinde değişiklikleri, aşınma parçacıklarının oluşumu, tribomateryal ve mikroyapısal değişim dahil olmak üzere farklı olaylara neden olmaktadır (Blau, 2009).

Kuru kayma koşulları altında metallerin aşınma ile sürtünme arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmada (Blau, 2009), kuru yük altında çeşitli yüklerdeki nemli havada, % 0,35 C çeliğin aşınma testleri yapılarak farklı yüklerdeki sürtünme davranışında aşınma değişikliklerin meydana geldiği belirtilmiştir. Palmiye yağı metil esterin dizel yakıtı olarak kullanılmasının emisyon ve aşınmaya etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışma yüzeylerindeki aşınmaların azaldığı vurgulanmaktadır (Mofijur, 2012).

Talib ve Rahim (2016), metal işleme sıvısı olarak, Jatropha (hind fıstığı) yağ metil ester elde etmek için kimyasal işlemlerle alternatif ürün geliştirmiştir. Yapılan deneysel çalışmada bu işleme sıvısının, ticari sentetik estere göre aşınma ve sürtünmeyi azaltmada üstün performansı yanı sıra kesme kuvvetinde ve maksimum kesme sıcaklıklarında düşüş göstermiştir.

Birçok koşula bağımlı olan  $\mu$ 'nün, zamana bağlı gösterdiği davranış değişimlerinin sayısal olarak değerlendirilmesi ve bu sayısal verilerin farklı matematiksel dönüşümler ile incelenmesi önemli bilgiler sağlayabilecektir. Bu amaçla zaman ortamında elde edilen verilerin frekans ortamında incelenmesine ait farklı çalışmalar bulunmaktadır.

## 2.2. Bitkisel Esaslı Yağ ve Yağlayıcılar Üzerine Literatür Taraması

Gerpen vd. (1998), dizel yakıt yağlayıcıların dizel yakıt enjeksiyon ekipman üreticileri için bir sorun kaynağı olduğunu, bu sorunun, modern dizel yakıtlarda gerekli olan düşük kükürt seviyelerine ulaşmak için gereken aşırı hidrojenasyona bağlı yağlayıcılığın azalması nedeniyle yakın zamanda araştırmacıların dikkatini çektiğini belirtmiştir. Yaptıkları çalışmada, soya yağı ya da soya yağı ile yapılan ürünlerin dizel yakıtta yağlayıcı katkı maddeleri olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir. Soya yağını doğrudan katkı maddesi olarak test edip, yağ katkısı olarak soya bazlı bir ürün olan metil soya yağıyla karşılaştırmışlardır. Metil soya yağı ile yapılan testler ve sonuçlar diğer etkili bir yağlayıcı katkı maddesi olduğunu göstermiştir. Metil soya yağının, soya fasulyesi yağına dayalı katkı maddesinin, dizel yakıt yağlayıcılığını arttırmada etkili olduğu bulunmuştur. Bu katkı, bir dizel motorunda 125 saat boyunca çeşitli hızlarda ve yüklerde test edilmiş ve hiçbir zararlı etkisi bulunmamıştır.

Erhan ve Asadauskas (2000) tarafından yapılan çalışmada, petrolden üretilen yağlarla bitkisel esaslı yağlayıcılar karşılaştırıldığında, bitkisel esaslı yağların biyolojik olarak bozunabileceği, ancak birçok diğer teknik özellik açısından daha verimli olabileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, hammadde materyalinin, yağlayıcı maddenin % 80'den fazlasına katkıda bulunacağı da belirtilmiştir. Bu materyalin; "temizlik, vizkometrik özellikler, uçuculuk, oksidatif ve hidrolitik kararlılık, çökelme oluşturma eğilimleri, karışabilirlik veya sistem elastomerleri ve diğerleriyle uyumluluk" açısından performans kriterlerine uyması gerektiği vurgulanmıştır. Bitkisel esaslı yağlayıcılarda oksidatif stabilite ve düşük sıcaklık sorunları en kritik noktalar olarak kabul edilmiştir. Bitkisel yağların düşük sıcaklık performansının sorun olduğu; bunun katkı maddeleri ile kısmen azaltılabileceği, bu nedenle bitkisel yağların oksidasyona duyarlı alanları ortadan kaldırmak ve düşük sıcaklıklarda kristal oluşumunu bozmak için kimyasal olarak modifiye edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Bitkisel yağlar, mükemmel kayganlık, biyolojik bozunabilirlik, viskozite, sıcaklık özellikleri ve düşük uçuculuk özelliklerinden ötürü, bazik akışkan olarak

tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, düşük termo-oksidasyon kararlılığı ve kötü soğuk akış davranışı nedeniyle kullanımı kısıtlı kalmaktadır. Bitkisel bazlı yağlayıcılar, biyolojik esaslı hidrolik akışkan gibi piyasada bulunan endüstriyel yağlayıcılarla kıyasla üstün oksidatif stabilite ve iyi akma noktaları gibi gelişmiş düşük sıcaklık özelliklerine sahiptir. Bitkisel yağ bazlı formülasyonlar, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere petrol esaslı yağlayıcılarla kıyaslandığında, özelliklerinin bir kısmında genellikle daha iyi performans gösterdikleri belirlenmiştir (Erhan vd., 2006).

Kimyasal modifikasyon yoluyla elde edilen bitkisel yağ esaslı AW katkı maddesinin tribokimyasal değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmada, doğal kaynaklardan çıkan yağlayıcıların kimyasal modifikasyonu ile elde edilen sülfürlü bitkisel bu yağın tribokimyasal davranışı, bilye disk aşınma test sistemi ve aşınma izi kullanılarak,  $\mu$  değerleri ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda, bitkisel esaslı aşınmaya karşı katkı maddeleri kullanışlı ve yararlı bulunmuştur (Sharma vd., 2009).

Bitkisel yağların, doğal olarak yağlayıcı özellikli yağlar olarak kullanılmaya uygun olduğu, fiziksel özelliklerini arttırmak için kimyasal modifikasyon yöntemleri ile mineral ve sentetik yağlayıcılar kadar iyi performans gösterdiği, katkı maddelerinin eklenmesi ile stabilitesinin arttığı ve bitkisel yağlayıcıların daha geniş sıcaklık ve basınç aralığı altında çalışabileceği diğer bir çalışmada vurgulanmıştır. Performans, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilirlik açısından bitkisel yağ kullanımının iyi bir seçenek olduğu, ancak yine de kullanılabilirlik için iyileştirme yapılması; kimyasal yapıların özellikle doymamış yağ asidi bileşenleri ve bunun belirli bir bitkisel yağın kalitesine etkisi olduğu, bitkisel yağın, Newtonien olmayan uygulamalarda koyulaştırıcı ilave edilerek baz yağa dahil edilmesi gerektiği belirtilmiştir (Nizam ve Abdul Bari, 2009).

Sharma vd. (2009) tarafından, kimyasal modifikasyon yoluyla elde edilen bitkisel yağ (kanola ve soya) esaslı AW katkı maddesinin tribokimyasal özellikleri incelenmiştir. Doğal kaynaklardan çıkan yağların kimyasal modifikasyonu ile elde edilen sülfürlü bitkisel bu yağın tribokimyasal davranışı, bilye disk aşınma

test sistemi ile aşınma izi ve  $\mu$  ölçülmüştür. Bitkisel esaslı AW katkı maddesi olarak uygun ve yararlı olduğu belirtilmiştir.

Yenilenebilir kaynaklardan olan biyokütleden, alışlagelmiş yakıtlara alternatif olarak katı-sıvı-gaz biyoyakıtlar elde edilebilmektedir. Bilindiği üzere, taşıtlar için sıvı yakıtlar vazgeçilmezdir. Petrol kökenli akaryakıtta tek seçenek motor biyoyakıtlarıdır. Çevre dostu nitelikleri, özellikle biyobozunurluk özelliği ile biyoyağlayıcılar da öne çıkmaktadır. İçten yanmalı motorların tarihi kadar eski tariheye sahip motor biyoyakıtları ve tekerlek tarihi ile gelişen biyoyağlayıcılar birleşik biyorafineri teknolojisi ile gelişimini sürdürerek çevreci ekonomide giderek artan oranlarda yer bulmaktadır (Karaosmanoğlu, 2010).

Shashidhara ve Jayaram (2010), birçok alanda olduğu gibi, potansiyel metal kesme sıvısı olarak bitkisel yağların uygulamalarını incelemek için bir derleme çalışması yapmıştır. Metal kesme ve şekillendirme sanayinde kesme sıvısı olarak bitkisel esaslı yağların kullanımı amacı ile yapılan çalışmaları incelemiş ve potansiyel kesme sıvısı olarak soya yağı, ayçiçeği yağı ve kanola yağının kullanımının uygun olacağını belirtmiştir.

Wang vd. (2010), tarafından yeni bir bor esteri türetilmiş ve EP katkı maddesi olarak kanola bitkisel yağına eklenerek dört bilye aşınma testinde tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen bor esterinin yük taşıma kapasitesi, sürtünme azaltıcı, aşınma önleyici, korozyon önleyici ve oksitlenme önleyici özelliklerinde gelişme gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, türetilen esterinin içindeki elementlerin sınır yağlama filminin oluşumuna da katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Bitkisel yağlara dayalı yağlayıcıların kullanımı, (biyolojik olarak parçalanabilmeleri, düşük ekotoksitesitesi ve tribolojik özellikleri nedeniyle), hızla artmaktadır. Biyobazlı yağlayıcılar mineral esaslı yağlayıcılara kıyasla daha düşük  $\mu$ , geliştirilmiş bir AW özelliklerine, daha yüksek bir VI indeksine ve daha düşük uçuculuk ve parlama noktalarına sahiptir. Bu amaçla, polimerize bitkisel yağlardan (soya) biyolojik esaslı bir dişli çark yağlayıcısı geliştirilmiştir. Soya yağı önce termal olarak polimerize edildikten sonra katkı maddeleri ve seyrelticiler ile karıştırılmıştır. Akma noktası düşürücü maddeler, anti-oksidanlar ve AW katkı

maddelerinin etkisi ve bitkisel esaslı yağların oksidatif bozunma kinetiği de incelenmiştir (Arca, 2011).

Dünyada ham petrol rezervinin tükenmesi ve ham petrol fiyatlarının artması nedeniyle biyolojik esaslı materyallerin kullanımına ilgi artmaktadır. Yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre dostu yağlayıcıların geliştirilmesi, doğal yağların yağlayıcı olarak yaygın kullanılmasına neden olmuştur. Bitkisel yağlar, mükemmel kayganlık, biyolojik bozunabilirlik, viskozite, sıcaklık özellikleri ve düşük uçuculuğu nedeniyle çevre dostu yağlayıcılar için baz sıvısı olarak kullanılmaya başlanılmışlardır. Tarım ağırlıklı ekonomiler göz önüne alındığında, teknik performans ek olarak ekolojik uyumluluğa sahip olan bitkisel yağ esaslı yağlayıcılar üretmek için büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Bitkisel yağların uygunluğu, kimyasal modifikasyona ihtiyaç duymakta ya da istenilen özelliğe göre yağ elde etmek için katkı maddeleri ilave edilerek kullanabilmektedir. Bitkisel yağların kimyasal modifikasyon yoluyla verimli hale getirilmesi, hidrolitik stabilite, köpürme, viskozite, buharlaşma, oksidasyon kararlılığı vb. gibi belirli teknik özellikleri ifade etmektedir. Bununla birlikte, bitkisel yağın oluşumu, ürünün genel maliyetine bağlıdır. Böylece, yenilenebilir hammaddelere dayanan yağlayıcıların pazar payının genişlemesine yardımcı olmaktadır. Bu gelişme için belirleyici faktörler, çevre koruması ve teknik gerekliliklerdir. Bu alandaki gelişmeler, kimyasal olarak değiştirilmiş yenilenebilir biyoyakıtların geliştirilmesi için büyük bir potansiyel sunmakta ve petrokimya hammaddelerine olan bağımlılığı azaltarak yeni sentez süreçleri yaratmaktadır. Bu durum, bitkisel yağların doğal kimyasının bozulmadan kullanılması ve bu durumun sürdürülebilir olması anlamına gelmektedir (Regueira vd., 2011).

Bitkisel yağlara dayalı biyolojik olarak parçalanabilen yağlayıcıların kullanımı, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri azaltılmış ürünleri teşvik etmek için önemli bir araştırma alanı haline gelmeye başlamıştır. Sıkıştırılabilirlik, mevcut hidrolik akışkanların ve dişli yağlayıcıların geliştirilmesi için dikkate alınması gereken temel özelliklerden biridir. İyonik sıvıların, bitkisel ve diğer biyolojik olarak parçalanabilir yağlayıcıların AW katkı maddesi olabileceği ve bu nedenle



bu yöndeki çalışmaların teşvik edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Regueira vd., 2011).

Kalam vd. (2011), atık palm yağına dayalı yeni bir yağlayıcı geliştirmek için yaptıkları bu çalışmada normal yağlama maddesi, katkı maddesi ilave yağlama maddesi ve atık bitkisel yağ yağlama maddelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini değerlendirmek için standart test metodu IP-239 ile dört bilyeli bir tribotester kullanmışlardır. Sürtünme ve aşınma özelliklerini araştırmak için sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), aşınma izi çapı, flaş sıcaklık parametresi, viskozite indeksi (VI) ve toplam asit sayısı değerlerini incelemişlerdir . Her bir test, beş farklı yük için, yağlayıcı olarak, % 1 ila % 5 arasında atık bitkisel yağ ve karşılaştırma amacıyla ise normal yağlayıcı kullanılarak yapılmıştır. Test sonuçları, uygun aşınma önleyici katkı maddesi içeren atık bitkisel yağ ile kontamine olmuş yağlama maddelerinin aşınma ve sürtünme katsayısını azaltabileceğini göstermiştir.

Shahabuddin vd. (2013) tarafından Jatropha Yağı (JY) kontamine biyo-yaglayıcı maddesinin tribolojik özellikleri özetlenmektedirler. Biyoyaglayıcıların formüle edilmesi için hacimce % 10-50 oranında JY, baz yağlayıcı SAE 40 ile harmanlanmış ve sınır yağlama şartlarında yapılan deneylerde en düşük aşınmanın % 10 JY eklenmiş deneyde ve % 20'nin üzerinde ilaveyle aşınma oranının önemli derecede arttığı vurgulanmıştır. Baz yağlayıcıya JY ilavesi, çok iyi bir yağlayıcı katkı maddesi olarak işlev gördüğü belirtilmekte, ayrıca otomotiv sektöründe % 10 biyoyaglayıcının kullanılması, mekanik etkinliği arttırarak petrole olan bağımlılığı azaltacağı belirtilmiştir.

Chowdhury vd. (2013), geleneksel olarak yenilenemeyen mineral yağ kaynaklarından üretilen yağlayıcıların biyolojik olarak parçalanamaz ve olumsuz çevresel etkilere neden olabildiğini, biyo-yaglayıcıyı sentezlemek için atık pişirme yağının kullanılabilirliği üzerine çalışma yapmışlardır. İki aşamalı yeni bir sentetik yöntem geliştirmiş ve üretilen oktil esterin istenen biyolojik yağlayıcı olarak kullanılabilir özellikte olduğunu belirtilmişlerdir. Geliştirilen iki aşamalı işlemle, biyolojik yağlama maddesi (oktil esterleri) atık pişirme yağından verimli

bir şekilde hazırlanmış, bu yeni yaklaşımın, doğada yenilenebilir olan ve yenilenemeyen madeni yağ ham maddelerine alternatif olabilecek atıklardan, yağlayıcı üretmek için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Lawal vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, metal işleme işlemlerinde, bitkisel yağ bazlı sıvıların, çevre ile uyumlu ve performans açısından verimli olmaları nedeni ile kullanımlarının artışına dikkat çekilmiştir.

Dünyadaki nüfus artışı ve gelişen teknolojiyle beraber enerjiye olan gereksinim günden güne artmaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliği, alternatif yakıt seçeneklerinin uygulanabilirliği, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji kullanımının yol açtığı çevre sorunları için aranan ve üretilen çözümler, dünya enerji gündeminde ağırlıklı bir yer işgal etmektedir. Yukarıda sayılan bütün konularla ilgili olan ve günümüz enerji kullanımında giderek kendine önemli bir yer edinen biyokütle enerjisi; sürdürülebilir kalkınma, çevre duyarlılığı ve enerji verimliliği kapsamında değerlendirilmeye uygun potansiyeli ile öne çıkmaktadır. Biyokütle; sürdürülebilirlik, kolay bulunabilirlik ve çevre üzerinde istenmeyen etkiye sebep olmama gibi bazı önemli avantajlara sahip olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütle enerjisi çevre ile dost ve sürdürülebilir enerji üretimini ve çevre yönetimini sağlayan, kalkınmayı hedefleyen özellikleri ile tüm dünyada geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu sebeple Dünya’da ve Türkiye’de biyokütlenin enerji üretiminde değerlendirilmesi önem kazanmaktadır (Kapluhan, 2014).

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen polimerik malzemeler son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bitkisel yağların polimerik malzemeler için geliştirilmesi ve kullanımı, biyolojik bozunabilirlik, düşük maliyet ve çevresel özellikleri nedeniyle, polimer ve kimya endüstrisinin önemli konuları arasında bulunmaktadır. Bitkisel yağlardan türetilmiş polimerik/kompozit malzemeler; boyalar, kaplamalar, yapışkanlar ve nanokompozitleri de içeren çok sayıda uygulamada sağladığı avantajlar nedeni ile geniş kullanım alanına sahiptir (Samarth ve Mahanwar, 2015).

Üretimde talaşlı imalatta kullanılan geleneksel kesme sıvılarının çoğu çevre dostu değildir. Bitkisel yağ bazlı kesme sıvıları ile ilgili Kumar vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, susam ve hindistan cevizi yağı kesme sıvısı olarak kullanılarak; kesme kuvveti, kesici takım sıcaklığı, takım kenarı aşınması ve yüzey pürüzlülükleri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, susam ve hindistan cevizi yağı ilaveli kesme sıvılarının diğerlerine kıyasla işleme performansını artırdığı gözlenmiştir.

Boiko ve Lebedinsky (2015) tarafından yapılan çalışmada, bor içeren yağlayıcının, demiryolu rayları için kullanılabilirliği ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikteki bu yağlayıcının AW özellikleri incelenmiştir.

Mamuda vd. (2016) tarafından, katkı maddeleri kullanılarak Neem (maun ailesinden gelen bir ağaç türü) tohum ve Jatrofa tohum yağı formülasyonu incelenmiştir. İki yağ arasındaki kayganlık ve yağlayıcılık performansını karşılaştırmak için dört bilme yöntemi iki farklı yağ formülasyonu için test edilmiştir. Jatroba (hint fıstığı) tohumu yağı maddesinin daha iyi performans gösterdiği ve tüm test koşullarında daha düşük sürtünme katsayıları sunduğu gözlenmiştir.

Yağlayıcılar, iletim ve endüstriyel üretim için önemli, enerji tasarrufu ve yakıt ekonomisine katkı sağlayan temel makine elemanlarıdır. Ancak artan çevresel endişeler birçok uygulamada yağlayıcılardaki bitkisel yağ kullanımını arttırmaya zorlamaktadır. Bitkisel yağlar yenilenebilirlik, biyolojik bozunurluk gibi doğal nitelikleri nedeniyle önemli çevresel faydalar sunmaktadır. ASTM D 4172 standardına göre pamuk tohumu yağı ve soya fasulyesi yağı, çok silindirli motor üzerinde test edilmiştir. Çalışmada SAE 20W40 yağı + % 10 (Pamuk tohumu yağı + ağırlıkça% 0.5 grafit) karışımının çok silindirli motor için en uygun yağlayıcı olduğu belirtilmiştir(Kalhature vd.,2016).

Petrol ürünlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve petrol kaynaklarının yetersizliği nedeniyle, günümüzde en önemli endüstriyel araştırma alanlarından biri; petrol bazlı materyallere alternatif üretmek için bitkisel yağları kimyasal

olarak modife etme çalışmalarıdır. Biyoyakıtlar, biyo plastikleştiriciler, izosiyanat-olmayan poliüretanlar, biyoyakıt, kaplama malzemeleri, biyolojik bileşimler ve diğer katma değerli kimyasallar, bitkisel yağların kimyasal olarak modifiye edilmesiyle kolayca üretilebilirler. Kimyasal olarak değiştirilmiş bitkisel yağlar, genellikle çevre dostu yağlayıcıların formülasyonu için baz yağı olarak kullanılırlar. Sürdürülebilir katkı maddeleri olarak uyguladıklarına dair raporlar, geliştirilmiş çok işlevli performansları (tek katkı maddeleri, ticari katkı maddeleriyle karşılaştırıldığında VI geliştirici, akma noktası düşürücü, aşınma önleyici ürünler) ve biyolojik olarak parçalanabilirlik özelliğinden dolayı son zamanlarda özel ilgi çekmiştir (Sharma ve Biresaw, 2016).

Biyodizel, birçok ülkede dizel yakıtlı karışımlar olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, biyodizel/dizeldeki ana engel kabulü, dünya çapında ticarileştirmeyi ve daha yüksek karışımları kullanmanın otomotiv parçalarının aşınmasını ve sürtünmesini arttırdığı görülmektedir. Üç farklı anti-oksidantın palm biyodizel-dizel harmanının (B30) yağlamaya etkisini ve performansına bağlı olarak antioksidan konsantrasyonunu optimize etmek için yapılan çalışmada, üç fenolik anti-oksidant, bir saat deney süresinde, 1500 d<sup>-1</sup> hızda ve 400 N yükte ortam sıcaklığında dört bilyeli tribotester ile testler yapılmış ve anti-oksidant, karışımı aşınma ve sürtünmeyi azaltma bakımından en etkili sonuçları göstermiştir(Sundus vd., 2017).

Ameen (2017) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, soya yağı ve atık kızartma yağı yağ asiti metil esterleri karışımlarının sınır yağlama şartlarında tribolojik özellikleri incelenmiştir. Pim disk aşınma test cihazında alüminyum esaslı yatak malzemesi numunesi ile çelik bilye arasında sınır yağlama şartlarında testler yapılmıştır. Test yükleri olarak 5 N, 10 N ve 20 N, kayma hızları olarak 100 d<sup>-1</sup>, 300 d<sup>-1</sup>, 500 d<sup>-1</sup> ve kayma mesafesi olarak da 500 m seçilmiştir. Sınır yağlama şartlarında elde edilen tüm  $\mu$  değerleri ile kuru (yağsız) deney şartlarında elde edilen  $\mu$  değerleri karşılaştırıldığında oldukça düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bu çalışma; yağlayıcı adayı olan soya yağı ve atık kızartma yağı yağ asiti metil esterlerinin sınır ve/veya karışık yağlama

performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca yükün artması ile birlikte özgül aşınma miktarı değerlerinin genellikle azaldığı tespit edilmiştir.

Bitkisel yağ bazlı yağlayıcıların temel avantajları, yüksek biyolojik bozunabilirlik ve suda yaşayanlar için düşük toksisitedir. Son zamanlarda, biyolojik esaslı yağlayıcılar, çevreye duyarlı yağlayıcı bileşimler hazırlamak için ticari olanlar ile harmanlanmaktadır. Bitkisel yağlar petrol bazlı yağlarla karşılaştırıldığında, biyolojik esaslı yağlayıcılar, daha az üretildiğinden maliyetleri daha yüksek olmaktadır. Bitkisel yağ bazlı yağlayıcılar (bazik sıvı veya katkı maddeleri) ticari petrol bazlı yağlayıcılardan daha pahalı olmasına rağmen zehirsiz ve biyolojik olarak parçalanabilir olması nedeniyle gelecekte yeşil ürünler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yağların, daha yüksek VI, daha iyi AW performansı, daha yüksek parlama noktası ve diğer yağlayıcılardan daha düşük akma noktası ve buharlaşma noktası vardır. Bitkisel yağ bazlı materyallerden biyolojik yağlayıcılar üretmek için daha ekonomik ve daha yeşil bir yöntem geliştirmek için devam eden araştırmalar bulunmaktadır.

### **2.3. Frekans Analizi Üzerine Literatür Taraması**

Zaman frekans analizi; makine arıza teşhisi alanındaki ana konulardan biridir. Zaman-frekans analizi, sinyal frekansı bileşenlerini ve zaman-değişken özelliklerini saptamak ve durağan olmayan sinyallerde bulunan bilgiyi değerlendirmek için kullanılabilir. Makine arıza teşhisine ait çeşitli zaman-frekans analiz yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır(Feng vd., 2013). Zamana bağlı olarak değişen sürekli sinyallerin dalga enerjisi ve frekansında bazı değişiklikler meydana gelebilir. Bu sinyallerin anlık spektrum karakteristikleri, düşük frekanslı değişimlere neden olan bu parametrelerin sağlıklı olarak belirlenmesini sağlayabilmektedir. Özellikle sismik sinyallerin taşıdığı bilgilerin ortaya çıkarılmasında bu analizler önem kazanmıştır (Xue vd., 2013). Benzer şekilde, hasarlı betonarme kiriş üzerinde, (Neild vd., 2003), inşaat mühendisliği alanında (Owen vd., 2001; Gerpen vd., 1998), bilgisayar sabit disklerinin okuma başlıklarının arayüz sinyallerinden alınan örnekler, hızlı Fourier dönüşüm algoritması adapte edilerek analiz edilebilmektedir (Menon ve Boutaghou, 1998).

Bastiaans (1978) tarafından ışık ve ses analizleri, mekanik sistemlerden elde edilen zamana bağlı sinyallerin çözümlemeleri için zaman-frekans analizleri kullanılmıştır. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü, kısa süreli olarak sinyallerin durağan olduğu varsayımına dayanmaktadır. Kısa süreli durağanlığın uzunluğu, elde edilebilecek frekans çözünürlüğünü belirler. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü, kısa yakalama süresi için sabit bir gösterim varsayımıyla, küçük parçalarda yakalanacak uzun süreli sinyallerin detaylı incelenebilmesini sağlayabilmektedir.

Menon ve Boutaghou (1998) tarafından yapılan çalışmada; zaman-frekans analizi, tribolojik etkileşimlerde durağan ve durağan olmayan sinyalleri karakterize etmek için kullanılmıştır. Bu analizde, tribolojik etkileşimlerden kaynaklanan sinyalleri analiz edebilmek için; zaman, frekans ve sinyal genlikleri kullanılmıştır. Kısa süreli Fourier dönüşümü, Wigner, Coi- Williams ve Zhao-Atlas – Marks dağılımları sabit ve durağan olmayan sinyalleri analiz edebilmek için kullanılan yöntemlerdir. Zaman, frekans ve genlik bilgisinden oluşan üç boyutlu gösterim ile yapılan sinyal tarifi, zaman-frekans gösterimi olarak adlandırılır.

Zaman-frekans analizlerinin çok farklı alanlarda uygulama imkânı bulunmaktadır. (Geisheimer vd., 2001) tarafından yapılan çalışmada, insan yürüyüşünden kaynaklanan titreşim verilerini kaydetmek için 10.5 GHz civarında çalışan tam uyumlu, sürekli dalga radar geliştirilmiştir. Alınan sinyal, hareketli gövdenin çeşitli kısımlarından yansıyan sinyallerin toplamından oluşmaktadır. Bacaklar, kollar ve gövde, yürüyüş döngüsü boyunca farklı göreceli hızlarda hareket ettiğinden, insan yürüyüşü imzası çok miktarda bilgi içerir. Kaydedilen bu sinyallerden, Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Chirplet dönüşümü teknikleri kullanılarak insan hareketlerinin çeşitli parametreleri elde edilmiştir.

Benzer şekilde, (Rao vd., 2008) tarafından yivli bir diskin tribolojik özellikler üzerindeki etkisi, titreşim ve gürültü özellikleri üzerine deneysel çalışmalar iki farklı temas biçiminde gerçekleştirilmiştir. Disk yüzeyinde sadece bir oluk içeren bir disk numunesi, her iki temas biçiminde gıcırta gürültüsünün bastırılmasında

oluğun farklı yeteneklerini, her iki temas durumunda ise olukların kararsızlığının etkisini göstermiştir.

Kuru veya sınır yağlamalı tribo sistemlerdeki sürtünme davranışı zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Malzeme çiftleri aynı ortalama sürtünme katsayılarını gösterebilmektedir. Ancak önemli ölçüde farklı aşınma gösterebilirler, çünkü sürtünme, bir malzeme grubundan diğerine farklı şekilde yayılabilmektedir. Metallerin, seramik ve polimerler için sürtünmenin zamana karşı davranışının özellikleri, aşınma içeren parçalı sürtünme modellerinin geliştirilmesini gerektirecek aşamalardan oluşabilmektedir (Blau, 2009).

Song vd. (2017) yaptıkları çalışmada, KZFD ile belirlenen frekans genliği, sürtünme kuvveti frekans tepelerinin genlikleri tarafından kolayca bulunabileceğini, test edilen numunelerin aşınma hızlarının ve aşınma mekanizmalarının yanı sıra zamanla meydana gelen değişimlerin, sürtünme kuvveti sinyallerinin frekans tepelerinin genlik, dağılım ve dalgalanmasından saptanabileceğini göstermektedirler. Ayrıca, sürtünme kuvvetinin zaman-frekans analizinin, malzemelerin zamana bağlı olarak aşınma sürecinde, özellikle de baskın aşınma mekanizması ve aşınma oranındaki değişiklikleri incelemek için etkili bir yol olduğunu vurgulamışlardır.

Sürtünme katsayısının zamana bağlı olarak elde edilen sinyalleri üzerinde, zamanla değişen sürtünme katsayılarının frekans genliklerini analiz etmek için KZFD kullanılabilir.

#### **2.4. Titreşim Analizi Üzerine Literatür Taraması**

Neild vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, betonarme yapılarda doğrusal olmayan titreşimlerin analizi için zaman-frekans dağılım araçlarının gözden geçirilmesi gerekliliği üzerinde durulmuştur. Hareketli pencere ayrık Fourier dönüşümü, hareketli pencere otomatik regresif modeli, harmonik dalgacık dönüşümü, Wigner-Ville ve Pencereless Wigner-Ville dağılımlarının temel teorik bilgileri sunulmuştur. Her bir tekniğin güçlü ve zayıf yönleri onları çeşitli yapay

sinyallere uygulanarak gösterilmiş olup ardından, hasarlı bir betonarme kiriş üzerindeki deneylerden alınan gerçek titreşim verilerine uygulanmıştır.

Zaman-frekans analizinin, makine titreşim sinyallerinin geçici veya zamanla değişen özelliklerinin izlenmesinde etkili olduğu ve bu nedenle makine durumunun izlenmesinde kullanımının arttığı ifade edilmektedir (Lakis, 2007). Bu çalışmada, zaman ve frekanstaki bir sinyal hakkında daha fazla bilgi veren ve makinenin teşhisinde klasik yöntemlere göre sinyalin daha iyi gösterilmesini sağlayan zaman-frekans yöntemlerinin uygulanması önerilmektedir. Aynı zamanda, klasik titreşim parametrelerinin doğrulanmasına dayanarak makine tanı teknikleri incelenmiş olup, zaman-frekans analizinin kullanılması gerekliliği tartışılmıştır. KZFD, Wigner-Ville dağılımı ve Dalgacık dönüşümleri teorisi kısaca incelenmiş, avantajları örneklerle gösterilmiştir.

Zaman-frekans analizi ile sürtünme kaynaklı titreşim davranışı hakkında faydalı ve etkin bilgiler elde edilebilmektedir. (Chen ve Zhou, 2007) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme kaynaklı titreşimin zaman-frekans karakteristiklerini analiz etmek için; KZFD, Wigner- Ville dağılımı, Choi-Williams dağılımı ve Zhao-Atlas-Marks dağılımı uygulanmıştır.

Chowdhury ve Helali (2008) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme katsayılarının farklı frekanslarda normal titreşimin genlikten nasıl etkilendiği incelenmiştir. Normal titreşim genliği ile sürtünme katsayısının değişimi, hafif çelik pimin cam elyaf takviyeli plastik, kumaş takviyeli ebonit, politetrafloroetilen, kauçuk ve yumuşak çelik gibi farklı malzeme türleri üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bunun için, test numunelerinin farklı genliklerde ve titreşim frekanslarında titreşim yapma özelliğine sahip olan bir disk tasarlanmış, deneyler sırasında kayma hızı, pürüzlülük, normal yük ve sürtünme süresinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, sürtünme katsayısının azaltılma oranının, titreşim genliği ve frekansı ile özel bir ilişkisi olduğu da gözlenmiştir. Deney sonuçları literatürde bulunanlarla karşılaştırılmış ve temel fiziksel açıklamalar sunulmuştur.



Pehlivan (2012) tarafından yapılan çalışmada ise, konum değişimleri, yüksek hassasiyette GPS ölçümleri ile zaman serisi (sinyal) şeklinde elde edilip, zaman serilerinin periyodik bileşenleri zaman ve frekans bölgesinde incelenmiştir. GPS sinyallerinin alçak frekansta uzun periyodlu hareketlerle, yüksek frekansta kısa zaman periyodunda oluşan titreşim hareketlerini içerdiği gözlenmiştir. Bunların dışında, ölçülen sinyalin rastlantısal olma özelliği dikkate alınarak, belirli bir gürültüyü de içerdiği belirtilmektedir. Baskın frekanslar, sinyal içerisinde tekrarlanan aynı frekanslı sinyallerin toplamını içerdiğinden, GPS sinyali bir dizi işlemden sonra Hızlı Fourier Dönüşümü ile frekans bölgesine dönüştürülmüştür. Böylece, ana sinyal alt sinyallere ayrıştırılıp ve hangi frekansta hangi şiddette bir periyodik bileşen olduğu belirlenmiştir. Hızlı Fourier Dönüşümü ile tekrarlanmayan sinyaller dikkate alınmazken karmaşık sinyaller içinde periyodik olanlar belirlenip harmonik bileşenlerine ayrılmıştır. Bu şekilde veriler, ölçülen yapının fiziksel kuvvetlere karşı davranışlarının yorumlanabileceği şekle dönüştürülmüştür.

Titreşim sinyallerinin incelenmesi ve bu sinyallere ait kaynağın özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda da benzer analizler yapılmaktadır. Ermiş vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, zeminde oluşan titreşimlerinin ölçülmesi ve analizi ile insanların varlığının algılanması ile ilgili testler yapılmıştır. Bu testlerde, hedef tespiti amacıyla sismik sinyaller toplanmış ve belirli zaman aralıklarına bölünerek incelenmiştir. Bu sinyallerin ölçülebilmesi için bir deney altyapısı kurulmuş ve belirlenen ölçüm senaryoları dahilinde bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları zaman ve frekans tanım bölgelerinde analiz edilmiş, kullanılan analiz yöntemleri ile insan adımı karakteristiği çıkarılmış, adım kaynaklı darbelerin zeminde oluşturduğu zorlamalar incelenmiş ve farklı yürüyüş stillerinde bir insanın oluşturduğu sismik sinyal bileşenleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, titreşim analizi ile hedef tespit ve tanımlaması yapılabileceğini ortaya çıkarmıştır.

Titreşim analizleri, malzeme yorgunluğunun ve arızalı bölgenin tespit edilmesinde de kullanılmaktadır. Feng vd. (2016) tarafından yapılan bu çalışma, durağan olmayan koşullar altında rüzgar türbinlerinin arıza teşhisi için karmaşık durağan olmayan titreşim sinyallerinden, zamanla değişen frekansların

belirlenmesi üzerinde durmaktadır. Yöntem, durağan olmayan çalışma koşulları altında bir rüzgar türbini test teçhizatında bir planet dişli kutusunun deneysel sinyallerinin analiz edilmesiyle gösterilmektedir. Sonuçlar, bu yöntemin hem dağıtılmış (her dişin aşınması) hem de lokalize (bir diş üzerinde) dişli arızalarını tespit etmede etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, (Ertekin vd., 2017) tarafından yapılan çalışmada, hatalı disk fren sistemlerinden gelen seslerin dalgacık tepeleri yaklaşımı ile analizi gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonucunda hatalı frenlerden gelen sinyallerden hesaplanan düzensizliklerin daha yüksek olduğu ve bu değerlerin ayırıcı bir nitelik olarak hata analizinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

## **2.5. Oksidasyon Kararlılığı Üzerine Literatür Taraması**

Oksidasyon kavramı yağlama yağının bozunması ve işlevini yitirmesi anlamına gelmektedir. Bu konuda (Sarin vd., 2009) tarafından Hindistan'da biyodizel için önerilen, ağaç kaynaklı ve yenilmeyen yağ çekirdeği, Jatropha'dan biyodizelin kararlılığı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Avrupa biyodizel standardı EN-14214, Rancimat metoduyla (EN-14112) ve 6 saat minimum indükleme süresi ile 110 °C'de oksidasyon stabilitesinin belirlenmesine çalışılmış ve Jatropha biyodizel (JBD) in oksidasyon stabilitesi 3.95 saat olarak belirlenmiştir. Jatropha metil esterinin oksidasyon kararlılığı üzerinde, depolama tankları ve varillerin metalurjisinde bulunması muhtemel olan geçiş metallerinin varlığının etkisini araştırmak için yapılan araştırmalarda metalin etkisinin oksidasyon kararlılığına ve katalitik olmasına zarar verdiği bulunmuştur. Küçük metal kirletici konsantrasyonları bile büyük miktarlarda oksidasyon stabilitesi üzerinde benzer etki göstermiştir. Bakır en güçlü zararlı ve katalitik etki göstermiştir. Oksidasyon stabilitesinin metal tipi üzerindeki bağımlılığı ve konteyner malzemesinin biyodizelin oksidasyon kararlılığı üzerindeki etkisinin belirlenmesinde uzun süreli depolama testlerinin yerini daha hızlı Rancimat testi almıştır. Bu testte, yağ örneklerinin oksidatif stabilitesi Rancimat cihazında "American Oil Chemists' Society Official Method Cd 12b-92"ye göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, örnekler 121.7 °C sıcaklık ve 20 l/saat hava akışında oksidasyona uğratarak indüksiyon periyotları belirlenmiştir. İndüksiyon periyodu, parçalanma ürünlerinin damıtık

suya transfer olması sonucu suyun iletkenliğinde oluşan değişimle ölçülmektedir ve çalışmada elde edilen indüksiyon periyotları saat olarak verilir.

Benzer şekilde, (Bozkurt vd., 2017) tarafından yapılan çalışmada, mikrodalgada ısıtılmış pirina yağlarının oksidatif stabilitesi Rancimat yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemde pirina yağları sıcaklık ve hava akışına maruz bırakılmış ve oksidasyon süreci hızlandırılmıştır. Pirina yağı, yüksek oranda içerdiği tekli doymamış yağ asitleri sebebiyle diğer bitkisel sıvı yağlar arasında yüksek oksidatif stabilitesi ile dikkat çekmektedir. Pirina yağının farklı kullanım olanakları üzerine de çalışmalar yoğunlaşmış durumdadır. Pirina yağı farklı gıda ürünlerinde bileşen olarak kullanılabilirdiği gibi, kızartma işlemlerinde ve mikrodalgada kullanılabilir. Yapılan çalışma ile pirina yağının mikrodalgada kullanımının yağ kalitesi ve trans yağ içeriği üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı güç ve sürelerde ısıtılmış pirina yağlarının yağ asidi bileşiminde değişiklik meydana gelmediğini ve mikrodalga ısıtmanın yağ örneklerinde trans yağ asidi oluşumuna yol açmadığını ortaya koymuştur.

Endüstride, motor yağları, gresler, transmisyon ve hidrolik sıvıları, türbin yağları ve bitkisel yağların oksidasyon kararlılığının hızlı bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Uygulamada, oksidasyon stabilite testi (ASTM D943) standart olarak kullanılmaktadır. (Sharma ve Stipanovic, 2003) tarafından, farklı yağlayıcılar için, sıcaklık, basınç, ısıtma oranı, numune kütlesi, numune tavaşı tipleri, çözünebilir katalizör konsantrasyonu ve gaz akış oranı değerleri kullanılarak geliştirilen oksidasyon indüksiyon zamanı yöntemi de ASTM D943 standardı ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Geliştirilen bu yöntem, operatörün becerisine çok az bağımlıdır ve basit, hızlı ve güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Yağlayıcılardaki otooksidasyon ve açığa çıkan oksi-serbest radikalleri önlemek için yapay antioksidanların ilavesi yaygın olarak kullanılan en etkili yöntemlerdendir. Ülkemizde fiyatının düşüklüğü ve üretim fazlalığı nedeniyle en çok tercih edilen yağ olan ayçiçek yağı, dünya sıralamasında ise soya ve palm yağından sonra en çok üretilen ve tüketilen yağlar arasındadır. (Duman vd., 2015) tarafından yapılan çalışmada, ayçiçek yağının oksidasyon kararlılığı

üzerine Retinol Palmitat'ın etkisi Rancimat metoduyla incelenmiştir. Bu amaçla, ayçiçek yağı içine sırayla farklı oranlarda palmitat ilave edilerek, ayçiçek yağına göre, inhibisyon zamanlarındaki değişim incelenmiş ve farklı oranlarda farklı indüksiyon periyotlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

## **2.6. Döngüsel Ekonomi Üzerine Literatür Taraması**

Avrupa Komitesi tarafından 2014 yılında sunulan raporda; döngüsel bir ekonomiye geçiş sürecinde, ürün dizaynından yeni sektör ve pazar modellerine ve tüketim davranışlarının yeni biçimlerine kadar bir dizi alışkanlığın yeni teknolojiler kullanılarak değişmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ancak bu değişimin sadece teknoloji ile değil aynı zamanda örgüt, toplum, finans metotları ve politikalarında da tam bir sistematik değişim ve yenilikçi anlayışın gelişimine bağlı olduğu belirtilerek, döngüsel ekonomi sistemlerinin, ürünlerin katma değerini koruyarak israfı ortadan kaldıracığı belirtilmiştir.

Döngüsel ekonomi, doğası ve amacı itibariyle iyileştirici olan ve kaynakların döngüsel bir şekilde yönetildiği endüstriyel bir ekonomi olarak tanımlanabilmektedir. Döngüsel ekonomi kavramı, toplumun kaynaklardan maksimum değer almasını ve kaynak tüketimini reel ve gelecek ihtiyaçlara göre uyarlamasını sağlar. Atık önleme, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım (malzeme ve enerji) toplumun kaynaklarından maksimum değer almasını ve tüketimi reel ihtiyaçlara göre uyarlamasını mümkün kılar. Bu şekilde birincil kaynaklara yönelik talep optimize edilmiş olacak ve bununla bağlantılı olarak çevreye etki ve enerji kullanımı da hafifletilmiş olacaktır (PAGEV, 2015).

## **2.7. Atık Yönetimi Üzerine Literatür Taraması**

Dünyanın kaynakları sınırlıdır ve bunları özenle kullanmak önemlidir. Sınırlı kaynaklar için kullanışlı maddeleri bulmak ve çevreyi korumak biyokütle kaynaklarına güven duyulmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, yağlayıcılar için sürdürülebilirlik önemli bir kavramdır. Petrol, milyonlarca yılda oluşan sınırlı bir kaynaktır, ancak keşfedildiğinden beri hızlı bir şekilde tüketilmektedir. Buna

karşılık, oleokimyasallar, bitkilerdeki fotosentez yoluyla karbondioksit dönüşümüyle yenilenebilir kaynaklardan türetilmektedir. Petrol türevleri ise biyolojik olarak bozunabilir değildir ve kirliliğe neden olur. Buna ek olarak, petrokimyasal kullanımın karbon döngüsü açıktır, bu da atmosferdeki küresel ısınmaya katkıda bulunan CO<sub>2</sub> seviyesinde artışa neden olur. Bitkisel yağlar için serbest CO<sub>2</sub>, bitkiler tarafından fotosentez için kullanılanına eşittir ve bu döngü kapalıdır (Sharma ve Biresaw, 2016).

Günümüzde sürdürülebilir kalkınma ve yaşam döngüsü değerlendirmesi ilkesiyle uyumlu olarak, malzeme verimliliği doğal kaynakları, atık maddeleri ve endüstriyel yan ürünlerin sürdürülebilir kullanımını teşvik etmek için önemli bir konudur. (Prokkola vd., 2012) tarafından yapılan araştırmada, ormancılık ekipmanlarındaki zincir yağları ve beton kalıp yağı gibi farklı uygulamalarda, bitkisel yağ esaslı ürünlerin kullanımının biyolojik ve fiziko-kimyasal özellikleri açısından uygun olduğu belirtilmektedir. Biyolojik bozunabilirlik ve ekolojik ürünlerin niteliği çevre açısından değerlendirilen en önemli özelliktir. Sonuç olarak, incelenen geri dönüştürülmüş bitkisel yağların ölçülen tüm özellikleri, ürünlerin çevre dostu olduğunu göstermektedir.

Özellikle sanayiden kaynaklı tehlikeli atıkların miktarlarının mümkün olduğu kadar düşürülmesi için, atık önleme ve azaltma ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bunların bir kısmı literatürde önerilmekte ve sanayi kuruluşları tarafından benimsenmekte, bir kısmı da bireysel kuruluşlar tarafından kendi ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilmekte ve daha sonra uygulama olarak yayılmaktadır. Atık önleme ve azaltma uygulamaları ya da bir diğer adıyla mevcut en iyi teknikler (MET) sadece üretilen atık miktarlarının düşürülmesi sayesinde pozitif bir çevresel etki yapmakla kalmayıp, atık bertaraf masraflarının önlenmesi ya da azaltılması sayesinde de işletmelere ekonomik bir fayda sağlamaktadır (Yetiş, 2016).

Avrupa Çevre Ajansı Raporu (2014)'na göre ise; 'Döngüsel ekonomi' terimi, mümkün olduğunca az kayıplı bir üretim ve tüketim sistemini destekler. İdeal bir dünyada, hemen hemen her şey yeniden kullanılır, geri dönüştürülür veya başka

çıktılar üretmek üzere değerlendirilir. Ürünlerin ve bu ürünlerin üretim süreçlerinin yeniden tasarlanması israfı minimuma indirmeye ve kullanılmayan kısmı kaynağa çevirmeye yardımcı olacaktır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, çevre dostu atık bitkisel esaslı yağlardan elde edilen YAME'nin yağlama yağı olarak kullanıldığında, farklı yük ve hız koşullarında, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları ölçümleri yapılarak mineral BY ile karşılaştırılmaktadır. Yağlayıcı adayı YAME'nin kuru, sınır - karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki tribolojik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Pim Disk Aşınma Test Cihazı (PDATC) ile yapılan, sürtünme-aşınma deneylerinde kullanılan parametreler;

- Deneylerdeki yağlama şartları: yağsız (kuru), sınır - karışık sürtünme, sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları,
- Deneylerde uygulanan yükler: 5N, 10N, 15N,
- Deneylerde uygulanan kayma hızları:  $100d^{-1}$ (0.0785 m/s),  $300d^{-1}$  (0.2356 m/s),  $600d^{-1}$ (0.471 m/s)

olarak seçilmiştir. PDATC'de yapılan deneylerde kayma mesafesi olarak 1000 m seçilmiştir. Deney süresi olarak ise seçilen bu kayma mesafesine göre  $100 d^{-1}$  hızı için yaklaşık 3 saat 54 dakika,  $300 d^{-1}$  hızı için yaklaşık 1 saat 18 dakika,  $600 d^{-1}$  hızı için yaklaşık 36 dakika olarak gerçekleşmiştir. Üç tekrarlı olarak yapılan bu deneylerden elde edilen sayısal sürtünme katsayısı, aşınma miktarı ve yüzey pürüzlük ölçüm sonuçları bu tez çalışmasının temel verilerini oluşturmuştur.

Tez çalışmasında zamana bağlı olarak elde edilen deneysel sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) verilerinin, zaman-frekans ortamında incelenmesi amacı ile KZFD metodu kullanılmıştır. Bu dönüşüm sayesinde, sayısal halde bulunan bir sinyalin zaman ve frekans ortamındaki özellikleri belirlenebilmektedir.

Ayrıca, test numunelerinin temas yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri alınarak metalografik incelemeleri ve yağlayıcı temas açısı gibi fiziksel özelliklerine yönelik ölçümlerle de çalışma desteklenmiştir.

### 3.1. Deney Malzemeleri

Deneyleerde yağlayıcı olarak BY ve YAME, PDATC'daki yağlamalı deneyleerde kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan yağlayıcılardan BY, Körfez / KOCAELİ'de faaliyet gösteren Tüpraş Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş., YAME ise İzmir'de faaliyet gösteren DB Tarımsal Enerji A.Ş. firmalarından hibe yoluyla elde edilmiştir. BY ve YAME'ye ait analiz verileri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Deney numunesi BY analiz değerleri (Tüpraş)

Özellik	Birim	Değer	Sınır	Spesifikasyon
Görünüş		Bağdaşık		Gözle Muayene
Renk		1.5	En çok	ASTM D 1500
Yoğunluk (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	Raporlanır		TS 1013 EN ISO 3675 TS EN ISO 12185 ASTM D 4052
Karbon Kalıntısı	% Ağırlık	0.1	En çok	TS EN ISO 10370 ASTM D 4530
Parlama Noktası	°C	180	En az	TS EN ISO 2592 ASTM D 92
Akma Noktası	°C	-12	En çok	TS 1233 EN ISO 3016 ASTM D 5950 ASTM D 97
Kinematik Viskozite (40°C)	cSt	16.23		TS 1451 EN ISO 3104 ASTM D 445
Kinematik Viskozite (100°C)	cSt	3.2-4.0		TS 1451 EN ISO 3104 ASTM D 445
Viskozite İndeksi		94	En az	TS ISO 2909 ASTM D 2270
Kükürt	% Ağırlık	0.03-5.5		TS ISO 8754 IP 336
Doymuş Hidrokarbon İçeriği	% Ağırlık	50-89		TS 6596
Hidrokarbon İçeriği, Aromatik	% Ağırlık	15	En çok	TS 6519
NOACK Uçuculuk	%	35	En çok	TS 13489 ASTM D 5800
Asit Sayısı	mg KOH/g	0.1	En çok	TS 2432 EN 12634 ASTM D 664
Baz Sayısı	mg KOH/g	1.2	En çok	TS 5655 ISO 3771 ASTM D 2896
Su	mg/kg	150	En çok	TS 6147 EN ISO 12937 ASTM D 6304



Çizelge 3.2. Deney numunesi YAME analiz değerleri (DB Tarımsal Enerji A.Ş.)

Özellikler	Birim	Değer aralığı		Analiz Sonuçları
		Min.	Max.	
Tan (toplam asit numarası)	mg KOH/g	-	0,5	0,38
İyot değeri	g iyot/100g	0	120	119
Su içeriği	mg/kg	0	500	300
Ester içeriği	% (m/m)	96,5	-	98,2
Alevlenme noktası	°C	101	-	180
Viskozite (40 °C)	cSt	3,5	5	4,18
Yoğunluk (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	860	900	884,2
Serbest gliserol	% (m/m)	-	0,02	0,005
Monogliserit	% (m/m)	-	0,7 (yaz);0,4 (kış)	0,33
Digliserit	% (m/m)	-	0,2	0,11
Trigliserit	% (m/m)	-	0,2	0,003
Çoklu doymamış me	% (m/m)	-	1	0,077
Linolenik asit içeriği	% (m/m)	-	12	6,27
Toplam kirlilik	mg/kg	-	24	5,5
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-	5 (yaz);5 (kış)	-5
Kükürt	mg/kg	-	10	3,25
Fosfor	mg/kg	-	4	0,35
Sodyum	mg/kg	-	-	0
Potasyum	mg/kg	-	5	0,27
Kalsiyum	mg/kg	-	-	1,52
Magnezyum	mg/kg	-	5	0,56
Setan sayısı	-	51	-	55,1
Bakır şerit korozyon	derece	Sınıf 1	-	1A
Metanol	% (m/m)	-	0,2	0
Oksidasyon kararlılığı	h	8	-	8
Sülfatlanmış kül	% (m/m)	-	0,02	0,002

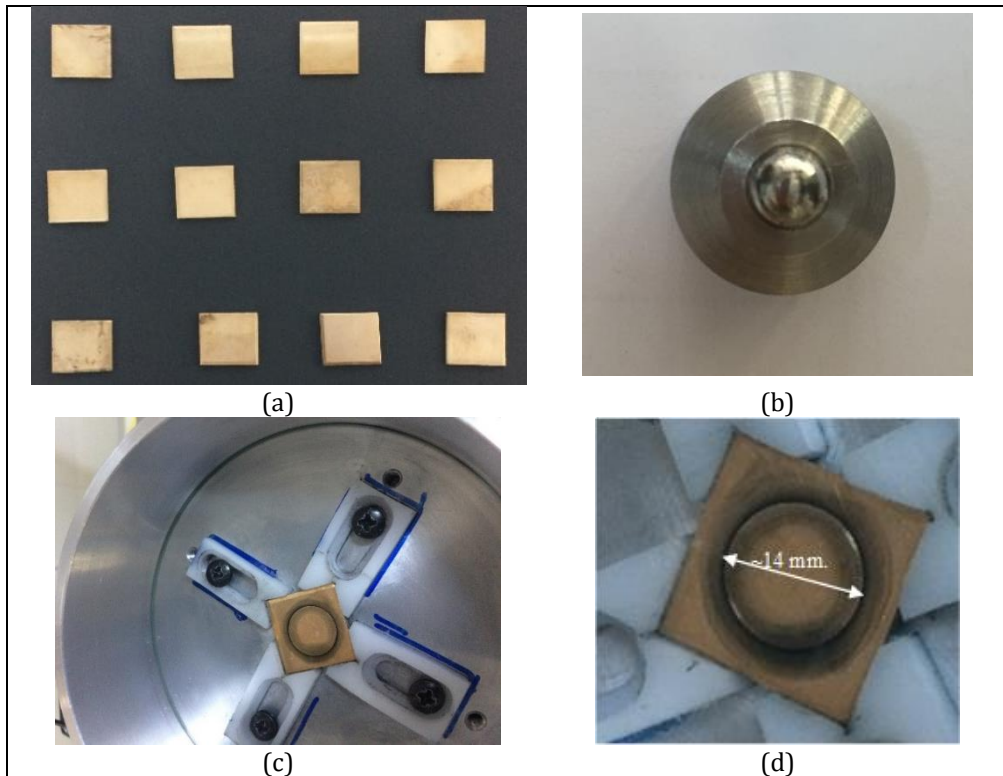
PDATC'de karşı eleman malzemesi olarak yatak üretiminde kullanılan bakır esaslı yatak malzemeleri kullanılmıştır. Söz konusu bu yatak malzemeleri Şahin Motor Yatakları A.Ş. Gebze/ Kocaeli, hibe yoluyla temin edilmiştir. Bu malzemeler disk üzerine dört adet civata ve tutucularla bağlanmıştır. Bu yatak malzemesinin kabaca %91'ini Bakır (Cu), %8'ini Kalay (Sn), %1'ini ise Nikel (Ni) elementleri oluşturmaktadır. Kullanılan CuSn8Ni1 alaşım, yatak malzemesinin genel özellikleri Çizelge 3.3'de verilmektedir. Bu tip yataklar çok tabakalı olup seçilen yatak malzemesinin alt yüzeyinde bulunan tabaka kısmı C1010 çelik malzemedan üretilmektedir. Bu yatak malzemesinin seçilmesinin nedeni tez çalışmasında kullanılacak yağlayıcı ve/veya yağ katkı maddesi adayının bir motorda yağlayıcı veya biyodizel yakıtı olarak kullanılması durumunda bu yatak malzemelerindeki

tribolojik davranışını görebilmektedir. DB Tarımsal Enerji AŞ.'den ve Tüpraş Türkiye Petrol Raf. A.Ş'den hibe olarak temin edilen bu numuneler biyodizel yakıtının üretiminde de kullanılmaktadır.

Çizelge 3.3. CuSn8Ni1 alaşımlı yatağın özellikleri(Şahin Motor Yatakları A.Ş.)

Malzeme tanımı	Bakır-Kalay-Nikel alaşımlı yatak malzemesi
Çelik kalınlık	1.92 - 1.97 mm.
Alaşım kalınlık	0.42 - 0.62 mm.
Çelik sertlik (ortalama)	135 HB
Alaşım sertlik (ortalama)	120 HB

Deneyler yatak malzemelerinin alaşımlı olan ön yüzlerinde aşınma testi uygulanmıştır. Numune boyutları 20 mm x 20 mm x 2 mm'dir (Şekil 3.1a). Aşındırıcı olarak ise krom çelik bilye (AISI 52100,100Cr6) kullanılmıştır (Şekil 3.1b). Aşındırıcı küresel çelik bilyenin teknik ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4'te, verilmiştir. Aşındırıcı bilye çapı 6 mm, bilyenin kat etme mesafesi olarak yatak malzemesi üzerinde oluşturduğu yuvarlak aşınma izinin çapı ise yaklaşık 14 mm'dir (Şekil 3.1.c,d).



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan (a)yatak malzemesi, (b)aşındırıcı bilye, (c)aşınmış yatak malzemesi ve (d) aşınma izi çapı

Çizelge 3.4. AISI 52100, 100Cr6 aşındırıcı küresel bilyenin teknik ve mekanik özellikleri (İtimat Bilye Rulman)

Özellikler	Değer
C	0,90-1,10
Si	0,15-0,35
Mn	0,25-0,45
P	0,025(max)
S	0.025(max)
Cr	1,30-1,60
Sertlik (HRC)	64
En yüksek çalışma sıcaklığı(°C)	468
Kritik çekme dayanımı (GPa)	2.24
Elastik Modülü (GPa)	203.46
Özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	7.83

Deney numunelerinin temizlenmesinde kullanılan ultrasonik temizleme cihazı ve örnek numune temizlenme görüntüsü Şekil 3.2.'de verilmiştir. Yatak malzemesi numuneleri ultrasonik temizleme ünitesinde iki kez 50°C'de 15 dakika süre ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuştur.



Şekil 3.2. Deney numunelerinin temizlendiği ultrasonik temizleme cihazı

Test edilecek yatak malzemesi numunelerinin deney öncesi ve deney sonrasındaki yüzey pürüzlülükleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Triboloji Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.3'te fotoğrafı verilen TİME TR200 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Numunelerin aritmetik ortalama pürüzlülük değeri  $R_a$ , ölçüm uzunluğundaki en yüksek 5 adet pürüz tepesi ile en çukur 5 pürüzlerinin ortalama pürüz yüksekliği  $R_z$  ve en büyük pürüz yüksekliği  $R_t$  değerleri  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Pürüzlülük

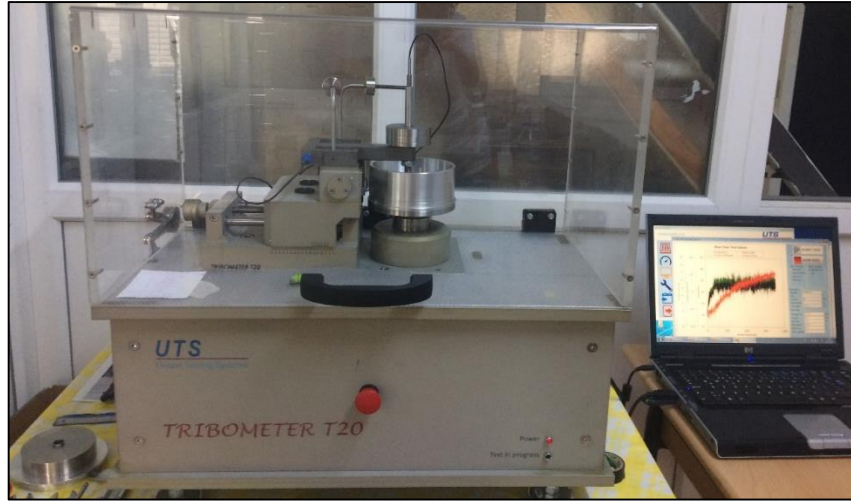
ölçümleri her bir numunenin beş farklı bölgesinden deney öncesinde ve deney sonrasında ölçülerek aritmetik ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve örnek ölçüm

### 3.2. Pim Disk Aşınma Test Cihazı (PDATC)

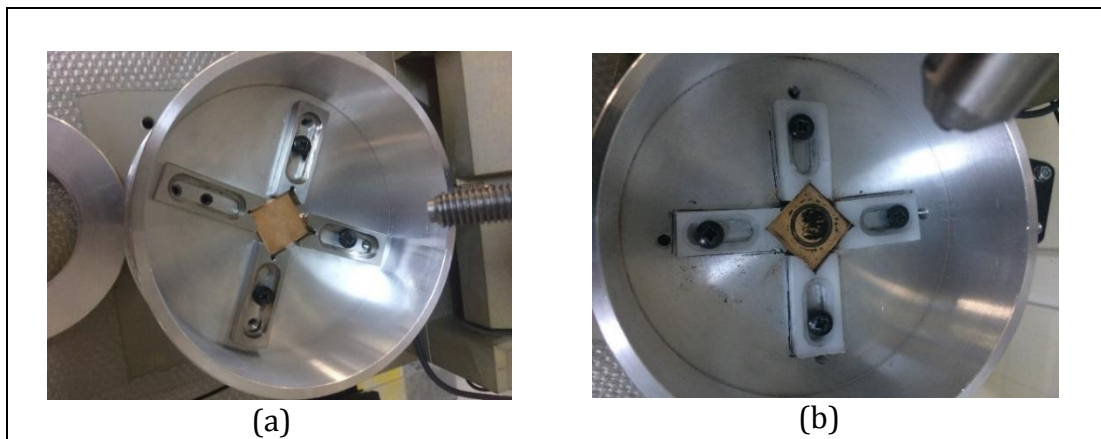
Bu çalışmada tribolojik deneyleri gerçekleştirebilmek için ASTM G-99 (Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus) standardına uygun testler yapabilen UTS T20 marka Pim Disk Aşınma Test Cihazı (PDATC) kullanılmıştır. Birbiri ile temasta olan malzemelerin sürtünme, aşınma ve yağlama gibi tribolojik özelliklerinin farklı yükleme şartlarında ve farklı hızlarda araştırılmasına olanak sağlayan PDATC ve cihazın detay fotoğrafı Şekil 3.4'te verilmektedir. Deneylerde, aşındırıcı uç olarak kullanılan krom çelik bilyenin (AISI 52100,100Cr6) her deney şartından sonra temas bölgesinin değiştirilmesine özen gösterilmiştir. Deneylerde elde edilen sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları cihazın UTS Turquoise v2.0 isimli programı ile bilgisayara Micsosoft Excell formatında depolanabilmektedir.



Şekil 3.4. Pim disk aşınma test cihazı(PDATC)

### 3.3. Deney Şartları

Aşındırma testleri, PDATC kullanılarak, farklı yağlama şartlarında, üç farklı yük ve üç farklı hız kullanılarak ortam sıcaklığında ( $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) yapılmıştır. Deneylerde uygulanan yükler 5N, 10N ve 15N olup, kayma hızları ise  $100\text{d}^{-1}$ (0.0785 m/s),  $300\text{d}^{-1}$ (0.2356 m/s),  $600\text{d}^{-1}$ (0.471 m/s) olarak seçilmiştir. Deneylerde kayma mesafesi olarak 1000m seçilmiştir. Tüm deneyler üç defa tekrarlanarak ortalama değerler kullanılmıştır. Deney öncesi ve sonrası test edilmiş yatak malzemesi görüntüleri Şekil 3.5’de verilmiştir.



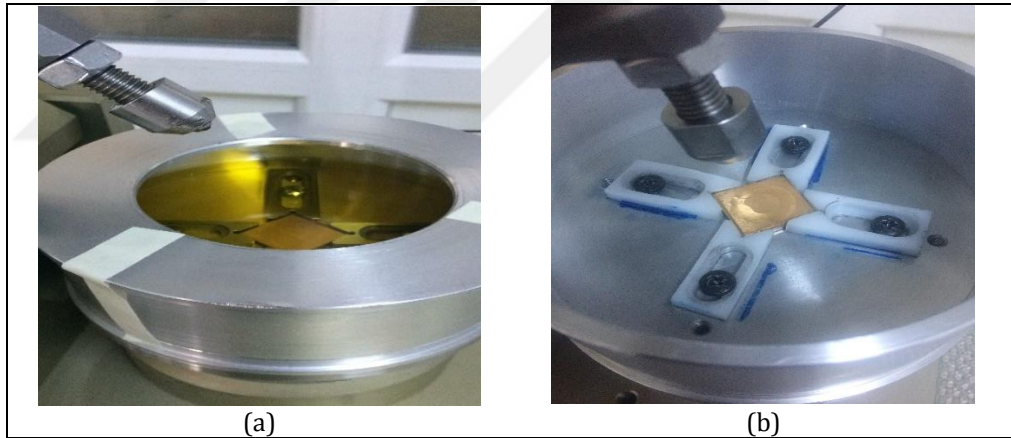
Şekil 3.5. Aşındırma deneyi öncesi (a) ve sonrası (b)yatak numunelerinin genel görüntüsü

Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında ise, deney başlamadan önce bilye ve numune arasına atık YAME ve BY olmak üzere iki farklı yağlayıcıdan 300 ml.



deney yapılan hazne içine doldurulmuş ve sızdırmazlık için kapak ve gövde arasında teflon bantlar kullanılmıştır. Böylece deney süresince yağ miktarının sabit kalması sağlanmıştır (Şekil 3.6.a).

Sınır-karışık yağlama şartında, deney başlamadan önce bilye ve numune arasına atık YAME ve BY olmak üzere iki farklı yağdan bir damlalıkla deney numunesi yatak malzemesinin yüzeyine bir damla yağlayıcı damlatılmıştır. 1000 metrelik kayma mesafesi boyunca her 250 m' de bir damla yağlayıcı tekrar damlatılmıştır. Testlerde kullanılan bu yağ damlasının miktarının belirlenmesi için hassas terazi ile 20 adet damla yağ örneği tartılmıştır. Yaklaşık bir damla yağın ortalama kütleinin 15 mg olduğu görülmüştür. Örnek test numune yağı, yatak malzemesi üzerine deney öncesi damlatılmıştır. Yağlayıcı damlatıldıktan sonra el ile disk birkaç tur döndürülerek yağlayıcının aşındırıcı bilyenin izleyeceği yol üzerine dağılması sağlanmıştır (Şekil 3.6.b).

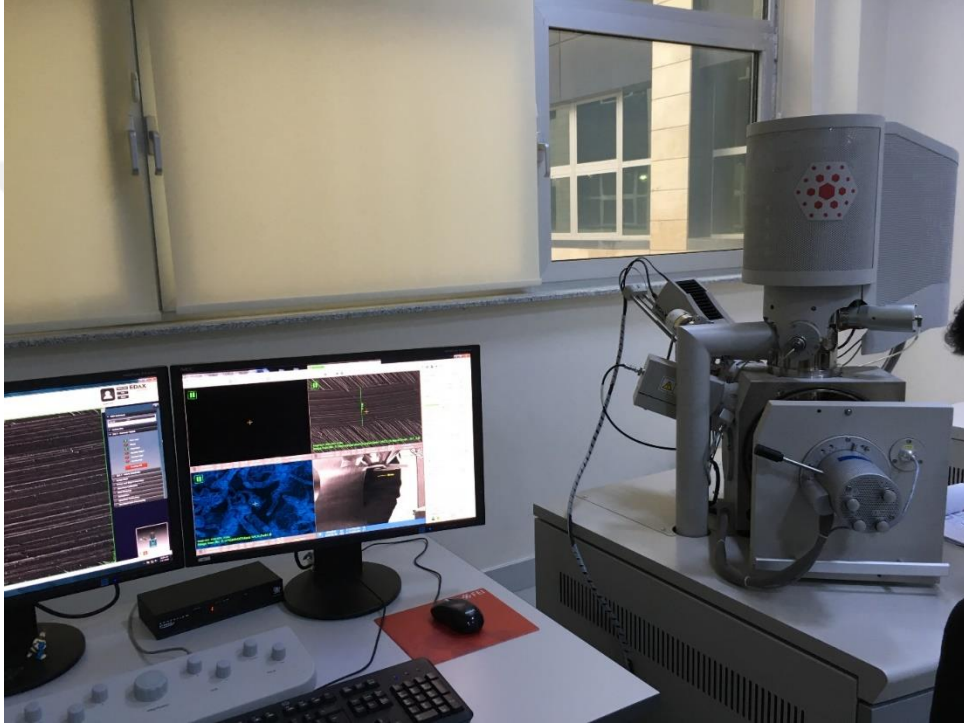


Şekil 3.6. Yağlama şartları a)Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında yağlayıcı eklenmiş deney numunesi; b)Sınır-karışık yağlama şartında örnek yağlayıcı damlatılmış ve bilyenin izleyeceği yol üzerine dağıtılması ile yağlanmış deney numunesi

Aşınma miktarları kütle kaybı prensibine göre belirlenmiş olup, deneyler sırasında sürtünme katsayıları da kaydedilmiştir. Aşınma miktarının tespit edilebilmesi için deneylerden önce ve sonra tüm numuneler ultrasonik temizleme cihazında hegzan ile 2 kez 15 dakika süre ile 50°C'de yıkanmış, sıcak hava ile kurutulduktan sonra 0.0001g hassasiyetli terazide tartılmıştır.

### 3.4. Numunelerin Yüzey İncelemeleri

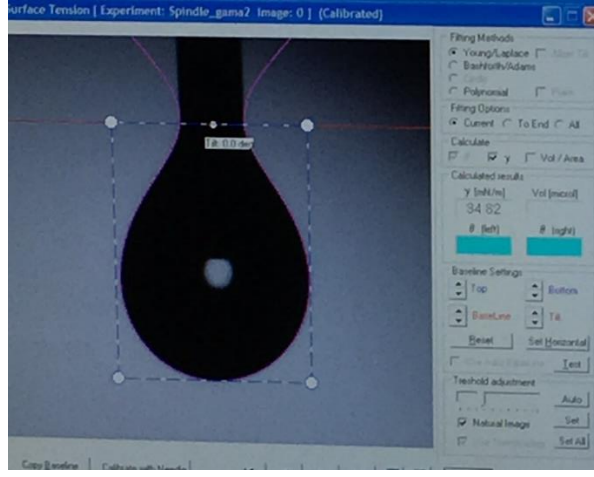
Deneyleerde kullanılan yatak malzemesi numunelerin yüzey incelemeleri Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Araştırma Merkezi'nde (YETEM) bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüzey fotoğrafları ve Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) yüzey analizleri FEI Quanta FEG 250 EDAX/EDS ile yapılmıştır(Şekil 3.7).



Şekil 3.7. SEM cihazı

### 3.5. Temas Açısı Ölçümü

Temas açısı ve yüzey gerilimi ölçümleri SDÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda KSV CAM 101 model temas açısı ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz bilgisayar kontrollü olup yüzey-ara yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümü yapabilmektedir. Bu cihaz yüzey gerilimi ölçümünde asılı damla tekniğini kullanmaktadır(Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Yüzey geriliminin ölçümü



#### **4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA**

Bu tez çalışması kapsamında tez konusu ile ilgili genel bilgiler ve KZFD ilkesi 1. Bölüm’de, literatür taraması 2. Bölüm’de, deneysel çalışmanın ayrıntıları da 3. Bölüm’de özetlenmiştir. Bu bölümde ise ortalama sürtünme katsayılarının ( $\mu$ ) kayma mesafesine göre değişimleri, sürtünme katsayısı sinyallerinin zaman frekans analiz sonuçları, kütle kaybı, yatak malzemesi yüzeylerinin SEM görüntü ve EDS malzeme analizleri, pürüzlülük ölçüm sonuçları, aşınma oranı değerleri, temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri ve diğer deneysel elde edilen bulgular sunulmuştur.

Elde edilen  $\mu$  değerlerinin kayma mesafesine göre değişimleri Şekil 4.1-4.10.’da verilmektedir. Deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için grafikler hem sabit yük ile farklı hızlardaki  $\mu$  değişimleri, hem de sabit hız ile farklı test yüklerindeki  $\mu$  değişimlerine göre ayrı ayrı çizilmiştir. Ayrıca tüm yağlama şartlarında elde edilen ortalama  $\mu$  değerlerinin hem sabit yük ile farklı hızlardaki, hem de sabit hız ile farklı test yüklerindeki sonuçları da Şekil 4.11-4.12’deki grafiklerde gösterilmiştir.

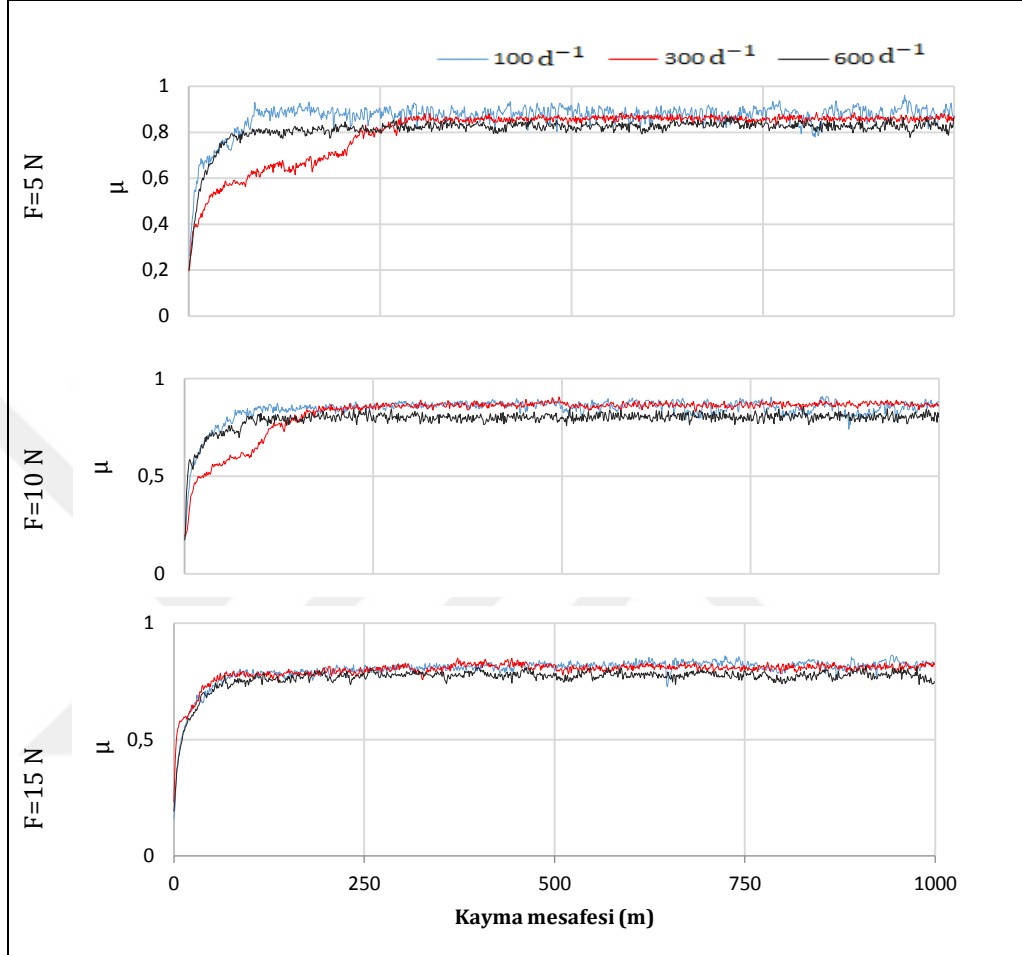
#### **4.1. Sürtünme Katsayısı Deney Sonuçları**

##### **4.1.1 Kuru (Yağsız) sürtünme katsayısı deney sonuçları**

Yağlayıcıların sürtünme katsayılarına etkisini görebilmek için yağlayıcı kullanmadan kuru sürtünme deneyleri de çalışmaya ilave edilmiştir. Kuru sürtünme (yağsız) testlerine (Şekil 4.1-2) ait  $\mu$  eğrisi, sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı deneylerle kıyaslandığında en yüksek ortalama değere sahiptir. Kuru sürtünme testlerine ait  $\mu$  önce başlangıç aşamasında aniden artmakta, daha sonra ise hemen hemen sabit kalmaktadır. Bunun sebebi olarak yüzeylerin birbirine alışması ve çalışmanın rejim haline ulaşması olarak açıklamak mümkündür.

Tüm kuru sürtünme deney şartlarında elde edilen  $\mu$  değerleri literatürdeki bilgilere paralel olarak, sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında

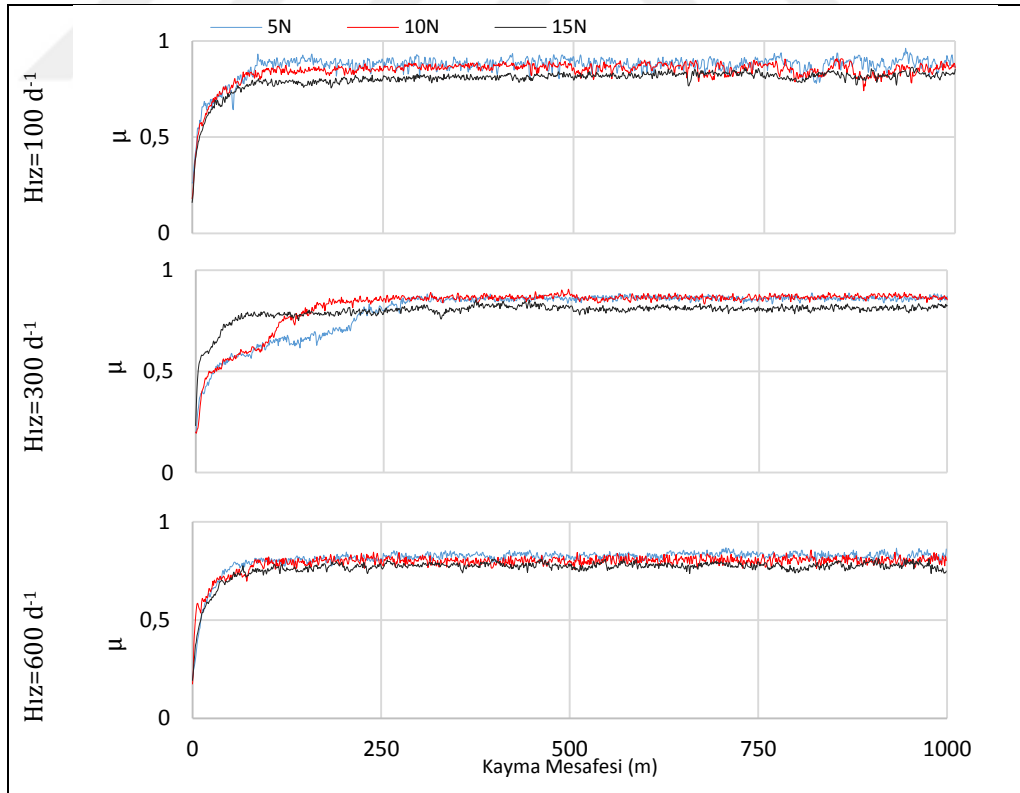
elde edilen sürtünme katsayılarından oldukça büyük değerlerde olduğu rahatlıkla görülmektedir. Kuru yağlama şartlarında ortalama  $\mu$  değerleri yaklaşık 0.76 ile 0.86 arasında değişmektedir.



Şekil 4.1. Kuru sürtünmeli deneylerde bütün yüklerdeki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Deney başlangıcı olan 0-250 m bölgesinde 5 N ve 10 N yüklerde hızın  $\mu$ 'e etkisi olduğu, 15 N yükte ise daha az etkisi olduğu Şekil 4.1'de görülmektedir. 5 N yük bölgesinde 300  $d^{-1}$  hızda en düşük  $\mu$  değerleri elde edilirken, 600  $d^{-1}$  hızda artmakta, 100  $d^{-1}$  da ise en yüksek değerlere çıkmaktadır. 250 m'den sonra ise (Şekil 4.1) en düşük yük olan 5 N yükte daha büyük hızlarda kayma mesafesi boyunca daha düşük  $\mu$  değeri gözlenmiştir. En düşük hız olan 100  $d^{-1}$  ise daha büyük ve kayma mesafesi ile artan bir  $\mu$  değişimi göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük  $\mu$  değeri 100  $d^{-1}$  hızda olurken 300 ve 600  $d^{-1}$  hızlarda daha düşük ve birbirine yakın değerde olduğu

görülmektedir. 10 N yükte ise 0-250 m bölgesinde 5 N yükteki  $\mu$ 'ye benzer bir değişim göstermiştir. 0-250 m bölgesinde 300 d<sup>-1</sup> hızda en düşük  $\mu$  değerleri elde edilirken, 600 d<sup>-1</sup> hızda artmakta, 100 d<sup>-1</sup> da ise en yüksek değerlere çıkmaktadır. 250 m'den sonra ise 300 d<sup>-1</sup> hızlarda en yüksek, 100 ve 600 d<sup>-1</sup> hızlarda birbirine yakın ve 300 d<sup>-1</sup> hıza göre daha düşük  $\mu$  değişimi sergilemiştir (Şekil 4.1.). Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında, en büyük  $\mu$  değeri 100 d<sup>-1</sup> hızda olurken, 300 d<sup>-1</sup> hızda daha düşük ve 600 d<sup>-1</sup> hızda en düşük değerde olduğu görülmektedir. En büyük yük olan 15 N'de ise 0-250 m bölgesinde tüm hızlarda birbirine yakın  $\mu$  değişimi sergilemiştir. 250 m'den sonra ise 100 ve 300 d<sup>-1</sup> hızlarında birbirine yakın ve 600 d<sup>-1</sup> hıza göre daha büyük  $\mu$  değişimi sergilemiştir (Şekil 4.1.). Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük  $\mu$  değeri 100 ve 300 d<sup>-1</sup> hızda aynı değerde olurken, 600 d<sup>-1</sup> hızda daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Tüm yüklerdeki ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5 N'de yükte 100 d<sup>-1</sup> hızda en yüksek, en küçük ise 15 N'de 600 d<sup>-1</sup> hızda elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Kuru sürtünmeli deneylerde bütün hızlardaki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Kuru sürtünmeli deneye ait hız verileri incelendiğinde; deney başlangıcı olan 0-250 m bölgesinde 100 d<sup>-1</sup> ve 300 d<sup>-1</sup> hızlarda yükün  $\mu$ 'e etkisi olduğu, 600 d<sup>-1</sup> hızda ise ise çok büyük etkisi olmadığı Şekil 4.2'de görülmektedir.

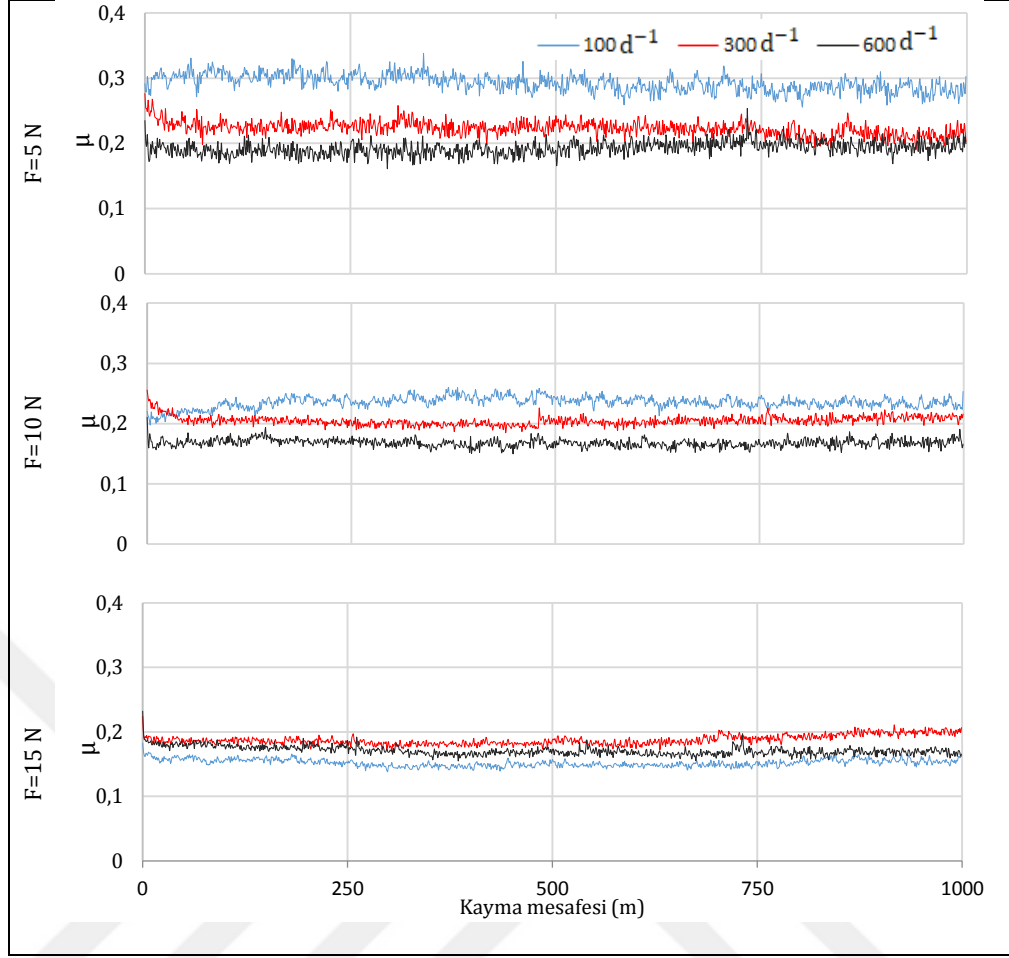
250 m'den sonra ise (Şekil 4.2) en düşük hız olan 100 d<sup>-1</sup>'de değişim birbirine yakın olmakla beraber 15 N en düşük, en yüksek ise 5 N yükte olduğu söylemek mümkündür. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise en büyük  $\mu$  değer en düşük yük değer olan 5 N'de, en düşük ortalama  $\mu$  değer ise en büyük yük olan 15 N'de olduğu görülmektedir.

300 d<sup>-1</sup> hızda 250 m'den sonra ise (Şekil 4.2) en büyük yük olan 15 N'de en düşük  $\mu$  değerleri, diğer yüklerde ise birbirine yakın  $\mu$  değişimi sergilediği görülmektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise en büyük  $\mu$  değer 10 N'de, en düşük ortalama  $\mu$  değer ise 15 N'de olduğu görülmektedir.

En büyük hız olan 600 d<sup>-1</sup> 'de (Şekil 4.2) ise hem 0-250 m bölgesinde hem de 250-1000 m bölgesinde birbirine yakın  $\mu$  değişimi sergilemiştir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise en büyük  $\mu$  değer 5 N'de, en düşük ise 15 N'de olduğu görülmektedir. 15 N'de yatak yüzeyindeki tabakanın bilyeye sıvanarak bir yağlayıcı gibi davrandığından daha düşük  $\mu$  elde edildiği anlaşılmaktadır.

#### **4.1.2. Sınır-Karışık YAME sürtünme katsayısı deney sonuçları**

Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcılı ortalama  $\mu$  değerleri yaklaşık 0.15 ile 0.29 arasında değişmektedir.

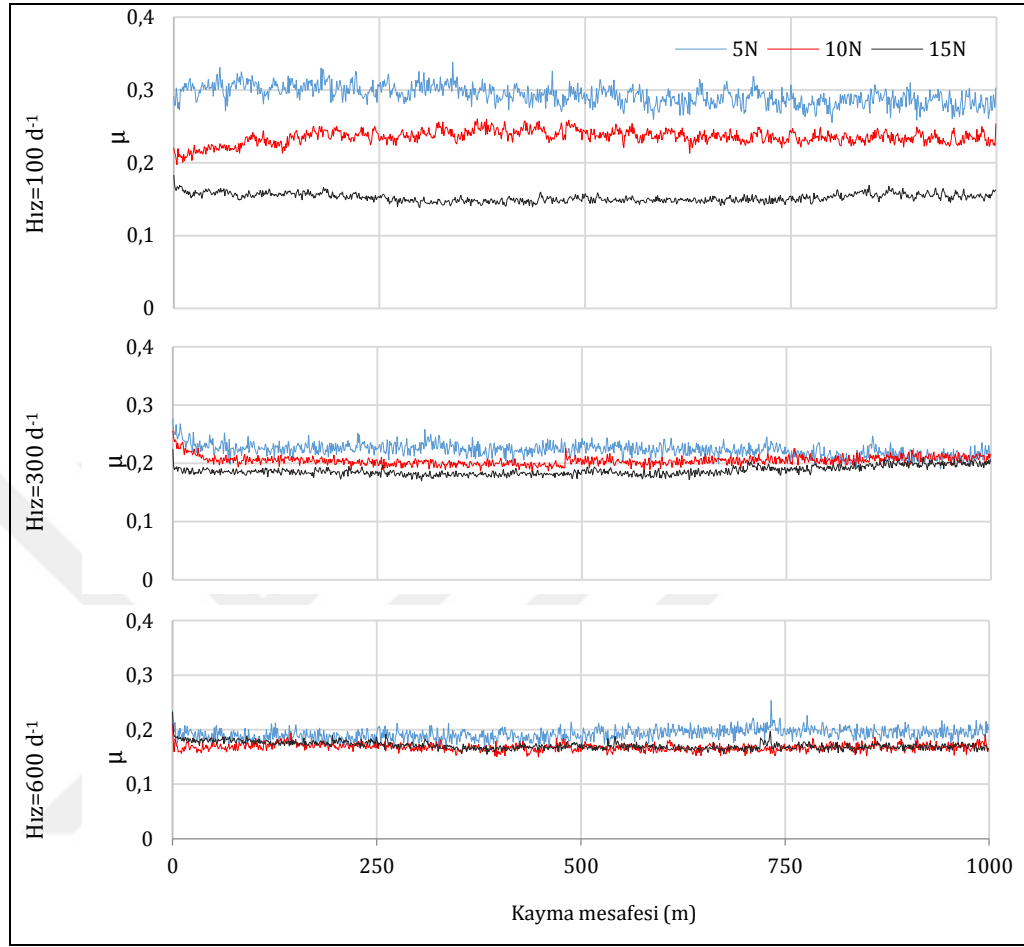


Şekil 4.3. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcılı deneye ait yük verileri (Şekil 4.3) incelendiğinde 5 ve 10 N yüklerde, daha büyük hızlarda daha düşük  $\mu$  göstermektedir. Yine bu yüklerde yükte kayma mesafesi boyunca, tüm hızlarda ( $100 \text{ d}^{-1}$ ,  $300 \text{ d}^{-1}$ ,  $600 \text{ d}^{-1}$  hızlarda) önemli bir değişim göstermemektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5 ve 10 N için hız artıkcça  $\mu$  değerleri azalmaktadır.

15 N yük ve  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda kayma mesafesi boyunca en düşük  $\mu$  ve  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda ise en yüksek  $\mu$  değişim göstermektedir(Şekil 4.3). En yüksek  $\mu$  değeri 5 N yük ve  $100 \text{ d}^{-1}$  hız değerinde görülmektedir. 15 N'de ise ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük  $\mu$  değeri  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda olurken,  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda ise en düşük değerde olduğu görülmektedir. Tüm yüklerdeki ortalama  $\mu$  değerleri

(Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise 5 N’de yükte  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda en yüksek, en küçük ise 15 N’de  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda elde edilmiştir.



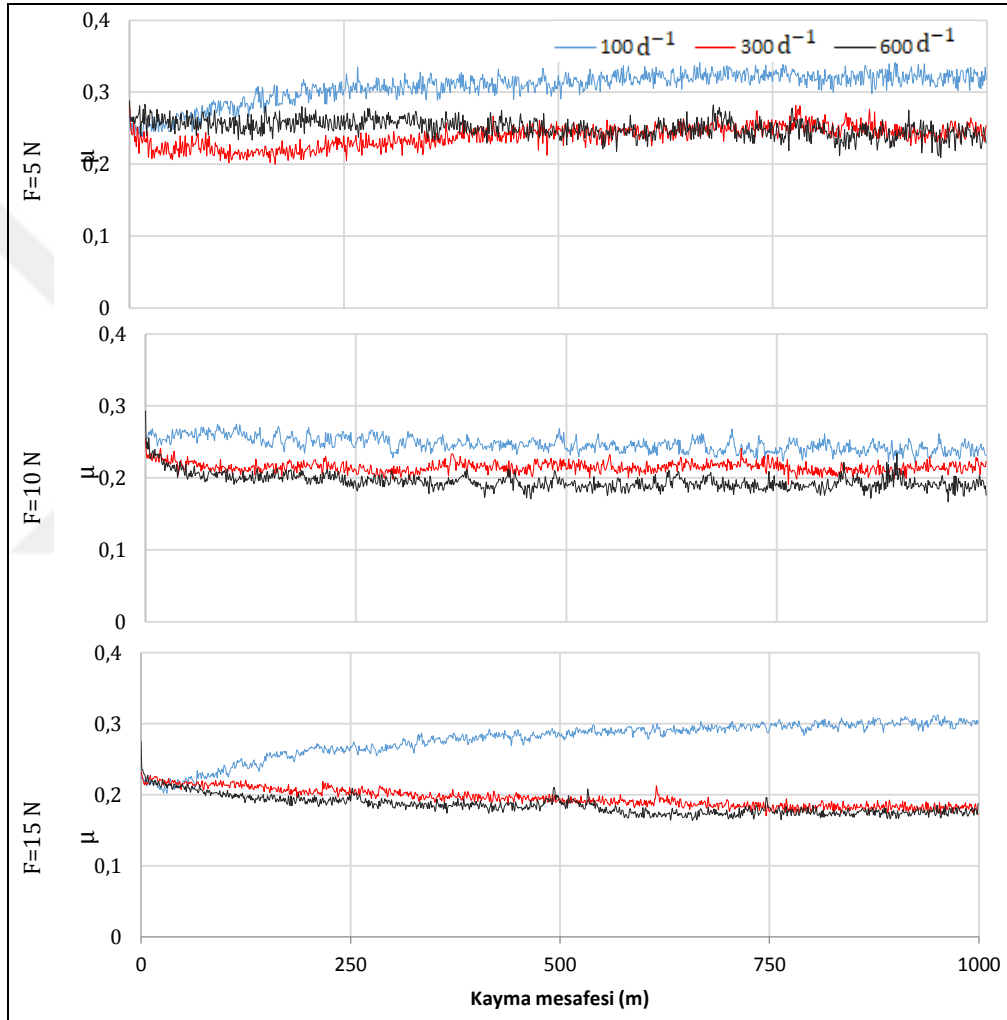
Şekil 4.4. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME deneylerine ait bütün hızlardaki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcılı deneye ait hız verileri (Şekil 4.4) incelendiğinde,  $100 \text{ d}^{-1}$  ve  $300 \text{ d}^{-1}$  hızlarda yük arttıkça kayma mesafesi boyunca daha düşük  $\mu$  değişimi göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise  $100$  ve  $300 \text{ d}^{-1}$  hızlarda yük arttıkça  $\mu$  değerleri azalmaktadır. Stribeck eğrisinde de (Şekil 1.3.) sınır yağlama bölgesinde hızın artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı görüldüğünden literatür ile test sonuçları uyum sağlamaktadır (Temiz, 2014; Soydan ve Ulukan, 2013; Koç, 2008; Kurbanoğlu, 2009).  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda tüm yüklerdeki  $\mu$  değişimleri birbirine yakın değerlerde olmakla birlikte 5 N yükte en büyük  $\mu$  değişimleri sergilemiştir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise 5 N yükte en yüksek, 10 N’de en düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum göz önüne alındığında sınır-

karışık yağlama şartlarında YAME deneye ait verilere göre genellikle yük arttıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır.

#### 4.1.3. Sınır-Karışık BY sürtünme katsayısı deney sonuçları

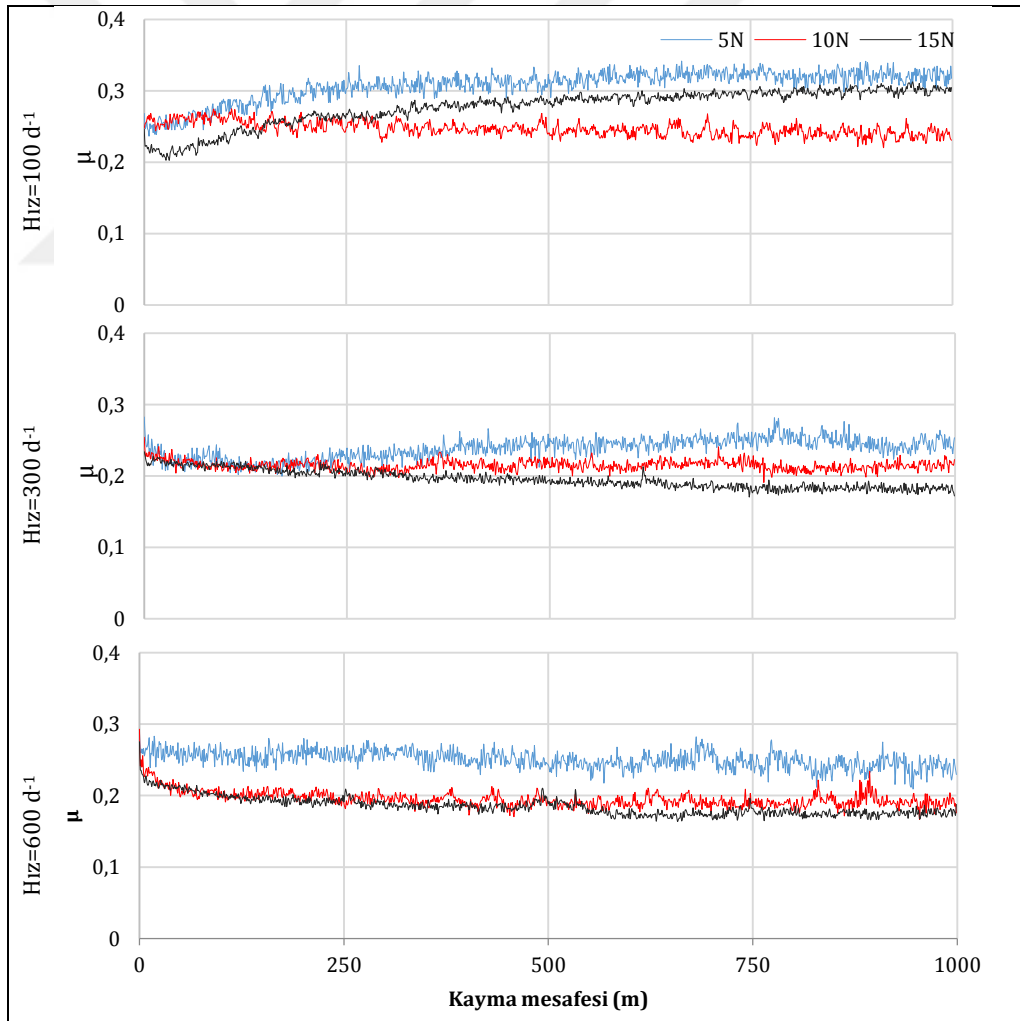
Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcılı, ortalama  $\mu$  değerleri yaklaşık 0.18 ile 0.30 arasında değişmektedir.



Şekil 4.5. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY deneylerine ait bütün yüklerdeki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcılı deneye ait  $\mu$  yük verileri (Şekil 4.5) incelendiğinde 5 N'de, en yüksek  $\mu$  değişimi en düşük hız olan  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda görülmektedir.  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda kayma mesafesi artarken düşük bir eğilimi göstermesine rağmen  $300 \text{ d}^{-1}$  hıza göre daha yüksek  $\mu$  değişimi sergilemektedir.

Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise en düşük  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda, en yüksek  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda ortalama  $\mu$  değerleri elde edilmiştir.  $10 \text{ N}$ 'de, en yüksek  $\mu$  değişimi  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda,  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda kayma mesafesi artarken bir düşüş eğilimi göstererek en küçük  $\mu$  değişimi sergilemektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise hız artıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır.  $15 \text{ N}$ 'de, kayma mesafesi artması ile bir artış değişimi göstererek en yüksek  $\mu$  değişimi  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda,  $300$  ve  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda birbirine yakın değişim göstermekle beraber, kayma mesafesi artarken düşük eğilim göstererek en küçük  $\mu$  değişimi  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda olduğu grafikten görülebilmektedir(Şekil 4.5). Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise hız artıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır. Tüm yüklerdeki ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise  $5 \text{ N}$ 'da yükte  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda en yüksek, en küçük ise  $15 \text{ N}$ 'da  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY deneylerine ait bütün hızlardaki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

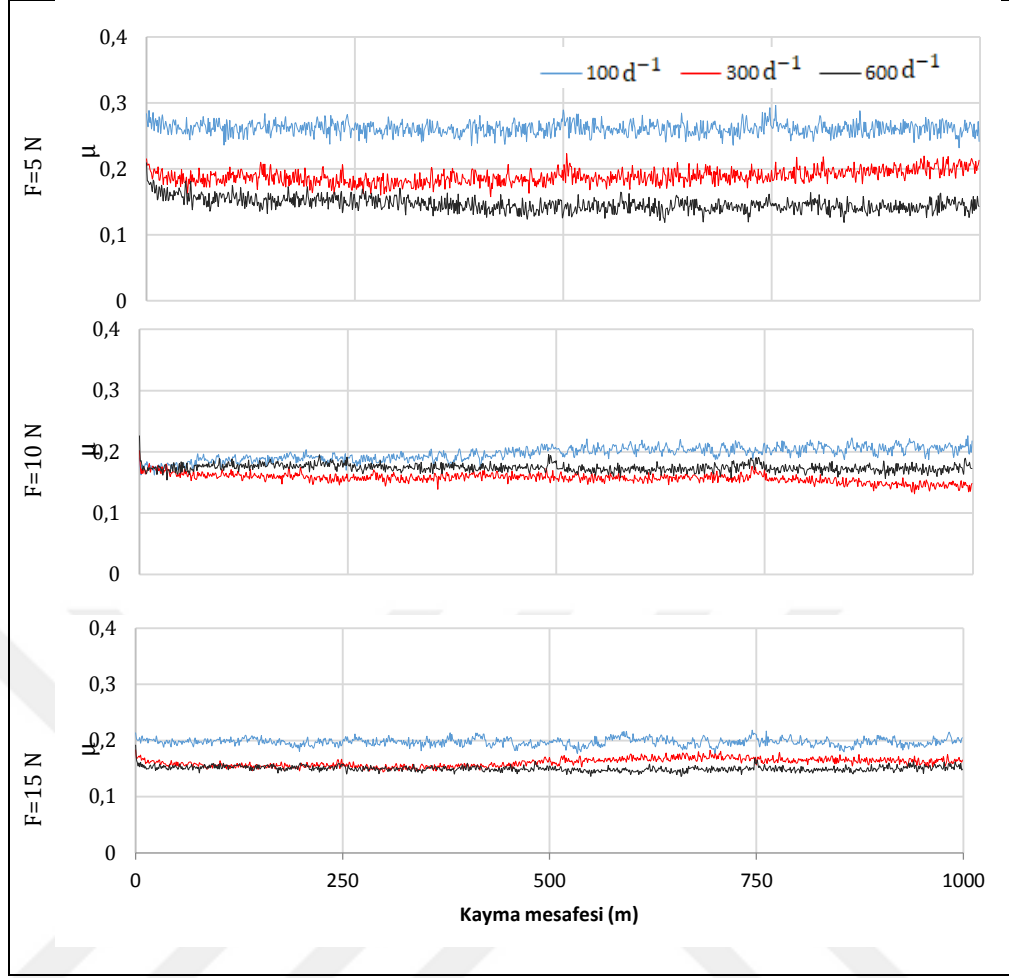


Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcı deneylerine ait hız verileri (Şekil 4.6) incelendiğinde, 100 d<sup>-1</sup> hızda 5 N ve 15 N yükte  $\mu$  değeri zamanla artan bir değişim göstermektedir. Bu yükler için  $\mu$  değişimleri birbirine yakın değerlerde olmakla birlikte 5 N yükte en büyük  $\mu$  değişimleri sergilemiştir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük 5 N'de olurken, en düşük 10 N yükte olduğu görülmektedir.

300 d<sup>-1</sup> hızda 5 N yükte  $\mu$  değeri zamanla artan bir değişim göstermektedir. 15 N yükte ise  $\mu$  değeri az da olsa bir azalma eğilimi göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 300 ve 600 d<sup>-1</sup> hızlarda yük arttıkça  $\mu$  değerleri azalmaktadır. Tüm hızlardaki ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 100 d<sup>-1</sup> hızda 5 N'de en yüksek, en küçük ise 600 d<sup>-1</sup> hızda 15 N'de elde edilmiştir. Bu durum göz önüne alındığında sınır-karışık yağlama şartlarında BY deneye ait verilere göre genellikle yük arttıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır.

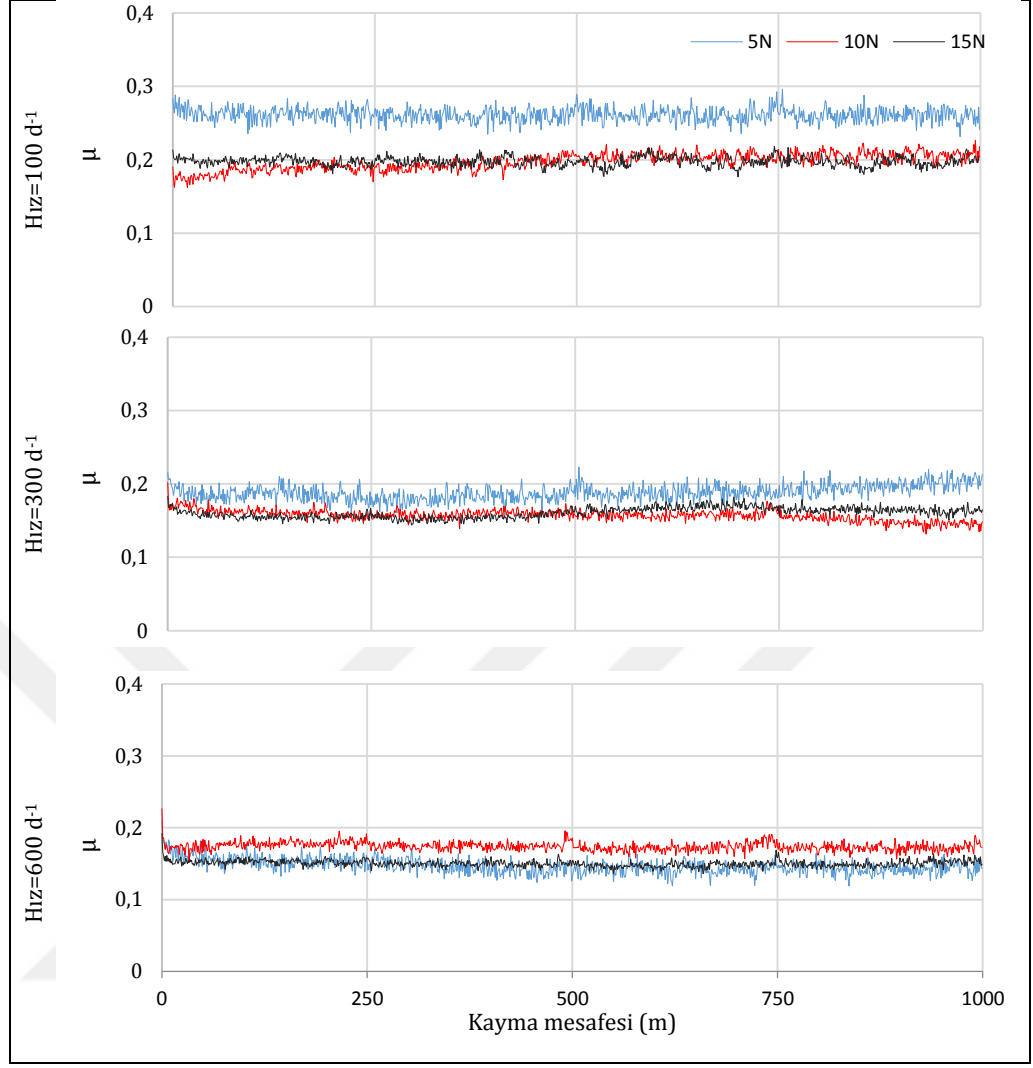
#### **4.1.4. Sıvı YAME sürtünme katsayısı deney sonuçları**

Sıvı YAME yağlayıcı, ortalama  $\mu$  değerleri yaklaşık 0.15 ile 0.26 arasında değişmektedir.



Şekil 4.7. Sıvı YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sıvı YAME yağlayıcı ortamı yağlama şartları ile yapılan deneye ait  $\mu$  değerlerinin yük ve hıza göre değişimleri (Şekil 4.7) incelendiğinde, 5 ve 15 N yüklerde, daha büyük hızlarda daha düşük  $\mu$  elde edilmiştir. Yine bu yüklerde kayma mesafesi boyunca, tüm hızlarda ( $100 \text{ d}^{-1}$ ,  $300 \text{ d}^{-1}$ ,  $600 \text{ d}^{-1}$  hızlarda) önemli bir değişim göstermemektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5 ve 15 N için hız artıçça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır. 10 N yük,  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda kayma mesafesi boyunca en düşük  $\mu$  gösterirken 10 N yük,  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda ise en yüksek  $\mu$  değişimi göstermektedir(Şekil 4.7). 10 N'de ise ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük  $\mu$  değeri  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda olurken,  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda ise en düşük değerde olduğu görülmektedir. Tüm yüklerdeki ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5 N'de yükte  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda en yüksek, en küçük ise 5 N'de  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Sıvı YAME deneylerine ait bütün hızlardaki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sıvı YAME yağlayıcı ortamlı yağlama şartları deneyine ait  $\mu$  değerleri hıza göre değişimleri (Şekil 4.8) incelendiğinde,  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda, kayma mesafesi boyunca 5N'de en yüksek değerde, 10 N ve 15 N de ise birbirine yakın olmakla birlikte daha düşük  $\mu$  değişimi göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda, 5 N'de en yüksek, 10 ve 15 N yüklerde ise daha düşük olup birbirine yakın değerdedir.

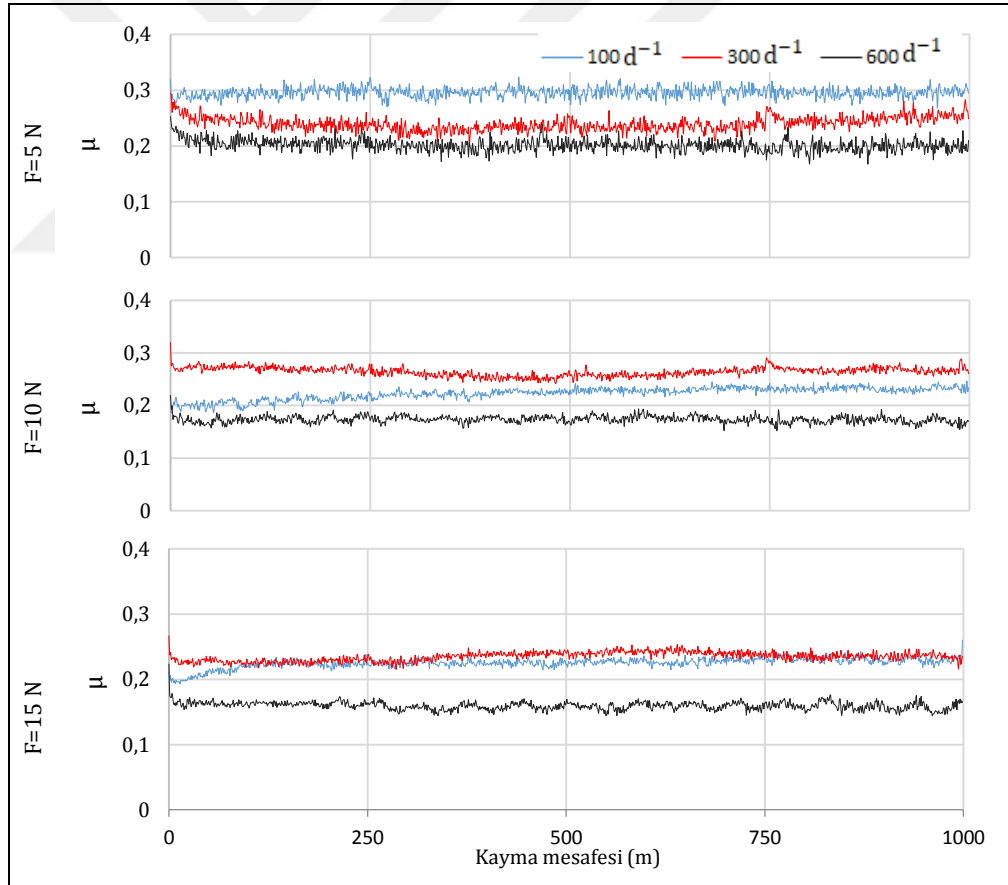
$300 \text{ d}^{-1}$  hızda 5 N kayma mesafesi boyunca daha büyük bir  $\mu$  değerleri gösterirken, 10 ve 15 N yüklerde ise birbirine yakın değişim göstermektedir. Bu hız için ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştığında ise 5 N yükte en yüksek, 10 N'de en düşük değerler elde edilmiştir.

600 d<sup>-1</sup> hızda 10 N yükte kayma mesafesi boyunca daha büyük bir  $\mu$  değerleri gösterirken, 5 ve 15 N yüklerde ise birbirine yakın değişim ve daha düşük bir  $\mu$  değerleri göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 10 N yükte en yüksek, 5 N'de en düşük değerler elde edilmiştir.

Bu durum göz önüne alındığında sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında YAME deneye ait verilere göre genellikle yük arttıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır.

#### 4.1.5. Sıvı BY sürtünme katsayısı deney sonuçları

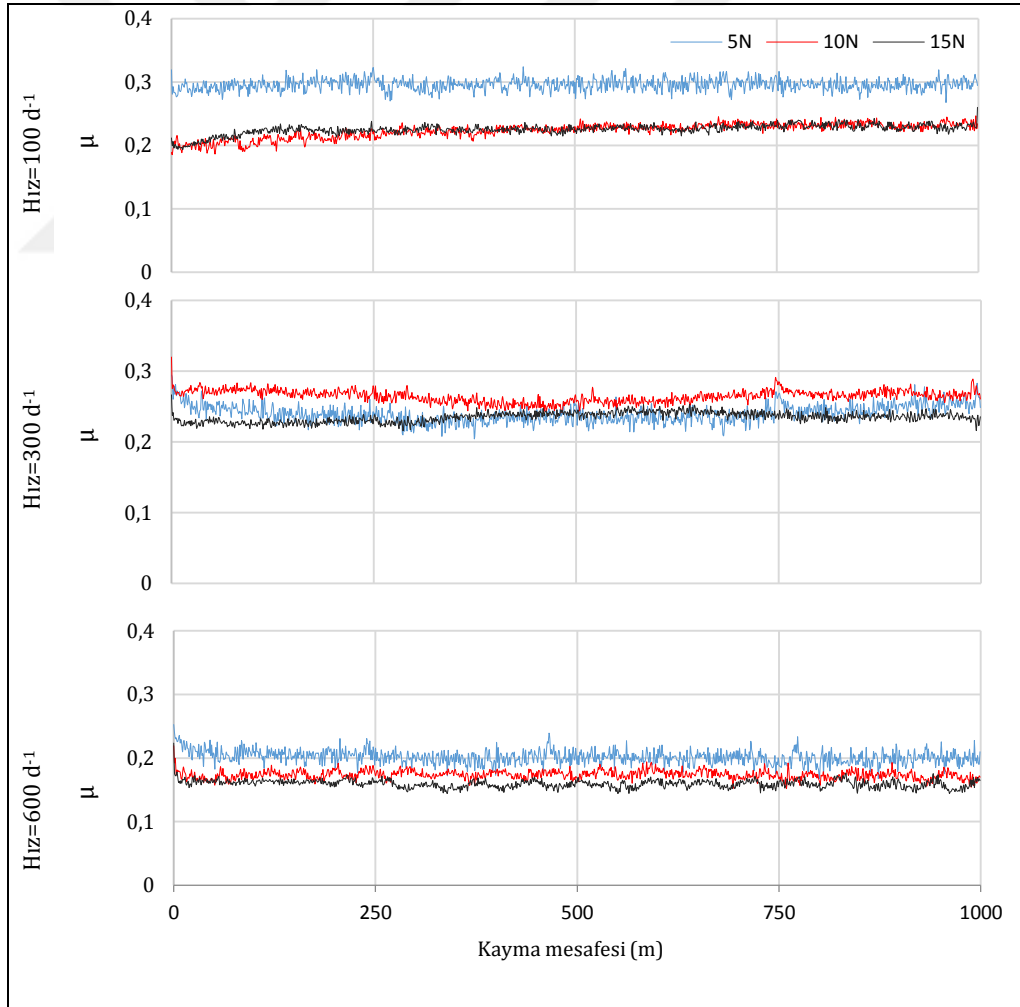
Sıvı BY yağlayıcı, ortalama  $\mu$  değerleri yaklaşık 0.15 ile 0.29 arasında değişmektedir.



Şekil 4.9. Sıvı BY deneylerine ait bütün yüklerdeki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sıvı BY yağlayıcı ortamlı yağlama şartları ile yapılan deneye ait yük verileri incelendiğinde (Şekil 4.9) 5 N yükte, daha büyük hızlarda daha düşük  $\mu$

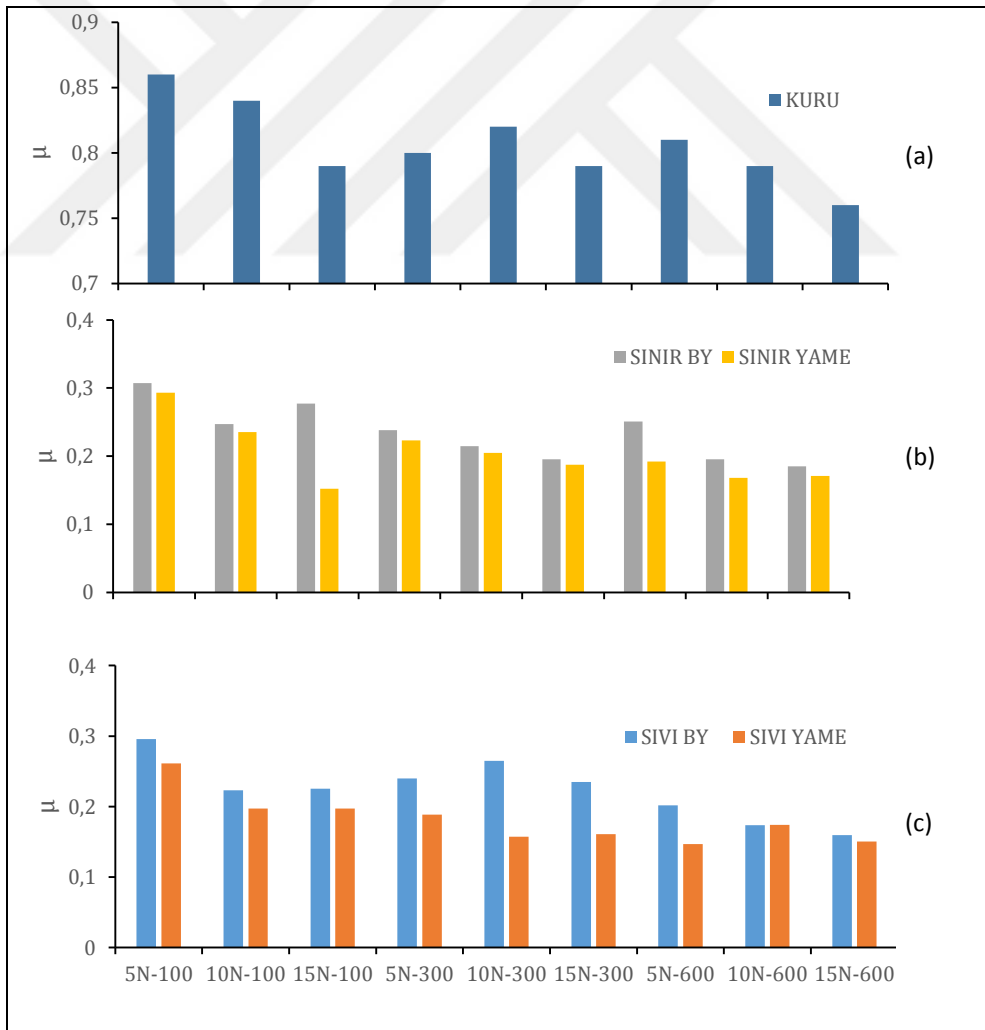
göstermektedir. Yine aynı yükte kayma mesafesi boyunca önemli bir değişim göstermemektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5N için hız artıka  $\mu$  değerleri azalmaktadır. 10 N yük ve 600 d<sup>-1</sup> hızda kayma mesafesi boyunca en düşük  $\mu$  ve 300 d<sup>-1</sup> hızda ise en yüksek  $\mu$  değişim göstermektedir(Şekil 4.9). Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 10 N için en yüksek 300 d<sup>-1</sup> hızda, en düşük 600 d<sup>-1</sup> hızda gerçekleşmiştir. 15 N yükte 600 d<sup>-1</sup> hızda kayma mesafesi boyunca en düşük  $\mu$  ve 300 d<sup>-1</sup> hızda ise en yüksek  $\mu$  değişim göstermektedir(Şekil 4.9). 15 N’de ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise en büyük  $\mu$  değeri 300 d<sup>-1</sup> hızda olurken, 600 d<sup>-1</sup> hızda ise en düşük değerde olduğu görülmektedir. Tüm yüklerdeki ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 5 N’de yükte 100 d<sup>-1</sup> hızda en yüksek, en küçük ise 15 N’de 600 d<sup>-1</sup> hızda elde edilmiştir.



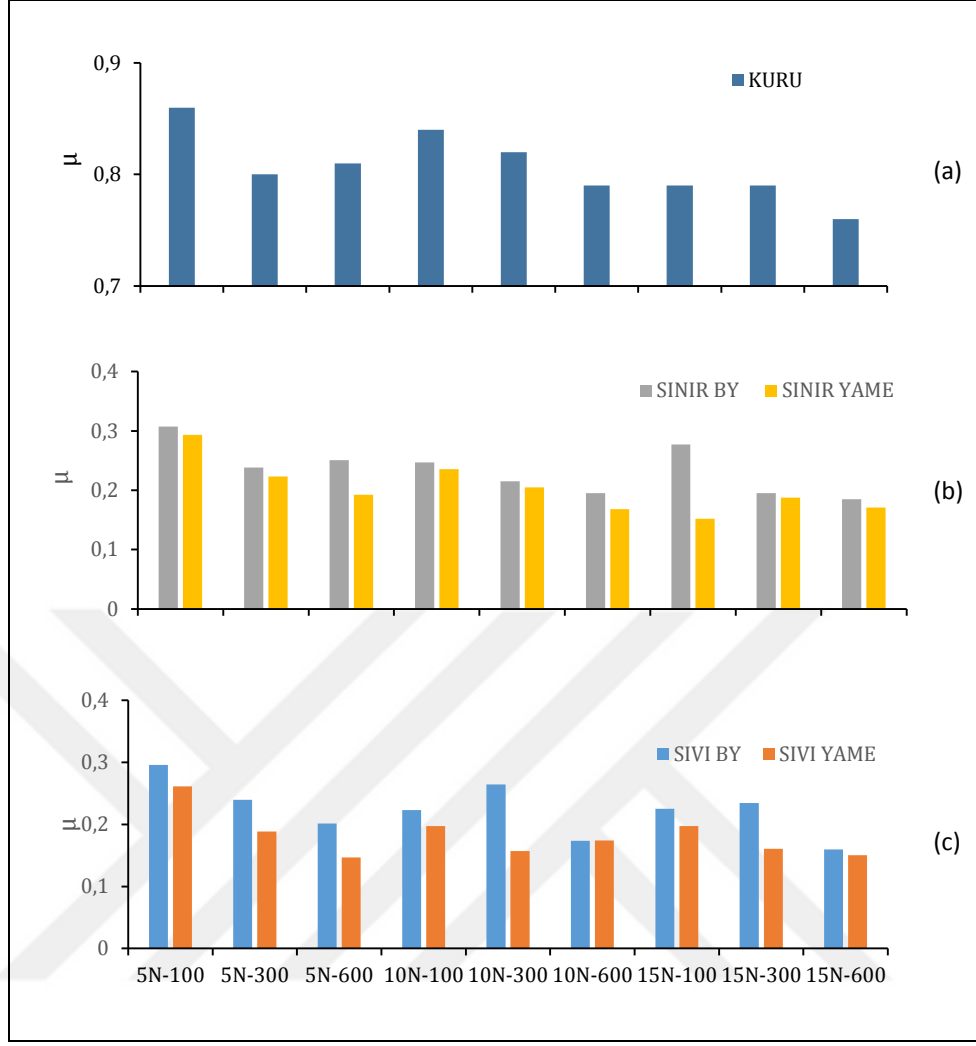
Şekil 4.10. Sıvı BY deneylerine ait bütün hızlardaki  $\mu$  - kayma mesafesi değişimi

Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları BY ile yapılan deneye ait hız verileri incelendiğinde (Şekil 4.10), 100 d<sup>-1</sup> ve 600 d<sup>-1</sup> hızlarda yük arttıkça kayma mesafesi boyunca daha düşük  $\mu$  değişimi göstermektedir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 100 ve 600 d<sup>-1</sup> hızlarda yük arttıkça  $\mu$  değerleri azalmaktadır. 300 d<sup>-1</sup> hızda tüm yüklerdeki  $\mu$  değişimleri birbirine yakın değerlerde olmakla birlikte 10 N yükte en büyük  $\mu$  değişimleri sergilemiştir. Ortalama  $\mu$  değerleri (Şekil 4.11-12) karşılaştırıldığında ise 10 N yükte en yüksek, 15 N'de en düşük değerler elde edilmiştir.

Bu durum göz önüne alındığında sıvı BY yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında ile yapılan deneye ait verilere göre genellikle yük arttıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmaktadır.



Şekil 4.11. Tüm deneylere ait bütün yüklerdeki  $\mu$  ortalama değişimi



Şekil 4.12. Tüm deneylere ait bütün hızlardaki  $\mu$  ortalama değişimi

**Kuru deney şartlarında;** ortalama  $\mu$  değeri bütün yüklerde hız arttıkça genelde azalmıştır(Koç, 2008). 100  $d^{-1}$  ve 600  $d^{-1}$  hız değerinde ise yük arttıkça  $\mu$  azalmıştır. Bunun sebebi olarak aşınma partiküllerinin bilyeye sıvanarak bu yatak alaşımı aşınma partiküllerinin katı yağlayıcı gibi davranması ile açıklamak mümkündür. 300  $d^{-1}$  hız değerinde ortalama  $\mu$ , yük arttıkça önce biraz yükselip sonra 15 N yükte tekrar azalmıştır.

**Sınır- karışık YAME yağlayıcı deney şartlarında;** ortalama  $\mu$  değeri her yük değerinde 100  $d^{-1}$  hızda en büyük değeri göstermiştir. Hız artması ile 300  $d^{-1}$  hızda bir miktar düşerek, 600  $d^{-1}$  hızda ise en düşük ortalama  $\mu$  değeri elde edilmiştir. Bu durum hızın artması ile yağlama şartlarının iyileştiğini, sınır-karışık yağlamadan karışık yağlama rejimine geçişin sağlandığını

göstermektedir(Şekil 4.11). Birbiri ile temasta olan iki metal yüzeyi arasına belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü bir madde (yağlayıcı) koyulup, mevcut yük ve kayma hızı koşullarında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, sürtünme direncinin üç temel bileşeni olduğu belirtilmektedir. Bu bileşenler; adhezif bileşen, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direnci şeklinde ortaya çıktığı vurgulanmaktadır. Sınır-karışık sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısının, adhezif değme alanlarına paralel olarak (doğru orantılı) azaldığı belirtilmektedir. Kayma hızı arttıkça adhezif temas alanları da küçülmekte ve direncin azaldığı belirtilmektedir(Soydan ve Ulukan, 2013; Ameen, 2017).

**Sınır- karışık BY yağlayıcıli deney şartlarında;** en büyük ortalama  $\mu$  değeri 5 N yük ve  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda göstermiştir. Yük artması ile genelde ortalama  $\mu$  değerinde bir azalma olduğunu söylemek mümkündür. Yağlama şartlarının  $300 \text{ d}^{-1}$  iyileşmesine sonra,  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda kötüleşmesine yüksek hız nedeni ile yağ damlasının yüzeyden savrulması, yüzeydeki yağlayıcı miktarının azalması ve merkezkaç kuvvetinin yüzeyde tutunma kabiliyetinin azaltması ile açıklanmaktadır(Ameen 2017).

**Sıvı YAME yağlayıcıli deney şartlarında;** 5 N yükte ortalama  $\mu$  değeri  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda en büyük değeri gösterirken, hız arttıkça azalmıştır. Bu test sonuçlarına göre, hızın artması ile yağlama şartlarının daha iyileştiği, sınır-karışık yağlamadan karışık yağlama rejimine geçiş yapılması ile açıklamak mümkündür.

**Sıvı BY yağlayıcıli deney şartlarında;** 5 N yükte ortalama  $\mu$  değeri  $100 \text{ d}^{-1}$  hızda en büyük değeri gösterirken, hız arttıkça değişkenlik göstermesine rağmen genelde bir azalma göstermiştir. 10 N ve 15 N yükte ortalama  $\mu$  değeri  $600 \text{ d}^{-1}$  hızda en küçük değeri gösterirken,  $300 \text{ d}^{-1}$  hızda ortalama  $\mu$  değerinde artış göstermiştir.

Yağlanmış yüzeylerdeki aşınmaya ilişkin temel kavram, yağlama maddesi tarafından üretilen yüzey ayrılma derecesidir. Yağlamadaki en önemli grafik Stribeck eğrisi, ayırma ve sürtünme durumunu açıklar. Düşük kayma hızlarında, yağlayıcı ile yağlanan yüzeyler kısmen veya aralıklı olarak temas eder ve

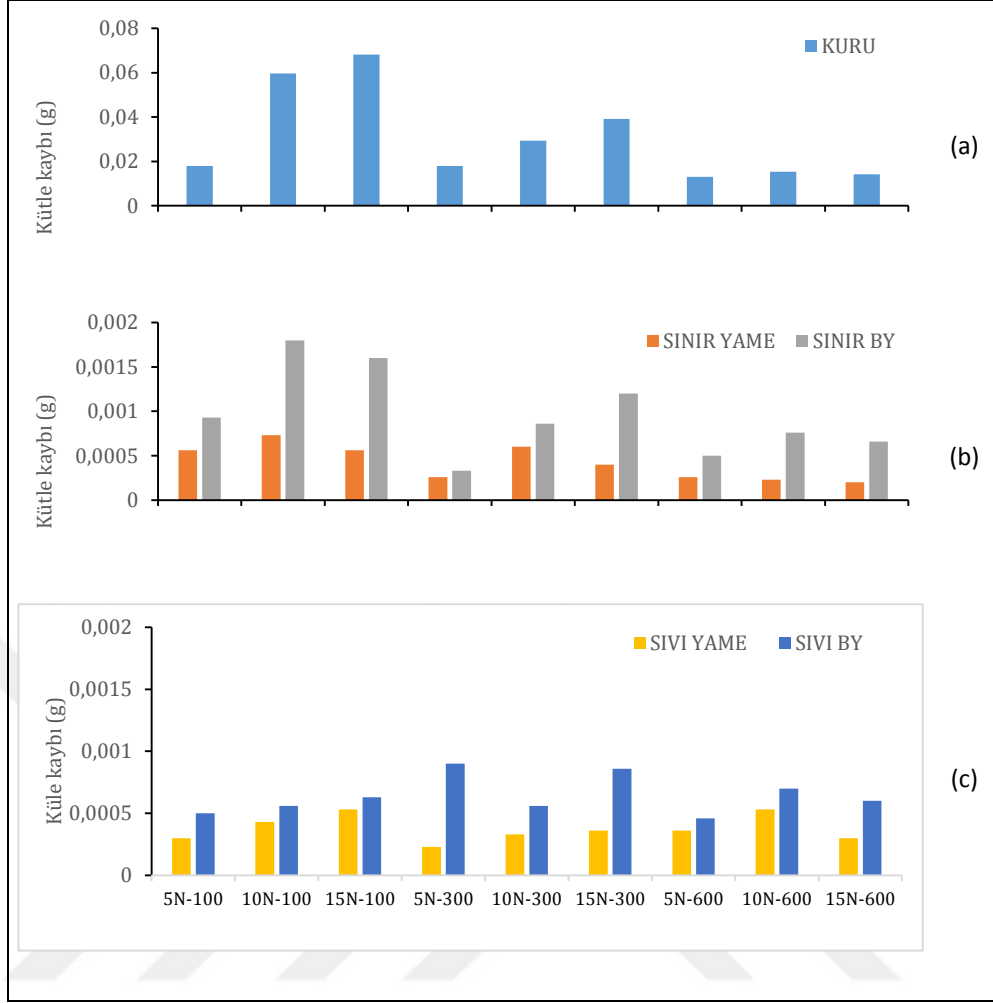


sürtünme katsayısı yüksek değerlere ulaşır. Çünkü yağlayıcı sürtünme yüzeylerini etkili bir şekilde birbirinden ayırmamakta ve pürüz tepeleri birbiri ile kenetlenmektedir. Bu nedenle, düşük hız bölgesinde sınır-karışık yağlama ile tanımlanmaktadır. Bu rejimde yüzeyler tam olarak yağlanmaktadır. Hız arttıkça yüzeyleri birbirinden ayıran yağ filmi daha kalınlaşır ve yüzey ayrımı daha sık görülür. Bu karışık yağlama rejimi olarak tanımlanır. Hız ve yağ viskozitesi arttıkça, yağlayıcı sürtünme yüzeylerinin sabit bir şekilde ayrılmasını sağlayabilir, sürtünme daha sabit ve düşüktür. Buna hidrodinamik veya sıvı film yağlama rejimi denir (Kenneth, 2014).

Salman (2011) yaptığı doktora tezi çalışmasında, Pim Disk Aşınma cihazında Dökme Demir malzemeli pim ve Çelik disk arasında yağlayıcı olarak hem soya yağı hem de soya yağı esaslı metil ester kullanmıştır. Sınır yağlama şartlarında soya yağının yağlama şartları için daha uygun olduğu ve mineral baz yağa göre düşük ortalama  $\mu$  değerleri verdiğini, ayrıca soya yağı esaslı metil ester yağları ortalama sürtünme katsayılarını inceleyip katkı maddesi olarak kullanıldığında mineral baz yağa göre düşük  $\mu$  değerleri verdiğini belirtmiştir.

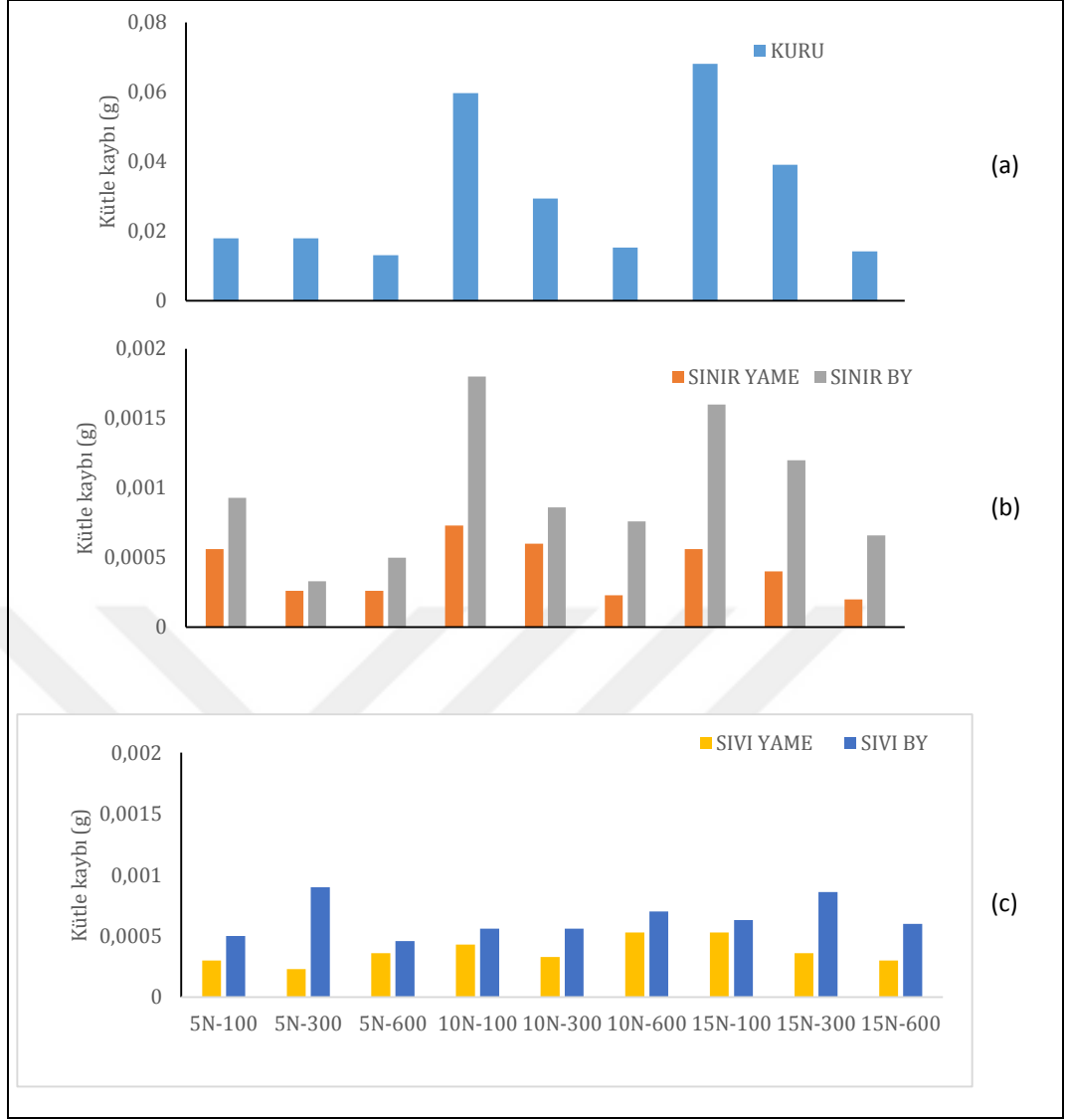
#### **4.2. Kütle Kaybı**

Kuru, sınır-karışık, sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki BY ve YAME yağlayıcılı deneylerine ait aşınma değerleri deney öncesi ve sonrasında kütle kaybından bulunarak grafik halinde Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Kuru, sıvı, sınır-karışık, sürtümlü BY ve YAME deneylerine ait bütün yüklerdeki kütle kaybı değişimi

Beklenildiği gibi kuru deneyde kütle kaybı en büyük değerdedir. Sınır-karışık ve sıvı testlerdeki kütle kayıpları kuru deneylerin yaklaşık 1/100'ü değerlerine karşılık gelmektedir. Kuru deney şartlarında yük sabit olduğunda numuneye uygulanan hızın artmasıyla (Şekil 4.14) kütle kaybı değerinin azaldığı, yükün artmasıyla (Şekil 4.13) kütle kaybının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Kuru, sıvı, sınır-karışık sürtümlü BY ve YAME deneylerine ait bütün hızlardaki kütle kaybı değişimi

Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları ve sınır-karışık deneye ait tüm hızlarda, hızın artmasıyla aşınma yönünden BY'ye göre YAME'nin daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir.

Sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında ise hem düşük hızlarda hem de düşük yüklerde ve özellikle düşük hızda YAME'nin aşınma yönünden daha etkili olduğu görülmektedir.

Yağlayıcının kullanıldığı deney şartlarında yük sabit olduğunda numuneye uygulanan hızın artmasıyla kütle kaybı miktarlarının farklı davranış sergilediği görülmektedir (Şekil 4.14). Ancak YAME yağlayıcı ile yapılan denemelerdeki

kütle kaybı, BY yağlayıcı deneylere göre daha az gözlenmiştir. Yağlayıcı kullanılan tüm deney şartları içerisinde en çok kütle kaybının görüldüğü deney sınır-karışık sürtünmeli BY yağlayıcı deneylere aittir.

### 4.3. Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

1930'lu yıllarda metal yüzeylerinin pürüzlülük değerlendirilmesi, o yüzeye bakarak ya da dokunularak yapılmıştır. Bu tip değerlendirmenin ömrü uzun olmamış ve yüzeyler yüzey pürüzlülük parametreleriyle değerlendirilmeye başlanmıştır. Yüzey kalitesini değerlendirmek ve parametrelere (matematiksel büyüklüklere) çevirmek için pürüzlülük ölçümleri yapılır. Pürüzlülük ölçümlerinin doğru ve hassas yapılmasının yanında hangi pürüzlülük parametrelerinin kullanılacağına doğru tespiti ve bunların doğru değerlendirilmesi gerekmektedir. Pürüzlülük ölçümünde kullanılan çok sayıda parametre mevcuttur. Pürüz yüksekliği için ortalama yükseklik( $R_a$ ), yüzey yapısında başrol oynamaktadır(Durakbasa vd., 2001). Bu tez çalışması kapsamında deney öncesi ve deney sonrası  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$  pürüzlülük ölçümleri değerlendirilmiştir.

Pürüzlülük ölçüm sonuçları deney öncesi ve deney sonrası her numunedeki aşınma izindeki farklı bölgelerdeki beş adet ölçümün ortalaması alınarak kuru, sınır-karışık, sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneye ait  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$  pürüzlülük değerleri sırasıyla Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de verilmektedir. Numunelerin ölçümleri sırasında malzemenin işleme yönünde (yatay yönde) olmasına özen gösterilmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası yüzde değişim miktarları grafik üzerinde verilmiştir.

$R_a$  değerleri en çok kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm parametresi olduğundan sadece  $R_a$  değerlerine göre yapılan Anova testine göre YAME ve BY yağlayıcı, pürüzlülük açısından benzer özellikler taşımaktadır. Bu test sırasında Tukey (farklılıkların kaynağını belirlemek üzere farklılığı yaratan grup ya da grupları belirlemek için çoklu karşılaştırma yapılmak istendiğinde kullanılan test türü) benzerlik testi uygulanmıştır. Bu test ile elde edilen tabloda benzerlik değerleri

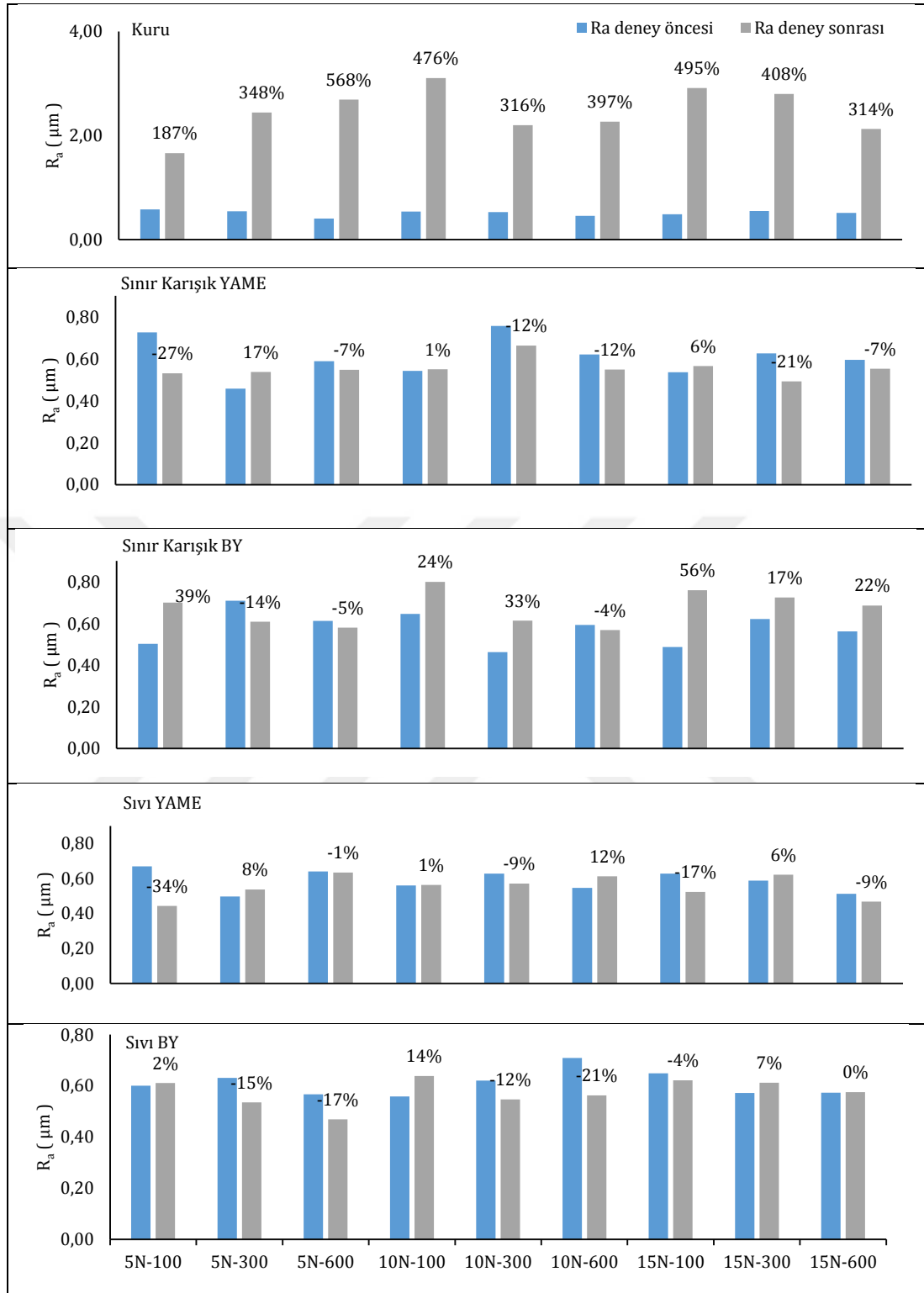
1'e yakın olan deney şartlarının birbirine benzer olduğu varsayılmaktadır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Pürüzlülük( $R_a$ ) değerlerine göre oluşturulan Anova tablosu

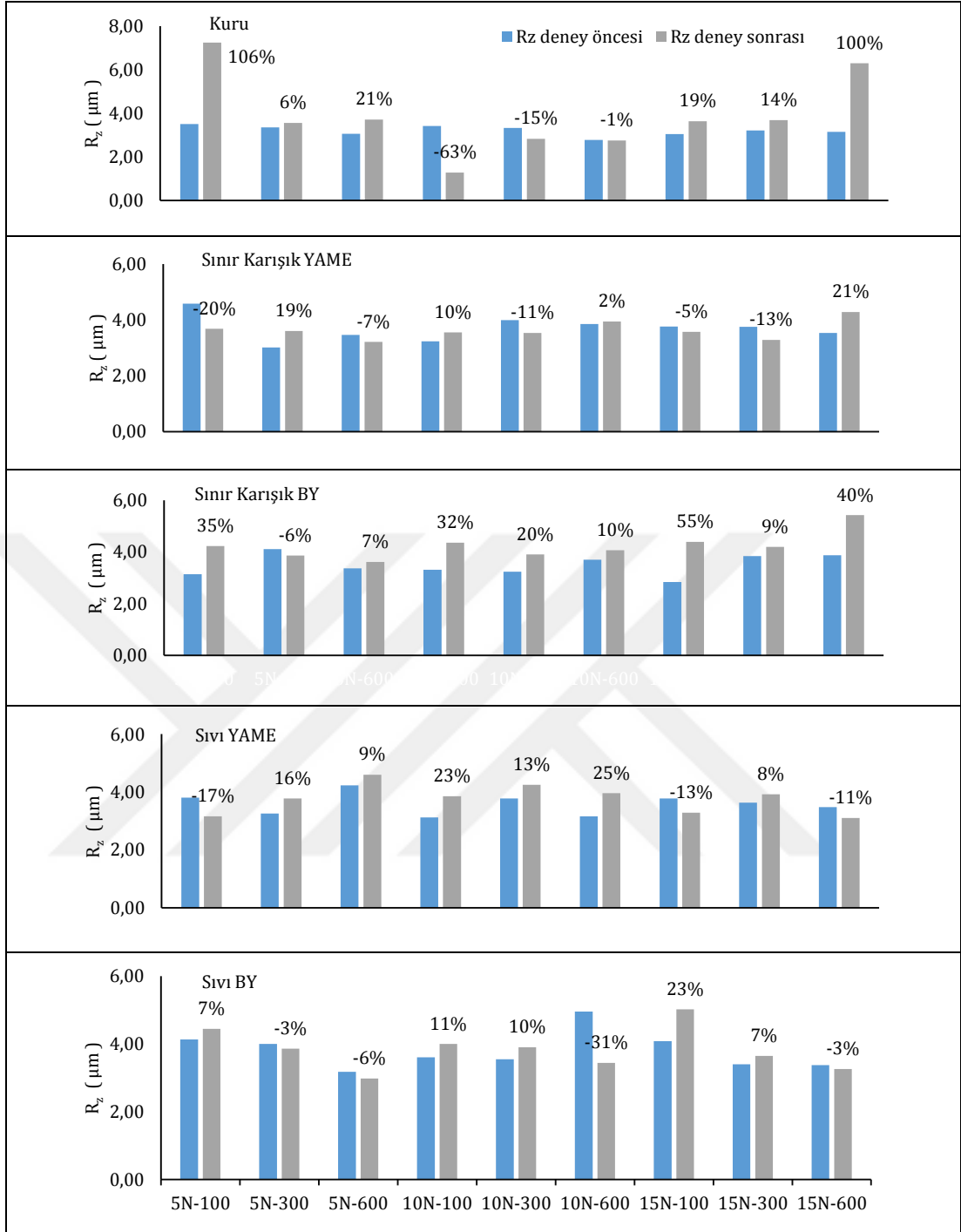
	Kuru	Sınır-Karışık BY	Sınır-Karışık YAME	Sıvı BY yağlayıcı ortamdaki	Sıvı YAME yağlayıcı ortamdaki
Kuru		0	0	0	0
Sınır-Karışık BY	0		1	0.8932	0.7986
Sınır-Karışık YAME	0	1		1	1
Sıvı BY yağlayıcı ortamdaki	0	0.8932	1		0.9996
Sıvı YAME yağlayıcı ortamdaki	0	0.7986	1	0.9996	

Kuru deney şartlarının sınır ve sıvı her iki yağlayıcı ile yapılan deneylerdeki pürüzlülük yönünden birbirinden oldukça uzak olduğu Çizelge 4.1'de görülmektedir. Bunun yanısıra sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki pürüzlülük değişimlerinin birbirine yakın olduğu aynı çizelgeden anlaşılmaktadır. Bu da bize zaman zaman deney şartlarının birbiri içerisine girdiğini, zaman zaman aynı deney şartında farklı yağlama şartlarının oluşabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla zaman zaman sıvı filmlili yağlama şartlarında sınırdan daha büyük zaman zaman da daha küçük ortalama  $\mu$  değerlerinin nedenini açıklamaktadır. Sınır-karışık BY yağlayıcı ile sıvı YAME yağlayıcı deney şartlarında  $R_a$  ölçüm parametreleri arasındaki benzerlik en azdır (Çizelge 4.1).

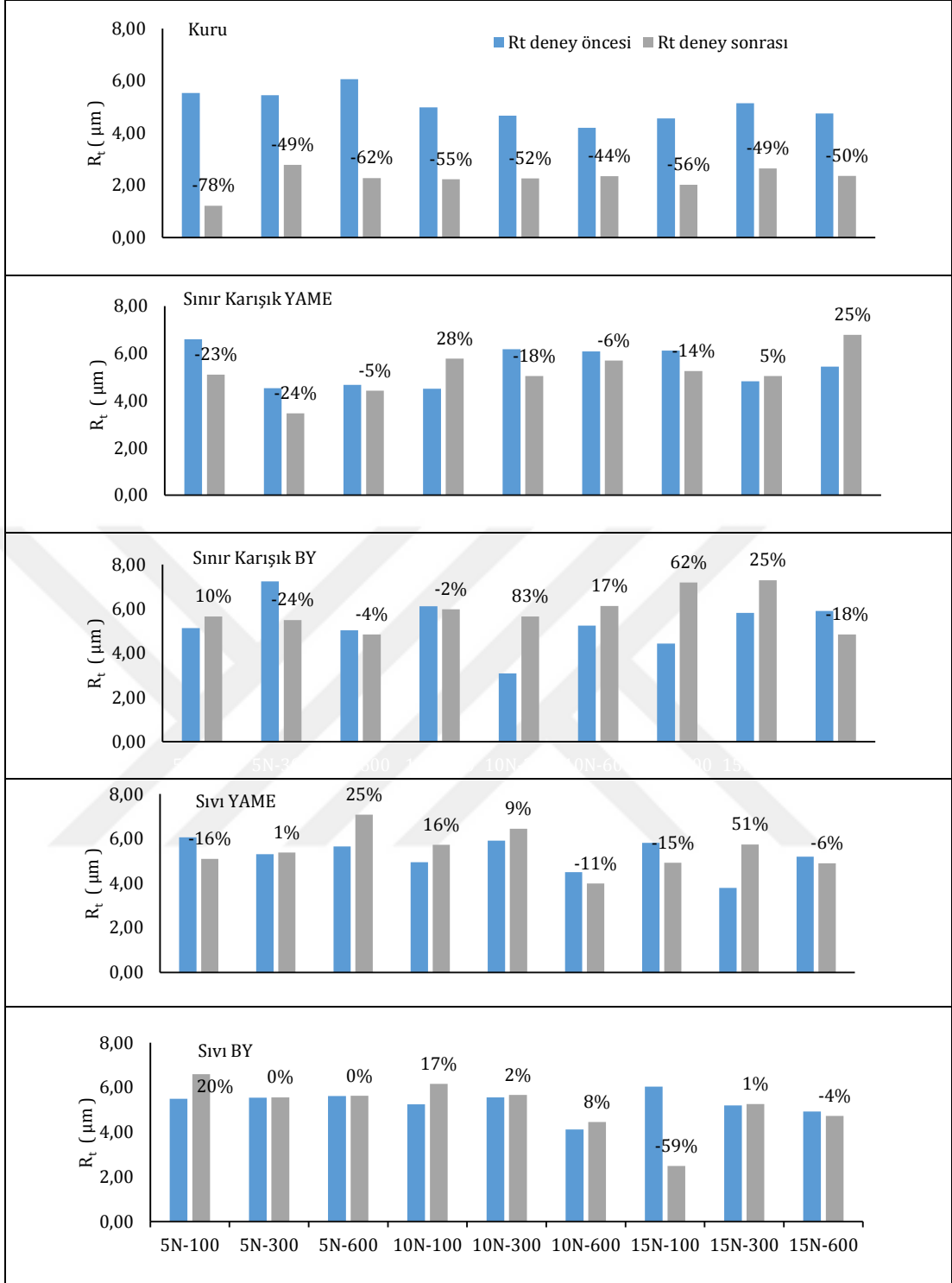
Yağlayıcıda sert birikintilerin bulunması, arayüzde üçüncü bir cisim gibi davranır ve metal yüzeyi bozar ve karşı yüzün pürüzlülüğünü artırır (Alotaibi, 2014). Kütle kaybı verilerinde olduğu gibi en yüksek değişim,  $R_a$  pürüzlülük değerleri kuru sürtünmeli deneylerde elde edilmiştir. Kuru deney şartlarında  $R_a$  değerindeki artışlar çok yüksek görülürken diğer yağlama şartlarında artışların az olması yağlamanın etkisini net olarak ortaya koymaktadır. Sınır-karışık ve sıvı ortam deneylerinde elde edilen  $R_a$  pürüzlülük değerlerinde, uygulanan yüklere göre, farklılık gözlenmemiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası  $R_a$  pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri



Şekil 4.16. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası  $R_z$  pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri



Şekil 4.17. Tüm denemelerde kullanılan hız ve yüklere göre ölçülen deney öncesi ve deney sonrası  $R_t$  pürüzlülük değerleri ve değişim yüzdeleri

Karşılıklı temas eden yüzeylerin pürüzlülükleri, yüzeyin sürtünme ve aşınma davranışını önemli derecede etkilemektedir. Bağlı hareket yapan iki kuru (yağlanmamış) parça temas yüzeylerinde meydana gelen sürtünme türü olup, parçalar birbirleri üzerinde yüzey pürüzleri temas ederek kaymaktadır. Kuru



sürtünme analizinde yüzeylerin pürüzlü oldukları dikkate alınmaktadır. Bu yüksek basınç plastik deformasyona, temas eden pürüz tepeliklerinin birbiriyle kaynak bağlantısı oluşturmaya sebep olabilmektedir. Hareket süresince bu kaynak bölgeleri kesilir veya kopar. Sürtünmeyi oluşturan, bu kesme kuvvetleridir (Koç, 2008).

***R<sub>a</sub> pürüzlülük değeri;*** yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. İstatistik olarak R<sub>a</sub> aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün y koordinatlarının merkezden ortalama aritmetik sapmasını tanımlar (Aksulu vd.,2001). R<sub>a</sub> pürüzlülük değerlerindeki düşüş olması yüzeylerde parlama oluştuğunun bir göstergesi olarak gösterilebileceğini, artış eğilimi gösteren numunelerde özellikle en büyük yüklerde plastik deformasyon olabileceği, şiddetli abrazyon aşınma oluşabilmesi düşünülmekle beraber numunelerin işleme kalitesi farklılığı, ölçüm noktalarında yüzey yapısı, yüzey kalitesinden kaynaklanabileceği de düşünülmektedir (Ameen, 2017). R<sub>a</sub> pürüzlülük değerinin (Şekil 4.15) deney öncesi ve deney sonrası değişim miktarlarına bakıldığında;

***Kuru deney şartlarında;*** % değişim miktarlarındaki büyük orandaki artış nedeniyle, özellikle bu numunelerde büyük plastik deformasyonun olabileceğini, yatak malzemesi üzerindeki maksimum tepelerin aşınmış olsa da kopan bu parçaların çalışma ortamında kaldığından şiddetli abrazyon aşınma çizgileri oluşturduğu düşünülmektedir. 600 d<sup>-1</sup> hız, 5 N yük değerindeki R<sub>a</sub> değerinde en fazla artış olduğu (Şekil 4.15) görülmektedir.

***Sınır-karışık ve sıvı YAME ve BY yağlayıcı deney şartlarında;*** % değişim miktarındaki değişim kuru deney şartlarına kıyasla daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Bu değişimde yağlayıcının etkisinin olduğunu göstermektedir. % değişim miktarındaki azalma parlatma aşınmasını, % değişim miktarlarındaki artış ise pürüzlerin birbirine kaynarak kopmasını ifade eden adhezif ve kopan sert partiküllerinde yüzeyden parça ve/veya çizik oluşturmaya da abrazyon aşınmanın olduğu şeklinde düşünülmektedir.

**$R_z$  pürüzlülük değeri;** yüzey pürüzlülüğüne karşılık gelen y koordinat aralıklarının ölçülerek, en yüksek beş ve en düşük beş noktadaki ölçünün pürüzlülük derinliğine dayanan aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır (Aksulu vd.,2001).  $R_z$  pürüzlülük değerlerinin (Şekil 4.16) deney öncesi ve deney sonrası değişim miktarlarına bakıldığında;

***Kuru deney şartlarında;*** tüm hızlarda 5 N ve 15 N yük değerlerinde % artış, 10 N yükte % azalma görülmektedir.  $R_z$  değerlerindeki artışlar,  $R_a$  değerindeki artışlar kadar büyük oranda değildir. Artış abrazif aşınma çizgilerinin oluştuğunu, % azalma ise plastik deformasyon ve yüzey parlamasından kaynaklanabileceğidir.

***Sınır-karışık ve sıvı YAME ve BY yağlayıcı deney şartlarında;*** % değişim miktarındaki artma abrazif çizgilerin oluştuğunu yağlamanın sınır ve/veya karışık yağlama rejiminde olduğunu göstermektedir. % değişim miktarındaki azalma ise yüzey parlamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu düşüşleri ve yüzey parlamasını, az yağlayıcının olması ile aşınma partiküllerinin yüzeyden uzaklaşma ihtimalini artırmakta ve/veya yüzeylerin adeta birbirine alışma periyodundaki gibi davranarak yüzeylerin daha pürüzsüz veya daha düşük değerde  $R_z$  pürüzlük değerlerinin oluşabileceği şeklinde yorumlamak mümkündür.

**$R_t$  pürüzlülük değeri** ise değerlendirme uzunluğundaki profilin tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı ve/veya arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanır(Aksulu vd.,2001).  $R_t$  pürüzlülük değerlerinin (Şekil 4.17) deney öncesi ve deney sonrası değişim miktarlarına bakıldığında;

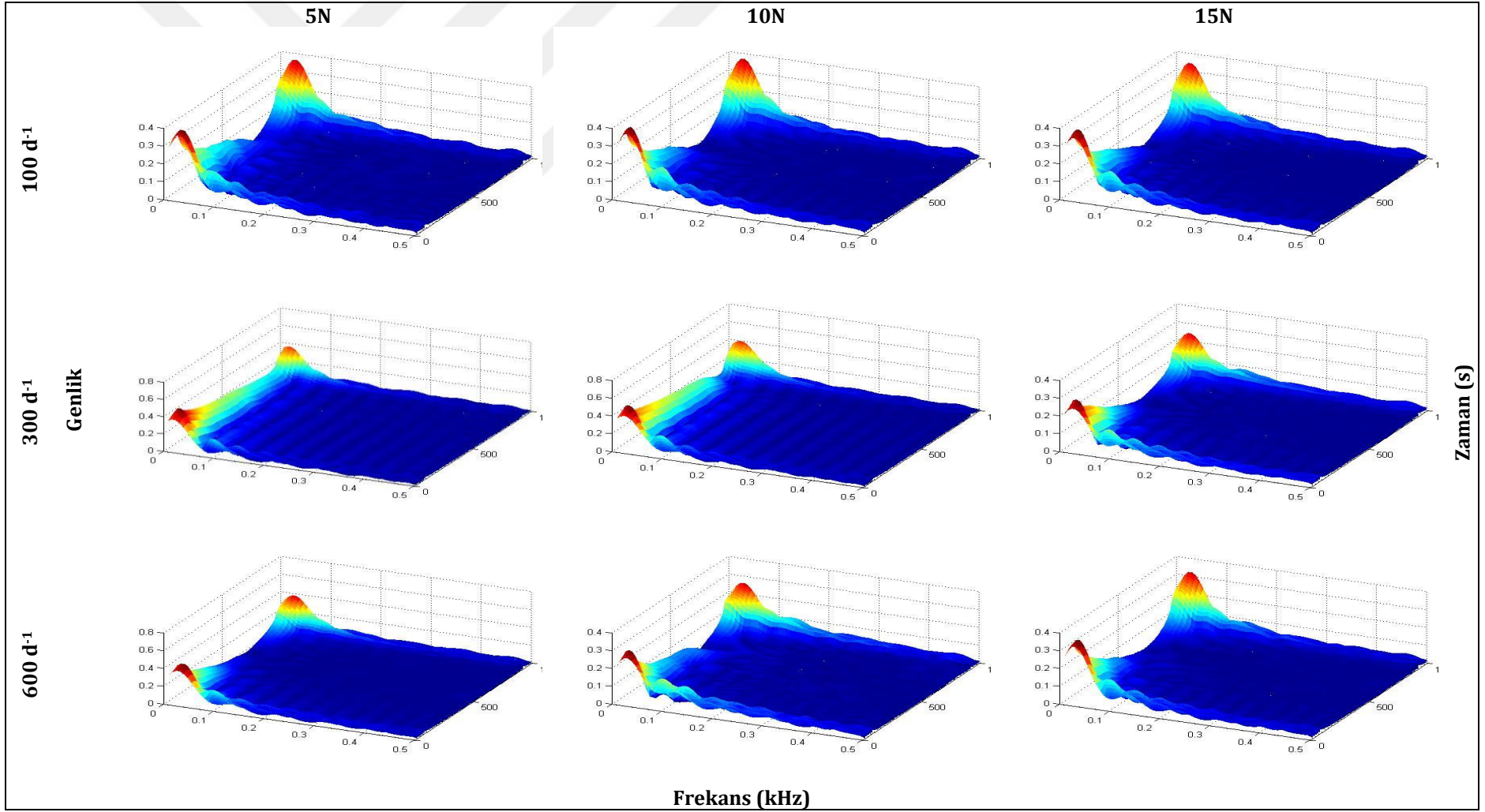
***Kuru deney şartlarında;*** tüm deneylerde % azalma göstermiştir. Bu durum yatak malzemesi üzerinde plastik deformasyon olması ve yüzeyin bir çeşit alışma periyodu gibi parlama olayı gerçekleştiği, pürüz tepelerinin kesildiği ve bu nedenle pürüz yükseklikleri azalmaktadır.

**Sınır-karışık ve sıvı YAME ve BY yağlayıcı deney şartlarında;** % değişim miktarındaki artma büyük çiziklerin oluştuğunu, azalma ise düzleşme ve yüzeyde iyileşmeyi göstermektedir.  $R_z$  de olduğu gibi bu düşüşleri ve yüzey parlamasını, yağlayıcının olması ile aşınma partiküllerinin yüzeyden uzaklaşma ihtimalini artırmakta ve/veya yüzeylerin adeta birbirine alışma periyodundaki gibi davranarak yüzeylerin daha pürüzsüz veya daha düşük değerde  $R_t$  pürüzlük değerlerinin oluşabileceği şeklinde yorumlamak mümkündür.

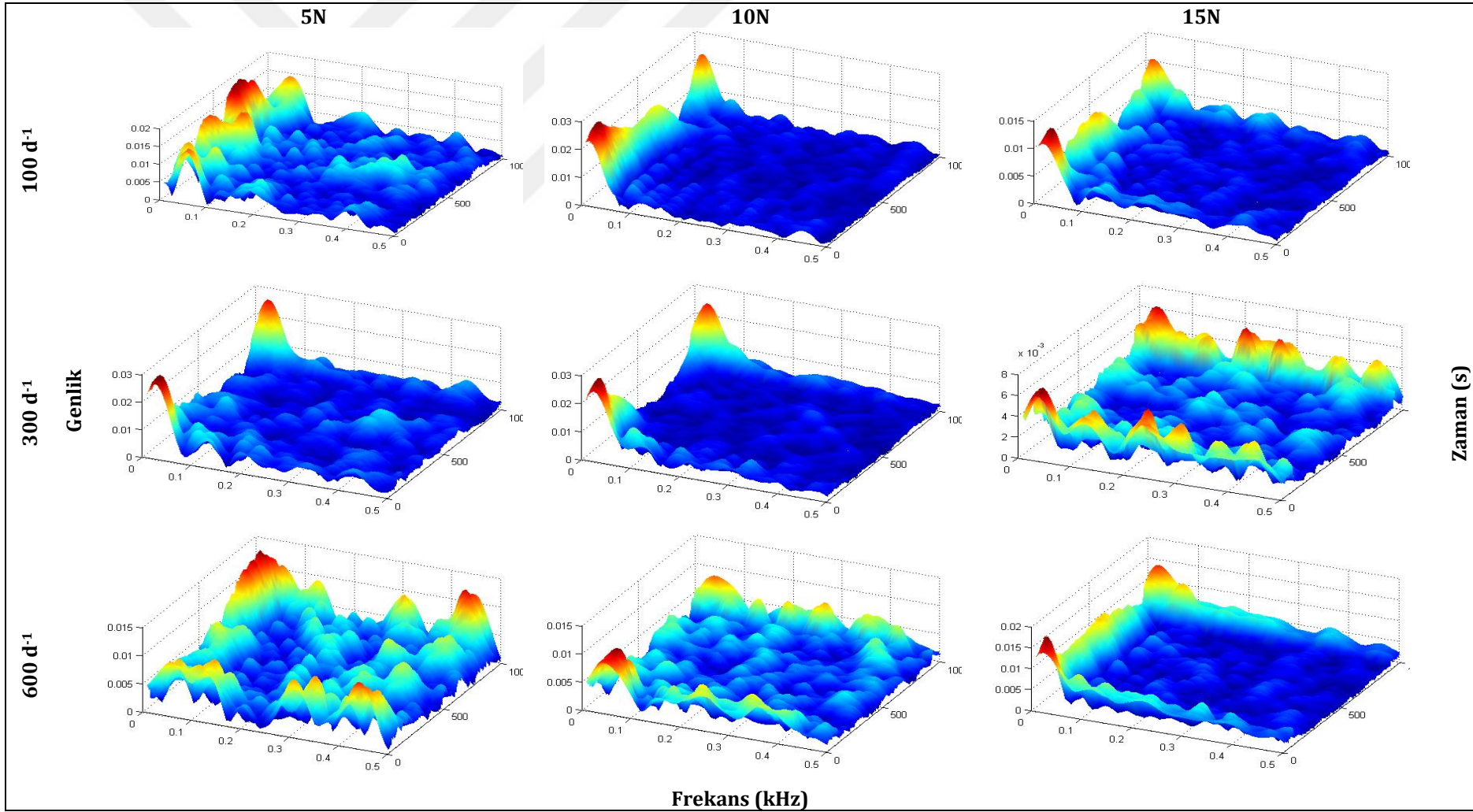
#### **4.4. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) Uygulaması**

Yatak malzemelerinin ve atık YAME'nin endüstri uygulamalarında tribolojik davranışlarının incelenmesi, özellikle farklı yöntemler ve bakış açısı ile araştırılması için bu bölümde zaman frekans analizi kullanılmıştır. Kullanılan kısa zamanlı Fourier dönüşümü yöntemi test edilen yatak malzemesi ve yağlayıcının sürtünme ve aşınma değerlerinin analizinde farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Yapılan deneylerden elde edilen ortalama deneysel  $\mu$  veri sinyalleri ile zaman frekans özellikleri analiz edilmiştir.

Farklı frekanslarda zamana bağlı genlik dağılımlarını incelemek için sürtünme katsayıları üzerinde, Matlab araçları ile hazırlanan program kullanılarak, KZFD analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların genlik değerleri, test edilen numunelerin sürtünme davranışlarını değerlendirmek amaçlanmıştır. Elde edilen kuru, sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki YAME ve BY yağlacılarına ait deneysel verilerin KZFD analizleri Şekil 4.18 - 4.22'de verilmiştir.

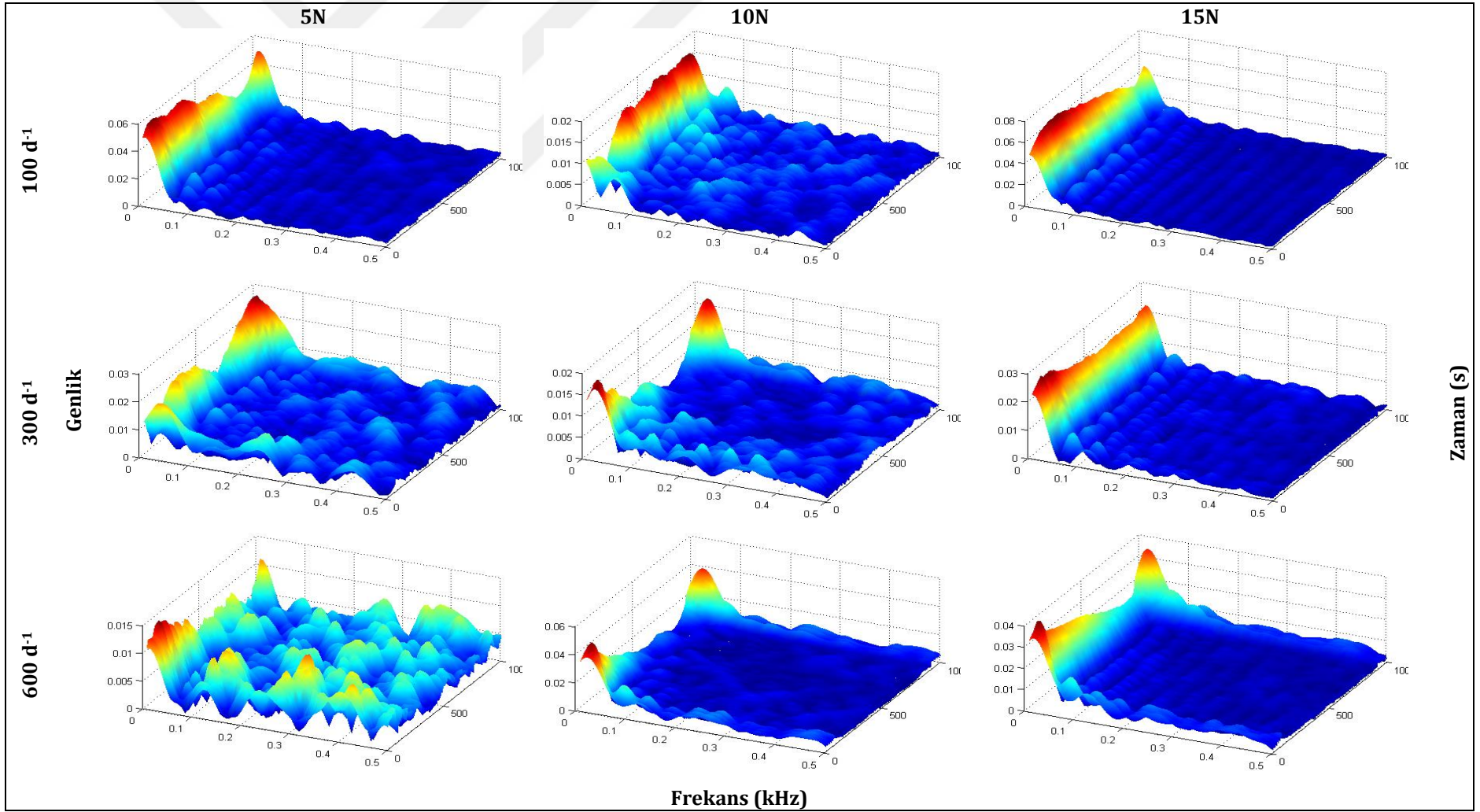


Şekil 4.18. Kuru sürtümlü deney ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim

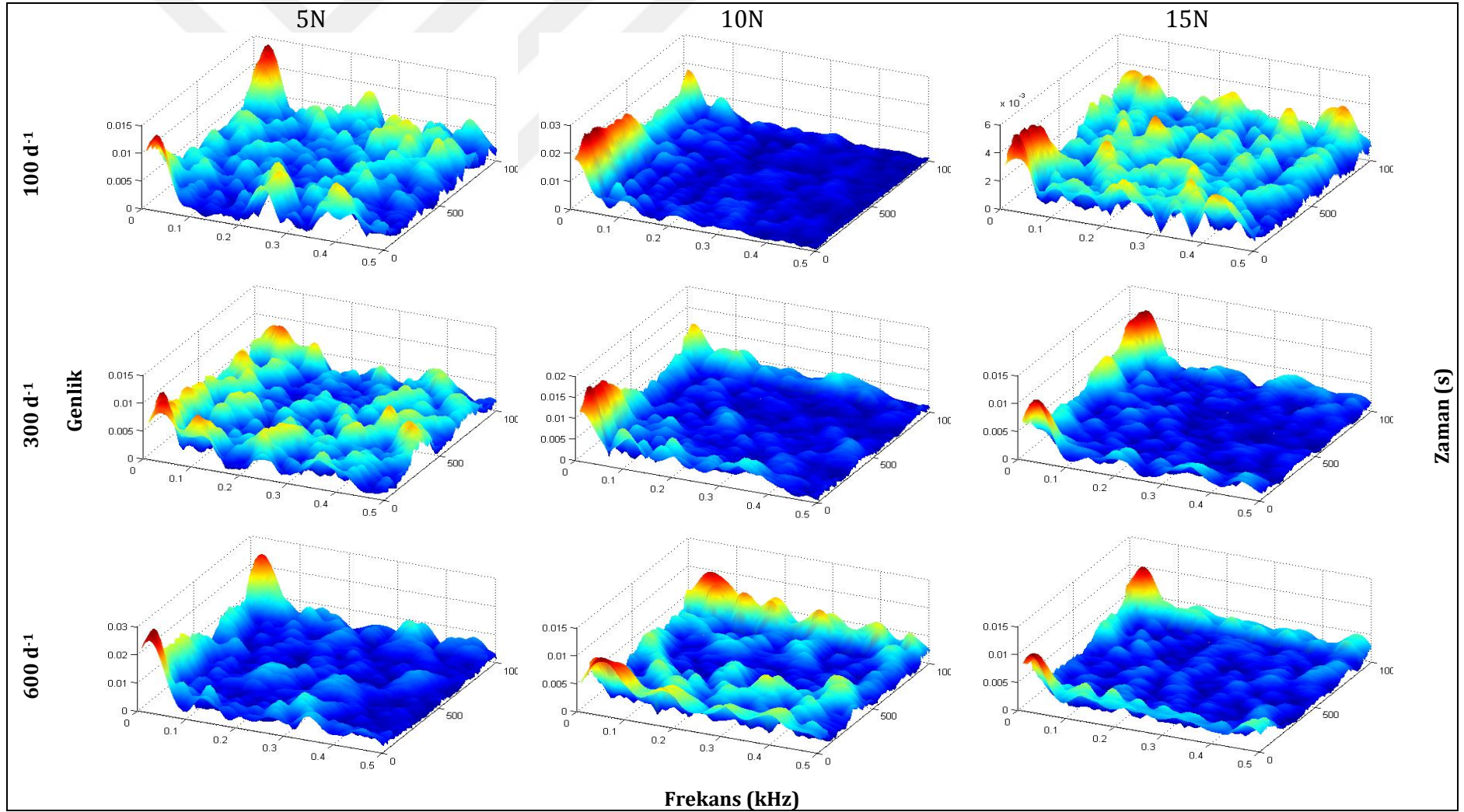


Şekil 4.19. Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim

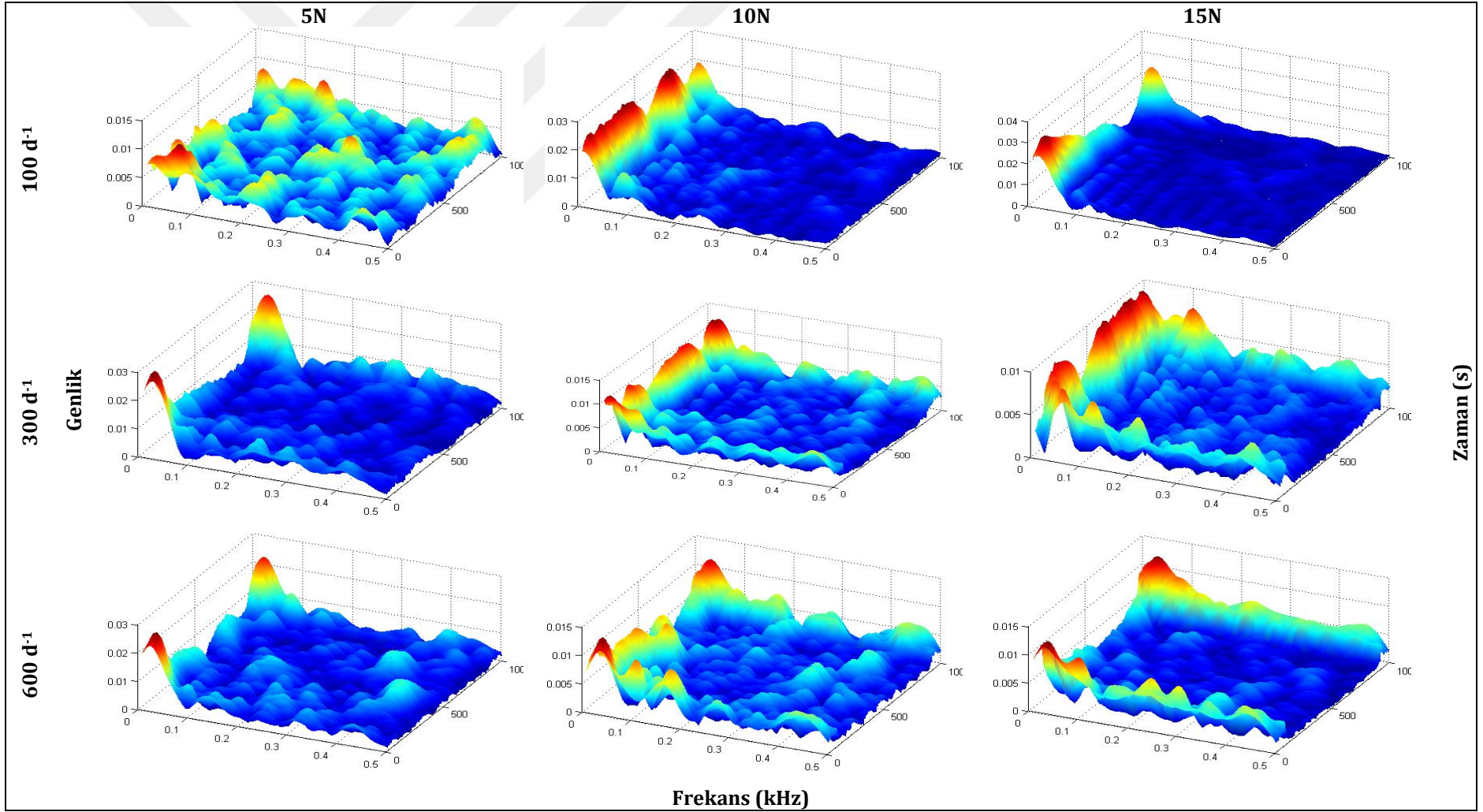




Şekil 4.20. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim



Şekil 4.21. Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları YAME yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim



Şekil 4.22. Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları BY yağlayıcı deneylere ait kısa zamanlı Fourier dönüşümüne ait üç boyutlu gösterim



***Kuru yağlama şartlarında*** yapılan deneylerde PDATC'da test numunesi yatak malzemesi ile aşındırıcı bilye arasında herhangi bir yağlayıcı kullanmadan kuru sürtünme ile aşınma gerçekleşmiştir (Şekil 4.18). Kuru sürtünme için  $\mu$  genlik değerleri yüksek olup kayma süresiyle artmıştır. CuSn8Ni1 alaşımlı malzemede kuru sürtünmeli deneylerin tümünde yüksek genlik değerleri söz konusudur. Kısa zamanlı Fourier dönüşümündeki  $\mu$  genliklerin yüksek enerji ve büyük pik değerleri partikül transfer oluşumunu göstermektedir (Song vd., 2017). Yağlayıcı kullanmadan yapılan kuru şartlardaki deneylerde ortalama  $\mu$  değeri CuSn8Ni1 alaşımlı yatak malzemelerinde çok yüksektir. CuSn8Ni1 alaşımlı malzeme ile yapılan kuru deneylerde genlik değerinin yüksek olduğu durumlarda aşınma miktarının (kütle kaybının) da yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.13). KZFD ile belirlenen frekans genliği tarafından kolayca bulunabileceğini ortaya koymaktadır. Aşınma hızlarındaki yüksekliğin, frekans tepelerindeki genlik farkından doğrudan tespit edilebileceği belirtilmiştir. Genlik miktarının yüksek olması ve partikül transfer oluşumu  $\mu$  değerinin oldukça yüksek olması nedeniyle de açıkça görülmektedir (Şekil 4.22). Frekans alanındaki tüm ayırt edilebilir tepe noktaları zaman alanındaki periyodik sinyallere karşılık geldiği (Hsiao vd., 2009) ve kuru yağlama şartlarında tepe noktasının en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Song ve arkadaşları KZFD'deki  $\mu$ 'nün temel frekansının yüksek olması partikül transfer oluşumunu gösterdiğini belirtmektedirler (Song vd., 2017). Temel frekanstaki genliklerin büyük genlik değerleri tribo sistemindeki partikül transfer oluşumunu ve plastik deformasyonu net bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Zamana bağlı değişimlerdeki büyüklükler genlik miktarının artmasına neden olduğundan, zamana bağlı değişim dolayısıyla meydana gelen zorlanmayı da ifade eder.

Bütün yük değerlerinde  $100 \text{ d}^{-1}$  ve  $600 \text{ d}^{-1}$  hız değerlerinde KZFD grafikleri birbirine benzer özellikte olup (Şekil 4.18) genlik değerleri tüm kuru deney şartlarında yüksektir.  $300 \text{ d}^{-1}$  hız 5 N-10 N yük,  $600 \text{ d}^{-1}$  hız 5 N yük (Şekil 4.2) de açıkça görüldüğü gibi zamana bağlı  $\mu$  değişimi daha uzun kayma mesafesinde görüldüğünden genlik miktarlarındaki artış en fazla bu üç deneyde görülmüştür.

**YAME yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama** şartlarında yapılan deneyler incelendiğinde, genlik değerlerinin birbirine yakın ve kuru deney şartlarına kıyasla en az 16 en fazla 100 kat (Şekil 4.19), zamana bağlı değişimlerin kuru deneylere kıyasla az olduğu ve bu nedenle genlik değerlerinin de düşük olduğu görülmektedir. Özellikle, 600 d<sup>-1</sup> hız tüm yük değerleri ile 100 d<sup>-1</sup>, 300 d<sup>-1</sup> hız 15 N yük değerlerinde diğer deneylere göre daha düşük olduğu (Şekil4.19) görülmektedir.

**BY yağlayıcı sınır-karışık yağlama** şartlarında yapılan deneylerde, kuru deney şartlarına kıyasla en az 10 en fazla 33 kat (Şekil 4.20) olduğu saptanmıştır. 600 d<sup>-1</sup> hız 10 N yük ile 100 d<sup>-1</sup> hız 5 N ve 15 N yük değerlerinde  $\mu$  değerinin zamanla değişimi nedeniyle bu yük ve hız değerlerinde genlik miktarı yüksek çıkmaktadır. Genlik miktarının en düşük olduğu 600 d<sup>-1</sup> hız 5 N yük değerinde zamana göre değişim yok denecek kadar azdır.

**Sıvı YAME yağlayıcı ortamı** şartlarında yapılan deneylerde, kuru deney şartlarına kıyasla en az 13, en fazla 100 kattır (Şekil 4.21). Sıvı YAME yağlayıcı ortamdaki deney şartları tüm deneyler içinde en düşük genlik değerlerine sahiptir.  $\mu$  değerinin zamana bağlı değişimlerinin en az olduğu (Şekil 4.7-4.8) 100 d<sup>-1</sup> hız 15 N yük değerinde genlik miktarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

**Sıvı BY yağlayıcı ortamı** yağlama şartlarında yapılan deneylerde, kuru deney şartlarına kıyasla en az 16 en fazla 50 kat daha düşük olduğu ve aşınma miktarının da düşük olduğu görülmektedir(Şekil 4.22).  $\mu$  değerinin zamana bağlı değişimlerinin en az olduğu (Şekil 4.9 -4.10) 300 d<sup>-1</sup> hız 15 N yük genlik değeri düşük,  $\mu$  değerinin zamana bağlı değişimlerinin en fazla olduğu 100 d<sup>-1</sup> hız 15 N yük değerinde ise genlik en yüksektir. 600 d<sup>-1</sup> hız, 10 N ve 15 N yük değerinde yüksek frekans düşük genlikli bir çalışmanın olduğu görülmektedir.

Bu verilere göre sıvı YAME yağlayıcı ortamı yağlama şartları ve sınır-karışık yağlama şartları KZFD verileri sıvı BY yağlayıcı ortamı yağlama şartları ve sınır-karışık yağlama şartları ile kıyaslandığında ise tespit edilen  $\mu$  sinyallerinin

frekans piklerinin, genlik dağılımlarının tribolojik davranışları belirlemede kolaylık sağlayabileceğini göstermektedir.

Kuru, sıvı veya sınır-karışık yağlamalı tribo sistemlerdeki sürtünme davranışı zamana bağlı olarak değişebilir. Malzeme çiftleri aynı ortalama sürtünme katsayılarını gösterebilir, ancak önemli ölçüde farklı aşınma gösterebilirler. Metallerin, seramik ve polimerler ile kombinasyonları için sürtünmenin zamana karşı davranışının özellikleri, aşınma içeren parçalı sürtünme modellerinin geliştirilmesini gerektirecek aşamalardan oluşabilir (Blau, 2009).

Song vd. (2017) yaptıkları çalışmada, KZFD ile belirlenen frekans genliği, sürtünme kuvveti frekans tepelerinin genlikleri tarafından kolayca bulunabileceğini, test edilen numunelerin aşınma hızlarının ve aşınma mekanizmalarının yanı sıra zamanla meydana gelen değişimlerin, sürtünme kuvveti sinyallerinin frekans tepelerinin genlik, dağılım ve dalgalanmasından saptanabileceğini göstermektedirler. Ayrıca, sürtünme kuvvetinin zaman-frekans analizinin, malzemelerin zamana bağlı olarak aşınma işlemini, özellikle de baskın aşınma mekanizması ve aşınma oranındaki değişiklikleri incelemek için etkili bir yol olduğu vurgulanmıştır.

YAME ve BY yağlayıcılara ait genlik değerleri, kuru deney şartları ile kıyaslandığında YAME'ye ait sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait genlik miktarlarının daha düşük olduğu KZFD ile yapılan bu hesaplamaların tribo sistemlerdeki sürtünme davranışı hakkında bilgi verebileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında da KZFD ile hesaplanan  $\mu$  sinyallerinin frekans ve genlik değerlerinin, farklı yatak malzemesi ve yağlayıcı ile yapılan çalışmalarda, sürtünme ve aşınma değerlerinin analizinde farklı bir bakış açısı verebileceği ortaya konulmuştur. KZFD deneysel verileri değerlendirme etkin bir araç olduğundan, endüstri uygulamaları ve akademik çalışmalarda veri değerlendirmede önemli bir yöntem olarak kullanılabilir.

#### 4.5. Numunelerin SEM ve EDS Analizleri

Aşınmış plaka yüzeylerinin yüzey hasarları SEM taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüzey fotoğrafları ve Energy Dispersive Spectroscopy (EDS ) yüzey malzeme analizleri yapılmıştır. SEM incelemesinden önce, test edilen numuneler hegzan banyosunda ayrı ayrı 15 dakika boyunca temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuştur. Bilye ve kullanılmamış yatak malzemesi, kuru, sınır-karışık, sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarına ait yatak malzemelerinin SEM görüntüleri, aşınma iz genişlikleri Şekil 4.23 - 4.35'da ve EDS sonuçları Çizelge 4.3' de verilmiştir. Görüntülerde kullanılan kısaltmalar ise;

A: Abrazif aşınma,

Ad: Adhezif aşınma,

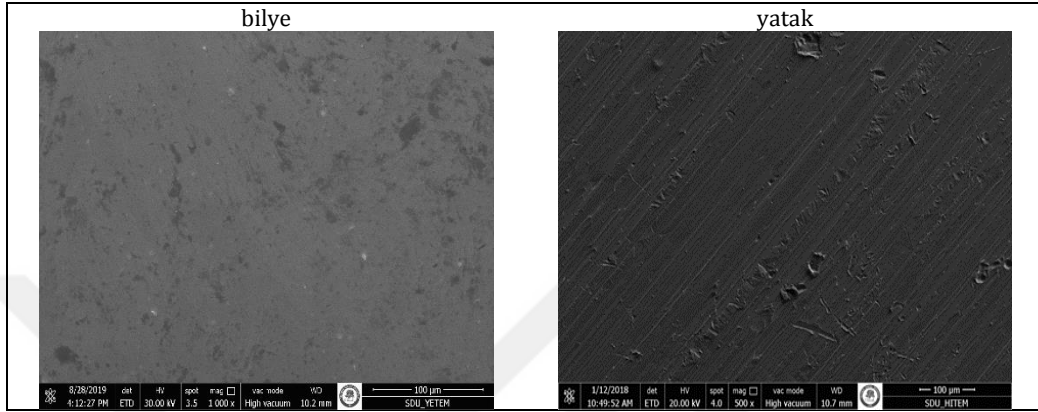
P: Parlatma aşınması,

Pl: Plastik deformasyon aşınması olarak kullanılmıştır.

Kuru, sınır-karışık, sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki BY ve YAME yağlayıcıları ile yapılan aşınma kütle kayıpları ile denklem (1.2) ile hesaplanan (Archard Denklemi) aşınma indeksi K değerleri de Şekil 4.36'de verilmiştir.

Kullanılmamış yatak malzemesi, kuru, sınır -karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında test edilmiş numunelerin aşınmış yüzeyleri ve aşındırıcı bilyenin temas yüzeyi de incelenmiştir. Aşınmış yüzeylerin karşılaştırılabilmesi açısından imkânlar ölçüsünde en düşük yük ve hız, orta yük ve hız ile en yüksek yük ve hız örneklerindeki test numuneleri seçilmiştir (5N, 100d<sup>-1</sup>, 5N 600d<sup>-1</sup>, 10N 300d<sup>-1</sup>, 15N 100d<sup>-1</sup>, 15N 600d<sup>-1</sup>). Sınır-karışık YAME deney numuneler için ise imkânlar ölçüsünde tüm deneylerden birer örnek incelenmiştir. Kullanılmamış yatak malzemesi ve bilye, kuru sürtünme (yağ ilavesiz), sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki örnek numunelerin SEM görüntüleri ve iz genişlikleri Şekil 4.23 - 4-35'te verilmektedir. Genel olarak üretici firmanın yatak numunesi ve bilye malzemelerin verilen analizleri (Çizelge 3.3) ile kullanılmamış numuneye ait EDS analizindeki (Çizelge 4.3) kimyasal kompozisyon birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Kullanılmış kuru ve sınır-karışık ve sıvı

yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki seçilen numune analizlerindeki karbon miktarındaki artışın bir kısmı aşındırıcıdan bir kısmının ise yağlayıcının yüzeye yapışmış veya tabaka oluşturması ile açıklamak mümkündür. Oksijen ise havadan kaynaklanmış olabileceği veya yatak numunelerinde oluşabilecek oksit tabakasından kaynaklanabilmektedir.

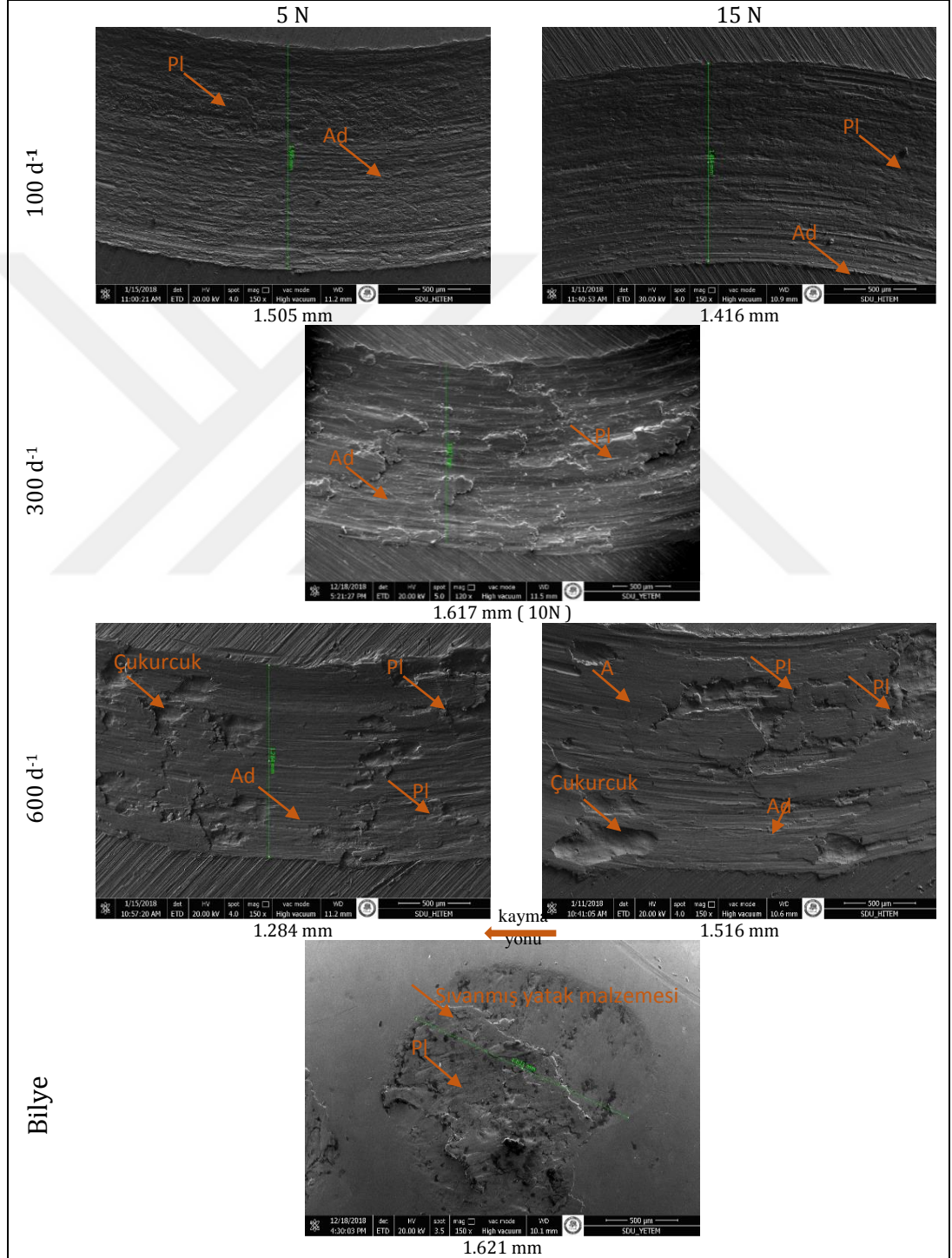


Şekil 4.23. Kullanılmamış aşındırıcı bilye ve yatak malzemesinin SEM görüntüsü

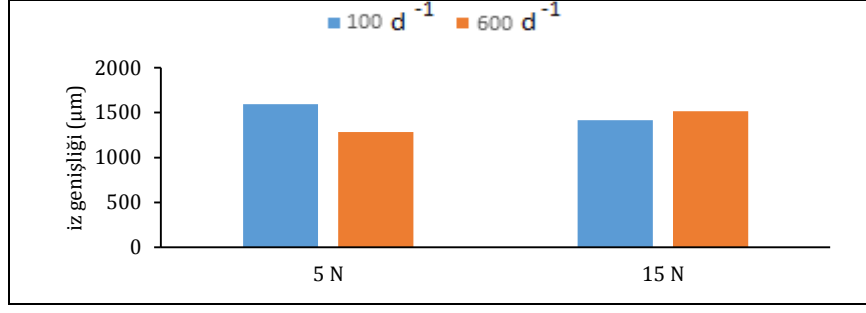
#### 4.5.1. Kuru deney şartlarındaki numunelerin SEM analizleri

Kuru (yağsız) yatak malzemesi SEM görüntüsünde (Şekil 4.24) rahatlıkla görüleceği gibi malzeme şiddetli aşınmaya ve plastik deformasyonlara uğramıştır. Yükün artması ile aşınma izlerindeki boşluklar, çukurcuklar belirginleşmekte, aşınma izi daha kaba bir topografya görünümüne dönüşmektedir.  $R_a$  ölçümleri de bu bulguyu desteklemektedir (Şekil 4.15). Sürtünme ve aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurmak da mümkün değildir. Farklı malzeme çiftleri arasında sürtünme direnci aynı olabilir, ancak bunlar arasındaki aşınma miktarı farklılığı 100 veya daha fazla kata çıkabilmektedir. Genel olarak aşınma problemi, sürtünme probleminden daha karmaşık bir yapıdadır. Eş çalışan fonksiyon yüzeyleri arasında çok değişik türde aşınma şekillerine rastlanır ve çok kez de aynı bir koşulda bu değişik şekillerin bir kaçını aynı zamanda kendini gösterir. Bu nedenlerle bütün aşınma hallerini veya bir kısmını kapsayan ve genel geçerliliği olan bir aşınma kanununu tanımlamak mümkün olamamıştır (Temiz,V.,2019). Kuru ve sınır-karışık sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbiri ile temas halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma gerilmesi sınırı aşıldığında kuvvetli bir adhezif veya bölgesel artan sıcaklık

etkisi ile teşvik edilen koheziv bir bağ meydana gelmektedir (Temiz, 2014). Bejjani vd. (2011) ise aşınma mekanizmasını partikül transfer oluşumuna göre tartışmışlar, polimer olmayan bir karşı yüzey üzerinde oluşturulan partikül transferinin yüzey malzemesi, pürüzlülük ve kayma koşulları tarafından oluştuğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.24. Kuru (yağsız) yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü



Şekil 4.25. Kuru yapılan deneylerde ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri değerleri

(Koçak vd., 2015) Kalay bronzunun aşınma yüzeyinin çok daha etkin bir şekilde plastik deformasyona uğradığı ve yüzeyde kalın sıvama tabakalarının var olduğunu, bu durumun sünek malzemelerin özellikle ağır yükleme şartlarında beklenen bir durum olduğunu belirtmişlerdir. Bu yüzeylerin aşınması sonrası daha çok yapraksı aşınma parçacıklarının oluşması, sünek malzemelerin aşınması sırasında aşınan parçacıklar ara yüzeye yapışmakta ve devam eden kayma periyodları sırasında birbirleriyle birleşerek ve deforme olarak sertleşmekte ve ara yüzeyden ayrıldıklarını ifade etmişlerdir. Kuru deney şartlarında aşınma izlerine bakıldığında diğer tüm yağ ile yapılan deneylere kıyasla çok geniş izlere, daha kabarık görünümlü aşınma izlerine rastlanmaktadır.  $R_a$  ve  $R_z$  ölçüm sonuçları da bu bulguyu desteklemektedir (Çizelge 4.15-16). Kuru deney şartlarında, herhangi bir yağlayıcının olmaması nedeni ile aşınmanın da yüksek olması beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

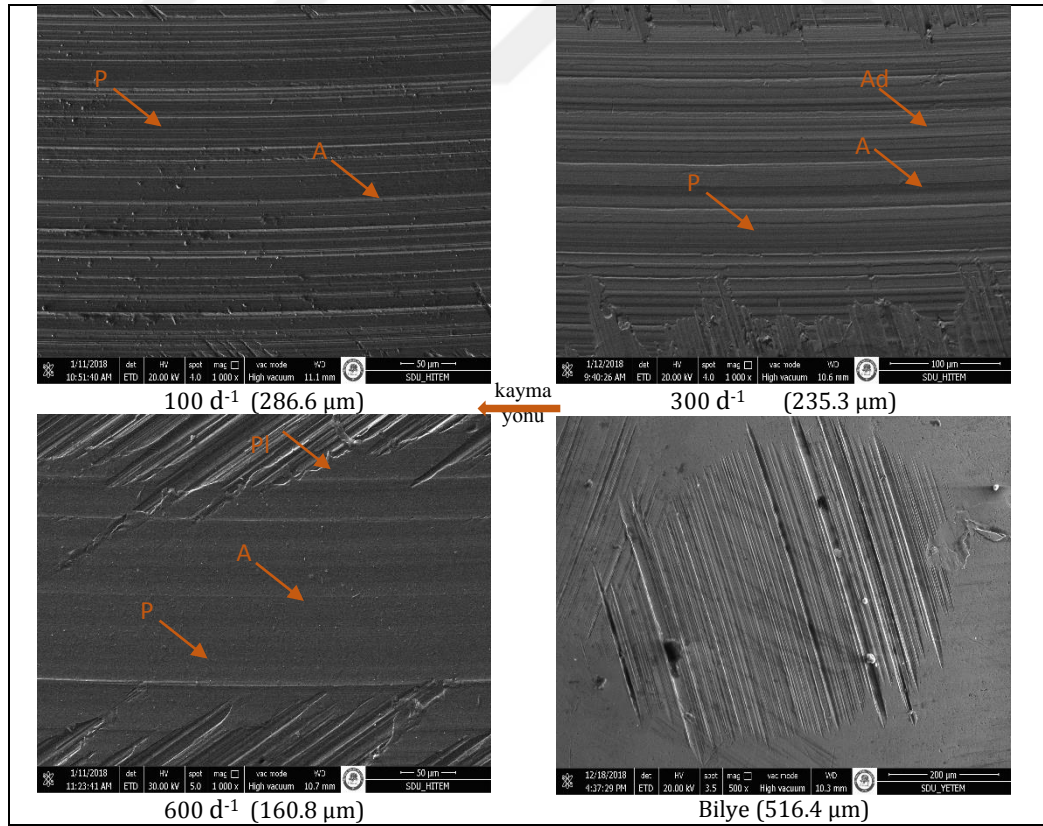
600 d<sup>-1</sup> hız, 15 N yükte (Şekil 4.24) SEM görüntülerinde oluşan tepe ve çukurların abrazif, adhezif aşınma ve plastik deformasyonların bir göstergesi olduğu açıktır. 300 d<sup>-1</sup> hız, 10N yükte (Şekil 4.18) deneyine ait SEM görüntülerinde iz genişliğinin ölçülebilen en yüksek değerde olduğu, kopan parçaların bilyeye sıvandığı (Şekil 4.24) rahatlıkla görülmektedir. Bu da başlangıçta adhezyon aşınması ve plastik deformasyonun birlikte olduğu, daha sonra bu aşınma mekanizmalarına abrazif aşınmanın da oluştuğunun bir göstergesidir. Bilyeye sıvanan yatak alaşımının karşı yüzeye sıvanmasından (yapışmasından) sonra bir katı yağlayıcı gibi davranarak bazı deneylerdeki sürtünme katsayısındaki düşüşün bir nedeni olarak açıklamak mümkündür. Bilyenin (100Cr6) yatak malzemesi (CuSn8Ni1)



ile kuru yağlama şartlarında aşınmış yüzeyinin mikrografları Şekil 4.24'de verilmiştir. SEM sonuçları, metallerin yıpranmış yüzeylerinde görülen hasarlar arasındaki etkileşimi göstermiştir. Özellikle bilye yüzeyindeki yatak malzemesinden kopan parçaların, bilye yüzeyine yapıştığı, kenetlendiği görülmektedir. Bunun sonucunda da, kuru sürtünme nedeniyle (yağlayıcı olmaması) aşınmanın yüksek olduğu, bilyeye yatak alaşımının transferinden sonra yapışarak iki benzer yapıdaki tabaka arasında çalışmaya devam ettiği, bununla adhezif ve abrazif aşınmaların birlikte olduğu sonucunu göstermiştir.

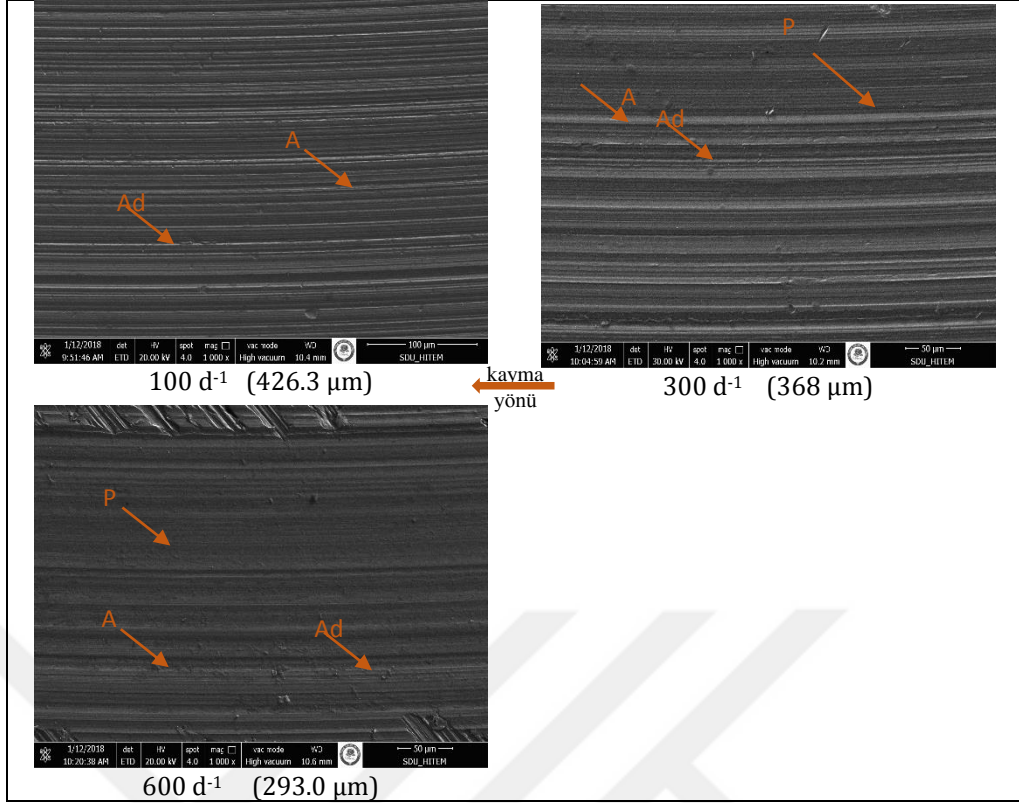
#### 4.5.2. Sınır-karışık YAME deney şartlarındaki numunelerin SEM analizleri

Sınır-karışık YAME yağlayıcı deney numuneler için ise tüm deneylerden birer örnek incelenmiştir. Sınır-karışık YAME yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki örnek numunelerin SEM görüntüleri (Şekil 4.26-28) ve iz genişlikleri (Şekil 4-29) verilmektedir.

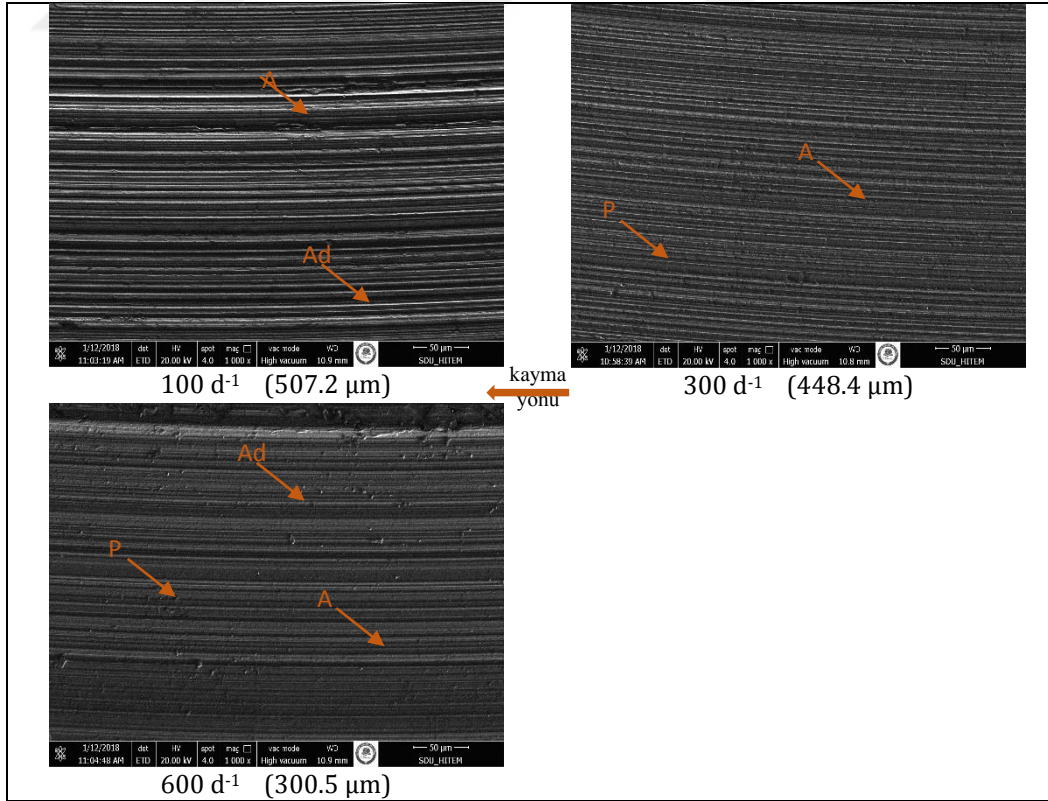


Şekil 4.26. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak ve bilye malzemesinin SEM görüntüsü (F=5N)

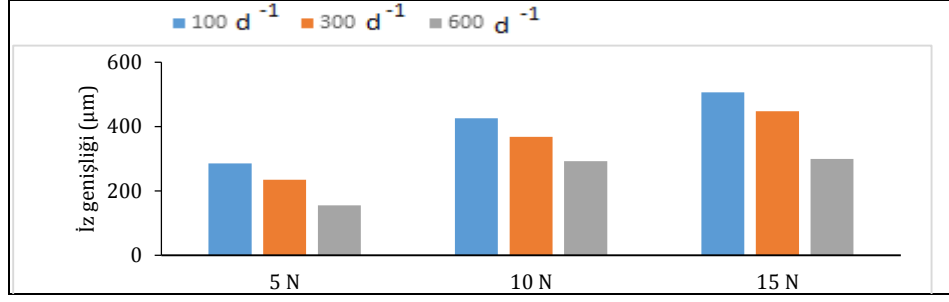




Şekil 4.27. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak malzemesinin SEM görüntüsü ( $F=10N$ )



Şekil 4.28. YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak malzemesinin görüntüsü ( $F=15N$ )



Şekil 4.29. YAME ile yapılan sınır-karışık yağlama şartlarındaki deneylerde ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri değerleri

YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak malzemelerinin SEM görüntüsü dikkate alındığında tüm deney verilerinin iz genişliği ölçümleri alındığında, artan yük ile aşınma iz genişliğinin yükseldiği; artan hız ile aşınma iz genişliğinin düştüğü görülmektedir (Şekil 4.29). Bu durum hızın artması ile oluşan yağlama şartlarında bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Ayrıca daha büyük hız şartlarında test numunesi yağın daha iyi bir yağlama performansı göstermesi açısından önemli bir bulgudur. Ancak yağlama sırasında temas sonucunda oluşacak adhezif aşınma partiküllerinin, çalışma yüzeyinden uzaklaştırılmaması nedeniyle abrazif ve abrazif aşınmanın özel bir tipi olan parlatma aşınmasının (prosesinin) oluşmasına ve gelişmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Artan hızla özellikle düşük yük olan 5 N'de aşınma izlerinin yok olduğu (Şekil 4.26), aşınma bölgesindeki izinde parlama olduğu ve Şekil 4.15-16-17'deki  $R_a$ ,  $R_z$  ve  $R_t$  ölçümlerinin azalması da bunu desteklemektedir.

Adhezif aşınma, yağlanmış ya da kuru temas koşulları altında kayan temas halinde olan iki düz katı yüzeyden kaynaklanan en yaygın aşınma türüdür. Birkaç bağlantı veya yama üzerinde yakın temasın yapıldığı iki katı malzemenin arayüzünde oluşturulan güçlü yapışkan kuvvetlerden kaynaklanır. Adhezif aşınmasının en önemli kısmı sert yüzey üzerinde bir arayüz partikül transfer oluşumu ve plastik deformasyondur. Pürüz tepelerindeki temasta, temaslar kayan parçalarla kesilir ve bu da parçaların bir yüzeyden ayrılmasına ve diğer yüzeye yapışmasına neden olabilir. Diğer bir deyişle, kayma devam ettikçe kaynamamalar (bağlanmalar) veya yamalar yapılmaya veya kırılmaya devam eder. Orijinal yüzeye çıkmayan veya geri dönmeyen partiküller gevşek aşınma partikülleri oluşturur. Birbirine kaynama (bağlanma) işlemi, yüksek yerel basınç

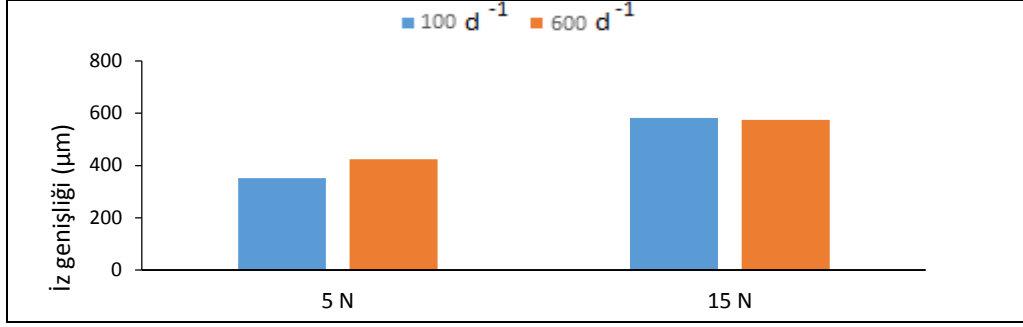
nedeniyle gerçekleşir. Pürüzler basıncı desteklemek için gerçek temas alanını artırmak için deforme olur. Yüzey filmleri olmadan, yüzeyler yapışır, ancak az miktarda kirletici, tamamen normal yükleme altında yapışmayı en aza indirir veya önler. Teğetsel kuvvetler uygulandığında, temas noktasında kirletici maddeler dağılır ve kavşaklarda soğuk kaynak yapılabilir. Sürekli kayma hareketi ile yeni bağlanmalar oluşturulur ve kesilir. (Alotabi,2014)

Sınır- karışık yağlama şartlarındaki YAME yağlayıcı ile test edilen aşınmış bilye yüzeyindeki aşınma izlerinin büyük olduğu 15 N deneyindeki yüzeylerin mikrograflarını Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Aşınma mekanizması, bu bölgede sürtünme işlemiyle ilişkili adhezif ve üç-cisimli abrazif aşınma olduğu düşünülmektedir. Adhezif aşınma, uygulanan yük ile aşınmış yüzeyin pürüzlülüğü biraz arttığında parlatma işlemine benzer bir yüzey oluşturmaktadır. Bilye yüzeyindeki şiddetli aşınma izlerinin, ara yüzeyde üçüncü bir cisim olarak hareket eden, yağlayıcıda içine karışan sert birikintilerin bulunması nedeniyle, abrazif üç-cisimli bir aşınma mekanizması SEM mikrograflarının görüntüsünde net bir şekilde görülmektedir. Bilye üzerindeki derin aşınma çizgilerinin de bu sert aşınma partiküllerinin sebep olduğu anlaşılmaktadır.

#### **4.5.3.Sınır Karışık BY yağlayıcı deney şartlarındaki numunelerin SEM analizleri**

Sınır-karışık BY yağlayıcı deney numuneler için ise en düşük, orta ve en yüksek hız ve yük değerlerindeki deneylerden birer örnek incelenmiştir. Sınır-karışık BY yağlama şartlarındaki örnek numunelerin SEM görüntüleri (Şekil 4.30) ve iz genişlikleri (Şekil 4-31) verilmektedir.





Şekil 4.31. BY yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki deneye ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri

BY yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki yatak malzemelerinin SEM görüntüsü ve ölçülen deney verilerinin iz genişliği ölçümleri dikkate alındığında artan yük ile aşınma iz genişliğinin arttığı görülmektedir(Şekil 4.31). 15 N olan en yüksek yük değerinde ise artan hız ile aşınma iz genişliğinin çok az miktarda düştüğü görülmektedir. Birbiri üzerinde kayan yüzeylerin arasında aşındırıcı sert partiküllerin bulunması ya da dışarıdan sisteme girmesi veya adhezif parçacıkları ve/veya oksidasyon tabaka parçacıkları olarak sistem içinde kalması abrazif aşınmanın oluşmasına ve gelişmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu bulguların yüzeylere uygulanan yüklerde, yüzeyden yüksek oranda malzeme çıkarılmasını, yani yüksek bir özgül aşınma oranını gösteren bir aşınma niteliği gösterebileceği belirtilmektedir(Song, 2017).

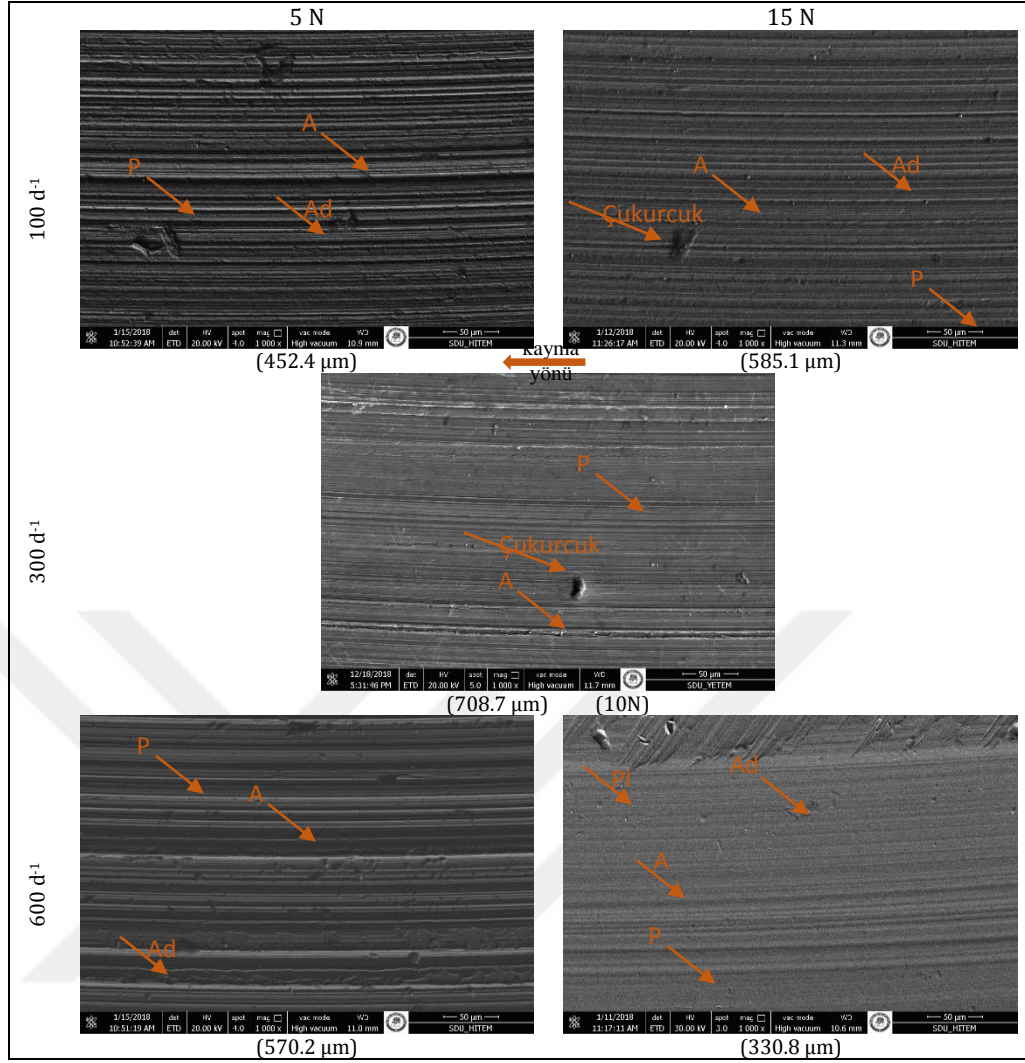
BY yağlayıcı ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki test edilen aşınmış bilye yüzeyinin mikrograflarını Şekil 4.30 de gösterilmektedir. Aşınma mekanizması adhezif aşınma ve üç cisimli abrazif aşınma mekanizmasıdır. Kopan partiküllerin bir kısmı bilyeye transfer edilirken bir kısmı da numune yüzeyine tekrar sıvanarak yatak yüzeyi test numunesi yüzeyinde kaldığından, yatak alaşımı test numunesi kütle kaybının çok büyük değerde olmamasına sebep olmaktadır. Ayrıca, ara yüzdeki yağlayıcı madde varlığı ile bu kadar pürüzsüz bir yüzey, düşük  $\mu$ 'ye neden olmuştur. Bilyenin aşınmış yüzeyinin niteliği, yağlama maddesinde üçüncü bir cisim olarak hareket eden, ara yüzeydeki kopan parçacıkların varlığına bağlıdır (Alotaibi, 2014).

Sınır-karışık yağlama şartlarındaki BY ile YAME yağlayıcı testlerdeki yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında BY yağlayıcı deneylerdeki aşınma izleri daha belirgin, artan hız ile izlerde bir azalma görülse de YAME yağlayıcı deneylerdeki gibi temas yüzeylerinde net bir parlama görülmemiştir. Ayrıca aşınma izleri BY'de YAME'ye göre daha (10 N, 300 d<sup>-1</sup> hariç) büyük değerde olduğu rahatlıkla görülmektedir. Ayrıca R<sub>a</sub> pürüzlülük sonuçlarına bakıldığında da BY'de daha fazla artış olduğu görülmektedir. BY ve YAME yağlayıcılar ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki aşındırıcı çelik bilye üzerindeki aşınma izleri ölçümleri karşılaştırıldığında YAME'nin BY'ye göre daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.30.).

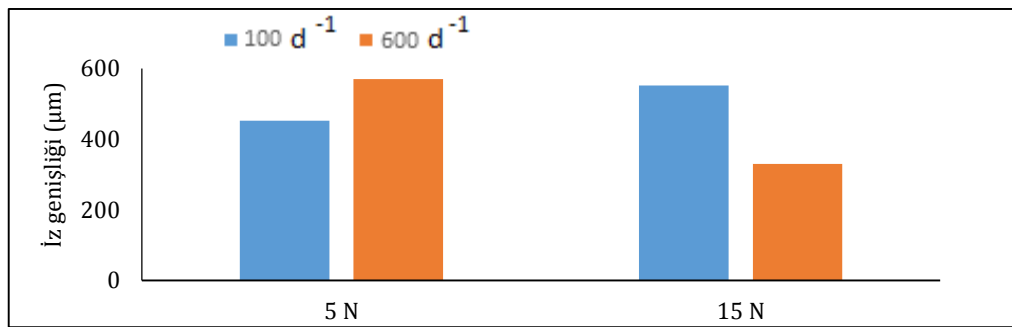
#### **4.5.4. Sıvı YAME deney şartlarındaki numunelerin SEM analizleri**

Sıvı YAME yağlayıcı ortamdaki deney numuneler için ise en düşük, orta ve en yüksek hız ve yük değerlerindeki deneylerden birer örnek incelenmiştir. Sıvı YAME yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki örnek numunelerin SEM görüntüleri (Şekil 4.32) ve iz genişlikleri (Şekil 4-33) verilmektedir.





Şekil 4.32. YAME ile sıvı yağlayıcı ortamı yağlama şartlarındaki yatak malzemesinin SEM görüntüsü



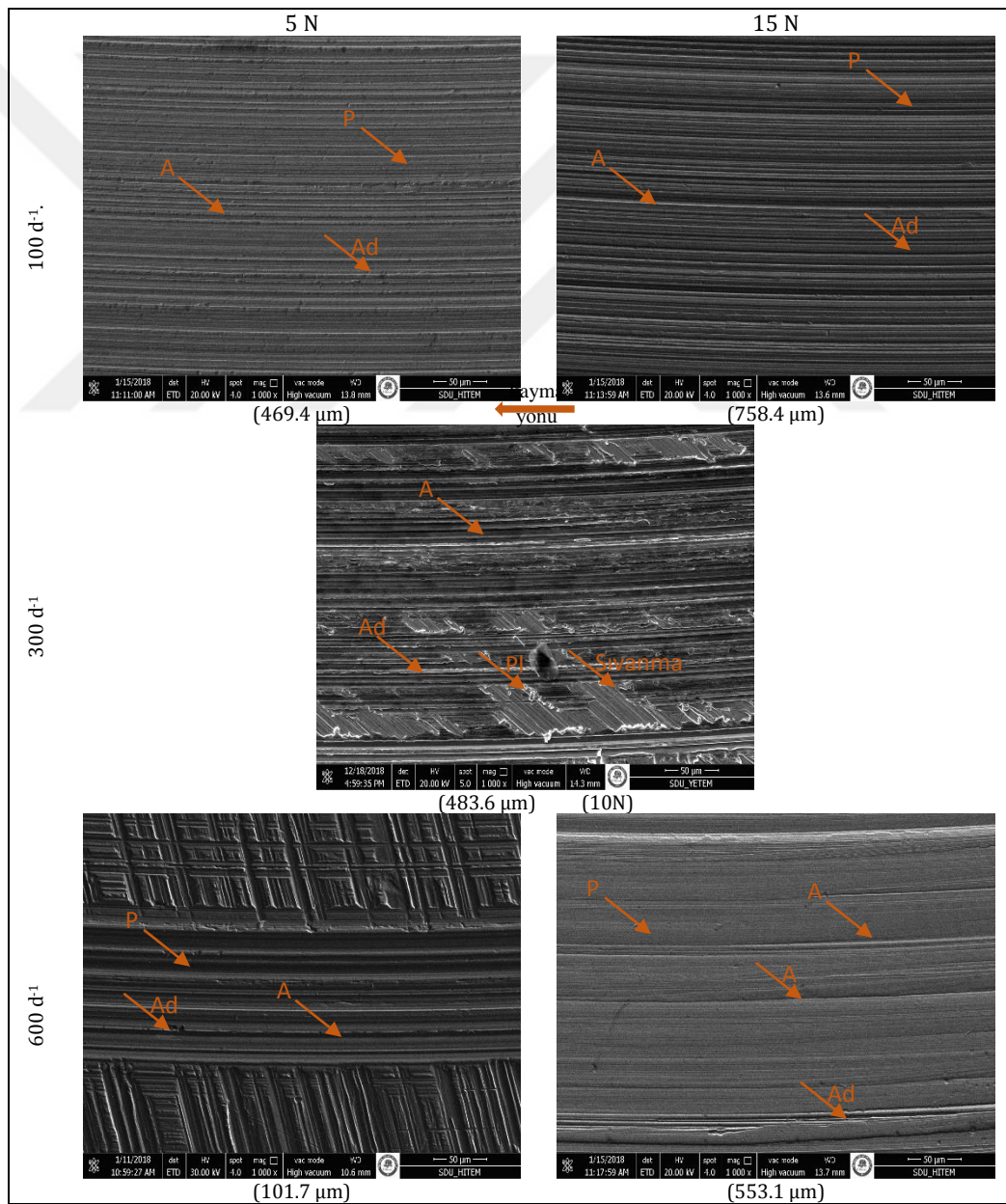
Şekil 4.33. YAME ile sıvı yağlayıcı ortamı yağlama şartlarındaki deneylere ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri

YAME ile sıvı yağlayıcı ortamı yağlama şartlarındaki yatak malzemelerinin SEM görüntüsü dikkate alındığında ölçülen deney verilerinin iz genişliği ölçümleri dikkate alındığında en düşük iz genişliği en yüksek yük ve hızda olduğu

görülmektedir. Adhezif aşınmayı takiben abrazif aşınmanın olduğu düşünülmektedir. Bu yüzeylerde de abrazif ve parlatma aşınmalarının olduğunu söylemek mümkündür(Alotaibi, 2014).

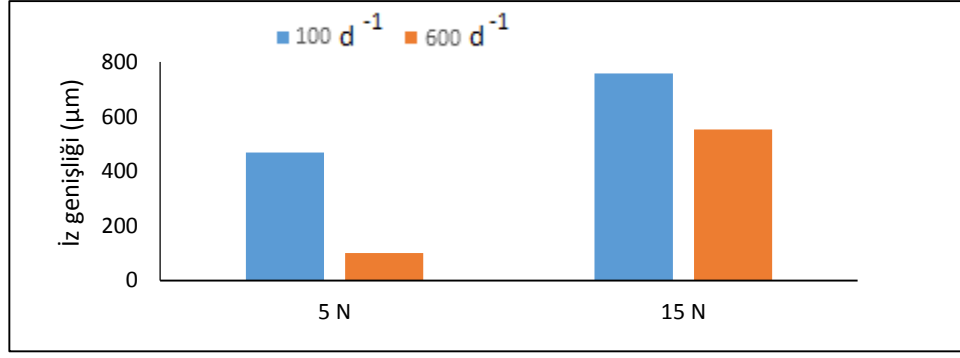
#### 4.5.5. Sıvı BY deney şartlarındaki numunelerin SEM analizleri

Sıvı BY yağlayıcı ortamdaki deney numuneler için ise en düşük, orta ve en yüksek hız ve yük değerlerindeki deneylerden birer örnek incelenmiştir. Sıvı BY yağlayıcı ortamı yağlama şartlarındaki örnek numunelerin SEM görüntüleri (Şekil 4.34) ve iz genişlikleri (Şekil 4-35) verilmektedir.



Şekil 4.34. BY ile sıvı yağlayıcı yağlama şartlarındaki malzemenin SEM görüntüsü





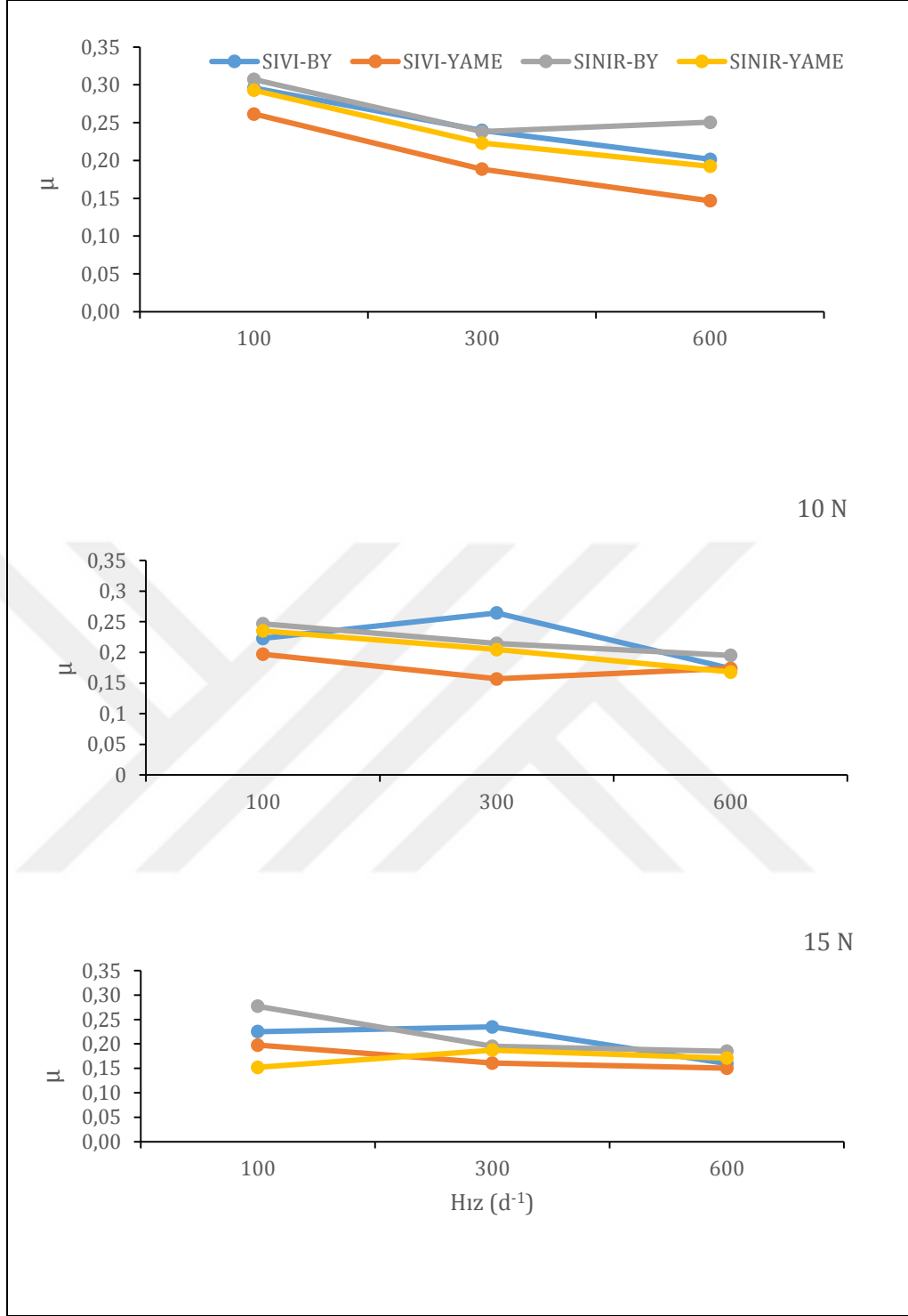
Şekil 4.35. BY yağlayıcı ile sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait SEM görüntülerinde ölçülen iz genişlikleri

BY yağlayıcı ile sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki yatak malzemelerinin SEM görüntüsü dikkate alındığında tüm deney verilerinin iz genişliği ölçümleri alındığından artan yük ile aşınma iz genişliğinin yükseldiği; artan hız ile aşınma iz genişliğinin düştüğü görülmektedir. Hızın artması ile oluşan yağlama şartlarının daha iyi olduğunu göstermektedir. İşleme sırasında malzeme arasında kopan parçacıkların sıkışabileceği ve üç cisim abrazif aşınmaya yol açabileceği unutulmamalıdır (Bejjani vd., 2011). Yağlama sırasında Adhezif aşınma ile birlikte abrazif aşınma oluşmuştur. Ayrıca düşük gerilimli aşınma altında meydana gelen çizilme, karşılaşılan aşındırıcı parçacıkların boyutuna ve parçacıkları bir yüzeye karşı zorlayan kuvvete bağlı olduğu belirtilmektedir (Kenneth, 2014).

Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki BY ile YAME yağlayıcı deneylerdeki test numunesi yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında BY’de aşınma izleri sınır-karışık yağlama şartlarındaki gibi çok net bir ayırım söz konusu değildir. İz genişliğinde ve iz belirginliğinde artış ve/veya düşüşler görülmektedir. Bunun nedeni test şartlarının sahip olduğu çalışma noktasının Stribeck eğrisindeki kritik noktanın sağında veya solunda olmasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar sıvı içerisinde bu deneyler yapılsa da yeterli bir yağ filmi oluşmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca  $R_a$  pürüzlülük (Şekil 4.15) sonuçlarına bakıldığında da hem YAME hem de BY’de benzer değişim göstermekte, genelde  $R_a$  değerlerinde düşüşler olduğu görülmektedir. Böylece yağlama ile yüzeylerin birbirine alışma devresi gibi benzer bir çalışma şartları oluştuğunun bir göstergesidir.

Yağlayıcı maddesinin varlığı, kuru sürtünme durumuna göre yatak malzemesi ve bilye malzemeleri arasında oluşan aşınma izlerini ve sürtünme katsayı değerini önemli ölçüde azaltmıştır. Yağlayıcıların malzemelerin aşınma davranışını belirlemede önemi açıkça görülmektedir. Ara yüzeyde üçüncü bir cisim olarak hareket eden, yağlayıcıda içine karışan sert birikintilerin bulunması nedeniyle, abrazif üç-cisimli bir aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Yıpranmış yüzeyin mikrografları ile kuru ve yağlayıcı ilaveli sürtünme koşulları arasındaki kıyaslamalarda, kuru ortamdaki yıpranmış yüzeyde şiddetli aşınma ve plastik deformasyon net bir şekilde görülmektedir. Sınır-karışık yağlama koşullarında YAME ve BY yağlayıcılar ile sürtünme ve aşınma şartları kıyaslandığında ise atık YAME yağlayıcısındaki yağ asitlerinin varlığı, aşınmaya ve sürtünme sonuçlarına önemli ölçüde etki ettiği belirtilmektedir(Fox vd., 2004).

YAME ve BY yağlayıcı ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait tüm yüklerdeki hız- $\mu$  grafiği Şekil 4.36 da verilmiştir. Böylelikle hem yağlayıcı hemde yağlama türleri arasında kıyaslama yapılmıştır.



Şekil 4.36. YAME ve BY yağlayıcı ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait tüm yüklerdeki hız- $\mu$  grafiği

5 N sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneyde hızın artmasıyla YAME ve BY yağlayıcı, ortalama  $\mu$  değeri azalırken, sınır-karışık yağlama şartlarında

YAME yağlayıcı deneylerde azalmaya devam ederken, BY yağlayıcı deneylerde 300 d<sup>-1</sup> hızda minimum, 600 d<sup>-1</sup> hızda hafif yükseliş sergilemiştir.

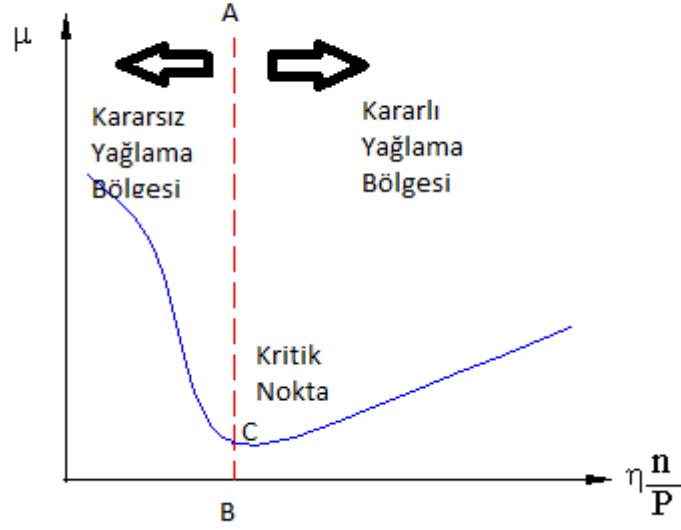
10 N sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında BY yağlayıcı 300 d<sup>-1</sup> hızda maksimum ortalama  $\mu$  değeri, YAME yağlayıcı ise 300 d<sup>-1</sup> hızda minimum ortalama  $\mu$  değeri vermiştir. Sınır-karışık yağlama şartlarında hem YAME yağlayıcı hem BY yağlayıcı deneylerde, ortalama  $\mu$  değeri devamlı düşmektedir.

15 N sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında BY yağlayıcı 300 d<sup>-1</sup> hızda maksimum ortalama  $\mu$  değeri, YAME yağlayıcı deneylerde ise 300 d<sup>-1</sup> hızda minimum ortalama  $\mu$  değeri göstermektedir. Sınır-karışık yağlama şartlarında BY yağlayıcı deneylerde hız arttıkça azalmaya devam ederken YAME yağlayıcı deneylerde ise hızın artmasıyla ortalama  $\mu$  değerinde de artış göstermektedir.

Tüm yüklerde YAME ve BY yağlayıcı ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait hız grafiklerinde YAME BY'ye göre daha düşük ortalama  $\mu$  değeri vermektedir (Şekil 4.36).

Sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında tüm yükleri göz önüne aldığımızda YAME için en düşük ortalama  $\mu$  değeri hem sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama hemde sınır-karışık yağlama şartlarında 600 d<sup>-1</sup> hız değerinde gerçekleşmiştir(Şekil 4.36).

İki yüzey arasındaki aşınma davranışı, yüzeyler arasındaki yağlama rejimine göre farklılık göstermektedir. Hidrostatik ya da hidrodinamik yağlama rejiminde yüzeyler arasındaki kalın yağlayıcı film tabakası bu yüzeylerin birbirine temasını önleyerek aşınma miktarını ciddi oranda azaltırken, sınır yağlamada yüzeylerdeki pürüzlerde metal-metal temas ederek ciddi miktarda aşınma gözlenebileceği belirtilmektedir (Tekin ve Akkök, 2011).



Şekil 4.37. Sürtünme katsayısının ( $\eta n / P$ ) parametresi ile değişimi (Gemalmayan,2019;. Budynas vd.,2011; Durak, 2019; Tekin ve Akkök,2011)

Şekil 4.37. 'deki AB doğrusunun olduğu kritik nokta

$$\frac{\eta n}{P}$$

1.16

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada  $\eta$  yağlayıcının dinamik viskozitesi(Pa.s),  $n$  devir/saniye cinsinden hız,  $P$  ise ortalama basıncı ifade etmektedir. Yağlama rejiminin sınır yağlama şartından kurtulup, kararlı yağlama rejimine (kalın filmli yağlama) geçebilmesi için

$$\frac{\eta n}{P} > 1.7 \cdot 10^{-6}$$

1.17

şartı sağlanmalıdır(Tekin, ve Akkök, 2011).

İster hidrodinamik yağlama tipi olsun ister hidrostatik yağlama tipi olsun arzu edilen kalın yağ filmi kararlı yağlama olarak tanımlanmaktadır. Bunun nedeni Şekil 4.37.'deki grafikteki AB doğrusunun sağında kalacak şekilde seçilen parametrelerle çalışıldığı zaman ve zamanla yağ sıcaklığının herhangi bir nedenle

artması kaçınılmazdır. Sıcaklığın artması ile yağın viskozite düşeceğinden yatak eksenindeki ( $\eta n / P$ ) değeri de düşecek, ve sola doğru hareket edilecektir. Yatay ekseninde sola doğru gelmesi demek sürtünme katsayısı değerinin düşmesi demektir. Bu düşüş yağlayıcının kayması nedeniyle üretilen ısıyı artıracak kadar büyüklükte olmadığından yağlayıcının sıcaklığı düşer. Böylece BA ordinatının sağ tarafındaki yağlama kendi kendini düzelttiği için Kararlı Yağlama (Kalın film yağlama) olarak tanımlanmaktadır.

Diğer taraftan AB doğrusunun sol tarafındaki bölgede viskozitedeki bir düşüş sürtünme katsayısının büyümesine, bunun sonucu da sıcaklığın artmasına yol açacaktır. Bu durumunun tekrarlanarak devam etmesi ise sonucunda mil ile yatak yüzeylerinin bir birine kaynamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle AB doğrusunun sol tarafında Kararsız (ince film yağlama) bir yağlama özelliği göstermektedir.

Viskozitenin küçük olması ( $\eta n / P$ ) değerinin küçük olması demektir. Bu ise yağ film kalınlığının çok incilmesi demektir. Sonuçta mil ve yatak yüzeylerinde metal-metal temasının olma ihtimalini artırır ve bu da daha büyük bir sürtünme katsayısı demektir. Buna göre C noktası, ( $\eta n / P$ ) değerinin küçülmesi ile mil ve yatak yüzeylerinde metal-metal temasının başlangıcını gösteren bir Kritik Nokta olduğunu bize göstermektedir (Gemalmayan,2019;. Budynas vd.,2011; Durak, 2019; Tekin ve Akkök,2011).

Numunelerdeki SEM görüntülerindeki aşınma iz genişliği esas alınarak (Denklem 1.16) hesapladığımız parametre değerleri Çizelge 4.2 verilmiştir.

Çizelge 4.2. SEM görüntüleri olan test numunelerinin sürtünme katsayılarının ( $\eta$  n / P ) parametreleri ile değişimi

Deney Şartları	F(N)	n(d <sup>-1</sup> )	$\eta.n/P$	$\mu_{ort}$
Sınır- Karışık YAME	5	100	1.40.10 <sup>-10</sup>	0.29
	5	300	2.84. 10 <sup>-10</sup>	0,22
	5	600	2.63.10 <sup>-10</sup>	0.19
	10	100	1.56. 10 <sup>-10</sup>	0,24
	10	300	3.48.10 <sup>-10</sup>	0.2
	10	600	4.41. 10 <sup>-10</sup>	0.17
	15	100	1.47.10 <sup>-10</sup>	0.15
	15	300	3.43.10 <sup>-10</sup>	0,19
	15	600	3.08.10 <sup>-10</sup>	0.17
Sıvı YAME	5	100	3.50.10 <sup>-10</sup>	0.26
	5	600	3.34.10 <sup>-9</sup>	0.15
	10	300	1.29.10 <sup>-9</sup>	0.16
	15	100	1.96.10 <sup>-10</sup>	0.2
	15	600	3.73.10 <sup>-10</sup>	0.15
Sınır- Karışık BY	5	100	7.11.10 <sup>-10</sup>	0.31
	5	600	6.21.10 <sup>-9</sup>	0.25
	10	300	1.42.10 <sup>-9</sup>	0.21
	15	100	6.51.10 <sup>-10</sup>	0.27
	15	600	3.81.10 <sup>-9</sup>	0.19
Sıvı BY	5	100	1.27.10 <sup>-9</sup>	0.3
	5	600	3.52.10 <sup>-10</sup>	0.2
	10	300	2.01.10 <sup>-9</sup>	0.26
	15	100	1.10.10 <sup>-9</sup>	0.23
	15	600	3.52.10 <sup>-9</sup>	0.16

Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki test numunesi yağın içerisinde olmasına rağmen hem ortalama  $\mu$  değerlerinin büyüklüğü hem de aşınma iz değerlerinin sıvı filmlili yağlama şartlarını tam sağlamadığını göstermektedir. Sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki yatak numunelerinde oluşan aşınma izlerinin mevcut olması, bilve ile yatak malzemesi yüzeyleri arasında yeterli bir yağ filminin oluşmadığının bir göstergesidir. Ayrıca Çizelge 4.2'deki tüm test sonuçlarına ait parametre değerlerinin kritik değerden küçük olduğu da görülmektedir. Sonuç olarak tüm bu veriler ışığında sınır ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarının sıvı filmlili değil, sınır ve/veya karışık yağlama bölgesinde ve kararsız yağlama rejiminde (ince yağ filmlili) olduğu anlaşılmaktadır.

#### 4.5.6. Tüm deney şartlarındaki numunelerin EDS analizleri

Tüm deney şartlarında belirlenen deneylere ait yüzey analizleri yapılan numunelerin EDS değerlerine göre elementlerin % ağırlık, % atomik değerleri Çizelge 4.3 de verilmiştir. Buna göre bilye ve yatak malzemesi üzerindeki element geçişleri incelenmiştir.

Çizelge 4.3. Tüm deney şartlarında belirlenen deneylere ait EDS değerlerine göre elementlerin % ağırlık, % atomik değerleri

Deney şartları	Elementlerin (Ağırlık%, Atomik %)										
	Sn	Cu	C	O	Ni	Mn	Fe	Cr	Si	S	P
Kullanılmamış Yatak	6.33	92.45	0	0	1.22	0	0	0	0	0	0
	3.49	95.15	0	0	1.36	0	0	0	0	0	0
Sınır YAME (10 N, 300 d <sup>-1</sup> )	3.81	76.86	15.34	3.07	0.91	0	0	0	0	0	0
	1.18	44.37	46.83	7.04	0.57	0	0	0	0	0	0
Sınır BY (10 N, 300 d <sup>-1</sup> )	5.26	82.31	11.55	0	0.88	0	0	0	0	0	0
	1.91	55.93	41.51	0	0.65	0	0	0	0	0	0
Sıvı BY yağlayıcı ortamdaki (10 N, 300 d <sup>-1</sup> )	5.79	92.70	0	0	1.52	0	0	0	0	0	0
	3.18	95.14	0	0	1.58	0	0	0	0	0	0
Sıvı YAME yağlayıcı ortamdaki (10 N, 300 d <sup>-1</sup> )	5.65	80.17	13.36	0	0.82	0	0	0	0	0	0
	1.95	51.80	45.67	0	0.57	0	0	0	0	0	0
Kuru (10 N, 300 d <sup>-1</sup> )	6.80	91.63	0	0	1.57	0	0	0	0	0	0
	3.75	94.49	0	0	1.75	0	0	0	0	0	0
Bilye kullanılmamış	0	0	6.97	0	0	1.00	78.02	13.40	0.45	0.11	0.05
	0	0	25.53	0	0	0.80	61.43	11.33	0.70	0.15	0.08
Kuru Bilye	1.53	26.22	19.87	6.13	4.45	0.85	32.33	8.40	0	0.22	0
	0.39	12.50	50.11	11.60	2.29	0.47	17.53	4.89	0	0.20	0
Sınır YAME Bilye	1.47	20.42	19.16	6.29	5.39	0.99	35.99	9.66	0.19	0.45	0
	0.38	9.79	48.58	11.98	2.79	0.55	19.63	5.66	0.21	0.42	0
Sınır BY Bilye	1.10	0	13.60	0	8.19	1.30	59.59	14.57	0.60	1.04	0
	0.69	0	41.70	0	5.14	0.87	39.29	10.32	0.79	1.20	0

Kuru sürtünmenin gerçekleştiği bilyede yüzeyde aşınma yapışma olduğu ve EDS sonuçlarına bakıldığında (Çizelge 4.3) ise yatak malzemesinden taşınan üçüncü cisimlerin varlığı (Sn, Cu ve Ni) görülmektedir. Uygulanan yükün, aşınma döküntülerini yüzeye yapıştırmada yardımcı olduğu, uygulanan yük nedeniyle de iyi bir aşınma performansı ile sonuçlandığı anlaşılmaktadır (Alotaibi, 2014). Temas bölgesinde görülen yüksek plastik deformasyondan kaynaklanabilecek çok büyük miktarda döküntüler nedeniyle, kuru şartlarda yüksek aşınma miktarı



gerçekleşmiştir. Başka bir deyişle, yağlamanın olmadığı kuru yağlama şartlarında, yatak malzemesi yüzeyinde oluşan sıyırılma ve döküntülerin yüksek malzeme kaybına yol açtığı görülmektedir.

Kuru sürtünmenin gerçekleştiği yatakta EDS analizleri (Çizelge 4.3) incelendiğinde C miktarındaki artış yatak malzemesinden ve bilyeden kopan parçaların plastik deformasyonunu göstermektedir.

YAME ile sınır-karışık yağlama şartlarında, aşınma sonucunda, yatak yüzeyinden malzemenin koparak ayrıldığı EDS sonuçları ile görülebilmektedir. Ara yüzde plastik deformasyonun meydana geldiği, bu da yatak malzemesinden materyalin çıkarılmasına ve aynı zamanda yüzeyin düzgünleştirilmesine neden olmuştur(Alotaibi, 2014).

#### **4.6. Aşınma Miktarı Ölçüm Sonuçları Archard's Eşitliği**

Deney öncesi ve deney sonrası numunelerin kütleleri ölçülerek kütle aşınma kayıplarının ortalama değerleri belirlendikten sonra ve deney şartları ile aşınma miktarının değişimini daha iyi anlayabilmek için Archard's denklemi (Denklemler 1.2) ile K aşınma indeksi değerleri hesaplanmıştır(Şekil 4.37).

Hesaplanan K değer aralıklarına göre aşınma sınıflaması şu şekilde tanımlanmıştır (Challen vd., 1986);

<b>Şiddetli aşınma</b>	<b>:</b>	<b><math>10^{-2} - 10^{-4}</math></b> ,
<b>Orta aşınma</b>	<b>:</b>	<b><math>10^{-4} - 10^{-6}</math></b> ,
<b>Parlatma aşınması:</b>		<b><math>10^{-6} - 10^{-8}</math></b>



Şekil 4.38. Tüm yağlama şartlarında Archard's denklemi aşınma indeksi

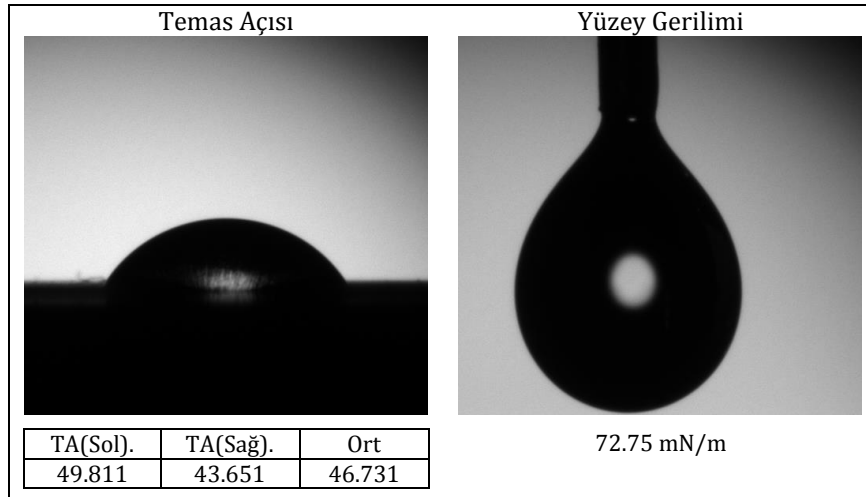
Buna göre;

- Kuru deney şartları özellikle 10 N yük ve 100 d<sup>-1</sup> hızda şiddetli aşınma,
- YAME yağlayıcı ile yapılan sınır -karışık yağlama deney şartlarında parlatma aşınması (parlatma prosesi) olarak,
  - BY yağlayıcı ile yapılan sınır -karışık yağlama, YAME ve BY yağlayıcılar ile yapılan sıvı yağlayıcı ortamı yağlama deney şartlarında ise parlatma ve orta aşınma olarak görülmektedir.
- Tüm deney şartlarına bakıldığında (Şekil 4.37.b) en yüksek K değerinin kuru deney şartlarında oluşması beklenen bir sonuçtur.

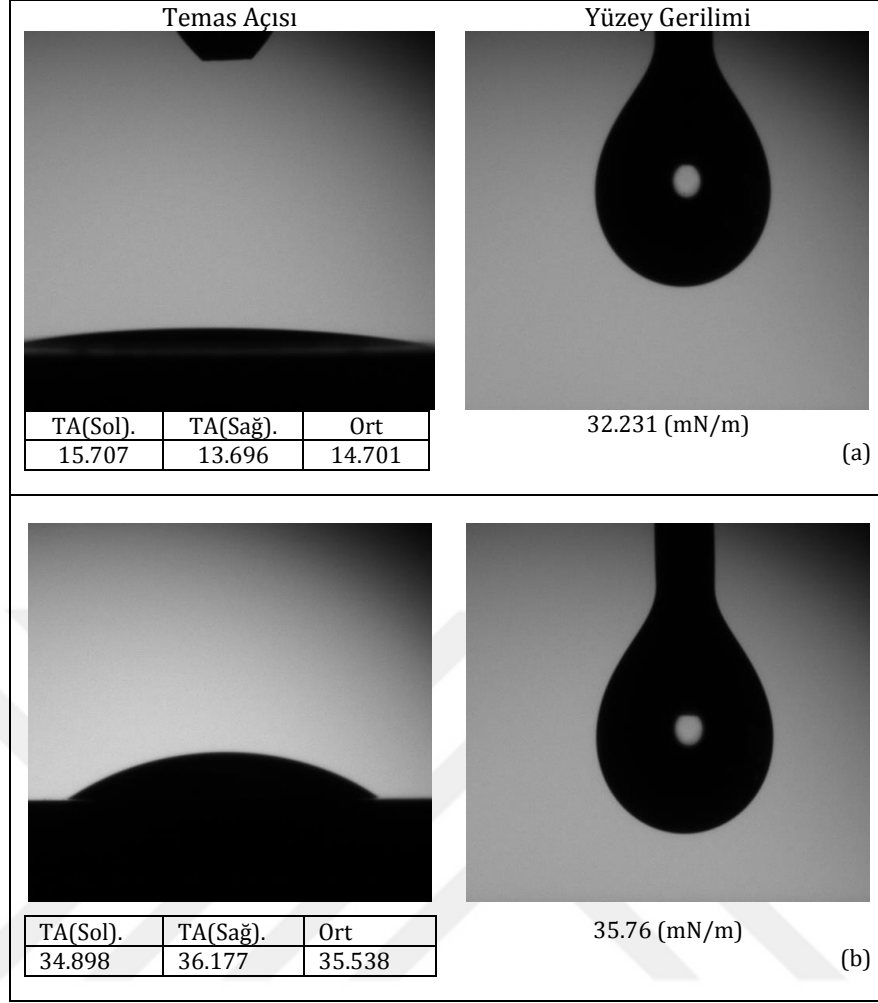
#### 4.7. Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı ve yüzey gerilimi ölçümleri SDÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında KSV CAM 101 model temas açısı ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz bilgisayar kontrollü olup yüzey-ara yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümü yapabilmektedir. Bu cihaz yüzey gerilimi ölçümünde asılı damla tekniğini kullanmaktadır. BY ve YAME yağlayıcıları ve suya ait temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri Şekil 4.38 ve 4.39'da verilmiştir.

Temas açısı bir katının bir sıvı tarafından ıslatılan miktarının nicel ölçümüdür. Temas açısı  $90^\circ$ 'den küçükse sıvı yüzeyi ıslatıyor;  $90^\circ$ 'den büyükse ıslatmıyor demektir. Hidrofilik yüzeylerde su damlası yüzeyde dağılma eğilimi göstermekte hidrofobik yüzeylerde ise damla yayılmak yerine küresel bir şekilde durma eğilimi göstermektedir(Şekil 4.38). Eğer yüzeyler bu eğilimleri çok fazla gösteriyorlarsa. yani su damlası tamamen yayılıyorsa ve yüzeyle yaptığı açı  $5^\circ$  den küçükse ( $0^\circ$  yaklaşıyorsa) buna süperhidrofilik; damla neredeyse küresel bir şekilde duruyorsa ve yüzeyle yaptığı açı  $150^\circ$  den büyükse ( $180^\circ$  yaklaşıyorsa) süperhidrofobik yüzeyler olarak adlandırılır (Bağçeci, 2010).



Şekil 4.39. Su damlasına ait temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri



Şekil 4.40. Deneylerde kullanılan yağlara ait temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri, (a) YAME, (b) BY

Islanabilirlik, yumuşak ve sert yüzeyleri kaplamak için bir sıvı eğimi olarak tarif edilebilir ve sürtünme ve aşınma bakımından bu tür yüzeylerde sertlik ilişkilerinde bir dengeyi muhafaza eder. Islatma yükü ve ayrı yüzeyleri taşıyabilen bir tribofilm oluşturmaya yardımcı olur (Pawlak, Urbaniak, ve Oloyede 2011). Bu nedenle deney test yağlayıcıların her ikisi de hidrofil özellikte olup ıslatma sağlayabilir niteliktedir (Şekil 4.39). Yüzey geriliminin matematiksel modeli birim uzunluğa düşen kuvvettir. Bir sıvının yüzey gerilimi; yüzey üzerinde sıvının yüzey genişlemesine zıt olan birim uzunluk başına karşılık gelen kuvvettir.

Hem BY hem de YAME temas açısı ölçümleri 90°'den küçük olduğu, ıslatma kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir. BY temas açısı ortalama değeri

yaklaşık 35.5°, YAME'nin ise yaklaşık 14.7° olduğu, bu da bize YAME'nin ıslatma kabiliyetinin daha iyi olduğu, yağın yüzeye yapışarak tutunma kabiliyetinin iyi olduğunun bir göstergesi olarak belirtmek mümkündür. YAME ve BY'nin viskozite değerleri (Çizelge 3.1-3.2) dikkate alındığında YAME'nin BY'e göre daha düşük olmasına rağmen yüzeyde tutunma kabiliyeti daha yüksek değerde olması YAME'nin daha iyi bir yağlayıcı adayı olduğunun, viskozitesinin daha düşük olması sıvı filmlili yağlama rejiminde daha düşük sürtünme katsayısına sahip olacağını göstermektedir. Böylece daha az enerji kaybına sebep olacaktır.

Bir sıvının molekülleri ile katıların temas sırasında; kohezyon kuvveti, adezyon kuvvetinden küçükse, sıvı katıya yapışır ve yüzeyine yayılarak katıyı ıslatır. Ters durumda ise yüzeye yayılmayacak, moleküller biri birine bağlı kalacağından, sıvı katıya yapışmaz ve katıyı ıslatmaz. Yüzey geriliminin azalması sıvının ıslatma özelliğini artırmaktadır. Deneyde kullanılan her iki yağa ait yüzey gerilmeleri birbirine yakın ve ıslatabilir özelliktedir. Yüzey gerilmeleri ise az da olsa BY yağlayıcıya göre YAME yağlayıcının biraz daha düşük olduğu, bununda yüzeye yapışma yönünden daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, çevre dostu bitkisel atık yağlardan elde edilen ve biyodiesel üretiminde de kullanılan YAME'nin yağlama yağı olarak kullanıldığında göstereceği tribolojik performans araştırılmıştır. Bunun yanı sıra YAME yağlayıcının aşınma, sürtünme, yüzeye tutunma ve yüzey gerilimi gibi davranış özellikleri BY yağlayıcı ile karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Çalışmada, yatak üretiminde kullanılan bakır esaslı CuSn8Ni1 alaşımlı yatak malzemesinin iki farklı yağ ile kuru, sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında kullanılabilirliklerini araştırmak için  $\mu$  değerlerinin kayma mesafesine göre değişimleri hız ve yük değerlerine göre grafikler halinde verilmiş ve  $\mu$  sinyallerinin zaman-frekans analizi yapılmıştır. Sürtünme katsayılarının KZFD ile zaman-frekans analizleri yapılmış ve bu yeni yaklaşım kullanılarak zamana bağlı tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Aşınma özelliklerinin belirlenmesi için tüm deney şartlarındaki yatak test numunelerinin kütle kayıpları incelenmiştir. Yatak malzemesinin tüm deney şartlarında pürüzlülükleri, Anova analizi kullanılarak, yağlama şartları ve yağ türlerine göre değerlendirilmiştir. Aşınma şiddetini belirlemede Archard denklemi ile hesaplanmıştır. Yağlayıcıların hidrofilitik ve ıslanabilirlik özelliklerini belirlemede ise temas açısı ve yüzey gerilimi değerleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Tüm kuru sürtünme deney şartlarında elde edilen  $\mu$  değerleri sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında elde edilen sürtünme katsayılarından oldukça büyük değerlerde olduğu, her iki yağlayıcının sürtünme katsayılarına etkisi elde edilen deney sonuçlarından net olarak görülmüştür.
- Sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında YAME ve BY yağlayıcı deneylere ait verilere göre genellikle yük arttıkça ortalama  $\mu$  değerleri azalmıştır.
- Tüm deney şartlarında en yüksek ortalama  $\mu$  değeri 5 N yük ve 100 d<sup>-1</sup> hızda gerçekleşirken, kuru, sınır - karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında BY yağlayıcı deneylerde genellikle en düşük  $\mu$  değeri ise 15 N yük, 600 d<sup>-1</sup> hız değerindedir.

- Sınır-karışık yağlama şartlarında YAME yağlayıcı kullanılan deneylerde en düşük  $\mu$  değeri 15 N yük, 100 d<sup>-1</sup> hız değerinde ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında YAME yağlayıcı kullanılan deneylerde ise en düşük  $\mu$  değeri 5 N yük, 600 d<sup>-1</sup> hız değerinde elde edilmiştir.

- Tüm yük değerlerinde sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında YAME için en düşük ortalama  $\mu$  değeri 600 d<sup>-1</sup> hız değerinde gerçekleşmiştir.

- YAME yağlayıcı ile yapılan deneylerdeki kütle kaybı, BY yağlayıcı ile yapılan deneylere göre daha az gözlenmiştir.

- Kuru şartlara göre sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartları kıyaslandığında aşınma izlerinde çok büyük oranda düşüşler görülmüştür.

- Yağlama şartlarına göre en az R<sub>a</sub> pürüzlülük değeri YAME yağlayıcılı deneylerinde elde edilmiştir.

- KZFD ile belirlenen yüksek genliğin kuru deney şartlarında yüksek aşınmayı göstermektedir. Söz konusu bu yüksek genlik miktarı, aşınma yüzeylerinde partikül transferi oluşumu ve plastik deformasyonun bir işareti olmaktadır(Song vd., 2017).

- Test edilen numunelerin  $\mu$  sinyallerinin KZFD ile elde edilen sonuçlara göre zamana bağlı frekans genlik dağılımlarının ve piklerinin, tribolojik davranışları belirlemede büyük öneme sahiptir.

- Zaman frekans analizi KZFD'nin hem zaman hem de frekans ortamında tribolojik davranışları anlamada etkili ve pratik bir araç olarak kullanılabileceği, KZFD ile yapılan bu hesaplamaların tribo sistemlerdeki sürtünme davranışı hakkında bilgi verebileceği(Song vd., 2017) ve bu yöndeki çalışmaların arttırılmasının önemli olduğu belirlenmiştir.

- Sürtünme katsayı değerleri, frekans genlik değerleri ve değişimleri tribo sistemdeki sürtünme ve aşınma olayları arasındaki ilişki kurmada fayda sağlamaktadır.

- Tüm kuru sürtünme deney şartlarına ait SEM görüntülerinde ölçülen aşınma iz genişliğinin yüksek değerlerde olduğu, kopan parçaların bir kısmının bilyeye sıvandığı, oluşan tepe ve çukurların abrazif, adhezif aşınma ve plastik deformasyonların bir göstergesi olduğu net bir şekilde görülmüştür.

- Aşınmanın sınır- karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında her iki yağ için abrazyon ve adhezyon, parlatma aşınması, kuru deney şartlarında ise abrazyon ve plastik deformasyonu işaret ettiği belirlenmiştir.

- BY ve YAME yağlayıcılar ile sınır-karışık yağlama şartlarındaki aşındırıcı çelik bilye üzerindeki aşınma izleri ölçümleri karşılaştırıldığında YAME'nin BY'e göre daha düşük olduğu SEM analizleri ile ortaya konmuştur.

- Yağlayıcı maddesinin varlığı, kuru sürtünme durumuna göre yatak malzemesi ve bilye malzemeleri arasında oluşan aşınma oranları, aşınma izlerini ve sürtünme katsayı değerini önemli ölçüde azalttığı, yağlayıcıların malzemelerin aşınma davranışını belirlemede önemli olduğu görülmüştür.

- Sınır-karışık yağlama koşullarında YAME ve BY yağlayıcılar ile sürtünme ve aşınma şartları kıyaslandığında ise atık YAME yağlayıcısındaki yağ asitlerinin varlığı (Fox vd., 2004), aşınmaya ve sürtünme sonuçlarına önemli ölçüde olumlu etki sağlamaktadır.

- Tüm yüklerde YAME ve BY yağlayıcı ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarındaki deneylere ait hız grafiklerinde YAME'nin BY'ye göre daha düşük ortalama  $\mu$  değeri verdiği görülmüştür.

- Düşük hızlardaki yağlama şartlarının daha kötü, yüksek hızda ise daha iyi yağlama performansı sergilediği, en düşük  $\mu$  ortalama değerinin genellikle en büyük yük ve en yüksek hız değerlerinde elde edildiği belirlenmiştir.

- Temas açısı YAME'nin, BY'e göre daha düşük değerde olduğu, böylece YAME'nin ıslatma kabiliyetinin daha yüksek bir performansa sahip olduğu görülmüştür.

- Yüzey gerilmeleri sonuçları ise az da olsa YAME'nin, BY'e göre biraz daha küçük olduğu, bunda yüzeye yapışma yönünden daha iyi bir performansa sahip olduğu açıkça görülmüştür.

- Seçilen YAME'nin atık yağ olmasının ve iyi performans göstermesinin çevresel, geri dönüşüm ve ekolojik açıdan çok önemlidir.

- Aynı sürtünme katsayısına sahip iki malzemenin oldukça farklı aşınma hızları, aşınma oranları ve aşınma özellikleri gösterebileceği, konunun gelecekte daha fazla araştırılması gerektiği belirlenmiştir.

- Atık yağların yağlama yağı ve biyodizel kullanımının ülke kalkınma politikasında önemli hale gelmesi gerektiği, bunun kaçınılmaz olduğu ve yoğun



olarak Ar-Ge çalışmaları yürütülmesi konusunda geç kalınmaması, böylece ulusal kaynakların değerlendirilmesi, hammadde çeşitliliğin sağlanması ve ekonomik katkı gibi olumlu getiriler kazanılacağı nettir.

- Çalışma kapsamında elde edilen deneysel verilerin farklı teknikler ile değerlendirilmesi ile yeni yağlama yağı ve/veya yağ katkı maddesi aday ürünlerin geliştirilip kullanılmasına yönelik sonuçlar elde edilmiştir. Atık YAME, BY yağlayıcıları ile sınır-karışık ve sıvı yağlayıcı ortamlı yağlama şartlarında kıyaslandığında daha iyi sonuç verdiği, söz konusu bu test yağlayıcılarına katkı maddesi ilavesi ile etkileşiminin incelenmesi ile çevresel açıdan büyük yarar sağlayacaktır.

- Bitkisel atık yağlar, bilinen yakıt ve yağlara oranla çevre dostu ve yararlı ürünlerdir. Bu atıkların yağlayıcı olarak kullanılması ve çevre koruma planlamalarında yer alması, bu tür alternatif yağlayıcıların, ülke ekonomisine önemli çıktılar sağlayacaktır. Söz konusu bu çalışmada seçilen YAME yağlayıcının gerçek sistemlerde kullanılarak sürtünme, aşınma yönünden değerlendirilmesi gerektiğinden gelecekte bu yönde çalışmaların yapılmasında büyük fayda sağlayacaktır.

- Numunedeki aşınmanın deney süresine bağlı olarak ölçülmesi ile aşınma davranışının KZFD ile değerlendirilmesi gelecek için bir çalışma konusu olarak önerilmektedir. Farklı yatak malzemeleri ve farklı yağ çeşitleri ile sürtünme katsayılarını değerlendirmek, zaman-frekans analizi tabanlı bir yaklaşım geliştirebilmek, aşınma genlik değeri arasında bir bağıntı kurabilmek için ek çalışmaların gelecekte yapılması bu alana büyük kazanımlar sunacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Aksulu, M., Ganioglu O., Yandayan, T.,2001. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri. V. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, Ekim,184-195.
- Alotaibi, J., 2014. Wear and Frictional Performance of Metals under Dry/Waste Cooking Oil Lubricant Conditions. University of Southern Queensland, Faculty of Health, Engineering and Sciences, Thesis PhD,197p, Australia.
- Amamoto, Y., Goto H., 2006. Friction and Wear of Carbon Steel Near T1-Transition under Dry Sliding. Tribology International 39(8), 756–62.
- Ameen, N. H. A., 2017. Soya Yağı ve Kullanılmış Kızartma Yağı Yağ Asiti Metil Esterleri Karışımlarının Sınır Yağlama Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.Süleyman Demirel Üniversitesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 67s, Isparta.
- Arca, M., 2011. Oxidative Properties and Thermal Polymerization of Soybean Oil and Application in Gear Lubricants. The Pennsylvania State University, The Graduate School Department of Chemical Engineering, M.Sc.Thesis, 116p, Pennsylvania.
- Archard, J. F., 1953. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, 24(8), 981 - 988.
- Aydar, A. Y., 2012. Determination of Contact Angle of Olive oil and Canola Oil on a PTFE Surface at Elevated Temperatures. North Carolina State University, M.Sc.Thesis, 79p, North Carolina.
- Babalık, F.C., Çavdar K., 2014. Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Basım Yayın Ltd. Ş., 844s, Bursa.
- Bağçeci, B. İ., 2010. NanoPartikül Yüzey Kaplama. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 106s, Ankara.
- Bastiaans, M. J., 1978. The Wigner Distribution Function Applied to Optical Signals and Systems. Optics Communications 25(1), 26–30.
- Bejjani, R., Shi, B., Attia, H., Balazinski, M., 2011. Laser Assisted Turning of Titanium Metal Matrix Composite. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60(1), 61–64.
- Bhushan, B., 2001. Modern Tribology Handbook Volume One Principles of Tribology. CRC Press LLC, 1760p, America.
- Bhushan, B., 2013. Principles and Applications of Tribology. John Wiley & Sons, Ltd., 980p, America.
- Blau, P. J., 1992. Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM Handbook,

Volume 18, pp. 191-198.

- Blau, P. J., 2009. Embedding Wear Models into Friction Models. *Tribology Letters* 34(1), 75–79.
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., 2011. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York
- Boiko, M., Lebedinsky K., 2015. Biodegradable Lubricant for Railway Transport. *Transport Problems* 10(4),99–105.
- Bozkurt, S., Uğraşım M. Y., Bozbey, S., Yorulmaz A., 2017. Mikrodalga Isıtmanın Pirina Yağının Oksidatif Stabilite ve Yağ Asidi Bileşimine Etkisi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 14(2), 51–55.
- Cengiz, O., 2010. Temas Açısı Ölçüm Cihazı Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tez, 83s, İstanbul.
- Challen, J. M., Oxley, P. L. B., Hockenhull, B. S., 1986. Prediction of Archard's Wear Coefficient for Metallic Sliding Friction Assuming a Low Cycle Fatigue Wear Mechanism. *Wear* 111(3), 275–88.
- Chattopadhyay, R., 2001. *Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention*. ASM International, 307p, United States of America.
- Chen, G. X., Zhou Z. R., 2007. Time-Frequency Analysis of Friction-Induced Vibration Under Reciprocating Sliding Conditions. *Wear* 262(1–2), 1–10.
- Chowdhury, M. A., Helali M., 2008. The Effect of Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Different Materials. *Tribology International* 41(4),307–14.
- Chowdhury, A. , Mitra, D., Biswas, D., 2013. Biolubricant Synthesis from Waste Cooking Oil Via Enzymatic Hydrolysis Followed by Chemical Esterification. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 88, 139-144.
- Cohen, L., 1995. *Time-Frequency Analysis*. Prentice-Hall, Inc., 299 p, USA .
- Çetin, M. (2005). Öztemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi, Ankara, 78-100.
- Duman, E., Baydır, A.T., Duman S., 2015. Ayçiçek Yağının Oksidasyon Kararlılığına Retinol Palmitat ' ın Etkisinin Ransimat Metodu ile Tespiti. *Kocatepe Veterinary Journal* 8(1), 33–38.
- Durak, E., Çulcuoğlu,E., Karaosmanoğlu, F., 2001. HidrolikYağların Katkıları. II.Ulusal Hidrolik ve Pnömatik Kongresi ve Sergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi 37–45.

- Durak, E., 2019. Kaymalı yatak tasarımı kriterleri II, Erişim Tarihi: 23.05.2019. <https://lubricant-world.com/kaymali-yatak-tasarimi-kriterleri-ii/>
- Durakbasa, M.N., Afjehi-Sadat, A., Nomak, A. 2001. Dimensional and Geometrical Measurement and Interpretation of Measuring Results on the Basis of the Skin Model. 3rd International Conference Measurement, Measurement Science Review, 14-17, Slovakia.
- Ekberg, A., 1997. Wear – some notes, Gothenburg, Sweden, 22 pp,
- Erhan, S. Z., Asadauskas S., 2000. Lubricant Basestocks from Vegetable Oils. Industrial Crops And Products 11(2-3), 277-82.
- Erhan, S Z., Sharma, B. K., Perez, J. M., 2006. Oxidation and Low Temperature Stability of Vegetable Oil-Based Lubricants. Industrial Crops and Products 24(3), 292-99.
- Ermış, A., Yurttadur, A.A., Karaçay, T., 2015. Human Intruder Detection by Measuring and Analysing Ground Vibrations. 30(2), 207-15.
- Ertekin, Z., Özkurt, N., Yılmaz, C., 2017. Disk Fren Sistemlerinde Dalgacık Tepeleri Yöntemi ile Ses Analizi. Sound Analysis of Disc Brake Systems using Wavelet-Ridges Method. 32(December), 193-200.
- Europe, Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in. 2016. Lubricant Additives: Use and Benefits.
- European Biofuels Technology Platform. 2011. Fatty Acid Methyl Esters ( FAME). Biofuel Fact Sheet 1:1-2.
- European, T. H. E. ve Committee. 2014. Communication from the Commission to the European Parliament. Brussels,.
- Feng, Z., Liang, M., Chu F., 2013. Recent Advances in Time-Frequency Analysis Methods for Machinery Fault Diagnosis: A Review with Application Examples. Mechanical Systems and Signal Processing 38(1), 165-205.
- Feng, Z., Qin, S., Liang, M., 2016. Time-Frequency Analysis Based on Vold-Kalman Filter and Higher Order Energy Separation for Fault Diagnosis of Wind Turbine Planetary Gearbox under Nonstationary Conditions. Renewable Energy 85:45-56.
- Fox N.J., Tyrer B., Stachowiak G.W., 2004. Boundary Lubrication Performance Of Free Fatty Acids In Sunflower Oil. Tribology Letters, 16, 4.
- Geisheimer, J. L., Marshall, W. S., Grenaker, E., 2001. A Continuous-Wave (CW) Radar for Gait Analysis. Conference Record of ThirtyFifth Asilomar Conference on Signals Systems and Computers CatNo01CH37256 1, 834-38.

(Gemalmayan, N.,2019. Yağlama Ve Kaymalı Yataklar Ders Notları, Erişim Tarihi: 23.05.2019. <https://websitem.gazi.edu.tr/site/nihatgem/files>.

Gerpen,J. H. V., Soylu, S., Chang D.Y.Z., 1998. Evaluation of the Lubricity of Soybean Oil-Based Additives in Diesel Fuel. Report Prepared for the United Soybean Board, Iowa State University, Ames.

Gobinda, K., Pranab, G., 2016. Environmentally Friendly and Biobased Lubricants. Boca Raton London New York CRC:, CRC Press.

Gopinath, K., Mayuram, M.M., 2009. Machine Design II. Indian Institute of Technology Madras, (Web). Modules / Lectures,Bombay

Gönül, N., 2000. Çok Fazlı Sistemler I, Yüzey Kimyası ve Colloidler. Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları No: 81, Ankara Üniversitesi Basımevi, 99s, Ankara. .

Gresham,B,Zabawski, E.(Ed.), 2013. The Basics of Viscosity Index. Society of Tribologists and Lubrication Engineers Publication. [https://www.stle.org/images/pdf/STLE\\_ORG/BOK/LS/Physical\\_Performance%20Properties/The%20Basics%20of%20Viscosity%20Index\\_tlt%20article\\_Sept07.pdf](https://www.stle.org/images/pdf/STLE_ORG/BOK/LS/Physical_Performance%20Properties/The%20Basics%20of%20Viscosity%20Index_tlt%20article_Sept07.pdf)

Gür, A. K., Orhan, A.,2008. PTA Yöntemiyle FeCrC Kaplanmış ST-37 Çeliğinin Aşınma Özellikleri. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 7(11), 39-43.

<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm>

<https://docplayer.biz.tr/15684587-Triboloji-triboloji-muhendislik-fakultesi-makine-muhendisligi-bolumu-prof-dr-irfan-kaymaz-prof-dr-akgun-alsaran-ars-gor-ilyas-hacisalihoglu.html>

Hurricks,P.L., 1970. The Mechanism of Fretting - A Review. Wear 15(6),389-409.

İlhan, P., 2007. Çay Tohumu Yağının Biyodizel Üretiminde Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 69s., İstanbul.

Jayadas N.H.,Nair K.P., G A., 2007. Tribological Evaluation of Coconutoil as an Environment-Friendly Lubricant, Tribology International 40, 350-354.

Kalhapure, A. S., Mhaske, V. M., Bajaj, S., 2016. Tribological Evaluation of Vegetable Oils as a Multi-Cylinder Engine Lubricant. International Advanced Research Journal in Science 3(1), 68-72.

Kapluhan, E., 2014. Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. DergiPark Marmara Coğrafya Dergisi, 97-125.

- Karaosmanoğlu, F., 2010. İTÜ Motor Biyoyakıtı ve Biyoyağlayıcılar Araştırma Laboratuvarı Olanakları, Otam Aylık Bülten 8(mart), 9.
- Kayaba, T., Kato, K., 1981. The adhesive Transfer of the Slip Tongue and the Wedge, ASLE Trans. 24(2), 164–74.
- Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Varman, M., Liaquat, A.M., 2011. Friction and Wear Characteristics of Waste Vegetable Oil, Contamiğnated Lubricant. International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 6(3), 431-436.
- Kenneth G. B.,2014. Friction, Wear, and Erosion Atlas. CRC Press.310 p, Boca Raton,U.S.A.
- Koç, E., 2008. Makina Elemanları Cilt 2., Adana Nobel Kitabevi, Adana.
- Koçak, T. Ü., Yanar, H., Pürçek, G., Birol, F., 2015. ( CuAl10Ni5Fe4 ) ile Kalay Bronzunun Özellikleri, 2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IIS'15), Karabük, Türkiye.
- Kumar ,B.S., Padmanabhan, G., Krishna,P.V., 2016. Performance Assessment of Vegetable Oil based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining, Journal of Advanced Research in Materials Science ISSN (online): 2289-7992, 19, 1-13.
- Kurbanoğlu, C., 2009. Makina Elemanları Teori, Konstrüksiyon ve Problemler. Ankara.
- Kuş, H., 2007. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışı. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi,Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Konya.
- Lakis, A. A. 2007. Rotating Machinery Fault Diagnosis Using Time-Frequency Methods. 7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines 139–44.
- Lawal, S. A., Choudhury, I.A., Sadiq,I.O., Oyewole, A., . 2014. Vegetable-Oil Based Metalworking Fluids Research Developments for Machining Processes: Survey, Applications and Challenges. Manufacturing Review 1:22.
- Mamuda, M., Fawzi, M., Ause,T.,. 2016. Formulation of Bio-Based Lubricants using Antimony Dialkyldithio Carbonate. 13(2), 55–59.
- Mang, T., Bobzin, K., Bartels T., 2011. Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication. 644 p, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

- Menon, A. K., Boutaghou Z.E., 1998. Time-frequency Analysis of Tribological Systems - Part I: Implementation and Interpretation. *Tribology International* 31(9), 501–10.
- Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Shahabuddin, M., Hazrat, M.A., Liaquat. A.M., 2012. Palm Oil Methyl Ester and Its Emulsions Effect on Lubricant Performance and Engine Components Wear, *Energy Procedia* 14, 1748 – 1753.
- Neild, S. A., McFadden, P. D. Williams M. S., 2003. A Review of Time-frequency Methods for Structural Vibration Analysis. *Engineering Structures* 25(6), 713–28.
- Nizam, M., Bari H.A., 2009. The Use Vegetable Oil in Lubricant as Base Oil: a Review. National Conference on Postgraduate Research (NCON-PGR) (October), 123–27.
- Odabaş, D., Karamiş M.B., 1998. Kuru Sürtünme Şartlarında Pim-Ring Kayma Sistemi İçin Plastik Deformasyon Isısının Teorik ve Deneysel Analizi. 22:65–76.
- Owen, J. S., Eccles, B. J., Choo, B. S., Woodings M. A., 2001. The Application of Auto-Regressive Time Series Modelling for the: Time-frequency Analysis of Civil Engineering Structures. *Engineering Structures* 23(5), 521–36.
- PAGEV, 2015. Döngüsel ekonomi. Erişim tarihi:14.08.2019.  
<https://www.pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebliğ%20Bilg.%203/PAGEV%20Döngüsel%20Ekonomi%20Durum%20Raporu.pdf>
- Pawlak, Z., Urbaniak, W., Oloyede A., 2011. The Relationship Between Friction and Wettability in Aqueous Environment. *Wear* 271(9–10), 1745–49.
- Pehlivan, H., 2012. Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Verisinin Spektral Analizi (Spectral Analysis of Real Time Kinematik GPS Data ). 9–16.
- Rao, P., Das, A. K., Murty, B. S., Chakraborty M., 2008. Microstructure and the Wear Mechanism of Grain-Refined Aluminum During Dry Sliding Against Steel Disc. *Wear* 264(7–8), 638–47.
- Prokkola, H., Kuokkanen, T., Lassi U., 2012. Material-Efficient Utilization of Waste Oils—Biodegradability and Other Chemical Properties of Vegetable Recycling Oils. *Green and Sustainable Chemistry* 2(04),133–40.
- Quinn, T. F. J. ,1996. Computational Methods Applied to Oxidational Wear. *Wear* 199(2), 169–80.
- Regueira, T., Lugo,L., Fandiño,O., López, E.R., Fernández J., 2011. Compressibilities and Viscosities of Reference and Vegetable Oils for Their Use as Hydraulic Fluids and Lubricants. *Green Chemistry* 13(5), 1293.

- Reeves, C. J., 2013. An Experimental Investigation Characterizing the Tribological Performance of Natural and Synthetic Biolubricants Composed of Carboxylic Acids for Energy Conservation and Sustainability, 409p, The University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee.
- Rigney, D. A., Hirth J. P., 1979. Plastic Deformation and Sliding Friction of Metals. *Wear* 53(2), 345–70.
- Salman, Ö. 2011. Yağlama Yağı İçin Bitkisel Yağların ve Esterlerinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 267 s, Isparta.
- Samarth, N.B. Mahanwar P., 2015. Modified Vegetable Oil Based Additives as a Future Polymeric Material - Review. *Open Journal of Organic Polymer Materials* 5(January), 1–22.
- Sarin, A., Arora, R., Singh, N. P., Sharma, M., R. K., 2009. Influence of Metal Contaminants on Oxidation Stability of Jatropha Biodiesel. *Energy* 34(9), 1271–75.
- Shahabuddin, M., Masjuki, H. H., Kalam, M.A., 2013. Development of Eco-Friendly Biodegradable Biolubricant Based on Jatropha Oil. *Tribology in Engineering*, 135-146.
- Sharma, B.K., Biresaw K.G., 2016. "Environmentally Friendly and Biobased Lubricants. Boca Raton London New York CRC, 450 p, CRC Press, Boca Raton.
- Sharma, B.K., Adhvaryu, A., Erhan S.Z., 2009. Friction and Wear Behavior of Thioether Hydroxy Vegetable Oil. *Tribology International* 42(2), 353–58.
- Sharma, B. K., Stipanovic A. J., 2003. Development of a New Oxidation Stability Test Method for Lubricating Oils Using High-Pressure Differential Scanning Calorimetry. 402,1–18.
- Shashidhara, Y. M., Jayaram S. R., 2010. Vegetable Oils as a Potential Cutting Fluid-an Evolution. *Tribology International* 43(5–6), 1073–81.
- Silva, J.A.C., 2011. Biodegradable Lubricants and Their Production Via Chemical Catalysis. *Tribology - Lubricants and Lubrication*, 186–200.
- Song, J., 2017. Time-Frequency Analysis of the Tribological Behaviors of Ti6Al4V Alloy Under A Dry Sliding Condition. *Journal of Alloys and Compounds* 724, 752–62.
- Soydan Y., Ulukan L., 2013. Temel Triboloji. Sürtünme- Aşınma Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. Sakarya.
- Sundus, F., Fazal, M. A., Masjuki, H. H., 2017. Effect of anti-Oxidants on the Lubricity of B30 Biodiesel–Diesel Blend. *Lubrication Science* 29(1), 3–15.



- Talib, N., Rahim, E.A.,2016. The Effect of Tribology Behavior on Machining Performances When Using Bio-Basedlubricant as a Sustainable Metal Working Fluid, Procedia CIRP 40,504 – 508.
- Tekin, K. S., Akkök, M.,2011.Sınır Yağlama Koşullarında Çalışan Yataklar İçin Aşınma Test Düzeneği Tasarımı, Yapımı ve İş Makinaları Yataklarında Aşınma Analizi / Design and Construction of Boundary Lubricated Bearing Test Rig and Wear Analysis in Earthmoving Machinery. TMMOB Makina Mühendisleri Odası Mühendis ve Makine 52 (616), 70-79.
- Temiz, V. 2014.Ders notları. Makina Elemanları 1 Triboloji Genel Bilgiler. Erişim tarihi:15.05.2019. <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf>.
- Terkeşli, M.H., 2017. Aps Yöntemi İle Üretilen WC Ve Mo Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 74 s., Bartın.
- The McGraw-Hill Companies, Inc. 2003. Antifriction Bearing.
- Tsuya, Y. ,1976. Microstructures of Wear, Friction and Solid Lubrication. Tech. Rep. no 81, Mechanical Engineering Laboratory.
- Uetz, H., Fhl, J., 1978. Wear as an energy transformation process. Wear 49(2), 253–64.
- Ulutan, M., 2007. AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora tezi, Eskişehir
- Wang,Y.,Li, J.S., Ren, T.,2009.Tribological Study of a Novel Borate Ester Containing Dialkylthiophosphate Group as Multifunctional Additive. Industrial Lubrication and Tribology 61(1), 33-39.
- Weller D.E. Jr., 2000. Study of The Effect of Chemical Structure of Esters and Vegetable Oils on Friction and Wear With and Without Wear, The Pennsylvania State University, Department of Chemical Engineering, PhD Thesis, Pennsylvania.
- Xue, Y. j., Cao,J.X., Tian.R.F., 2013. A Comparative Study on Hydrocarbon Detection Using Three EMD-Based Time-Frequency Analysis Methods. Journal of Applied Geophysics 89, 108–15.
- Yanmaz, V. 2016. Bitkisel Atık Yağların Yönetimi. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Nisan:30.
- Yetiş, Ü. 2016. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Sektörel Atık Kılavuzları. ODTÜ Çevre Müh. Blm. 114.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Güler ÖNCÜ  
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1973  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : guleroncu@isparta.edu.tr



## Eğitim Durumu

Lise : Isparta ŞAİK Lisesi, 1990  
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 1995.  
Yüksek Lisans : SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği, 2002.

## Mesleki Deneyim

Burdur Mensucat San. ve Tic. AŞ.	1996-1998
SDÜ Teknik Bilimler MYO	1999-2018
ISUBÜ Teknik Bilimler MYO	2018-.....(halen).