



**KARBON MALZEMELERİN İLİK DERİN ÇEKME
PROSESİNDE YAĞLAYICI OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE
SICAK KOŞULLAR İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ
YAĞLAYICI GELİŞTİRİLMESİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Özgür Erdem YURT

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Doç. Dr. Nuri ŞEN**

**KARBON MALZEMELERİN İLİK DERİN ÇEKME PROSESİNDE
YAĞLAYICI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE
SICAK KOŞULLAR İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ YAĞLAYICI
GELİŞTİRİLMESİ**

Özgür Erdem YURT

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Doç. Dr. Nuri ŞEN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Temmuz 2024**

Özgür Erdem YURT tarafından hazırlanan “KARBON MALZEMELERİN İLİK DERİN ÇEKME PROSESİNDE YAĞLAYICI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE SICAK KOŞULLAR İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ YAĞLAYICI GELİŞTİRİLMESİ ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Nuri ŞEN
2. Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 31/07/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Yunus TÜREN (NEÜ)

Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN)

Üye : Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Özgür Erdem YURT

ÖZET

Doktora Tezi

KARBON MALZEMELERİN İLİK DERİN ÇEKME PROSESİNDE YAĞLAYICI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE SICAK KOŞULLAR İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ YAĞLAYICI GELİŞTİRİLMESİ

Özgür Erdem YURT

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları

Doç.Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Doç.Dr. Nuri ŞEN

Temmuz 2024, 137 sayfa

Bu çalışmada hidrotermal karbon (HTC) yağlayıcının sentezi ve sıcak endüstriyel koşullarda yağlayıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, organik kaynaklardan düşük maliyetle ve kısa sürede sentezlenerek üretilen hidrotermal karbonun (HTC) karakterizasyonu yapılmış ve tribolojik performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Hidrotermal karbonizasyon yöntemi ile üretilen HTC yağlayıcı SEM görüntüsü ve EDS analizi ile karakterize edilmiştir. HTC'nin farklı sıcaklıklarda sürtünmeye etkisinin belirlenmesi için AA5754 malzemesi ile pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuştur. HTC'nin derin çekme prosesine tribolojik etkisinin analizi

için farklı yağlayıcı, sıcaklık, baskı plakası basıncı ve şekillendirme hızı parametrelerinin şekillendirme kuvvetine etkisi istatistiksel olarak analiz edilmiştir. HTC'nin performansı teflon, fulleren, grafen ve karbon nano-tüp (CNT) malzeme ile kıyaslanmıştır. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre en düşük sürtünme katsayısı değerinin fulleren yağlayıcı ortamında elde edildiği ve sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiş, HTC'nin oksidasyon sebebiyle aşınma deneyinde fullerenden daha düşük performans gösterdiği görülmüştür. Derin çekme parametrelerinin şekillendirme kuvvetine etkisi analiz edildiğinde en etkili parametrelerin sırasıyla sıcaklık (%72,32) ve yağlayıcı (%20,89) parametreleri olduğu sonucu elde edilmiştir. S/N analizi sonuçlarına göre minimum şekillendirme kuvvetinin teflon katı yağlayıcı, 250°C sıcaklık, 15 bar baskı plakası basıncı ve 2 mm/s şekillendirme hızı koşullarında elde edildiği belirlenmiştir. HTC ile teflon arasındaki tribolojik performans farkı %1 seviyesindedir. Elde edilen sonuçlar HTC'nin endüstriyel yağlayıcı olarak kullanılabilirliğini kanıtlar niteliktedir.

Anahtar Sözcükler : Hidrotermal karbon, Triboloji, Ilık derin çekme, Pin-on-disk

Bilim Kodu : 91445

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF THE CARBON MATERIALS AS LUBRICANT IN WARM DEEP DRAWING PROCESS AND DEVELOPMENT OF LOW COST LUBRICANT FOR HOT CONDITIONS

Özgür Erdem YURT

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisors:

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Assoc. Prof. Dr. Nuri ŞEN

July 2024, 137 pages

In this study, the synthesis of hydrothermal carbon (HTC) lubricant and its usability as a lubricant under hot industrial conditions were investigated. In this context, the characterization of HTC produced from organic sources at low cost and in a short time was performed, and its tribological performance was analysed in detail. HTC produced by the hydrothermal carbonization method was characterized through SEM images and EDS analysis. To determine the effect of HTC on friction at different temperatures, HTC was subjected to a pin-on-disc wear test with AA5754 material. The effect of various lubricants, temperatures, blank holder pressure, and forming speed parameters on the forming force for the analysis of the tribological effect of HTC on deep drawing

processes were statistically analysed. The performance of HTC was compared with Teflon, fullerenes, graphene, and carbon nanotube (CNT) materials. According to the results obtained from wear tests, the lowest friction coefficient value was achieved in the presence of fullerenes as the lubricant, and as the temperature increased, the friction coefficient decreased. It was observed that HTC exhibited lower performance in the wear test compared to fullerenes due to oxidation. When the effect of deep drawing parameters on the forming force was analysed, it was concluded that the most effective parameters were temperature (72.32%) and lubricant (20.89%). According to the S/N analysis results, the minimum forming force was obtained under the conditions of solid Teflon lubricant, 250°C temperature, 15-bar blank holder pressure, and 2 mm/s forming speed. The tribological performance difference between HTC and Teflon is at the 1% level. The results demonstrate the potential industrial usability of HTC as a lubricant.

Key Word : Hydrothermal carbon, Tribological performance, Warm deep drawing, Pin-on-disc

Science Code : 91445

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocalarım Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e ve Doç. Dr. Nuri şEN'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam süresince maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim sevgili Eőime, bu günlere gelmemde büyük emekleri olan sevgili annem ve babama tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 LİTERATÜR TARAMASI.....	4
1.1.1. Derin Çekme Çalışmaları	4
1.1.2. Karbon Esaslı Yağlayıcıların Tribolojik Performansı ile İlgili Çalışmalar	7
1.1.3. Nanobilim ve Nano Teknoloji	9
BÖLÜM 2	11
KARBON VE KARBON ALLOTROPLARI	11
2.1. KARBON ELEMENTİ	11
2.2. KARBON TERMİNOLOJİSİ VE KARBON MALZEMELERİNİN SINIFLANDIRILMASI	11
2.3. KARBON ATOMUNUN YAPISI.....	13
2.3.1. Karbon Allotropları ve Bileşikleri	13
2.3.1.1. Grafitin Yapısı	13
2.3.1.2. Grafenin Yapısı	15
2.3.1.3. Grafenin Mekanik Özellikleri	19

	<u>Sayfa</u>
2.3.1.4. Fulleren	19
2.3.1.5. Karbon Nanotüp (CNT)	21
2.4. KARBON ALLATROPLARININ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ	27
2.4.1. Karbon Nanomalzemelerin Yağlayıcılık Mekanizması.....	29
2.4.2. Katı Bir Yağlayıcı Olarak Karbon Nano Malzemeler	30
2.4.2.1. Grafitin Yağlayıcı Özellikleri	30
2.4.2.2. Grafenin Yağlayıcı Özellikleri.....	31
2.4.2.3. Grafen Bazlı Kaplamalar	32
2.4.2.4. Elmas benzeri karbon (DLC) tabanlı kaplamalar	33
2.4.3. Yağlayıcılarda Katkı Maddesi Olarak Karbon Nanomalzemeler.....	33
2.4.3.1. Yağlayıcı Katkısı Olarak Grafen	34
2.4.3.2. Yağlayıcı Katkısı Olarak Fulleren	35
 BÖLÜM 3	 37
HİDRO-TERMAL KARBONİZASYON (HTC)	37
 BÖLÜM 4	 41
TRİBOLOJİ	41
4.1. TRİBOLOJİNİN TEMEL KAVRAMLARI VE TERMİNOLOJİSİ.....	44
4.1.2. Sürtünmenin Tanımı	44
4.2. SÜRTÜNME KUVVETİNİN YASALARI.....	46
4.2.1. Kayma Sürtünmesinin Yasaları	46
4.2.2. Yuvarlanma Sürtünmesi Yasaları	50
4.3. AŞINMA	53
4.3.1. Aşınma Mekanizmaları.....	53
4.3.1.1. Adhesiv Aşınma.....	53
4.3.1.2. Abrasiv Aşınma	55
4.3.1.3. Eroziv Aşınma	57
4.3.1.3. Yorulma Aşınması	58
4.3.1.4. Korozyon Aşınması	59
4.3. YAĞLAMA REJİMLERİ	60

	<u>Sayfa</u>
4.3.1. Hidrodinamik Yağlama	61
4.3.2. Karma Yağlama Rejimi	62
4.3.3. Sınır Yağlama Rejimi	62
4.3.4. Elasto-hidrodinamik Yağlama	63
4.4. YAĞLAMA.....	64
4.4.1. Yağ Formülasyonları	64
4.4.2. Baz Yağ	65
4.4.2.1. Mineral Yağlar	66
4.4.2.2. Sentetik Yağlar.....	66
4.5. YAĞLAYICI KATKILARI	67
BÖLÜM 5	69
DERİN ÇEKME	69
5.1. DERİN ÇEKME İŞLEMİ	69
5.2. DERİN ÇEKMEDE TRİBOLOJİ	70
5.2.1. Derin Çekmede Temas Bölgeleri.....	70
5.2.2. Derin Çekmenin Genel Özellikleri	72
5.3.3. Derin Çekme ile İlgili Çalışmalar.....	73
5.3. DERİN ÇEKME KUSURLARI.....	74
5.3.1. Derin Çekmede Buruşma.....	74
5.3.2. Derin Çekmede Yırtılma.....	75
5.3.3. Derin Çekmede Sürtünme.....	75
5.3.5. Derin Çekmede Aşınma.....	76
5.3.6. Derin Çekmede Yağlama.....	77
5.4. DERİN ÇEKMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	79
BÖLÜM 6	80
MATERYAL VE METOT	80
6.1. HTC SENTEZİ.....	81

	<u>Sayfa</u>
6.2. YÜKSEK SICAKLIK KOŞULLARINDA YAPILAN PİN-ON-DİSK AŞINMA TESTİ	82
6.3. ILIK/SOĞUK ORTAM DERİN ÇEKME DENEYLERİ	84
BÖLÜM 7	88
BULGULAR VE TARTIŞMA	88
7.1. NUMUNELERİN MİKRO YAPISI	88
7.2. PİN ON-DİSK TESTİNDEN ELDE EDİLEN SÜRTÜNME KATSAYISI SONUÇLARI	91
7.3. PİN-ON DİSK TESTİNDEN ELDE EDİLEN AĞIRLIK KAYBI SONUÇLARI	94
7.4. ILIK DERİN ÇEKME İŞLEMİ SONUÇLARININ ANALİZLERİ.....	102
7.5. HTC İÇİN GENEL DEĞERLENDİRME.....	114
BÖLÜM 8	116
SONUÇLAR	116
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	137

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Farklı nesnelerin ve doğal organizmaların boyutları	10
Şekil 2.2. Grafit yapısının üç boyutlu şeması	14
Şekil 2.3. 2D yapı bloğundan 3D grafen oluşumu farklı grafen dizilimleriyle üç yaygın grafit yapısı: altıgen dizilim (AA), Bernal dizilim (AB) ve eşkenar dörtgen dizilim (ABC)	16
Şekil 2.4. 2D grafen tabakası, diğer alotropilerin temelidir: 0D (fulleren) ve 1D (karbon nanotüpü)	17
Şekil 2.4. Grafende iki tür kenar a) zigzag ve b) Armchair	18
Şekil 2.5. (Sol) Corannulen yapısı. (Sağ) Buckminsterfulleren C60	21
Şekil 2.6. a) Tek katlı karbon nanotüp, b) Çok katlı karbon nanotüp	23
Şekil 2.7. zigzag ve armchair grafen tabakası	24
Şekil 2.8. Karbon nanotüp yapıları. (a) Bir grafen tabakası yuvarlanarak bir nanotüp oluşturulur. T, tüp eksenini, a1 ve a2 ise gerçek uzaydaki grafenin birim vektörlerini gösterir. (b) Armchair (n, n). (c) Zigzag (n, 0). (d) Üç duvarlı armchair karbon nanotüp	25
Şekil 2.9. Kiralite vektörü, iki ana yön olan zigzag ve armchair arasında tanımlanmıştır. Yarı iletken karbon nanotüpler (kırmızı renkte (baskı versiyonlarında açık gri)) ve metalik olanlar (mavi renkte (baskı versiyonlarında koyu gri))	26
Şekil 2.10. Karbon nanotüpler için farklı kiralite	26
Şekil 2.10. Triboloji alanında kullanılan farklı karbon nanomalzemeleri	28
Şekil 3.1. Selülozdan HTC üretiminin şematik gösterimi	39
Şekil 4.1. Eğimli bir yüzey üzerindeki cismin gösterimi	45
Şekil 4.1. Sürtünmeyi yenmek için gerekli olan F kuvveti ile harekete neden olan (a) yuvarlanma ve (b) kayma hareketi	48
Şekil 4.2. Normal yüke göre sürtünme katsayısının varyasyonu	49
Şekil 4.3. Yağlanmamış bir çelik yüzey üzerindeki ahşap kaydırıcılar için görünen temas alanıyla sürtünme katsayısının (μ) değişimi	49
Şekil 4.4. Yuvarlanma sürtünmesi	51
Şekil 4.5. Adhesiv Aşınmanın Mekanizması	54
Şekil 4.6. Adhezyondan dolayı metal transferinin süreci	54

Sayfa

Şekil 4.7. Ultra yüksek mukavemetli beynitik çelikten yapılmış tek abrasiv aşınma izi	55
Şekil 4.8. Bir grit madde geçerken alt yüzey deformasyonu	56
Şekil 4.9. Abrasif aşınmanın mekanizmaları: Mikro kesme, çatlama, yorulma ve tane kopması	56
Şekil 4.10. Bir yüzeye çarpan abrasif parçacığın erozif aşınmanın şematik görseli ..	57
Şekil 4.11. Yuvarlanma hareketinde bir yüzeyin yorulma kırığının şematik diyagramı	58
Şekil 4.12. Adhesiv ve abrasif aşınma arasındaki denge	60
Şekil 4.13. Yağ film tabakasının dört farklı yağlama rejimi üzerine temellendirilmiş stribeck eğrisinin ayırt edilmesi	61
Şekil 4.14. Karşı biçimli temasların örnekleri: a) Dişli diş, b) Bir mil karşı yüzeyi c) Bir rulman ve karşı yüzeyine ait kesit resimleri	64
Çizelge 4.1. Farklı katkı maddeleri türleri ve bunların yağlayıcı formülasyondaki amaçları	68
Şekil 5.1 Derin çekme işlemi a) Şematik, b) Kesiti	69
Şekil 5.2. Derin çekmede temas bölgeleri	71
Şekil 5.3. Buruşma şekillerine ait görseller	74
Şekil 5.4. Derin çekilmiş bir numunenin yırtılmasına ait görsel	75
Şekil 5.4. Sürtünme ve derin çekme derinliğinin kırılmaya bağlılığı	76
Şekil 5.6. Derin çekme işleminde yağlama	78
Şekil 5.7. Balık kılıcı yöntemiyle derin çekmeyi etkileyen parametreler	79
Şekil 6.1. Çalışma metodolojisi.	80
Şekil 6.2. HTC sentezinin şematiği.....	82
Şekil 6.3. Aşınma test cihazı ve aşınma izlerinin 3D analizine ait şematik gösterimi.	84
Şekil 6.4. Derin çekme ünitesi a) ve yalıtılmış kalıp sistemine b) ait resimler c) bileşenler.	85
Şekil 6.5. Kap kalınlığı ölçüm metodu ve ölçüm noktaları.....	87
Şekil 7.1. HTC ve diğer vasıflı karbonların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.	90
Şekil 7.2. Fulleren yağlayıcı koşulunda ölçülen sürtünme katsayıları.....	92
Şekil 7.4. HTC yağlayıcı koşulunda ölçülen sürtünme katsayıları.	94

Şekil 7.5. Katı yağlayıcıların hacim kaybı grafiği.	95
Şekil 7.7. CNT katı yağlayıcı ile farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı b) 100 °C c) 200 °C) aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları.	98
Şekil 7.8. HTC katı yağlayıcının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı b) 100 °C c) 200 °C aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları.	98
Şekil 7.9. Fulleren katı yağlayıcının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı, b) 100 °C ve c) 200 °C aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları, d) 200 °C Fulleren EDS çizgi boyu elemental tarama.	99
Şekil 7.10. Oda sıcaklığında Fulleren katı yağlayıcı kullanılan deney sonrası PİN yüzeyi EDS analizi.	100
Şekil 7.11. 200 °C sıcaklık da Fulleren kullanılan deney sonrası pin yüzeyinin EDS analizi.	100
Şekil 7.12. Oda sıcaklığında HTC yağlayıcı kullanılan deney sonrası pin yüzeyi EDS analizi.	101
Şekil 7.13. 200 °C sıcaklıkta HTC yağlayıcı kullanılan deney sonrası PİN yüzeyi EDS analizi.	102
Şekil 7.14.1.7 Gerinin sınır oranına göre çekilen örneklerin görüntüleri. a) Baz yağ 200 °C üst görünüm ve b) kesit görünüm, c) HTC 200 °C üst görünüm ve d) kesit görünüm, e) CNT 200 °C üst görünüm ve f) kesit görünüm, g) Teflon 250 °C üst görünüm ve h) kesit görünüm, i) Fullerene oda sıcaklığı üst görünüm ve j) kesit görünüm.	104
Şekil 7.15. Şekillendirme kuvveti için istatistiksel kontrol grafikleri.....	104
Şekil 7.16. Şekillendirme kuvveti için S/N analizi.	108
Şekil 7.17. Parametre etkileşimlerinin şekillendirme kuvvetine etkisinin analizi için elde edilen 3 boyutlu görüntüler.	110
Şekil 7.18. Kap duvarı ve ıstampa radyusu bölgelerinden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri.	112
Şekil 7.19. Kalınlık analizleri için istatistiksel grafikler a) Artık(fark) grafikleri, b) Ana etki grafiği, c) ANOVA.....	114
Şekil 7.20. Genel sonuçlar için standardizasyon tablosu.	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Grafen malzemelerin boyutlarına göre adlandırılması	17
Çizelge 6.1. Derin çekme deneylerinde dikkate alınan parametreler ve seviyeleri ...	85
Çizelge 7.1. Deney Tasarımı – Taguchi L18	103
Çizelge 7.2. Şekillendirme kuvveti için ANOVA tablosu.	106
Çizelge 7.3. Güvenilirlik analizi sonuçları.....	110
Çizelge 7.4. Kap kalınlığı değişimi sonuçları.	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

MoS ₂	: Molibden disülfid
MoWS ₄	: Molibden Tungsten Tetrasülfür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
PTFE	: Politetrafloroetilen
He	: Helyum
GO	: Grafen oksit
Cr	: Krom
C	: Karbon
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Mo	: Molibden
µm	: Mikrometre
N	: Newton
HV	: Vickers sertlik birimi
HRC	: Rockwell sertlik birimi
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
R-sq	: Regresyon katsayısı
R-sq(adj)	: Düzeltilmiş regresyon katsayısı
P	: İstatistiksel anlam
F	: İstatistiksel test oranı

KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskopu
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi

XRD : X Işını Kırınımı
SEM :Taramalı Elektron Mikroskopu
SS : Kareler Toplamı
COF :Sürtünme Katsayısı
LDR : Sınır Çekme Oranı
HTC :Hidro-Termal Karbon
CNT : Karbon Nano Tüp
CVD :Kimyasal Buhar Biriktirme
SWCNT:Tek katmanlı Karbon Nanotüp
MWCNT: Çok katmanlı Karbon Nanotüp
CNO : Karbon Nano Soğanlar
GQN :Grafen kuantum Noktaları
ND :Nano Elmas
CNH : Karbon Nano Küreler
FCS :İşlevselleştirilmiş Karbon Küre
GNP :Grafen Nano levha
DLC :Elmas Benzeri Karbon

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ilık derin çekme prosesi ile oda sıcaklığında şekillendirilebilirlikleri düşük olan metal esaslı malzemelerin şekillendirilebilirlikleri sıcaklık etkisiyle arttırılmaktadır. Şekillendirilebilirliğin bir göstergesi olan sınır çekme oranı (LDR), ılık derin çekme prosesi ile önemli oranda arttırılabilir. Bu prosesin önemli bir avantajı, yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi sebebiyle mikroyapının değişmemesi ve sac malzemenin mekanik özelliklerinin etkilenmemesidir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde, yakıt tüketiminin düşürülmesi ve egzoz emisyonlarının azaltılması amacıyla alüminyum ve magnezyum alaşımları kullanılarak daha hafif araçların üretilmesi ılık şekillendirme prosesinin gelişimine bağlıdır [1–8].

Ilık derin çekme prosesinde iş parçası, pres harici bir ısıtma sistemi ile veya prese entegre ısıtma sistemi kullanılarak yüksek sıcaklıklara çıkartılmaktadır. Sıcaklık ve şekillendirme kuvvetlerinin etkisiyle kalıplarda, flanş bölgesinde ve iş parçasında ciddi oranda sürtünme oluşmaktadır. Sürtünmenin artışına bağlı olarak oluşabilecek problemler; radyüs bölgelerinde ve kap duvarında yırtılma, derin çekilebilirlik oranının düşmesi, stampa ile iş parçası arasında adhezyon oluşumu, iş parçasında yüzey aşınması, kalıp yüzeylerinin aşınması, iş parçasında yüzey pürüzlülüğü artışı, şekillendirme için gerekli enerjinin artışı, flanş bölgesinde buruşma artışı, homojen olmayan kalınlık dağılımı şeklinde sıralanabilir [9–11]. Belirtilen problemler, şekillendirme esnasında tribolojik performansı yüksek yağlayıcıların kullanımı ile minimize edilebilir. Soğuk şekillendirme prosesi için temini kolay ve maliyeti düşük parafin ve poliamit esaslı yağlayıcılar yeterli olurken [12,13], ılık derin çekme (~300 °C ve üzeri) işlemlerinde yüksek sıcaklıklarda tribolojik performanslarını koruyan ve

yanmayan nitelikte yağlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır [14–16]. Literatürde ılık derin çekme prosesi için teflon ve bakır içerikli gres yağlayıcıların kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [9,17–23]. Bu yağlayıcıların olumsuz özellikleri buharlaşma, kötü koku oluşturma ve yüksek maliyetleridir [9]. Literatürde yağlayıcıların etkisinin analizi için bilimsel metodolojiye uygun olarak çalışılmamış, sadece yağlayıcılığın olumlu etkisinin görülmesi yeterli kabul edilmiştir. İlâveten mevcut literatürde, ılık derin çekme prosesi için yağlayıcı geliştirilmesi, farklı yağlayıcıların etkisinin kıyaslanması, yağlayıcının prosese ve ürüne etkisi konularında deneysel tasarımlar, ileri görüntüleme ve elemental analiz tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmamaktadır.

Ilık derin çekme prosesi için yüksek sıcaklıklarda yağlama performansına sahip yağlayıcıların geliştirilmesi ve sürdürülebilir kullanımlarının sağlanması tribolojik açıdan büyük önem taşımaktadır. Kendiliğinden yağlama özelliğine sahip olan teflon esaslı malzemeler bu ihtiyacı önemli oranda karşılamaktadır. Kendinden yağlama özelliğine ve yüksek sıcaklıklarda kararlılığa sahip karbon esaslı malzemeler ise önemli bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Özellikle, nitelikli karbon malzemelerden olan grafen, fulleren ve karbon nanotüp malzemelerin yüksek yağlama performansları ve 1500 °C üzeri sıcaklıklarda işlevsellik gösterebilmeleri ılık derin çekme prosesi açısından önemlidir [24–28]. Bu kristal yapılı karbon malzemelerin yüksek üretim maliyetleri (~1 €/g) en büyük dezavantajlarıdır [29,30]. Bu yüksek maliyetli ürünlerin yerine doğal kaynaklardan (biyokütle) elde edilen hidrotermal karbonların bu alanda kullanım potansiyeline sahip olduğu öngörülmektedir. Hidrotermal karbon (HTC) düşük üretim maliyetine, birçok biyokütle kaynağından elde edilebilirliğe (selüloz, karbohidrat, deniz bitkisi atıkları, gıda atıkları), 180 – 350 °C reaksiyon sıcaklıklarında sentezlenebilirliğe, kimyasal stabiliteye ve yüksek termal bozunma sıcaklığına sahiptir [30,31]. Özellikle otoklavda düşük sıcaklık (~200 C°) ve basınç (<6MPa) koşullarında sentezlenmesi kolay üretilebilirlik açısından önem taşımaktadır. HTC'nin biyokütle kaynaklarından sentezlenmesi sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir [31]. Bu avantajlar sayesinde, birçok farklı uygulama alanında kullanılmışlardır [32,33]. Literatürde farklı biyokütle kaynaklarından HTC sentezi ve sentezlenen HTC'nin tribolojik

performansına ilişkin çalışmalar mevcuttur [25,31,34–36]. Fakat yüksek sıcaklık (>~100 °C) ortamlarında gerçekleştirilen mühendislik uygulamalarında HTC'nin tribolojik performansının araştırıldığı çalışmalar literatürde mevcut değildir. Tez kapsamında, elde edilebilirlik ve maliyet açısından nitelikli karbon malzemelere önemli bir alternatif olan HTC'nin ılık derin çekme işlemindeki tribolojik performansı detaylı olarak incelenecektir. HTC'nin diğer vasıflı karbonlardan ve teflon yağlayıcıdan daha iyi veya benzer tribolojik performans sağlaması, HTC'nin endüstriyel kullanılabilirliği açısından önemlidir. Nano-morfolojiye sahip karbonlarla (örneğin karbon nanotüp, grafen ve fulleren gibi) karşılaştırıldığında, Hidrokarbonların (HC) düşük üretim maliyetleri vardır, üretimlerinde metal katalizatlara ihtiyaç duymazlar ve çevre dostu ürünlerdir.

Bu tez çalışmasında, HTC'nin ılık derin çekme prosesinde yağlayıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Hidrotermal yöntem ile sentezlenen karbon malzemenin ılık derin çekme işleminde triboloji odaklı kullanılabilirliğinin araştırılması ve diğer yağlayıcılar ile tribolojik performansının kıyaslanması literatür için tektir. Hidrotermal karbon (HTC) kullanımı ile yüksek sıcaklıklarda yağlama kabiliyetini koruyan yağlayıcı elde edilmesi hedeflenmektedir. Hidrotermal karbon üretimi ile vasıflı ve düşük maliyetli yağlayıcı elde edilmesi, HTC'nin tribolojik performansının aşınma deneyleri ile incelenmesi, HTC'nin endüstriyel kullanımı için ılık derin çekme prosesine olan etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi tezin özgün değer adımlarını oluşturmaktadır. Ayrıca HTC'nin biyokütle kaynaklarından elde edilmesi düşük maliyet ve sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır.

1.1 LİTERATÜR TARAMASI

1.1.1. Derin Çekme Çalışmaları

Tari vd. [37] termal koşulların AZ31B-O magnezyum alaşımının derin çekilebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Teflon film yağlayıcının kullanıldığı proseste farklı zımba sıcaklığı (20°C-295°C), kalıp-kalıp tutucu sıcaklığı, baskı plakası basıncı ve zımba hızı parametrelerinin şekillendirme kuvveti ve kalıptaki gerinim dağılımına etkisi deneysel ve görsel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre zımba hızı arttıkça malzemeye etki eden yükün arttığı ve bu durumun malzemenin kırılma eğilimini arttırdığı belirlenmiştir. Flanş bölgesindeki sıcaklık arttıkça malzemenin sünek kırılma davranışı gösterdiği ve derin çekme işleminin başarılı şekilde gerçekleşebilmesi için kalıp sıcaklığının minimum 225°C olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Türköz vd. [38] ılık hidromekanik derin çekme prosesinin performansını sayısal ve deneysel yöntemlerle analiz ederek elde edilen sonuçları hidromekanik ve ılık derin çekme prosesleriyle kıyaslayarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada AA5754-O sac malzemesi bakır macun yağlayıcı ortamında farklı sıcaklıklarda (20°C-300°C) çekme ve şişirme testlerine tabi tutularak elde edilen gerilim-gerinim grafikleri kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen sürtünme katsayıları referans alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile matematiksel model oluşturulmuş, elde edilen modelin sonuçları ile deneysel sonuçların uyumluluğu analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre ılık hidromekanik derin çekme prosesinde (3,125) hidromekanik (2,5) ve ılık derin çekme (2,625) proseslerine kıyasla daha yüksek limit derin çekme oranı elde edilmiştir. Limit derin çekme oranı %25 oranında arttırıldığında ılık hidromekanik derin çekme prosesinde ılık derin çekmeye kıyasla kalınlık dağılımının daha homojen olduğu ve %35 oranında enerji tasarruf edildiği belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen modelle elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumluluğu analiz edildiğinde şişirme deneyi için %90 oranında uyumluluk gösterdiği, çekme deneyinde ise %12 sapma ile deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde ettiği sonucuna varılmıştır.

Ma vd. [39] yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen derin çekme prosesinde sürtünme katsayısının etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırmışlardır. Çalışma kapsamında AA6111 levhası ıstampa-baskı plakası-malzeme arasındaki sürtünme katsayıları (0-0,3) değiştirilerek yüksek sıcaklıklarda (350°C, 450°C ve 500°C) derin çekme işlemine tabi tutulmuştur. Sıcaklık ve gerinim hızı değişimine bağlı olarak gerilim-gerinim grafiği elde edilmiş, ek olarak sürtünme katsayısının malzeme kalınlık dağılımına etkisi incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri analiz edilerek kırılma mekanizmaları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık arttıkça ve gerinim hızı azaldıkça gerilimin azaldığı sonucu elde edilmiştir. Derin çekme prosesinin en verimli şekilde 0,15 sürtünme katsayısında elde edildiği belirlenmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların uyumluluk gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kırılma yüzeyleri analiz edildiğinde ise kabın tabanının merkezinde sünek kırılma, kabın köşesine yakın bölgede sünek-gevrek kırılma mekanizması olduğu görülmüştür.

Wang vd. [40] yağlayıcı koşullarının AA6061-T6 malzemesinin derin çekilebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada derin çekme prosesi yağ, gres, grafit ve PTFE (teflon film) yağlayıcı ortamlarında gerçekleştirilmiş olup yağlayıcıların sınır derin çekme oranı, malzeme inceme oranı ve malzemenin köşe radyüsü sertliğine etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 3 MPa basınç ve 200 mm/dk parametrelerinde sınır derin çekme oranları sırasıyla yağ (1,92), grafit (2,03), gres (2,12) ve PTFE (2,16) şeklinde olduğu belirlenmiştir. PTFE'nin inceme ve sertlik oranının gres ve grafitte kıyasla daha düşük olduğu ve bu duruma bağlı olarak PTFE'nin derin çekilebilirlik performansının diğer yağlayıcılara kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Folle ve Schaeffer [41], derin çekme prosesinde yüzey pürüzlülüğü ve yağlayıcı koşullarının sürtünme katsayısı üzerine etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırmışlardır. Çalışmada 3 farklı yüzey pürüzlülüğünde AA1100 malzemesi derin çekme işlemine tabi tutularak sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Yağlayıcı ortamının etkisinin analizi için sabit yüzey pürüzlülüğü değerinde kuru, mineral bazlı yağlar, teflon ve gres yağlayıcı koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü azaldıkça sürtünme

katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Teflon ve gres yağlayıcı koşullarında mineral bazlı yağlayıcı ortamlarına kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edildiği, teflon ve gres yağlayıcı koşullarında sürtünme katsayısının (0,056) eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında sonlu elemanlar modelinin deney sonuçlarının tahminlemede başarılı olduğu belirlenmiştir.

Tiwari vd. [42], derin çekme prosesine etki eden faktörleri ve bu faktörlerdeki değişimin etkilerini literatür çalışmalarını detaylı analiz ederek araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre derin çekme prosesini etkileyen ana faktörlerin sürtünme, baskı plakası basıncı, sıcaklık, yağlama ve kalınlık parametreleri olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça malzemenin plastik deformasyonunun kolaylaştığı, yağlayıcı kullanımının malzemenin kırışmasını ve boyunlaşmasını azalttığı, sürtünme azaldıkça gerekli zımba yükünün azaldığı, baskı plakası basıncı yüksek olduğunda buruşmanın azaldığı fakat çok yüksek değerlerde malzemenin kırılmasına yol açabileceği belirlenmiştir.

Padmanabhan vd. [43] proses parametrelerinin paslanmaz çeliğin derin çekilebilirliğine etkisini istatistiksel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırmışlardır. Çalışmada giriş parametresi olarak 3 farklı seviyede kalıp yarıçapı (14 mm, 18 mm, 22 mm), baskı plakası kuvveti (85 kN, 95 kN, 105 kN), sürtünme katsayısı (0,08 μm , 0,14 μm , 0,2 μm) parametreleri belirlenmiş ve bu parametreler kullanılarak Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi ile deney tasarımı oluşturulmuştur. Belirlenen proses parametrelerinin malzeme kalınlığındaki değişime etkisi ANOVA ve sonlu elemanlar yöntemleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kalınlık değişimi için en etkili parametrenin kalıp yarıçapı (%89,2) olduğu, sürtünme katsayısı (%6,3) ve baskı plakası kuvvetinin (%4,5) etkisinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Ren vd. [44] AZ31 malzemesinin ılık derin çekilebilirliğinde proses parametrelerinin etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklık aralıkları (20°C -300°C) ve gerinim hızlarında (0,001 s⁻¹, 0,01 s⁻¹, 0,1 s⁻¹) ılık derin çekme prosesleri gerçekleştirilmiş ve uzama miktarına etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca 3 farklı köşe geometrisinde (dik açılı köşe, yuvarlak köşe, pahlı köşe) elde

edilen AZ31 numunelerinin derin çekme işleminde zımba kuvveti ve kalınlık değişimine etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık arttıkça süneklik ve uzama miktarının arttığı, 200°C-250°C sıcaklık aralığında ve düşük gerinim hızının optimum parametreler olduğu belirlenmiştir. Minimum zımba kuvveti ve kalınlık değişiminin pahlı köşe geometrisindeki numunede elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Zareh-Desari vd. [45] nanopartikül takviyeli yağlayıcının derin çekme prosesindeki tribolojik performansını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırmışlardır. Çalışma kapsamında kuru, CM202A pres yağı ve CM202A + 0,5 Al₂O₃ koşullarında derin çekme deneyleri gerçekleştirilerek nanopartikül katkılı yağlayıcının sürtünme katsayısı, şekillendirme için gerekli yük ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre nano Al₂O₃ takviyeli yağlayıcının baz yağla kıyasla sürtünme katsayısını ve yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %29,84 ve %16,88 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Konsantrasyon etkisinin belirlenmesi için pres yağına ağırlıkça %0,2-%1 aralığında nanopartikül takviye edilerek hazırlanmış yağlayıcıların şekillendirme için gerekli yük miktarı ve sürtünme katsayısı üzerine etkisi analiz edilmiştir. Konsantrasyon arttıkça şekillendirme için gerekli yük miktarının ve sürtünme katsayısının azaldığı, minimum yük ve sürtünme katsayısının %0,6 konsantrasyonda elde edildiği ve %0,6'dan yüksek konsantrasyonlarda yük ve sürtünme katsayısının arttığı sonucuna varılmıştır.

1.1.2. Karbon Esaslı Yağlayıcıların Tribolojik Performansı ile İlgili Çalışmalar

Lee vd. [46] sürtünme yüzeyleri için geliştirilen fulleren takviyeli yağlayıcının tribolojik performansını kaymalı baskı yatağı test cihazındaki etkisinin analiz ederek araştırmışlardır. Çalışmada mineral yağla %0,1 fulleren, %0,3 fulleren ve %0,1 CNT takviye edilerek üç farklı yağlayıcı hazırlanmış ve süspansiyon stabilitesi UV ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre fulleren takviyeli yağlayıcıların stabil halde olduğu, CNT takviyeli olanın ise aglomerasyona uğradığı belirlenmiştir. Bu sebeple deneyler mineral yağ, mineral yağ + %0,1 fulleren, mineral yağ + %0,3 fulleren koşullarında yapılarak yağlayıcıların farklı yük (800N-4000N) ve hız (300 rpm-3000 rpm) aralıklarında sürtünme katsayısına etkisini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre tüm yük ve hız koşullarında fulleren takviyeli yağlayıcı ortamlarında baz yağla

kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı elde edildiği ve 1200 N'dan yüksek yüklerde sürtünme katsayıları arasındaki farkın ihmal edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Bu durum nano boyutta fulleren takviyesinin yağın viskozitesini arttırarak tribo-film tabakası oluşturmasıyla açıklanmıştır.

Huang vd. [47] grafit nano levha ve pul grafit takviyeli yağlayıcıların tribolojik performansını deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Parafin yağına farklı konsantrasyonlarda takviye edilen grafit nano levha ve pul grafit ile hazırlanan yağlayıcılar four-ball ve pin-on-disk aşınma deneylerinde kullanılmış, bu yağların sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapına etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre grafit nano levha takviyeli yağlayıcının parafin yağı ve pul grafit takviyeli yağlayıcıya kıyasla sürtünme katsayısını ve aşınma izi çapını önemli oranda azalttığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapının minimizasyonu için optimum konsantrasyonun %0,01 olduğu sonucuna varılmıştır.

Radhika vd. [48] fonksiyonelleştirilmiş karbon küreleri ve grafen nanolevhasından oluşan hibrit yağlayıcının tribolojik performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma fonksiyonelleştirilmiş karbon kürelerinin (FCS) optimum konsantrasyonu, grafen nano levhasının (GNP) optimum konsantrasyonu ve her iki takviyenin optimum konsantrasyonları ile hibrit (FCS/GNP) yağlayıcının optimum konsantrasyonundan oluşan deney tasarımının sürtünme katsayısına ve aşınma izi çapına etkisinin analizi olmak üzere üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hibrit takviye, FCS ve GNP'nin saf yağa kıyasla sürtünme katsayısını sırasıyla %18, %8 ve %3 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Deney sonrası elde edilen aşınma izlerinin optik görüntülerinde hibrit yağlayıcının aşınma izi çap değerinin diğer yağlayıcı ortamlarına kıyasla daha düşük olması da bu durumu destekler niteliktedir.

Su vd. [49] nano grafit takviyeli yağlayıcıların tribolojik performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada bitkisel esaslı yağa farklı boyut (35 nm ve 80 nm) ve farklı konsantrasyonlardaki (%0,05 ve %0,25) nano grafit takviye edilerek hazırlanan yağlayıcıların tribolojik etkisi pin-on-disk aşınma deneyleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları sürtünme katsayısı, aşınma hacmi değerleri ile nicel olarak değerlendirilmiş, aşınma yüzeyleri FE-SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Elde edilen

sonuçlara göre nano grafit konsantrasyonu arttıkça ve partikül boyutu azaldıkça sürtünme katsayısı ve aşınma hacminin azaldığı, aşınma izinin yüzeysel olarak deformasyona uğradığı belirlenmiştir.

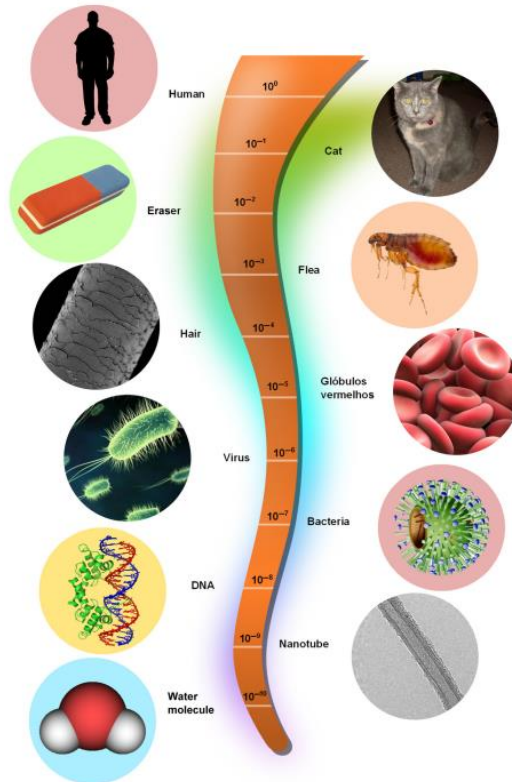
Bhaumik vd. [50] karbon nanotüp takviyeli yağlayıcıların tribolojik performansını four-ball aşınma deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışmada mineral yağa ağırlıkça %0,1, %0,5 ve %0,6 konsantrasyonlarında karbon nanotüp takviye edilerek hazırlanan yağlayıcıların performansı yük taşıma kapasitesi, sürtünme torku, sürtünme katsayısı, aşınma miktarı değerleri açısından değerlendirilmiş ve aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları mineral yağ ve %0,5 grafit takviyeli yağlayıcılar ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yük taşıma kapasitesi ve aşınma önleme özelliği açısından karbon nanotüp takviyeli yağlayıcıların mineral yağ ve grafit takviyeli yağlayıcılara kıyasla daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı açısından optimum karbon nanotüp konsantrasyonunun %0,5 olduğu, bu konsantrasyon değeri arttıkça yağlayıcının aglomerasyonunun arttığı ve yağlama etkisinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Lee vd. [51] nano grafit takviyeli yağlayıcıların tribolojik etkisini disk-on-disk aşınma deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışma kapsamında endüstriyel dişli yağına ağırlıkça %0,1 ve %0,5 konsantrasyonlarında nano grafit takviye edilerek hazırlanan yağlayıcıların performansı sürtünme katsayısı, sıcaklık değişimi ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir. Ek olarak yağlayıcıların yüzey morfolojisine etkisi SEM ve AFM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre konsantrasyon arttıkça sürtünme katsayısı, sıcaklık artış miktarı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı belirlenmiş, yüzey morfolojisinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

1.1.3. Nanobilim ve Nano Teknoloji

1974 yılında nanoteknoloji terimini ilk kez bir makalesinde kullanan Nario Taniguchi, nanoteknolojiyi şöyle tanımlamıştır: Nanoteknoloji, bir atom veya bir molekül tarafından malzemelerin ayrılma, birleşme ve şekil değiştirme işlemi olarak tanımlanmıştır [52]. Bu alanlarda geleceğe yönelik yapılan araştırmaların devrim niteliğinde gelişmeler yaratacağı düşünülmekte ve nanoteknolojiden, sıklıkla

geleceğin sanayi devrimi olarak bahsedilmektedir [53–55]. Nano teriminin etimolojik kökeni Yunancadır ve cüce anlamına gelir. Bu terim, fiziksel boyutların metrenin milyarda biri (10^{-9} m veya nano-metre) düzeyinde olduğunu belirtir. Bu aralığa nanometrik ölçek veya basitçe nano ölçek denir. Geleneksel olarak 1 ila 100 nm arasındaki boyutların nano ölçeğe ait olduğu kabul edilir. Şekil 1.1 farklı ölçeklerdeki nesnelerin ve doğal organizmaların boyutlarını karşılaştırmaktadır. Nanoteknolojinin birçok uygulaması nano boyutlarda maddenin farklı davranmasına dayanır. Nano boyutlarına inildiğinde artan yüzey alanı/hacim oranı maddeyi çok daha aktif yaparak, çevredeki diğer atom ve moleküllerle farklı etkileşimlerine neden olur. Böylece boyutların azaltılması malzemeyi kimyasal olarak daha reaktif hale getirir ve malzemenin elektriksel, manyetik, morfolojik, yapısal, termal, optik ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bu tür özellikler artık klasik (Newton) mekanik açıdan tanımlanamaz ve nanometrik boyutlarda kuantum mekaniği etkin olarak kullanılır. [56].



Şekil 1.1. Farklı nesnelerin ve doğal organizmaların boyutları [56].

BÖLÜM 2

KARBON VE KARBON ALLOTROPLARI

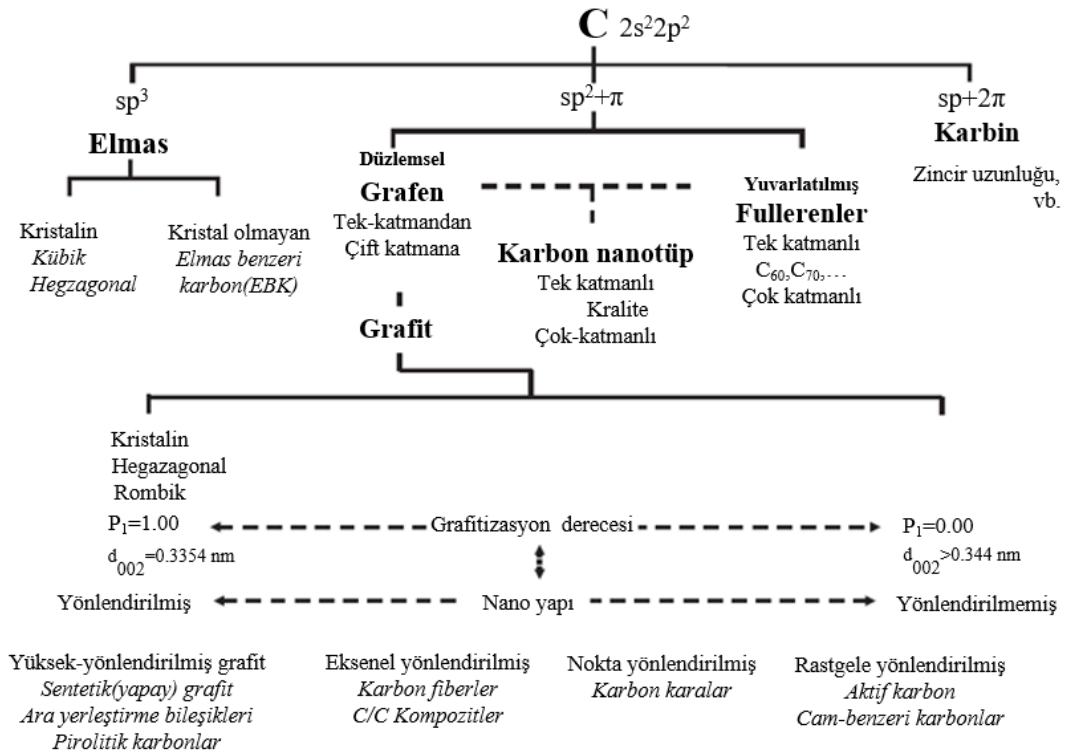
2.1. KARBON ELEMENTİ

Karbon C sembolü, 6 atom numarası ve $[\text{He}]2s^22p^2$ elektron konfigürasyonuna sahip bir kimyasal elementtir. Adı, Latince "kömür" anlamına gelen "carbo" kelimesinden türetilmiştir. Allotroplar olarak, aynı elementin atomlarının bağlanma şeklini değiştirerek farklı düzenlenme biçimlerini tanımlarız. Bu farklı düzenlenme şekilleri, nihai "makro malzemelerin" özelliklerini değiştirir örneğin, en iyi yağlayıcılardan biri grafit siyah ve oldukça yumuşakken, elmas şeffaftır ve şu ana kadar keşfedilmiş en sert malzemelerden biridir. [57].

2.2. KARBON TERMİNOLOJİSİ VE KARBON MALZEMELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Karbonla ilgili terminoloji karışık olabilir çünkü karbon, diğer elementlerden çeşitliliği açısından farklıdır. Çoğu elementin aksine, karbonun polimorf (veya allotrop) olarak bilinen birkaç maddesel formu vardır. Bu formlar tamamen karbon atomlarından oluşmasına rağmen farklı fiziksel yapıları vardır. Karbona özgü olarak, bu formlar farklı isimlere sahiptir: grafit, grafen, elmas, fulleren ve diğerleri. Terminolojiyi netleştirmek için, karbon ve polimorfik yapılarının ne anlama geldiğini tanımlamak gereklidir. Tek başına kullanıldığında, "karbon" terimi sadece elementi ifade etmelidir. Çeşitli karbon malzemeleri üretilmiş, sentezlenmiş ve çeşitli endüstrilerde geniş bir şekilde kullanılmıştır. Bu karbon malzemelerinin, karbon atomlarının kimyasal bağla bileşenlerine dayalı olarak sp^3 , sp^2 ve sp hibrit orbitallerini kullanarak sınıflandırılması önerilmektedir. Karbon atomlarının sp^2 hibrit bağlanması, iki yapıyı ortaya çıkarır: düz tabakalar, altı üyeli karbon halkalarından oluşur; bu yapı grafit ile temsil edilmiştir ancak şimdi grafen de bu kategoriye dahil edilmiştir.

Kıvrımlı tabakalar ise altı üyeli halkalara beş üyeli karbon halkaları ekler, bu yapı fullerenlerde görülür sp^2 orbitallerden oluşan düz ve kıvrımlı tabakalar, doğal olarak anizotropik yapıdadır ve tabakanın her iki tarafında π -elektron bulutlarına sahiptir. Bu durum, malzemelerin yapı ve özelliklerinde geniş bir çeşitliliğe neden olur. Karbon nanotüpleri, uçlarında fulleren benzeri beş üyeli halkaları içerirken, duvarları grafen benzeri altı üyeli halkalardan oluşur. Ancak nanotüpler, bu yapıları sarılarak oluşturdukları için fulleren ile grafen arasında konumlandırılabilirler. Şekil 2.1, her karbon malzemesinin çeşitliliği ile hibrit bağlara dayalı olarak karbon malzemelerinin sınıflandırılmasını göstermektedir. Karbon malzemeleri, çoğunlukla sp^2 hibrit orbitallerden oluştuğu için anizotropik doğaya ve π -elektron bulutlarının varlığına sahiptir. Bu nedenle, paralel olarak istiflenen katman sayısı bu malzemelerin özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Düzenli olarak istiflenmiş büyük sayıda katmana grafit denir ve endüstrilerde üretilen çeşitli grafit ile ilişkili malzemeler kritik endüstriyel malzemeler olarak kullanılmaktadır; bunlardan bazıları Şekil 2.1'de listelenmiştir [58].



Şekil 2.1. Karbon Malzemelerinin Sınıflandırılması [58].

2.3. KARBON ATOMUNUN YAPISI

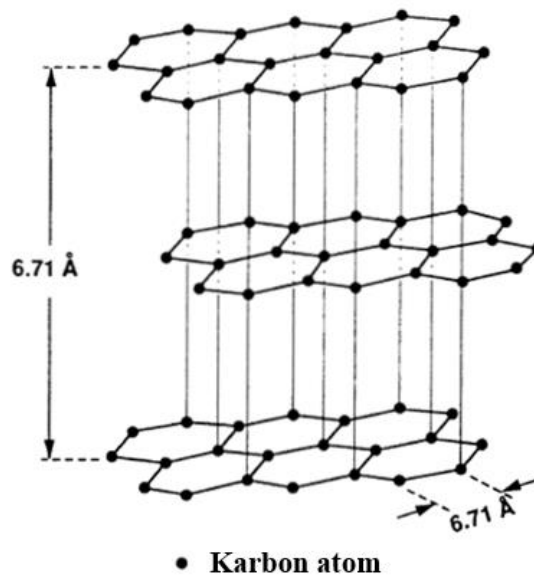
2.3.1. Karbon Allotropları ve Bileşikleri

Karbon, allotroplarının sayısı ve çeşitliliği açısından benzersizdir. Bu biçimler, allotroplar veya polimorflar olarak da bilinir ve hepsi karbon atomlarından oluşur, ancak farklı fiziksel yapılara sahiptirler, karbon allotroplarının sayısı ve çeşitliliği açısından öne çıkar. Başka bir deyişle, farklı moleküler veya kristal formları vardır. Çeşitli karbon allotroplarının özellikleri büyük ölçüde değişebilir. Örneğin, elmas, bilinen en sert malzeme iken, grafit en yumuşaklardan biri olabilir. Elmas, görünür spektruma karşı şeffağken, grafit opaktır; elmas elektriksel bir yalıtkan iken, grafit iletkenidir ve fullerenler her ikisinden de farklıdır. Ancak bu malzemeler aynı karbon atomlarından oluşmaktadır; bu farklılık, atomik yapı düzenlemelerinin sonucudur. Karbonun allotroplarının oluşumu ve bunların davranışları ile ilgili özelliklerin nedenlerini anlamak için, karbon atomunun atomik yapılandırmasının ve diğer karbon atomlarına bağlanma şekillerinin net bir şekilde anlaşılması esastır. Karbon, kendi kendisiyle kolayca birleşerek polimorflar oluşturabilir ve aynı zamanda hidrojen ve diğer elementlerle birleşerek, aynı bileşime sahip fakat farklı yapılarda olan izomerler ve çeşitli bileşikler oluşturabilir. Karbon ve hidrojen bileşikleri ve bunların türevleri, organik kimya olarak bilinen geniş ve karmaşık bir kimya dalını oluşturur. Yarı milyondan fazla organik bileşik tanımlanmış olup, sürekli olarak yenileri keşfedilmektedir. Aslında, tüm diğer elementlerin bileşiklerinden daha fazla karbon bileşiği bulunmaktadır. Organik kimya bu tezin konusu içeriğinde hidro termal karbon üretim aşaması için önem arz etmektedir ve organik bileşikler karbon polimorflarının işlenmesinde büyük bir rol oynamaktadır [59].

2.3.1.1. Grafitin Yapısı

Grafit kelimesinin kökeni Yunanca "graphein" kelimesidir, ki bu "yazmak" anlamına gelir ve grafit tarih öncesinden beri yazmak (ve çizmek) için kullanılmaktadır ve ilk kalemler 15. yüzyılda İngiltere'de üretilmiştir. Elmastan oldukça farklı bir kristal yapıya sahip olan grafit aynı zamanda oda sıcaklığı ve basınç altında elmastan daha karardır. Grafit yapısı hekzagonal olarak düzenlenmiş karbon atomu katmanlarından

oluşur ve bu katmanların içindeki her karbon atomu üç eş düzlemsel komşu atomlara güçlü kovalent bağlarla bağlıdır. Dördünün bağlanma elektronu katmanlar arasındaki Van der Waals tipi zayıf bağların katkısı ile sağlanır. Bu zayıf tabakalar arası bağların bir sonucu olarak, tabakalar arası bölünmenin (klivaj) oluşması kolaydır. Bu grafitin mükemmel olan yağlayıcılık özelliğinde artış sağlar. Şekil 2.2’de grafitin şematik gösterimi mevcuttur. Ayrıca, elektriksel iletkenlik, hekzagonal levhalara paralel kristalografik yönde nispeten yüksektir. Grafitin diğer istenen özellikleri şunlardır: yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve kimyasal kararlılık ve oksitleyici olmayan ortamlarda, yüksek ısı iletkenlik, düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek ısı(termal) şok direnci, gazların yüksek adsorpsiyonu ve iyi işlenebilirlik. Grafit, elektrikli fırınlarda ısıtma elmanı olarak yaygın biçimde kullanımının yanı sıra; ark kaynağı için elektrot olarak, metalurjik potalarda, metal alaşımlar ve seramik için döküm kalıbı olarak, yüksek sıcaklık refrakter ve izolasyonları için, roket egzoz çıkışlarında, kimyasal reaktör kaplarında, elektrik kontaklarında, fırçalar ve dirençlerde kullanılır. Pillerde, elektrotlarda ve hava temizleme cihazlarında kullanımı sayılabilecek diğer örnekler arasındadır Grafit, temel formundan üretilebilecek çok çeşitli malzemelerle dikkat çekicidir. Bu malzemeler arasında son derece güçlü lifler, kolayca kayabilen yağlayıcılar, gaz geçirmez bariyerler ve gaz adsorbanlar bulunmaktadır. Tüm bu çeşitli malzemelerin ortak bir özelliği vardır: hepsi karbon atomlarının trigonal sp^2 bağlanmasına dayanmaktadır [59,60].



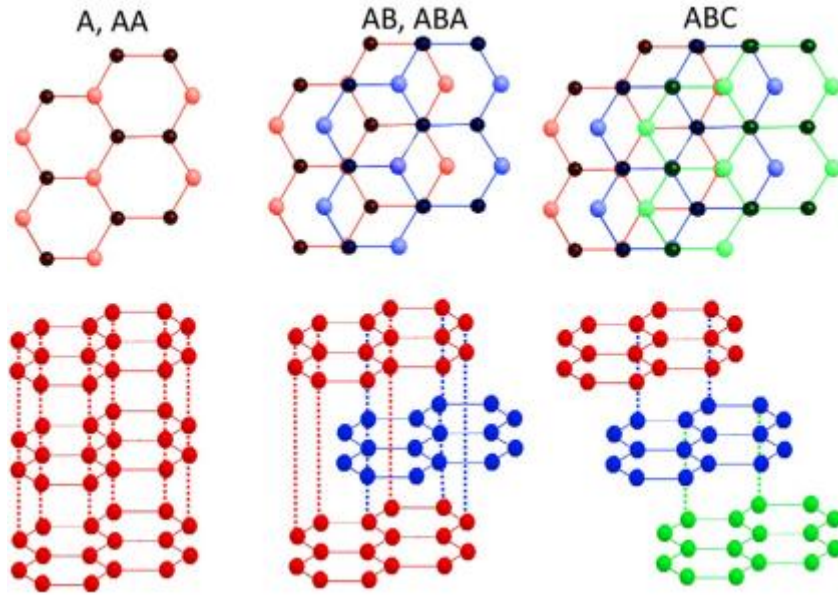
Şekil 2.2. Grafit yapısının üç boyutlu şeması [59].

2.3.1.2. Grafenin Yapısı

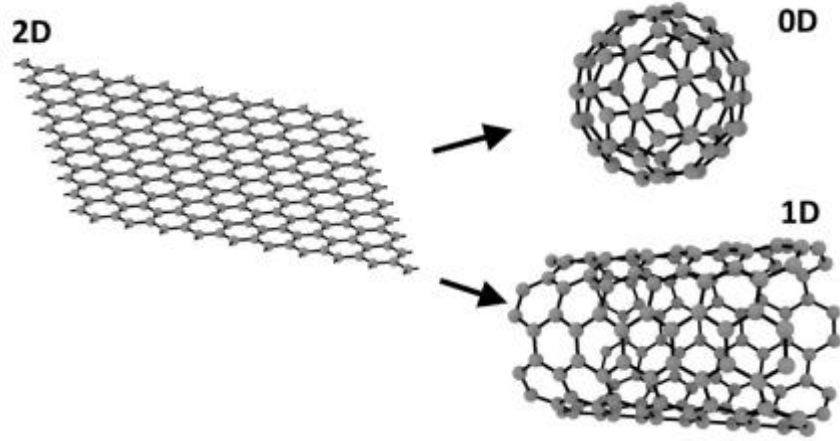
Grafen karbon allotroplarından birinin adıdır. "Grafen" kelimesi, "grafit" 'ten gelen önek "graf" ve karbon/karbon çift bağlarını temsil eden ek "en" 'den oluşur [61]. Grafen" genellikle sp^2 hibritleşmiş C-C bağlarına ve π -elektron bulutlarına sahip karbon altıgenlerinin tek katmanı olarak tanımlanır. Mühendislik açısından, tek katmanlı grafen de dahil olmak üzere birkaç katman karbon atomundan oluşan ince pullar, büyüleyici yapısal, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle önemli olabilir. Grafen, grafit, karbon siyahı, karbon nanotüpler, karbon fiberler, aktif karbonlar, gözenekli karbonlar, elmas ve fullerenler gibi karbon malzemeleri ailesinin bir üyesidir. Grafen parçacıkları ve filmleri hazırlamak için doğal grafit, yüksek derecede yönlendirilmiş pirolitik grafit (HOPG) ve kish grafit (doğal grafit türü) gibi grafit malzemeleri kullanılmaktadır. Grafen dışında, aktif karbonlar, gözenekli karbonlar (karbon köpükleri) ve karbon nanotüpler gibi diğer karbon malzemeleri, literatürde yenilikçi malzemeler olarak bahsedilmektedir [58].

Grafen ve ilgili malzemelerinin umut verici potansiyel uygulamaları, teknolojik alanlarda vurgulanmıştır. Grafen ve ilgili malzemelerine yönelik ani bilimsel ve teknolojik ilgi, grafenle ilgili malzemelerin tanımı ve terminolojisi konusunda bilimsel dergilerde dahi bazı karışıklıklara yol açmıştır [58]. İki boyutlu karbon malzemeleri için adlandırma önerisi, karbon dergisinde sunulmuştur [62]. Ancak literatürde, grafen terimi için sp^2 hibritleşme bağlarına sahip olan tek katmanlı karbon gibi kesin bir tanımlama kullanılmamaktadır. Bazı yazarlar, malzemelerinde kaç tabakanın olduğuna yeterince dikkat etmezler, ancak onları "grafen" olarak adlandırırlar. Bu nedenle, grafeni ifade ederken "tek tabaka grafen" (veya mono katman grafen), "iki katman grafen" (veya bikatman grafen) ve "çok katmanlı grafen" terimleri, üzerinde istiflenmiş katman sayıları ifade edilebilir. Çok sayıda inceleme, çeşitli bakış açılarından grafeni ele alarak, onunla ilgili neyin büyüleyici olduğunu vurgulayarak yayımlanmıştır. Bu incelemeler, yapısına bağlı olarak üretimine odaklanarak, elektronik uygulamalarına, enerji depolama uygulamalarına, sensörler de dahil biyolojik uygulamalarına, fonksiyonelleştirme ve kompozit oluşturma işlemlerine, mekanik uygulamalarına, termal özelliklerine, özelliklerini iyileştirmek için katkı malzemeleri eklenmesine ve toksisitesine odaklanmaktadır. Grafen, grafit, karbon

siyahı, karbon nanotüpler, karbon fiberler, aktif karbonlar, gözenekli karbonlar, elmas ve fullerenler gibi karbon malzemeleri ailesinin bir üyesidir. Grafen parçacıkları ve filmleri hazırlamak için doğal grafit, yüksek derecede yönlendirilmiş pirolitik grafit (HOPG) ve kish grafit (doğal grafit türü) gibi grafit malzemeleri kullanılmıştır. Grafen dışında, aktif karbonlar, gözenekli karbonlar (karbon köpükleri) ve karbon nanotüpler gibi diğer karbon malzemeleri, literatürde rekabetçi malzemeler olarak bahsedilmiştir [58]. Genel olarak, "grafen" kelimesi, π -orbitalleriyle kısmen doldurulmuş iki boyutlu (2D) petek yapıya paketlenmiş sp^2 hibritlenmiş karbon atomlarının tek bir tabakasını ifade eder [63]. Grafen tabakası atomik olarak düzdür ve Van der Waals kalınlığı yaklaşık 0.34 nm'dir. Bu tek tabaka, diğer tüm grafik malzemelerin yapı taşı temsil eder. Grafen, sadece tek bir tek tabaka (levha) formunda değil, aynı zamanda birkaç tabakanın bir araya getirilmesiyle üç boyutlu (3D) bir yapı oluşturan çok katmanlı formda da bulunabilir (Şekil 2.3). 3D grafit oluşturma yanısıra, grafen sıfır boyutlu (0D) fullerenlere veya bir boyutlu (1D) nanotüplere sarılabilir (Şekil 2.4) [63,64].



Şekil 2.3. 2D yapı bloğundan 3D grafen oluşumu farklı grafen dizimleriyle üç yaygın grafit yapısı: altıgen dizilim (AA), Bernal dizilim (AB) ve eşkenar dörtgen dizilim (ABC) [65].



Şekil 2.4. 2D grafen tabakası, diğer alotropilerin temelidir: 0D (fulleren) ve 1D (karbon nanotüpü) [65].

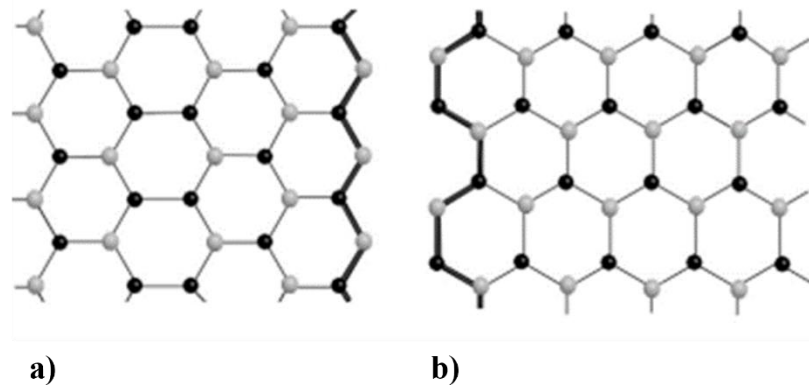
Grafen, çok farklı özelliklere, yan uzunluklara ve katman sayılarına sahip malzemeler içeren büyük bir 2D ve 3D karbon formu grubunun temel bir ögesidir. "Grafen" terimi "çift katmanlı", "az katmanlı" veya "çok katmanlı" olabilir. Bu sınıflandırma önemlidir çünkü mono, çift ve çok katmanlı grafenin özellikleri grafitten ve birbirlerinden farklıdır [61,63]. Ayrıca, aynı yapılar için farklı isimler kullanılabilir. Örneğin, "çok katmanlı nano levha" terimi "az katmanlı nano levha" ile aynı anlama gelir. Grafen için en yaygın kullanılan terimler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Grafen malzemelerin boyutlarına göre adlandırılması [65].

Parametre							
		Katman sayısı (n)		En-boy oranı (A)		Yanal boyut (D)	
				(uzunluk/genişlik)		(nm)	
Aralık	1	$2 < n < 10$	> 10	$A < 10$	$A > 10$	$D < 100$	$D > 100$
Sınıflandırma	Tek- Katman; monolayer	Birkaç- katman; multilayer	Grafit	Nano	Micro	- Pul - Tabaka - Levha - Plaket	- Şerit

Az katmanlı grafitin üç olası yığılma yapılandırması vardır (Şekil 2.3). Bernal (AB), altıgen (AA) ve eşkenar dörtgen (ABC) [66,67]. Bu yığılma yapılandırmaları, bazı uygulamalar için oldukça önemli olan grafit tabaka yığınlarının göreceli yönelimlerinde farklılık gösterir. Örneğin, yığılma sırası az katmanlı grafitin elektronik yapısını önemli ölçüde etkiler [66]. Olası yığılma yapılandırmaları

arasında, Bernal yapılandırması en düşük yığılma enerjisine sahiptir [68]. Bu yapılandırma, z ekseninde birbirine göre 60 derece döndürülmüş iki grafen tabakanın yığılması ile oluşur. Bu durumda, 3B birim hücresinde dört atom bulunur ve grafen tabaka yığınlarına dik olan üçüncü baz vektörü, sırasıyla 4,2 ve 297K'de 0,6672 ve 0,6708 nm'dir [69]. AA-yığılmış grafende, her tabakadaki tüm karbon atomları aynı x ve y koordinatlarına sahiptir (Şekil 2.3). ABC yapıda, atomların yarısı komşu tabakadaki atomların tam altında ve altıgen halka merkezlerinin tam üstünde yer alırken diğer yarısı atomların tam üstünde ve altıgen halka merkezlerinin tam altındadır [70]. Tek kristalli grafitte Bernal yığılması en yaygın yapılandırma olsa da, soyulmuş çok katmanlı grafenin %15'inin tipik Bernal yığılması yerine eşkenar dörtgen yığılmış mikrometre boyutlu alanlardan oluştuğu bulunmuştur [71]. Yığılma sırası, özellikle makroskobik seviyede birkaç katmanlı grafenin mekanik davranışı için hayati öneme sahip olabilir. Örneğin, AB yığılma durumunda üst ve alt katmanların farklı uzunlukları, kısa grafen katmanlarının sınırında bir gerilim konsantrasyonuna yol açmıştır [72]. Grafenin birçok özelliği kiralite veya yönelim tarafından etkilenir. Grafen altıgen bir ızgara olduğundan, zigzag ve armchair olarak adlandırılan iki tür kenar vardır (Şekil 2.4). Zigzag ve armchair kenarları aynı zamanda "yan" ve "uzunlamasına" kenarlar olarak da çizilebilir [73]. Nano şeritlerin durumunda, "zigzag grafen" ve "armchair grafen" tanımları kullanılabilir. Burada, bir nano şeritlerin en uzun boyunca kenar tipi tarafından adlandırılır ve kenarlar kalın çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Grafende iki tür kenar a) zigzag ve b) Armchair [65].

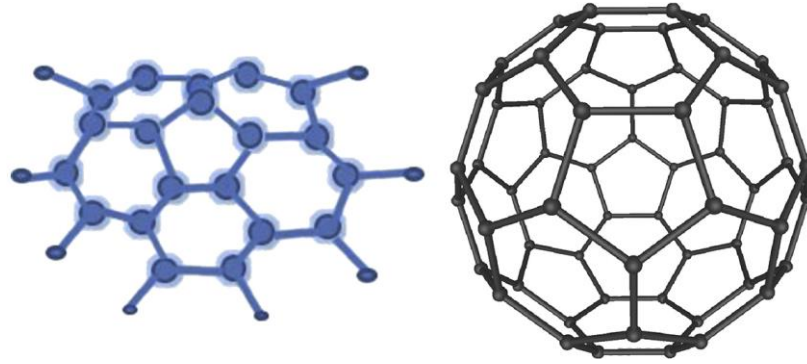
2.3.1.3. Grafenin Mekanik Özellikleri

Grafenin mekanik özellikleri, onu geleceğin birincil tribolojik malzemesi yapan ana nedenidir. Karbon nanotüplerden sonra en yüksek mukavemet ve elastik modülüne sahiptir. Grafenin olağanüstü mekanik özellikleri, altıgen kafes oluşturan sp^2 bağlarının kararlılığına dayanır. Bu, bir grafen tabakasının düzlem içi deformasyonlara karşı koymasını sağlar [74]. Grafenin serbest duran tek katmanlı mekanik özellikleri ilk kez Lee ve arkadaşları tarafından AFM (Atomik kuvvet mikroskobu)'nin nanoindentasyon (malzemelerin mekanik özelliklerin belirlenmesi için kullanılan teknik) modu kullanılarak ölçülmüştür [74]. Tek katmanlı grafen yapısının 1 TPa'lık bir elastiklik katsayısı elde edildiğini ancak, bazı raporlarda farklı sertlik değerleri elde edildiğini ve bu fark, grafen tabakalarının köşe noktalarındaki kusurlar veya sınırdaki düzensiz gerilmelerden kaynaklanabilecek kaydedilemeyen kırışıklıklara atfetmişlerdir [74–76]. CVD ile üretilen tek katmanlı grafenin kayma modülü Lui ve arkadaşları tarafından ölçüldü ve 280 GPa'lık bir değer elde edildi. [75]. Hone vd.'nin yaptığı çalışma ile, hatasız tek tabakalı grafen en dayanıklı materyal olduğu benimsenmiştir. [76]. Ancak, grafenin mekanik özellikleri kusurlar tarafından önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Boşluk türü veya sp^3 tipi gibi kusur türü ve yoğunluğuna bağlı olarak, grafenin mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde azalabilmektedir bu, boşluklar için gözlemlenmiştir. Tersine, mekanik özellikler, daha yüksek yoğunluklardaki sp^3 tipi kusurlarda bile korunmuştur [77].

2.3.1.4. Fulleren

1980'lerin ortalarından bu yana üç yeni karbon allotropu keşfedilmiştir: Fullerenler, karbon nanotüpleri (KNT'ler) ve son olarak da grafendir. Bir fulleren karbon atomlarının düzenlenerek küresel veya silindirik bir şekil elde ettiği bir moleküldür. En ünlü küresel olanları C60'tır, bu moleküller 60 karbon atomundan oluşur [78]. Şekil 2.5'te sağ tarafta gösterildiği gibi C60, yüzeyinde 20 adet altıgen ve 12 adet pentagon içeren boş bir küre şeklindedir. C60'ın varlığı, Toyohashi Teknik Üniversitesi'nden Prof. E. Osawa tarafından 1970 yılında öngörülmüştür. Şekil 2.5'te resmin sol tarafında gösterildiği gibi Osawa, C₂₀H₁₀ (polisiklik aromatik hidrokarbon) formülüne sahip kimyasal bileşik korannulenin molekül yapısının, futbol topu şeklinde daha

karmaşık bir yapıya ait bir parça olduğunu görmüştü. Bu nedenle, fullerenin varlığını önermişti; ancak bu fikir Japonya dışında kabul görmedi ve yerel düzeyde kaldı. Sonunda, fulleren ilk kez 1985 yılında Rice Üniversitesi'nde Richard Smalley, Robert Curl ve Harold Kroto tarafından elde edildi. O zamanlar özellikle karbon atomlarının küçük kümeleşmelerine ilgi gösteriyorlardı; ilk deneylerinde, kütle spektrumlarında çift sayıda karbon atomu içeren daha büyük kümeleşmelere karşılık gelen zirveleri gözlemledik. Belirli deneysel koşullar altında, 60 karbon atomuna karşılık gelen zirvenin büyük ölçüde baskın olduğu ve dolayısıyla en kararlı küme olduğu bulundu. Diğer bir zirve ise 70 karbon atomuna karşılık geliyordu. Bu zirveler C₆₀ ve C₇₀'e karşılık gelmektedir [79]. Bu kümeleşmeler daha önce başka bilim insanları tarafından da fark edilmişti, ancak sadece Rice Üniversitesi ekibi bulgularının gerçek önemini anladı. Bu 60 karbon atomlu kümeleşmelerin etkileyici kararlılığını gözlemleyerek, bu kümeleşmenin kapalı bir düzenleme olduğunu öne sürdüler ve C₆₀ için mantıklı bir yapı önerdiler. Ancak, Krätschmer ve Huffman tarafından 1990 yılında grafitin buharlaştırılması ve yeniden yoğunlaştırılması, ark deşarj yöntemi kullanılarak büyük ölçekli sentezin gerçekleştirilmesi ve C₆₀'ın X-ışını difraksiyon analizi ile rapor edilmesiyle, bu yeni karbon allotroplarının varlığı doğrulandı [80]. Günümüzde, fullerenler ton ölçeğinde hazırlanabilir hale gelmiştir. Rice Üniversitesi'nden bilim insanlarının fullerenlerin keşfi sayesinde, 1996 yılında Kimya Nobel Ödülü'nü kazandıkları belirtilmiştir. ("fullerenlerin keşfi için"). Mekanik açıdan bakıldığında, fullerenler son derece güçlü moleküllerdir ve büyük basınçlara dayanabilirler. Örneğin, 3000 atmosferin üzerindeki basınca maruz kaldıktan sonra bile orijinal şekillerine geri dönebilirler. Teorik hesaplamalar, bir C₆₀ molekülünün boyutunun %75'i sıkıştırıldığında etkin bir bulk modülü (hacim modülü) olarak 668 GPa olduğunu önermektedir. Fullerenlerin paslanmaz çelikte 15,000 mil/saat hızında olan çarpışmaları dayanabileceği ve sadece geri tepip şekillerini koruyabileceği gösterilmiştir. Bu deney, molekülün yüksek kararlılığını kanıtlamaktadır [57]. Ek olarak elmas ve grafit, katı bağlar olarak adlandırılırlar ki karbon atomları katının tamamı boyunca komşu atomları ile birincil bağ oluştururlar. Bukminster fullerende bu küresel molekülleri oluşturmak için karbon atomları birlikte bağlıdır. Katı halde C₆₀ birimi kristal yapı bir araya gelerek paketleme ile yüzey merkezli kübik bir dizilim oluşturur. Saf bir kristal katı olarak bu malzeme, elektriksel açıdan yalıtkandır. Ancak, uygun empürite ilaveleriyle, son derece iletken ve yarı iletken olabilir [60].

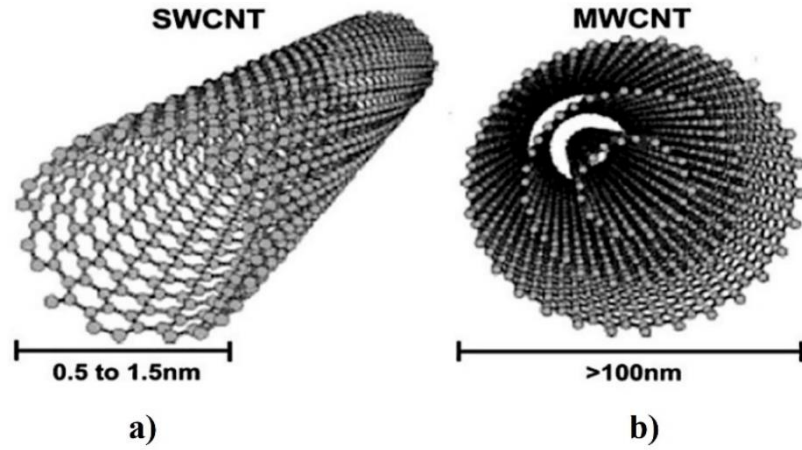


Şekil 2.5. (Sol) Corannulene yapısı. (Sağ) Buckminsterfulleren C60 [79].

2.3.1.5. Karbon Nanotüp (CNT)

Karbon nanotüpler (KNT'ler), Sumio Iijima tarafından 1991 yılında Japonya, Tsukuba'daki NEC Temel Araştırma Laboratuvarı'nda grafit elektrotlarının buharlaşmasının elektriksel deşarj yoluyla etkilerini incelerken tesadüfi bir şekilde keşfedilmiştir [81]. KNT'ün yapısı, bir grafenin kıvrılarak birleştirilmesi sonucu oluşturduğu bir rulodur ve alt ve üst yüzeyler C60 fulleren yarı küresi ile kapatılmıştır. Nano ön eki, tüp çaplarının nanometre boyutunda olduğunu gösterir (yani 100 nm veya daha az). Her nanotüp milyonlarca atomdan oluşan tek bir moleküldür ve bu molekülün uzunluğu çapından çok daha (binlerce kez) büyüktür [60]. Eşmerkezi silindirik şeklinde oluşmuş, çok katmanlı karbon nano tüpler de bulunmaktadır. Karbon nanotüplerin (KNT'lerin) ilgi çekici ve eşsiz özellikleri, moleküler yapısında bulunan karbon atomlarının helisel bir düzenlemesine dayanır. Bu düzenleme, bal peteği (altıgen) yapıya, bir katlanmış grafit tabakasına benzer şekilde oluşmuştur. SWCNT (tek katlı duvarlı karbon nanotüpler) yalnızca tek bir boş tüpten oluşan ve yalnızca bir tek grafit tabakasının katlanmasıyla elde edilen karbon nanotüplerdir veya MWCNT (çok katlı duvarlı karbon nanotüpler) olabilir, burada farklı çapta daha çok konsantrik tüpler vardır (Şekil 2.6). Tek duvarlı karbon nanotüpün (SWCNT) moleküler yapısı, çapını ve kiralitesini belirleyen (m, n) indeksi boyunca bir grafenin yuvarlanmasıyla oluşan kesintisiz, içi boş silindirik bir yapı olarak kabul edilir. Bir SWCNT, tipik olarak yaklaşık 1.5 nm çapında ve onlarca mikrometre uzunluğunda ultra yüksek en-boy oranına sahip ideal bir ince yapıdır. Atomik olarak tek katmanlı bir yüzeye ve kavisli π -bağlanma konfigürasyonuna sahip

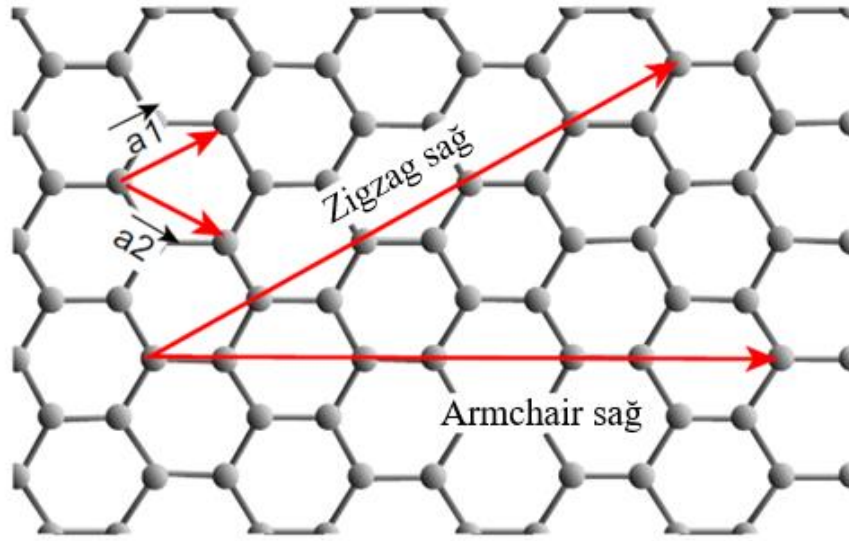
bireysel bir SWCNT, kiralitesine (altıgenler ve t p ekseni arasındaki kiral aı) ve çapına bağlı olarak metalik veya yarı iletken olabilir [81]. Kiralite ve nanotüpün yarıçapı, KNT'nin elektronik, mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Kesin aı ve çap, nanotüpün metalik mi yoksa yarı iletken mi olduğunu, gücünü, esnekliğini ve diğer özelliklerini etkiler [82]. SWCNT'ler söz konusu olduğunda, bant aralıkları, neredeyse aynı çaplara sahip olsalar bile (tipik olarak 1.5 nm çapında) nispeten büyük (yaklağık 0.5 eV) veya küçük (yaklağık 10 meV) olabilir [83]. Daha ilginç bir Şekilde, aynı kiraliteye sahip yarı iletken bir SWCNT'nin bant aralığı, çapıyla ters orantılıdır. SWCNT'nin bu ilginç karakteri, temel doğasını incelemek ve potansiyel uygulamalarını keŐfetmek için dünya çapında yoğun araŐtırmaları teşvik etmektedir. Örneğin, çeşitli türdeki SWCNT'ler, düşük dirençleri, yüksek termal iletkenlikleri (yaklağık 3500 W/m/K) ve akım taşıma kapasiteleri (yaklağık 10^9 A/cm²) nedeniyle ileri düzey elektrik bağlantıları için umut verici olarak görülmektedir. Kovalent karbon altıgen açı, son derece kararlı bir yapı oluşturur. TartıŐmalı olarak, KNT'ler doğada en güçlü nanomalzemeler olarak kabul edilir [84]. KNT'ler, bireysel karbon atomları arasındaki kovalent sp² bağları sayesinde, çekme mukavemeti ve elastik modül açısından keŐfedilen en güçlü ve en sert malzemelerdir [82]. KNT'lerin elastik özellikleri çeşitli yöntemlerle ölçülmüştür. Hem deneysel ölçümler hem de teorik hesaplamalar, KNT'lerin aksenal Young modülünün tipik olarak 1 ila 1.8 TPa arasında olduğunu, SWCNT demetlerinin kopma mukavemetinin ise 50 GPa'ya kadar çıktığını bunun elik tellerin yoğunluk-normalize edilmiş mukavemetinin yaklağık 50 katına karşılık geldiğini ortaya koymaktadır [84]. Birim Şekil değişimi yüzde beş ile yüzde yirmi aralığında olması ve yoğunluk değerlerinin az olmasından dolayı kompozit malzemelerde katkı maddesi olarak gelecek vaat eden bir yapı olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca karbon nanotüpler benzersiz ve iç yapıya duyarlı elektriksel özelliklere sahiptir [60].



Şekil 2.6. a) Tek katlı karbon nanotüp, b) Çok katlı karbon nanotüp [85].

Kimyasal bileşim açısından bakıldığında, KNT'ler saf C–C atomik bağlanma konfigürasyonuna sahip en basit malzemelerdir. Son yirmi yılda, KNT'ler, istisnai mekanik, kimyasal, elektriksel ve termal özellikleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle büyük ilgi çekmiş olup, geniş bir potansiyel uygulama yelpazesi için umut verici olarak görülmektedir. Örneğin, SWCNT'ler, elektroniklerin minyatürleştirme olarak tanıyan, kiraliteleriyle yakından ilişkili büyük elektriksel iletkenlik sergilemişlerdir. Kimyasal bileşim açısından bakıldığında, KNT'ler saf C–C atomik bağlanma konfigürasyonuna sahip en basit malzemelerdir. [83].

Elektronik açıdan bakıldığında, SWCNT'lerin yarı iletken (2/3) veya metalik (1/3) olabilme özelliği çok önemlidir, ancak MWCNT'ler yalnızca metalik olabilir. Tek katlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) için çapları genellikle 2 nm'den daha küçük olabilir. SWCNT'ler, takma adı kiralite vektörü olarak bilinen yapıları ile ilişkili olarak iletken ve yarı yalıtkan davranabilirler. Kiralite vektörü, karbon nanotüplerinin yapıldığı tek bir grafen tabakasının nasıl sarıldığını tanımlar. Bu, bir kâğıt sayfasını farklı şekillerde sararak yapılan silindirlerle benzerlik gösterir. Katmanın nasıl sarıldığına bağlı olarak, farklı elektronik özelliklere sahip KNT'ler elde edebiliriz. Adım adım ilerlersek, ilk olarak tek bir grafen tabakasını ele almamız gerekiyor. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi katmanın yüzeyinde, zigzag sağ ve armchair sağ olarak adlandırdığımız iki ana yönü tanımlayabiliriz [57].



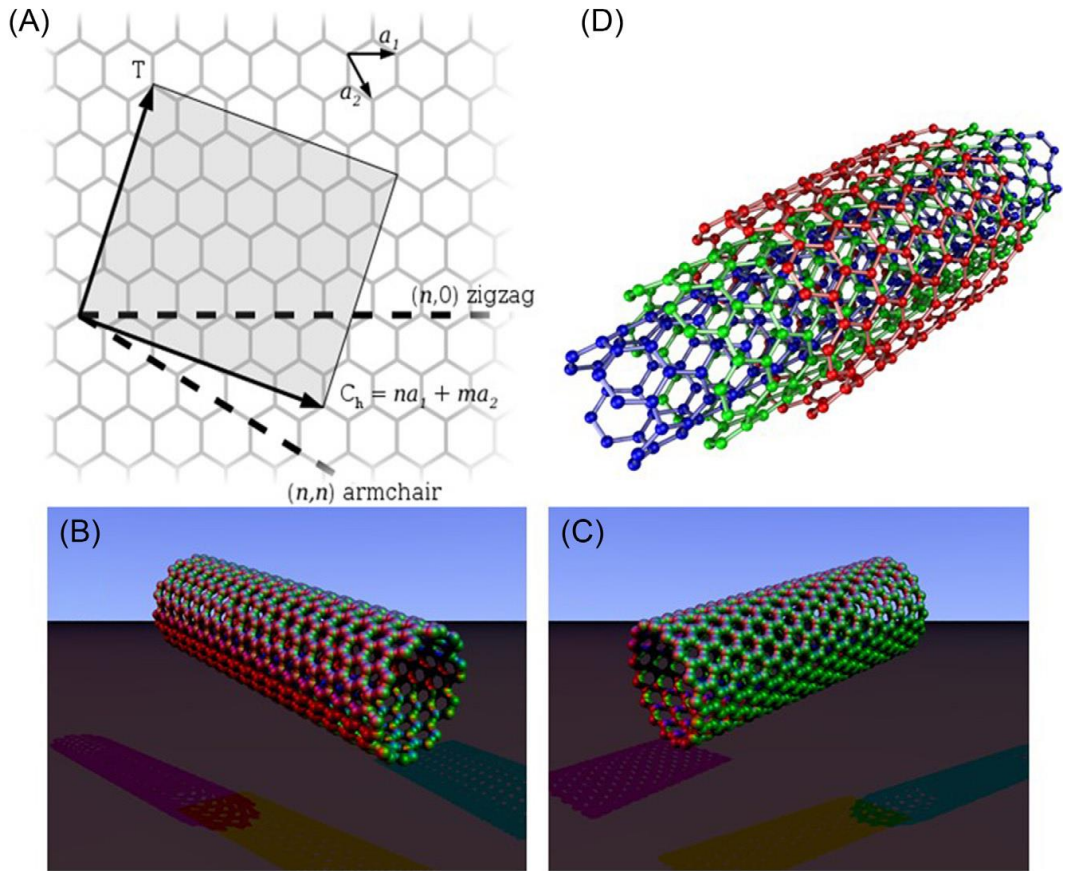
Şekil 2.7. zigzag ve armchair grafen tabakası. Diğer eksenler vektörler a_1 ve a_2 tarafından belirlenmektedir [57].

Bu iki yönlü, tabakanın hangi eksenini etrafında sarıldığını tanımlar. Armchair tipi SWCNT'lerin tamamı metalik iken, zigzag tipleri metalik veya yarı iletken olabilir. Aslında, genel bir yönlendirme, a_1 ve a_2 olarak adlandırılan iki vektör tarafından belirlenir. Bu iki vektör, denkleme 2.1'de C_h olarak adlandırılan kiralite vektörünü elde etmemizi sağlar.

$$C_h = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2 \quad (2.1)$$

Burada n ve m tamsayılar olup, $0 \leq |m| \leq n$ koşulunu sağlar. Kiral açı θ , C_h ve \mathbf{a}_1 vektörleri arasındaki açı olarak tanımlanır ve altıgen simetrisi nedeniyle $0 \leq \theta \leq 30$ derecedir. Genel olarak, kiralite vektörü grafen tabakasının hangi yönde sarıldığını belirlememizi sağlar. n ve m değerlerine bağlı olarak, Saito'nun 1992'de belirlediği yasa sayesinde KNT'lerin yarı iletken veya metalik olup olmayacağını bilebiliriz. Bu yasa, biçimsel olarak oldukça basittir ve $n - m = 3p$ (burada p bir tamsayı) olduğunda KNT'lerin metalik olduğunu belirtir. Diğer tüm durumlarda yarı iletken CNT ele alınmaktadır. Aşağıdaki resim, farklı KNT'ler için kiralite 'nin bir örneğini (zigzag ve armchair yönleri arasında) göstermektedir (Şekil 2.9 ve 2.10) [57]. Şekil 2.8a, sonsuz bir grafen tabakasını göstermektedir. Dikişsiz bir tüp oluşturmak için belirli geometrik koşulların karşılanması gerekir. Nanotüpler, grafenin birim vektörleri olan a_1 ve a_2 'ye

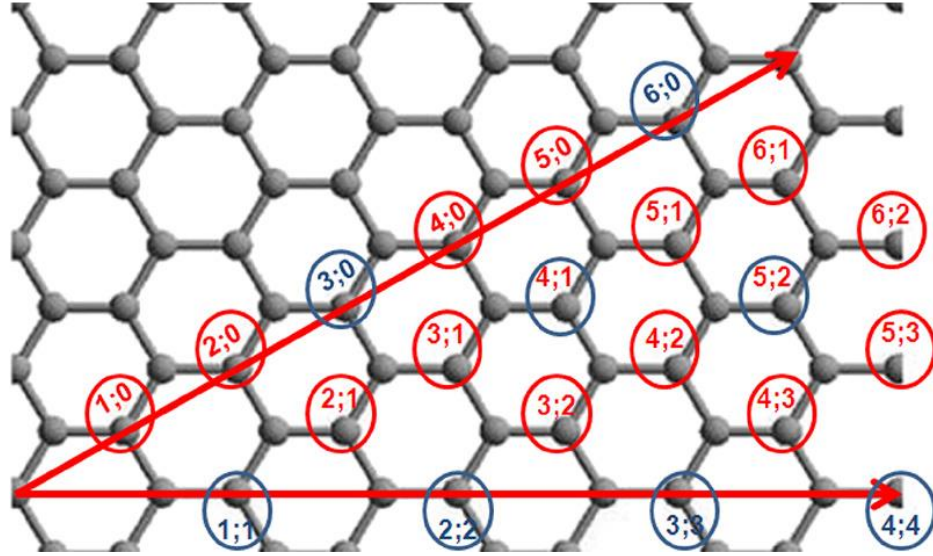
göre kiralite vektörle belirlenen kiraliteyi (n, m) ile adlandırılır. Grafendeki C-C bağının uzunluğu 0.142 nm olduğundan, birim vektörlerin uzunluğu 0.246 nm olacaktır. Tek duvarlı karbon nanotüpün yapısı (Şekil 2.8 b ve c) tamamen kiralite ile belirlenir. Armchair tüpler için $n=m$; zigzag tüpler için $m=0$ 'dır n ve m değerlerine göre yapının iletken, yarı iletken ya da yalıtkan olup olmadığını matematiksel olarak belirli kat değerleri aralarındaki eşitsizlik ve sıfıra eşit olmama durumları gibi ifadelerle belirlenmiştir [82].



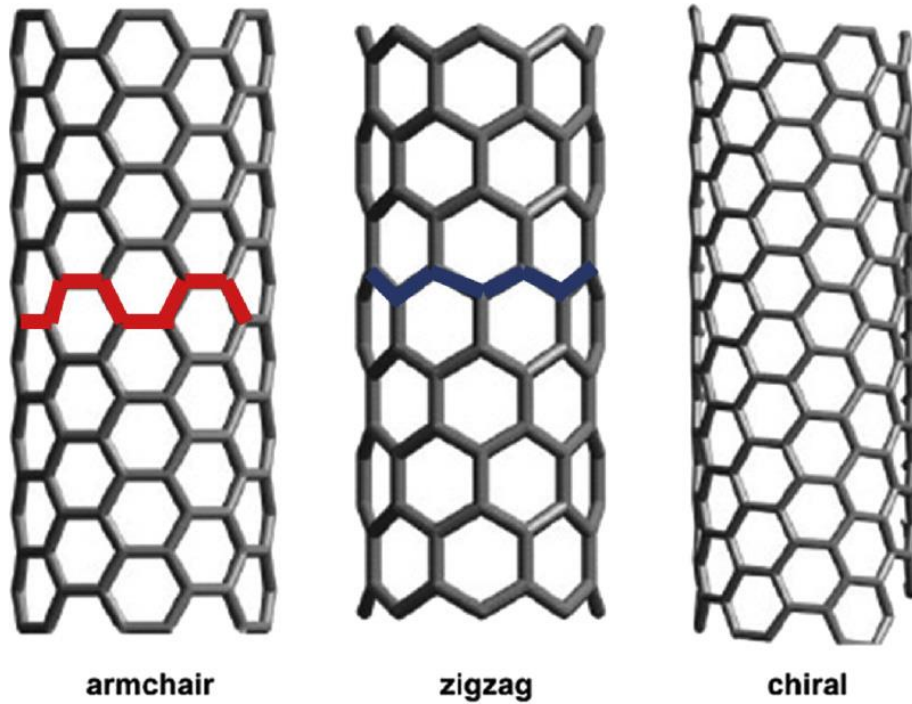
Şekil 2.8. Karbon nanotüp yapıları. (a) Bir grafen tabakası yuvarlanarak bir nanotüp oluşturulur. T, tüp eksenini, a_1 ve a_2 ise gerçek uzaydaki grafenin birim vektörlerini gösterir. (b) Armchair (n, n) . (c) Zigzag $(n, 0)$. (d) Üç duvarlı armchair karbon nanotüp [82].

KNT'ler, tek katmanlı, çift katmanlı ve çok katmanlı nano rulolar olarak kategorize edilir. Çok katmanlı karbon nano rulolar grafenin birden fazla sarılmış tabakasından (Şekil 2.8d'deki eş merkezli tüpler) oluşur. Çok katmanlı karbon nano tüplerdeki

tabakalar arası uzaklık, grafit allotropundaki grafen plakaları arası uzaklığa yakındır ve bu değer yaklaşık 3.4 Å (0.34 nm)'tur.



Şekil 2.9. Kiralite vektörü, iki ana yön olan zigzag ve armchair arasında tanımlanmıştır. Yarı iletken karbon nanotüpler (kırmızı renkte (baskı versiyonlarında açık gri)) ve metalik olanlar (mavi renkte (baskı versiyonlarında koyu gri)) [57].

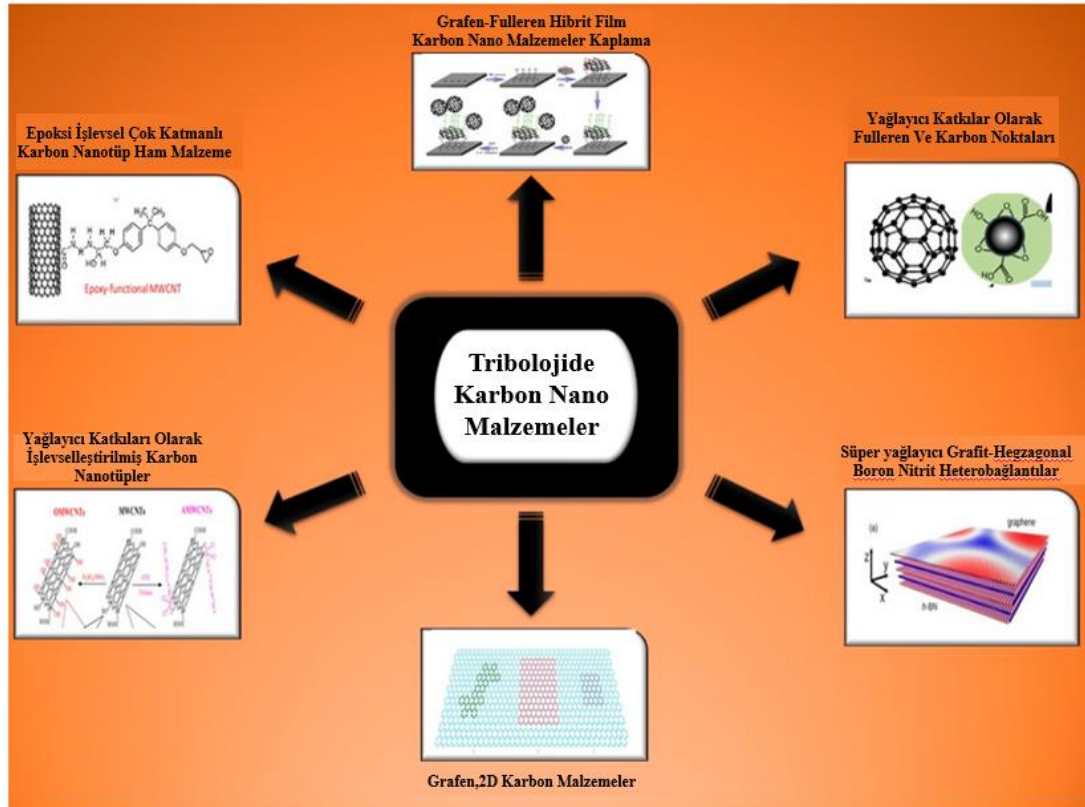


Şekil 2.10. Karbon nanotüpler için farklı kiralite [57].

2.4. KARBON ALLATROPLARININ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Her zaman istenmeyen bir durum olmasa da, örneğin işleme, imalat veya taşlama gibi durumlarda sürtünmenin, küresel enerji tüketiminin %20'sine neden olduğu düşünülmektedir [86]. Sürtünmenin belirli olumsuz etkileri şunları içermektedir: (i) sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan cismin hareketinin engellenmesi, (ii) sürtünmenin üstesinden gelmek için gereken işten kaynaklanan enerji kaybı, (iii) malzeme kaybı ve (iv) ısı üretimi sonucu sıcaklık artışıdır. Sürtünmenin etkisini önlemenin veya azaltmanın en iyi yollarından biri, sürtünme ve aşınma yağlamayı enerji verimliliği fazla yağlayıcıların kullanımıyla kontrol etmektir. Bu yöntemler, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırır ve CO₂ emisyonlarını azaltır. Sürtünme önemli miktarda enerji israfına neden olduğundan, yağlayıcılar M.Ö. 1400'den beri kullanılmaktadır [87]. Leonardo da Vinci (1452–1519), sürtünme ve yağlamanın temel kavramlarını ve yağlamanın iki kayma yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini açıklayan ilk kişiydi [88]. Yağlayıcılar, iki kayma yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltmak için uygulanan maddelerdir. Sürtünmeyi azaltma yeteneğine yağlayıcılık veya kayganlık denir ve bu işlemi gerçekleştirme eylemine yağlama denir [89]. Birçok yağlayıcı yağlar ve greslerden yapılırken, bazı durumlarda hem sıvılar hem de katılar yağlama için kullanılır. Fiziksel durumlarına bağlı olarak, yağlayıcılar katı, yarı katı, sıvı veya gaz halinde olabilir ve sürtünmeyi azaltmadaki performansları farklılık gösterir [90]. Modern teknolojilerin ilerlemesiyle birlikte, uygun yağlamanın önemi önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum, küresel enerji ve malzeme tasarrufunu doğrudan etkileyerek mekanik performans ve verimliliğin sürdürülebilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle, yağlama konusundaki bilgimizi genişletmek ve bu alandaki eksiklikleri gidermek hayati önem taşımaktadır. Dünya çapındaki araştırmacıların sürtünme ve aşınmayı azaltmada yağlayıcıların performansını artırma konusundaki sürekli çabalarını vurgulamaktadır. Nanomalzeme bazlı sürtünme önleyici ve aşınma önleyici katkı maddeleri, düşük viskoziteli yağlar ve buhar fazı yağlaması gibi çeşitli yöntemlerin, yağlayıcıların tribolojik performansını daha da artırdığı bildirilmiştir [91,92]. Farklı metalik ve metal olmayan katkı maddeleri, polimerler, nanopartiküller ve karbon nanomalzemeleri dahil olmak üzere çeşitli katkı maddeleri, yüksek verimli yağlayıcılara olan artan ihtiyacı karşılamak için kullanılmaktadır. Kullanılan katkı maddelerinin türüne ve yapısına

bağlı olarak farklı türlerde kayganlık artırılabilir. Karbon nanomalzemeler olağanüstü mekanik, elektriksel, termal, optik ve kimyasal özelliklere sahiptir, bu da onları tribolojik uygulamalar için ideal hale getirir. Bu materyaller sürdürülebilir mekanik performans ve verimlilik gösterirler [93]. Grafit uzun yıllardır endüstride katı bir yağlayıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bu nedenle karbon nanomalzemeler sürtünme, aşınma ve yağlama üzerine yapılan güncel araştırmaların önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Karbondan güçlü kovalent bağlar oluşturabilme özelliği nedeniyle farklı hibridizasyon durumlarında birçok karbon bazlı bileşik ve yapı bulunmaktadır. Nanoteknolojinin gelişimi ile karbon nanomalzemeleri tribolojik uygulamalarda giderek seçkin bir konuma getirmiştir. En yaygın olarak kullanılan karbon nanomalzemelerinin yağlama açısından performansı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Triboloji alanında kullanılan farklı karbon nanomalzemeleri [93].

Karbon malzemelerin keşfinden önce, yağlayıcı için kullanılan en iyi bilinen yapılar grafit ve elması. Grafit için makroskobik ölçekte sürtünme katsayısı 0.1 olarak

bulunurken, elmas temasında herhangi bir yağlama olmaksızın sürtünme katsayısı 0.05 olarak belirlenmiştir 1985 yılında Kroto, Smalley ve Curl tarafından fullerenler 1991 yılında Iijima tarafından karbon nanotüpler ve 1992 yılında Ugarte tarafından karbon soğanları keşfedildiğinden beri, dünya çapındaki araştırmacılar karbon nanomalzeme tabanlı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini araştırmaya yönelik çaba sarf etmektedir. Tribolojik uygulamalar için incelenen karbon nanomalzemeler sıfır boyutlu (0D), bir boyutlu (1D) ve iki boyutlu (2D) olarak kategorize edilebilir. Fullerenler, karbon nano-soğanlar (CNO'lar), nano elmaslar (ND'ler), karbon kuantum noktaları (CQD'ler) ve grafen kuantum noktaları (GQD'ler) hepsi nanometrik ölçekte boyutları olan sıfır boyutlu (0D) malzemelerdir.

Bu materyallerin bir boyutu nanometre ölçeğindedir. İki boyutlu (2D) karbon nanomalzemeleri, grafen, grafen nano bantları ve az katmanlı grafen gibi levha benzeri yapılarla karakterizedirler ve nanometre ölçeğinde kalınlığa sahiptirler [93]. Grafen ve karbon nanotüpler (KNT'ler), süper lubrikasyon (iki yüzey arasında neredeyse sıfır sürtünme noktasına ulaşan ultra düşük sürtünme durumu) rejimlerini elde etmek için mükemmel nanomalzemeler olarak gösterilmiştir [94,95].

2.4.1. Karbon Nanomalzemelerin Yağlayıcılık Mekanizması

Yağlamanın etkinliği, bir malzemenin tribolojik özellikleri ve çalışma koşullarına bağlıdır. Yağlama mekanizmaları genellikle şu şekilde sınıflandırılabilir: (i) sıvı film, kalın film veya hidrodinamik yağlama, (ii) ince film veya sınır yağlama veya (iii) yüksek basınç yağlaması. Karbon bazlı nanomalzeme yağlayıcıları, sınır, karma veya hidrodinamik yağlama bağlamında işlev görmektedirler. Kalın film yağlamada, tribo-yüzeyler düşük yük ve yüksek hızda olduğu durumda yağlayıcı tarafından kalın ve sürekli bir film ile ayrılır. Yüzeylerin temas etmediği durumlarda, sürtünmeyi azaltmada viskozitenin önemli bir rolü vardır. Hidrokarbon yağları sıvı film yağlamada yaygın olarak kullanılır. İnce film yağlamada, tribo-yüzeyler tamamen ayrılmaz ve yüksek yük altında düşük hızda çalışır. Burada yüzeyler temas halindedir ve yağlayıcının performansı, yüzeye yapışma yeteneği ve sürekli bir film oluşturma kabiliyetine bağlıdır. Bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, grafit, MoS₂ ve grafen gibi maddeler sınır yağlamada kullanılır [93].

2.4.2. Katı Bir Yağlayıcı Olarak Karbon Nano Malzemeler

Katı yağlayıcılar düşük sürtünme davranışı sergiler ve sıvı alternatiflerin yüksek sıcaklıklar, vakum koşulları veya yoğun mekanik yükler nedeniyle başarısız olduğu durumlarda kullanılır [96]. Grafit, hekzagonal bor nitür, molibden disülfür ve borik asit gibi katı yağlayıcılar, sanayide çeşitli hareketli mekanik montajlarda sürtünme ve aşınma ile mücadele etmek için geleneksel olarak kullanılır [97]. Günümüzde karbon nanomalzemelerin tribolojisi önemli ölçüde gelişmiş durumdadır, bu da onları çok yönlü yapıları ve mekanik, elektriksel, kimyasal ve termal özellikleri nedeniyle umut verici bir yağlayıcı haline getirmektedir. Karbon nanomalzemeler triboloji de katı yağlayıcılar, katkı maddeleri ve süper yağlayıcılar olarak kullanılmaktadır. Katı yağlayıcılar, sıvı ve yarı-sıvı yağlayıcıların tatmin edici sonuçlar veremediği yerlerde kullanılır. Katı yağlayıcının yüksek sıcaklık ve basınç altında önemli özellikleri vardır. Katı karbon nanomalzemeleri, örneğin grafit ve grafen gibi ve bunların bir yüzeye kaplanması, çeşitli yüzey özelliklerini artırır. Klemenç ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışma, grafen kaplamalarının yük taşıma kapasitesini artırdığını, yüzeyi aşınmadan koruduğunu, temas sertliğini ve elastik kapasiteyi artırdığını ortaya koymuştur [96]. Grafen kaplamalarının alüminyum üzerinde yük taşıma alanını artırabileceği ve deformasyon davranışını değiştirebileceği gösterilmiştir. Bu durum, daha yüksek sistem sıcaklıklarında bile girinti derinliği ve ilişkili yük üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [98].

2.4.2.1. Grafitin Yağlayıcı Özellikleri

Grafit, tipik bir 3 boyutlu karbon malzemesi olarak triboloji alanında bir yağlayıcı olarak geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Grafit, her biri atomların altıgen düzeninde olduğu karbon atomu tabakalarından oluşan bir yığın içerir ve atmosferik koşullarda yağlama için en uygun olanıdır. Grafit, kuru havaya kıyasla nemli havada daha iyi yağlama özellikleri sergiler [99]. Su buharı, grafitin yağlanması önemli bir rol oynar, çünkü adsorbe edilmiş su, grafitin altıgen düzlemleri arasındaki bağlanma enerjisini düşürür. Sürtünme, su moleküllerinin grafit katmanları arasındaki alana girmesiyle azalır. Berman vd. grafitin tribolojik özelliklerini grafen üzerine önceki çalışmalarıyla karşılaştırdı. Tribolojik testlerin sonuçları, grafit tozunun yağlayıcı

olarak kullanıldığında nemli havada düşük sürtünmeyi ancak kuru azot ortamında yüksek sürtünmeyi ve aşınmayı gösterdiğini ortaya koydu [100]. Grafit, yağlayıcılık sağlamak için katmanlı bir katı olarak işlev görür [101]. Bu, üst üste yerleştirilmiş bir dizi kartı andırır ve bu kartlar gevşek bir şekilde bağlı grafit katmanları gibi davranır. İki kayma yüzeyi birbirine temas ettiğinde, grafit gevşek bir şekilde düzenlenmiş katmanlar serisini yuvarlayarak yağlayıcılık sağlar ve bu şekilde rulmanlar gibi davranır [102]. Bu rulman mekanizması nedeniyle, temas yüzeyleri nispeten daha düşük bir sürtünme katsayısıyla kayar. Rulman mekanizmasının alternatif sürtünme katsayısı, kayma bölgesi sıcaklığı ve kayma ortamından (örneğin, vakum veya kuru hava, su buharı vb.) etkilenir [103]. Bulk grafit, grafit katmanları arasına su moleküllerinin girmesiyle nemli koşullarda sürtünmeyi etkili bir şekilde azaltabilir [101]. Grafit tabanlı yağlayıcılar konusunda, grafitin konsantrasyonu ve grafit partiküllerinin boyutu sürtünme katsayısını büyük ölçüde etkiler [104]. “Su ve diğer çalışma arkadaşları”, grafit nanopartiküllerinin hacim oranı arttıkça ve boyutları azaldıkça, bu nanopartiküllerin bitkisel bazlı yağa katkı maddesi olarak eklenmesiyle sürtünme katsayısının azaldığını ifade etmişlerdir. [104]. Bu durumdaki temel yağlama mekanizması, grafit nanopartiküllerinin küçük boyutları ve yüksek yüzey enerjileri nedeniyle temas yüzeyleri arasında fiziksel bir çökelti filmi oluşturmasıyla ilgilidir. Yine, temas yüzeyleri ideal olarak pürüzsüz değildir ve birçok konveks ve konkav bölgeden oluşabilir. Kayma sırasında önce konveks bölgeler temas eder ve sürtünme katsayısının artmasına neden olur. Ancak grafit nanopartikülleri yağa katkı olarak eklendiğinde, bu sürtünmeyi iki şekilde azaltır. İlk olarak, temas yüzeyleri arasındaki konkav bölgeye nüfuz ederek hasarı onarabilirler. Ve ikinci olarak, grafit nanopartiküller sürtünme yüzeyine yerleştirilerek temas bölgeleri açısından ince bir ayırım oluşturabilirler [105]. Grafitin kuru süper-yağlayıcılığı, atomik seviyede uygun bir paylaşım düzlemi (pürüzsüz temas arayüzleri) oluşturulmasıyla ortaya çıkan zayıf van der Waals kuvvetlerinden dolayıdır [106,107].

2.4.2.2. Grafenin Yağlayıcı Özellikleri

Grafen, olağanüstü sürtünme ve aşınma özelliklerine sahip olan 2 boyutlu bir karbon nanomalzemedir. Grafeni özel kılan şey, sp^2 hibritleşmesi ve çok ince atomik kalınlığıdır (0.345 nm). Grafen, olağanüstü mekanik, termal ve elektriksel özelliklere

sahiptir [108]. Grafenin başlıca avantajları, yüksek kimyasal saflığı düşük yüzey enerjisi, olağanüstü dayanıklılığı ve yoğun ve atomik düzeyde pürüzsüz yüzeyinde kolay kayma yeteneğidir, bununla birlikte üstün tribolojik davranış göstermesidir [109]. Grafenin önemli avantajlarından biri, tribolojik özelliklerinin çevreden bağımsız olmasıdır. Hem nemli hem de kuru koşullarda tribo yüzeylerin aşınmasını etkili bir şekilde azaltabilir ve sürtünmeyi önemli ölçüde düşürebilir. Ancak, bu özel nitelik grafitte bulunmaz. Nemli koşullarda, grafen ve grafitin sürtünme katsayısı 0.15–0.17 aralığındadır [100]. Ancak, grafen, tribo yüzeylerin aşınmasını grafitte kıyasla büyük ölçüde azaltabilir. Bu, ince bir filmin daha iyi yüzey kaplaması oluşturmasına ve tribo yüzeylerin temas arayüzündeki ince filmin kolay kaymasına bağlanır. Grafen, ultra ince yapısı sayesinde, osilasyon, dönme ve kayma temaslarına sahip mikro ve nano elektromekanik sistemler gibi nano ölçek veya mikro ölçek sistemlerde, hatta çok katmanlı olarak, sürtünme ve aşınmayı azaltmak için kullanılabilir. Jibin ve arkadaşları, silikon (Si) yüzeyinde oluşturulan bir grafen-fulleren C60 hibrit filminin iyi bir sürtünme azaltma, yük taşıma kapasitesi ve aşınma önleyici yeteneğe sahip olduğunu göstermişlerdir [110].

2.4.2.3. Grafen Bazlı Kaplamalar

Grafen, en ince ve en güçlü nanomalzemelerden biri olup, iki boyutlu bal peteği kafesinde sıkı bir şekilde paketlenmiş karbon atomlarının düz bir tek katmanından oluşur. "Mono katmanlar, birkaç katmanlı yapılar, çok katmanlar ve azaltılmış grafen oksit ile desteklenen kaplamaların sürtünme ve aşınma azaltımı, grafenin yağlayıcı kaplamalarda doğal avantajını vurgulamaktadır [111]. Grafen yüzeyinin sp^3 fonksiyonelleştirmesi, nanometre ölçeğinde grafenin sürtünmesi üzerinde de etkili olabilir. Bu durum, daha geniş bant aralıklarının oluşturulma olasılığı ve daha az van der Waals etkileşimleri ile yapışma kuvvetlerinin ve serbest elektron sayısının azalmasıyla ilgilidir [112,113]. Grafenin kaplama malzemesi olarak olağanüstü koruyucu kararlılığı ve aşınma direncinin, tek katman seviyesinden kaynaklandığı gösterilmiştir [97]. Dolayısıyla, en güçlü malzemelerden biri olmasının yanı sıra grafenin aynı zamanda şimdiye kadar bilinen en aşınma dirençli malzeme olduğunu ifade etmişlerdir [114,115]. Jiang ve arkadaşlarının yaptığı bir diğer deney de MoWS₄ ve grafen bazlı heterojen kompozit kullanılarak çelik arayüzünde elde edilen süper

yağlayıcılığını göstermişlerdir. Sürtünme katsayısının 0.008 kadar indiğini ve aşınma oranının ise 1.6×10^{-6} ile 1.1×10^{-6} mm arasında olduğunu açıklamışlardır [116].

2.4.2.4. Elmas benzeri karbon (DLC) tabanlı kaplamalar

Elmas benzeri karbon (DLC), karbon bileşiklerinin önemli bir 3D allotropudur ve karbon atomları arasında sp^3 bağlanma ile karakterizedir. DLC, geniş bant aralığı, olağanüstü sertlik ve mükemmel kimyasal stabilitesi nedeniyle ilgi görmektedir. Yüksek sertliğinin yanı sıra, mükemmel yağlayıcı performansı, oldukça düşük sürtünme ve kimyasal olarak asal olması, elmas benzeri karbon kaplamalar metal teması ve motor sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [117]. DLC, yüksek sertlik, amorf karbon atomlarının metastabil bir formu, önemli bir oranla sp^3 ve sp^2 bağları demir dışı malzemelere karşı yüksek kimyasal stabilite, düşük sürtünme katsayısı değeri ve iyi bir korozyon dayanımı, yüksek termal iletkenlik, düşük termal genişleme katsayısı ve iyi aşınma direncine sahiptir. DLC ince filmlerinin yüksek termal iletkenlik, düzgün kaplama, düşük sürtünme ve yüksek sertlik özelliklerine sahip olmaları, aşınmaya dayanıklı uygulamaların araştırılması için uygun olmalarını sağlamaktadır [118]. Donnet vd. yaptığı bir deneyde, %42 hidrojen içeriğine sahip ultra yüksek bir vakum ortamında DLC filminin sürtünme katsayısının 0.02 kadar düştüğünü göstermişlerdir [119].

2.4.3. Yağlayıcılarda Katkı Maddesi Olarak Karbon Nanomalzemeler

Yağlayıcı katkı maddeleri, yeni özellikler geliştirmede veya yağlayıcıların dezavantajlarını telafi etmede kritik bir rol oynar. Tipik bir yağlayıcının performansı, baz yağın ve katkı maddesinin viskozitesine bağlıdır. Katkı maddesi olmadan hem sınır hem de hidrodinamik yağlama tribo-yüzeyleri olumsuz etkileyebilir [123]. Karbon nanomalzeme katkı maddeleri, sürtünmeyi azaltan ve aşınma direnci sağlayan yüksek performanslı yağlayıcıların geliştirilmesinde çok umut vericidir. Ayrıca, geleneksel organik yağlayıcı katkı maddelerine kıyasla kimyasal olarak stabil ve çevre dostudurlar. Grafen, karbon nanotüpler, fullerenler, karbon nano-elmaslar ve diğer karbon nano yapıları gibi nanomalzemeler, daha büyük yüzey alanlarına sahiptir. Bu

özellikleri sayesinde tribolojik yüzeyler üzerinde daha geniş alanları kaplayabilirler ve bu da sürtünmeyi azaltır [93].

2.4.3.1. Yağlayıcı Katkısı Olarak Grafen

Grafen, kimyasal stabilitesi, dayanıklılığı ve kolay kayma yeteneği sayesinde olağanüstü sürtünme özelliklerine sahip 2 boyutlu bir nanomalzemedir. Ultra ince yapısı, mikro ve nano elektromekanik yapılar için uygundur. Berman ve arkadaşları, seramik/çelik sürtünme bileşenleri için grafen nano plakalarını yağ katkı maddesi olarak kullandılar ve grafenin seramik/çelik çiftleri arasındaki sürtünme arayüzünde koruyucu bir film oluşturduğunu keşfettiler. Bu sayede mekanik teması önlendiğini ve sürtünmeyi azalttığını belirttiler [71]. Zin vd. grafen tabanlı nano-katkı maddelerini yağlayıcılara dahil ederek tribolojik ve termal özelliklerini geliştirdiler ve grafen tabanlı yağlayıcıların umut verici tribolojik özelliklerini keşfettiler [120]. ZHao vd. (2016), yağlayıcı yağda katkı maddesi olarak kullanılan çok katmanlı grafenin sürtünmeyi biraz azaltabildiğini, ancak yaygın topaklanmalar ve kristal kusurları nedeniyle nispeten kararsız tribolojik özellikler sergilediğini bildirmiştir [121]. Spear vd. (2015), iki boyutlu grafen tabakalarını, grafen oksit (GO) ve metalik nano katkı maddelerini (Y_2O_3 , WS_2 , αZrP , IF-MoS₂) araştırmış ve bunların aşınmayı yaklaşık %95 ve sürtünmeyi yaklaşık %12 azaltıcı etkilerini bildirmiştir [122]. Shahnazar vd. (2016), pin-on-disk tribometre testlerini kullanarak, baz yağda katkı maddesi olarak kullanılan %0.06–5 oranında grafenin sürtünme katsayısını yaklaşık %80 oranında azalttığını göstermiştir [123]. Çizelge 2.2’de grafen tabanlı nanomalzemelerin kullanımıyla ilgili son ilerlemelerin bir kısmını özetlemektedir.

Çizelge 2.2 Yağlayıcılarda katkı maddesi olarak karbon nanomalzemeler [93].

Yağlayıcı	Katkı Maddesi	Deneysel Metot, Koşullar ve Uygulama	Tribolojik Özellikler	
			Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma
Poli-alfa-olefin 6 yağı (PAO-6)	Modifiye grafen (0.5 wt%)/dispersan (1 wt%)	Çift yönlü tribotester (UMT-5, Brucker) ile bilye-disk çelik modunda. Yük 2 N, kayma hızı 5 mm/s. PAO6 yağında modifiye grafen/dispersan.	$\mu=0.10$	Aşınma izi derinliği 21 nm
Saf su	Grafen oksit (1 wt%)	Pimli-disk tribometre ile elmas benzeri karbon ve paslanmaz çelik teması. Yük 10 N. Saf suda grafen oksit.	$\mu=0.10$	-
Grafen ile güçlendirilmiş yağlayıcı	Grafen dispersiyonu (110 $\mu\text{g/mL}$)	Çift yönlü tribotester (UMT-3) ile bilye-levha çelik modunda. Yük 2 N. Grafen ile güçlendirilmiş yağlayıcı.	$\mu=0.105$	Aşınma hacmi $0.8 \times 10^{-5} \text{mm}^3$
Saf su	Grafen oksit (0.1 wt%) ve nano elmas (0.5 wt%) konsantrasyonu	Tribotester bilye-levha tribo çiftleri olarak Si3N4 bilyeler ve Si plakaları kullanılmıştır. Yük 5 mN. Suda grafen oksit ve nano elmas.	$\mu = 0.03$	Aşınma izi derinliği 5 nm
Deiyonize su	Karbon noktaları (0.1 wt%) konsantrasyonu	Çift yönlü tribotester (UMT-3) ile bilye-disk. Yük 15 N, 5 Hz, 25°C. Amorf karbon (a-C) kaplamaları için su bazlı yağlayıcılarda karbon noktaları.	$\mu = 0.03$	Aşınma hacmi $0.9 \times 10^{-5} \text{mm}^3$
SAE 10W-30 yağlayıcı yağ	Sıvı fazda soyulmuş grafen (0.05 wt%) konsantrasyonu	Pimli-disk tribometre testi. Basınç 10 MPa, hız 0.3 m/s. SAE 10W-30 yağlayıcı yağında sıvı fazda soyulmuş grafen.	$\mu = 0.033$	Aşınma oranı $2.91 \times 10^{-7} \text{mm}^3 / \text{Nm}$
10W40 motor yağı (Çinko oksit)	ZnO/MWCNTs (çok katmanlı karbon nanotüpler) hibrit nanomalzeme (0.25 wt%), 3:2 karışım oranı	Bronz alaşım-çelik teması kullanılarak doğrusal çift yönlü bilye-disk tribotester. Yük 35 N. Motor yağında çinko oksit/MWCNTs hibrit nanomalzemeler.	$\mu = 0.044$	Aşınma hacmi 0.09mm^3
Mineral Yağ	Fulleren Nano Partikül (0.5 wt%) Konsantrasyon	Disk üzeri disk testi < Yük 200 N. Mineral Yağ da Fulleren nanopartikül	$\mu = 0.02$	Yüzey pürüzlülüğü 0.048 μm
PEG200 Yağı	Azaltılmış grafen oksit (0.2 mg/mL^{-1})	Bilye-disk nanotribometre. Yük 500 mN. PEG200 yağında azaltılmış grafen oksit (rGO).	$\mu = 0.06$	-

2.4.3.2. Yağlayıcı Katkısı Olarak Fulleren

Mükemmel küresel şekli, yüksek yük taşıma kapasitesi, güçlü molekül içi kuvvetler, zayıf moleküller arası kuvvetler ve düşük yüzey enerjisi sayesinde, umut verici bir karbon bazlı nanomalzeme olan fullerene C60, bir yağlayıcı katkı maddesi olarak yağlamada önemli bir etkiye sahiptir. Gupta vd., bir bilye-disk tribotester cihazında bir çelik disk üzerinde gerçekleştirdiği başka bir deney, ham mineral yağa kıyasla

sürtünme katsayısının yaklaşık %20 azaldığını ve aşınma izi genişliğinin 300–380 μm 'den 120–130 μm 'ye düştüğünü ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, mineral yağa yüksek oranda (ağırlıkça %5) C60 açısından zengin (%85 C60 ve %15 C70) nanopartiküller eklendiğinde elde edilmiştir [124]. Ayrıca, Lee ve arkadaşları mineral yağda fullerene nanopartikül katkı maddelerinin hacim konsantrasyonunu kontrol ederek sürtünme ve aşınmanın azaltılabileceğini göstermiştir [125]. Disk-üzerinde-disk tipi bir test cihazında 200 N yük altında yapılan deneylerde, %0.5 hacim konsantrasyonunda fullerene nanopartiküller kullanıldığında sürtünme katsayısı 0.02 olarak ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü 0.106 μm 'den 0.048 μm 'ye düşmüştür. Araştırma, fulleren nanopartiküllerin hacim oranının sürtünme katsayısının kontrolü ve aşınma miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Lee ve diğerleri tarafından yapılan bir deneyde, kompresörlerde yağlayıcı olarak %0.1 hacim oranında fullerene nanopartikülleri kullanıldığında, fulleren nanopartikülleri içeren yağın sürtünme katsayısının ham yağdan %90 daha düşük olduğunu ortaya koymuştur [126]. Hisakato vd., etanol içinde çözülmüş fullerene nanopartikülleri (%1 ağırlıkça) kullanarak seramik diskler üzerinde sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirdi. Aşınma yüzeylerinin mikro pürüzlülüklerinde topografik analiz yaparak fullerene partiküllerinin davranışını gözlemlediler. Al_2O_3 , SiC ve TiC'den yapılmış seramik disklerde fullerene partiküllerinin eklenmesinin ortalama sürtünme katsayısını ve aşınma hızlarını azalttığını buldular [127]. Ku vd., farklı viskoziteler için disk-üzerinde-disk test cihazı kullanarak fullerenin yüksek basınç ve aşınma önleyici özelliklerini değerlendirdiler. Fulleren nanopartiküllerinin varlığı, metal yüzeyler arasındaki temasları azaltarak sürtünmeyi azalttığını ve fullerenin daha düşük viskoziteli yağlara eklendiğinde daha etkili olduğu ifade ettiler [128]. Lee vd., soğutucu yağında katkı maddesi olarak kullanılan C60 fullerenin, düşük yüklerde (< 1600 N) sürtünme katsayısını etkili bir şekilde azaltılabileceğini bildirmiştir [46]. Ginzburg vd., endüstriyel yağda katkı maddesi olarak kullanılan C60 fullerenin temas yüzeylerinde koruyucu bir aşınma önleyici katman oluşturabileceğini göstermiştir [129].

BÖLÜM 3

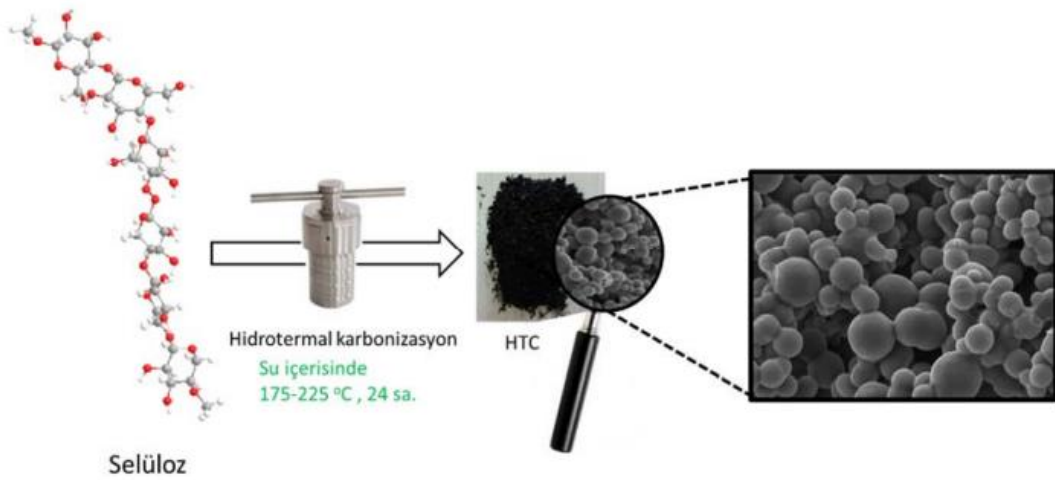
HİDRO-TERMAL KARBONİZASYON (HTC)

Biyokütlenin biyo-bazlı malzemeler için kullanımı, gelecekteki enerji taleplerini karşılama potansiyeli nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Geçmişte, araştırmacılar genellikle kömür, lignit, hurda lastikler ve kullanılmış yağ gibi fosil kaynaklardan karbonlu malzemeler oluşturmaya odaklanmışlardır. Çoğu karbonlu malzeme, fosil bazlı kaynaklardan elde edilmektedir. Biyokütle, fosil bazlı kaynakların yerine geçebilecek gelecek vaat eden yenilenebilir bir hammadde olarak kabul edilmektedir. Çevresel endişeler ve fosil kaynakların tükenmesi nedeniyle biyokütle kullanımına yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Bioçar, biyokütlenin termal işlemi sonucunda elde edilen karbon açısından zengin katı kalıntı ürünleridir ve çeşitli amaçlar için kullanılabilen önemli bir kaynaktır [130]. HTC prosesine ait işlem Friedrich Bergius tarafından araştırılmış ilk kez 1913 yılında selülozdan sentetik kömür üretmesiyle tanımlanmıştır. Kömürü yalnızca sıvı bir yakıt haline dönüştürmenin yanı sıra karbonhidratları kömür benzeri bir malzemeye dönüştürmenin yolunu da bulmuştur. Yirmi yıl sonra Berl ve Schmidt doğal kömürleşme sürecini simüle etmek için farklı biyokütle kaynaklarını kullanan bir çalışma yürüttüler. Glikoz, sükroz, nişasta, selüloz, ksilan, lignin ve furfural dahil olmak üzere çeşitli organik atık bileşenlerinin, HTC işlemi kullanılarak yüksek karbon ve enerji içeriğine sahip hidrokömüre dönüştürülebileceğini bulmuşlardır. Proses koşullarına bağlı olarak son ürün katı (hidroçar), sıvı (biyo-yağ) veya gaz (sentez gazı) olabilir [131,132].

Hidrotermal karbonizasyon, hidroçar olarak bilinen karbon açısından zengin katı yakıt ve yüksek katma değerli sıvı ürünler üretmek için en umut verici termokimyasal işlemlerden biridir. Biyokütlelerin hidrotermal dönüşümü, en etkili, basit ve ilgi çekici yöntemlerden biridir [133]. Diğer bir ifadeyle hidrotermal karbonizasyon (HTC); düşük sıcaklıkta organik bileşiklerin yapılandırılmış karbonlara dönüştürülmesine yönelik kimyasal bir işlemdir [134]. Bu süreçte, organik madde otojenik basınç altında

düşük sıcaklıklarda su içinde asılı kalan, kahverengi veya siyah renkte katı ürünlere dönüştürülür [135]. Bu yöntem, karbon açısından zengin biyokütlelerden doğrudan karbonhidrat kaynaklarının, su ortamında nispeten düşük reaksiyon sıcaklıklarında (<300°C) ve kendi kendine oluşan basınçlarda kullanılmasını içerir [136]. HTC'den elde edilen nihai ürünler katı hidroçar ve gazdır [133]. Yüksek nem içeriğine sahip biyokütlenin sıcak basınçlı su altında ön arıtımına yönelik termokimyasal bir işlem olan hidrotermal karbonizasyon kapalı bir reaktörde 180-280°C sıcaklık aralığında, basınç (2-6 MPa) altında, 5 ila 240 dakika süreyle gerçekleştirilir [137]. Karbonizasyon süreci, yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık karbonizasyonu olarak ikiye ayrılabilir. Net bir sınıflandırma olmasa da yüksek sıcaklık karbonizasyonu genellikle 300 ile 800 °C arasında gerçekleştirilir ve bu işlemle aktif karbon, karbon nanotüpler ve grafit gibi malzemeler üretilir. Öte yandan, düşük sıcaklık karbonizasyonu hidrotermal karbonizasyon yöntemiyle yapılır ve bu işlem sonucunda doğal kömüre benzeyen hidrotermal karbonlar elde edilir. Doğal kömürün oluşumu milyonlarca yıl sürerken, hidrotermal karbonizasyonla benzer yapılar birkaç saat içinde üretilebilir [138–140]. Karbonizasyon aşamasında karbon içeriği artırılır; az miktarda gaz halindeki ürünle oksijen ve mineral madde içeriği azalır. Reaksiyon sıcaklığı, basınç ve süre, hidrotermal karbonizasyon sürecini etkileyen önemli faktörlerdir; kullanılan biyokütle türü ise HTC ürünlerini etkiler [131]. Karbon malzemeler düşük sıcaklıklarda elde edildiği için yüzeydeki işlevsel gruplar korunur ve fonksiyonel karbonlu malzemeler üretilebilir. Yüzeydeki fonksiyonel gruplar, HTC'lerin nanoteknoloji ve malzeme biliminde uygulanabilirliğini artırır [141,142]. Ayrıca yanma, piroliz ve gazlaştırma ile karşılaştırıldığında, HTC düşük reaktif koşullar altında meydana gelmektedir ve piroliz prosesinin başlıca dezavantajı, yüksek sıcaklık gerektirmesidir. HTC süreci sırasında malzemeler, yüksek sıkıştırılmış su ortamında hidroliz, polimerizasyon (aromatizasyon), dehidrasyon, rekondensasyon ve dekarboksilasyon reaksiyonlarına uğrayarak yükseltilir [133,143]. Reaksiyon süresi hammaddeye bağlı olarak 1 ila 72 saat arasında değişebilir [144]. Reaksiyon, karbonhidratların dehidrasyonu yoluyla ilerler; reaktif ara ürünler bu sürece dahil olur ve nihai ürünler, hidrojen ve oksijen içeren karbon açısından zengin (%60-70) malzemelerdir. Bu reaksiyonlar yüksek katma değerli ürünlerin oluşumuna neden olur [136]. Su veya gaz fazında karbonizasyon sırasında daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında daha yüksek karbon içeriğine sahip karbon malzemelere dönüşürler.

Karboksil ve OH gruplarının çıkarılması, O/C oranını önemli ölçüde azaltarak nihai ürünü daha yoğun enerjili hale getirir. Bu süreçten elde edilen katı ürün genellikle başlangıçta kuru olan hammadde miktarının %35 ile %65'i arasında değişmektedir. Yüksek ısı değeri (YİD) ise, hammadde başlangıç enerji içeriğine bağlı olarak 13–30 MJ/kg arasında değişmektedir [145]. Bunlara karbonlu malzemeler veya HTC karbonu denir ve esas olarak kömüre benzer katı ürün üretmek için gerçekleştirilir ve bu katı ürünün enerji yoğunluğu çok daha yüksektir [144]. Tipik bir hidrotermal karbonizasyon işlemi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Selülozdan HTC üretiminin şematik gösterimi [146].

HTC süreci, çevre dostu bir şekilde yüksek kaliteli ürünler yaratmak için toksik olmayan kimyasallar ve etkili süreçler kullanarak yeşil kimya ilkeleriyle uyumludur [136]. Hidrotermal karbonizasyon, uygun maliyetli ve sürdürülebilir karbon malzemeler üretmenin yanı sıra, yüzey yapısının hem nano hem de makro düzeyde kontrol edilmesini sağlayarak önemli faydalar sunar. Ayrıca aktif karbon ve karbon nanotüpler gibi geleneksel karbonlarda görülmeyen, yüksek yüzey işlevselliğine yol açan polar oksijenatlarıdır [146,147]. Titirici ve ekibi hidrotermal karbonların çok sayıda avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunlar arasında, genellikle 130 ila 250 °C arasındaki düşük sıcaklıklarda çalışabilme özelliği bulunur ve bu da onları ön kurutmaya gerek kalmadan her türlü biyokütle için uygun bir hale getirmektedir. Ek olarak, küresel mikro boyutlu parçacıklar üretebilmesi ve bunların inorganik nano boyutlu parçacıklarla birleştirebileceğini ifade etmişlerdir [32]. Bu özellikler, çeşitli yenilikçi uygulamalar için umut vadedicidir (Örneğin, karbon dioksit tutma,

adsorbanlar, elektrotlar ve süper kapasitörler, enerji depolama, katalizör desteği ve hibrid malzemeler) [135]. Ek olarak, HTC prosesi yoluyla biyokütleden üretilen hidroçarlar, atık suyun arıtılmasında adsorbanların yanı sıra katı biyoyakıtlar ve karbon tutucu maddeler olarak da hizmet etme potansiyeline sahiptir [148].

BÖLÜM 4

TRIBOLOJİ

Triboloji, göreceli hareket halindeki yüzeylerin bilim ve mühendisliğidir. Ayrıca sürtünme, aşınma ve yağlama çalışması olarak da ifade edilmektedir. Sürtünme, harekete karşı direnci ifade eder. Aşınma, göreceli hareket nedeniyle katı malzemenin kaybıdır. Yağlama ise, genellikle bir sıvı olan düşük kayma mukavemetine sahip bir malzeme kullanarak sürtünme ve aşınmayı en aza indirir [149]. Yüzeylerin birbirine karşı kaymadığı veya yuvarlanmadığı mekanik sistemler nadirdir. Bu nedenle triboloji, geniş uygulama yelpazesine sahip önemli bir teknolojidir. Triboloji sürtünmeden daha geniş bir kapsamda olsa da sürtünme hala birçok mekanik sistemin işlevinde merkezi bir rol oynamaktadır. Bazı durumlarda düşük sürtünme arzu edilir ve hatta oldukça önemlidir. Kapı menteşeleri, insan kalça eklemleri veya köprü destekleri gibi çeşitli bağlantıların düzgün çalışması için düşük sürtünme kuvvetleri gereklidir. Makinelerdeki yatak ve dişlilerdeki sürtünmeyi yenmek için yapılan iş ısı olarak dağılır. Sürtünmeyi azaltmak genel verimliliği artırabilir. Fakat tüm durumlarda düşük sürtünme faydalı değildir. Sürtünme, frenler ve kavramalar için kinetik enerjiyi dağıtmak ve torku aktarmak açısından çok önemlidir. Benzer şekilde, yüksek sürtünme, araç lastikleri ve yol yüzeyinin yanı sıra insan ayağı ve yürürken zemin için de önemlidir. Yüzeyler birbirine karşı hareket ettiğinde aşınma meydana gelecek ve bu da yüzeylerden birinde veya her ikisinde giderek artan malzeme kaybına veya hasara yol açacaktır. Bazen aşınma fark edilemeyecek kadar hafiftir ancak aynı zamanda aşırı hızlı da olabilir. Çoğu durumda aşınma zararlı olabilir ve potansiyel olarak hareketli bileşenler arasında artan boşluklara, istenmeyen hareket özgürlüğüne ve hassasiyet kaybına neden olabilir. Çoğunlukla titreşime, artan mekanik yüklenmeye, daha hızlı aşınmaya ve bazen de yorulma arızasına yol açar. Küçük miktarlarda malzemenin bile aşınması, büyük ve karmaşık makinelerin tamamen arızalanmasına yol açabilir. Ne yazık ki, önemli mühendislik felaketlerinin doğrudan aşınma ve yıpranmaya atfedilebildiği durumlar olmuştur. Bazen yüksek aşınma

oranları faydalı olabilir. Örneğin taşlama ve cilalama, malzemeyi kasıtlı olarak kontrollü bir şekilde çıkarmak için aşınmayı kullanan yaygın üretim süreçleridir. Belirli makine türlerinde, başlangıçta az miktarda aşınma olması beklenir ve hatta "alıştırma" işlemi sırasında faydalı olduğu bile düşünülür. Sistemin yağlanması sürtünmeyi ve sıklıkla aşınmayı azaltmak için kritik bir yöntemdir. Bazı açılardan yağlama çalışmaları sürtünme ve aşınma ile yakından ilişkilidir. Bir sisteme hiçbir yapay yağlayıcı eklenmediğinde bile, çevredeki atmosferin bileşenleri, özellikle oksijen ve su buharı sıklıkla benzer bir rol oynar ve herhangi bir yüzey etkileşimi çalışmasında dikkate alınmalıdır [150]. "Triboloji" terimi, Yunanca "sürtmek" anlamına gelen "tribo" kelimesine dayanır ve sadece 1960'lardan beri kullanılmaktadır. Ancak, bu alan, inşaat ve ulaşım için ilk araçların kullanılmasından beri varlığını sürdürmektedir. Örneğin, antik Mısır'dan kalma görüntüler, büyük heykelleri yerden taşımak için yağlayıcıların kullanıldığını tasvir etmektedir. Bu ve diğer örnekler tribolojinin tarih boyunca kaydedilen önemini göstermektedir. Triboloji, birçok farklı endüstri ve yaşamın çeşitli yönlerindeki çeşitli uygulamalarla ilgilidir. Birincisi, her gün kullandığımız ürünlerin işlevinde ve etrafımızdaki dünyayla etkileşimlerimizde hayati bir rol oynar. Çeşitli sporlarda kullanılan ekipmanların çalışması tribolojiye dayanır. Örneğin, atletlerin ayakkabıların alt kısımları en uygun performans için tam olarak ve doğru miktarda sürtünme sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Kar kayağı ve yarış kızıağı gibi kış sporlarında kullanılan ekipmanlar, hızı en üst düzeye çıkarmak için genellikle ultra düşük sürtünmeyle tasarlanır. Böylelikle rekabetçi sporların özelliklerini geliştirmek için triboloji alanından yararlanılmaktadır. Tribolojinin ilişkili olduğu doğa olayları da mevcuttur. Örneğin depremler, zaman içinde sürtünmenin artmasıyla, yerin bu kuvvete dayanamayacak duruma gelmesiyle meydana gelir; bu da ani bir kaymaya ve bunun sonucunda ortaya çıkan depreme neden olur. Ayrıca su veya rüzgâr kaynaklı erozyon, toprağın zaman içerisinde aşınması sürecidir. Diğer tribolojik fenomenler daha küçük ölçekte meydana gelmektedir. Örneğin evrim, kertenkelelerin ayaklarının tercihen yüzeylere yapışmasını (veya yapışmamasını) ve böylece duvarlarda etkili bir şekilde yürüyebilmelerini sağlamıştır. Yılan gibi bazı hayvanlarda sessiz ve hızlı hareket için zemin ile özel bir temas sağlayarak sürünmektedir. Doğa tribolojik zorluklara yenilikçi çözümler sunmaktadır. Müzik alanında triboloji, güzel sesler yaratmak için bir yaygın keman telleriyle nasıl etkileşime girdiğini belirtmektedir. Kozmetikler pürüzsüz bir

cilt ve ipeksi saçlar oluşturmak için tribolojiyi kullanırken, insan vücudundaki dizler ve kalçalar gibi eklemler de yaşamımız boyunca hareket etmemizi sağlamaktadır. Tribolojinin uygulamaları sayılan örneklerin çok ötesine geçmekte olup, tribolojinin günlük hayatımızın her yerinde olduğunu söylemek abartılı kaçmayacaktır. Triboloji, imalat, taşıma ve güç veya hareket iletiminde kullanılan mekanik sistemleri tasarlayan, bakımını yapan, onaran veya verimliliğini artıran mühendisler için özellikle önemlidir. Çoğu mekanik sistem bir veya birden fazla hareket eden bileşene sahiptir. Bu bileşenlerin içindeki malzemelerin yüzeyleri birbiriyle temas halindedir ve birbirine göre hareket eder. Bazı bileşenlerde örneğin rulmanlar ve dişliler gibi hedef harekete direnci azaltmaktır böylelikle sürtünmedeki enerji kaybını minimize etmektir. Bu komponentlerin aksine frenler ve kavrama göreceli hareketi sınırlandırmak için maksimum kayma direnci gerektirir. Ayrıca diğer üretim prosesleri de tribolojiye dayanmaktadır bunlar haddeleme, tornalama, derin çekme, taşlama vb'dir. Tüm bu süreçler, istenen özellikleri karşılayan malzeme ve ürünler yaratmak için göreceli harekete dayanır. Çoğu ulaşım şekli, yalnızca mekanik bileşenleri açısından değil, aynı zamanda tekerleklerin üzerinde hareket ettikleri veya yuvarlandıkları yüzeylerle temas ettiği noktalarda da tribolojiye dayanır. İnşaat ve arama ekipmanlarındaki triboloji örnekleri arasında ekskavatörler, petrol platformları ve tünel kazma matkapları yer alır. Sürtünme ve aşınma çeşitli endüstrilerde yaygın olarak görülen işlemlerdir ve bunları kontrol etmek için yağlayıcılar kullanılır. Triboloji günümüz dünyası ile özellikle ilişkilidir çünkü çok fazla enerji mekanik bileşenlerdeki aşınma ve sürtünme ile kayıp olmaktadır. Küresel enerji tüketiminin önümüzdeki yıllarda artarak kaynakları ve çevreyi zorlayacağı öngörülmektedir. Sürtünme önemli miktarda enerji kaybına yol açarak doğal kaynakların verimsiz kullanılmasına neden olur. Örneğin küresel olarak yolcu taşıyan arabalarda sürtünmeden dolayı enerji kaybının 7×10^{18} joule olduğu raporlanmıştır. Parçaları değiştirmek için gereken enerji önemli olduğundan ve aşınmanın neden olduğu arızanın ekonomik, çevresel ve güvenlik maliyetleri çok yüksek olduğundan, temas eden malzemelerin aşınması nedeniyle daha fazla atık meydana gelir Dahası, rüzgâr türbinleri gibi yeni enerji verimli teknolojilerin karşılaştığı zorlukların çoğu sürtünme ve aşınmayla ilgilidir. Örneğin rulmanlar, dişli kutuları ve jeneratörlerdeki tribolojik arızalar rüzgâr türbini verimliliğini önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Triboloji, makine mühendisliği, kimya mühendisliği, malzeme bilimi, kimya, fizik ve daha fazlasını içeren disiplinler arası bir alandır ve bu alan

içerisinde makine mühendisliği, kimya mühendisliği, malzeme bilimi, kimya ve fizik ve ilişkilidir. Triboloji akışkanlar mekaniği (yağ akışı), katı mekanikleri ve malzemenin dayanımı (sürtünme ve aşınma), ısı transferi (sürtünme enerjisi ve dağılımı) ilişkilidir. Kimya triboloji 'de kilit öneme sahiptir [149].

4.1. TRİBOLOJİNİN TEMEL KAVRAMLARI VE TERMİNOLOJİSİ

Temel bakış açısı olarak genellikle yağlayıcılar kullanılarak sürtünme ve aşınma miktarının minimize edilmesidir [149].

4.1.2. Sürtünmenin Tanımı

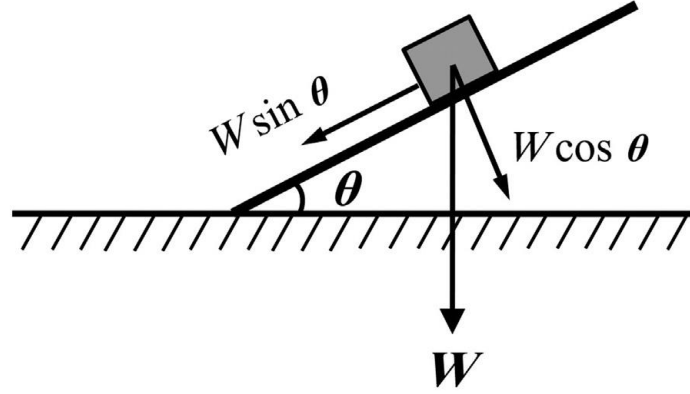
Sürtünme iki cisim arasında bağıl harekete direnen kuvvettir. Sürtünme kuvvetinin yönü daima hareketin yönüne terstir. Bu parametreler sürtünme kuvvetinin (F) normal kuvvete(W) bölümü olan sürtünme katsayısıdır f ya da μ şeklinde ifade edilmektedirler ve denklem 4.1 de gösterilmiştir [149].

$$\mu = f = \frac{F}{W} \quad (4.1)$$

Sürtünme kuvvetine katkı sağlayan ana faktörler temas alanındaki yüzeylerin dokusu, yüzey alanı, normal basınç, kayma hızı ve temasa devam eden yüzeylerin süresidir. Diğer faktörler örneğin sıcaklık, nem vb etkiler sürtünmenin doğası üzerinde kaydedilebilir bir etkiye sahip olabilir. Statik sürtünme, yüzeylerin sabit olduğu iki katı yüzey arasındaki sürtünmeyi ifade eder. Böyle bir durumda statik sürtünme kuvvetini yenebilecek yeterli büyüklükte bir kuvvet uygulanabilirse cisim hareket edebilir. Bir kez hareket başladığında statik sürtünme uygulanabilir değildir onun yerini kinetik sürtünme alır. Kinetik sürtünme ya da diğer adıyla dinamik sürtünme ise iki cisim arasında göreceli (bağıl) hareket olduğunda ve biri diğerine sürtüğünde ortaya çıkar. Kinetik sürtünme katsayısı μ_k olarak gösterilmektedir. Bazı malzeme kombinasyonları için, neredeyse tamamında, kinetik sürtünme katsayısı μ_k statik sürtünme katsayısından düşüktür. Bunun nedeni statik bir koşuldandır, eşleşen yüzeyler temas noktalarında oluşturulan adeziv bağlar ile yapışma eğilimindedir. Sürtünme açısı ise, cisim kaymaya başlamadan hemen önceki maksimum açısıdır. Şekil 4.1'de

gösterildiği yatayda θ açısında eğimli bir yüzey üzerinde yer alan W ağırlığında bir cisim için yatay bir yüzey ve cisim arasındaki statik sürtünme katsayısı denklem 4.2’de ifade edilmektedir [151].

$$\tan \theta = \mu_s \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Eğimli bir yüzey üzerindeki cismin gösterimi [151].

Ek olarak ifade edilmesi gerekli olan bir diğer bileşen ise cismin temas alanıdır. Bunun için sıklıkla kullanılan iki terminoloji mevcuttur. Bunlar görünür alan ve gerçek alandır. İki katı yüzey arasında temas olduğunda temasın görünür alanı aritmetik alandır. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünden dolayı pürüzlerin uç noktaları arasında temas meydana gelir. Sonuç olarak temas eden pürüzlerin deformasyonu yükü üzerine almasıyla ortaya çıkar ve bu temas noktaları ve bağlantılarda gerçek temas ile sonuçlanır. Genelde gerçek temas alanı görünür veya nominal temas alanının sadece küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Mühendislik malzemeleri için, örneğin metaller gibi, temasın gerçek alanı uygulanan yüke bağlıdır ve temasın normal alanından daha küçük olabilir [151]. Göreceli yani bağıl hareket ifade edersek bunun iki önemli sınıflandırması yaygın olarak benimsenmektedir bunlar ise yuvarlanma ve kaymadır. Kayma ve yuvarlanma arasındaki bu fark faydalıdır fakat iki durumda birbirinden bağımsız değildir hatta saf yuvarlanma hareketinde bile neredeyse her zaman biraz kayma içermektedir. Şekil 4.1’de gösterilen her iki ideal yuvarlanma ve kayma durumunda, sabit karşı yüzey üzerinde üst cismin hareketi için teğetsel bir F kuvveti ihtiyacı vardır Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü, sürtünme katsayısının değeri ile uygun bir şekilde ifade edilmektedir örneğin hafif yüklü bir rulmanda sürtünme

katsayısı 0.001'den eş benzer yapıda olan yüzeyi temizlenmiş metal yüzeyin vakum ortamında sürtünme katsayısı 10'dan daha büyük olabilir. Çoğu yaygın malzemeler için yağlayıcı olmaksızın hava ortamında malzemelerin kayması için sürtünme katsayısı(μ) değeri yaklaşık olarak 0.1 ile 1 aralığındadır [150].

4.2. SÜRTÜNME KUVVETİNİN YASALARI

4.2.1. Kayma Sürtünmesinin Yasaları

Belirli kayma koşulları altında, bir malzeme çifti için sürtünme katsayısı (μ), sabit yağlama koşullarında veya hiç yağlama olmadığında bile normal yük ve görünen temas alanı değiştikçe neredeyse sabit kalabilir. Kuru kayma sürtünmesi için üç klasik yasa vardır bu yasalar aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Ek olarak ilk iki yasa ve öncülleri sıklıkla Amontonun yasaları olarak atfedilmektedir ve metallerin kaymalarında çok makul derecede uymaktadır.

1. Sürtünme kuvveti (F) normal yükü doğru orantılıdır (W).
2. Sürtünme kuvveti görünür temas alanında bağımsızdır (A).
3. Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır (v).

Bununla birlikte polimerlerin(plastikler) kaymalarında bu yasalara pek uymamaktadır. Üçüncü yasa Kolomb tarafından ifade edilmiştir. Diğer yasalar deneysel çalışmalarla elde edilmiştir ve aşağıda dört madde ile ifade edilmiştir.

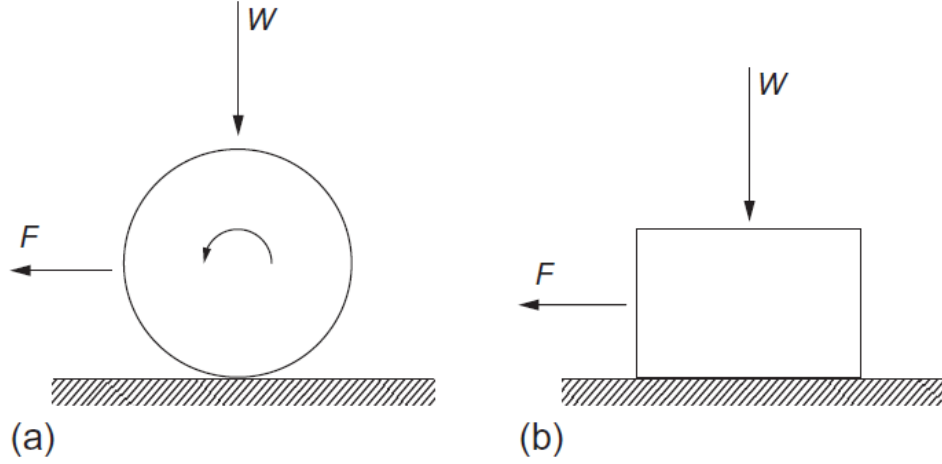
1. Statik sürtünme katsayısı dinamik sürtünme katsayısından biraz daha büyüktür.
2. Sürtünme kuvvetinin kayma hızına bağımlılığı çok küçüktür.
3. Sürtünme temas halindeki yüzeylerin yapısına bağlıdır.
4. Kayma sürtünmesi yuvarlanma sürtünmesinden daha büyüktür [150,151].

Birinci yasa şu şekilde ifade edilebilir

$$F = \mu \cdot W \quad (4.3)$$

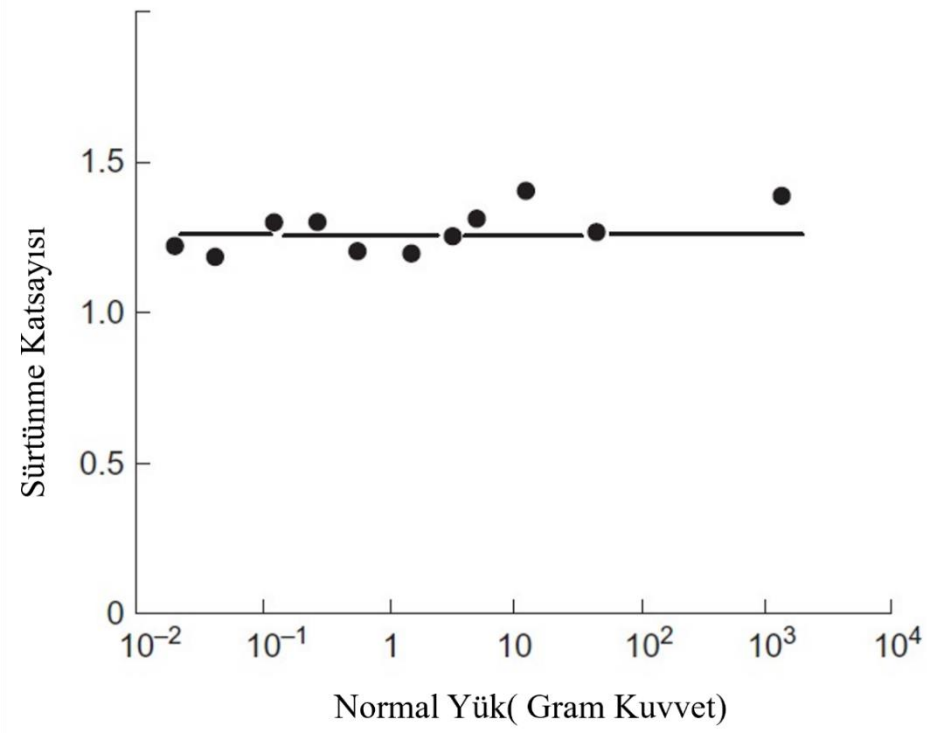
Birinci yasa yağlama olmayan koşullara uymaktadır. Şekil 4.2’de parlatılmış alüminyum üzerinde çeliğin yağsız ortamda sürtünme katsayısı ve normal yük grafiği belirtilmiştir. Yükteki artış 10^6 kadar artmasına rağmen sürtünme kuvveti sabit kalmıştır. Bu ifade, sürtünme katsayısı μ ’nün normal yükten bağımsız olarak sabit kaldığını öne sürmektedir ve yağlı ve yağsız ortamdaki kayma koşullarındaki pek çok malzeme için en azından makroskobik ölçekte temas alanlarında gözlemlenen doğru bir tahmindir [150]. Nominal temas alanına veya bireysel atomların özelliklerindeki değişikliklere bağlı değildir. Diğer bir ifade ile nano ölçek sürtünmede istatistiksel olarak ifade edilemeyen bireysel atom veya moleküllere bağlıdır çünkü atom veya molekülün çok küçük bir sayısını kapsamaktadır. Bu durumda, sürtünme bireysel atom veya molekülün karakteristikleri tarafında belirlenmektedir örneğin sayıları, hareketleri ve kayma yönüne bağlı olarak bireysel atomların yönelimleri. Dahası büyük yüzey alanı ve hacim oranından dolayı, kuantum mekanik etkileri örneğin elektronların kuantum kısıtlaması nesnelere fiziksel davranışlarını değiştirebileceğinden uygun olmayabilir. Bundan dolayı nano ölçek sürtünmede temas alanına ve ilgili atomun özelliklerine ve sayısına bağlıdır. Çeşitli değişkenler arasında etkileşimlerin karmaşıklığında dolayı sayısal olarak ifade etmek oldukça zordur veya daha küçük ölçekte sürtünmeyi tahmin etmek zordur ve bu durumda klasik teoriler örneğin Amontons’un ve Coulomb’un sürtünme yasaları artık uygulanamaz olmamaktadır [151]. Çoğu metal ve pek çok diğer malzeme 1. Yasaya iyi bir şekilde uymaktadır fakat polimerler ve elastik modülü çok düşük diğer malzemeler sıklıkla bu yasaya uymazlar. İkinci Sürtünme Yasası, Birinci yasa kadar geniş çapta araştırılmamıştır, ama yine de polimerler hariç çoğu malzeme için iyi bir şekilde kanıtlanmıştır. Şekil 4.3’te yağlayıcı kullanılmaksızın çelik bir yüzey üzerinde tahta bir malzemenin kaymasının sürtünme katsayısı gösterilmektedir. Normal yük sabit tutulur iken görünür temas alanı 250 kat kadar arttırıldı ve sürtünmenin değeri çok az değişti. Üçüncü ve son yasa diğer iki yasaya göre daha az bir şekilde temel bir yapıya oturtulabilmiştir. Sürtünme kuvvetinin yaygın gözlemlerinden biri ilk hareket uygulandığında gerekli olan kuvvetin kaymaya başladıktan sonraki kuvvete kıyasla daha yüksek olmasıdır. Böylelikle hareket başlamadan önceki statik sürtünme katsayısı (μ_s) hareket başladıktan sonraki kinetik veya da dinamik sürtünme katsayısından (μ_d) daha yüksek bir değere sahiptir. Fakat kayma bir kez gerçekleştiğinde oldukça geniş bir hız aralığında kaymanın neredeyse pek çok

sistemde bağımsız olduğu bulunmuştur, buna rağmen kayma hızı artıkça (metaller için 10 ile 100 m/s hız aralığında) dinamik sürtünme katsayısı azalmaktadır [150].

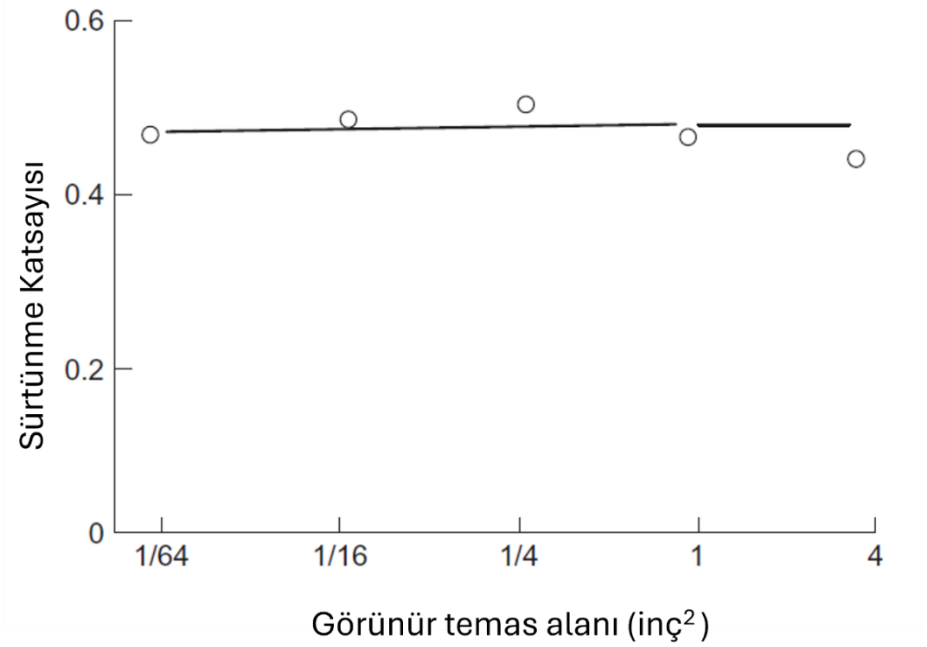


Şekil 4.1. Sürtünmeyi yenmek için gerekli olan F kuvveti ile harekete neden olan (a) yuvarlanma ve (b) kayma hareketi [150].

İki tip sürtünme şekli vardır bunlar temas sürtünmesi ve viskoz sürtünmedir. Harekete bağlı direncin sürtünme tipleri olmasına rağmen bu direncin kökleri oldukça farklıdır. Temas sürtünmesi iki katı yüzeyi birinde diğerine bağlı hareketi sonucunda oluşur. Sürtünmenin büyüklüğü temas eden cisimlerin yüzey pürüzlülüğü ve malzemelere bağlıdır. Viskoz sürtünmede ise bir akışkan örneğin yağ ile meydana gelir. Viskoz sürtünme de akışkanın malzeme özelliklerine bağlıdır, esasen akışkanın deformasyona iç direncinin ölçüsüdür. Sıvı bir yüzeyde kaymaya karşı direnç katı bir yüzeye göre daha az olduğundan dolayı, viskoz sürtünme, temas sürtünmesinden genellikle daha küçüktür [149].



Şekil 4.2. Normal yükü göre sürtünme katsayısının varyasyonu [150].



Şekil 4.3. Yağlanmamış bir çelik yüzey üzerindeki ahşap kaydırıcılar için görünen temas alanıyla sürtünme katsayısının (μ) değişimi [150].

4.2.2. Yuvarlanma Sürtünmesi Yasaları

Genel olarak kayma sürtünmesi ile karıştırılmasına rağmen yuvarlanma sürtünmesi bir rulman bilyası, teker veya dişli yüzeyin karşı bir yüzeyde döndüğünde ortaya çıkan harekete karşı gösterdiği dirençtir. Özetle dönmeye karşı gösterilen direngenliktir ve f_r ile gösterilir [151]. Bununla birlikte yuvarlanan cismin geometrik yapısı dikdörtgensel olabilir örneğin kaya ya da çakıl taşı gibi. Fakat bu sürtünme yasasında ifade edilen kavramlar geometrik olarak düzgün ve düz yüzeyler için ifade edilmiştir. Kayma ve yuvarlanma sürtünmesini kıyasladığımızda fark edilen ilk şey yuvarlanma sürtünmesinin deformasyonlarla kayma sürtünmesine kıyasla daha güçlü bir bağ kurmaktadır. Diğer ifadeyle eğer yuvarlanma ve yüzey mükemmel bir şekilde sertse, rijitse herhangi bir yuvarlanma sürtünmesi olmayacaktır. Ayrıca kayma sürtünmesine kıyasla yuvarlanmada makul derecede cisimlerin sertliği sağlandığında enerji kaybı daha az olacaktır [151]. Yuvarlanma sürtünmesi genellikle kayma sürtünmesinden oldukça düşüktür. Örneğin yuvarlanma sürtünmesi katsayısı 10^{-5} büyüklüğünde ve altında olabilir, aksine kayma sürtünme katsayısı genel olarak 0.1 'den büyüktür [149]. 1781'de Kolomb tarafından yuvarlanma sürtünmesini ilk iki yarasını anlamak için yapılan ilk önemli bir çalışmaydı. Dahası kayma sürtünmesinin bazı yasaları yuvarlanma sürtünmesine genelleştirildi bunlar ise aşağıda sıralanmıştır:

1. Sürtünme kuvveti uygulanan yük ile doğru orantılıdır.
2. Sürtünme kuvveti yuvarlanan bileşenlerin eğrilik yarıçapı ile ters orantılı olarak değişmektedir.
3. Sürtünme kuvveti düzgün yüzeylerde pürüzlü yüzeylere kıyasla daha düşüktür.
4. Statik sürtünme kuvveti, kinetik sürtünme kuvvetinde genellikle daha düşüktür.
5. Kinetik sürtünme kuvveti yuvarlanma hızına hafifçe bağlıdır [151].

Kayma sürtünmesinin aksine diğer malzemelerin yuvarlanma sürtünmesine ilişkin formülünü oluşturmak oldukça zordur. Bunun nedeni, plastik deformasyon, elastik histerezis ve yapışma histerezisi dahil olmak üzere birçok fiziksel mekanizmanın yuvarlanma sürtünmesine yol açmasıdır. Bununla birlikte Şekil 4.4'e göre yuvarlanma sürtünmesinin deneysel ifadesi formüle edilebilir.

$$F_r = \mu_r W \quad (4.4)$$

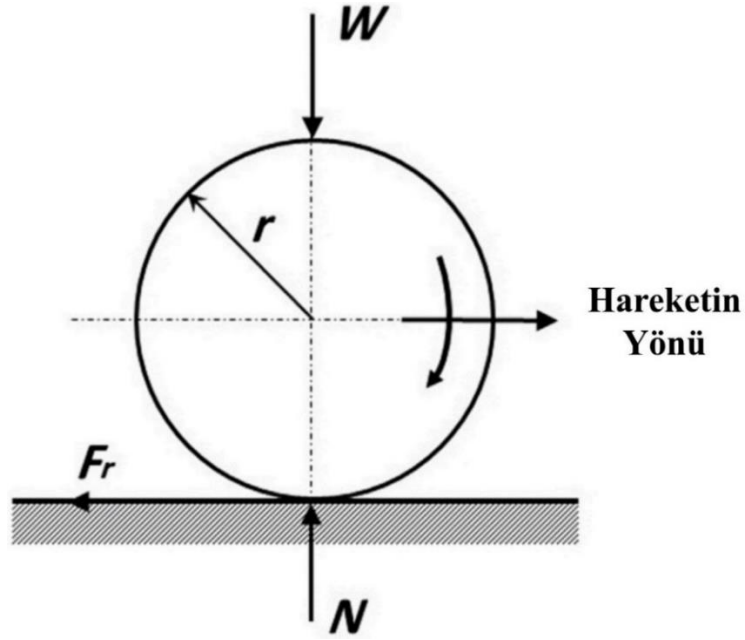
Burada; F_r yuvarlanma sürtünme kuvveti, N

μ_r yuvarlanma sürtünme katsayısı

W uygulanan normal yük, N

Yuvarlanan bileşenin yarıçapını hesaplamak için yuvarlanma direnci alternatif olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_r = \mu_{r1} \frac{W}{r} \quad (4.5)$$



Şekil 4.4. Yuvarlanma sürtünmesi [151].

Burada;

μ_{r1} yuvarlanma sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

r silindir ,rulman bilyası, dişli vb'nin yarıçapıdır.

Çoğu pratik koşullarda temas noktasının elastik ve plastik deformasyon olduğundan dolayı saf yuvarlanma düşünülemez. Ani temas noktaları farklı düzlemlerde olduğu anlamına gelir. Sonuç olarak saf yuvarlanma belirli sınırlı noktalarda meydana gelirken diğer temas noktalarında sürüklenme, kayma ve yuvarlanmanın bir kombinasyonu beklenmektedir. Kayma hızı v_s genel olarak yuvarlanma hızından v_r %5 daha düşüktür. Toplam yuvarlanma sürtünmesi F_R aşağıdaki denklem gibi yazılmaktadır.

$$F_R = \frac{v_s}{v_r} \mu_k \quad (4.6)$$

Burada μ_k kayma sürtünmesinin kinetik katsayısıdır.

Ayrıca yuvarlanma süresince bazı kayıplardan bahsedilebilmektedir. Birincisi yuvarlanan ekipmanın geometrisinin mükemmelliğinin eksik olmasında dolayı sürtünmenin yüzey pürüzlülüğü bileşenine neden olacaktır. İkincisi yuvarlanan yüzeyler üzerinde pürüzlülüğünün plastik deformasyonundan bir enerji kaybı ile sonuçlanır. Üçüncüsü yuvarlanma süreci oluşurken gerilim ve bırakma döngülerinden elastik histerisiz kayıpları ile sonuçlanır. Tüm bu kayıplar 10^{-4} büyüklüğündedir yuvarlanma sürtünmesinin toplamı olmalıdır [151].

4.3. AŞINMA

Göreceli hareketten dolayı bir yüzeyden malzeme kaybı aşınmadır. Çoğunlukla temas sürtünmesi nedeniyle katı yüzeyler birbirine doğru kaydığında malzeme kaybı meydana gelebilir. Yüksek sürtünmenin mutlaka yüksek aşınma oluşturacağı anlamına gelmez bunun tersi de geçerlidir. Malzeme kayıpları mekanik bileşenlerin performansı veya verimliliğini azaltabilir. Malzemenin nasıl aşındığına göre birkaç farklı aşınma mekanizması vardır. En yaygın olan aşınma mekanizmalarında olan abrazyon aşınmasında sert bir malzemenin kendinden daha yumuşak olan diğer malzemeden plowing (kazıma) etkisi ile malzeme kaldırması iken diğer aşınma türü ise adhezyondur bu aşınma türünde ise yüzeye yapışan malzemenin birbirine göre bağlı hareketinden dolayı yüzeyden malzeme kaybı işlemidir [149].

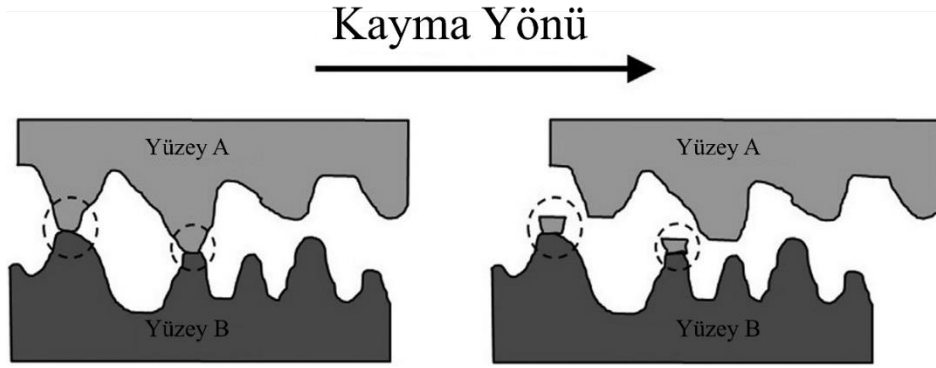
4.3.1. Aşınma Mekanizmaları

Tribolojik sistemlerde malzemenin yüzeylerden aşınabilmesini sağlayan birçok farklı mekanizma vardır. En yaygın mekanizmalar adhezyon ve abrazyondur. Aşınma; korozyon, yorulma veya diğer süreçler gibi nedenlerden dolayı meydana gelebilir. Tribolojik sistemlerde verilen baskın aşınma mekanizmaları malzemeye, çevreye ve operasyon koşullarına bağlıdır [149]. Aşınma tipleri dört ana gruba ayrılmıştır ve bu aşınma mekanizmaları adhesiv, abrasiv, yüzey yorulması ve korozif aşınmadır. Bu mekanizmaların her bir farklı kurallarla yönetilmektedir ve pek çok durumda bu aşınma türleri birbirleriyle ilişkilidir ve nadiren birbirlerinden bağımsız olarak ortaya çıkarlar. Bu aşınma türlerinin dışında; erozif, tireşimli, sıyırma, termal, kavitasyon, elektro-ark ve bio-korozyon aşınma türleri de vardır. Endüstriyel koşullarda aşınma türlerinin üçte ikisinin abrazif ve adhesiv aşınma türleri oluşturduğu ifade edilmektedir. Ayrıca yorulma aşınması dışındaki aşınma tiplerinde aşınma davranışı kademeli olarak gerçekleşmektedir [151].

4.3.1.1. Adhesiv Aşınma

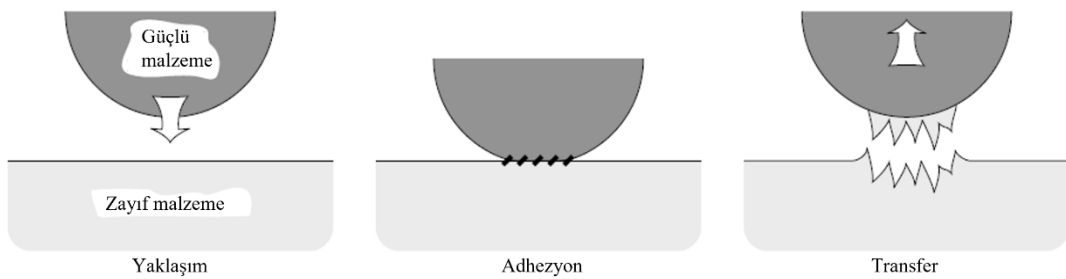
Mekanik sistemlerde en yaygın aşınma türlerinden birisi adhesiv aşınmadır. İki yüzey arasında yağ olup olmadığına bakılmaksızın yüzeylerin birbiri üzerinde kayması veya

bastırılması ile ortaya çıkar [151]. Adhesiv aşınma, temas halindeki iki gövdenin, bir gövdedeki malzemenin bir kısmının ayrıldıktan sonra diğerinin parçası haline gelecek şekilde ayrılması durumunda meydana gelir [149]. Yapışma tipik olarak pürüzlü yüzey bağlantı noktalarında meydana gelir ve daha yumuşak yüzey pürüzlülük uçlarının plastik olarak kesilmesi takip eder. Malzemenin uzaklaştırılması, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi diğer yüzeye yapışan küçük parçacıklar formunda meydana gelir [151]. Temas eden cisimlerin sertliği veya yüzey pürüzlülüğün artması ile adhezyon azalır [152].



Şekil 4.5. Adhesiv Aşınmanın Mekanizması [151].

Çok sayıda test, güçlü yapışma olduğunda, Şekil 4.6 'da gösterildiği gibi, daha zayıf metalin daha güçlü metale aktarımının gerçekleştiğini göstermiştir.



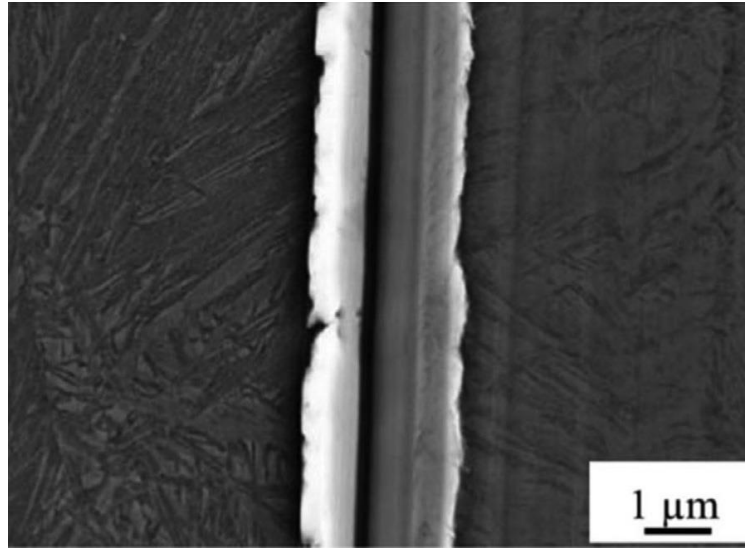
Şekil 4.6. Adhezyondan dolayı metal transferinin süreci [152].

Metaller arasında gözlemlenen güçlü yapışma, temas eden yüzeyler arasındaki elektron transferi ile açıklanabilir. Metallerde çok sayıda serbest elektron bulunur ve temas üzerine, bağ oluşturmak için iki katı arasında elektron alışverişi yapılabilir.

[152]. Adhesiv aşınmanın oluşturduğu aşınma kalıntıları parçacıkları genellikle bir yüzeyden ayrılan ve diğerine yapışan bir parça şeklinde de kendinin gösterir [151].

4.3.1.2. Abrasiv Aşınma

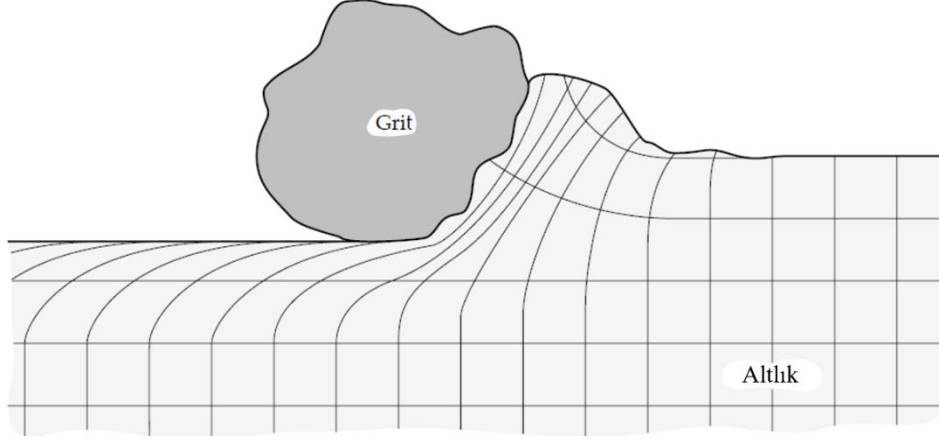
Çoğu mekanik uygulamada aşınma türleri içerisinde en belirgin olan türdür ve farklı sertlikte malzemeler arasındaki sürtünme yüzeylerine sahip tribo sistemlerde ortaya çıkar ve aynı sertlik ya da daha sert bir malzemenin pürüzlü yüzeylerinin daha yumuşak bir malzemenin yüzeyini plastik olarak deforme etmesiyle meydana gelir. Bu tip aşınmada yüzey topoğrafyası, yüzey malzemesinin çıkarılmasıyla birlikte kayma sırasında sürülmeyi içerir. Sonuç olarak, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, kayma yönünde ilerleyen aşındırıcı oluklar genellikle daha yumuşak (sünek) yüzey üzerinde oluşturulur. Abrasiv aşınmanın boyutu sanıldığından çok daha fazladır [151,152].



Şekil 4.7. Ultra yüksek mukavemetli beynitik çelikten yapılmış tek abrasiv aşınma izi [151].

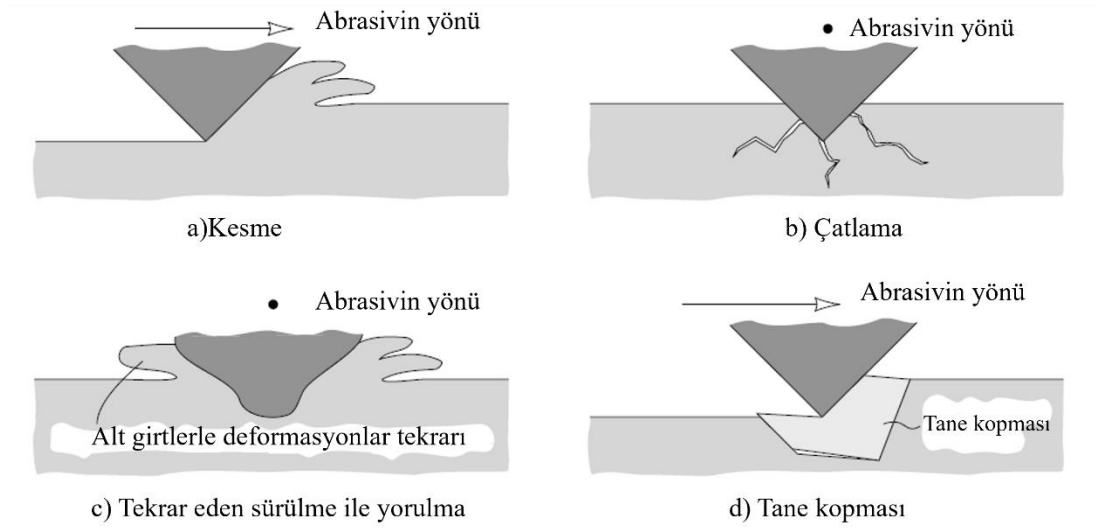
Yukardaki tanımlara ek olarak, ilk başlarda abrasiv aşınmanın neden olduğu aşınma türü ile ilgili olarak bir eğe ile daha yumuşak malzeme üzerinden malzeme kaldırma işleminin ve gritlerin ya da sert pürüzlerin neden olduğu aşınma ile aynı olduğuna kanaat getirilmekteydi fakat mikroskobik incelemelerde abrasiv aşınmanın en keskin geometrik şekil (grit) veya daha birçok direkt bağlantılı olmayan mekanizmalarla,

tahmin edilebileceği kapsadığı anlaşılmıştır. Girit'e ait görselleştirme Şekil 4.8'de gösterilmiştir [152].



Şekil 4.8. Bir grit madde geçerken alt yüzey deformasyonu [152].

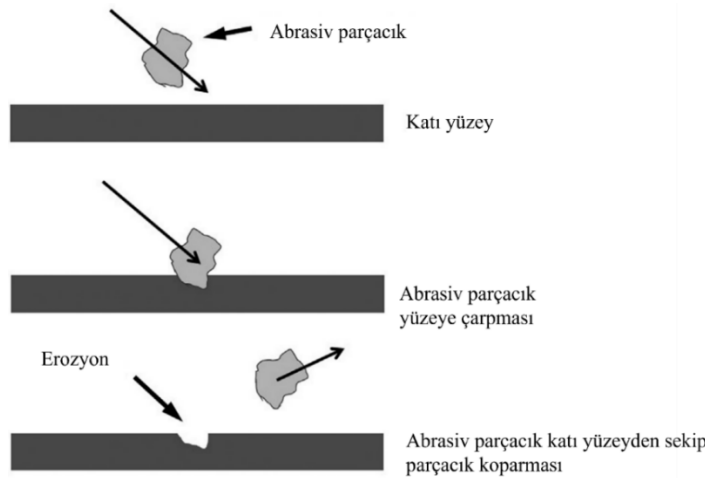
Grit'lerin geometrisi abrasiv aşınmanın mekanizması ayrıca etkiler. Parçacıklar veya gritler, malzemeyi mikro kesme, mikro kırılma, bireysel tanelerin koparılması veya Şekil 4.9'de gösterildiği gibi tekrarlanan deformasyonlar nedeniyle hızlanmış yorulma yoluyla malzeme kaldırılabilir [152].



Şekil 4.9. Abrasif aşınmanın mekanizmaları: Mikro kesme, çatlama, yorulma ve tane kopması [152].

4.3.1.3. Eroziv Aşınma

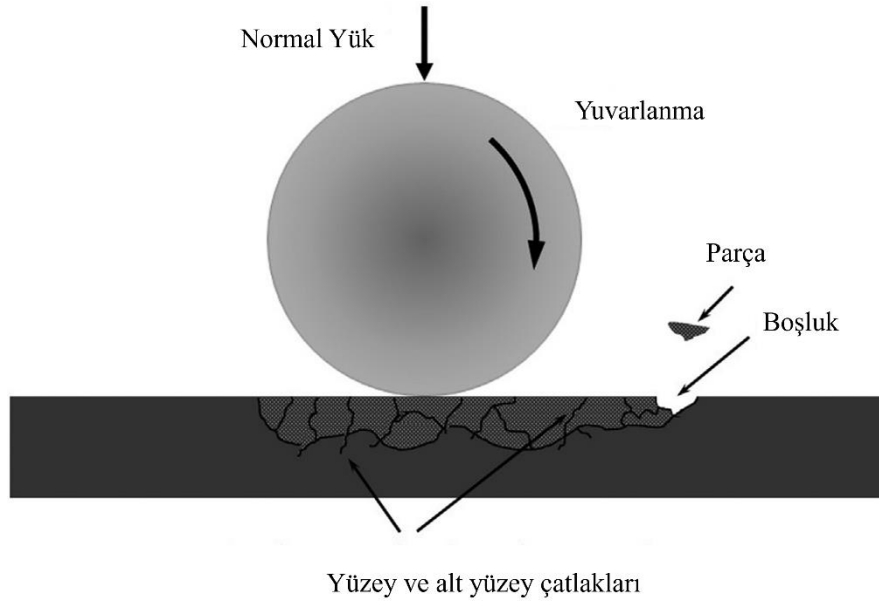
Bu mekanizma Şekil 4.10'da gösterildiği gibi keskin katı parçacıkların bir yüzeye çarpması sonucu oluşan metalin uzaklaştırılması işlemidir [151]. Diğer bir ifade ile de bir nesnenin yüzeyine karşı sıvı ya da katı katı parçacıklarının çarpması nedeniyle ortaya çıkan aşınma türüdür. Parçacık malzemesiyle büyük oranda kontrol edilebilen Eroziv aşınma çeşitli aşınma mekanizmalarını içerir ve bunlar, çarpmanın açısı, çarpma hız ve partikül boyutudur. Eğer çarpan malzeme sert ve katı bir malzemeyse o zaman görmüş olacağımız aşınma türü abrasif aşınmanın benzeri olacaktır. Sıvının aşındırma etkisi gösterdiği durumlarda ise aşınma meydana gelmediği aşınma mekanizmaları tekrarlı darbelerden ortaya çıkar [152]. Eroziv aşınmada parçacık sertliği malzeme sertliğinden fazlaysa eroziv aşınmanın genellikle meydana geldiği açıktır. Muhtemelen özellikle uzay endüstrisinde, dikkat çeken en önemli aşınma türü eroziv aşınmadır. Eroziv aşınma abrasif aşınma mekanizmasının ve çarpmanın bir kombinasyonu olarak düşünülebilmektedir. İkisi arasında temel ayrışma, eroziv aşınma da çarpma kaynaklı karşı malzemeden malzeme kaldırması sebebiyle yüzey pürüzlülüğün kıyasla daha büyük olmasıdır. İkinci olarak ise erozyondaki temas gerilimi hava ya da sıvı akış ortamındaki partiküllere karşı bir cisim ile karşılaştığında elde ettiği kinetik enerjisinden oluşmaktadır. Şekil 4.10 'da eroziv aşınmaya ait görselde ifade edilmiştir [151]. Eroziv aşınmaya örnek olarak ise bir uçak motorunun kanatçıklarına uçuş sırasında giren toz partikülleri verilebilir [149].



Şekil 4.10. Bir yüzeye çarpan abrasif parçacığın eroziv aşınmanın şematik görseli [151].

4.3.1.3. Yorulma Aşınması

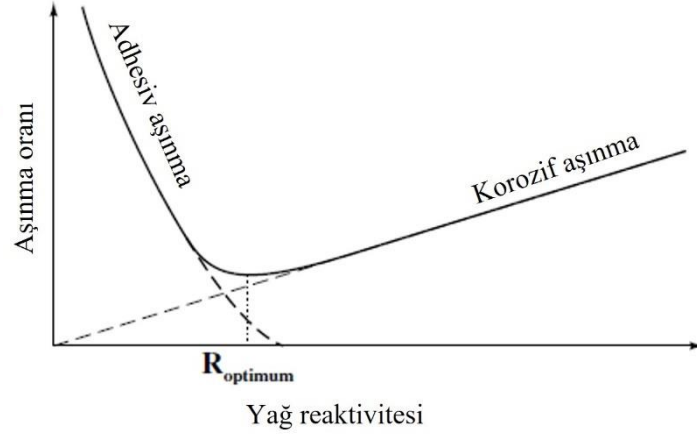
Abrazyon ve adhesiv aşınmada iki yüzey birbirine göre kaydığına meydana gelir. Fakat cisimlerin hareketi yuvarlanma yoluyla meydana geldiğinde bu mekanizmalar daha az önemlidir. Bunların yerine yuvarlanma temasları veya öncelikli olarak yuvarlanma sergileyen yapılar için ana aşınma mekanizması yorulma aşınması olmaktadır [149]. Bu aşınma mekanizması malzemelerin genel yorulma olgusu ile yakından ilişkilidir. Uygulanan stres ile arıza için gereken döngü sayısı arasında bir korelasyon vardır [151]. Yorulma, yüzeye yakın malzemenin zamanla kademeli olarak zayıflaması nedeniyle yüzeyden malzeme kaybıdır. Yüksek gerilim, çalışma sırasında yavaşça büyüyen ve sonunda yüzeye ulaşana kadar mikroskobik çatlakların oluşmasına neden olur ve bu da aşınmaya neden olur. Yorulma aşınması, yüzeydeki çukurlarla karakterize edilir ve aynı zamanda çukurlaşma veya dökülme olarak da adlandırılır. Kaybedilen malzeme hacmi veya hacim kaybı oranıyla ölçülen aşındırıcı ve yapışkan aşınmanın aksine, yorulma aşınması kullanım ömrü açısından ölçülür [149]. Pratik olarak yorulma kırılmasına neden olan iki yaygın durum vardır: Şekil 4.11'de gösterildiği gibi yuvarlanma uygulamaları (örneğin, rulmanlar, kamlar ve dişliler) ve kırılgen yüzeyler (örneğin, seramik malzemeler) üzerinde kayma.



Şekil 4.11. Yuvarlanma hareketinde bir yüzeyin yorulma kırığının şematik diyagramı [151].

4.3.1.4. Korozyon Aşınması

Korozif aşınma, yüzeyler ve ortamdaki reaktif türler arasındaki kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan malzemenin uzaklaştırılmasıyla ilgilidir ve malzeme yüzeyinin azalmasına arızaların ani bir şekilde meydana getirmesiyle ciddi bir risk oluşturan aşınma türüdür [149,151]. Reaktif türler havada (kuru kaymayla ilgili) ve yağlayıcıda (yağlı temaslarla ilgili) mevcut olabilir. Kimyasal reaksiyonlar ya doğrudan malzemeyi kaldırabilir ya da yüzeyin özelliklerini değiştirerek malzemenin diğer aşınma mekanizmaları yoluyla daha kolay çıkarılmasını sağlayabilir. En yaygın aşındırıcı madde, yüzeylerle, özellikle metallerle reaksiyona girerek oksitler oluşturan oksijendir. Korozif aşınma genellikle metal üzerinde oksijen ile reaksiyona girmesiyle ortaya çıkan ve oksidatif aşınma olarak adlandırılan bir aşınma türüdür. Oksidasyon aşınmayı azaltabilir. Çünkü metal oksitler metallere göre daha düşük yapışma özelliğine sahiptir [149]. Bununla birlikte oksitler aşınma nedeniyle daha kolay aşınır ve bu da aşınmayı artırabilir. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi çok az bir korozif aşınma olduğunda adhezyondan dolayı aşınma yüksektir ve daha fazla korozyon olduğunda ise abrasif aşınma türünden dolayı aşınma yükselir. Ayrıca bu şekilde bir ortamın aşındırıcılığı azaldıkça, belirli yük ve kayma hızı koşulları altında etkili bir yağlayıcı olarak işlev görebilir. Bununla birlikte, bir yağlayıcının aşındırıcılığında veya reaktivitesinde aşırı bir azalma, koruyucu yüzey filmlerinin yetersiz oluşması nedeniyle ciddi adhesiv aşınmasına yol açabilir. Bu nedenle yağlayıcı bileşimler, korozif ve adhesiv aşınmayı dengeleyecek ve aşınma oranını en aza indirecek şekilde optimize edilebilir. Ayrıca bu şekilde yağ reaktivitesi çok az olursa adhesiv aşınma şiddetli bir şekilde baskın hale gelebilir. Diğer taraftan eğer yağlayıcı aktivitesi çok yüksek olursa korozif aşınma şiddetli hale gelir o yüzden uygun oranda yağlayıcı reaktivitesi belirli çalışma koşullarına bağlıdır. Bunun sebebi ise yüzeyler ile yağlayıcıdaki aşınma önleyici veya aşırı basınç katkı maddeleri arasındaki etkileşimler nedeniyle yağlanmış temas noktalarında korozif aşınma meydana gelebilir. Bu katkı maddeleri yüzeylerle reaksiyona girerek aşınmaya karşı koruma sağlayan filmler oluşturur ancak çok fazla kullanıldığında yüzeylere karşı agresif olabilir. Bu sebeple bu tip katkı maddeleri yağlayıcı içeriklerinde az miktarlarda kullanılmaktadır [149,152].



Şekil 4.12. Adhesiv ve abrasif aşınma arasındaki denge [152].

4.3. YAĞLAMA REJİMLERİ

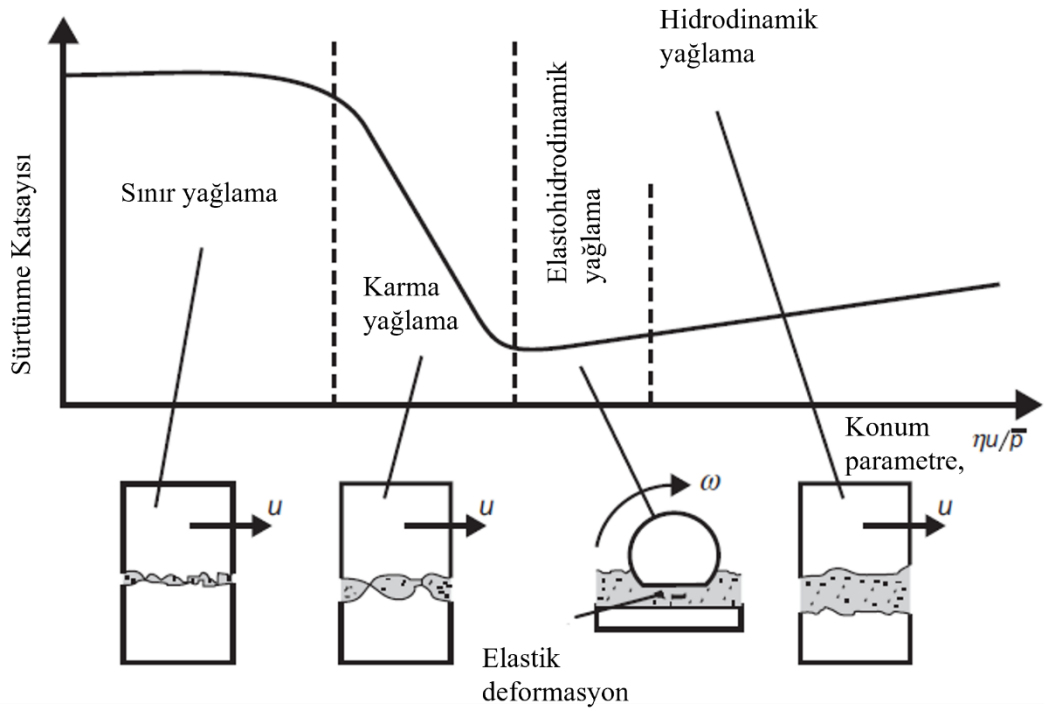
Yağlayıcılar iki yüzeyi ayırmak ve göreceli hareketi kolaylaştırmak için kullanılır. Çoğu yağlayıcılar sıvıdır. Bunun nedeni, sıvıların bir yükü taşıyacak kadar viskoz olmasına rağmen doğası gereği kesmeye karşı düşük dirence sahip olmasıdır. Sıvı yağlayıcılar ayrıca ikincil ancak yine de kritik işlevleri yerine getirir: (i) kayma arayüzünde üretilen sürtünme ısını dağıtır ve (ii) yüzeylerden aşınmış küçük parçacıkları veya diğer kirletici maddeleri temastan uzağa taşır [149].

Sıvı yağlamada kilit parametre yağlayıcı film kalınlığının iki katı yüzeyin pürüzlülüğüne oranıdır. Film kalınlığı sıvının yüzeyleri ayırdığı mesafedir. Yüzeyler üzerinde pürüzlülüklerinin ortalama yüksekliği pürüzlülük olarak ifade edilmektedir. Film kalınlığı yüzey pürüzlülüğünden daha büyük olduğunda, bu yüzeyler tamamen ayrılır viskoz kayma direnci oluşur ve aşınma meydana gelmez. Eğer ki film kalınlığı pürüzlülükten daha düşük ise pürüzler yüzey ile temasa geçer ve temas sürtünmesi ve aşınma ortaya çıkar. Film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne göreli büyüklüğü lambda oranıyla ölçülür ve denklem 4.7 de gösterilmiştir [149].

$$\lambda = \frac{h_0}{R_a} \quad (4.7)$$

Burada h_0 minimum film kalınlığı ve R_a temas yüzeyinin ortalama pürüzlülüğüdür. λ oranı tribolojik sistemin yağ rejimini belirler. Yağlama rejimleri, Stribeck eğrisi adı

verilen sürtünme katsayısına karşı λ oranına ilişkin bir grafik üzerinde farklılaştırılabilir [149]. Yüzeyler arasındaki yağlayıcı film kalınlığına göre dört farklı rejim şu şekildedir Hidrodinamik, sınır, karma ve elastohidrodinamik yağ rejimidir. Bu parametreler minimum film kalınlığı h 'nin ortalama pürüzlülük yüksekliğine oranıdır. Şekil 4.13'te Stribeck eğrisi konum parametresi olarak adlandırılan $\frac{\eta u}{\bar{p}}$ ile adlandırılır ve η kinematik viskozite, u hareket eden cismin hızı ve \bar{p} akışkan filmdeki ortalama basınçtır [153].



Şekil 4.13. Yağ film tabakasının dört farklı yağlama rejimi üzerine temellendirilmiş stribeck eğrisinin ayrıtılması [153].

4.3.1. Hidrodinamik Yağlama

Sıvı film yüzey pürüzlülüğünden daha kalın olduğundan ($\lambda > 3$), katılar asla temas etmezler ve yük sıvı ile tamamen desteklenmektedir [149]. Diğer ifade ile $h \gg R_a$ 'dandır ilişkili film kalınlığı yaklaşık $1 \mu\text{m}$ veya daha büyüktür ve şekil 4.13'te gösterilmektedir [153]. Hidrodinamik olarak ifade edilmesinin sebebi uygulanan yük ile itildiğinde yüzeyleri ayrı tutan sıvı tabaka hidrodinamik basınç ile oluşturulur ve bu film tabakasında sürtünme tamamen viskozdur ve λ artışıyla birlikte sürtünme artar

[149]. Bağıl hareket ve iç film sürtünmesi nedeniyle yağ filminde üretilen hidrodinamik basınç yüzey deformasyonuna neden olmayacak kadar düşüktür. Yağ filminin akışı laminardır fakat yağın kalınlığı $20 \mu\text{m}$ 'nin üzerine çıkarsa türbülanslı hala gelir ve istenmeyen sürtünme kayıplarına neden olur [153]. Tam film rejiminde sürtünme katsayıları genellikle 0.1'den azdır. Bu rejimde aşınma minimaldir. Çünkü yüzeyler hiçbir zaman direkt temasa geçmezler. Bu yüzden mekanik bileşenler zamanın çoğunu tam katman rejiminde çalıştırmak için tasarlanmaktadır böylelikle aşınma yoktur ve az sürtünme vardır [149].

4.3.2. Karma Yağlama Rejimi

Akışkan filminin kalınlığı iki yüzeyin ortalama pürüzlülüğüne ($1 < \lambda < 3$) yaklaştığında ,yüzeyler sıvı ile ayrılan ara yüzeylerin alanları olacaktır fakat pürüzlü olan diğer alanlar direkt temasa girmektedir [149]. Bu karma rejimde $h \sim R_a$ değerleri birbirine yakındır ve hidrodinamik ve sınır rejim arasındadır temas eden yüzeyler ve direkt akışkanın temas ettiği alanlar sürtünme ve film parametrelerinden eşit bir şekilde etkilenmektedir. Film kalınlığı 70 nm 'den $1 \mu\text{m}$ 'ye kadar değişmektedir ve şekil 4.13'te rejimin olduğu eğri gösterilmiştir [153]. Bu rejimde, karma yağlama diye adlandırılan uygulanan yük, sıvı ve temas pürüzlülükleri ile kısmen desteklenmektedir. Karma yağlama rejimi ayrıca aşınmanın başlangıcına karşılık gelir, özellikler aşınma arayüzey içinde pürüzlülüğün temas bölgelerinde ortaya çıkabilir. Stribeck eğrisi üzerinde sol tarafa doğru, daha fazla aşınma beklenmektedir. Bununla birlikte, kayma ilk başladığında aşınma en yüksek pürüzlülüklerinin giderilmesi ile yüzeyler ayrıca düzleştirilebilir ki λ oranındaki artışlar ve tam film rejimine doğru harekete geçer. Tüm mekanik ekipmanlar zamanının en az birkaçında karma yağlama rejiminde çalışmaktadır. Örneğin hareket başladığında veya durduğunda hız mutlaka düşüktür. Dahası karma ve tam film rejimi arasında geçiş en düşük sürtünme olasılığına sahiptir ve bu yüzden enerji verimliliği açısından arzu edilen çalışma bölgesidir [149].

4.3.3. Sınır Yağlama Rejimi

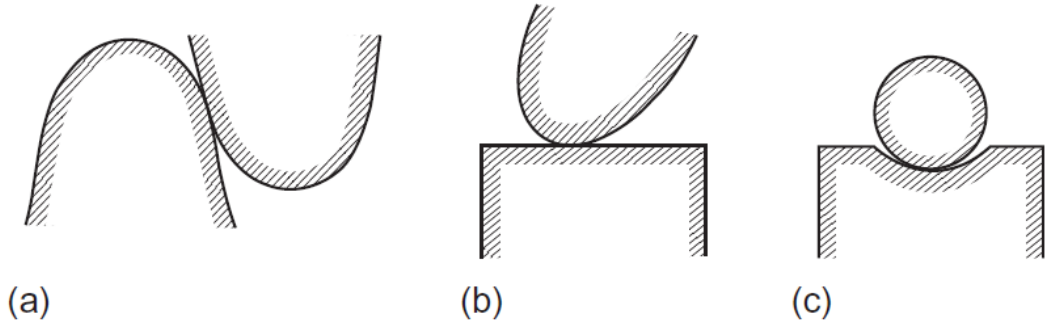
Akışkan filmi, uygulanan yükü artık destekleyemeyecek kadar ince olduğunda sınır yağlama olarak adlandırılan olay ile bağıl hareket gerçekleşir. " λ " oranı birden az

olduğunda sınır yağlama beklenmektedir ve bu durumda film kalınlığı ortalama pürüzlülükten daha düşüktür [149]. Diğer bir ifadeyle bu sınır rejimden $h < R_a$ 'dır ve akışkan filmi süreklilik sağlamaz ve temas yüzeyleri pürüzlülüğün yüksek noktalarında temasa başladığında ortaya çıkmaktadır. Film kalınlığı 70 nm'den daha az ve diğer filmlere göre daha fazla sürtünme katsayısına sahiptir [153]. Sınır yağlama terimi katı yüzeyler ve yağlayıcıda katışıklar arasındaki etkileşimler ile oluşturulan bir sınır filmin mevcudiyetinden söz etmektedir. Bu katmanlar düşük kayma gerilmesi ile yarı katıdır şöyle ki bazı yükleri taşıyabilir. Aynı zamanda tipik katı malzemelerden daha düşük sürtünme sağlamaktadır. Bu katman(film) iki farklı yolla kullanılmaktadır; akışkan film hareketli yüzeyleri birbirinden ayıran bir sıvı ve hidrodinamik basınç boyunca yük taşıyabilir iken sınır filmi yağlayıcı katkı maddelerinden oluşan yarı katı bir malzemeyi ifade eder. Tam film rejiminde bir sıvı film bulunurken, sınır rejimde bir sınır filmi oluşur. Her ikisine de film (sınır tabaka ya da katman) denir ve anlamları şartlarına göre farklılaştırılmak zorundadır. Sınır rejimde bağlı harekete karşı direnç tamamen λ 'ya bağlı olmayan temas sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayıları sınır yağlama rejiminde karma ve tam filmden daha yüksektir. Yüzeyler direkt temas kurduğunda ve sıvı ile ayrılmadığından, sınır rejimi aşınma ile de ilişkilidir. Buna rağmen bileşen sınır filmi varlığı nedeniyle hala arıza olmadan çalışabilir. Ancak bunun yalnızca yağlayıcı katkı maddeleri olduğunda geçerlidir. Eğer yüzeylerle reaksiyona girerek sınır filmi oluşturacak katkı maddeleri yoksa sürtünme ve aşınma çok daha yüksek olacaktır [149]. Sınır rejime örnek verecek olursak ekipmanlar çalışmaya başladığında veya durduğunda örneğin dişli yüzeyler, arabanın valf setleri ya da rulmanların yağ filminin kesildiğinde kısa süreli bir sınır film tabakası ile karşılaşmaktadır [153].

4.3.4. Elasto-hidrodinamik Yağlama

Elasto-hidrodinamik (EHD) rejim, karşıt yüzeylerden bir veya ikisini etkilemeye yetecek kadar yüksek basınçlı hidrodinamiğin özel bir durumudur. Film kalınlığı 10 ile 70 nm arasındadır [153]. Bu rejimde karşıt yüzeylerin temas yüzey noktasındaki alan daha küçük olduğundan ortaya çıkan basınç hidrodinamik yağlama rejiminden genel olarak daha yüksektir. Bir dişilinin yükü taşıyan dişli yüzeyi, bir eksantrik milinin eğri yüzeyindeki temas noktası ve bir rulman bilyasına ait temas izi üzerindeki

çok küçük bir alanda yoğun bir temas meydana gelmektedir. Bu temas noktaları Şekil 4.3 stribek eğrisi ve Şekil 4.14 dişli, mil ve bir rulmana ait kesitte belirtilmektedir. Bu etkileşim noktalarında yerel basınçlar çelik malzemeler için tipik olarak birkaç giga paskal aralığındadır. Bu koşullar altında yağlayıcının viskozite-basınç bağımlılığı ve yatak yüzeylerinin elastik deformasyonu önemli rol oynar. Bu koşullar altında yağlama elasto-hidrokinamik olarak bilinmektedir [150].



Şekil 4.14. Karşı biçimli temasların örnekleri: a) Dişli diş, b) Bir mil karşı yüzeyi c) Bir rulman ve karşı yüzeyine ait kesit resimleri [150].

4.4. YAĞLAMA

Yağlayıcılar iki yüzeyi ayırmak ve göreceli hareketi kolaylaştırmak için kullanılır. Çoğu yağlayıcılar sıvıdır. Bunun nedeni, sıvıların bir yükü taşıyacak kadar viskoz olmasına rağmen doğası gereği kesmeye karşı düşük dirence sahip olmasıdır. Sıvı yağlayıcılar ayrıca ikincil ancak yine de kritik işlevleri yerine getirir: (i) kayma arayüzünde üretilen sürtünme ısısını dağıtır ve (ii) yüzeylerden aşınmış küçük parçacıkları veya diğer kirletici maddeleri temastan uzağa taşır [149].

4.4.1. Yağ Formülasyonları

Yağlayıcıların iki ana şekli gresler ve yağlardır. Yağlar ve gresler arasındaki ana farklılık onların yoğunluklarıdır ve yağlar sıvı gresler yarı katıdır. Gresin yarı katı yapısı faydalıdır çünkü arayüzün dışına sızan yağlayıcı miktarını en aza indirir ve kirletici maddelere karşı sıvı yağ formunda daha iyi koruma sağlar. Gresler ekipmanda daha uzun süre kalabilir ve çoğu endüstriyel ortamda uygulanması daha kolaydır.

Fakat sıvı yağların ortamdaki uzaklaştırılması yani boşaltılması daha kolaydır ve ortamdaki ısıyı daha kolay uzaklaştırabilmektir. Sıvı yağlayıcılar iki veya üç temel bileşenden oluşur bunlar baz yağ ve katkı maddeleridir. Gresler için ise kıvam arttırıcı, kalınlaştırıcı adı verilen ek bir bileşen vardır. Bu bileşenler tamamlandıktan sonra yağ formülasyonu meydana gelmektedir. Bir formülasyondaki baz yağ, katkı maddeleri ve koyulaştırıcı ilavesi, hedef uygulama ve çalışma koşullarına göre belirlenmektedir [149]. Standart bir yağlayıcı akışkanda baz yağ %95 oranında bulunurken katkı maddeleri %5 oranındadır Yağlayıcının temel görevi cisimlerin yüzeylerini birbirinden ayırmak, ısı ve kirlenici maddeleri uzaklaştırmaktır. Ayrıca yağ performansının iki temel görevi vardı bunlar sürtünme ve aşınmaları gerekli oranda tutmak ve yağın devamlılığı bozulmasına rağmen bu devamlılığı sağlamaktır. Doğal veya mineral yağlardan oluşturulan yağlayıcılar kısmen işlenmiş kısmen de kirlidir. Kirlilik ve saflık arasındaki denge yağın oksidasyon kararlılığı için kritiktir ve onun çeşitliliği yağın uygulamalarına bağlıdır [152]. Baz yağa küçük konsantrasyonlarda katkı maddeleri adı verilen kimyasallar eklenerek özellikleri iyileştirilir. Katkı maddeleri yağın özelliklerini geliştirmede kritik öneme sahiptir ve yağın genel performansını geliştirmede kaçınılmaz rol oynar [149,152]. Katkı maddeleri, sıvı viskozitesinin ayarlanmasından bileşen yüzeylerinin aşınmaya karşı korunmasına kadar çeşitli işlevlere hizmet eder ve bu oranlar uygulamaya göre değişir [149]. Ayrıca yağın belirli karakteristikleri örneğin korozyon eğilimi, köpüklenme, pıhtılaşma, oksidasyon, aşınma direnci ve diğer özelliklerini belirler [152]. Yarı katı formda olması için kıvam arttırıcılar kullanılan gresler kesilene kadar akamaz ama yarı katı formları uygulamalara göre değişkenlik gösterir [149].

4.4.2. Baz Yağ

Yağlayıcıların çoğu baz yağdır ve üç genel türü vardır bunlar biyolojik, mineral ve sentetik yağlardır. Biyolojik yağlar gıda işleme ve ilaç endüstriden kirlenmenin olduğu durumlarda kullanılır. Mineral yağlar, mineral kaynaklardan hidrokarbonların karışımıdır ve ham petrol kaynaklarından damıtılır. Mineral bazlı yağlayıcılar düşük maliyet, hazır kullanılabilme ve çoğu uygulama için yeterli performansından dolayı sıklıkla mineral bazlıdır. Sentetik yağlar ise madeni yağlar ile elde edilemeyen belirli özellikleri elde edebilmek için yapay olarak oluşturulur ve sentezlenir [149].

4.4.2.1. Mineral Yağlar

Mineral yağın kökeni hakkında yaygın olarak kabul edilen hipotez fosil yakıt teorisidir. Mineral yağın bu teorisi tuzlu sudaki ölü bitkiler ve hayvanların bozulması sonucudur [152]. Mineral yağlar, değişen boyut ve yapıya sahip hidrojen ve karbondan oluşan hidrokarbon moleküllerinden oluşur. Mineral yağın oluşturulmasındaki ilk aşama ham petrolün ısıtılmasıdır ısıtılan ham madde buharlaştıktan sonra kademeli olarak soğutulur Mineral yağların elde edilmesi için ham petrolün damıtılması işlemi gereklidir kaynama noktası yüksek olan işlemin gerçekleştiği ekipmanın üst kısımda yoğunlaşırken düşük kaynama noktasına sahip olanlar ise alt noktada yoğunlaşır. Ham petrolün bileşenlerinin farklılaştırmak için basınç bazı süreçleri yönlendirebilir. Distilasyondan sonra yağlayıcı yağın oranları çeşitli rafinasyon işlemlerinden geçer. Rafinasyon ek bir damıtma saflığı arttırmak için organik çözücülerle karıştırma ve hidro-proses ve filtrasyon gibi kimyasal süreçleri içerir. Yağlayıcı yağların rafine edilmesinin ana amaçlarından biri ise yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerin, aromatik hidrokarbonların (karbon halkalı ve çift bağlı moleküller) ve kükürt ve nitrojen içeren bileşiklerin uzaklaştırılmasıdır. Mineral yağın kimyasal özellikleri ham petrolün kaynağına ve ayrıca rafine proseslerine ve distilasyona bağlıdır [149].

4.4.2.2. Sentetik Yağlar

Sentetik yağlar ya da sentetikler belirli kimyasal özelliklere sahip malzeme ve yağları elde etmek için belirli özelliklerde moleküllerin kimyasal olarak oluşturulmasıyla elde edilir. Bu malzemeler iyi bilinen yapılara ve öngörülebilir özelliklere sahiptir [149]. Mineral bazlı yağları sınırlamaları olan oksidasyon ve termal kararsızlık yüksek sıcaklıklarda viskozite kaybı düşük sıcaklıklarda katılaşma ve güçlü oksijen bileşenlerinin varlığında yanma veya patlama sentetik yağlar ile üstesinden gelinmektedir [149,152]. Bu etkiler, yüksek sıcaklıkta çalışması gereken yağlayıcılar gerektiren ve bazen de çok düşük sıcaklıklara dayanması gereken gaz türbini motorları gibi belirli özel uygulamalarda oldukça sınırlayıcıdır. Bir başka diğer örnekte ise vakum pompaları ve jet motorları gibi düşük buhar basınçlı yağlayıcılar gereklidir. Sentetik yağlayıcılar genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır bunları hem ortam koşullarında hem de yüksek sıcaklıklarda üstün yağlayıcılık sağlayan akışkanlar ve aşırı

sıcaklıklara veya kimyasal saldırılar için yağlayıcılardır. Yaygın olarak kullanılan dört tip yağlayıcı vardır. Bunlar; Sentetik hidrokarbonlar, Oksijen içerikli bileşikler, silikon içerikli bileşikler ve halojen içerikli bileşiklerdir. Sentetik hidrokarbonlar mineral yağlar ile benzer bir maliyete sahip olsa 'da daha iyi yağlayıcı özelliğine sahiptir. Slikonlar ise vakum ve sıcaklığın üst noktalarına direnci ekstremdir fakat iyi bir emilim veya yüksek basınç yağlayıcılığı sağlamaz ve pahalıdır [152]. Bu yağlayıcılar asaldır, mükemmel termal ve oksidasyon dengesine iyi viskozite sıcaklık karakteristiklerine ayrıca düşük uçuculuk, toksit ve yüzey gerilimine sahiptir. Viskozite sıcaklık aralığı -50 ile 370 °C aralığında çalışabilmektedir [149,152]. Oksijen içerikli sentetik bazlı yağlar polialkilen glikol veya polyglikol hem düşük hem yüksek sıcaklıklarda iyi bir sıcaklık viskozite ilişkisine sahiptir. Suda çözünebilen poliglikoller suyu emme eğilimindedir ve yaygın olarak fren sıvısı olarak kullanılmaktadır dahası endüstriye dişli yağları metal işleme yağları yangına dayanıklı hidrolik akışkanlarında kullanılmaktadır [149]. Halojenler ise adsorpsiyon ve yüksek basınç ile, yüksek sıcaklıklara direnç veya kimyasal saldırılara karşı etkili bir yağlayıcılık sunabilir. Bu yağlar iyi oksidatif ve termal denge ve ekstrem koşullarda örneğin vakum ortamında kullanılabilir. Halojen içerikli sentetik yağların maliyetleri fazladır benzersiz özellik kombinasyonlarının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Örneğin flor içeren Perfloropolieter, bilgisayarlardaki mekanik sabit diskler için yağlayıcı olarak kullanılmaktadır [149,152].

4.5. YAĞLAYICI KATKILARI

Katkı maddeleri, bir yağlayıcının performansını baz yağla elde edilebilecek olanın ötesinde artıran kimyasallardır. Bir yağlayıcıdaki katkı maddeleri seti, tipik olarak %1 ila %30 oranında yağlayıcı içeren bir katkı paketi olarak bilinmektedir. Bir paketteki her katkı maddesinin miktarı uygulamaya, çalışma koşullarına ve beklenen yağlayıcı ömrüne bağlıdır. Katkı miktarı toplam yağlayıcı ağırlığının ağırlıkça yüzdesi (wt.%) olarak ifade edilir [149]. Yağlayıcı katkıların spesifik amaçları yüksek basınç yağlayıcı ve emilim ile sürtünme ve aşınma karakteristiklerini iyileştirme, oksidasyon direnci geliştirme, korozyonu kontrol etme, reaksiyon ürünleri ile kirliliği kontrol etme, yüksek sıcaklıklarda yağın viskozitesinin aşırı düşmesini engelleme vb şeklindedir

[152]. Çizelge 4.1’de yağlayıcı formülasyonlarında kullanılan katkı maddelerinin dağılımları ve amaçları belirtilmektedir [149].

Çizelge 4.1. Farklı katkı maddeleri türleri ve bunların yağlayıcı formülasyondaki amaçları [149].

Katkı Maddesi	Amaç
Viskozite düzenleyici	Yüksek sıcaklıklarda viskozite artışı
Akma noktası düşürücü	Düşük sıcaklıklarda akışkanlığı etkinleştirme
Köpük önleyici	Hava kabarcıklarını engellemek
Oksidasyon İnhibitörü	Yağ oksidasyonunun oranını düşürmek
Dağıtıcı	Kirleticilerin toplanmasını engellemek
Deterjan	Kirliliklerden yüzeyi korumak
Korozyon İnhibitörü	Korozyondan yüzeyi korumak
Sürtünme düzenleyici	Sürtünmeyi azaltmak
Aşınma önleyici	Aşınmayı Azaltmak
Ekstrem basınç	Çeşitli koşullarda aşınmayı azaltmak

BÖLÜM 5

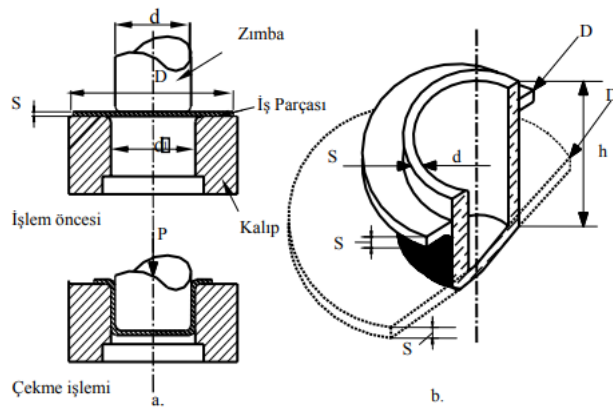
DERİN ÇEKME

5.1. DERİN ÇEKME İŞLEMİ

Derin çekme, sacın, saca uygulanan zımbanın (punch) gerilimi ile bir şekillendirme ekipmanı üzerinde radyal olarak sürüklendiği, düşük maliyetli ve etkili bir sac şekillendirme işlemi yöntemidir [154].

Sac metal şekillendirmesi, en yüksek kalitede ürün elde etmek için tasarlanmalıdır ki başarılı olsun. Günümüz tüketici beklentileriyle, üreticiler bu ihtiyaçları doğru teknik ve yöntemleri kullanarak karşılamalıdır. Bu işlemde kalıp üzerinde küçük bir metal disk parçası olan bir boşluk tutulur. İşlem için zımba, kalıp ve boş tutucu kuvvet gereklidir. Zımba, işlenmemiş parçayı kalıba doğru iter ve işlenmemiş parça, kalıbın şeklini alır [155,156].

Basit bir derin çekme kalıbı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Zımba kuvveti hariç diğer bütün elemanlar bağımsız değişkenlerdir. Derin çekme işlemini analiz etmek için Şekil 5.1a'da görülen şeklin incelenmesi gerekir. Burada da görüldüğü gibi derin çekilmiş kap, silindir şeklinde olduğundan taban ve tavan çapları birbirine eşittir. Şekil 5.1b'de perspektif görünümü mevcuttur.



Şekil 5.1 Derin çekme işlemi a) Şematik, b) Kesiti [157].

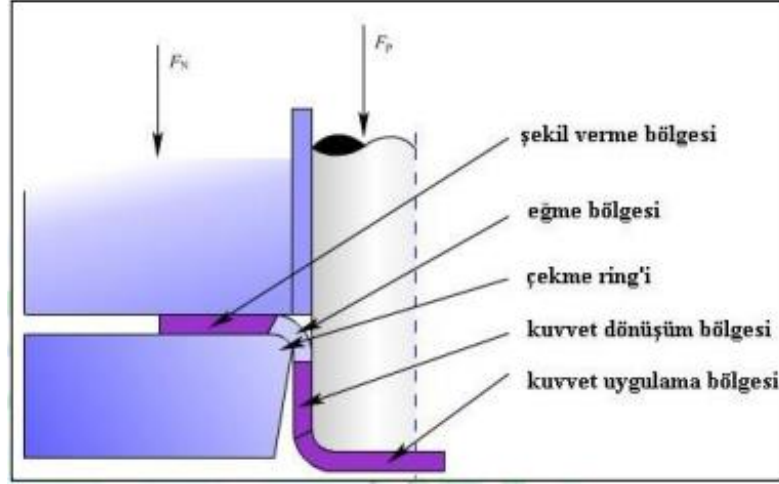
5.2. DERİN ÇEKMEDE TRİBOLOJİ

Klasik triboloji, sac şekillendirme işlemlerine az ilgi göstermiştir. Bundan dolayı derin çekme işlemine dayalı çalışmaların sayısı düşüktür. Klasik triboloji görüşü ile derin çekme arasında farklı bakış açıları vardır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Derin çekmede işlemlerinde sürtünme malzeme akışını kontrol etmek için gereklidir. Fakat klasik bakış açısında ise bu değer en aza indirilmelidir.
2. Takım ve ürünün malzemeleri, derin çekme işlemlerinde sınırlıdır. Nihai ürün özellikleri önceden belirlenmiştir (mekanik, yüzey özellikleri vb.) Takım malzemeleri karbon çelikleri alaşımlı çelikler veya dökme demirdir ve takım yüzeyinde aşınmaları minimize edebilmek için sert bir tabaka ile kaplanması yaygındır.
3. Derin çekme işleminde yeni malzeme deformasyon bölgelerine (zımba yarıçapı, kalıp yarıçapı vb.) her çekme işleminden sonra beslenir. Klasik triboloji 'de ise yüzeyler sadece bir kez etkileşime girer [158].

5.2.1. Derin Çekmede Temas Bölgeleri

Derin çekmede zımba, kalıp, ham parça tutucu ve ham parça arasında farklı temas bölgeleri vardır. Temas basıncı, yerel hız, gerinim oranı gibi parametreler farklı bölgelerde değişiklik gösterir ve sonucunda farklı sürtünme değerleri gözlenir. Bu bölgeleri sürtünme özelliklerine, zımba kuvveti etkilerine, sac tutucu kuvvetine ve iş parçasının çekilebilirliğine göre sınıflandırmıştır. Bölgeler Şekil 5.2'de gösterilmekte olup özellikleri şu şekilde özetlenebilir; şekil alan bölgede baskı plakası ile malzeme deki kırışma önlenir, eğme bölgesinde malzeme kalıp yarıçapı üzerinde şekil almaya zorlanır, cisme uygulanan kuvvetin uygulama alanında ise parçanın cidar bölümü şekil alır ve son olarak kuvvetin uygulandığı malzemenin alt yüzeyinde şekillendirme gerçekleştirilir [159].



Şekil 5.2. Derin çekmede temas bölgeleri [160].

Derin çekmede tribolojik koşulları etkileyen başlıca işlem parametreleri, kalıp giriş yarıçapı (r_d), çekme oranı ($DR = D_b/d_p$, boş çap/ıstampı çapı), çekme hızı (v) ve sac malzemenin kalınlığı (s_0) olarak sıralanabilir. Ayrıca, birleşim ve mekanik özellikler açısından sac malzemenin türü önemli bir rol oynar. Bu parametreler, yerel takım basınçları, kayma hızını ve işlem sırasında yağ filmi üzerinde etki eden sıcaklığı etkiler ve bu nedenle yağlamaya ilişkin mekanizmaları ve koşulları etkiler bu da yağ filminin bozulması için kritik öneme sahiptir.

Kalıp Giriş Yarıçapı (r_d): Kalıp giriş noktasındaki yarıçap, daha keskin bükme ve daha küçük temas alanından dolayı yüzey basıncını etkiler. Daha küçük kalıp giriş yarıçapı, yüzey basıncını artırır.

Çekme Oranı (DR): Boşluk çapının (D_b) punç(zımba) çapına (d_p) oranı olan $DR = D_b/d_p$, kalıp yarıçapındaki normal basıncı etkiler. Daha büyük çizim oranları daha yüksek normal basınçlara ve kalıp yarıçapındaki kayma uzunluğunun artmasına neden olur.

Çekme Hızı (v): Çekme işleminin gerçekleştirildiği hız, yerel takım basınçlarını, kayma hızını ve sıcaklığı etkiler. Daha yüksek çizim hızları, takım/parça ara yüzeyinde artan sıcaklığa yol açabilir.

Levha Malzemesi Kalınlığı (s_0): Levha malzemesinin başlangıç kalınlığı, yerel takım basınçlarını ve çizim işlemi sırasındaki malzemenin genel deformasyonunu etkiler.

Levha Malzemesi Özellikleri: Levha malzemesinin bileşimi ve mekanik özellikleri önemlidir. Bu özellikler, deformasyona malzemenin tepkisini belirlemede önemli bir rol oynar ve takım basınçları, kayma hızı ve yağlamayı etkiler.

Kalıp giriş yarıçapını azaltmak, sac malzemenin daha keskin bükülmesi ve daha küçük bir kalıp temas alanına sahip olmasından dolayı yüzey basıncını artırır. Boş çapın başlangıç boyutunu artırmak ve dolayısıyla çizim oranını artırmak, daha büyük çekme kuvvetine bağlı olarak kalıp yarıçapındaki normal basıncın artmasını ve aynı zamanda kalıp yarıçapının üzerinde kayma mesafesinin artmasını içerir, her ikisi de takım/iş parçası arayüzündeki sıcaklığın artmasına neden olur. Çekmenin son aşamasında flanş kenarının çekilmesi de daha şiddetlidir.

Bu nedenle, işlem parametrelerinin sistemli bir şekilde değiştirilmesiyle, yağlayıcılar derin çekmede tribolojik olarak test edilebilir ve bireysel olarak sıralanabilir (Şekil 5.2) [158].

5.2.2. Derin Çekmenin Genel Özellikleri

Derin çekme prosesleri, çoğu uygulamada benzer olan bir dizi iç ve çevresel özelliğe sahiptir. Bu çalışmanın konusu olan aksel simetrik derin çekme işlemi de aşağıdaki gibi özetlenebilecek bu özellikleri göstermektedir:

1. Sistemde kullanılan ham metal, zımba, kalıp ve iş parçası tutucusu vardır.
2. Takımlar işlenmemiş malzemedenden daha pürüzsüz ve yumuşaktır; daha sert bir malzeme ile kaplanabilirler.
3. İşlenmemiş parça da daha pürüzlü ve nispeten daha serttir ve işlem sırasında plastik olarak deforme olur.
4. Çevresel koşulların oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta olduğu varsayılmıştır.
5. Hafif hizmet koşulları olmadıkça her zaman ticari bir yağlayıcı kullanılır [158].

5.3.3. Derin Çekme ile İlgili Çalışmalar

Aleksandrović vd. (2011), düşük karbonlu elektro-galvanizli çelik sacların monoton olmayan iki fazlı derin çekme işlemi üzerindeki belirli bir tribolojik sistemin etkisinin araştırılmasına ilişkin deneysel sonuçlar sunmuştur. İlk aşama, uzama işlenmemiş malzeme üretiminin %10'una ulaşana kadar şeritlerde tek eksenli gerilimi içeriyordu. Bunu derin çizim takip etti. Levha düzlemindeki ana gerinimlerin çekme kuvveti ve dağılımı izlendi. Yazarlar, süreç sonuçlarını iyileştirmek için somut monoton olmayan şekillendirme yöntemini kullanmanın mümkün olduğunu belirttiler [161].

Drossel vd. (2019), üst kalıp ile pres şahmerdanı arasındaki kuvvet ölçüm platformuna dayalı olarak derin çekmede normal kuvvet dağılımını ölçmek ve kontrol etmek için yeni bir mekatronik sistem inşa etmiştir. Ortaya çıkan kuvvet konumunun sistematik olarak ayarlanması ve ölçülmesi, çekme işleminin kontrol edilmesinin yanı sıra işlem güvenilirliğinin ve çekilen parça kalitesinin sağlanması için yeni bir olanak sunar [162].

Tiwari vd. (2022), sürtünme, boş tutucu kuvveti, yağlama, işlem sıcaklığı ve çizilen parçanın şekli dahil olmak üzere derin çekme işlemini etkileyen faktörler üzerine yapılan çalışmaları gözden geçirdi. Söz konusu faktörlerin süreç üzerindeki etkisinin optimize edilmesiyle sürecin sonuçlarının tahmin edilebileceğini, yani istenilen ürünün kalitesinden ödün vermeden elde edilebileceğini belirttiler [163].

Ikumapayi vd. (2022), derin çekme işleminin süreç uygulamalarını, avantajlarını ve dezavantajlarını kapsayan "derin çekmenin kısa bir özetini" gerçekleştirdi. Yazarlar, sıcak derin çekmenin metalurjik özellikleri hakkında bilgi eksikliği olduğunu belirtmişlerdir [164].

Szewczyk vd. (2022), 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacların düz kalıp şerit çekme testinde derin çekme kalitesindeki çelik sacların sürtünme özelliklerini dikkate almıştır [165].

Hetz vd. (2020), çapraz profil derin çekmede "geri yaylanma" davranışı olarak adlandırılan davranışı dikkate almıştır. Böyle bir davranış, yarı mamulde ortaya çıkan artık gerilimlerin bir sonucudur. Yazarlar, AA7020-T6 ve AA7075-T6'nın geri esneme davranışını geri esneme açısı aracılığıyla araştırmak için yeni bir yaklaşım

önerdiler. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda geri esneme davranışının incelenmesinin önemli olduğunu da tavsiye ettiler [166].

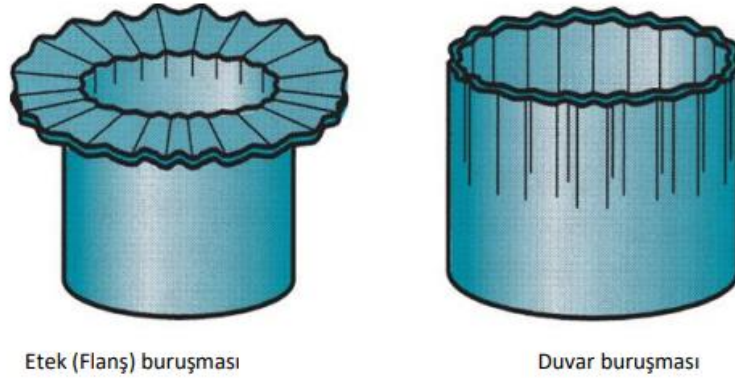
Dwivedi ve Agnihotri (2017), derin çekme işlemini optimize etmek amacıyla derin çekme işlemi parametreleri üzerine bir çalışma yürüttüler. Dikkate alınan parametreler arasında iş parçası tutma kuvveti, sürtünme ve iş parçası tutucu basıncı yer alıyordu. Yazarlar, başarılı bir derin çekme üretim süreci için, süreci etkileyen tüm parametrelere ilişkin derin bilginin "bir zorunluluk" olduğu sonucuna varmışlardır [167].

5.3. DERİN ÇEKME KUSURLARI

Sac metallerin derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi germe, çekme, eğme, basma veya bu işlemlerin değişik kombinasyonlarını içerir. Şekillendirme esnasında oluşan büyük deformasyonlar nedeniyle buruşma, yırtılma, kulaklanma, sürtünme, aşınma, yağlama vb. kusurlar oluşur. Bu kusurlardan bazıları aşağıda incelenmiştir [168].

5.3.1. Derin Çekmede Buruşma

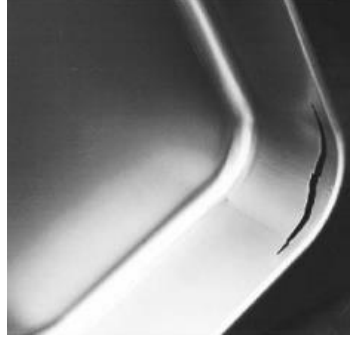
Derin çekilen numunelerin alt ve üst yüzeylerinde kırışmalar oluşabilir (Şekil 5.3). Kırışmayı engellemek için kalıp boşluğu ve zımba kuvveti kontrol edilmelidir. Ek olarak kalıp geometrisi ve punç yapısındaki radius kırışmayı engelleyecek bir şekilde tasarlanmalıdır [157].



Şekil 5.3. Buruşma şekillerine ait görseller [169].

5.3.2. Derin Çekmede Yırtılma

Meydana gelen önemli kusurlardan bir tanesi de yırtılma veya kopmadır. İşlem esnasında kap duvarları düşey yönde çekme gerilmelerine ve uzamaya maruz kalır. Bu yüzden duvar kalınlığı inceler ve kopar/yırtılır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Derin çekilmiş bir numunenin yırtılmasına ait görsel [160].

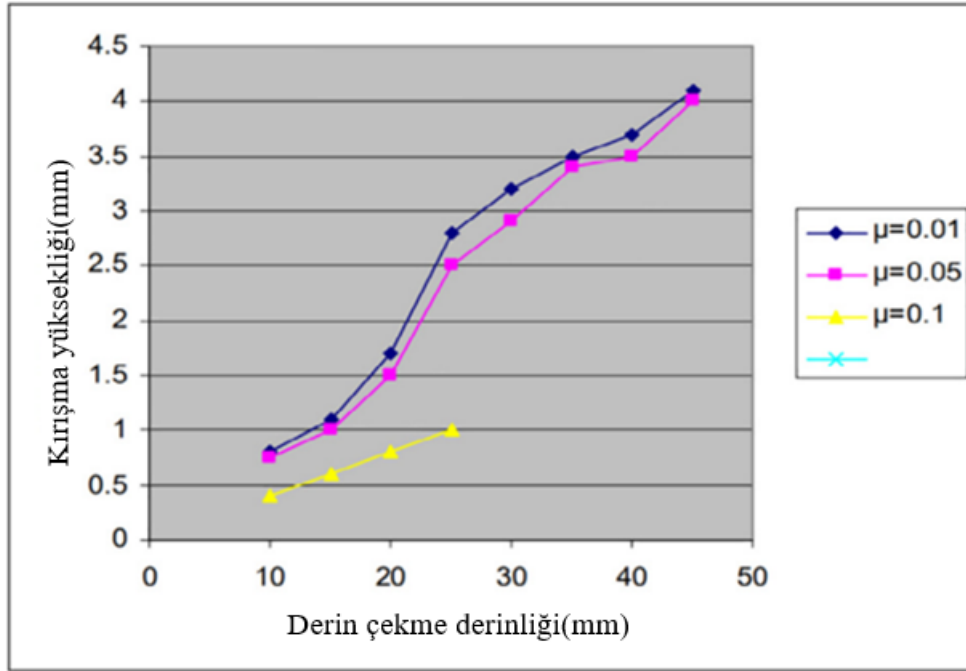
5.3.3. Derin Çekmede Sürtünme

Malzemenin şekillendirilme sırasında ortaya çıkan ve ürünün derin çekilmesinin ve malzemenin yüzey kalitesini önemli oranda etkileyen bir faktördür ve büyüklüğü oldukça önemlidir. Derin çekme işlemi sırasında gerekli olacak birçok önemli konu ancak sürtünmenin bilinmesiyle tahmin edilebilir ve sürtünmenin derin çekme işlemine etkisi oldukça fazladır. Sürtünme katsayısı aynı zamanda oluşan hasarı da etkiler ve hasarla doğru orantılıdır [170,171]. Sürtünme katsayısı 0,1'den büyükse çevresinde kırılma ve kırışıklıklar görülür. 0,005'in altında olması yağlama işleminin zor olacağını ancak çatlama ve kırışıklıkların sıfır olacağını gösterir. Toplu şekillendirme ve levha şekillendirme proseslerinde sürtünmenin, malzeme akışını ve istenen yükü etkilediği için en önemli parametre olduğunu söyledi [171]. Bir değer sürecin başında çok fazla etkisi olmasa da zımbanın hareketi arttıkça sürtünmenin etkisi de çok daha fazla olur. Sürtünmeyi artırarak kırışmanın en aza indirilebileceğini gözlemlemiştir [172]. Sürtünmenin azaltılması stresin azalmasına neden olur. Sürtünme azaldığında elemanın minimum kalınlığında bir iyileşme olur. 0,05 sürtünme katsayısında minimum incelme gözlemlendi. Sürtünmenin azalmasıyla birlikte gerekli zımba yükü de azalır. Kalıp boşluğundaki metal akışı da sürtünmeye bağlıdır.

Sürtünme azsa kalıp boşluğundaki metal akışı da düzgün olur. Ürünün şeklinin veya tasarımının karmaşıklığının artmasıyla birlikte sürtünmenin proses üzerindeki etkisi de artmakta ve en çok etkileyen faktör haline gelmektedir. Sürtünme azaldıkça incelme %25'ten %16'ya çıkar. Sürtünme 0,2'den 0,06'ya düştükçe kalınlık dağılımı 0,75108'den 0,873'e iyileştirildi.

Parça boyutu küçük olduğunda sürtünme belirgin hale gelir. Sürtünmenin az olması durumunda kırışmanın kolaylıkla gözlemlendiğini söylemişlerdir [173]. Kırışmanın sürtünmeye bağlılığı görülebilir (Şekil 5.4).

Ancak sürtünme kuvveti çok yüksek olursa malzeme kırılabilir. Bu nedenle Sürtünme çok önemli bir parametredir.



Şekil 5.4. Sürtünme ve derin çekme derinliğinin kırışmaya bağlılığı [173].

5.3.5. Derin Çekmede Aşınma

Derin çekme kalıplarında kalıp ömrünü etkileyen en önemli faktör, kalıp elemanlarının aşınması ve bu aşınmanın da belirli bölgelerde yoğunlaşmasıdır. Bunun sonucu olarak, üretilen parçaların ölçü hassasiyeti ve yüzey kalitesi bozulur. Genellikle bunlar kalıp elemanlarının ne zaman ve hangi sıklıkta yenileneceğini tayin eder. Kalıp ağzı dairesel olarak seçilmişse ve flanşlı iş parçalarında flanş kavisinde bir sınırlama yoksa pratik

olarak kalıp kavis yarıçapı malzeme kalınlığının on katı veya daha fazlası alınabilir. Kavis yarıçapının küçük olması halinde çekme kuvveti artacağından sürtünme ve dolayısıyla aşınma da artar. Kalıp ağzı profili konik olarak seçilmiş ise, parça çapı ve malzeme kalınlığının artması ile açılı küçülür. Kalıp malzemesinin yeterli sertliğe sahip olmaması ve yanlış kalıp malzemesi kullanılması da aşınmayı fazlalaştırır. Derin çekme kalıplarında kullanılan malzemelerin sertliğinin yanı sıra aşınma direncinin de yüksek olması gerekir [157].

5.3.6. Derin Çekmede Yağlama

Derin çekme işlemlerinde baskı plakası ve kalıbın çekme yüzeylerinin hassas işlenmesi ve uygun şekilde yağlaması sürtünmeyi azaltır. Yağlar, yüzeye yapışarak adhesiv aşınmayı önler. Derin çekme işlemlerinde sac cinsine göre kullanılması tavsiye edilen yağlayıcı maddeler verilmiştir. Ancak yağ filmi bazen yırtılabilir. Bunu önlemek için çekme bölgesinde üzerinde delik bulunmayan çekme kalıplarında basınçlı yağlama sistemi uygulanır [157]. Sac metal şekillendirme işlemleri dünya çapında gerçekleştirilen imalatların büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde şekilli parçaların tasarımı, imalatı ve montajına yılda 100 milyar doların üzerinde harcandığı tahmin edilmektedir. Otomotiv ve havacılık gibi çoğu büyük endüstride sac metal şekillendirme, ürün yaratmanın en kritik bileşeni olarak kabul edilir. Şekillendirme işlemleri sırasında, sacın şekillendirilebilirliğini arttırmak için yağlayıcılar genellikle takım-iş parçası arayüzü boyunca uygulanır. Bu yağlayıcılar, pürüzleri hidrodinamik olarak ayıran filmler sağlar ve temas basınçlarının daha eşit bir şekilde dağıtılmasına olanak tanır, bu da sonuçta takım ömrünü artırır ve şekillendirilen parçaların yüzey kalitesini artırır.

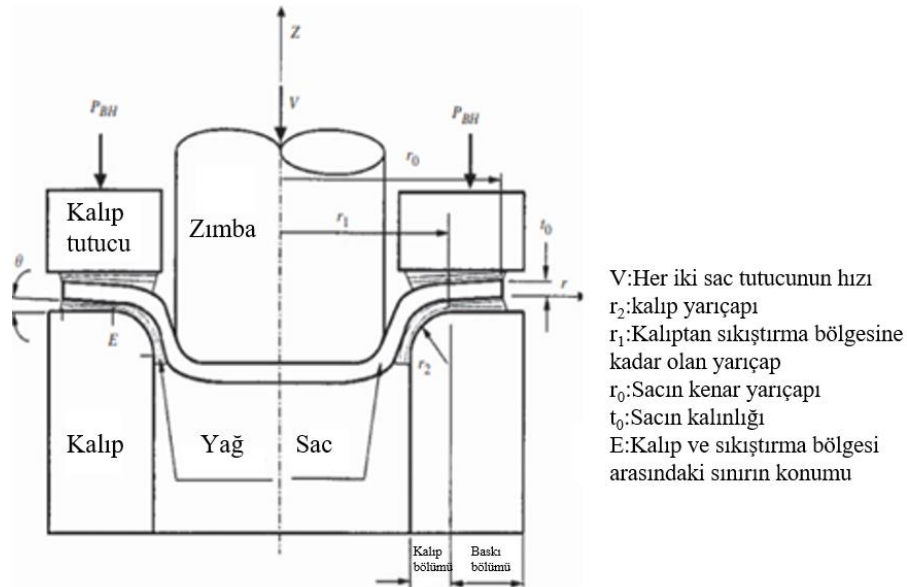
Şekillendirme operasyonlarında kullanılan yağlayıcılar imalat camiasına önemli çevresel ve ekonomik zorluklar yaratmaya devam etmektedir. Bu zorluklar aşağıdaki faktörlerden kaynaklanmaktadır:

1. Sac metal parçaların tatmin edici şekillendirilebilirliği ve yüzey kalitesi, kuru koşullar altında nadiren elde edilebilir.
2. Sac şekillendirmede kullanılan neredeyse tüm yağlayıcılar yağ veya gres bazlıdır; her ikisi de önemli miktarda kirlenici madde katar.

3. Şekillendirme yağlayıcıları hem birincil kullanım hem de imhası sırasında sıklıkla insanlar için sağlık riski taşır.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için mevcut tez çalışması, sac şekillendirme işlemleri için yeni, çevre dostu bir yağlayıcının geliştirilmesine ve test edilmesine odaklanmaktadır. Karbon türevlerinden oluşan bu yağlayıcılar, doğaldır, çevre dostudur ve daha önce aşınma deneylerinde mükemmel yağlama özellikleri göstermiştir [174].

Çeşitli yağlar arasındaki üst kitlede kalınlaşmanın, çekme işleminin başlamadan önce kalıp ve boş tutucu yüzeyinin en üst kısmını birleştiren boş bölgede gerçekleştiği görülmüştür. Bu kalınlaşmanın, başlatılan basınç yüklerine atfedildiği belirtilmiştir. Kuru koşullardaki en büyük incelmeyen, yağlanmış koşullardaki incelmeye kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Kuru koşullardaki en büyük inceme oranı %12,15 iken, yağlanmış koşullardaki oran %6,8'dir. Bu durum, yağların boyun oluşumunu ve kırılma başlangıcını azalttığını göstermektedir. Temelde, yağlar kırışıklığı azaltmış ve çekilmiş numunelerin kulaklarının yüksekliğini düşürmüştür. Çeşitli yağlar ve farklı zimbalar ile yapılan otografik kayıtların değerlendirilmesi, bunlar arasında hatta kuru koşullarda bile son derece az veya hiç fark olmadığını ortaya koymuştur. Derin çekme işleminde yağlama ait Şekil 5.6'da gösterilmiştir [175].

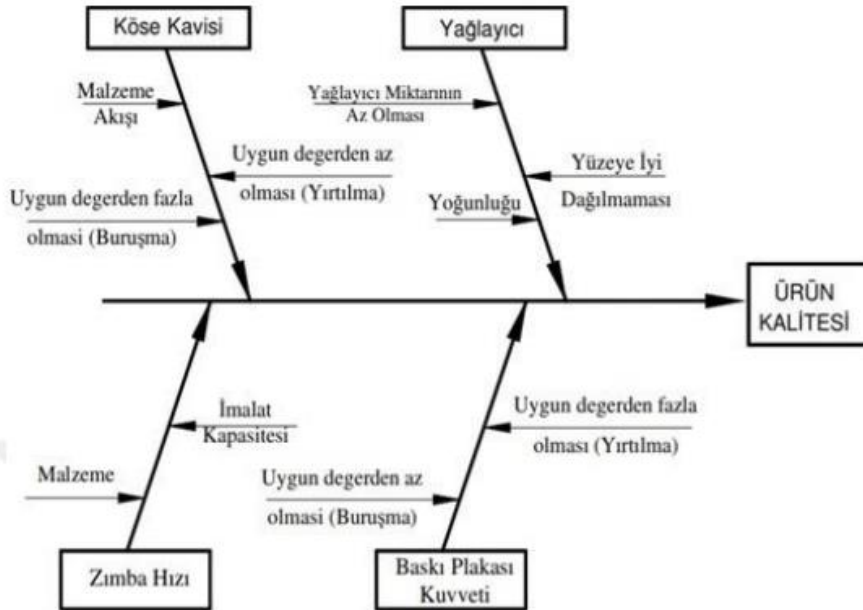


Şekil 5.6. Derin çekme işleminde yağlama [175].

Şu anda 10.000'den fazla farklı mineral ve sentetik yağlayıcı kullanılmaktadır [176]. Bununla birlikte, mineral yağların önemli sağlık riskleri ve artan maliyetleri, potansiyel ikameler olarak yeşil alternatiflerin teşvik edilmesinde küresel bir değişime neden olmuştur. Geleneksel mineral yağlardan [177,178] daha iyi tribolojik özelliklere sahip, çevre dostu, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel yağlar [179], petrol bazlı yağlayıcıların yerini alacağı kabul edilmektedir. [180]. Dünya gıda krizleriyle karşı karşıyayken bitkisel yağların kaynağı, üretimden çekilen partilerde veya son kullanma tarihi geçtiği için geri çekilen yağlarda görülebiliyor. Bu yağlar insan tüketimine uygun değildir ancak geri dönüşümden önce metal şekillendirmede yağlayıcı kaynağı olabilir.

5.4. DERİN ÇEKMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Derin çekmeyi etkileyen birçok parametre olmakla beraber zımba hızı, matris yuvarlatma yarıçapı, baskı plakası kuvveti ve yağlamanın doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Bu parametreler uygun seçilmediğinde en çok karşılaşılan kusurlar buruşma ve yırtılmadır. Balık kılçığı diyagramında bu dört ana parametrenin ürünü nasıl etkilediği görülmektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Balık kılçığı yöntemiyle derin çekmeyi etkileyen parametreler [181].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında dikkate alınan metodoloji Şekil 6.1’de verilmiştir. Kimyasal karakterizasyon aşamasında, sentezlenen HTC’ler kimyasal karakterizasyon aşamasında teflon, grafen, fulleren ve karbon nano-tüp (vasıflı karbonlar) ile kıyaslanmış ve bu karbonlar hem aşınma hem de ılık derin çekme deneylerinde HTC’nin tribolojik performansının analizinde kullanılmıştır. Teflon, Grafen, fulleren ve karbon nano-tüp ticari olarak temin edilmiştir.



Şekil 6.1. Çalışma metodolojisi.

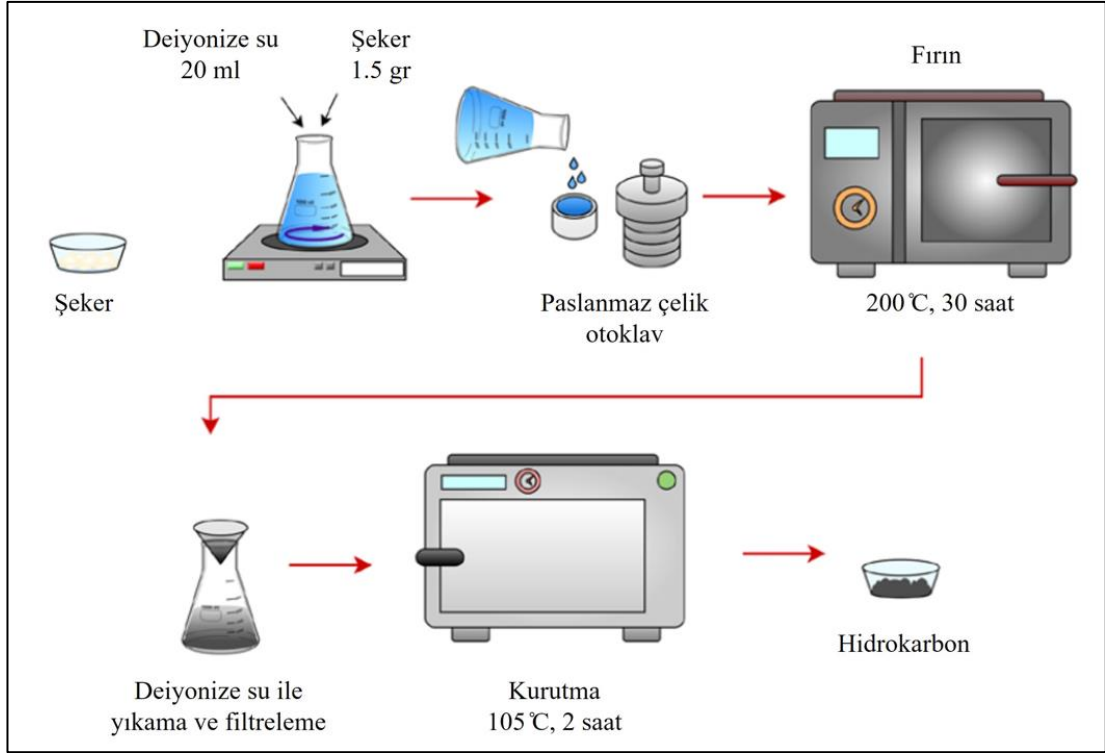
Ilık derin çekme prosesinin önemli bir bileşeni de şekillendirilecek malzemenin karakteristiğidir. Alüminyumun (Al) düşük yoğunluğu (2700 kg/m^3) ve yüksek spesifik mukavemet özelliği, özellikle otomotiv, elektronik ve savunma gibi hafif konstrüksiyon odaklı endüstrilerde ilgi uyandırmaktadır [182–187]. Benzer şekilde

magnezyum da (Mg) düşük yoğunluğa (1738 kg/m³) ve yüksek spesifik mukavemete sahiptir [188–190]. Fakat Mg, hekzagonal sıkı paket yapısı sebebiyle ancak ılık koşullarda (~300 °C) şekillendirilebilmektedir [22,191]. Bu sebeple, şekillendirme esnasında sıcaklığa bağlı olarak sürtünme, aşınma ve yağlayıcının bozulması odaklı problemlerin oluşması kaçınılmazdır. Tez kapsamında iş parçası olarak, ülke içinde temin edilebilirliği mümkün ve endüstriyel kullanım alanı mevcut olan AA5754-O Al-Mg alaşımı kullanılarak, malzemenin derin çekilebilirliğinin, yağlayıcının tribolojik performans kriterlerine bağlı olarak artırılması hedeflenmektedir. Geliştirilecek HTC esaslı yağlayıcı ile çeşitli sıcaklık koşullarında oluşan yırtılma, buruşma, derin çekme oranı, yüzey kalitesi, incelme parametreleri dikkate alınarak, malzemenin derin çekilebilirliği arttırılmaya çalışılacaktır.

6.1. HTC SENTEZİ

Hidroçarların iç yapısı genellikle karbonca zengin aromatik kürelerden oluşmakta iken yüzeye yakın grupları genellikle oksijen ihtiva eden ketonik gruplardan (C=O) ve sp² hibritleşmesi gerçekleştirmiş alken gruplarından (C=C) oluşmaktadır. Belirtilen gruplar kararlı yapıda olduklarından hidroçarı oluşturan atom grupları arası van der Walls çekimleri ve $\pi - \pi$ etkileşimi azalmaktadır [192,193]. Bu sayede farklı endüstriyel koşullarda kararlılığını koruyan karbon esaslı yağlayıcı eldesi mümkün olmaktadır.

Aşınma deneylerinde kullanılan hidroçarlar şu şekilde üretilmişlerdir; Paslanmaz çelikten imal edilmiş otoklavın içinde bulunan 50 ml hacimli teflon kaba 1,5 gram glukoz ve üzerine 20 ml deiyonize su ilave edilmiştir. Kapağı sıkıca kapatılan otoklav önceden 200 °C'ye ısıtılmış fırında 30 saat bekletilmiştir. Fırından çıkartılan otoklav oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra katı ve sıvı ürünler birlikte otoklavdan alınmıştır. Teflon kap, otoklav ve fırın için kullanılan şematikler, Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Ürünler 300 ml deiyonize su ile yıkanarak filtre kâğıdı kullanılarak süzölmüştür. Daha sonra filtre kâğıdı üzerinde kalan katı ürün 105 °C sıcaklıkta 2 saat kurutulduktan sonra cam kaplarda muhafaza edilmiştir. Daha detaylı bilgiler önceden yayımlanmıştır [31].



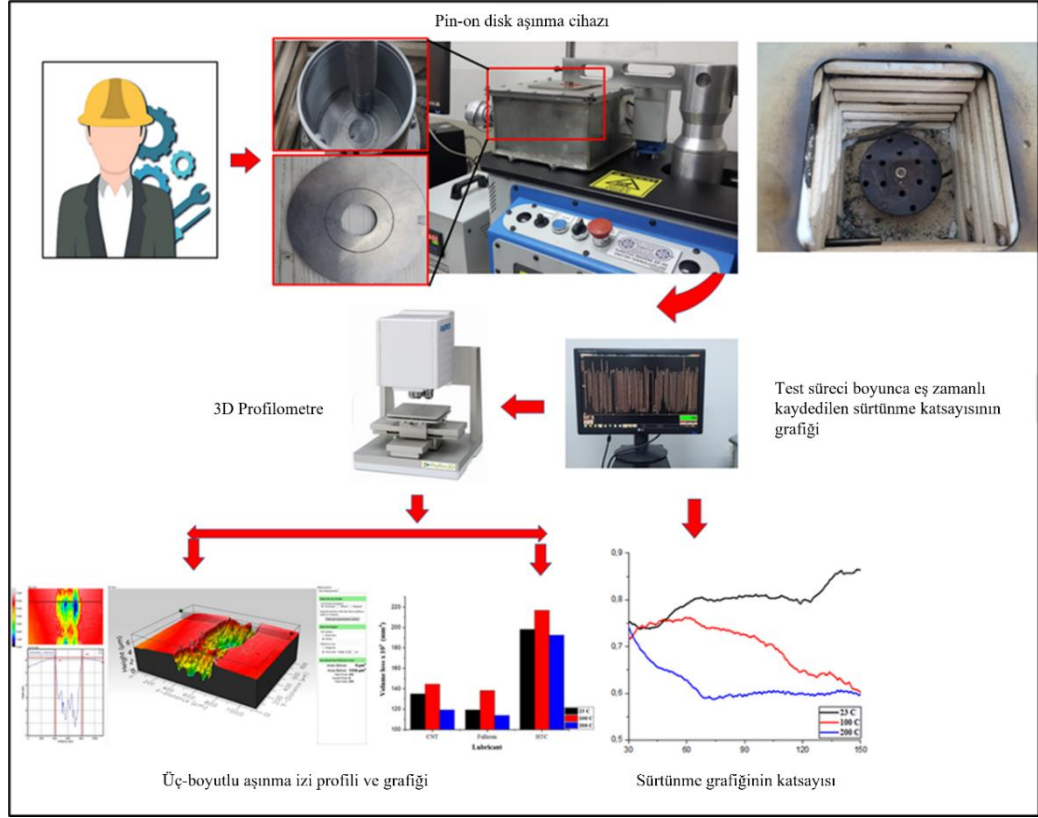
Şekil 6.2. HTC sentezinin şematığı.

6.2. YÜKSEK SICAKLIK KOŞULLARINDA YAPILAN PİN-ON-DİSK AŞINMA TESTİ

Aşınma deneyleri, ılık derin çekme prosesi öncesi yağlayıcılar hakkında ön fikir vermesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda (~200 °C'ye kadar) gerçekleştirilen aşınma deneyleri için kullanılan Turkyus (TURKYUS POD&HT&WT) marka aşınma cihazına ait görüntü Şekil 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.3'te aşınma cihazına entegre edilmiş olan ısıtma ünitesinin resmi de görülmektedir. Pin-on-disk yöntemiyle deneyler gerçekleştirilmiş olup, deneylerde pin malzemesi olarak 50 HRC (469 HB) sertlikte rulman çeliği kullanılmıştır. Derin çekme deneylerinde kullanılacak olan AA5754-O (50 HB) malzeme, aşınma deneylerinde disk (altlık malzeme) olarak kullanılmıştır. Sıcak aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi için pin-on-disk aşınma ünitesinin üzerine rezistanslı ısıtma sistemi eklenmiş ve deneyler adyabatik ortamda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü için T tipi (Cu-CuNi) ısıl çift kullanılmış ve 0,1 °C hassasiyette ölçüm yapılmıştır. Sürtünme katsayısı tespiti için $\pm 0,01$ N hassasiyetinde tek eksen dinamometre kullanılmış, kuvvet verileri yazılım vasıtasıyla sürtünme katsayısına çevrilmiş ve

grafikleştirilmiştir. Deneyle sonucunda meydana gelen aşınma izinin boyu 1/10'luk kumpas ile, aşınma izinin derinliği ve eni ise 2D profilometre cihazı (Portable Surface Roughness Tester (Sj-410 Series)) ile belirlenmiştir. Hacim kaybı verileri Eş. 1'deki bağıntıya göre hesaplanarak elde edilmiştir. Eşitlik 6.1'de verilen a, b ve c değerleri sırasıyla aşınma izinin enini, derinliğini ve strok mesafesini ifade etmektedir [194]. Deneysel süresi için derin çekme deneyinin gerçekleşme süresi referans alınmış ve 150 sn'de her bir aşınma deneyi tamamlanmıştır. Bütün deneylerde yük ve hız parametreleri sabit tutulmuş olup, deneyler 1 m/sn çevresel hızda ve 20 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde sadece sıcaklık (oda sıcaklığı, 100 °C ve 200 °C) ve yağlayıcı türü değiştirilmiştir. Aşınma deneyleri kapsamında vasıflı karbonlar (HTC, fulleren, CNT) aşınma testine tabi tutulmuştur. Vasıflı karbon malzemelerin deney sistemine tatbik edilebilmesi için aqua-jel sıvısı kullanılmış ve yüksek viskoziteli (ph:7, 25 °C'de ~11500 cP) dispersiyon elde edilmiştir. 20 gram aqua-jel ile %4 konsantrasyonda vasıflı karbon kullanılarak dispersiyon hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi için mekanik karıştırıcı (50 rpm bir saat) kullanılmıştır. Hacim kaybı ölçümü için 2D topografya görüntüleri dikkate alınmıştır.

$$V = \frac{2}{3} a \cdot b \cdot c \quad (6.1)$$



Şekil 6.3. Aşınma test cihazı ve aşınma izlerinin 3D analizine ait şematik gösterimi.

6.3. ILIK/SOĞUK ORTAM DERİN ÇEKME DENEYLERİ

Derin çekme deneylerinde kullanılan 100 tonluk çift etkili prese ait görüntü Şekil 6.4'te verilmiştir. Ilık derin çekme deneyleri (250 °C'ye kadar) için seramik rezistanslı ısıtıcı, yalıtım için de taş yünü malzeme kullanılmıştır (Şekil 6.4). Tez kapsamında geliştirilen HTC esaslı yağlayıcının derin çekme işlemindeki tribolojik performansını belirleyebilmek için 1,7 derin çekme oranında (LDR) deneyler gerçekleştirilmiştir. 1,7 değeri ön çalışmalar ile belirlenmiş, yırtılma ve marullanma kusurlarının oluşmadığı koşul dikkate alınmıştır. Bütün deneylerin kararlı bir şekilde gerçekleştirilmesi ve farklı yağların tribolojik performanslarının kıyaslanabilmesi için kararlı sonuç alınabilen bir LDR'de çalışılması önem taşımaktadır. İstampa ve baskı plakası 4140 çeliğinden imal edilmiş ve ıslah işlemi ile ~50 HRC değerine kadar sertleştirilmiştir. Baskı plakası basıncı 1 bar hassasiyetle ayarlanmış, sıcaklık kontrolü ise ± 5 °C sapma ile kontrol edilmiştir. Ilık şekillendirme prosesi için yağlayıcı geliştirme amacıyla hazırlanan deney tasarımı çizelge 6.1'de verilmiştir. Deney tasarımında yağlayıcı türü (6 seviye), baskı plakası basıncı (3 seviye), ıstampa hızı (3 seviye) ve şekillendirme

sıcaklığı (3 seviye) parametreleri dikkate alınmıştır. Taguchi L18 ortogonal dizinine göre deney tasarımı yapılmıştır. Tam faktöriyel tasarımda 162 (6x3x3x3) deney yapılması gerekirken, Taguchi (kesirli faktöriyel tasarım) tasarımı ile 18 deneyde yeterli deney sayısına ulaşılabilmektedir. Parametre seviyelerinin kolaylıkla belirlenebilmesi, zaman ve maliyet tasarrufu sağlaması amacıyla Taguchi tasarımı tercih edilmiştir.



Şekil 6.4. Derin çekme ünitesi a) ve yalıtılmış kalıp sistemine b) ait resimler c) bileşenler.

Çizelge 6.1. Derin çekme deneylerinde dikkate alınan parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Seviyeler						
Yağlayıcı Türü	6 seviye	HTC	CNT	Fulleren	Grafen	Teflon	Baz Gres
Sıcaklık (°C)	3 seviye	Oda Sıcaklığı		200		250	
Baskı Plakası Basıncı (bar)	3 seviye	10		15		20	
Şekillendirme Hızı (mm/s)	3 seviye	2		4		6	

Ilık derin çekme deneylerinde yağlayıcı olarak kullanılan HTC proje kapsamında sentezlenmiş, diğer yağlayıcılar ticari olarak temin edilmiştir. Hem sıcak hem de soğuk çekme deneylerinde, endüstriyel olarak yoğun kullanım alanına sahip olan teflon (PTFE) yağlayıcı performans kıyaslaması amacıyla kullanılmıştır. Deneysel çalışmada grafitin de kullanılması düşünülmüş fakat aşınma deneylerinde grafitin performans

olarak diğ er vasıflı karbonlarla kıyaslanamayacak derecede yüksek tribolojik performansa sahip olduğu belirlenmiştir. İstatistiksel analizlerde fiziksel olarak anlamsız sonuçların çıkacağı düşünülerek grafit esaslı yağlayıcı derin çekme deney tasarımında kullanılmamıştır. Aşınma deneylerinde aqua jel ile dispersiyon halinde hazırlanan yağlar, aqua-jelin sıcak koşullarda buharlaşması sebebiyle anlamlı tribolojik performans sergileyememiştir. Bu sebeple HTC ve diğ er vasıflı karbonlar ılık derin çekme deneylerinde lityum esaslı gres ile karıştırılarak baskı plakası-malzeme arayüzeyine tatbik edilmiştir. Lityum esaslı gres oda sıcaklığı koşullarında aqua-jel ile benzer viskoziteye sahip olduğu için tercih edilmiş, sıcak koşullarda ise kararlı deneysel sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir (ph:10, 25 °C’de ~10000 cP). Her bir karışımda 20 gram lityum esaslı gres kullanılmıştır. Bütün yağlayıcılar için, literatür referans alınarak sabit %4 konsantrasyon oranında deneyler yapılmıştır. Yağlayıcılar, iş parçasının flanş bölgesinin alt ve üst yüzeylerine yaklaşık 50 µm kalınlık oluşturacak şekilde uygulanmıştır. İlaveten, sadece lityum esaslı gresin kullanıldığı koşullarda da deney yapılarak HTC ve diğ er vasıflı karbonların baz etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Şekillendirme kuvvetinin ölçümü için tek eksenli yük hücresi ve data-logger kullanılmış, kuvvet verileri şekillendirme işlemi süresince bilgisayara aktarılmış ve maksimum kuvvet verisi analize tabi tutulmuştur. Kalınlık değişimi ölçümü için 1 µm hassasiyetinde dijital mikrometre kullanılmıştır. Kalınlık değişimi ölçümü için öncelikle, derin çekilmiş numuneler simetrik iki parça olacak şekilde kesilmiş ve sonra kap tabanı merkezinden ıstampa radyüsüne, ıstampa radyüsünden de kap duvarının bitimine kadar 7 farklı noktadan kalınlık ölçümü alınmıştır (Şekil 6.5). Kalınlık değişimi parametresinin incelenmesinde minimizasyon hedeflenmiş ve bu doğrultuda Minitab programı kullanılarak istatistiksel analizler yapılmıştır. Taguchi deney tasarımına göre yapılan optimizasyonda şekillendirme kuvvetinin minimizasyonu hedef fonksiyon olarak belirlenmiştir. Derin çekme deneylerinin doğrulanması için güvenilirlik deneyleri de yapılmıştır. Güvenilirlik deneylerinde Taguchi deney tasarımından elde edilen en iyi ve en kötü parametreler ile HTC koşulu dikkate alınmıştır. Güvenilirlik deneylerinde hem Taguchi ’nin tahmin değerleri kullanılmış hem de gerçek deneysel sonuçlar elde edilerek kıyaslama yapılmıştır. Bütün deneyler ve ölçümler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.5. Kap kalınlığı ölçüm metodu ve ölçüm noktaları.

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

HTC'nin sentezi, aşınma deneyleri ve ılık derin çekme deneyleri için her bir aşamadaki sonuçlar detaylı olarak aşağıda anlatılmıştır.

7.1. NUMUNELERİN MİKRO YAPISI

Karbon bazlı yağlayıcıların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.1'de gösterilmiştir. HTC dışındaki katı yağlayıcıların nano boyutlu morfolojiye sahip olduğu bilinirken, HTC'nin mikron boyutlu lif morfolojisine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu nano boyutlu karbonların karbon oranının %99.9'dan fazla olduğu bilinirken, bu oranın HTC'de yaklaşık %75 olduğu ve geri kalanının oksijen olduğu belirlenmiştir. HTC'nin yapısının oksijen içeren aromatik çekirdekler ve farklı fonksiyonel gruplardan oluştuğu da bilinmektedir [31,195].

HTC ve vasıflı karbonlar için elde edilen SEM görüntülerinde HTC'nin CNT ve fullerenlerden daha büyük yapıları olduğu görülmektedir (Şekil 7.1). SEM görüntülerinde her bir karbon tipi için morfolojinin en iyi görüldüğü büyütme oranları kullanılmıştır. HTC'nin yapı olarak grafene benzediği, küresel ve tabakalı bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Bu durum tribolojik açıdan önemlidir. Küresel yapılar yuvarlanma sürtünmesi oluşumu sağlarken, tabakalı yapılar sürtünme esnasında koruyucu film tabakası oluşturabilmekte, tabakaların birbirleri üzerinden kaymaları sayesinde sürtünme katsayısını düşürebilmektedir. EDX analizlerinde vasıflı karbonların kararlı oldukları fakat HTC'de oksitlenme problemi olduğu görülmüştür. Bu durum aşınma deneylerinde HTC açısından olumsuz sonuçlar doğurmuş olmasına rağmen, derin çekme deneylerinde HTC'nin tribolojik performansının yeterli olduğu görülmüştür. Aşınma deneylerinde kullanılan aqua-jel nedeniyle HTC'nin oksitlenme eğiliminin arttığı, fakat derin çekme deneylerinde gres ile disperse edilen HTC'nin

oksitleme eğiliminin minimize edilmesiyle yeterli tribolojik performansı sağladığı düşünülmektedir.



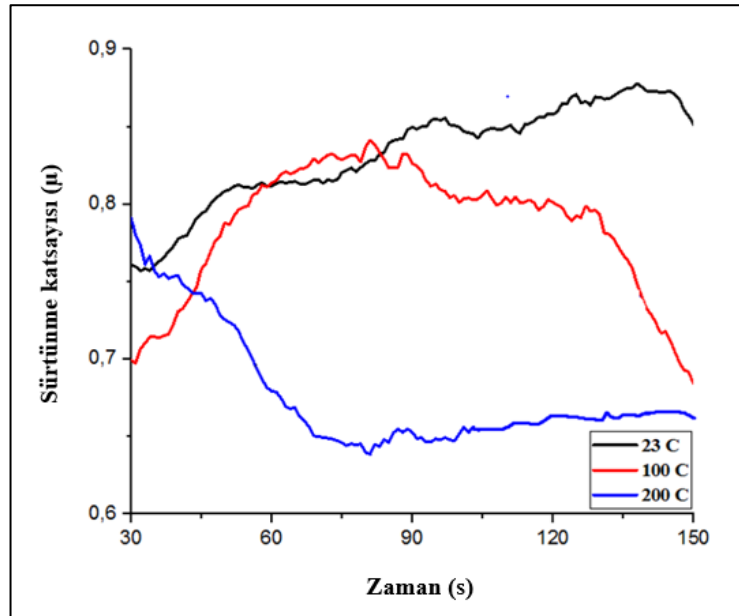
Şekil 7.1. HTC ve diğer vasıflı karbonların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

7.2. PİN ON-DİSK TESTİNDEN ELDE EDİLEN SÜRTÜNME KATSAYISI SONUÇLARI

Oda sıcaklığında, 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen pin-on-disk tipi aşınma testinde fulleren, CNT ve HTC için elde edilen sürtünme katsayısı (COF) değerlerinin değişimi Şekil 7.2-7.4'te grafiksel olarak verilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri için yapılan aşınma süresi derin çekmedeki bir numunenin şekillendirme süresi olan 150 sn baz alınarak referans alınmıştır. Grafen ile fulleren benzer aşınma davranışı gösterdikleri için sadece fullerene ait sonuçlara yer verilmiştir. Her üç yağlayıcı koşulunda ve farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerlerinin 0,65 ile 0,85 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Ortalama COF değerleri dikkate alındığında performans sıralamasının iyiden kötüye doğru fulleren, CNT ve HTC şeklinde olduğu görülmektedir. HTC'nin morfolojik yapı ve oksitlenme eğilimi nedeniyle en düşük performansı verdiği söylenebilir. Fakat en iyi koşul ile en kötü koşul arasındaki fark ihmal edilebilecek seviyededir (~%3). Her üç yağlayıcı tipinde oda sıcaklığında (~23 °C) artış trendi gözlenirken, 100 °C koşulunda önce artan sonra azalan, 200 °C koşulunda ise azalan trend olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda alüminyum malzemenin yüzeyinde oluşan oksit tabakasının sertliği sayesinde sürtünme katsayısının azaldığı düşünülmektedir.

Fulleren ile farklı sıcaklıklarda aşındırma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı (COF) değerleri Şekil 7.2'de verilmiştir. Oda sıcaklığında 45 sn'lik zaman dilimine kadar olan ani artış, 75. sn'ye kadar stabil bundan sonra tekrar yükselme eğilimine girmiştir. Buna göre ilk 45 sn'de COF değerinin yüksek olması, ilk temas yüzeyinin en yüksek pürüzler vasıtası ile olması ve zamanla uçları kesilerek düzleşen pürüzler için sarf edilen kuvvete atfedilebilir. Bundan sonraki stabil durum numunenin kimyasal bileşimi ve tribolojik etkenler dahilinde birçok parametreye bağlı olarak değişim gösterir. Run-in (ilk aşınma periyodu) periyodu geçildikten sonra numunenin COF değerinde kristalografik yönelimler etkili olabileceği gibi deformasyon sertleşmesi de COF değerini etkileyen parametrelerden biridir [196–198]. Dolayısıyla yüzeyin dokusu, şekli ve pürüzlüğü COF değerini etkilemektedir. Ayrıca yüzeyde oluşan oksit tabakası ile birlikte yağlayıcı fullerenin etkisini daha iyi göstermesine de bağlıdır. Çünkü daha önce de belirtildiği üzere mikron boyuta sahip katı yağlayıcının

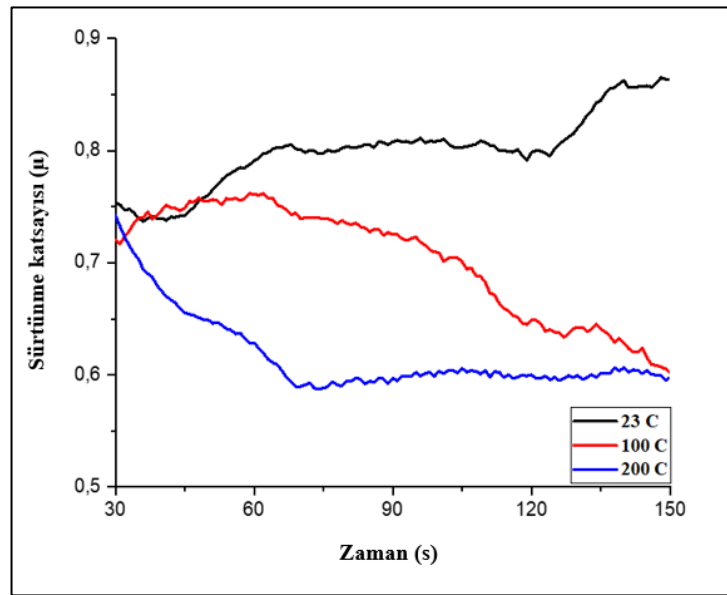
bir kısmı başlangıçta pürüz aralarını doldurarak katı yağlayıcı etkisi göstermiştir. Zamanla pürüzlerin tıraşlanmasıyla aşındırıcı ile daha rahat bir şekilde temas eder hale de gelmiştir. Bu aşamadan sonra temas yüzeyinin smooth (pürüzsüz) hale gelmesiyle fulleren partiküllerini fiziksel olarak tutacak bir yüzey topografisi olmadığı için yağlayıcı etkisinin azalmasıyla COF değerleri artış eğilimini sürdürmüştür. 100 °C sıcaklıkta elde edilen COF grafiği incelendiğinde, COF değerinin ilk 75 sn'lik zaman diliminde sürekli arttığı görülürken daha sonra şiddetli bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum sıcaklığın artması ile birlikte oksijene afinitesi yüksek olan Al matrisin hızlı bir şekilde oksitlenmesi ile açıklanabilir. Böylece hem oksit tabakası hem de fullerenin vermiş olduğu yağlayıcı etki ile COF değeri düşmüştür. Benzer bir durum 200 °C de elde edilen COF değerinde de görülmekte, yani sıcaklığın artması COF değerini hızlı bir şekilde azaltmaktadır. 200 °C grafiğın bu denli değişmesindeki sebep numunenin bu sıcaklığa gelene kadar ısı haznesi içerisinde beklemesi olarak düşünülebilir. Çünkü bu sürede numune yüzeyinde nispeten daha kalın ve yağlayıcı özelliğe sahip bir oksit tabakası oluşmasının yanısıra yüzey sertliği de nispeten arttığı söylenebilir. Dolayısıyla hem bahsedilen bu etkilerin hem de fullerenin yağlayıcı etkisinin bir araya gelmesiyle düşük COF değerleri elde edilmiştir. Bu durum 75 sn kadar devam ederken burada stabil kalan COF değerleri oksit tabakasının oluşumu ve kırılmasına bağlı olarak dalgalı bir seyir izlemiştir.



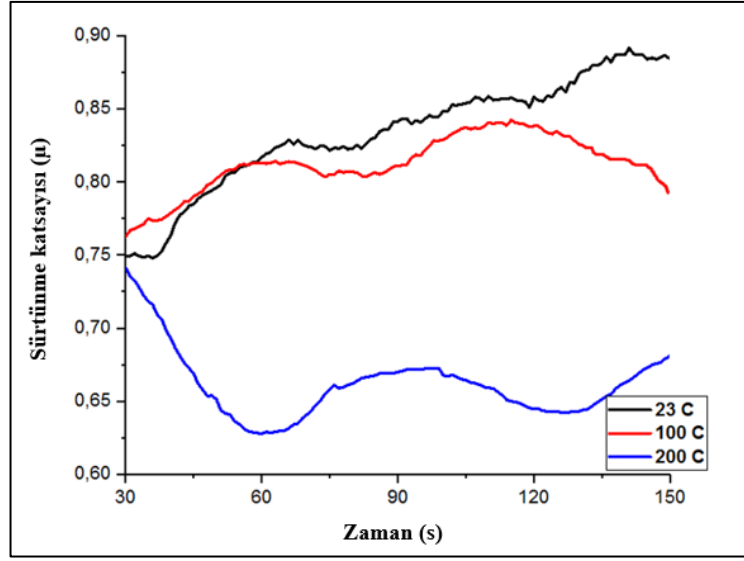
Şekil 7.2. Fulleren yağlayıcı koşulunda ölçülen sürtünme katsayıları.

CNT ile yağlama işlemine tabi tutulan numunelerin COF değerleri ise Şekil 7.3'te verilmiştir. CNT yağlayıcı ile yapılan deneylerde de en yüksek COF değeri oda sıcaklığında görülürken bunları 100 ve 200 °C de yapılan deney çalışmaları izlemiştir. 200 °C de grafiğin diğerlerinin tersine öncelikle düşüş sergilemesi Blau ve arkadaşları tarafından yapılan bir araştırmada şöyle izah edilmiştir. Bu şekilde bir davranış gösteren numunelerin yüzeye yakın bölgelerinde mikroyapı kristalografik olarak tekrar yönlenme eğilimine girmiştir. Tercihli kristal yapı oluşturulduğunda bu yön kayma gerilmelerine paralel çalıştığı için kararlı durum aşınmasına geçilmiş olur. Diğer bir yaklaşım ise aşındırılan malzemenin yüzey kompozisyonunda meydana gelen değişim olarak belirtilmiştir [196]. Burada 200 °C de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ısının etkisi ile yüzeyde oksit oluşumunun hız kazanacağı dolayısıyla böyle bir etkiye sebep olacağı düşünülebilir.

HTC ile yağlama işleminden sonra aşındırma işlemine tabi tutulan numunelerde de fulleren ve CNT benzeri durum görülmüştür (Şekil 7.4). HTC'nin CNT ye göre yağlayıcı etkisinin daha düşük olduğu söylenebilir ancak genel olarak katı yağlayıcıların run-in (ilk aşınma periyodu) periyodunu geciktirici etkisinin tüm yağlama işlemlerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Böylece yağlayıcılar aşınma periyodunda ortaya çıkan sürtünme şiddetini ve aşınma oranındaki değişimleri azaltma eğilimi sergilediği ifade edilebilir [196,197].



Şekil 7.3. CNT yağlayıcı koşulunda sürtünme katsayıları.

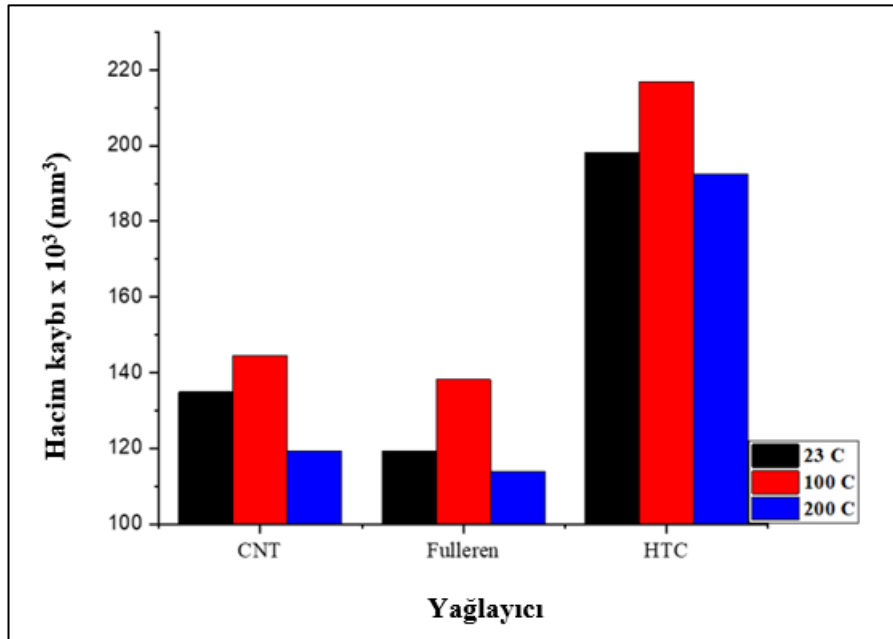


Şekil 7.4. HTC yağlayıcı koşulunda ölçülen sürtünme katsayıları.

7.3. PİN-ON DİSK TESTİNDEN ELDE EDİLEN AĞIRLIK KAYBI SONUÇLARI

Şekil 7.5'te AA5754-O malzemesi üzerinde farklı katı yağlayıcılar kullanılarak farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı grafiği verilmiştir. Yapılan çalışmayı tribolojik parametrelerden biri olan sıcaklığa bağlı olarak değerlendirdiğimizde en düşük aşınma hacim kaybı fulleren ile elde edilirken bunu sırasıyla CNT ve HTC izlemiştir. Hacim kaybı sonuçları sürtünme katsayısı sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Yine grafikte dikkat çekici bir durum 100 °C de gerçekleştirilen deneylerde tüm numunelerde hacim kayıpları diğer sıcaklıklara göre daha yüksek çıkmıştır. 200 °C ise hacim kayıplarının tekrar düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Yağlamanın amacı, fonksiyonel iki yüzeyin arasında sıvı bir film tabakası oluşturarak yüzeyleri birbirinden ayırmaktır. Böylece yüzeylerin hasara uğraması önemli ölçüde azaltılmaktadır. Yine denilebilir ki malzemelerin aşınma dirençlerinin artırılmasında kullanılan en önemli parametrelerden birisi iki yüzey arasında bir yağlama katmanı oluşturmaktır. Yağlayıcılar ortama göre sıvı olabildikleri gibi, yüksek viskoziteli sıvı veya katı da olabilmektedirler. Tez çalışmasına konu olan AA5754-O numune için sadece yağlayıcı olarak kullanılan malzemelere bakılarak hacim kaybı değerlendirilecek olursa en iyi aşınma direnci performansı fulleren ile yüzeyi yağlanan numunelerde görülmüştür. Bu durum fullerenin morfolojik yapısı ile

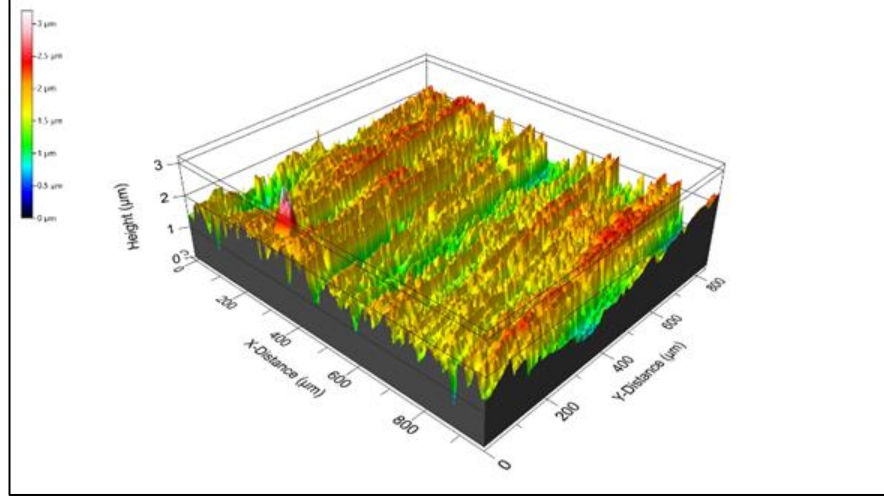
ilişkilidir. Mikron boyutundaki fullerenin malzeme yüzeyindeki pürüzlerin içerisine dolarak burada mekanik olarak kilitlenmesi olasıdır. Yine küresel yapılarından dolayı üzerlerindeki yükün etkisi ile yuvarlanma hareketi yaparak basma kuvvetlerinin alt yüzeye olan etkisini azaltıcı rol oynadığı değerlendirilmektedir. Ayrıca pürüzler arasına kilitlenen fullerenlerin bir kısmı pürüz uçlarında oluşan plastik deformasyonla birlikte pürüz yüzeyleri arasında tutularak bir çeşit yatak vazifesi görebilmektedir. Sıcaklığın artması ile hacim kaybının düşmesi, sıcaklık artışına bağlı olarak malzeme yüzeyinde oksit tabakasının daha hızlı oluşmasıyla açıklanabilir. Şöyle ki aşındırıcı pin, önündeki yağlayıcı tabakayı bası kuvvetleri ile birlikte anlık olarak temizlemekte ve kısa bir zaman diliminde de olsa burası 100 veya 200 °C gibi bir sıcaklığa maruz kalmaktadır. Bu kısa zaman diliminde de oksidasyon kabiliyeti yüksek olan AA5754-O malzemesinin yüzeyi oksitlenir. İkinci olarak en düşük hacim kaybı CNT ile yüzeyi yağlanan numunelerde görülmüştür. Bu numunelerin fullerenlerden daha düşük performans göstermesinin başlıca sebebinin tanecik morfolojisi ile ilişkilendirmek mümkündür.



Şekil 7.5. Katı yağlayıcıların hacim kaybı grafiği.

Şöyle ki CNT yağlayıcı 25-50 nm kalınlık ve 1-6 mikron uzunluğunda olan farklı yönlerdeki örgü biçimli girift bir yapıya sahip olduğundan (Şekil 7.1) AA5754-O

malzemesinin aşınma öncesi yüzeyi morfolojisi CNT yağlayıcının yüzeye tam anlamıyla etki etmesine müsait değildir (Şekil 7.6).

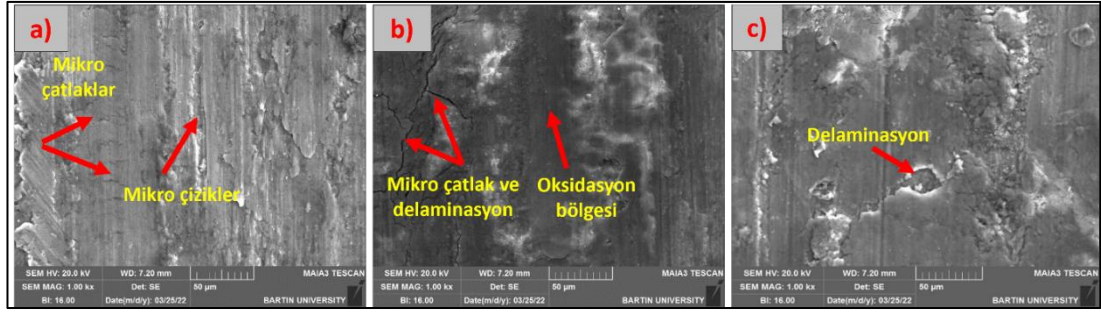


Şekil 7.6. AA5754-O numunesinin aşınma öncesi yüzey topografisi.

Ancak, her ne kadar numune pürüz aralarına girememiş olsalar da örgü yapılarından dolayı aşındırıcı yüzeye tutunmaya yatkındır. Uç temas basıncı ve sürüklenme hareketi ile hareket yönünde bu grift tabaka da harekete başlayacaktır (topun temas ettiği alan). Ancak aşındırıcı pim ve alt yüzey arasında CNT'ler ara yüzey oluşturup karbonun yağlayıcı etkisi ile sürtünme kuvvetini düşürüp aşınma direncini yükseltecektir. Çünkü COF değerinin düşmesi yüzeyden malzeme transferini yavaşlatacağı için burada meydana gelen termokimyasal işlemleri destekleyici rol oynayacaktır. Yüzeye sürülen yağlayıcının büyük bir kısmı morfolojisinden dolayı pürüz yüzeylerinde kalırken bir kısmı da kırılıp ayrılarak pürüz aralarına yerleşecektir. Dolayısıyla pürüzlerin tamamen yok olmasına kadar bu mekanizma çalışacaktır.

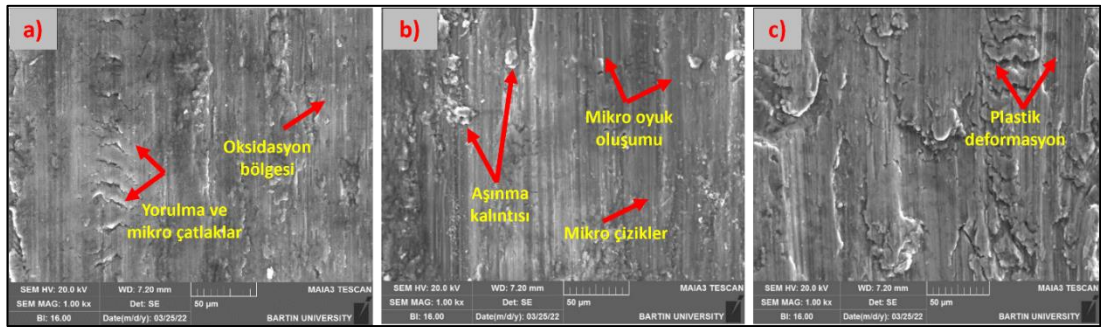
HTC yağlayıcı kullanılan aşınma deneyi hacim kaybı değerleri CNT ve fulleren yağlayıcılarla elde edilenlere göre daha yüksek olmuştur. Bu durumu HTC'nin yüzey morfolojisi ile ilişkilendirmek mümkündür. Çünkü HTC yağlayıcının partikül morfolojisi CNT ve fullerene göre homojen olmayan yapıda ve daha prizmatiktir. Böylece temas çiftleri arasındaki hareketi CNT ve fulleren yağlayıcı partiküllere kıyasla daha zor olacaktır. Ayrıca HTC'nin oksitlenmiş olması üç cisimli aşındırma mekanizması oluşumunu hızlandırmakta, bu duruma bağlı olarak da aşınma hacmi artmaktadır.

Aşındırma işlemi sonucunda numune yüzeylerinde meydana gelen morfolojik değişimler ve aşınma mekanizmaları SEM aşınma izi mikrografı ve EDS analizi kullanılarak incelenmiştir. Şekil 7.7.a'da oda sıcaklığında CNT yağlayıcısı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen aşınma izi fotoğrafı verilmiştir. Tekrarlı yükler altında yorulma ve bu yorulma sonucunda radyal yönde oluşan mikro çatlaklar görülmektedir. Ayrıca aşınma izi boyunca sıvanan (smeared) Al matris dikkati çekmektedir. Yine adhezyonun sebep olduğu plaka şeklinde kopmalar görülebilmektedir. Sıcaklığın 100 °C derecesine çıkması ile aşınma mekanizmasının ağırlıklı olarak değiştiğini söylemek mümkündür. Şekil 7.7.b incelendiğinde oksidasyon ağırlıklı bir aşınma mekanizmasının varlığı görülmektedir. Bunun oluşma hızını metalik malzemenin oksidasyona olan afinitesi de etkiler. Oksidasyon tipi aşınmalarda sıcaklık önemli bir etken parametredir. Eğer etkileşim atmosferik sıcaklıklarda meydana geliyorsa etkili oksidasyon öncelikle sadece pürüz etkileşimlerinde görülür. Bunun ana sebebi gerçek temas noktası olan pürüzler üzerindeki kısa süreli flash sıcaklıklardır (parlama sıcaklığı). Atmosferik ortamdaki sıcaklığın artması ile yüzeyde oluşan oksidasyon haricinde ikinci bir oksit oluşumu devreye girer ki, bu ise aşınma davranışında göz ardı edilemeyecek bir parametredir. Yukarıda anlatılan mekanizmalar dahilinde malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakaları; uygulanan yük, kayma hızı, oluşan oksidin kimyasal bileşimi, kalınlığı ve yüzeyde tutunabilme kabiliyetleri çerçevesinde oluşur ve sonrasında aşınma etkisiyle kırılarak yüzeyden uzaklaştırılır. Yüzeyde oluşan oksit kalınlığı aşınma mekanizmasının oluşumunda etkilidir. Oksit kalınlığı belirli bir kalınlığın üzerine çıktığında yüzey altı çatlakları şeklinde başlayıp bu çatlakların yüzeye ulaşması ile meydana gelen dökülmeler genellikle delaminasyon tipi aşınmaya sebep vermektedir (Şekil 7.7.b ve 7.7.c). Benzer mekanizma 200 °C'de gerçekleştirilen numunelerde de görülmüştür (Şekil 7.7.c). Artan sıcaklıkla birlikte yüzeydeki oksit oluşum hızı artmış ve aşınma etkisiyle kopan sert oksit partikülleri three-body (abrazif partikül etkisi) etkisi ve ploughing (sürülme) tipi abrasif aşınmaya neden olmuştur.



Şekil 7.7. CNT katı yağlayıcı ile farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı b) 100 °C c) 200 °C aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları.

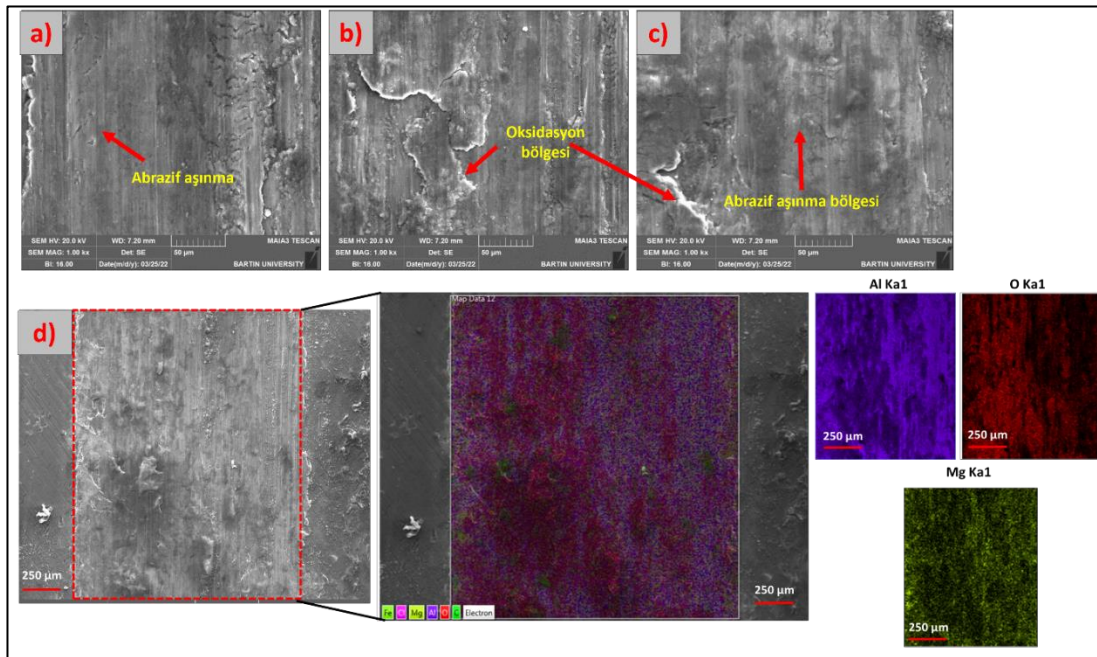
Şekil 7.8 a-c'de sırası ile oda, 100 ve 200 °C sıcaklıklarda HTC yağlayıcı kullanılan numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Oda sıcaklığında düşük oksidasyon, yorulma ve adhezyon tipi aşınma mekanizması görülmektedir (Şekil 7.8.a). 100 °C'de yorulma ve aşınma atıklarının (wear debris) sebep olduğu mikro çizilme (micro scratches) ve oluklanmalar (grooving) dikkat çekmektedir (Şekil 7.8.b). 200 °C derecede ise ana aşınma mekanizması aşırı plastik deformasyondur (Şekil 7.8.c). HTC koşullarında yüzey morfolojisinde katastrofik bozulmaların oluşmadığı, düzlemsel yapının büyük oranda korunduğu görülmektedir. Hacim kaybının yüzeyde daha homojen bir yapıda gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 7.8. HTC katı yağlayıcının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı b) 100 °C c) 200 °C aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları.

Son olarak fullerenin kullanıldığı aşınma deneyleri sonucunda numune yüzeylerinden alınan SEM aşınma izi fotoğrafları Şekil 7.9 a-d'de sırası ile verilmiştir. En yüksek aşınma direnci fulleren yağlayıcı ile elde edilmiştir. Oda sıcaklığında fulleren kullanılan numunenin deney sonrasında yüzeyinden alınan mikroyapı incelendiğinde (Şekil 7.9 a-b), CNT ve HTC yağlayıcı kullanılan diğer iki numune ile benzerlik

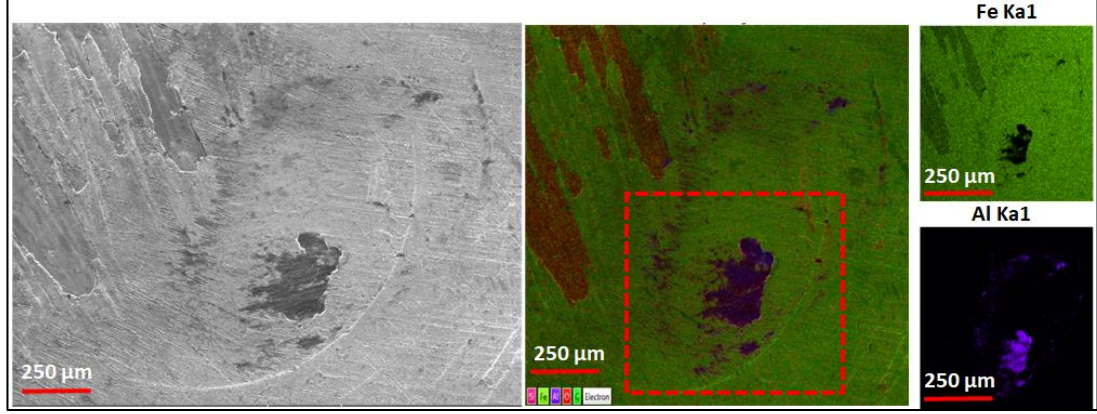
gösterse de yüzeyde meydana gelen hasarın daha az olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum yağlayıcı partikül morfolojik yapısı ile ilgilidir. Fullerenler, sıfır boyutlu karbon yapıları olduğundan, arayüzeyler arasındaki boşluğu doldurarak, kayma sırasında nanometre ölçeğinde bir top gibi hareket ederek aşınmayı azaltabilirler [199]. Öte yandan, bir boyutlu karbon nanotüpler de aşınmayı azaltmada etkilidir. Ancak, yüksek yüzey alanlarından dolayı bir araya gelme eğiliminde oldukları bilinmektedir [200]. Üç boyutlu HTC'ler iyi tribolojik özellikler gösterse de arayüzleri doldurma yeteneklerinin daha küçük olanlara göre daha sınırlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, 100 °C ve 200 °C de gerçekleştirilen deneylerde yüzeyde oksidasyon tipi aşınmanın hâkim olduğu (Şekil 7.9.d) ancak yüzey hasarının daha az olduğu görülmüştür (Şekil 7.9 b-d).



Şekil 7.9. Fulleren katı yağlayıcının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen a) Oda sıcaklığı, b) 100 °C ve c) 200 °C aşınma deneylerine ait SEM aşınma izi fotoğrafları, d) 200 °C Fulleren EDS çizgi boyu elemental tarama.

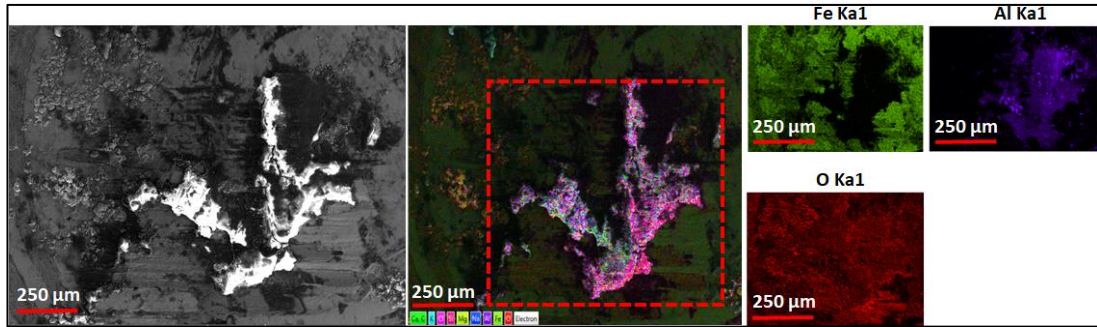
Yapılan çalışmada en düşük hacim kaybı değerleri fullerene katı yağlayıcının kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deney sonrasında karşı gövde parçası yüzeyinden (bundan böyle pin olarak adlandırılacaktır) alınan EDS analizi Şekil 7.10'da verilmiştir. Etkileşimin en yüksek olduğu kısmın

yaklaşık alanı $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ olan bölgedir. Bu bölgede numune yüzeyinden transfer edilerek pin yüzeyine sıvı alan alüminyum elementi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.10. Oda sıcaklığında Fulleren katı yağlayıcı kullanılan deney sonrası PIN yüzeyi EDS analizi.

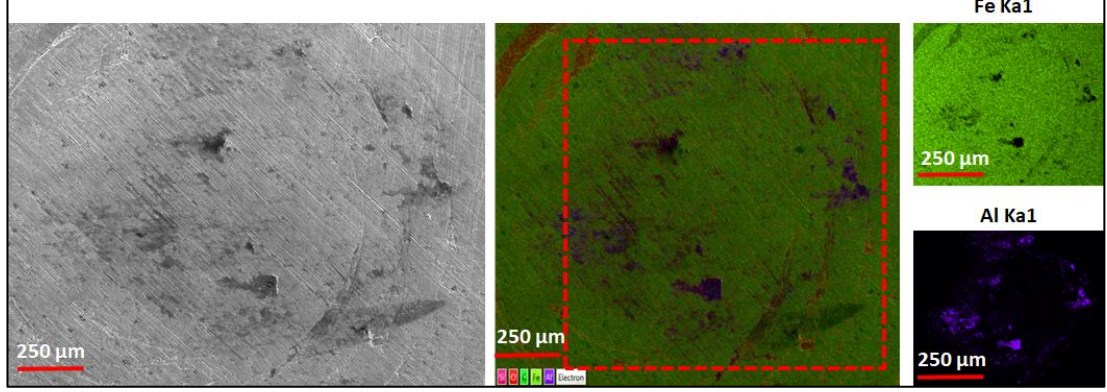
Şekil 7.11'de ise $200 \text{ }^\circ\text{C}$ de yine fulleren kullanılarak yapılan aşındırma işlemi sonrasında pinin aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi verilmiştir. Sıcaklığın artması ile pin yüzeyine, numune yüzeyinden aktarılan aşınma atık transferi artmıştır. Bunun en önemli sebebi artan sıcaklık ile birlikte ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) alüminyumun sertlik değerinde yaklaşık %15'lik bir düşüş [201] görülmekte ve bunun neticesinde her ne kadar yüzeyde bir oksit tabakası oluşsa da alt yüzey bunu yeterince destekleyemediği için artan plastik deformasyon oranı ile birlikte katmanın ayrılarak transferi gerçekleşmektedir. Bu tabaka EDS analizinde açıkça görülebilmektedir.



Şekil 7.11. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık da Fulleren kullanılan deney sonrası pin yüzeyinin EDS analizi.

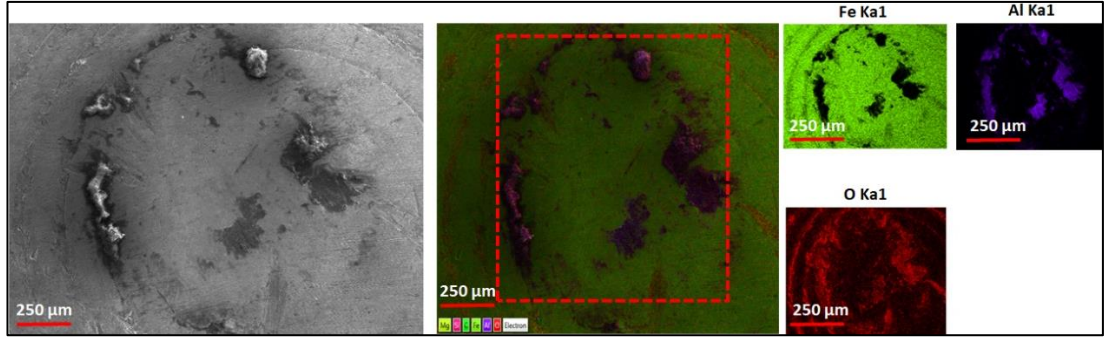
Şekil 7.12'de Oda sıcaklığında HTC yağlayıcı kullanılan aşındırma işlemi sonrası kullanılan pin yüzeyinin EDS analizi verilmiştir. Burada da ferrit matrisi üzerine

sıvı Al tabakası, fulleren kullanılan deney ile kıyaslandığında pine olan transferin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum HTC'nin morfolojiye bağlı yağlayıcı etkisinin fullerene göre düşük olması ile açıklanabilir ve ayrıca hesaplanan aşınma hacim kayıpları ile de uyumludur.



Şekil 7.12. Oda sıcaklığında HTC yağlayıcı kullanılan deney sonrası pin yüzeyi EDS analizi.

Şekil 7.13'te 200 °C'de HTC yağlayıcı ile birlikte kullanılan pinin aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi verilmiştir. Pinin temas yüzey alanının oda sıcaklığındakine göre genişlediği dikkati çekmektedir. Ayrıca transfer edilen Al katmanının ise temas merkezinden ziyade dış çerçeve oluşturduğu gözlenmiştir. Temas basıncının maksimum olduğu merkezde ise artan sıcaklıkla birlikte oksit miktarının da arttığı görülmektedir. HTC ile pin yüzeyinde daha fazla aşınma gerçekleşmiş olmasına rağmen elde edilen görüntüler fulleren ile kıyaslanabilir seviyededir. Fullerenin endüstriyel ve ticari bir ortamda elde edildiği, HTC'nin ise laboratuvar şartlarında elde edildiği düşünüldüğünde, HTC için elde edilen sonuçların fulleren kullanılan koşullardan ihmal edilebilir seviyede farklılaştığı ve HTC'nin endüstriyel olarak kullanıma uygun olduğu söylenebilir.



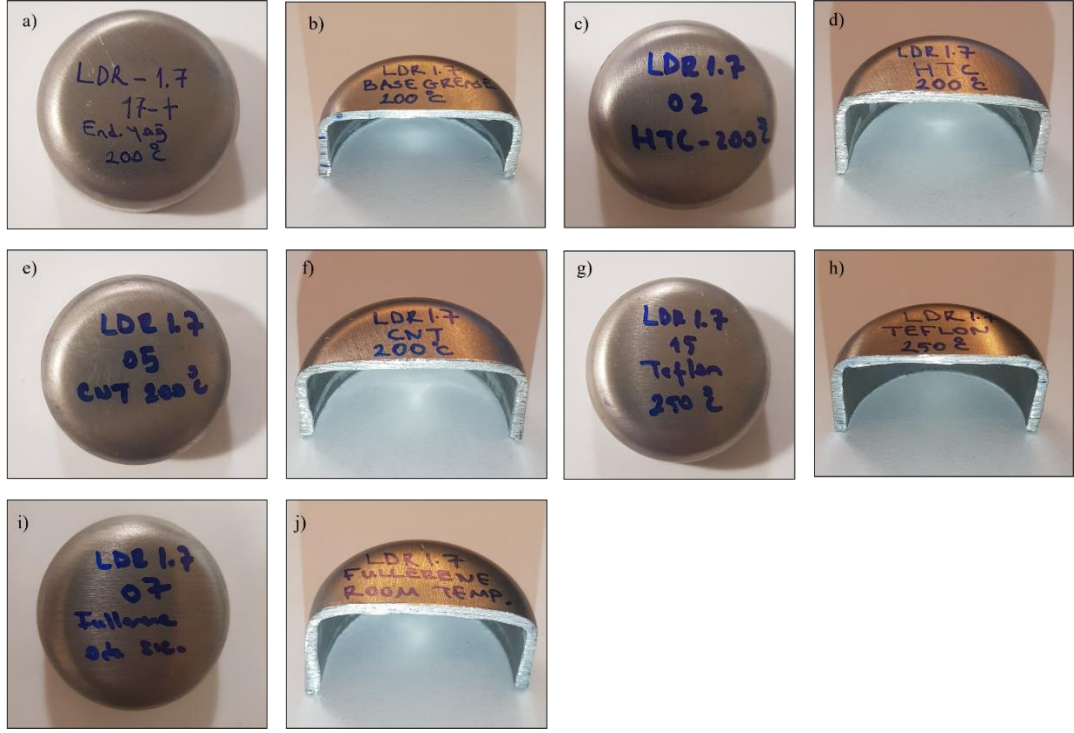
Şekil 7.13. 200 °C sıcaklıkta HTC yağlayıcı kullanılan deney sonrası PIN yüzeyi EDS analizi.

7.4. ILIK DERİN ÇEKME İŞLEMİ SONUÇLARININ ANALİZLERİ

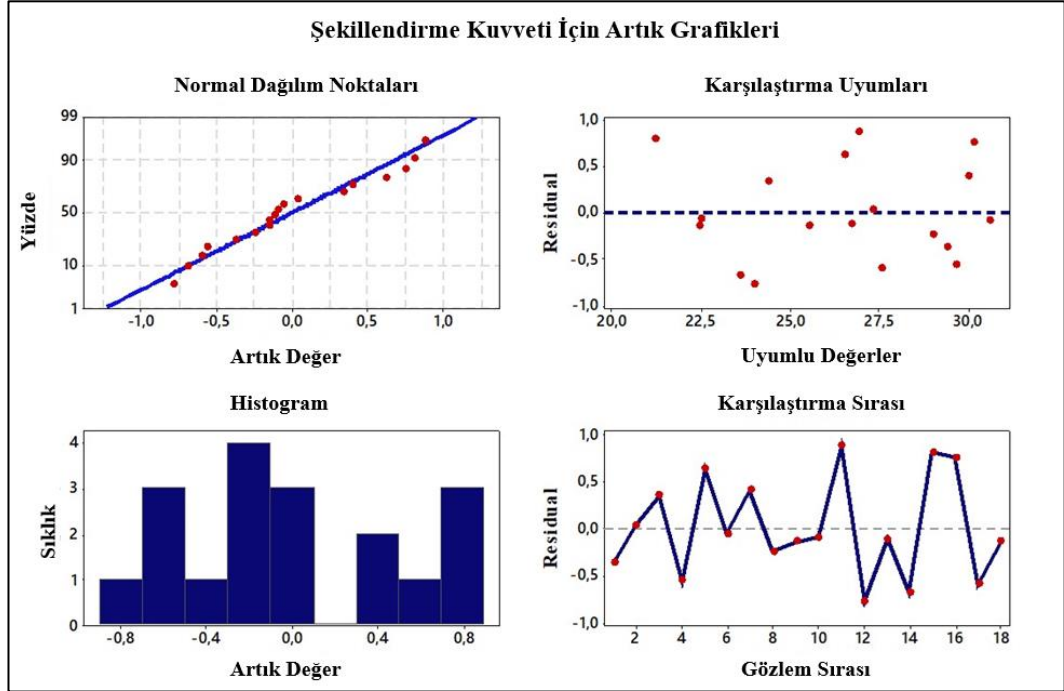
Ilık şekillendirme prosesi için yağlayıcı geliştirme amacıyla hazırlanan deney tasarımı ve şekillendirme kuvveti için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmiştir. Çizelge 7.1’e göre 6 farklı yağlayıcı, 3 farklı sıcaklık, 3 farklı baskı plakası kuvveti ve şekillendirme hızı ortamında deney yapılmıştır. Şekil 7.14’te 1,7 LDR’de ılık derin çekme deneylerine ilişkin resimler verilmiştir. Deney sonuçlarına göre şekillendirme kuvvetinin ortalaması 26,52 kN ve standart sapma değeri ise 3,01 kN olarak hesaplanmıştır. Verilerin $\pm 3\sigma$ aralığında dağılım gösterdiği düşünüldüğünde farklı deney parametrelerinin şekillendirme kuvvetini anlamlı seviyede değiştirdiği söylenebilir. Şekil 7.15’te verilen normal dağılım grafiği ve histogram çubukları deneysel verilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.1. Deney Tasarımı – Taguchi L18

Deney No	Yağlayıcı	Sıcaklık (°C)	BPB (Bar)	Şekillendirme Hızı (mm/s)	Şekillendirme Kuvveti (kN)
1	Gres + %4 HTC	OS	10	2	29,02
2	Gres + %4 HTC	200	15	4	27,36
3	Gres + %4 HTC	250	20	6	24,71
4	Gres + %4 CNT	OS	10	4	29,08
5	Gres + %4 CNT	200	15	6	27,13
6	Gres + %4 CNT	250	20	2	22,41
7	Gres	OS	15	2	30,4
8	Gres	200	20	4	28,77
9	Gres	250	10	6	25,39
10	Gres + %4 Grafen	OS	20	6	30,49
11	Gres + %4 Grafen	200	10	2	27,82
12	Gres + %4 Grafen	250	15	4	23,19
13	Teflon Katı Yağlayıcı	OS	15	6	26,61
14	Teflon Katı Yağlayıcı	200	20	2	22,91
15	Teflon Katı Yağlayıcı	250	10	4	22,01
16	Gres + %4 Fulleren	OS	20	4	30,89
17	Gres + %4 Fulleren	200	10	6	26,96
18	Gres + %4 Fulleren	250	15	2	22,3



Şekil 7.14.1.7 Gerinin sınır oranına göre çekilen örneklerin görüntüleri. a) Baz yağ 200 °C üst görünüm ve b) kesit görünüm, c) HTC 200 °C üst görünüm ve d) kesit görünüm, e) CNT 200 °C üst görünüm ve f) kesit görünüm, g) Teflon 250 °C üst görünüm ve h) kesit görünüm, i) Fullerene oda sıcaklığı üst görünüm ve j) kesit görünüm.



Şekil 7.15. Şekillendirme kuvveti için istatistiksel kontrol grafikleri.

Derin çekme işleminde giriş parametrelerinin şekillendirme kuvvetine etkisi ANOVA yöntemi ile analiz edilmiş ve analiz sonuçları Çizelge 7.2’te verilmiştir. Çizelge 7.2’ye göre şekillendirme kuvveti için en etkili parametrenin sıcaklık (%72,32) olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın yanı sıra yağlayıcı parametresinin de %20,89 oranında etkili olduğu görülmektedir. Baskı plakası basıncı ve şekillendirme hızı parametrelerinin şekillendirme kuvveti parametresi için istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen “p” değerleri de bu durumu destekler nitelikte olup, baskı plakası basıncı ($p=0,515>0,05$) ve şekillendirme hızı ($p=0,130>0,05$) parametreleri için bu değer 0,05 değerinden yüksek olduğu görülmektedir. %95 güven aralığında “p” değerinin 0,05 değerinden düşük olması parametrenin etkisinin anlamlı olduğunu, yüksek olması istatistiksel olarak anlamsız olduğunu ifade etmektedir. Çizelge 7.2’de görülen %3,05 hata oranı ise proses esnasındaki titreşim, nem, ortam sıcaklığı değişimi gibi kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklanmaktadır. Proses için belirlenen parametrelerin şekillendirme kuvvetini açıklama yeteneğinin belirlenmesi için R-Sq(adj) değeri elde edilmiştir. Elde edilen R-Sq(adj) (%91,36) değerinin %70’ten yüksek olması belirlenen parametrelerin şekillendirme kuvvetini açıklamak için yeterli olduğunu göstermektedir. Çizelge 7.2’de verilen ANOVA tablosuna göre sıcaklık parametresinin yüksek oranda (%72,32) etkili olması beklenen bir durumdur. Şekil 7.16’da verilen S/N grafiğine göre de sıcaklık arttıkça kuvvetin ciddi bir şekilde lineer olarak azaldığı görülmektedir. Alüminyum esaslı malzemelerde oluşan bağ yapısında tek bir valans elektronunun paylaşılması sebebiyle ısı iletimi hızlanmakta ve sıcaklığa bağlı histerisiz etkisi düşük seviyede kalmaktadır. Sıcaklık arttıkça atomsal titreşimler artacağı ve dolayısıyla dislokasyon hareketi kolaylaşacağı için malzemenin iç yapısında pekleşme azalmış ve şekillendirme kuvveti düşmüştür. ANOVA tablosunda asıl dikkat çeken parametre %20,89 oranı ile yağlayıcının etkisidir. Yağlayıcılar malzeme yüzeyinde sınır tabakada bir etki oluşturarak yüzeyleri tribolojik açıdan korumaya çalışırlar. Malzemenin yüzeyinde mikron seviyede bir film kalınlığı oluşturan ve yüzeyle kimyasal etkileşime girmeden sadece fiziksel bir etki oluşturan yağlayıcıların imalat sistemlerinde oluşturacağı etki genelde %10 seviyesindedir. Fakat ılık derin çekme işleminde bu değer %20 değerine kadar çıkmıştır. Bu durum hem prosesin yapısı hem de yağlayıcıların etkinliği ile açıklanabilir. Ilık derin çekme işleminde yağlayıcılar baskı plakası bölgesinde etki oluşturmaktadır. Istampanın çekme kuvveti etkisiyle

kalıp içerisine doğru malzeme akarken, malzemenin yırtılmadan ve buruşmadan form alabilmesi büyük ölçüde yırtılmayan yağ filmleri sayesinde sağlanmaktadır. Film formunun korunması amacıyla teflon, polietilen ve polipropilen esaslı katı yağlayıcılar yoğun kullanım alanına sahiptir. Çalışma kapsamında da teflon katı yağlayıcı kullanılmış ve maksimum performans teflonlu deneylerden elde edilmiştir (Şekil 7.16). Bununla birlikte HTC ve diğer vasıflı karbonların da teflona yakın performans gösterdikleri Şekil 7.16’da görülmektedir. Yağlayıcıların baskı plakası bölgesine tatbik edilmesi için lityum esaslı bir gres ile karbon malzemeler karıştırılmış ve baskı plakası bölgesine teflon malzemenin kalınlığı ile eşdeğer bir film oluşturacak şekilde tatbik edilmiştir. Bu duruma bağlı olarak HTC ve diğer vasıflı karbonlar ile oluşturulan etkinin ılık derin çekme işleminde istatistiksel ve fiziksel olarak anlamlı derecede etkili olduğu söylenebilir. HTC ve diğer vasıflı karbonlar sürtünme esnasında karbon molekülleri arasındaki zayıf van-der-walls bağları sayesinde yağ filminin sürekliliğini sağlayabilmişlerdir. Özellikle düşük maliyet ve sentez kolaylığı ile diğer vasıflı karbonlardan ayrılan HTC, endüstriyel olarak kullanılabilirlik açısından dikkat çekmektedir.

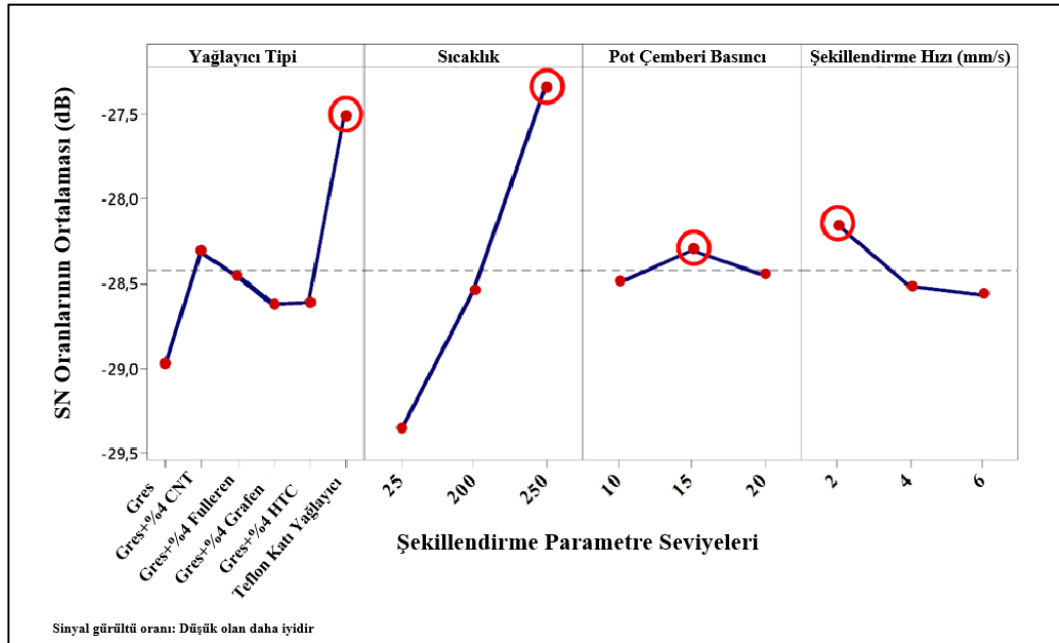
Çizelge 7.2. Şekillendirme kuvveti için ANOVA tablosu.

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ($\alpha=5\%$)	P Değeri	Etki Oranı
Yağlayıcı	5	32,272	6,4544	8,22	0,012	%20,89
Sıcaklık	2	111,709	55,8546	71,12	0,000	%72,32
Baskı Plakası Basıncı	2	1,167	0,5836	0,74	0,515	%0,76
Şekillendirme Hızı	2	4,601	2,3005	2,93	0,130	%2,98
Hata	6	4,712	0,7854			%3,05
Toplam	17	154,462				%100
Anlamlılık		R-Sq=%96,95			R-Sq (adj)=%91,36	

Şekillendirme kuvvetinin minimizasyonu ve ürün kalitesinin yüksek olması için prosese uygun yağlayıcının kullanımı büyük önem taşımaktadır. Şekillendirme kuvvetinin minimizasyonu için optimum yağlayıcı, sıcaklık, baskı plakası basıncı ve şekillendirme hızı parametreleri S/N yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 7.16'da verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre teflon film yağlayıcı, 250°C sıcaklık, 15 bar baskı plakası basıncı ve 2 mm/s şekillendirme hızı parametreleri optimum parametreler olarak belirlenmiştir. Yağlayıcıların performansı en yüksekte en düşüğe doğru teflon, gres + CNT, gres + fulleren, gres + HTC, gres + grafen ve baz gres şeklinde sıralanabilir. Gres ve gres matrisli vasıflı karbonlar arasında anlamlı bir farklılık oluştuğunu söyleyebilmek güçtür. Yağlayıcının sac malzeme ve kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltabilmesinin yanı sıra sıcaklık artışına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerini koruması ve istenilen tribolojik etkiyi göstermesi beklenir. Çalışma kapsamında proses 25, 200 ve 250 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Literatürde teflon film yağlayıcının sıcak proses koşulları için en uygun yağlayıcılardan biri olduğu ve 300°C'ye kadar dayanım gösterebildiği belirtilmiştir [18]. Bu durum şekillendirme kuvvetinin minimizasyonu için teflon film yağlayıcının optimum yağlayıcı olarak kullanılmasını destekler niteliktedir. Gres yağına takviye edilen HTC, CNT, fulleren ve grafen yarı akışkan forma sahiptir. Bu duruma bağlı olarak kalıp ve sac malzeme arasındaki basınç sebebiyle yağlayıcı tabaka zaman zaman deforme olarak etkisini yitirmekte ve bu durum sac malzeme ve kalıp arasındaki sürtünmenin artmasına neden olmaktadır. Teflon film yağlayıcının katı formda olması, yağlayıcı tabakanın basınca daha dayanıklı olmasını sağlayarak sac malzeme-kalıp arasındaki teması engellemekte ve bu sayede sürtünmeyi diğer yağlayıcılara kıyasla azaltmaktadır. Gres ve gres matrisli karbon esaslı takviyeli yağlayıcılarla kıyaslandığında teflon film yağlayıcı ile ~%3 seviyesinde daha düşük şekillendirme kuvveti elde edildiği belirlenmiştir. %3 farka bağlı olarak vasıflı karbonlarında tribolojik açıdan yeterli performansa sahip olduğu söylenebilir. Sıcaklık arttıkça şekillendirme kuvvetinin azaldığı görülmektedir. Çalışma kapsamında oda sıcaklığından 250°C'ye çıkıldığında şekillendirme kuvvetinin ortalama %20,55 oranında azaldığı görülmektedir (Çizelge 7.1). Bu durum literatürle uyumluluk göstermektedir. Özek ve Taşdemir [4], AA5754 sac malzemesinin derin çekme prosesinde farklı sıcaklıkların ıstampa kuvvetine etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık, oda sıcaklığından

250°C'ye arttırıldığında ıstampa kuvvetinin yaklaşık %22,69 oranında azaldığını belirlemişlerdir.

Çalışma kapsamında istatistiksel ve fiziksel olarak anlamlılık elde edilemeyen parametrelerden biri baskı plakası kuvvetidir. Baskı plakası basıncındaki değişim şekillendirme kuvveti açısından kararlı davranış göstermemiştir. Basınç 10 bardan 15 bara arttıkça şekillendirme kuvveti azalırken, 15 bar-20 bar aralığında kuvvet tekrar artmaktadır. Şekillendirme hızı ile kuvvet arasında lineer ilişki olduğu görülmektedir. Şekillendirme hızı sertleşmesine bağlı olarak hız arttıkça malzemenin sünekliliği azalmakta ve mukavemeti artmaktadır. Bu durum plastik şekil değişimini zorlaştırmakta ve şekil değişimi için gerekli kuvveti arttırmaktadır. Ek olarak şekillendirme hızı arttıkça zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti aşmakta olup, bu durum sac malzeme kalınlığının homojen dağılımını engelleyerek ürün kalitesini azaltmaktadır. Kalınlık dağılımının homojenliğinin bozulmasına bağlı olarak yerel kalınlaşan bölgeler çekme zorlanmasına karşı direnç oluşturacağı için şekillendirme kuvvetlerinin arttığı iddia edilebilir.

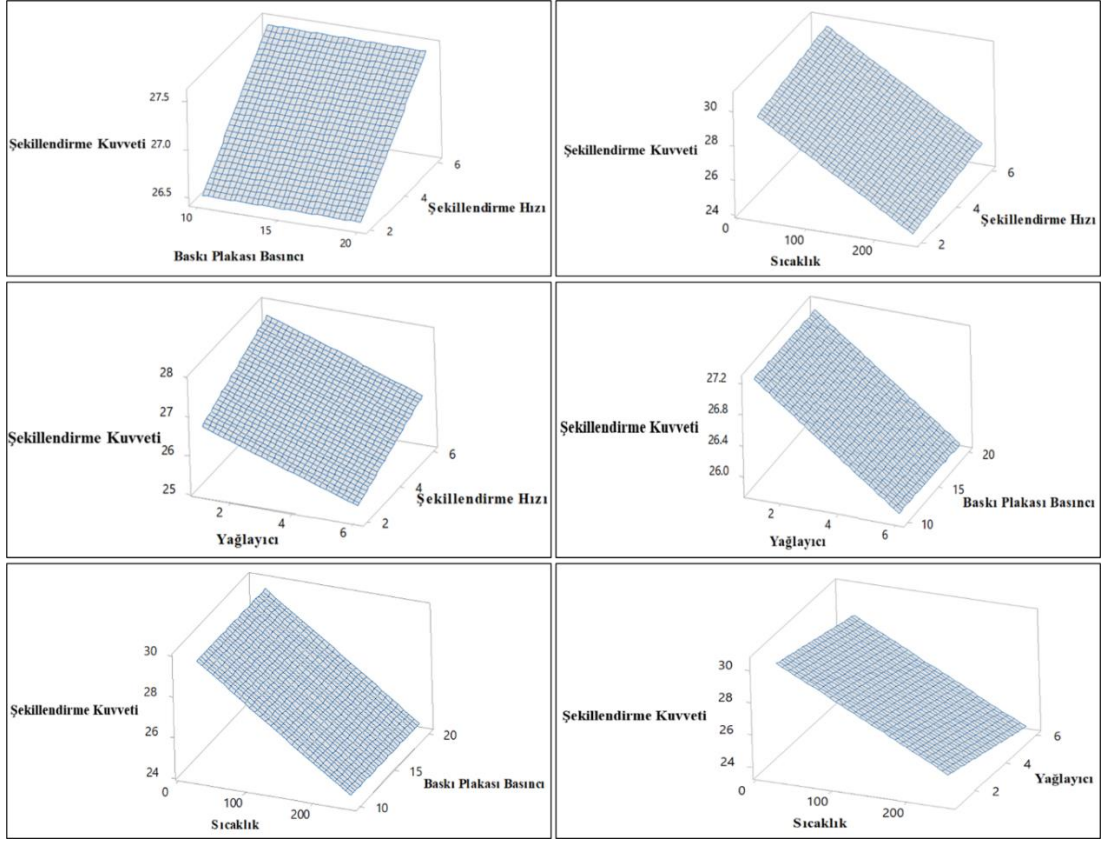


Şekil 7.16. Şekillendirme kuvveti için S/N analizi.

Giriş parametrelerinin her birinin şekillendirme kuvvetine etkisi ANOVA ve S/N analizi yöntemleri ile belirlenmiştir. Fakat bu parametreler proses esnasında

birbirleriyle etkileşimli olarak etki etmektedir. Bu sebeple parametrelerin ikili etkileşimlerinin şekillendirme kuvvetine etkisi 3 boyutlu görüntüler elde edilerek analiz edilmiş ve analiz sonuçları Şekil 7.17’de verilmiştir. Şekil 7.17’de verilen grafiklerin hepsinde lineer davranış gösteren yüzeyler oluştuğu görülmektedir. Bu duruma bağlı olarak parametreler arasında anlamlı bir etkileşimin bulunduğunu iddia etmek güçtür.

Deney sisteminin güvenilirliği için en iyi ve en kötü deney koşulları ile rastgele seçilen bir deney koşulu için Minitab’da tahmin modülü çalıştırılmış ve tahmin değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Rastgele nokta için çalışma kapsamında geliştirilen HTC yağlayıcı koşulu dikkate alınmıştır. Güvenilirlik deney parametreleri ve sonuçları Çizelge 7.3’te verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile tahminlenen değerler arasında maksimum %7 hata gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen sonuç ile %91,36 oranında hesaplanan regresyon katsayısı değeri tutarlılık göstermektedir. Ayrıca geliştirilen HTC yağlayıcı ile tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Güvenilirlik değerleri maksimum, minimum ve HTC koşulunu içerdiği için sonuçların anlamlılığı 3d topografya görüntüleri ile görsel olarak da incelenmiştir.



Şekil 7.17. Parametre etkileşimlerinin şekillendirme kuvvetine etkisinin analizi için elde edilen 3 boyutlu görüntüler.

Çizelge 7.3. Güvenilirlik analizi sonuçları.

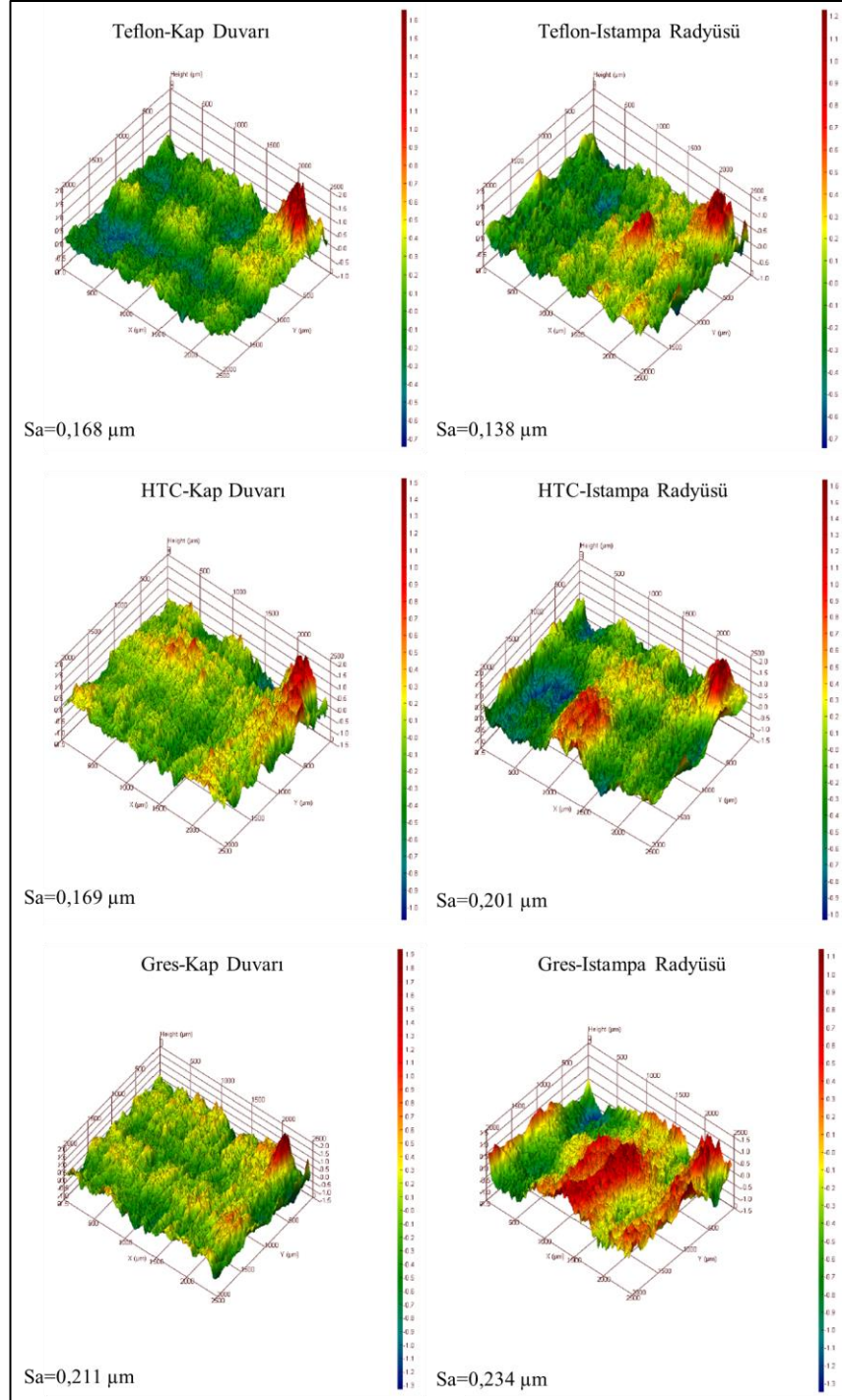
	Deney	Yağlayıcı	Sıcak. (°C)	Basınc (Bar)	Hız (mm/dk)	Tahmin	Deney Sonuç	Fark (%)
LDR 1,7	En iyi	Teflon	250	15	2	19,57	20,82	6,34
	Rastgele	HTC	200	10	4	27,50	26,53	3,54
	En kötü	Gres	OS	10	6	31,70	30,1	5,06

S/N analizi ile belirlenen en iyi, HTC ve en kötü koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda kap duvarı ve ıstampa radyusu bölgelerinden 3D topoğrafya görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler ve pürüzlülük (Sa) değerleri Şekil 7.19’da verilmiştir. Topoğrafya görüntülerinde kırmızı renk tonu pürüzlülüklerin yoğunluğunu, mavi renk tonu pürüzlülüklerin derinliğini, sarı ve yeşil renk tonları düzlemselliği ifade etmektedir. Literatüre göre derin çekmede yüzey pürüzlülüğünün tane boyutu ve gerinim ile bağlantılı olduğu belirtilmiştir [202]. Gerinim değerinin

artışı şekillendirme kuvvetinin artışına bağlıdır. Elde edilen topografya sonuçlarına göre şekillendirme kuvveti arttıkça kap duvarı ve radyusu bölgesinde pürüzlülüğün arttığı görülmektedir (Şekil 7.18). Şekillendirme esnasında artan kuvvete bağlı olarak temas noktalarında malzeme ile kalıp arasında nüfuziyet artacağı için yüzey deformasyonunun artması beklenen bir durumdur. Yağlayıcı kullanımı ile temas noktalarında oluşturulan film tabakası sayesinde deformasyon minimize edilebilmiştir. Şekil 7.18’de HTC ve teflonun yüzey pürüzlülüğü açısından kap duvarı ve ıstampa radyusu bölgelerinde benzer performans gösterdiği, gresin kullanıldığı koşullarda ise yüzey formunun bozulduğu görülmektedir. Bu durum HTC’nin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme açısından anlamlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

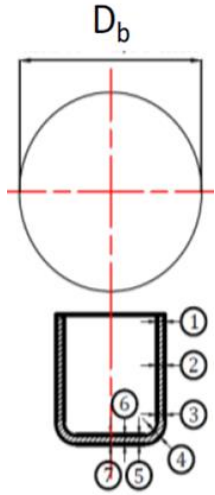
HTC odaklı ılık derin çekme deneylerinde dikkate alınan bir diğer çıkış parametresi kap kalınlığıdır. Kalınlık değişimi sonuçları Çizelge 7.4’te verilmiştir. Kap kalınlığı için yapılan ölçümler binde bir hassasiyetli iğne uçlu mikrometre ile gerçekleştirilmiştir. Kap kalınlığı değişimi açısından minimum incelme 1,703 mm ile baz gres yağlayıcı kullanıldığı koşulda, maksimum kalınlık ise 2,246 mm değeri ile teflon yağlayıcının kullanıldığı koşulda elde edilmiştir. Bütün yağlayıcı koşullarında %20’den fazla kap incelmesi probleminin oluşmaması deneysel sistem kararlılığı açısından anlamlıdır. HTC de diğer endüstriyel yağlara kıyasla benzer performans göstermiştir. Bütün ölçüm noktalarından elde edilen verilere ANOVA uygulanmış ve sadece 3 numaralı ölçüm bölgesi için anlamlı istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.19). Diğer ölçüm noktaları için elde edilen düzeltilmiş R kare (Adj R-Sq) değerleri %30 değerinin altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak, kap kalınlığı değişiminin giriş parametrelerinden bağımsız olarak farklı deney koşullarında benzer trendle hareket ettiği söylenebilir. Farklı ölçüm noktalarından sadece bir tanesindeki uyumluluğa bakarak yağlayıcıların performans kıyaslanmasının yapılmasının anlamlı olmayacağı düşünülmüştür. HTC’nin kap kalınlığı dağılımında homojenliği sağlaması tez çalışması kapsamında beklenmekteydi. Şekil 7.19(b), HTC ve Teflon’ un kullanıldığı deneylerde minimum incelmenin meydana geldiğini göstermektedir. Fakat şekillendirme kuvveti açısından HTC’den daha iyi sonuç veren ve yoğun endüstriyel kullanıma sahip teflon yağlayıcı koşulunda dahi homojen bir dağılım elde edilemediği görülmüştür. İncelme esnasında oluşan çekme kuvvetlerinin fiziksel etkisinin yağlayıcının oluşturduğu fiziksel etkiye kıyasla numune üzerinde çok

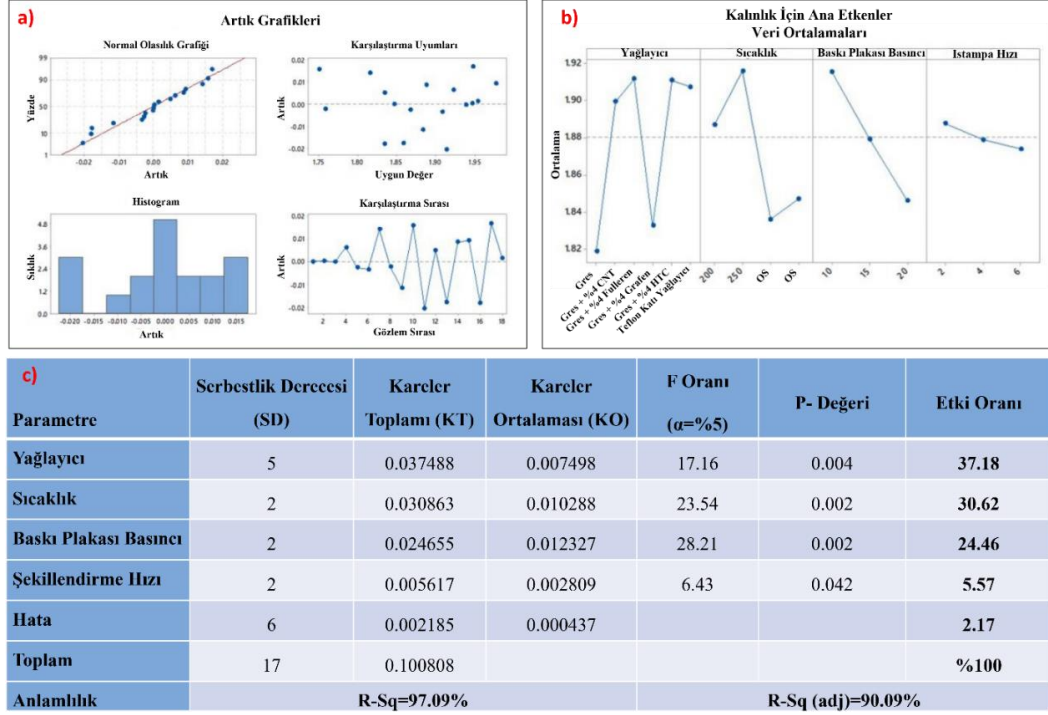
daha fazla etkili olması sebebiyle, kap kalınlığı açısından parametrik çalışmayla açıklanabilir sonuçlar elde edilememiştir. Bu aşamada sadece, HTC ve diğer vasıflı karbonların benzer performans göstermesi, HTC'nin endüstriyel kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır.



Şekil 7.18. Kap duvarı ve ıstampa radyusu bölgelerinden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri.

Çizelge 7.4. Kap kalınlığı değişimi sonuçları.

AA5754 Kalınlık=2mm $D_b=Ø60$ mm $D_p=35$ mm LDR: 1.7								
Ölçüm Noktaları	Bölge Numarası Kalınlık (mm)							
	Deney No	1	2	3	4	5	6	7
 $LDR = \frac{D_b}{D_p}$ <p>D_b: Numune çapı D_p: İstampa çapı</p>	1	2,128	1,945	1,847	1,727	1,928	1,948	1,942
	2	2,179	1,913	1,947	1,729	1,957	1,953	1,959
	3	2,201	1,891	1,938	1,732	1,956	1,958	1,964
	4	2,279	1,902	1,929	1,721	1,920	1,957	1,960
	5	2,252	1,966	1,864	1,745	1,966	1,962	1,967
	6	2,221	2,017	1,905	1,780	1,903	1,951	1,949
	7	2,199	1,981	1,829	1,814	1,944	1,945	1,945
	8	2,176	1,933	1,756	1,734	1,960	1,962	1,969
	9	2,227	1,942	1,872	1,753	1,955	1,962	1,960
	10	2,192	1,964	1,766	1,738	1,934	1,948	1,955
	11	2,233	1,968	1,793	1,761	1,913	1,955	1,959
	12	2,235	1,981	1,839	1,796	1,867	1,958	1,959
	13	2,104	1,972	1,840	1,739	1,957	1,968	1,965
	14	2,246	1,994	1,949	1,787	1,937	1,949	1,952
	15	2,233	2,047	1,986	1,793	1,928	1,960	1,956
	16	2,108	1,935	1,816	1,757	1,962	1,965	1,958
	17	2,222	2,047	1,964	1,703	1,942	1,952	1,951
	18	2,203	2,005	1,955	1,752	1,953	1,954	1,957

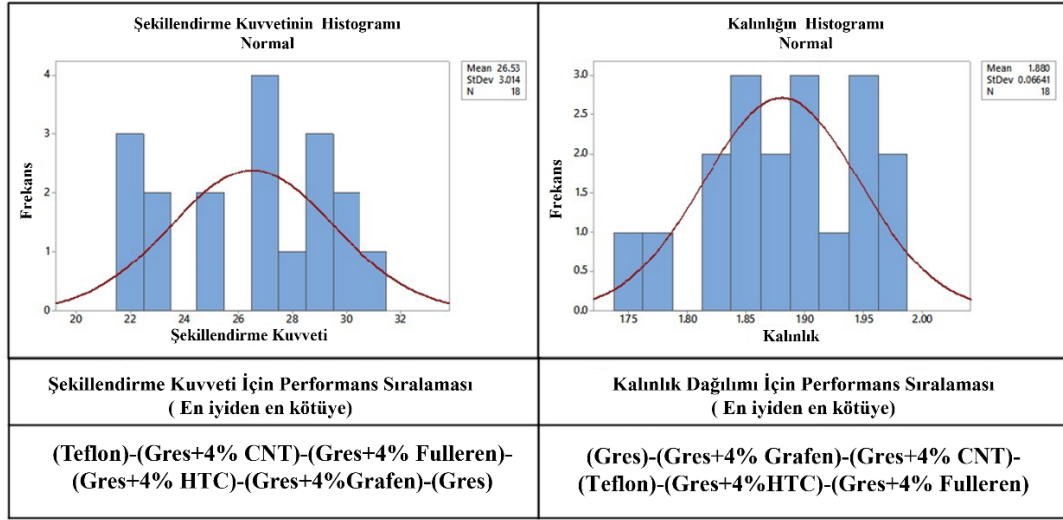


Şekil 7.19. Kalınlık analizleri için istatistiksel grafikler a) Artık(fark) grafikleri, b) Ana etki grafiği, c) ANOVA.

7.5. HTC İÇİN GENEL DEĞERLENDİRME

Şekil 7.20, HTC'nin ılık derin çekme deneylerinde elde edilen şekillendirme kuvveti ve kalınlık dağılımı için standart dağılım grafiklerini göstermektedir. Grafikler normal standart dağılım davranışı göstererek deneysel sonuçların anlamlı ve uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 7.20 aynı zamanda yağlayıcıların şekillendirme kuvveti ve kalınlık dağılımı için en iyiden en kötüye doğru performans sıralamasını da göstermektedir. HTC yağlayıcının performansı Teflona göre daha düşük ancak şekillendirme kuvveti açısından nitelikli karbonlara (CNT, fulleren, grafen) yakındı. Diğer bir parametre olan kalınlık dağılımı açısından ise yağlayıcıların oldukça benzer performans gösterdiği, HTC'nin ise endüstriyel yağlayıcılara eşdeğer performans gösterebildiği belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. Grafen ile yapılan çalışmada grafenin polialfaolefinlere (PaO4) kıyasla sürtünme katsayısını 0,14'ten 0,08'e düşürdüğü belirlenmiştir [203]. Ray-tekerlek sürtünme ortamında gerçekleştirilen tribolojik performans testinde CNT katkılı yağlayıcının sürtünme katsayısı ve kütle kaybı açısından yüksek performans verdiği belirtilmiştir [204]. Fullerenin tribolojik performansını ölçen başka bir çalışmada, mineral bazlı yağlayıcı

ortamda 0,033, fulleren katkılı yağ ortamında ise 0,021 sürtünme katsayısı elde edilmiştir [205]. Başka bir çalışmada bitkisel yağ ortamında 0,0825 grafen katkılı bitkisel yağ ortamında ise 0,0714 sürtünme katsayısı elde edilmiştir [206].



Şekil 7.20. Genel sonuçlar için standardizasyon tablosu.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

AA5754-O Al-Mg alaşımı kullanılarak, malzemenin derin çekilebilirliğinin, yağlayıcının tribolojik performans kriterlerine bağlı olarak arttırılması ve geliştirilen HTC esaslı yağlayıcı ile çeşitli sıcaklık koşullarında oluşan yırtılma, buruşma, derin çekme oranı, yüzey kalitesi, incelme parametreleri dikkate alınarak malzemenin derin çekilebilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada kimyasal karakterizasyon aşamasında, sentezlenen HTC'ler kimyasal karakterizasyon aşamasında teflon, grafen, fulleren ve karbon nano-tüp (vasıflı karbonlar) ile kıyaslanmış ve bu karbonlar hem aşınma hem de ılık derin çekme deneylerinde HTC'nin tribolojik performansının analizinde kullanılmıştır. Çalışmanın metodolojisi, üretim, karakterizasyon, aşınma deneyleri ve hacim kayıpları ve ılık derin çekme prosesine ait işlem basamaklarını ve bunların deneysel ve istatistiksel analizlerinden oluşmaktadır. Üretim aşamasında ilk başta HTC sentezlenmiştir ve kıyaslama yapılabilmesi için diğer vasıflı karbonlar, teflon ve baz gres kullanılmıştır. HTC ve diğer vasıflı karbonların SEM ve EDX analizleri ile karakterize edilmiştir. Farklı yağlayıcı türevlerine göre sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Yağlayıcıların numune üzerindeki aşınma özelliklerini belirlemek için pin-on disk aşınma testleri yapıp hacim kaybı grafiği elde edilmiştir. Aşınma deneylerinde numuneler ve pin-on diske ait malzemenin sem görüntüleri ve elementel analizleri yapılmıştır ve üç farklı sıcaklık aralığında (oda sıcaklığı ,100 °C ve 200 °C) farklı yağlayıcılar yapılan deneylerde aşınma tipleri gösterilmiştir. Son olarak ılık derin çekme prosesine için yağlayıcı geliştirme amacıyla hazırlanan deney tasarımında Taguchi L18 ortogonal dizinine göre yağlayıcı türü (6 seviye), baskı plakası basıncı (3 seviye), ıstampa hızı (3 seviye) ve şekillendirme sıcaklığı (3 seviye) parametreleri dikkate alınmıştır. Ilık derin çekme prosesinde; şekillendirme kuvveti, kap kalınlığı analizi için ANOVA, S/N, regresyon analizi ve 3 boyutlu etkileşim grafikleri kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilip genel sonuçlar için standardizasyon

tablosu oluşturulmuştur. Aşınma izleri, SEM, EDS ve kap numunelerinin 3D topografya görüntüleri elde edilmiştir.

HTC sentezi ve HTC'nin tribolojik performans analizi için pin-on-disk ve ılık derin çekme odaklı yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. HTC'nin sentezi sonrasında SEM görüntüleri ve FTIR sonuçları, küresel morfolojide yaklaşık 550 nm çapında HTC malzemesinin elde edildiğini göstermektedir.
2. HTC'nin mikron boyutlu lif morfolojisine sahip olduğu gözlenmiştir.
3. HTC'nin karbon oranının yaklaşık %75 ve geri kalanında oksijen olduğu belirlenmiştir.
4. Her üç yağlayıcı koşulunda ve farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerlerinin 0,65 ile 0,85 arasında değişim gösterdiği gözlenmiştir Ortalama sürtünme değerleri dikkate alındığında performans sıralamasının iyiden kötüye doğru fulleren, CNT ve HTC şeklinde olduğu görülmüştür.
5. Sürtünme değerleri için HTC'nin morfolojik yapı ve oksitlenme eğilimi nedeniyle en düşük performansı verdiği söylenebilir. Fakat en iyi koşul ile en kötü koşul arasındaki fark ihmal edilebilecek seviyededir (~%3).
6. Aşınma testini tribolojik parametrelerden biri olan sıcaklığa bağlı olarak değerlendirdiğimizde en düşük aşınma hacim kaybı fulleren ile elde edilirken bunu sırasıyla CNT ve HTC izlemiştir. Hacim kaybı sonuçları sürtünme katsayısı sonuçları ile benzerlik göstermiştir.
7. AA5754-O Numune için en iyi aşınma direnci performansı fulleren ile yüzeyi yağlanan numunelerde görülmüştür.
8. Aşınma testlerinde sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybına ilişkin performans sıralaması fulleren, CNT ve HTC olarak elde edilmiştir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda, her üç yağlayıcı koşulunda benzer aşınma davranışı gözlemlenmiştir.
9. Derin çekme işleminde giriş parametrelerinin şekillendirme kuvvetine etkisi ANOVA yöntemi ile analiz edilmiş ve şekillendirme kuvveti için en etkili parametrenin sıcaklık (%72,32) olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın yanı sıra

yağlayıcı parametresinin de %20,89 oranında etkili olduğu görülmüştür. Baskı plakası basıncı ve şekillendirme hızı parametrelerinin şekillendirme kuvveti parametresi için istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

10. Gres ve gres matrisli karbon esaslı takviyeli yağlayıcılarla kıyaslandığında teflon film yağlayıcı ile daha düşük şekillendirme kuvveti elde edildiği belirlenmiştir ve bu kuvvetler arasındaki fark yaklaşık yüzde 3 'tür.
11. Sıcak/soğuk derin çekme deneylerinde şekillendirme kuvvetini düşürme performansını teflon sergilerken, HTC diğer yağlayıcılarla benzer performans göstermiştir. Bu performans farkı yağlayıcılar arasında yaklaşık yüzde 1 'dir.
12. Kap kalınlığı değişimi açısından minimum incelme 1,703 mm ile baz gres yağlayıcı kullanıldığı koşulda, maksimum kalınlık ise 2,246 mm değeri ile teflon yağlayıcının kullanıldığı koşulda elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Pourboghrat, F., Carsley, J. E., Abedrabbo, N., Carsley, J., Chung, J. W., Dick, K., Lege, R. E., Choi, F., and Chu, S. H., "Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models", *Elsevier*, 23: 841–875 (2007).
2. Acar, D., Türköz, M., Halkacı, H. S., Gedikli, H., Cora, Ö. N., Üniversitesi, K. T., and Üniversitesi, S., "Ilık Hidromekanik Derin Çekme Prosesinin Sonlu Elemanlar Analizi Ve Parametrik Optimizasyonu", (2014).
3. Bolt, P. J., Lamboo, N. A. P. M., and Rozier, P. J. C. M., "Feasibility of warm drawing of aluminium products", *Journal Of Materials Processing Technology*, 115 (1): 118–121 (2001).
4. Özek, C., of the Faculty of Engineering & V. T.-J., and undefined 2017, "AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması.", *Search.Ebscohost.Com*, 32 (1): 193–201 (2017).
5. Toros, S., Ozturk, F., and Kacar, I., "Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys", *Journal Of Materials Processing Technology*, 207 (1–3): 1–12 (2008).
6. Türköz, M., "Ilık hidromekanik derin çekmede proses optimizasyonu - baskı plakası kuvveti, basınç ve sıcaklık üzerine deneysel ve nümerik çalışmalar", (2015).
7. WANG, H., LUO, Y., FRIEDMAN, P., CHEN, M., and GAO, L., "Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 22 (1): 1–7 (2012).
8. Pandey, A., Khan, A. S., Kim, E. Y., of ..., S. H. C.-I. J., and undefined 2013, "Experimental and numerical investigations of yield surface, texture, and deformation mechanisms in AA5754 over low to high temperatures and strain rates", *Elsevier*, 41: 165–188 (2013).
9. Muhammed, H. Ç., "Ilık derin çekme prosesi için şekillendirme sıcaklıklarının belirlenmesi ve karakterizasyonu. Karabük Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi.", (2015).
10. Şen, N., "Yüksek mukavemetli çelik sacların flanş bölgesinin ısıtılması ile derin çekme sınır oranının deneysel incelenmesi.", (2015).

11. Danişman, D. T. M. E. A. D. and ÖZEK, Y. D. C., "Kare kesitli kapların derin çekilmesinde kalıp geometrisi ve radyüsünün çekme oranına etkisinin araştırılması/Investigation of the effect of die geometry and the", (2011).
12. Bay, N., Olsson, D. D., and Andreasen, J. L., "Lubricant test methods for sheet metal forming", *Tribology International*, 41 (9–10): 844–853 (2008).
13. Bay, N., Andreasen, J. O., Olsson, D. D., and Andreasen, J. L., "A quantitative lubricant test for deep drawing", *Inderscienceonline.ComDD Olsson, N Bay, JL AndreasenInternational Journal Of Surface Science And Engineering, 2010•inderscienceonline.Com*, 4 (1): 2–12 (2010).
14. Ghosh, M., Miroux, A., Werkhoven, R. J., Bolt, P. J., and Kestens, L. A. I., "Warm deep-drawing and post drawing analysis of two Al–Mg–Si alloys", *Journal Of Materials Processing Technology*, 214 (4): 756–766 (2014).
15. Iwanaga, K., Tashiro, H., Okamoto, H., and Shimizu, K., "Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy", *Journal Of Materials Processing Technology*, 155–156: 1313–1316 (2004).
16. Takuda, H., Mori, K., Masuda, I., Abe, Y., and Matsuo, M., "Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction", *Journal Of Materials Processing Technology*, 120 (1–3): 412–418 (2002).
17. Cetin, M. H., Ugur, A., Yigit, O., Gokkaya, H., and Arcaklioglu, E., "Development of Forming Temperature Curves for Warm Deep Drawing Process Under Non-isothermal Conditions", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 40 (9): 2763–2784 (2015).
18. Mckinley, J., "Warm Forming of Aluminum Brazing Sheet. Experiments and Numerical Simulations", (2010).
19. Tari, D. G., Worswick, M. J., and Winkler, S., "Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions", *Journal Of Materials Processing Technology*, 213 (8): 1337–1347 (2013).
20. Ren, L. M., Zhang, S. H., Palumbo, G., and Tricarico, L., "Warm deep drawing of magnesium alloy sheets - Formability and process conditions", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 222 (11): 1347–1354 (2008).
21. Ren, L. M., Palumbo, G., Zhang, S. H., and Tricarico, L., "Warm Deep Drawing Of Rectangular Cups With Magnesium Alloy AZ31 Sheets", (2007).
22. Türköz, M., Cora, Ö. N., Gedikli, H., Dilmeç, M., Halkacı, H. S., and Koç, M., "Numerical optimization of warm hydromechanical deep drawing process parameters and its experimental verification", *Elsevier*, (2020).

23. Palumbo, G., Sorgente, D., of Achievements in ..., L. T.-..., and undefined 2006, "Numerical and experimental analysis of the Warm Deep Drawing process for Mg alloys", *Academia.EduG Palumbo, D Sorgente, L Tricarico, SH Zhang, WT ZhengJournal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering, 2006•academia.Edu*, 14 (1–2): (2006).
24. Berman, D., Erdemir, A., Carbon, A. V. S.-, and undefined 2013, "Reduced wear and friction enabled by graphene layers on sliding steel surfaces in dry nitrogen", *Elsevier*, (2013).
25. Cheng, G., Dong, L., Kamboj, L., Khosla, T., Wang, X., Zhang, Z., Guo, L., Pesika, N., and Ding, J., "Hydrothermal Synthesis of Monodisperse Hard Carbon Spheres and Their Water-Based Lubrication", *Tribology Letters*, 65 (4): (2017).
26. Mistry, K. K., Pol, V. G., Thackeray, M., Wen, J., and Erdemir, D. J. A. M., "Synthesis and Tribology of Micro-Carbon Sphere Additives for Enhanced Lubrication", *Tribology Transactions*, 58 (3): 474–480 (2015).
27. Turan, M. E., "Investigation of mechanical properties of carbonaceous (MWCNT, GNPs and C60) reinforced hot-extruded aluminum matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 788: 352–360 (2019).
28. Zhang, X., Ma, F., Ma, K., of Materials Science, X. L.-J., and undefined 2012, "Effects of graphite content and temperature on microstructure and mechanical properties of Iron-based powder metallurgy parts", *Pdfs.Semanticscholar.OrgX Zhang, F Ma, K Ma, X LiJournal Of Materials Science Research, 2012•pdfs.Semanticscholar.Org*, 1 (4): (2012).
29. Agostini, M., Brutti, S., and Hassoun, J., "High Voltage Li-Ion Battery Using Exfoliated Graphite/Graphene Nanosheets Anode", *ACS Applied Materials And Interfaces*, 8 (17): 10850–10857 (2016).
30. Simsir, H., Akgul, Y., and Erden, M. A., "Hydrothermal carbon effect on iron matrix composites produced by powder metallurgy", *Materials Chemistry And Physics*, 242: 122557 (2020).
31. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood chips via low-temperature and their characterization", *Bioresource Technology*, 246: 82–87 (2017).
32. Titirici, M.-M., White, Robin. J., Falco, C., and Sevilla, M., "Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage", *Energy & Environmental Science*, 5 (5): 6796 (2012).

33. Román, S., Libra, J., Berge, N., Sabio, E., Ro, K., Li, L., Ledesma, B., Álvarez, A., and Bae, S., "Hydrothermal carbonization: modeling, final properties design and applications: a review", *Mdpi.Com*, (2018).
34. Fei, J., Qi, Y., Luo, L., Gu, Y., and Huang, J., "Synergistic effect of talc/carbon spheres composite as oil-based additive enhancing the lubricating properties for steel-steel contact", *Lubrication Science*, 32 (2): 80–89 (2020).
35. Lv, X., Cao, L., Yang, T., Wan, Y., and Gao, J., "Lubricating behavior of Submicrometer carbon spheres as lubricant additives", *Particulate Science And Technology*, 38 (5): 568–572 (2020).
36. Min, C., He, Z., Liu, D., Zhang, K., and Dong, C., "Urea modified fluorinated carbon nanotubes: unique self-dispersed characteristic in water and high tribological performance as water-based lubricant additives", *New Journal Of Chemistry*, 43 (37): 14684–14693 (2019).
37. Ghaffari Tari, D., Worswick, M. J., and Winkler, S., "Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions", *Journal Of Materials Processing Technology*, 213 (8): 1337–1347 (2013).
38. Türköz, M., Cora, Ö. N., Gedikli, H., Dilmeç, M., Halkacı, H. S., and Koç, M., "Numerical optimization of warm hydromechanical deep drawing process parameters and its experimental verification", *Journal Of Manufacturing Processes*, 57 (June): 344–353 (2020).
39. Ma, W. Y., Wang, B. Y., Fu, L., Zhou, J., and Huang, M. D., "Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 25 (7): 2342–2351 (2015).
40. Wang, Y., Cheng, Y., Zhang, P., Luo, G., Li, P., and Jiang, K., "Effect of lubrication conditions on the forming limit of deep drawing of 6061 aluminum alloy sheet", *Materials Science Forum*, 944: 85–91 (2018).
41. Folle, L. F. and Schaeffer, L., "Effect of surface roughness and lubrication on the friction coefficient in deep drawing processes of aluminum alloy aa1100 with fem analysis", *Revista Materia*, 24 (1): 1–16 (2019).
42. Tiwari, P. R., Rathore, A., and Bodkhe, M. G., "Factors affecting the deep drawing process – A review", *Materials Today: Proceedings*, 56: 2902–2908 (2022).
43. Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., Alves, J. L., and Menezes, L. F., "Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel", *Finite Elements In Analysis And Design*, 43 (14): 1062–1067 (2007).

44. Ren, L. M., Zhang, S. H., Palumbo, G., and Tricarico, L., "Warm deep drawing of magnesium alloy sheets - Formability and process conditions", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 222 (11): 1347–1354 (2008).
45. Zareh-Desari, B., Abaszadeh-Yakhforvazani, M., and Khalilpourazary, S., "The effect of nanoparticle additives on lubrication performance in deep drawing process: Evaluation of forming load, friction coefficient and surface quality", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 16 (5): 929–936 (2015).
46. Lee, J., Cho, S., Hwang, Y., Cho, H. J., Lee, C., Choi, Y., Ku, B. C., Lee, H., Lee, B., Kim, D., and Kim, S. H., "Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces", *Tribology International*, 42 (3): 440–447 (2009).
47. Huang, H. D., Tu, J. P., Gan, L. P., and Li, C. Z., "An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive", *Wear*, 261 (2): 140–144 (2006).
48. Radhika, P., Sobhan, C. B., and Chakravorti, S., "Improved tribological behavior of lubricating oil dispersed with hybrid nanoparticles of functionalized carbon spheres and graphene nano platelets", *Applied Surface Science*, 540: 1–12 (2021).
49. Su, Y., Gong, L., and Chen, D., "An investigation on tribological properties and lubrication mechanism of graphite nanoparticles as vegetable based oil additive", *Journal Of Nanomaterials*, 2015: 1–7 (2015).
50. Bhaumik, S., Prabhu, S., and Singh, K. J., "Analysis of Tribological behavior of carbon nanotube based industrial mineral gear oil 250 cSt viscosity", *Advances In Tribology*, 2014: 1–8 (2014).
51. Lee, C. G., Hwang, Y. J., Choi, Y. M., Lee, J. K., Choi, C., and Oh, J. M., "A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 10 (1): 85–90 (2009).
52. Gordon, A. T., "Re: Introduction to nanotechnology: Potential applications in physical medicine and rehabilitation: Response letter [2]", *American Journal Of Physical Medicine And Rehabilitation*, 86 (12): 1032 (2007).
53. Aktürk, C., "ZnO nano sistemlerinin sentezlenmesi ve manyetik özelliklerinin elektron paramanyetik rezonans (EPR) spektroskopisi ile incelenmesi.", (2013).
54. Bhushan, B., "Introduction to Nanotechnology", Springer Handbook of Nanotechnology, *Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, 1–13 (2010).
55. Lewenstein, B. V., Gorss, J., Radin, J., and Hall, K., .

56. Çeliker., G., "Nanotechnology in Packaging Industry and Its Applications. In 4th Packaging Congress, Turkey.", (2005).
57. Bondavalli, P., "Carbon and Its New Allotropes: Fullerene, Carbon Nanotubes, and Graphene", *Graphene And Related Nanomaterials*, 1–40 (2018).
58. Takai, K., Tsujimura, S., Kang, F., and Inagaki, M., "Graphene: preparations, properties, applications, and prospects", (2019).
59. Pierson, H. O., "Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes", *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes*, 43–69 (1993).
60. William D. Callister, Jr. , D. G. R., "Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach", *JOHN WILEY*, (2020).
61. Bianco, A., Cheng, H. M., Enoki, T., Gogotsi, Y., Hurt, R. H., Koratkar, N., Kyotani, T., Monthieux, M., Park, C. R., Tascon, J. M. D., and Zhang, J., "All in the graphene family – A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials", *Carbon*, 65: 1–6 (2013).
62. Bianco, A., Cheng, H. M., Enoki, T., Gogotsi, Y., Hurt, R. H., Koratkar, N., Kyotani, T., Monthieux, M., Park, C. R., Tascon, J. M. D., and Zhang, J., "All in the graphene family – A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials", *Carbon*, 65: 1–6 (2013).
63. Geim, A. K. and Novoselov, K. S., "The rise of graphene", *Nature Materials* 2007 6:3, 6 (3): 183–191 (2007).
64. Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., and Seal, S., "Graphene based materials: Past, present and future", *Progress In Materials Science*, 56 (8): 1178–1271 (2011).
65. Penkov, O. V., "Tribology of graphene: Simulation methods, preparation methods, and their applications", *Tribology Of Graphene: Simulation Methods, Preparation Methods, And Their Applications*, 1–246 (2020).
66. Mak, K. F., Shan, J., and Heinz, T. F., "Electronic Structure of Few-Layer Graphene: Experimental Demonstration of Strong Dependence on Stacking Sequence", *Physical Review Letters*, 104 (17): (2010).
67. Partoens, B. and Peeters, F. M., "From graphene to graphite: Electronic structure around the K point", *Physical Review B - Condensed Matter And Materials Physics*, 74 (7): 075404 (2006).
68. Haering, R. R., "BAND STRUCTURE OF RHOMBOHEDRAL GRAPHITE", <https://doi.org/10.1139/P58-036>, 36 (3): 352–362 (2011).

69. Ferralis, N., "Probing mechanical properties of graphene with Raman spectroscopy", *Journal Of Materials Science* **2010 45:19**, 45 (19): 5135–5149 (2010).
70. Lu, C. L., Chang, C. P., Huang, Y. C., Ho, J. H., Hwang, C. C., and Lin, M. F., "Electronic Properties of AA- and ABC-Stacked Few-Layer Graphites", <https://doi.org/10.1143/JPSJ.76.024701>, 76 (2): (2007).
71. Lui, C. H., Li, Z., Chen, Z., Klimov, P. V., Brus, L. E., and Heinz, T. F., "Imaging stacking order in few-layer graphene", *Nano Letters*, 11 (1): 164–169 (2011).
72. Dou, W., Xu, C., Guo, J., Du, H., Qiu, W., Xue, T., Kang, Y., and Zhang, Q., "Interfacial Mechanical Properties of Double-Layer Graphene with Consideration of the Effect of Stacking Mode", *ACS Applied Materials And Interfaces*, 10 (51): 44941–44949 (2018).
73. Zhang, H. and Chang, T., "Edge orientation dependent nanoscale friction", *Nanoscale*, 10 (5): 2447–2453 (2018).
74. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., and Young, R. J., "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites", *Progress In Materials Science*, 90: 75–127 (2017).
75. Liu, X., Metcalf, T. H., Robinson, J. T., Houston, B. H., and Scarpa, F., "Shear modulus of monolayer graphene prepared by chemical vapor deposition", *Nano Letters*, 12 (2): 1013–1017 (2012).
76. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., and Hone, J., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, 321 (5887): 385–388 (2008).
77. Zandiatashbar, A., Lee, G. H., An, S. J., Lee, S., Mathew, N., Terrones, M., Hayashi, T., Picu, C. R., Hone, J., and Koratkar, N., "Effect of defects on the intrinsic strength and stiffness of graphene", *Nature Communications* **2014 5:1**, 5 (1): 1–9 (2014).
78. "The Physics of Fullerene-Based and Fullerene-Related Materials | WorldCat.Org", <https://search.worldcat.org/title/1123916478> (2024).
79. Bondavalli, P., "Graphene and Related Nanomaterials: Properties and Applications", *Graphene And Related Nanomaterials: Properties And Applications*, 1–175 (2017).
80. Hirsch, A., "The era of carbon allotropes", *Nature Materials* **2010 9:11**, 9 (11): 868–871 (2010).

81. Hamada, N., Sawada, S. I., and Oshiyama, A., "New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules", *Physical Review Letters*, 68 (10): 1579 (1992).
82. Laird, E. A., Kueemeth, F., Steele, G. A., Grove-Rasmussen, K., Nygård, J., Flensberg, K., and Kouwenhoven, L. P., "Quantum transport in carbon nanotubes", *Reviews Of Modern Physics*, 87 (3): 703 (2015).
83. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Eklund, P. C., and Ebert, L. B., "Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes", *Carbon*, 3 (35): 437–438 (1997).
84. Liew, K. M., Yan, J.-W., and Zhang, L.-W., "Introduction", *Mechanical Behaviors Of Carbon Nanotubes*, 1–22 (2017).
85. Ribeiro, B., Botelho, E. C., Costa, M. L., and Bandeira, C. F., "Carbon nanotube buckypaper reinforced polymer composites: a review", *Polímeros*, 27 (3): 247–255 (2017).
86. Manu, B. R., Gupta, A., and Jayatissa, A. H., "Tribological Properties of 2D Materials and Composites—A Review of Recent Advances", *Materials 2021, Vol. 14, Page 1630*, 14 (7): 1630 (2021).
87. Rahman, M. M., Islam, M., Roy, R., Younis, H., AlNahyan, M., and Younes, H., "Carbon Nanomaterial-Based Lubricants: Review of Recent Developments", *Lubricants 2022, Vol. 10, Page 281*, 10 (11): 281 (2022).
88. Sawyer, W. G., "Leonardo da Vinci on Wear", *Biotribology*, 26: 100160 (2021).
89. Agarwal, S., "Engineering chemistry: Fundamentals and applications", (2019).
90. Rasheed, A. K., Khalid, M., Rashmi, W., Gupta, T. C. S. M., and Chan, A., "Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 63: 346–362 (2016).
91. Younes, H., Hong, H., and Peterson, G. P., "A Novel Approach to Fabricate Carbon Nanomaterials–Nanoparticle Solids through Aqueous Solutions and Their Applications", *Nanomanufacturing And Metrology*, 4 (4): 226–236 (2021).
92. Holmberg, K. and Erdemir, A., "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions", *Friction*, 5 (3): 263–284 (2017).
93. Rahman, M. M., Islam, M., Roy, R., Younis, H., AlNahyan, M., and Younes, H., "Carbon Nanomaterial-Based Lubricants: Review of Recent Developments", *Lubricants 2022, Vol. 10, Page 281*, 10 (11): 281 (2022).

94. Sun, J. and Du, S., "Application of graphene derivatives and their nanocomposites in tribology and lubrication: a review", *RSC Advances*, 9 (69): 40642–40661 (2019).
95. "Tribology Explained: Superlubricity - PCS Instruments", <https://pcs-instruments.com/articles/tribology-explained-superlubricity/> (2024).
96. Klemenz, A., Pastewka, L., Balakrishna, S. G., Caron, A., Bennewitz, R., and Moseler, M., "Atomic scale mechanisms of friction reduction and wear protection by graphene", *Nano Letters*, 14 (12): 7145–7152 (2014).
97. Berman, D., Deshmukh, S. A., Sankaranarayanan, S. K. R. S., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Extraordinary Macroscale Wear Resistance of One Atom Thick Graphene Layer", *Advanced Functional Materials*, 24 (42): 6640–6646 (2014).
98. Lei, Y., Yan, Y., and Lv, J., "Atomistic study of the strengthening mechanisms of graphene coated aluminum", *Nanotechnology*, 31 (5): (2020).
99. Bryant, P. J., Gutshall, P. L., and Taylor, L. H., "A study of mechanisms of graphite friction and wear", *Wear*, 7 (1): 118–126 (1964).
100. Berman, D., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Graphene: a new emerging lubricant", *Materials Today*, 17 (1): 31–42 (2014).
101. Bryant, P. J., Gutshall, P. L., and Taylor, L. H., "A study of mechanisms of graphite friction and wear", *Wear*, 7 (1): 118–126 (1964).
102. Spreadborough, J., "The frictional behaviour of graphite", *Wear*, 5 (1): 18–30 (1962).
103. Bollmann, W. and Spreadborough, J., "Action of Graphite as a Lubricant", *Nature 1960 186:4718*, 186 (4718): 29–30 (1960).
104. Sánchez Egea, A. J., Martynenko, V., Abate, G., Deferrari, N., Martinez Krahmer, D., and López de Lacalle, L. N., "Friction capabilities of graphite-based lubricants at room and over 1400 K temperatures", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (5–8): 1623–1633 (2019).
105. Su, Y., Gong, L., and Chen, D., "An Investigation on Tribological Properties and Lubrication Mechanism of Graphite Nanoparticles as Vegetable Based Oil Additive", *Journal Of Nanomaterials*, 2015 (1): 276753 (2015).
106. El Mansori, M., Schmitt, M., and Paulmier, D., "Role of transferred layers in friction and wear for magnetized dry frictional applications", *Surface And Coatings Technology*, 108–109 (1–3): 479–483 (1998).

107. Dienwiebel, M., Verhoeven, G. S., Pradeep, N., Frenken, J. W. M., Heimberg, J. A., and Zandbergen, H. W., "Superlubricity of graphite", *Physical Review Letters*, 92 (12): 126101 (2004).
108. "Properties of Graphene – Graphenea", <https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties> (2024).
109. Kim, K. S., Lee, H. J., Lee, C., Lee, S. K., Jang, H., Ahn, J. H., Kim, J. H., and Lee, H. J., "Chemical vapor deposition-grown graphene: The thinnest solid lubricant", *ACS Nano*, 5 (6): 5107–5114 (2011).
110. Pu, J., Mo, Y., Wan, S., and Wang, L., "Fabrication of novel graphene–fullerene hybrid lubricating films based on self-assembly for MEMS applications", *Chemical Communications*, 50 (4): 469–471 (2013).
111. Zhai, W., Srikanth, N., Kong, L. B., and Zhou, K., "Carbon nanomaterials in tribology", *Carbon*, 119: 150–171 (2017).
112. Balog, R., Jørgensen, B., Nilsson, L., Andersen, M., Rienks, E., Bianchi, M., Fanetti, M., Lægsgaard, E., Baraldi, A., Lizzit, S., Sljivancanin, Z., Besenbacher, F., Hammer, B., Pedersen, T. G., Hofmann, P., and Hornekær, L., "Bandgap opening in graphene induced by patterned hydrogen adsorption", *Nature Materials* 2010 9:4, 9 (4): 315–319 (2010).
113. Elias, D. C., Nair, R. R., Mohiuddin, T. M. G., Morozov, S. V., Blake, P., Halsall, M. P., Ferrari, A. C., Boukhvalov, D. W., Katsnelson, M. I., Geim, A. K., and Novoselov, K. S., "Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: Evidence for graphane", *Science*, 323 (5914): 610–613 (2009).
114. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., and Hone, J., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, 321 (5887): 385–388 (2008).
115. Lee, G. H., Cooper, R. C., An, S. J., Lee, S., Van Der Zande, A., Petrone, N., Hammerberg, A. G., Lee, C., Crawford, B., Oliver, W., Kysar, J. W., and Hone, J., "High-strength chemical-vapor-deposited graphene and grain boundaries", *Science (New York, N.Y.)*, 340 (6136): 1074–1076 (2013).
116. Jiang, B., Zhao, Z., Gong, Z., Wang, D., Yu, G., and Zhang, J., "Superlubricity of metal-metal interface enabled by graphene and MoWS4 nanosheets", *Applied Surface Science*, 520: 146303 (2020).
117. Yeldose, B. C. and Ramamoorthy, B., "Characterization of DC magnetron sputtered diamond-like carbon (DLC) nano coating", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 38 (7–8): 705–717 (2008).
118. Kustas, F. M., Fehrebnbacher, L. L., and Komanduri, R., "Nanocoatings on Cutting Tools For Dry Machining", *CIRP Annals*, 46 (1): 39–42 (1997).

119. Donnet, C. and Grill, A., "Friction control of diamond-like carbon coatings", *Surface And Coatings Technology*, 94–95: 456–462 (1997).
120. Zin, V., Agresti, F., Barison, S., Colla, L., and Fabrizio, M., "Influence of Cu, TiO₂ Nanoparticles and Carbon Nano-Horns on Tribological Properties of Engine Oil", *Journal Of Nanoscience And Nanotechnology*, 15 (5): 3590–3598 (2015).
121. Zhao, J., He, Y., Wang, Y., Wang, W., Yan, L., and Luo, J., "An investigation on the tribological properties of multilayer graphene and MoS₂ nanosheets as additives used in hydraulic applications", *Tribology International*, 97: 14–20 (2016).
122. Spear, J. C., Ewers, B. W., and Batteas, J. D., "2D-nanomaterials for controlling friction and wear at interfaces", *Nano Today*, 10 (3): 301–314 (2015).
123. Shahnazar, S., Bagheri, S., and Abd Hamid, S. B., "Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41 (4): 3153–3170 (2016).
124. Gupta, B. K. and Bhushan, B., "Fullerene particles as an additive to liquid lubricants and greases for low friction and wear", *Lubrication Engineering*, 50 (7): (1994).
125. Hisakado, T. and Kanno, A., "Effects of fullerene C₆₀ on the friction and wear characteristics of ceramics in ethanol", *Tribology International*, 32 (7): 413–420 (1999).
126. Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Kwon, L., Kim, S., and Lee, J., "Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil", *Current Applied Physics*, 9 (2): e128–e131 (2009).
127. Hisakado, T. and Kanno, A., "Effects of fullerene C₆₀ on the friction and wear characteristics of ceramics in ethanol", *Tribology International*, 32 (7): 413–420 (1999).
128. Ku, B. C., Han, Y. C., Lee, J. E., Lee, J. K., Park, S. H., and Hwang, Y. J., "Tribological effects of fullerene (C₆₀) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 11 (4): 607–611 (2010).
129. Ginzburg, B. M., Shibaev, L. A., Kireenko, O. F., Shepelevskii, A. A., Baidakova, M. V., and Sitnikova, A. A., "Antiwear effect of fullerene C₆₀ additives to lubricating oils", *Russian Journal Of Applied Chemistry*, 75 (8): 1330–1335 (2002).
130. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood

- chips via low-temperature and their characterization", *Bioresource Technology*, 246: 82–87 (2017).
131. Yoganandham, S. T., Sathyamoorthy, G., and Renuka, R. R., "Emerging extraction techniques: Hydrothermal processing", *Sustainable Seaweed Technologies: Cultivation, Biorefinery, And Applications*, 191–205 (2020).
 132. Pauline, A. L. and Joseph, K., "Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters", *Fuel*, 279: 118472 (2020).
 133. Iñiguez, M. E., Conesa, J. A., and Fullana, A., "Hydrothermal carbonization (HTC) of marine plastic debris", *Fuel*, 257: 116033 (2019).
 134. Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S. H., Antonietti, M., and Titirici, M. M., "Engineering Carbon Materials from the Hydrothermal Carbonization Process of Biomass", *Advanced Materials*, 22 (7): 813–828 (2010).
 135. Ercan, B., Auersvald, M., Kejla, L., Tekin, K., Šimáček, P., and Karagöz, S., "A Polystyrene supported Scandium (III) microencapsulated Lewis acid catalyst for hydrothermal carbonization of glucose", *Biomass And Bioenergy*, 177: 106950 (2023).
 136. Gong, Y., Xie, L., Chen, C., Liu, J., Antonietti, M., and Wang, Y., "Bottom-up hydrothermal carbonization for the precise engineering of carbon materials", *Progress In Materials Science*, 132: 101048 (2023).
 137. Fiori, L., Basso, D., Castello, D., Trans, M. B.-Chem. Eng., and 2014, undefined, "Hydrothermal carbonization of biomass: Design of a batch reactor and preliminary experimental results", *Researchgate.NetL Fiori, D Basso, D Castello, M BaratieriChem. Eng. Trans, 2014•researchgate.Net*, 37: (2014).
 138. Marinovic, A., Pileidis, F. D., and Titirici, M. M., "Hydrothermal Carbonisation (HTC): History, State-of-the-Art and Chemistry", *RSC Green Chemistry*, 2015-January (32): 129–155 (2015).
 139. Fujino, T., Calderon-Moreno, J. M., Swamy, S., Hirose, T., and Yoshimura, M., "Phase and structural change of carbonized wood materials by hydrothermal treatment", *Solid State Ionics*, 151 (1–4): 197–203 (2002).
 140. Salvador, F., Sánchez-Montero, M. J., and Izquierdo, C., "C/H₂O Reaction under Supercritical Conditions and Their Repercussions in the Preparation of Activated Carbon", *Journal Of Physical Chemistry C*, 111 (37): 14011–14020 (2007).
 141. Kubo, S., "Nanostructured carbohydrate-derived carbonaceous materials", *TANSO*, 2013 (258): 232–233 (2013).

142. Titirici, M., White, R., Falco, C., Environmental, M. S.-E. &, and 2012, undefined, "Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage", *Pubs.Rsc.OrgMM Titirici, RJ White, C Falco, M SevillaEnergy & Environmental Science, 2012•pubs.Rsc.Org, .*
143. Chen, D., Yu, X., Song, C., Pang, X., Huang, J., and Li, Y., "Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar", *Bioresource Technology*, 218: 1303–1306 (2016).
144. Tekin, K., "Hydrothermal conversion of Russian olive seeds into crude bio-oil using a CaO catalyst derived from waste mussel shells", *Energy And Fuels*, 29 (7): 4382–4392 (2015).
145. Kirtania, K., "Thermochemical Conversion Processes for Waste Biorefinery", *Waste Biorefinery: Potential And Perspectives*, 129–156 (2018).
146. Titirici, M. M. and Antonietti, M., "Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization", *Chemical Society Reviews*, 39 (1): 103–116 (2009).
147. Kubo, S., Tan, I., White, R. J., Antonietti, M., and Titirici, M. M., "Template synthesis of carbonaceous tubular nanostructures with tunable surface properties", *Chemistry Of Materials*, 22 (24): 6590–6597 (2010).
148. Han, L., Sun, H., Ro, K. S., Sun, K., Libra, J. A., and Xing, B., "Removal of antimony (III) and cadmium (II) from aqueous solution using animal manure-derived hydrochars and pyrochars", *Bioresource Technology*, 234: 77–85 (2017).
149. Ashlie Martini, "Introducton to Tribology for Engineers", (2022).
150. Hutchings, I. and Shipway, P., "Tribology: friction and wear of engineering materials", (2017).
151. Abdelbary, A. and Chang, L., "Principles of engineering tribology: Fundamentals and applications", (2023).
152. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology: Fourth Edition", *Engineering Tribology: Fourth Edition*, 1–852 (2013).
153. Mylvaganam, K. and Zhang, L. C., "Micro/Nano Tribology", *Tribology for Engineers: A Practical Guide, Elsevier*, 121–160 (2011).
154. Singh, C., and G. A.-I. J. of S., and 2015, undefined, "Study of deep drawing process parameters: a review", *Researchgate.NetCP Singh, G AgnihotriInternational Journal Of Scientific And Research Publications, 2015•researchgate.Net*, (2015).

155. Das, P., Panda, S., Advanced, D. P.-I. J. of, and 2013, undefined, "Modification of initial blank shape to minimize earing in deep drawing process", *Cir.Nü.Ac.Jp*, (2013).
156. Lim, Y., Venugopal, R., Volumes, A. U.-I. P., and 2008, undefined, "Advances in the control of sheet metal forming", *Elsevier*, (2008).
157. Muhammer GAVAS, "Sac Metallerin Şekillendirilmesi 2. Baskı", *Seçkin* , 1–440 (2020).
158. Başpınar, M., "Modelling and simulation of friction in deep drawing", (2011).
159. Schey JA., "Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear ASM. Metals Park, Ohio, 44073.", (1983).
160. Ay, İ., "Balıkesir Üniversitesi, İmalat Yöntemleri II Ders Notları", (2015).
161. Internet: Aleksandrović, S.; S. M.; A. D.; L. V.; B. M.; N. R.; V. T., "University of Kragujevac Digital Archive: Variable Tribological Conditions on the Flange and Nonmonotonous Forming in Deep Drawing of Coated Sheets.", <https://scidar.kg.ac.rs/handle/123456789/20638> (2024).
162. Drossel, W. G., Zorn, W., and Hamm, L., "Modular system to measure and control the force distribution in deep drawing processes to ensure part quality and process reliability", *CIRP Annals*, 68 (1): 309–312 (2019).
163. Tiwari, P. R., Rathore, A., and Bodkhe, M. G., "Factors affecting the deep drawing process – A review", *Materials Today: Proceedings*, 56: 2902–2908 (2022).
164. Ikumapayi, O. M., Afolalu, S. A., Kayode, J. F., Kazeem, R. A., and Akande, S., "A concise overview of deep drawing in the metal forming operation", *Materials Today: Proceedings*, 62: 3233–3238 (2022).
165. Szewczyk, M., Szwajka, K., and Trzepieciński, T., "Frictional Characteristics of Deep-Drawing Quality Steel Sheets in the Flat Die Strip Drawing Test", *Materials 2022, Vol. 15, Page 5236*, 15 (15): 5236 (2022).
166. Hetz, P., Suttner, S., and Merklein, M., "Investigation of the Springback Behaviour of High-strength Aluminium Alloys Based on Cross Profile Deep Drawing Tests", *Procedia Manufacturing*, 47: 1223–1229 (2020).
167. Dwivedi, R. and Agnihotri, G., "Study of Deep Drawing Process Parameters", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 820–826 (2017).
168. Karagöz, Y., "Saç Kalıpcılığı Teknolojisi, Ege Üniversitesi Ders Notları, İzmir.", (2003).

169. Internet: Emin ERDİN, "Https://Web.Hitit.Edu.Tr/Dosyalar/Materyaller/Eminerdin@hititedutr300420180H7S9C0E.Pdf", .
170. Chandini, K., & A. R.-I. J. of S., and 2015, undefined, "Parametric Importance of Warm Deep Drawing Process for 1070A Aluminium Alloy: Validation through FEA", *Jntuhceh.Ac.InK Chandini, AC ReddyInternational Journal Of Scientific & Engineering Research, 2015•jntuhceh.Ac.In*, 6 (4): (2015).
171. Fereshteh-Saniee, F. and Montazeran, M. H., "A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process", *Journal Of Materials Processing Technology*, 140 (1–3): 555–561 (2003).
172. Tiwari, P. R., Rathore, A., and Bodkhe, M. G., "Factors affecting the deep drawing process – A review", *Materials Today: Proceedings*, 56: 2902–2908 (2022).
173. Reddy, R., Reddy, D., of, D. R.-I. J., and 2012, undefined, "Effect of various parameters on the wrinkling in deep drawing cylindrical cups", *CiteseerRV Reddy, DTAJ Reddy, DGCM ReddyInternational Journal Of Engineering Trends And Technology, 2012•Citeseer*, (2012).
174. Deshmukh, P., Lovell, M., Sawyer, W. G., and Mobley, A., "On the friction and wear performance of boric acid lubricant combinations in extended duration operations", *Wear*, 260 (11–12): 1295–1304 (2006).
175. Zaid, A. I. (2017)., "Effect of Different Lubricants on Deep Drawing of Galvanized Steel. ", *International Journal Of Scientific & Engineering Research, 8(1).*, (2017).
176. Menezes, P. L., Reeves, C. J., and Lovell, M. R., "Fundamentals of Lubrication", *Tribology For Scientists And Engineers: From Basics To Advanced Concepts*, 9781461419457: 295–340 (2013).
177. Taheri, R., Kosasih, B., Zhu, H., and Tieu, A. K., "Surface Film Adsorption and Lubricity of Soybean Oil In-Water Emulsion and Triblock Copolymer Aqueous Solution: A Comparative Study", *Lubricants 2017, Vol. 5, Page 1*, 5 (1): 1 (2016).
178. Siniawski, M. T., Saniei, N., Adhikari, B., and Doezema, L. A., "Influence of fatty acid composition on the tribological performance of two vegetable-based lubricants", *Journal Of Synthetic Lubrication*, 24 (2): 101–110 (2007).
179. Pfister, D. P., Xia, Y., and Larock, R. C., "Recent Advances in Vegetable Oil-Based Polyurethanes", *ChemSusChem*, 4 (6): 703–717 (2011).
180. Joseph, P. V. and Sharma, D. K., "Improvement of thermooxidative stability of non-edible vegetable oils of Indian origin for biodegradable lubricant application", *Lubrication Science*, 22 (4): 149–161 (2010).

181. Koçar, O., "Derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü", (2014).
182. Akyüz, B., Fen, S. Ş.-B. Ş. E. Ü., and undefined 2014, "Alüminyum Alaşımlarında Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerindeki Etkisi", *Dergipark.Org.TrB Akyüz, S ŞenaysoyBilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2014•dergipark.Org.Tr*, (2014).
183. AYDIN, H., Fakültesi, A. B.-U. Ü. M., and undefined 2010, "Farklı Isıl İşlem Koşullarındaki 2024 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Kaybın Belirlenmesi", *Dergipark.Org.Tr*, 15 (1): (2010).
184. Çetinkaya, C., Tekeli, S., Kurtuluş, O., and Lisesi, H. E. M., "Alüminyum Alaşımların Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Parametrelerin Mekanik özelliklere ve Mikro Yapıya Etkisi", *Dergipark.Org.TrC Çetinkaya, S Tekeli, O KurtuluşPoliteknik Dergisi, 2002•dergipark.Org.Tr*, 5 (5): 321–333 (2002).
185. Rana, R. S., Purohit, R., of Scientific, S. D.-I. J., and and undefined 2012, "Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites", *Academia.EduRS Rana, R Purohit, S DasInternational Journal Of Scientific And Research Publications, 2012•academia.Edu*, 2 (6): (2012).
186. Sarkar, J., Kutty, T. R. G., Conlon, K. T., Wilkinson, D. S., Embury, J. D., and Lloyd, D. J., "Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 316 (1–2): 52–59 (2001).
187. YURDAKUL, M., Özbay, O., -, Y. I., of Gazi University, A., and undefined 2002, "Selection of aerospace aluminum alloys Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi", *Avesis.Gazi.Edu.Tr*, 17 (2): 1–23 (2002).
188. Duygulu, Ö., YÜCEL, O., İTÜDERGİSİ/d, A. A. K.-, and undefined 2011, "Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi", *Itudergi.Itu.Edu.TrÖ Duygulu, O YÜCEL, AA KAYAITÜDERGİSİ/D, 2011•itudergi.Itu.Edu.Tr*, 9 (4): 133–138 (2010).
189. Kandemir, K., Can, A. Ç., Üniversitesi, P., Fakültesi, T. E., Bölümü, E., Denizli, K. /, Fakültesi, M., Bölümü, M. M., and Denizli, Ç. /, "Otomotiv endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli", *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 9 (1): 37–45 (2003).
190. Öztürk, F. and Kaçar, İ., "Magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2): 12–20 (2016).
191. Watari, H., Koga, N., Davey, K., Haga, T., and Ragado, M. T. A., "Warm deep drawing of wrought magnesium alloy sheets produced by semi-solid roll strip-

- casting process", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 46 (11): 1233–1237 (2006).
192. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "The role of capping agents in the fabrication of nano-silver-decorated hydrothermal carbons", *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 7 (5): 103415 (2019).
 193. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "Effects of Acidic and Alkaline Metal Triflates on the Hydrothermal Carbonization of Glucose and Cellulose", *Energy And Fuels*, 33 (8): 7473–7479 (2019).
 194. Korkmaz, S., Pehlivanoglu, M., Orak, A., and Cetin, M. H., "Investigation of wear behavior of carbide based coated rolling roll materials under dry and lubricated conditions", *Surface Topography: Metrology And Properties*, 9 (1): 15023 (2021).
 195. Baccile, N., Laurent, G., Babonneau, F., Fayon, F., Titirici, M. M., and Antonietti, M., "Structural characterization of hydrothermal carbon spheres by advanced solid-state MAS ¹³C NMR investigations", *Journal Of Physical Chemistry C*, 113 (22): 9644–9654 (2009).
 196. Blau, P. J., "On the nature of running-in", *Tribology International*, 38 (11–12): 1007–1012 (2005).
 197. Khonsari, M. M., Ghatrehsamani, S., and Akbarzadeh, S., "On the running-in nature of metallic tribo-components: A review", *Wear*, 474–475: 203871 (2021).
 198. Voelkel, K., Pflaum, H., and Stahl, K., "Running-In Behavior of Wet Multi-plate Clutches: Introduction of a New Test Method for Investigation and Characterization", *Chinese Journal Of Mechanical Engineering (English Edition)*, 33 (1): (2020).
 199. Alazemi, A. A., Etacheri, V., Dysart, A. D., Stacke, L. E., Pol, V. G., and Sadeghi, F., "Ultrasoother submicrometer carbon spheres as lubricant additives for friction and wear reduction", *ACS Applied Materials And Interfaces*, 7 (9): 5514–5521 (2015).
 200. Wu, S., Tian, S., Menezes, P. L., and Xiong, G., "Carbon solid lubricants: role of different dimensions", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology* 2020 107:9, 107 (9): 3875–3895 (2020).
 201. Özek, C. and Taşdemir, V., "Alüminyum Alaşımının Derin Çekilmesine Sıcaklığın Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması", *Journal Of Polytechnic*, 21 (1): 193–199 (2018).
 202. Trzepieciński, T. and Fejkiel, R., "On the influence of deformation of deep drawing quality steel sheet on surface topography and friction", *Tribology International*, 115: 78–88 (2017).

203. Kong, S., Wang, J., Hu, W., and Li, J., "Effects of Thickness and Particle Size on Tribological Properties of Graphene as Lubricant Additive", *Tribology Letters*, 68 (4): 1–10 (2020).
204. Cornelio, J. A. C., Cuervo, P. A., Hoyos-Palacio, L. M., Lara-Romero, J., and Toro, A., "Tribological properties of carbon nanotubes as lubricant additive in oil and water for a wheel–rail system", *Journal Of Materials Research And Technology*, 5 (1): 68–76 (2016).
205. Lee, J., Cho, S., Hwang, Y., Cho, H. J., Lee, C., Choi, Y., Ku, B. C., Lee, H., Lee, B., Kim, D., and Kim, S. H., "Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces", *Tribology International*, 42 (3): 440–447 (2009).
206. Sie, S., Kiu, K., Yusup, S., Soon, C. V., Arpin, T., Samion, S., Nik, R., and Kamil, M., "Tribological investigation of graphene as lubricant additive in vegetable oil", *Core.Ac.UkSSK Kiu, S Yusup, CV Soon, T Arpin, S Samion, RNM KamilJournal Of Physical Science, 2017•core.Ac.Uk*, 28: 257–267 (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Özgür Erdem YURT orta ve lise öğrenimini Amasya'da tamamladı. 2009 Yılında Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü kazandı, 2012 yılında mezun oldu. İzmir bölgesinde makine imalatı yapan firmalarda yaklaşık 2 sene çalıştıktan sonra 2015 yılının ocak ayından itibaren Kastamonu bölgesinde hayat holding şirketine bağlı Kastamonu Entegre Ağaç sanayinde mekanik bakım yardımcı işletmeler mühendisi olarak çalışmaya başladı ve özel sektörde çalışmaya devam etmektedir.