

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN
SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin Emre GÖKTEPE

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN
SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin Emre GÖKTEPE

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UYSAL

EYLÜL 2024

Emin Emre GÖKTEPE tarafından hazırlanan “AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 27.09.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç Dr. Mehmet Uysal Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Hasan ALGÜL Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Nuri ERGİN Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı (etik onayı gerekmiyorsa bu cümle metinden çıkartılır), çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(27/09/2024)

Emin Emre GÖKTEPE





Aileme.



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Uysal'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin desteği ve yönlendirmeleri olmaksızın bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Hayatımın her anında yanımda olan, desteklerini her zaman hissettiğim canım annem Sevgi Göktepe, babam Ahmet Göktepe ve abim Eren Göktepe'ye içtenlikle teşekkür ederim.

Tez sürecimde değerli katkıları ve desteğiyle yanımda olan Mustafa Göktepe'ye şükranlarımı sunarım. Sağladığı yardımlar benim için büyük önem taşımaktadır.

Bu zorlu tez sürecinde hep yanımda olan sevgili dostum Miraç Mutlu'ya, verdiği moral, yardımları ve içten arkadaşlığı için gönülden minnettarım.

UniqueTech firmasına sundukları imkanlar için teşekkür eder, Uğur Ayhan Beştepe'ye ve Berke Özdemir'e süreç boyunca verdiği destek, profesyonel tutumu ve iş birliğine olan katkıları için minnettar olduğumu ifade etmek isterim.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca bana her türlü desteği sağlayan yöneticilerim Emre Koz ve Mustafa Başaran'a teşekkür ederim. Onların sağladığı motivasyon ve rehberlik, bu süreci çok daha verimli kıldı.

Son olarak, bu çalışmanın gerçekleşmesinde önemli katkıları bulunan ve gerekli altyapıyı sağlayan Ford Otosan firmasına teşekkürlerimi sunarım. Sağladıkları imkanlar ve destek, çalışmamın başarıyla tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Emin Emre GÖKTEPE



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SİMGELER	xix
TABLO LİSTESİ	xxi
ŞEKİL LİSTESİ	xxiii
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	2
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Literatür Araştırması	3
2. LAZER METAL BİRİKTİRME	5
2.1. Lazer Meral Biriktirme (LMD) Yöntemi	5
2.2. Lazer Meral Biriktirme Ekipmanları	8
2.2.1. Lazer sistemi	9
2.2.2. Nozullar	11
2.2.2.1. Eş eksenli nozullar	11
2.2.2.2. Eksen dışı nozullar	12
2.2.3. Toz besleme sistemi	12
2.3. Lazer Meral Biriktirme Proses Parametreleri	13
2.3.1. Lazer gücü	13
2.3.2. Toz akış hızı	14
2.3.3. Tarama hızı	15
2.3.4. Gaz akışı	16
2.3.5. Lazer ışını çapı	17
2.3.6. Bindirme yüzdesi	17
2.4. Lazer Metal Biriktirme Toz Karakteristiği	18
2.4.1. Metal alaşımlı tozlar	18
2.4.1.1. Metal alaşımlı tozların üretimi	18
2.4.1.2. Metal alaşımlı toz çeşitleri	20
2.4.2. Metal matris kompozit tozlar ve çeşitleri	26
2.4.2.1. Karbürler	28
2.4.2.2. Oksitler	29
2.4.2.3. Nitrürler	29
2.4.2.4. Borürler	30
2.4.2.5. MAX fazı	31
3. FREN SİSTEMLERİ VE TRİBOLOJİK MEKANİZMALARI	37
3.1. Fren Sistemi Yapısı	37
3.1.1. Disk	40

3.1.2. Kaliper	41
3.1.3. Balata.....	42
3.2. Dökme Demirler: Fren Disklerindeki Uygulamaları.....	43
3.2.1. Gri dökme demir	44
3.2.2. Küresel grafitli dökme demir	46
3.2.3. Beyaz dökme demir.....	47
3.2.4. Temperlenmiş dökme demir.....	49
3.2.5. Kompakt grafitli dökme demir	50
3.3. Frenlerde Sürtünme ve Aşınma Mekanizması	51
3.3.1. Sürtünme	52
3.3.1.1. Sürtünmenin temel yasaları.....	52
3.3.1.2. Klasik sürtünme mekanizması	54
3.3.2. Aşınma	57
3.3.2.1. Adezyon aşınması	57
3.3.2.2. Abrasyon aşınması	58
3.3.2.3. Yorulma aşınması.....	60
3.3.2.4. Korozyon aşınması.....	61
3.4. Fren Sistemlerinde Performans Gereksinimleri	63
3.4.1. Termal iletkenlik	63
3.4.2. Aşınma direnci	64
3.4.3. Mekanik mukavemet.....	65
3.5. Güvenlik Standartları ve Mevzuata Uygunluk	66
4. MALZEME VE METHOD	69
4.1. Malzemeler	69
4.1.1. Fren diski malzemesi.....	69
4.1.2. Kaplama malzemesi	70
4.1.2.1. Saf nikel.....	70
4.1.2.2. Titanyum alüminyum karbür.....	71
4.2. Lazer Metal Biriktirme İşlemi	73
4.2.1. Toz hazırlığı	73
4.2.2. Kaplamanın biriktirilmesi	74
4.2.3. Taşlama	75
4.3. Uygulanan Deneyler.....	76
4.3.1. Optik mikroskop analizi.....	76
4.3.2. SEM ve EDS analizi.....	76
4.3.3. XRD analizi.....	77
4.3.4. Sertlik analizi.....	78
4.3.5. Aşınma deneyi.....	78
4.3.6. 3 boyutlu profilometre.....	79
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	81
5.1. Mikroyapı Karakterizasyonu	81
5.1.1. Toz mikroyapı incelemesi	81
5.1.1.1. Saf nikel tozu.....	81
5.1.1.2. Ti2AlC MAX tozu	83
5.1.2. Kaplamasız fren diski mikroyapı incelemesi	87
5.1.3. LMD kaplamalı fren diskleri mikroyapı incelemesi	91
5.2. Mikrosertlik Analizi	97
5.3. Tribolojik Parametre Karakterizasyonu	98
5.4. Yüzey Topografisi	102
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105

KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	113





KISALTMALAR

ABS	: Anti brake system
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alümina
AMF	: Additive-Manufacturing
ASTM	: American Society for Testing and Materials
B	: Bor
BN	: Bor Nitrür
c-BN	: Karbon
CGI	: Kübik Bor Nitrür
CNC	: Computer Numerical Control
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
CrAlC	: Krom Alüminyum Karbür
Cu	: Bakır
CZ	: Cladding Zone
ECE	: Avrupa Ekonomik Komisyonu
ECU	: Elektrik Kontrol Ünitesi
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
EHF	: Elektro-Hidrolik Frenleme
EMB	: Elektromekanik Frenleme
EN	: Euro Norm
ESP	: Electronic Stability Programme
FCC	: Face Centred Cubic
FCHV	: Yakıt Hücreli Hibrit Araç
FCV	: Yakıt Hücreli Araç
Fe	: Demir
Fe₃C	: Sementit
FeB	: Demir Borür
FTC	: Eritilmiş ve Ezilmiş Tungsten Karbür

GA	: Gaz atomizasyonu
HAZ	: Heat effected zone
h-BN	: Altıgen bor nitrür
He	: Helyum
HEV	: Hibrit elektrikli araç
HV	: Vickers hardness
ICEV	: Saf içten yanmalı motorlu araç
IN625	: Inconel 625
ISO	: International organization for standardization
IZ	: Interfacial zone
LC	: Laser cladding
LMD	: Laser metal deposition
MMK	: Metal matrisli kompozitler
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MTC	: Makro kristal tungsten karbür
Nb	: Niyobyum
Nd	: Neodimyum
Ne	: Neon
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
P	: Fosfor
PA	: Plazma atomizasyonu
PEV	: Saf elektrikli araç
PM	: Partikül kütlesi
PN	: Partikül sayısı
S	: Sülfür
SCC	: Küresel dökme tungsten karbür
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
Si₃N₄	: Silisyum nitrür
SiC	: Silisyum karbür
SiO₂	: Kuvars
SS316L	: Paslanmaz çelik 316L
STL	: Standard Triangulation Language

Ti	: Titanyum
Ti₂AlC	: Titanyum Alüminyum Karbür
Ti₂SiC	: Titanyum Silisyum Karbür
Ti₃AlC₂	: Titanyum Alüminyum Karbür
TiB₂	: Titanyum Diborür
TiC	: Titanyum Karbür
TiN	: Titanyum Nitrür
TiO₂	: Titanyum Oksit
UN	: United Nations
V	: Kompakt Grafitli Demir
W	: Vanadyum
WC	: Tungsten
XRD	: X-ışını Difraksiyonu
YAG	: İtiryum Alüminyum Granat
ZrB₂	: Zirkonyum Diborür
ZrO₂	: Zirkonyum oksit



SİMGELER

α	: Alfa
β	: Beta
Δ	: Delta
μ	: Mikro
π	: Pi
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
μ	: Sürtünme katsayısı
Θ	: Yoğunluk [g/m^3]
$\approx$	: Teta
%	: Yüzde
ΔK	: Gerilme yoğunluğu faktörü
A	: Temas alanı [mm^2]
d	: Işın çapı [mm]
D	: Çap [mm]
da/dN	: Çatlak büyüme oranı
dk	: Dakika
E	: Enerji yoğunluğu [MJ/L]
F	: Kuvvet [N]
g	: Gram
GPa	: Gigapaskal
H	: Malzeme sertliği
H_a	: Aşındırıcı sertliği
H_s	: Yüzey sertliği
j	: Joule
k	: Aşınma katsayısı
k	: Kilo
L	: Litre
m	: Metre
mm	: Milimetre
M	: Mega

P	: Basınç
p	: Lazer gücü [W]
p	: Penetrasyon derinliği [mm]
rpm	: Devir bölü dakika
s	: Saniye
s	: Malzeme kesme mukavemeti [MPa]
W	: Yük [N]
W	: Watt
V	: Kayma hızı [mm/dk]
V	: Tarama Hızı [mm/dk]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Nikel özellikleri ve sınıflandırılması.....	21
Tablo 2.2. Titanyum alaşımının özellikleri ve sınıflandırılması (Cavaliere, 2020) ..	24
Tablo 3.1. Gri dökme demirdeki eser elementlerin etkileri ve düzeyleri (ASM International, 1988).	46
Tablo 3.2. Grade 3.1 küresel grafitli dökme demir kimyasal kompozisyonu (ISO 9147, 1987)	47
Tablo 3.3. Güç aktarma organı teknolojisine göre 31 Aralık 2029'a kadar standart sürüş döngüsünde geçerli olan Euro 7 fren partikül emisyon sınırları (The European Parliament, 2024).....	67
Tablo 4.1. Fren diski kimyasal kompozisyonu (% kütleli)	69
Tablo 4.2. Titanyum alüminyum karbür (Ti ₂ AlC) MAX fazı tozu teknik özellikleri (Nanografi, 2024).....	72
Tablo 4.3. Lazer metal biriktirme parametreleri.	75
Tablo 5.1. Saf nikel tozu EDS element kompozisyonu.....	83
Tablo 5.2. Ti ₂ AlC MAX tozu EDS element kompozisyonu.	86
Tablo 5.3. Saf nikel tozu EDS element kompozisyonu.....	89



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. LMD şematik gösterimi (Graf vd., 2013).....	5
Şekil 2.2. LMD kaplama tabakası şematik gösterimi (Cheng vd., 2022).	6
Şekil 2.3. Lazer sisteminin şematik gösterimi (Silfvast 2004).	9
Şekil 2.4. Diyot lazeri şematik gösterimi (Weng W. Chow, 1999).	10
Şekil 2.5. a) Eş eksenli, b) Eksen dışı nozul şematik gösterimi (Segerstark, 2017)..	11
Şekil 2.6. Disk Toz Besleyici (Mahamood, 2018).....	13
Şekil 2.7. a) Gaz atomizasyonu, b) Plazma atomizasyonu şematik gösterimi (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024).....	19
Şekil 2.8. a) GA yöntemiyle imal edilmiş Inconel 718 tozu, b) PA yöntemiyle imal edilmiş Inconel 718 tozu (Segerstark, 2017).	20
Şekil 2.9. Nikel ve alaşımlarının sınıflandırılması (Cavaliere, 2020).....	21
Şekil 2.10. Metal matrisli kompozit takviye çeşitleri.	28
Şekil 2.11. Karbür mikrografik görüntüleri: a) FTC, b)SCC, c)MTC.....	29
Şekil 2.12. MAX fazlarındaki geçiş metalleri, A grubu elementleri ve karbon/azot bileşenlerinin periyodik tablo gösterimi (Barsoum ve El-Raghy, 2001). .	32
Şekil 2.13. MAX fazlarının 211, 312 ve 413 grupları örnek bileşikleri (Barsoum ve El-Raghy, 2001).	32
Şekil 2.14. a) 211, b) 312 ve c) 413 fazlarının atomik yapıları (Michel W. Barsoum, 2013)	33
Şekil 3.1. Fren sistemi şematik gösterimi (Bhat, 2023).....	37
Şekil 3.2. Fren diski hava kanalları (Li ve Yang, 2023).	38
Şekil 3.3. Kampana şematik gösterimi (Bhat, 2023).	39
Şekil 3.4. Elektromekanik frenleme komponentleri (Faisal vd., 2022).	39
Şekil 3.5. Fren disk çeşitleri soldan sağa, oluklu, delikli ve yekpare (Maske vd., 2020)	41
Şekil 3.6. Kaliper çeşitleri. a) sabit, b) yüzer ve c) kayar kaliper (Reif, 2014).	42
Şekil 3.7. Disk fren balatası (Reif, 2014).....	43
Şekil 3.8. Demir-Karbon denge diyagramı (Callister ve Rethvisch, 2009).	44
Şekil 3.9. Çeşitli dökme demirlerin optik mikro görüntüleri: a) Gri dökme demir, b) Küresel grafitli dökme demir (Callister ve Rethvisch, 2009).	45
Şekil 3.10. Çeşitli dökme demirlerin optik mikro görüntüleri: a) Beyaz dökme demir, b) Temper dökme demir, c) Kompakt grafitli dökme demir. (Callister ve Rethvisch, 2009).	48
Şekil 3.11. Dökme demirlerin demir-karbon faz diyagramından bileşim aralıkları. Gf, lamelli grafit; Gr çiçeksi grafit; Gr, grafit yumrusu; P, pearlite; α , ferrite. (Callister ve Rethvisch, 2009).....	49
Şekil 3.12. Sürtünmenin üstesinden gelmek ve hareket etmek için F, kuvvet. a) Yuvarlanma, b) Kayma (Hutchings ve Shipway, 2017).	53
Şekil 3.13. Yağlanmamış çelik yüzey üzerindeki ahşap kaydırıcılar için sürtünme katsayısı μ 'nün görünür temas alanı ile değişimi (Hutchings ve Shipway, 2017).	53

Şekil 3.14. Mikroskobik düzeyde sürtünme oluşturan adezyon mekanizması (ASM International, 1992).	54
Şekil 3.15. Sürtünmede oluşturan deformasyon mekanizması (ASM International, 1992).	55
Şekil 3.16. Sürtünme deformasyonu konik modeli (Hutchings ve Shipway, 2017)..	56
Şekil 3.17. Adeziv aşınma mekanizması: a) temas öncesi; b) temas sırasında; c) temastan sonra (Terwey vd., 2020).	58
Şekil 3.18. İki ve üç parçalı abrazyon aşınma mekanizması (Salot vd., 2016).	59
Şekil 3.19. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi (Filipe vd., 2015).	61
Şekil 3.20. Sürtünme katsayılarının sıcaklık bağımlı değişimi (Mădălin-Florin ve Nicolae-Vlad, 2019).	63
Şekil 3.21. Fren süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı karakterizasyonunun diyagramı (Bao vd., 2015).	64
Şekil 4.1. Ağır ticari araç fren diski	69
Şekil 4.2. Saf nikel tozunun x250 SEM görüntüsü.	71
Şekil 4.3. Ti ₂ AlC tozunun x2000 SEM görüntüsü.	73
Şekil 4.4. Msetec BM-0802 bilyeli değirmen.	74
Şekil 4.5. UniqueTech Group, (2024) lazer metal biriktirme sistemi.	74
Şekil 5.1. Saf nikel tozu x500 SEM görüntüsü	82
Şekil 5.2. Saf nikel tozu elementel EDS spektrumu.	82
Şekil 5.3. Saf nikel tozu XRD difraktogramı.	84
Şekil 5.4. Ti ₂ AlC MAX tozu x500 SEM görüntüsü.	85
Şekil 5.5. Ti ₂ AlC MAX tozu elementel EDS spektrumu.	85
Şekil 5.6. Ti ₂ AlC MAX tozu XRD difraktogramı.	87
Şekil 5.7. Dağlanmamış gri dökme demir SEM görüntüsü.	88
Şekil 5.8. Gri Dökme Demirin elementel EDS spektrumu.	88
Şekil 5.9. Gri dökme demir XRD difraktogramı.	90
Şekil 5.10. Kaplanmış fren disklerinin taşlanmamış ve taşlanmış numuneleri.	91
Şekil 5.11. Kaplanmış fren disklerinin SEM kesit görüntüleri, a) Ni + %5 Ti ₂ AlC, b) Ni + %10 Ti ₂ AlC.	92
Şekil 5.12. Kaplanmış fren disklerinin SEM kesit görüntüleri, a) Ni + %15 Ti ₂ AlC, b) Ni + %30 Ti ₂ AlC.	93
Şekil 5.13. Ni + %15 Ti ₂ AlC kaplı numunede kesit SEM görüntüsü.	94
Şekil 5.14. %100 Ni (siyah), Ni + %5 Ti ₂ AlC (kırmızı), Ni + %10 Ti ₂ AlC (mavi), Ni + %15 Ti ₂ AlC (yeşil) ve Ni + %30 Ti ₂ AlC (mor) kaplamalarının XRD difraktogramı.	96
Şekil 5.15. Kaplanmış fren disklerinin mikrosertlik (HV) değerleri.	97
Şekil 5.16. Kaplanmış numunelerin aşınma deneyi SEM görüntüleri.	99
Şekil 5.17. 1N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.	100
Şekil 5.18. 3N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.	100
Şekil 5.19. 5N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.	101
Şekil 5.20. Kaplama sonrası yüzey profilmetre görüntüleri.	102

AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinin sürtünme ve aşınma özellikleri, ulaşım sektörünün emniyetini ve güvenilirliğini sağlamak için temellerindendir. Özellikle zorlu koşullar altında uzun mesafelerde önemli yükler taşınması gereken ağır ticari araçlar, araç üzerinde yüksek torklara, aşırı sıcaklıklara ve uzun çalışma döngülerine dayanabilen gelişmiş fren sistemleri talep etmektedirler. Güvenlik endişelerine ek olarak, özellikle disk aşınmasından kaynaklanan toz olmak üzere fren sistemlerinin çevresel etkisine ilişkin farkındalık artmaktadır. Frenleme sırasında açığa çıkan ince partikül maddelerden oluşan fren tozu, hava kirliliğine katkıda bulunmakta ve hem insan sağlığı hem de çevre için risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, fren diskini aşınmasını azaltmak yalnızca fren sistemlerinin performansını ve ömrünü artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel etkilerini de azaltmaktadır.

Bu çalışma, sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için, fren disklerini Nikel-Ti₂AlC (Titanyum Alüminyum Karbür) kompozitiyle kaplamak için Lazer Metal Biriktirme (LMD) teknolojisinin kullanılma potansiyelini araştırmaktadır. LMD, metal tozlarını bir yüzeye eritmek ve biriktirmek için yüksek enerjili bir lazer kullanan modern bir katkı üretim tekniğidir. İşlem, kaplama malzemesi ile alt tabaka arasında güçlü metalurjik bağ oluşturarak gelişmiş aşınma direnci ve diğer istenen tribolojik özellikleri sunmaktadır. Özellikle bu çalışma, fren disklerinin tribolojik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için saf Nikel ile farklı Ti₂AlC MAX fazı bileşimlerinin uygulanmasına odaklanmaktadır.

Fren diskleri, araç güvenlik sistemlerindeki kritik bileşenlerdir ve hareket eden araçların kinetik enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürmektedir. Bu süreç, yüksek aşınma direncine, iyi termal iletkenliğe ve çeşitli koşullar altında sabit sürtünme katsayılarını koruma yeteneğine sahip malzemeler gerektirmektedir. Genellikle dökme demirden yapılan geleneksel fren diskleri yeterli performans sağlamakta, ancak gelişmiş kaplama malzemeleri kullanılarak iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Mükemmel termal özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan dökme demir, nispeten düşük aşınma direnci ve zorlu koşullar altında korozyona eğilim gibi belirli sınırlamalardan muzdariptir. Bu nedenle, bu araştırma, LMD yoluyla bir Nikel-Ti₂AlC kaplaması uygulayarak daha dayanıklı bir fren diskini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel metodolojisi, fren diskini numunelerinin hazırlanmasıyla başlayarak çeşitli aşamaları içermektedir. Fren diskleri için kullanılan temel malzeme, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı için seçilen dökme demirdir. LMD, bu disklerin yüzeyini saf Nikel ile birleştirilmiş çeşitli Ti₂AlC MAX fazı bileşimleriyle kaplamak için kullanılmaktadır. Test edilen bileşimler arasında saf nikel, Ni + %5 Ti₂AlC, Ni + %10 Ti₂AlC, Ni + %15 Ti₂AlC ve Ni + %30 Ti₂AlC bulunur. Ti₂AlC MAX fazı, metalik ve seramik özelliklerinin benzersiz kombinasyonu, kendi kendini yağlama davranışı, yüksek termal kararlılık ve gelişmiş aşınma direnci sağladığı için seçilmiştir.

LMD işlemi, yüksek güçlü bir lazerin dökme demir fren disklerinin yüzeyine yönlendirilmesini ve aynı anda Nikel-Ti₂AlC kompozit tozlarının lazer ışınına beslenmesini içermektedir. Bu, disk alt tabakası ile kaplama arasında metalurjik bir bağ oluşmasına ve sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşmasını sağlamaktadır. Lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı gibi lazer kaplama işlemi parametreleri, düzgün kaplama kalınlığı ve optimum bağlanma mukavemeti sağlamak için dikkatlice edilmektedir.

Fren diskleri kaplandıktan sonra, mikro yapısal ve tribolojik özelliklerini değerlendirmek için çeşitli testler yapılmaktadır. Kaplamalı fren disklerinin mikro yapısını analiz etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı Spektroskopi (EDS) kullanılmakta ve Nikel matrisi içindeki Ti₂AlC parçacıklarının dağılımına ve kaplama ile alt tabaka arasındaki bağın bütünlüğüne odaklanılmaktadır. Kaplamalarda bulunan fazları belirlemek ve disklerin aşınma direncini artıran sert fazların oluşumunu doğrulamak için X-ışını Kırınımı (XRD) kullanılmaktadır. Ayrıca kaplamanın incelenen bir diğer yönü ise, kaplamalı fren disklerinin tribolojik testidir. Aşınma testleri, gerçek dünya frenleme koşullarını simüle etmek için değişen yükler (1N, 3N ve 5N) altında bir tribometre kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu testler, farklı basınçlar ve sıcaklıklar altında çalışırken fren disklerinin sürtünme katsayılarını ve aşınma oranlarını ölçmektedir. Ek olarak, 3B profilometre, fren disk yüzeylerindeki aşınma izlerini incelemek için kullanılmakta ve aşınma mekanizmalarının ayrıntılı bir analizini sağlamaktadır.

Tribolojik testlerin sonuçları, Nikel-Ti₂AlC kaplamaların, kaplamasız dökme demir disklerle kıyasla fren disklerinin aşınma direncini ve sürtünme kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Kaplamasız dökme demir disklerde yüksek sürtünme ve aşınma sorunları gözlenirken, Nikel-Ti₂AlC kaplamalar bu sorunları büyük ölçüde azaltarak disklerin daha uzun ömürlü ve performanslarının daha güvenilir olmasını sağlamıştır. Lazer kaplama yöntemiyle uygulanan bu kaplamalar, özellikle ağır ticari araçların zorlu koşullar altında karşılaştığı yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalma durumlarında avantaj sağlamaktadır. Test edilen farklı bileşimler arasında, Ni + %30 Ti₂AlC kaplaması, çeşitli yükler ve sıcaklıklar altında kararlı bir sürtünme katsayısı sergileyerek minimum aşınma göstermiş ve en dengeli performansı sunmuştur. Özellikle, yüklerin artmasıyla birlikte sürtünme katsayısında önemli bir değişiklik olmaması ve aşınma oranlarının düşük seviyelerde kalması, bu kaplamanın üstün performansını kanıtlamaktadır. Bu bulgu, Ni + %30 Ti₂AlC kaplamasının, özellikle uzun süreli ve yüksek stres altında çalışan fren sistemleri için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Mikroyapısal analizler, Ti₂AlC parçacıklarının Nikel matrisi boyunca eşit şekilde dağıldığını ve bu homojen dağılımın kaplamanın yüksek sertliğine ve aşınma direncine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Kaplama malzemesi içinde bu homojen dağılım, kaplamanın dayanıklılığını artıran en önemli etkenlerden biridir. Ayrıca, bu eşit dağılım, kaplamanın yüzeyinde meydana gelebilecek mikroskobik çatlakların oluşumunu engelleyerek, kaplamanın daha uzun süre bozulmadan kalmasını sağlamaktadır. Ti₂AlC'nin kendiliğinden yağlama özellikleri de kaplamanın sürtünme katsayısını düşük seviyelerde tutarak, disklerin daha verimli çalışmasına yardımcı olmaktadır. Bu, kaplamanın aşırı ısınma ve deformasyona karşı dirençli olmasını sağlayarak, fren disklerinin performansını daha da iyileştirmektedir.

Kaplama ile dökme demir alt tabaka arasındaki güçlü metalurjik bağ, kaplamaların stres koşulları altında sağlam kalmasını sağlamaktadır. Lazer kaplama süreci sırasında

meydana gelen bu metalurjik bağ, kaplama ile alt tabaka arasında kusursuz bir entegrasyon sağlar ve kaplamanın alt tabakadan ayrılmasını önler. Bu güçlü bağ, özellikle yüksek basınç ve sıcaklık altında çalışan fren sistemlerinde büyük bir avantaj sunmaktadır. Aşırı koşullar altında kaplamaların soyulma veya çatlama yapmaması, fren sisteminin genel güvenilirliğini artırmakta ve bakım gereksinimlerini azaltmaktadır.

Çalışmanın bulgularında önemli saptamalardan biri, kaplamalardaki Ti_2AlC içeriği ile aşınma dirençleri arasındaki açık korelasyondur. Yapılan testler, Ti_2AlC içeriği arttıkça kaplamaların sertliğinin ve aşınma direncinin iyileştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle Ti_2AlC 'nin metalik ve seramik özelliklerinin kombinasyonu, kaplamalara yüksek sertlik kazandırarak daha iyi aşınma direnci sağlamaktadır. Sert malzemeler, aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğundan, kaplamaların ömrü uzamakta ve ticari araçlarda kullanılan fren disklerinin daha uzun süreli ve güvenilir bir performans sergilemesi mümkün olmaktadır. Bu doğrultuda, $Ni + \%30 Ti_2AlC$ kaplaması en yüksek sertliği sunarken, en iyi aşınma direncini de sağlamaktadır.

Bulgular ayrıca, Ti_2AlC içeriğinin arttıkça kaplamanın sürtünme katsayısında da belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu, kaplamaların sürtünme performansını optimize etmede Ti_2AlC 'nin katkısının ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır. En yüksek sertlik ve aşınma direnci değerleri $Ni + \%30 Ti_2AlC$ kaplamasında elde edilmiş olsa da kaplamanın genel tribolojik performansını optimize etmek için bileşim oranlarının dikkatle ayarlanması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu da sertlik, aşınma direnci ve sürtünme kararlılığı arasında en iyi dengeyi elde etmek için kaplama bileşiminin optimize edilmesinin kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, lazer kaplama yöntemi kullanılarak uygulanan Ti_2AlC katkı maddeleri ile zenginleştirilmiş Nikel kaplamaların, ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinin sürtünme ve aşınma performansında önemli iyileştirmeler sağladığını göstermiştir. Ti_2AlC 'nin değişen yüzdelerde dahil edilmesinin, saf Nikel kaplamalara kıyasla aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğü gösterilmiştir; bu da bu geliştirilmiş kaplamaları ticari araç fren sistemleri gibi zorlu uygulamalar için son derece uygun hale getirmektedir. SEM analizleriyle doğrulandığı gibi, Nikel matrisi içindeki Ti_2AlC parçacıklarının homojen dağılımı, yüzey sertliğini artırmada kritik bir rol oynamakta ve bu da doğrudan kaplamaların iyileştirilmiş dayanıklılığına ve aşınma direncine katkıda bulunmaktadır. Dahası, mikrosertlik testleri, kaplamaların mekanik özelliklerinin Ti_2AlC içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde arttığını, en yüksek mikrosertlik değerlerinin $\%30 Ti_2AlC$ içeren kaplamalarda gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Tribolojik testler, Ti_2AlC takviyeli kaplamaların, stres altında minimum yüzey deformasyonu ve gelişmiş aşınma direnci ile üstün performansını daha da doğrulamıştır. Ek olarak, yüzey topografyası analizi, yüzey pürüzlülüğünü azaltmaya ve kaplamalı fren disklerinin ömrünü uzatmaya yardımcı olan Ti_2AlC kaplamalarda daha pürüzsüz ve daha düzgün yüzeyler olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, Ti_2AlC takviyeli Nikel kaplamaların, ağır ticari araçlarda daha güvenli, daha dayanıklı ve verimli fren sistemleri geliştirmek için umut verici bir yaklaşım sunduğunu, potansiyel olarak gelişmiş güvenliğe, azaltılmış bakım maliyetlerine ve gerçek dünya çalışma koşullarında genel olarak iyileştirilmiş performansa yol açtığını göstermektedir.



EXAMINATION OF THE FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF BRAKE DISCS USED IN HEAVY COMMERCIAL VEHICLES

SUMMARY

The friction and wear properties of brake discs used in heavy commercial vehicles are fundamental to ensuring the safety and reliability of the transportation sector. Heavy commercial vehicles, especially those that must carry significant loads over long distances under harsh conditions, demand advanced braking systems that can withstand high torques, extreme temperatures and long operating cycles on the vehicle. In addition to safety concerns, awareness of the environmental impact of brake systems, especially dust from disc wear, is increasing. Brake dust, consisting of fine particulate matter released during braking, contributes to air pollution and poses a risk to both human health and the environment. Therefore, reducing brake disc wear not only increases the performance and life of brake systems, but also reduces their environmental impact.

This study investigates the potential of using Laser Metal Deposition (LMD) technology to coat brake discs with a Nickel-Ti₂AlC (Titanium Aluminum Carbide) composite to improve friction and wear properties. LMD is a modern additive manufacturing technique that uses a high-energy laser to melt and deposit metal powders onto a surface. The process provides improved wear resistance and other desired tribological properties by creating strong metallurgical bonding between the coating material and the substrate. Specifically, this study focuses on the application of different Ti₂AlC MAX phase compositions with pure Nickel to evaluate their effects on the tribological performance of brake discs.

Brake discs are critical components in vehicle safety systems and convert the kinetic energy of moving vehicles into heat through friction. This process requires materials with high wear resistance, good thermal conductivity and the ability to maintain constant friction coefficients under various conditions. Conventional brake discs, usually made of cast iron, provide adequate performance, but improvements can be achieved by using advanced coating materials. Cast iron, which is widely used due to its excellent thermal properties, suffers from certain limitations such as relatively low wear resistance and tendency to corrosion under harsh conditions. Therefore, this research aims to develop a more durable brake disc by applying a Nickel-Ti₂AlC LMD coating.

The basic methodology of the study includes several stages, starting with the preparation of brake disc samples. The base material used for brake discs is cast iron, which was chosen because it is widely used in the automotive industry. LMD is used to coat the surface of these discs with various compositions of Ti₂AlC MAX phase combined with pure Nickel. The compositions tested include pure Nickel, Ni + 5% Ti₂AlC, Ni + 10% Ti₂AlC, Ni + 15% Ti₂AlC and Ni + 30% Ti₂AlC. The Ti₂AlC MAX phase was chosen because it provides a unique combination of metallic and ceramic properties, self-lubricating behavior, high thermal stability and improved wear resistance.

The LMD process involves directing a high-power laser onto the surface of cast iron brake discs and simultaneously feeding Nickel-Ti₂AlC composite powders into the laser beam. This creates a metallurgical bond between the disc substrate and the coating, creating a hardened surface layer. Laser coating process parameters such as laser power, scanning speed and powder feed rate are carefully selected to ensure uniform coating thickness and optimum bond strength. After the brake discs are coated, various tests are performed to evaluate their microstructural and tribological properties. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) are used to analyze the microstructure of the coated brake discs, focusing on the distribution of Ti₂AlC particles within the Nickel matrix and the integrity of the bond between the coating and the substrate. X-ray Diffraction (XRD) is used to identify the phases present in the coatings and to verify the formation of hard phases that increase the wear resistance of the discs. Another aspect of the coating that is also examined is the tribological testing of the coated brake discs. Wear tests are performed using a tribometer under varying loads (1N, 3N and 5N) to simulate real-world braking conditions. These tests measure the friction coefficients and wear rates of brake discs while operating under different pressures and temperatures. In addition, a 3D profilometer is used to examine wear marks on brake disc surfaces, providing a detailed analysis of wear mechanisms.

The results of the tribological tests reveal that Nickel-Ti₂AlC coatings significantly improve the wear resistance and friction stability of brake discs compared to uncoated cast iron discs. While uncoated cast iron discs exhibit high friction and wear issues, Nickel-Ti₂AlC coatings effectively mitigate these problems, making the discs more durable and reliable in terms of performance. These coatings, applied using the laser cladding method, offer a distinct advantage, especially under the high temperatures and pressures encountered in heavy commercial vehicles. Among the different compositions tested, the Ni + 30% Ti₂AlC coating demonstrated the most balanced performance, exhibiting a stable friction coefficient under various loads and temperatures while showing minimal wear. Notably, the fact that the friction coefficient remains largely unchanged as the loads increase, along with the low wear rates, proves the superior performance of this coating. This finding suggests that the Ni + 30% Ti₂AlC coating holds great potential, especially for brake systems operating under prolonged and high-stress conditions.

Microstructural analyses show that Ti₂AlC particles are evenly distributed throughout the Nickel matrix, and this homogeneous distribution significantly contributes to the high hardness and wear resistance of the coating. This uniform distribution within the coating material is one of the key factors that enhances its durability. Additionally, this even distribution helps prevent the formation of microscopic cracks on the coating surface, allowing it to remain intact for a longer time. Ti₂AlC's self-lubricating properties also help maintain a low friction coefficient, improving the overall efficiency of the brake discs. This resistance to overheating and deformation further enhances the performance of the brake discs.

The strong metallurgical bond between the coating and the cast iron substrate ensures that the coatings remain intact under stress conditions. This metallurgical bond, formed during the laser cladding process, provides seamless integration between the coating and the substrate, preventing the coating from separating. This strong bond offers a significant advantage, particularly in brake systems operating under high pressure and temperature. The fact that the coatings do not peel off or crack under extreme

conditions increases the overall reliability of the braking system and reduces maintenance requirements.

One of the key findings of the study is the clear correlation between the Ti_2AlC content in the coatings and their wear resistance. Tests clearly show that as the Ti_2AlC content increases, the hardness and wear resistance of the coatings improve. Particularly, the combination of metallic and ceramic properties of Ti_2AlC imparts high hardness to the coatings, resulting in better wear resistance. Since harder materials are more resistant to wear, the lifespan of the coatings is extended, allowing the brake discs used in commercial vehicles to perform reliably over longer periods. In this regard, the $\text{Ni} + 30\% \text{Ti}_2\text{AlC}$ coating provides the highest hardness and the best wear resistance.

The findings also show a notable decrease in the friction coefficient as the Ti_2AlC content increases, further highlighting the critical role of Ti_2AlC in optimizing the friction performance of the coatings. While the highest hardness and wear resistance values were achieved with the $\text{Ni} + 30\% \text{Ti}_2\text{AlC}$ coating, the findings suggest that careful adjustment of the composition ratios is necessary to optimize the overall tribological performance of the coatings. This emphasizes the importance of optimizing the coating composition to achieve the best balance between hardness, wear resistance, and friction stability.

In conclusion, this study has shown that Ti_2AlC additive-enriched Nickel coatings applied using laser cladding method provide significant improvements in friction and wear performance of brake discs used in heavy commercial vehicles. It has been shown that incorporation of Ti_2AlC in varying percentages significantly increases wear resistance and decreases friction coefficient compared to pure Nickel coatings, making these improved coatings highly suitable for demanding applications such as commercial vehicle brake systems. As confirmed by SEM analyses, homogeneous distribution of Ti_2AlC particles within the Nickel matrix plays a critical role in increasing the surface hardness, which directly contributes to improved durability and wear resistance of the coatings. Furthermore, microhardness tests revealed that the mechanical properties of the coatings significantly increase with increasing Ti_2AlC content, with the highest microhardness values being observed in coatings containing 30% Ti_2AlC . Tribological tests further confirmed the superior performance of Ti_2AlC reinforced coatings with minimal surface deformation under stress and improved wear resistance. In addition, surface topography analysis showed smoother and more uniform surfaces on Ti_2AlC coatings, which helped reduce surface roughness and extend the life of coated brake discs. These results suggest that Ti_2AlC reinforced Nickel coatings offer a promising approach to developing safer, more durable, and more efficient brake systems for heavy-duty vehicles, potentially leading to improved safety, reduced maintenance costs, and overall improved performance under real-world operating conditions.

Future research could investigate the use of other MAX phase materials in combination with Nickel or other metal matrices to further enhance the performance of brake disc coatings. In addition, further improvement of LMD process parameters could lead to improved coating quality and performance. Overall, this work contributes to the ongoing development of safer, more efficient braking systems for heavy commercial vehicles and aligns with the industry's goals of improving vehicle safety, reducing wear-related maintenance, and promoting sustainability in transportation.



1. GİRİŞ

Fren sistemleri, ağır ticari araçların güvenliği ve performansı açısından hayati öneme sahip bileşenlerdir. Bu sistemlerin en kritik parçalarından biri olan fren diskleri, araçların durma mesafesini ve genel güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Ağır yükler taşıyan ve sürekli olarak zorlu çalışma koşullarına maruz kalan bu araçların fren disklerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi, taşıma sektöründe büyük önem taşımaktadır.

Fren disklerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin optimize edilmesi, malzeme seçimi, kaplama teknikleri ve proses parametreleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Lazer kaplama teknolojisi, son yıllarda fren disklerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan yenilikçi bir yöntemdir. Bu teknoloji, lazer ışını kullanarak metal tozlarının ergitilmesi ve yüzeye kaplanması prensibine dayanmaktadır. Lazer kaplama, kaplama yüzeyinin sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirmekte ve malzemenin ömrünü uzatmaktadır.

Ağır ticari araçlarda kullanılan fren diskleri, yüksek frenleme kuvvetlerine ve aşırı ısınmaya maruz kaldıklarından dolayı, malzeme özelliklerinin bu zorlu koşullara dayanacak şekilde iyileştirilmesi gerekmektedir. Gri dökme demir, fren diskleri için yaygın olarak kullanılan bir malzeme olup, iyi termal iletkenliği ve yüksek aşınma direnci ile bilinmektedir. Ancak, dökme demirin düşük kırılma tokluğu ve korozyon direnci gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Fren diskleri, frenleme sırasında araçların kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştüren temel bileşenlerdir. Yüksek sürtünme katsayısına sahip olmalı ve bu değeri değişen sıcaklık koşullarında koruyabilmelidir. Ayrıca, düşük aşınma hızı, yüksek ısı mukavemet, iyi ısı iletim kapasitesi ve düşük ısı genleşme katsayısı gibi özellikler de aranan diğer önemli kriterlerdir. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için kullanılan malzemeler genellikle gri dökme demir, çelik ve alüminyum matrisli kompozitler gibi malzemelerdir. Gri dökme demir, düşük maliyeti, iyi dökülebilirliği ve yüksek sönümlenme kapasitesi ile yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, bu malzemenin düşük korozyon direnci ve yüksek ağırlığı gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır.

Son yıllarda, lazer kaplama teknolojisi, fren disklerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yenilikçi bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Lazer kaplama, yüksek yoğunluklu bir lazer ışını kullanarak metal tozlarının ergitilmesi ve yüzeye kaplanması prensibine dayanmaktadır. Bu teknoloji, kaplama yüzeyinin sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirmekte ve malzemenin ömrünü uzatmaktadır.

Lazer kaplama yöntemi, fren disklerinin yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu yöntemin uygulanması, fren disklerinin aşınma direncini artırarak daha uzun ömürlü ve güvenilir fren sistemlerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, lazer kaplama ile kaplanmış disklerin sürtünme katsayısı ve termal dayanıklılığı da artmakta, bu da daha güvenli ve etkin bir frenleme performansı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, lazer kaplama teknolojisinin fren disklerine uygulanabilirliği ve bu kaplamaların aşınma ve sürtünme performansına etkileri araştırılmaktadır. Elde edilen veriler, lazer kaplama yöntemi ile kaplanmış fren disklerinin ağır ticari araçlarda kullanımının potansiyelini ve avantajlarını ortaya koymaktadır. Bilgiler, gelecekteki araştırmalara ve fren sistemlerinin geliştirilmesine önemli ipuçları sunmaktadır.

1.1. Tezin Kapsamı

Deneysel çalışmalar, lazer kaplama ile kaplanmış fren disklerinin farklı çalışma koşullarındaki performansını değerlendirmektedir. Bu kapsamda, çeşitli yük ve hız koşulları altında yapılan testler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma verileri analiz edilmektedir. Elde edilen veriler, lazer kaplama yöntemi ile kaplanmış fren disklerinin ağır ticari araçlarda kullanım potansiyelini ve avantajlarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu veriler ışığında, lazer kaplama teknolojisinin fren disklerinin ömrünü uzatmadaki ve aşınma direncini artırmadaki etkinliği değerlendirilmektedir. Çalışmanın bulguları, lazer kaplama yöntemi ile geliştirilmiş fren disklerinin, ağır ticari araçlarda daha güvenli ve etkin bir frenleme performansı sağlayabileceğini göstermektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini lazer kaplama yöntemi kullanarak iyileştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, aynı malzemedan üretilmiş ve lazer kaplama yöntemi ile Titanyum

Alüminyum Karbür MAX fazı ile kaplanmış fren disklerinin sürtünme ve aşınma özellikleri deneysel olarak incelenmektedir. Lazer kaplama yöntemi, kaplanan malzemenin yüzeyini sertleştirmekte ve aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Jing ve ark. (2024), Fe-Ti₂AlC-Ni kompozit kaplamaların yüksek hızlı lazer kaplama kullanılarak üretilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu kaplamalar, kalıp çeliğinin tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Çalışmada, Ti₂AlC kendiliğinden yağlayıcı fazı ve TiC ile Ti₃Al gibi sert fazların eklenmesiyle kaplamaların, geleneksel Fe bazlı kaplamalara kıyasla daha iyi aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaplamaların mikro yapısı, sertliği ve aşınma mekanizmaları incelenmiş; Ti₂AlC içeriği arttıkça kaplamaların sertleştiği ve tribolojik performanslarının iyileştiği görülmüştür. En iyi sonuçlar, %10 Ti₂AlC içeren kaplamalarda elde edilmiş olup, bu iyileşme oksit film, kendiliğinden yağlayıcı fazlar ve kaplama sürecinde oluşan sert fazların iş birliğine dayanmaktadır.

Xu ve ark. (2014), lazerle kaplanmış WC/Ni kompozit kaplamaların yuvarlanma teması altında yorulma davranışını incelemiştir. Bu kaplamalar, malzemelerin yüzey tabakasında meydana gelen aşınma ve yorulma hasarlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, yuvarlanma teması altında gerçekleşen yorulma çatlaklarının, WC partiküllerinin kaplama içindeki dağılımına bağlı olduğu bulunmuştur. Özellikle WC partikülleri ile Ni matrisi arasındaki ara yüzeyde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların birleşmesiyle pullanma olarak bilinen hasar türünün meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaplama yüzeyinde yorulma çatlaklarının genellikle WC partiküllerinden başladığını ve alt yüzeyde dallanan çatlaklarla birleşerek pullanmanın oluşumuna neden olduğunu göstermiştir.

Cai ve ark. (2024), lazer kaplama yöntemi ile TiC/Ni60 kaplamaların mikro yapı ve özelliklerine TiC içeriğinin etkileri araştırılmıştır. Ti6Al4V alaşımı üzerine TiC ve Ni60 karışım tozları kullanılarak oluşturulan kompozit kaplamalarda, TiC partiküllerinin büyük yapılar olarak rastgele dağıldığı ve kaplamaların TiC, TiCx, Ti₂Ni, TiNi, TiB ve CrxB gibi fazlar içerdiği tespit edilmiştir. Artan TiC içeriği ile kaplamalarda kırılabilirlik artmış ve aşınma direncinde azalma gözlemlenmiştir.

Bükölme dayanımı da TiC içeriği arttııkça düşmüş, kaplamalarda kırılđan çatlaklar belirgin hale gelmiştir.

Liu ve ark. (2023), lazer kaplama yöntemi kullanılarak Ni50 ve Ni50-WC kaplamalarının yapı ve özelliklerine WC seramik partiküllerinin etkileri incelenmiştir. Ni50-WC kaplamalarının mikro yapı, aşınma ve korozyon direnci taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraktometresi (XRD), mikro sertlik test cihazı ve aşınma test cihazı kullanılarak değeriendirilmiştir. WC eklenmesi ile kaplamaların mikro sertliği artmış, Ni50e20WC kaplamasının ortalama mikro sertliği 817.9 HV olarak ölçölmüştür. Ayrıca, bu kaplama en düşük sürtünme katsayısına (0.41) sahip olup, korozyon direncinde de önemli iyileşmeler göstermiştir. Ni50e20WC kaplaması, ince ve kompakt yapısıyla üstün aşınma direnci sergilemiştir.

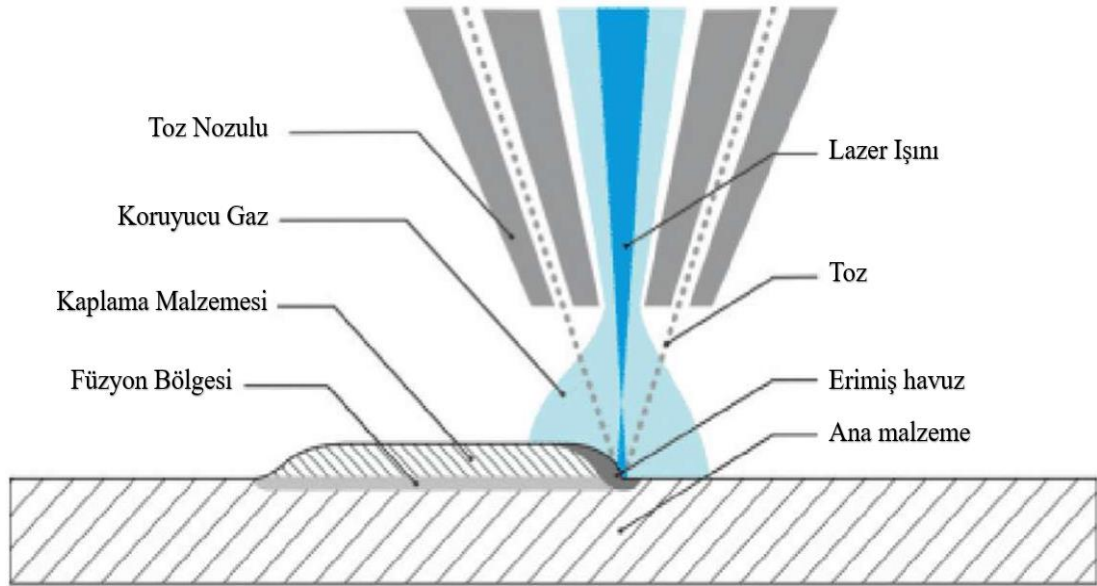
Ding ve ark. (2023), Mo-Si-B-Y₂O₃ kompozit kaplamalar, lazer kaplama yöntemiyle nikel bazlı alaşım üzerine uygulanmış ve Y₂O₃ eklenmesinin kaplamaların mikro yapı ve özelliklerine etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, Y₂O₃ içeriğinin artmasıyla kaplamaların mikro sertliği ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci artmıştır. Bununla birlikte, aşırı Y₂O₃ eklenmesi kaplamanın çatlama eğilimini artırmış ve yüksek sıcaklıkta aşınma direncini azaltmıştır. En iyi kalite, %1 Y₂O₃ içeren kaplamada elde edilmiştir. Bu kaplama, 931 HV mikro sertlik değeri ile substratın sertliğinden 5.6 kat daha yüksek bir değeri göstermiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık oksidasyon direncinde önemli bir artış kaydedilmiştir.

2. LAZER METAL BİRİKTİRME

2.1. Lazer Meral Biriktirme (LMD) Yöntemi

Lazer Metal Biriktirme (*Laser Metal Deposition*, LMD), lazer ışını ve toz akışını biriktirme yüzeyi üzerinde yönlendirmek için çok eksenli bir bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) makinesi veya robot kullanabilen bir işlemdir (Segerstark, 2017). Yöntem Lazer Kaplama (*Laser Cladding*, LC) veya Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (*Directed Energy Deposition*, DED) isimleri ile de anılmaktadır.

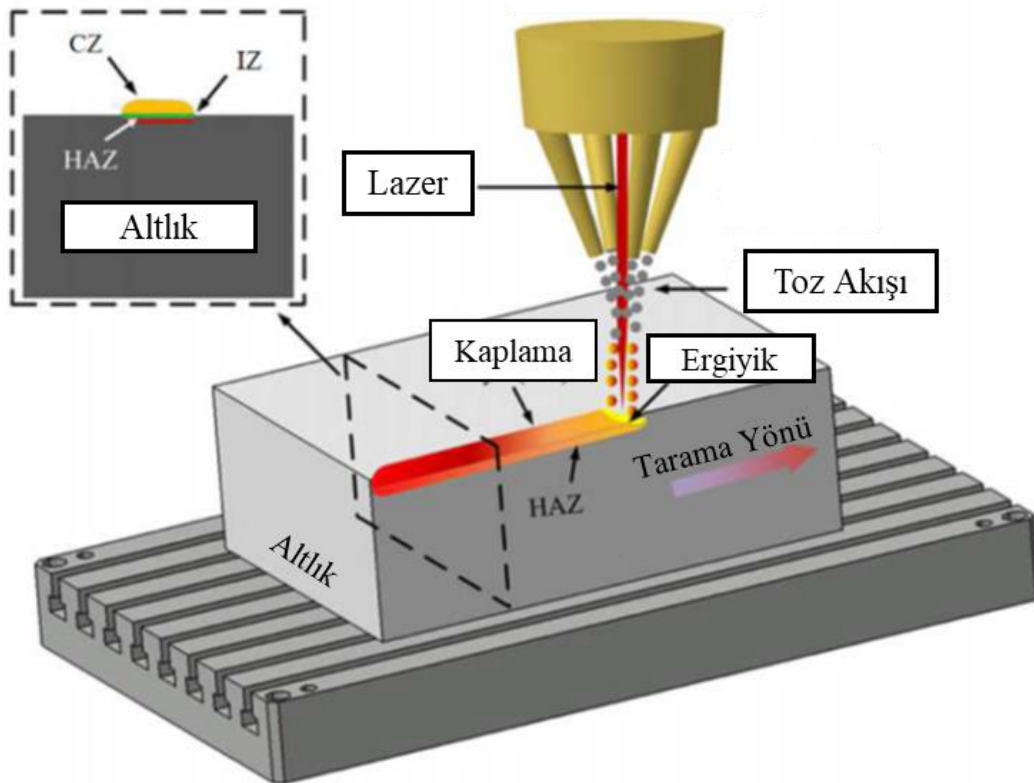
Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi LMD süreci, bir yüksek enerji lazer ışını kullanarak alt tabakanın yüzeyini ve eş eksenli bir nozul aracılığıyla gaz (Ör. argon) ile iletilen metal tozunu eritmek için kullanılmaktadır. Bu etkileşim, iş parçasının yüzeyinde bir erimiş havuz oluşturmaktadır. Lazer ışınası sonrasında, eriyik havuz hızla katı bir metal kaplama tabakasına dönüştürmektedir. Toz akışının ve bir sonraki katmanın oluşturulmasını, belirlenmiş tarama desenine göre, takip eden hareketi, birbirini takip eden katmanların altlık ana malzeme üzerine kaplanmasını kolaylaştırmakta, böylece karmaşık üç boyutlu yapılar oluşturulmaktadır (Cheng vd., 2022).



Şekil 2.1. LMD şematik gösterimi (Graf vd., 2013).

Lazer metal biriktirme işlemi, malzemenin (toz veya tel) eritildiği ve katılaşan bir eriyik havuzu oluşturduğu alt tabaka üzerindeki lazer odak alanına, sürekli malzeme beslemesiyle sağlanmaktadır (Mahamood, 2018). Metal doğrudan erimiş havuza depolanmaktadır. Havuzda, malzeme sıvı halde bulunmakta ve katı metalle çevrilidir. Malzeme, yüzey gerilimi tarafından konumunda tutulması nedeniyle üzerinde stres birikimlerine oluşmaktadır. Bu erimiş havuzun yönlendirilmesi, nihayetinde kaplanan malzemenin özelliklerini belirlemektedir. Soğutma hızı ve katılaşma hızı gibi temel faktörler, mikroyapının boyutunu, yönelimini ve bileşimini önemli ölçüde etkileyerek birikimin dayanıklılığını ve sünekliğini etkilemektedir (Miguel ve Ramalho, 2019).

LMD ile oluşturulan kaplama tabakası, yüzeyden içeriye doğru sınıflandırıldığında, kaplama tabakası üç ayrı bölgeyi içermektedir: Kaplama Bölgesi (*Cladding Zone*, CZ), Arayüz Bölgesi (*Interfacial Zone*, IZ) ve Isıl Etki Bölgesi (*Heat Affected Zone*, HAZ) (Cheng vd., 2022). Kaplama bölgesinin mikroyapısı, LMD işleminden sonra sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Arayüz bölgesi, kaplama tozu ile altlık arasındaki temas arayüzünü belirtmekte ısı etkilenmiş bölge ise altlığın mikroyapısını veya önceki kaplama tabakasını ısı işlemi veya diğer işlemler nedeniyle değiştirilen bölgeleri içermektedir.



Şekil 2.2. LMD kaplama tabakası şematik gösterimi (Cheng vd., 2022).

Lazer metal biriktirme prosesi için Mahamood (2018), Ti6Al4V altlık üzerine titanyum karbür (TiC) biriktirme üzerine beş temel aşamadan olduğundan bahsetmiştir. Bu aşamalar:

- I. Kaplama yapılacak olan parçanın CAD modeli hazırlanması ve modelin LMD cihazına yüklenmektedir.
- II. 3D CAD modelinin, Standard Triangulation Language (STL) veya Additive-Manufacturing (AMF) dosyasına dönüştürülmektedir.
- III. Model dönüştürme işleminden sonra AMF formatındaki 3D CAD verileri, parçalara ayrılarak 2D profillere dönüştürülmektedir. Bu işlem sırasında temel yapı korunmaktadır. Yapının oluşturulma yönü, operatör veya bilgisayar tarafından belirlenmektedir. Bu yönetimin doğru seçilmesi, işlem sonrası yüzey işlemlerini en aza indirmek için önemlidir.
- IV. İşlem, altlık yüzeyinde eriyik bir havuzun oluşturulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Lazer eksenine eş-eksenli olarak yerleştirilmiş malzeme besleyicisi, malzemeyi lazerin odak noktasına yönlendirerek erimiş havuzda katılaşma sağlanmaktadır. Lazer, oluşturma işlemi tamamlandı 3D parça oluşturulana kadar 2D profilin belirlediği yolu parça parça ve katman katman takip etmeye devam etmektedir.
- V. Üretim süreci tamamlandıktan sonra, parça çıkarılır ve yüzeyi temizlenmektedir. Üretilen üründen istenen hizmet performansına bağlı olarak gerekirse bitirme işlemleri ve ısıtma işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

LMD tekniği, karmaşık geometriler oluşturma, malzeme özelliklerini gelişmesini sağlama ve malzeme israfını azaltma gibi yetenekleri sayesinde, geleneksel üretim yöntemlerine göre avantaj sunmaktadır. Mevcut literatürün ve vaka çalışmalarının kapsamlı bir incelemesi sonucunda elde edilen avantajlar şu şekilde özetlenebilir:

- *Tasarım Esnekliği:* Takım tasarımı kısıtları nedeniyle sınırlanan geleneksel çıkarma üretim yöntemlerinin aksine, LMD karmaşık geometrilerin üretimini mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda mevcut parça tasarımlarında da sıfırdan üretmeye gerek kalmadan değiştirilebilmekte ve eskimiş bir ekipman yeniden yeni hale getirilebilmektedir (Mahamood 2018). Lazer ışınının yolunu ve biriktirme parametrelerini hassas bir şekilde kontrol ederek, üreticiler özel gereksinimlere uygun olarak özel tasarlanmış parçalar oluşturabilmektedirler.

- *Malzeme Çeşitliliği ve Geliştirilmiş Özellikleri:* LMD, malzeme seçiminde geniş bir malzeme yelpazesine uygulanma olanağı sağlamakta ve işlenmesi zor malzemelere dahi verimli bir şekilde kaplama uyarlanabilirliğe sahiptir (Cheng vd., 2022). Üreticilere, paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum ve nikel bazlı süper alaşımlar dahil olmak üzere geniş bir metal ve alaşım yelpazesini biriktirme imkânı sağlamaktadır. Bu çeşitlilik, sert niteliklerle birlikte daha yüksek yapı hacmine sahip bileşenler, korozyon direnci ve termal iletkenlik gibi özel malzeme (John Solomon vd., 2022) özelliklerine sahip bileşenlerin üretimini sağlamaktadır. Ayrıca, LMD farklı bölgelerde farklı malzeme özelliklerine sahip hibrit yapıların üretimini mümkün kılmaktadır.
- *İşlem Verimliliği:* LMD malzeme hurdasını en aza indirme ve işleme gereksinimlerini azaltma özelliklerine sahiptir. Tel beslemeli tekniklerinde neredeyse %100'e varan verimlilik sağlanabilmektedir (Miguel ve Ramalho, 2019). Bu da malzeme kullanımının ve üretim çıktısının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, LMD mevcut CNC işleme sistemlerine entegre edilebilmekte, optimum verimlilik ve hassasiyet elde etmek için olanak tanımaktadır.
- *Çevresel Sürdürülebilirlik:* Malzeme biriktirme gerektirmeyen geleneksel üretim süreçlerinin aksine, LMD malzeme sadece gerektiği yerlere biriktirilerek atığı minimuma indirmektedir. Atık azalması, kaynakların korunmasının yanı sıra, malzeme üretimi ve bertarafıyla ilişkili enerji tüketimini de azaltmaktadır. Ayrıca, LMD geri dönüştürülmüş veya yeniden kazanılmış tozların kullanımını mümkün kılarak, üretim işlemlerinin çevresel etkisini daha da azaltmaktadır. Genel olarak, LMD'nin çevre dostu doğası, karbon ayak izlerini en aza indirmeye çalışan endüstriler için çekici bir seçenek haline getirmekte ve daha sürdürülebilir üretim uygulamaları benimsemeyi hedefleyen birçok endüstri için önemli bir avantaj sunmaktadır.

2.2. Lazer Meral Biriktirme Ekipmanları

Lazer Metal Biriktirme (LMD) işleminde, sürecin etkili bir şekilde çalışması için dört temel ekipman gerekmektedir. Bu ekipmanlar:

2.2.1. Lazer sistemi

Silfvast (2004), "Lazer" terimi, "Işık Yükseltme ile Uyarılmış Yayılma (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)" ifadesindeki kelimelerin baş harflerinden türetilmiş olduğunu, atomların uyarılmasıyla yörünge değiştirerek kararsız hale geçtiği, bu süreçte yüksek enerjili ışın yaydığı bir fenomeni ifade ettiğini dile getirmiştir. Lazer sistemi LMD ekipmanının temel bileşenidir. Metal tozunu veya telini biriktirme sırasında eritmek için gereken yüksek yoğunluklu lazer ışını oluşturur.

Lazer demeti, monokromatiklik olarak bilinen tek renkli bir ışınla karakterizedir. Tüm dalgaların aynı faz konumuna sahip olduğu uyumlu bir yapıya sahiptir ve düşük dağılıma sahiptir, yani paralel çizgiler halinde yayılmış bir ışın demektir. Lazerin bu özgün özellikleri, üretilen lazer ışınının yoğunluğunu konsantre etmektedir. Lazer ışını yalnızca hedef noktaya yönlendirme yeteneği, lazerin genellikle tercih edilmesini sağlamaktadır (Mahamood, 2018).

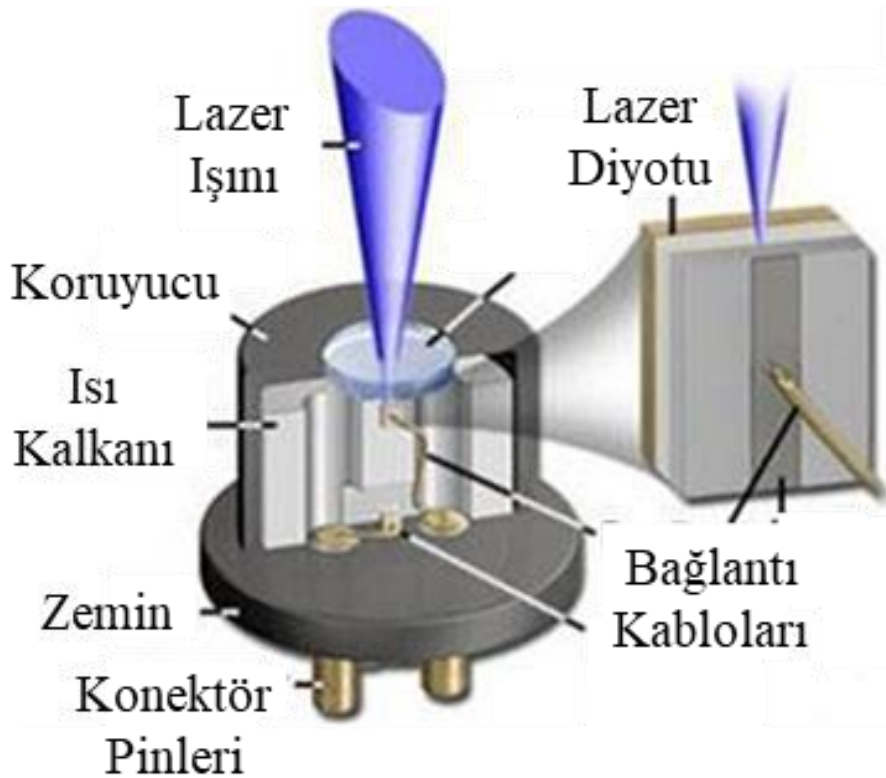
Şekil 2.3, temel bir lazer sisteminin şematik gösterimi bulunmaktadır. Görselden de anlaşılacağı üzere bu sistem de kendi içerisinde pek çok alt komponentten oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Lazer sisteminin şematik gösterimi (Silfvast 2004).

Lazerler, sektörel gelişmeler göz önüne alınarak kendi içlerinde lazerin oluşma ortamı göz önüne alınarak beş ana kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler; katı hâl lazerleri, sıvı hâl lazerleri, gaz hâl lazerleri, kimyasal lazerler ve yarı iletken veya diyot lazerleridir. Bu kategoriler arasında üç tanesi LMD tekniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır:

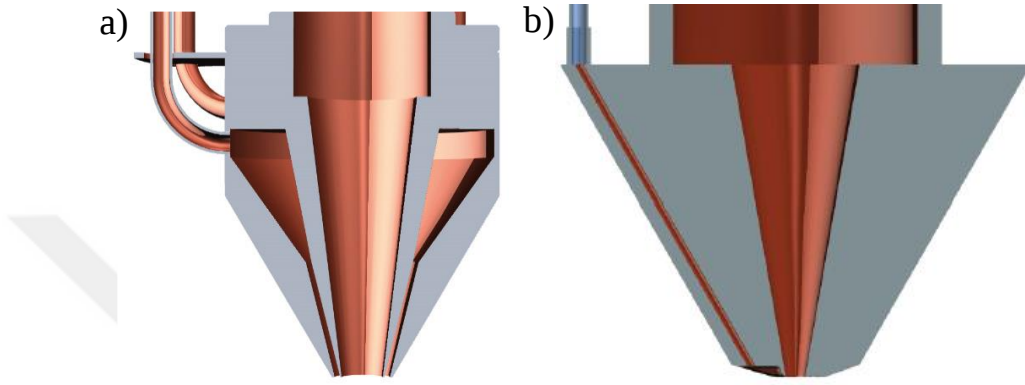
- *Katı Hal Lazeri:* Yöntemde, deşarj lambaları veya lazer diyotlar yoluyla pompalanan iyon katkılı kristaller veya camlara kullanılmaktadır (Miguel & Ramalho, 2019). En yaygın yöntemi Nd:YAG'dır. Neodimyum katkılı itriyum alüminyum granat lazerlerde, neodimyum iyonları (Nd), itriyum alüminyum granat (YAG) adı verilen bir kristalin içine gömülüdür ve arıdan bir ışık kaynağıyla pompalandığında, neodimyum iyonları uyarılır ve belirli dalga boyunda ışık yaymaya başlaması ile oluşmaktadır (Seegerstark, 2017).
- *Gaz Hal Lazeri:* Gaz lazerleri derin ultraviyole dalga boyları oluşturmak için buharlaştırılmış metal iyonundan da üretilmektedir; Helyum-gümüş (He-Ag) ve neon-bakır (Ne-Cu). İlk üretilen Helyum-neon lazerin dışındaki diğer gaz lazer türleri Argon lazeri, Kripton lazeri, Ksenon iyon lazeri, Azot lazeri, Karbon dioksit lazeri Karbon monoksit lazeri (Mahamood, 2018).
- *Diyot Lazeri:* Işık üretmek için elektriksel veya bazen optik olarak pompalanan araçları kullanan diyot lazerler bu kategoride en yaygın kullanılanıdır (Miguel & Ramalho, 2019). Şekil 2.4'te gösterildiği gibi P-N birleşiminde, pozitif gerilim uygulandığında p bölgesine, negatif gerilim uygulandığında ise n bölgesine elektron geçişi gerçekleşmektedir. Bu geçiş sırasında elektronlar enerji kaybederken foton yayıp, lazer ışını oluşmakta (Weng W. Chow, 1999).



Şekil 2.4. Diyot lazeri şematik gösterimi (Weng W. Chow, 1999).

2.2.2. Nozullar

LMD sürecinin en önemli unsurlardan sistemlerinden biri, metal tozunu biriktirmenin gerçekleştiği odak alanına ileten nozullardır. LMD'de sektörel olarak iki tip nozul (Şekil 2.5) yaygın olarak kullanılmaktadır: eş eksenli nozullar ve eksen dışı nozullar. Her iki çeşidin de kendine özgü üstün yönleri bulunmaktadır. Bu bölümde, LMD nozullarının tasarımı, işlevselliği ve çeşitleri incelenerek, biriktirme işleminin genel kalitesi ve performansı üzerindeki etkileri vurgulanmaktadır.



Şekil 2.5. a) Eş eksenli, b) Eksen dışı nozul şematik gösterimi (Segerstark, 2017).

2.2.2.1. Eş eksenli nozullar

Eş eksenli nozullar, tozu lazer ışınının etrafında simetrik olarak dağıtarak, hareket yönünden bağımsız olarak uniform bir biriktirme sağlamaktadırlar. Bu tür nozul, karmaşık geometriler ve çok yönlü yapıların oluşturulmasında özellikle avantajlıdır (Gibson, 2015), çünkü nozulun yapısı sürekli toz akışını ve lazer etkileşimini korumaktadır. Eş eksenli nozullar, halka şeklinde toz akışı sağlamakta ve çok çıkışlı olanlar olarak iki kategoriye ayrılabilir. Halka nozullar, sürekli ve odaklanmış bir toz akışı sağlayan ve lazer tarafından oluşturulan eriyik havuzuna yönlendirilen bir halka çıkışına sahiptir. Bu tasarım, sabit bir toz akış hızını koruyarak ve türbülansı en aza indirerek kararlı ve yüksek kaliteli bir biriktirme sağlamaktadır (Segerstark, 2017).

Çok çıkışlı eş eksenli nozullar, odaklanmış bir toz akışı oluşturmak için birden fazla çıkış kullanılmaktadırlar. Bu nozullarda belirli açılarla delinmiş birkaç boru kanalı bulunmakta ve kanallar, nozulun hemen altında yoğun bir toz odağı oluşturmaktadır. Bu tasarım, toz dağıtımını üzerinde hassas kontrol sağlamakta ve biriktirme sürecinin verimliliğini artırmaktadır. Eş eksenli nozullar genellikle pirinç veya bakır gibi yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerden imal edilmektedir (Segerstark, 2017). Bu malzemeler, lazer ışığını yansıtarak dağılmış lazer enerjisinden kaynaklanabilecek

nozul hasarını azaltabildikleri için seçilmektedirler. Ancak, bu malzemeler aynı zamanda daha düşük erime noktalarına sahiptirler ve bu da biriktirme işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar ve sıçramalar nedeniyle hasar görmelerine neden olabilmektedir.

2.2.2.2. Eksen dışı nozullar

Eksen dışı nozullar, tasarım açısından daha basit olmasına rağmen, belirli uygulamalarda yön bağımlılığı nedeniyle daha az verimli olabilir. Toz yandan beslenir ve bu, nozul yön değiştirdiğinde biriktirme hızında ve kalitesinde değişikliklere neden olabilir. Bununla birlikte, eksen dışı nozullar, biriktirme yönünün sabit ve öngörülebilir olduğu uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

Eksen dışı nozullar genellikle daha düşük maliyetli ve daha az karmaşık bir tasarıma sahiptirler. Ancak, tozun lazer ışınına olan uzaklığı ve açısı nedeniyle, bu tür nozullar bazen düzensiz bir biriktirme kalitesi neden olabilmektedirler. Eksen dışı nozulların performansı, kullanılan malzemeye ve spesifik uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişebilmektedir (Gibson, 2015). Örneğin, bazı malzemeler yandan besleme ile daha iyi sonuç verirken, diğerleri için eş eksenli bir yaklaşım daha uygundur.

2.2.3. Toz besleme sistemi

Toz besleme sistemleri, nozul ile ilişkili bileşenleridir ve toz halindeki malzemenin lazer tarafından oluşturulan ergime havuzuna hassas bir şekilde verilmesinden sorumludur. Bu sistemler, yüksek kaliteli bir biriktirme sağlamak ve kusurları en aza indirmek için tutarlı ve kontrollü bir toz akışı sağlamaktadır. Belirli uygulama gereksinimlerini karşılamak için çeşitli toz besleme sistemi yapılandırmaları ve mekanizmaları kullanılmaktadır (Mahamood, 2018).

En yaygın kullanılan toz besleyici sistemler, disk ve gravimetrik besleyicilerdir. Disk besleyiciler (Şekil 2.6), tozu çıkışa itmek için dönen bir disk ve silme mekanizması kullanılmaktadır. Toz, daha sonra bir taşıyıcı gaz kullanılarak nozula taşınmaktadır. Bu sistemlerde toz besleme hızı, disk dönüş hızı tarafından belirlenir ve bu hız, belirli bir zaman dilimi boyunca tozun ağırlığının ölçülmesiyle kalibre edilebilmektedir. Gravimetrik besleyiciler ise, beslenen tozun ağırlığını ölçerek ve besleme hızını buna göre ayarlayarak toz akışını kontrol etmektedirler. Bu sistemler, hassasiyetleri ve kararlılıkları ile bilinir ve hassas malzeme biriktirme gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedirler (Segerstark, 2017).



Şekil 2.6. Disk Toz Besleyici (Mahamood, 2018).

2.3. Lazer Meral Biriktirme Proses Parametreleri

LMD yoluyla üretilen parçaların fiziksel, metalurjik ve mekanik özellikleri, işleme parametrelerinden büyük ölçüde etkilemektedir. Anahtar parametreler arasında lazer gücü, toz akış hızı, tarama hızı, gaz akış hızı ve lazer ışını çapı bulunmaktadır. Bu parametrelerin her biri, nihai ürünün kalitesini ve özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, lazer gücü eriyik havuzunun boyutunu ve şeklini etkiler, biriktirilen malzemenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Benzer şekilde tarama hızı, ısı girdisini ve soğuma oranlarını etkileyerek malzemenin tane yapısını ve genel gücünü etkilemektedir.

LMD, işleme parametrelerindeki küçük değişikliklerin bile malzeme özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabileceği, doğrusal olmayan yapıyla karakterize edilmektedir. Ek olarak, bu parametreler arasında güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Bu bağ da onların optimizasyonunu karmaşık ama bir o kadar da önemli hale getirmektedir.

2.3.1. Lazer gücü

Lazerden uygulanan güç, eriyik havuzunun boyutunu ve şeklini doğrudan etkilemekte ve biriktirilen malzemenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Daha yüksek lazer gücü, malzemeye daha fazla enerji girişi sağlamakta, bu durum da daha büyük ve daha derin bir eriyik havuzu oluşmasına neden olmaktadır (Miguel & Ramalho, 2019). Katmanlar ve alt tabaka arasındaki bağı güçlendirebilir ancak düzgün bir şekilde kontrol edilmezse gözeneklilik ve çatlaklar gibi kusurların oluşma riskini

de arttırmaktadır. Öte yandan, düşük lazer gücü yetersiz erimeye neden olabilmektedir. Yetersiz ergime ise, zayıf katmanlar arası bağlanmaya ve toz parçacıklarının tam olarak kaynaşmamasına yol açabilmektedir (Gibson, 2015).

Lazer gücü, biriktirilen malzemenin mikro yapısal özelliklerini belirlemede de kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek lazer gücü ile daha büyük eriyik havuzları oluştuğundan dolayı daha yavaş katılaşma hızlarına ve denge mikro yapılarının oluşumuna yol açmaktadır. Örneğin, çalışmalar lazer gücü arttıkça mikro yapının ince martenzitten daha kalın tane yapılarına geçişine neden olmaktadır (Mahamood, 2018). Ayrıca yüksek güçten kaynaklı olarak sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Düşük lazer güçlerinde ise genellikle daha ince mikro yapılar üretilebilmektedir. İnce tane yapı ise sertliği ve aşınma direncini arttırmakta, ancak malzemenin sünekliği ve tokluğunu olumsuz etkileyebilmektedir (Gibson, 2015).

Lazer gücünün optimize edilmesi, biriktirme verimliliği ile malzeme özellikleri arasındaki dengeyi sağlamak için çok önemlidir. Farklı malzemeler ve uygulamalar için optimal bir lazer gücü aralığı değişken bir yapıya sahiptir. Örneğin, Inconel 718'in biriktirilmesinde, orta seviye bir lazer gücü ayarının, taneli yapı, gözeneklilik ve artık gerilmeler arasındaki dengeyi sağlayarak en iyi genel özellikleri ürettiği gösterilmiştir (Cheng vd., 2022).

Sonuç olarak, lazer gücü parametresi, LMD sürecinde eriyik havuzu dinamiklerini, malzeme mikro yapısını ve biriktirilen katmanların mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir rol oynamaktadır. Optimal lazer gücü ayarları, biriktirme kalitesini maksimize ederken kusurları en aza indirmek için önemli bir husustur.

2.3.2. Toz akış hızı

Toz akış hızı, birim zaman başına ergime havuzuna iletilen toz miktarını belirlemektedir. Genellikle gram/dakika (g/dk) cinsinden olacak şekilde birimlendirilmektedir. Optimal bir toz akış hızının sağlanması, toz parçacıklarının uygun şekilde ergimesi ve alt tabaka ile bağlanmasını sağlayabilmek için önem arz etmektedir. Kaplanan katmanın mekanik özelliklerini, mikro yapısını ve genel bütünlüğünü etkilemektedir.

Aşırı yüksek toz akış hızı, erime havuzuna daha fazla malzemenin gönderilmesi anlamına geldiğinden dolayı daha fazla biriktirme yapılabileceği anlamına

gelmektedir (Segerstark, 2017). Aynı zamanda, lazer enerjisinin yetersiz kalması nedeniyle toz parçacıklarının yeterince ergitilememesini doğurabilmektedir, eksik erime ise gözenekli ve zayıf mekanik özelliklere sahip bir kaplama ile sonuçlanabilmektedir (Mahamood, 2018).

Toz akış hızının çok düşük olması durumunda, toz parçacıklarının buharlaşmasına veya yeterince kaplanmamasına neden olabilmektedir. Çünkü mevcut lazer enerji yoğunluğu, beslenen az miktardaki malzeme için çok yüksek hale gelmekte (Mahamood, 2018), dolayısı ile düzensiz katman kalitesine yol açmaktadır.

2.3.3. Tarama hızı

LMD sürecinde tarama hızı, lazer ile altlık arasındaki etkileşim süresini belirlemektedir. Bu etkileşim süresi, malzemeye verilen enerji miktarını doğrudan etkilemekte ve malzemenin biriktirilme dinamiklerini belirlemektedir. Optimum tarama hızı, uniform katman birikimini sağlamak ve gözeneklilik ve çatlaklar gibi kusurlardan kaçınmak için çok önemlidir.

Mahamood ve arkadaşları (2018) tarafından belirtildiği gibi, düşük tarama hızı daha uzun etkileşim süresi ile sonuçlanarak daha büyük bir eriyik havuzu ve daha yavaş katılma oranlarına yol açmaktadır. Malzemede kusur oranı düşük homojen bir mikro yapı oluşturmaktadır. Ancak malzemenin aşırı seyreltme veya buharlaşmasına da neden olabilmektedir. Hızın yüksek değerlere sahip olmasında ise etkileşim süresini azaltarak tamamlanmamış erime ve hızlı katılma nedeniyle daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne yol açabilmektedir.

Enerji yoğunluğu ile tarama hızı arasındaki ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki (John Solomon vd., 2022):

$$E\left(\frac{J}{mm^2}\right) = \frac{P}{dV} \quad (2.1)$$

E enerji yoğunluğunu, P lazer gücünü, d ışın çapını ve V tarama hızını temsil etmektedir. Bu denklem, sabit lazer gücü ve ışın çapında, tarama hızının artırılmasının enerji yoğunluğunu azalttığını, tarama hızının azaltılmasının ise enerji yoğunluğunu artırdığını belirtmektedir.

Literatür incelendiğinde, 200 ile 599 mm/dk arasında değişen tarama hızlarının, iyi mekanik özellikler ve minimum kusurlar sağlayarak stabil ve doğru malzeme

birikimini sağlamak için yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir (John Solomon vd., 2022). Bu hızlarda, yeterli enerji girişi ile verimli malzeme işleme arasındaki denge korunmakta ve ince taneli homojen bir mikro yapının oluşumu teşvik edilmektedir.

Tarama hızının optimize edilmesi, yüzey kalitesi, mikro yapı ve mekanik özellikler arasındaki dengeyi sağlamak için kritik öneme sahiptir. Uygun optimizasyon, istenen özellikleri artırırken kusurları en aza indirebilmektedir. Örneğin, doğru tarama hızı ve lazer gücü kombinasyonunu bularak, gerekli mikro yapısal ve mekanik özelliklere sahip yüksek kaliteli birikimler üretebilmektedir.

2.3.4. Gaz akışı

LMD yönteminde iki ana gaz türü kullanılmaktadır: taşıyıcı gaz ve koruyucu gaz. Taşıyıcı gaz, tozu besleyiciden eriyik havuzuna taşımaktan sorumluyken, koruyucu gaz ise erimiş malzemeyi oksidasyon ve çevredeki atmosferden kaynaklanabilecek kirlenmelerden koruma görevini üstlenmektedir (Segerstark, 2017).

Taşıyıcı gaz, LMD sürecinde, argon veya azot gibi inert gazlar, toz malzemeyi lazer ergime havuzuna iletmek için taşıyıcı gaz olarak kullanılmaktadır (Mahamood, 2018), Gazın seçimi ve akış hızı, reaktif malzemelerin oksidasyon ve diğer çevresel etkileşimlerden korunması açısından kritik öneme sahiptir. Optimum bir gaz akış hızı, kararlı ve etkili bir toz akışını sürdürmek için gerekmektedir. Taşıyıcı gaz akış hızı, toz partiküllerinin eriyik havuzuna taşınma hızını etkilemektedir. Taşıyıcı gaz akış hızındaki bir artış, toz partiküllerinin daha yüksek hızda olması nedeniyle daha derin ve daha kısa bir eriyik havuzu oluşmasına neden olabilmektedir. Bu etki, termal dinamikleri ve biriktirilen malzemenin mikroyapısını değiştirerek, nihai ürünün mekanik özelliklerini elde etmek açısından kritik öneme sahiptir.

Koruyucu gaz, eriyik havuzunu atmosferik kirlenmeden korumada önemli bir rol oynamaktadır. Oksidasyonu ve nitrürlerin oluşumunu önlemek için yöntemde kullanılması kritiktir. Koruyucu gaz akış hızı dikkatle kontrol edilmelidir, çünkü hem yetersiz hem de aşırı akış hızları sorunlara yol açabilmektedir. Düşük akış hızları yeterli koruma sağlamayabilir ve oksidasyona yol açabilirken, yüksek akış hızları tozun üflenmesine veya biriktirilen malzemenin gözenekliliğini artırmaya neden olabilmektedir (Segerstark, 2017).

Araştırmalar, optimal koruyucu gaz akış hızının demir içeren ve demir içermeyen malzemeler arasında değiştiğini göstermiştir. Demir içeren malzemeler için 5.1–10 L/dk akış hızı yaygın olarak kullanılırken, demir içermeyen malzemeler için 0–5 L/dk akış hızı tercih edilmektedir (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024). Bu aralıklar, uygun koruma ve biriktirme kalitesini sağlamak, gözeneklilik ve çatlaklar gibi kusurları azaltmak için yardımcı olmaktadır.

2.3.5. Lazer ışını çapı

Lazer ışın çapı, odak uzaklığında dikey yönde ölçülmekte ve genellikle milimetre (mm) cinsinden ifade edilmektedir. Lazer noktası büyüklüğü veya ışın çapı, lazerin enerji yoğunluğunu etkilemekte ve bu da katman kalınlığı, parça kalitesi ve biriktirilen katmanların genişliği üzerinde etkili olmaktadır. Daha küçük bir ışın çapı, daha yüksek bir enerji yoğunluğuna yol açmakta ve daha derin ve dar eriyik havuzları oluşturmaktadır. Buna karşılık, daha büyük bir ışın çapı, enerjiyi daha geniş bir alana dağıtmakta ve bu da daha sık ve geniş eriyik havuzlarına yol açmaktadır (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024).

Optimum ışın çapı, işlenen malzemeye ve nihai parçanın istenen özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Ferritik malzemeler için ışın çapları genellikle 0 ile 1 mm arasında değişirken, ferritik olmayan malzemeler için aralık biraz daha geniş olup 1.1 ile 2 mm arasındadır. Işın çapı seçimi, hassasiyet ve malzeme biriktirme verimliliği arasındaki dengeyi sağlamalıdır (Gibson, 2015).

2.3.6. Bindirme yüzdesi

Bindirme yüzdesi, LMD sürecinde bir diğer kritik parametredir. Birbirini izleyen lazer geçişlerinin ne ölçüde örtüştüğünü ifade etmektedir. Bindirme yüzdesinin düzgün bir şekilde kontrol edilmesi, biriktirilen malzemenin homojen yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini sağlamak için esastır (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024). Optimum bindirme, gözenekliliğin azaltılmasına ve katmanlar arasında tutarlı bir mikro yapı elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Tipik olarak hem ferritik hem de ferritik olmayan malzemeler için bindirme yüzdesi %0 ile %40 arasında değişmektedir. Bu aralık, aşırı termal gerilme veya bükülme oluşturmadan düzgün bir biriktirme sağlamak için optimal kabul edilmektedir. Daha yüksek bindirme yüzdeleri, önceki biriktirilen katmanların yeniden eritilmesine yol açarak bağlanmayı artırabilmekte, ancak aynı zamanda kalıntı gerilmeler ve termal

distorsiyon riskini arttırabilmektedir. Daha düşük bindirme yüzdeleri, eriyik havuzlarının yetersiz örtüşmesi nedeniyle zayıf bağlanma ve daha yüksek gözeneklilikle sonuçlanabilmektedir (Gibson, 2015).

2.4. Lazer Metal Biriktirme Toz Karakteristiği

Lazer metal biriktirmede yöntemiyle biriktirilen katmanların kalitesi ve özellikleri, kullanılan metal alaşımlı tozların karakteristiği büyük ölçüde etkilemektedir. Tozların, üretim yöntemleri açısından tam olarak belirlenmeleri gerekmektedir. Bu nedenle biriktirmenin nihai özellikleri büyük ölçüde koşullandıracak bir adımdır. Bu bölümde LMD'de kullanılan metal alaşımlı toz türleri, bunların üretim süreçleri, hibrit kullanımları ve bunun sonucunda biriktirme süreci ve malzeme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmektedir.

2.4.1. Metal alaşımlı tozlar

Metal tozları, metalurjik işlemlerde ve özellikle lazer kaplama gibi ileri yüzey mühendisliği teknolojilerinde kullanılan ince metal parçacıklarıdır. Bu tozlar, belirli bir metalin veya metal alaşımının atomize edilmesi veya kimyasal yöntemlerle imal edilebilmektedir. Metal tozlarının boyutları, genellikle mikrometre ölçeğindedir. Yüzey kaplama sürecinde istenen yüzey özelliklerine bağlı olarak farklı malzemelerden üretilebilmektedir. Bu tozlar, lazer kaplama işlemi sırasında eriyerek alt tabaka yüzeyine yapışmakta ve böylece yüzeyin mekanik özelliklerini, aşınma ve korozyon direncini arttırılmasını sağlamaktadır. Metal tozları, kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan çelik, alüminyum, nikel, titanyum ve kobalt gibi çeşitli metallerden üretilebilmekte ve farklı endüstriyel uygulamalarda özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır.

2.4.1.1. Metal alaşımlı tozların üretimi

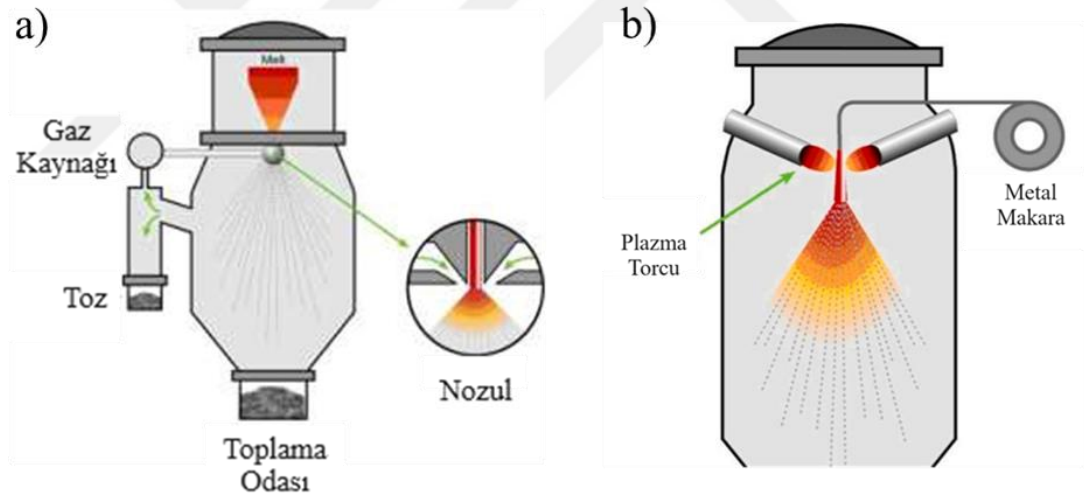
Yüksek kaliteli metal tozların üretimi, çeşitli gelişmiş üretim tekniklerini içeren detaylı bir süreçtir. Bu tozları üretmek için kullanılan en yaygın yöntemler arasında gaz atomizasyonu (GA) ve plazma atomizasyonu (PA) yer almaktadır.

2.4.1.1.1. Gaz atomizasyonu

GA, ergitilmiş metal bir nozulden dökülür (Şekil 2.7.a) ve metali soğutup katılaştırarak ince küresel partiküller haline getiren yüksek hızlı bir gaz akışı (tipik olarak argon veya nitrojen) ile parçalanması ile toz elde edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Elde

edilen küresel partiküller daha küçük yüzey alanı ve iyi akışkanlığa sahip olması sayesinde LMD uygulaması için uygun hale getirmektedir (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024).

Partikül boyutu ve dağılımı gaz basıncı, eriyik sıcaklığı ve nozul tasarımı ayarlanarak kontrol edilebilmektedir. Gazın hızı ve akış hızının yanı sıra nozulun tasarımı, üretilen toz partiküllerinin boyutunu ve dağılımını etkileyen çok önemli faktörlerdendir. GA yöntemi tozu yüksek üretim kapasitesine sahip, maliyeti düşük tutmaya yardımcı olan bir yöntem olmasına karşın, sıkıştırılmış gazlar, üretim sürecinde toz partiküllerindeki kalıntı birikintileri gözeneklilik içeriğinin artmasına neden olmaktadır (Segerstark, 2017). Ancak, GA yöntemi ile toz üretmek normalde uydu (satellite) olarak adlandırılan parçacıklar şeklinde toz üretimini gerçekleştirmektedir. Bu uydular, parçacıklardan oluşan yüzey düzensizlikleridir. Şekil 2.8.a’da gösterildiği üzere, daha küçük boyutlarda oluşan parçacıkların, büyük olanların yüzeylerine yapışması sonucunda oluşmaktadır.

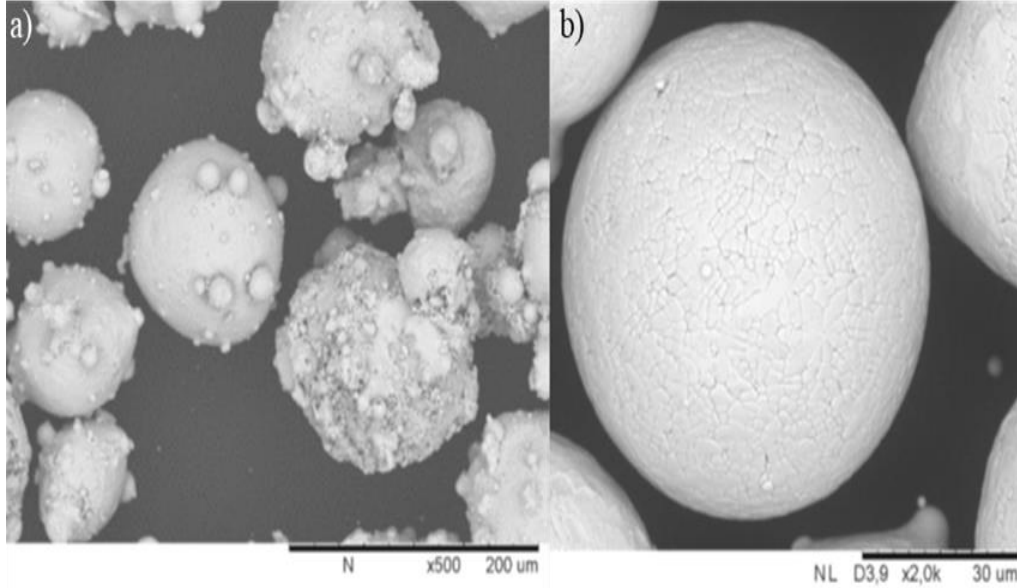


Şekil 2.7. a) Gaz atomizasyonu, b) Plazma atomizasyonu şematik gösterimi (Ghasempour-Mouziraji vd., 2024).

2.4.1.1.2. Plazma atomizasyonu

PA, yüksek kaliteli küresel tozlar üretmek için kullanılan bir başka tekniktir. Bu yöntemde, istenen alaşımdan yapılmış elektrot bir plazma arkı tarafından eritilmektedir. Plazma atomizasyon prosesine daha yüksek enerji sağlamaktadır (Şekil 2.7.b), bu da daha küçük partikül boyutu dağılımı ve gelişmiş akışkanlık ile sonuçlanmaktadır. Şekil 7.8’de gösterildiği üzere PA tozları, GA yöntemi ile üretilen tozlar ile karşılaştırıldığında, GA yönteminde gözlemlenen uydu tipi yapısına karşıt

olarak düzgün küresel partikül boyutu ve yüzeyi olmasının yanı sıra, yüksek saflıkları ve düşük oksijen içerikleri (Segerstark, 2017) sayesinde kendilerini diğer yöntemlerden ayırmaktadırlar.



Şekil 2.8. a) GA yöntemiyle imal edilmiş Inconel 718 tozu, b) PA yöntemiyle imal edilmiş Inconel 718 tozu (Segerstark, 2017).

2.4.1.2. Metal alaşımlı toz çeşitleri

Metal alaşımlı tozların, altlık üzerine biriktirilen nihai malzemenin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri nedeniyle lazer metal biriktirmede seçimi oldukça önemlidir.

Uygun tozların seçimi, çeşitli uygulamalarda istenen malzeme özelliklerini ve performansı elde etmek için kritiktir. Bu bölümde, nikel bazlı alaşımlar, kobalt bazlı alaşımlar ve titanyum bazlı alaşımlar dahil olmak üzere LMD'de kullanılan ana metal alaşımlı toz türleri ele alınmaktadır.

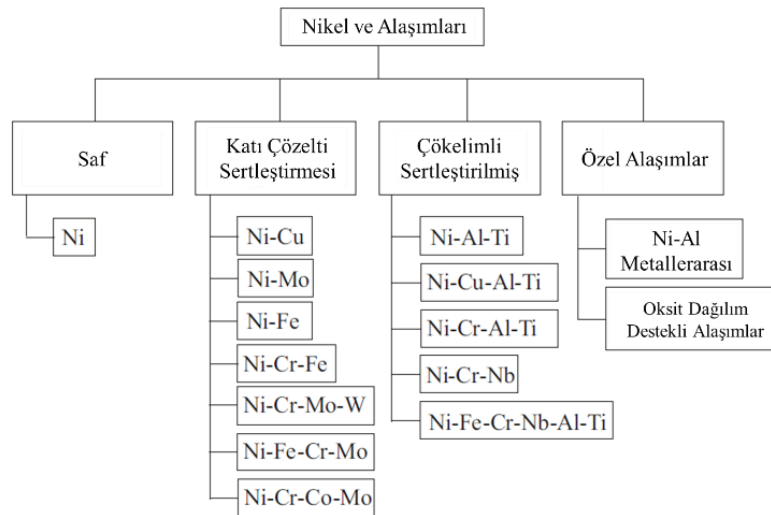
- **Nikel ve alaşımları**

Saf nikel tozu, termal iletkenliği ve çeşitli ortamlardaki kararlılıkları sayesinde sektörel olarak yaygın kullanılan tozlardadır. Aynı zamanda nikel bazlı alaşımlar hem sulu hem de yüksek sıcaklıktaki korozyif ortamlar gibi ağır çalışma koşullarına dayanma kabiliyetleri nedeniyle geniş bir popülerlik kazanmıştır (Cavaliere, 2020). Malzemenin kendisinin sahip olduğu üstün özellikleri (Tablo 2.1), yüksek yapışma gücüne, mükemmel aşınma direncine ve korozyon direncine sahip (Yinghua vd., 2020)lazer kaplama uygulamaları için uygun bir aday haline getirmektedir.

Tablo 2.1. Nikel özellikleri ve sınıflandırılması.

Özellik	Açıklama
Atom numarası	28
Atomik ağırlık	58.69 g/mol
Atomik hacim	6.59 cm ³ /mol
Yoğunluk	8.9 gm/cm ³
Ergime sıcaklığı	1455°C
Termal kondüktivite	90.9 W/m.K
Sertlik	638 HV

Nikelin, krom, brom ve molibden gibi elementlerle alaşımlandırarak formüle edilen alaşımları, belirli endüstriyel ihtiyaçları karşılamak için özelleştirilebilir özellikler sunmaktadır. Bu alaşımlar ile sertlik ve yüksek sıcaklık korozyonuna karşı direnç artışı sağlanabilmektedir. Alaşım tozlarının seçimi, lazer kaplamada istenen sonuçların elde edilmesi için önemlidir. Toz seçimi kaplama katmanının hem mekanik özelliklerini ve mikro yapısını iyileştirdiği pek çok çalışmada belgelenmiştir (Wang vd., 2023).

**Şekil 2.9.** Nikel ve alaşımlarının sınıflandırılması (Cavaliere, 2020).

Cavaliere, (2020) tarafından açıklandığı gibi, çökelme ile güçlendirilmiş Ni bazlı alaşımların fiziksel metalurjisi oldukça karmaşıktır. Bu alaşımlar çökelti oluşumu için Ti, Al ve Nb; oksidasyon direnci için Cr, Al ve Ta; ve sıcak korozyon direnci için Cr, La ve Th ile alaşımlandırılmaktadırlar.

Saf nikel, gri bir renge sahiptir. Lazer kaplamada nikel alaşımlarına göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. En önemli avantajlarından biri, performansı etkileyebilecek daha az kirlilik içeren daha düzgün ve tutarlı bir kaplama ile sonuçlanan daha yüksek saflığıdır. Saf nikel ayrıca, özellikle zorlu ortamlarda mükemmel korozyon direnci sağlamakta ve bu da onu kimya ve denizcilik endüstrilerindeki uygulamalar için ideal bir hale getirmektedir. Ayrıca, saf nikel kaplamalar birçok nikel alaşımına kıyasla üstün süneklik ve termal iletkenlik sergileyerek yüksek sıcaklık uygulamalarında performanslarını artırmaktadır. Alaşım elementlerinin bulunmaması da kaplama sürecini basitleştirerek istenmeyen faz oluşumları riskini azaltmakta ve kararlı yapı sağlamaktadır (Olakanmi, 2013).

Inconel 625 ve Inconel 718 gibi nikel alaşımları, gelişmiş mekanik özellikleri ve oksidasyon ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle lazer kaplamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar katı çözelti ile güçlendirilmiş veya çökelme ile sertleştirilmiş olup yüksek gerilimli ve yüksek sıcaklıklı ortamlarda performanslarını artırmaktadır.

- **Inconel 718:** Alaşım, krom ve önemli miktarda demir, molibden ve niyobyum içermektedir. Yüksek mukavemetleri, kaynaklanabilirlikleri ve yüksek sıcaklıklarda korozyona, yorulmaya ve oksidasyona karşı dirençleri nedeniyle nükleer santral bileşenleri, kanatçıklar ve gaz türbini parçaları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Inconel 718, çeşitli güçlendirme fazlarını barındıran yüzey merkezli kübik bir kristal yapıya sahiptir. Araştırmalar, yönlü katılaştırmanın düzensiz tane sınırlarını ve kusurları ortadan kaldırarak sürünme mukavemetini ve alaşımın ömrünü artırabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, geleneksel yönlü katılaştırma yöntemleri genellikle silindirik kristallerin hızlı bir şekilde bozulmasına ve mekanik özellik değişikliklerine neden olabilecek niyobyum ayrışması gibi sorunlara yol açmaktadır (John Solomon vd., 2022).
- **Inconel 625:** Kimyasal kompozisyonu: nikel (%58-71), krom (%21-23), molibden (%8-10) ve niyobyum (%3.2-3.8) ile az miktarda demir, kobalt ve

eser miktarda alüminyumdan oluşmaktadır. Yüksek korozyon direnci, mukavemet ve termal stabilite gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle lazer kaplamada tercih edilmektedir. Bu alaşım özellikle AISI 316L paslanmaz çelik gibi altlıklara uygulandığında uygulamalarda, aşınma direncini önemli ölçüde artırmakta ve hizmet ömrünü uzattığı kanıtlanmıştır (Bloemer vd., 2022). Inconel 625 ile lazer kaplama işlemi, kaplanan bileşenlerin bütünlüğünü korumak için çok önemli olan minimum seyreltme ve rafine bir mikro yapı ile güçlü bir metalürjik bağ oluşturulmasını sağlamaktadır. Ek olarak, lazer gücü, kaplama hızı ve toz beslenme hızı gibi proses parametreleri, mikro sertlik ve seyreltme oranı dahil olmak üzere istenen kaplama özelliklerini elde etmek için optimize edilmesi gerekmektedir (Rafiei vd., 2024).

Saf nikel tozlarının lazerle kaplanması için proses parametreleri, kaplama tabakasının kalitesini ve performansını belirlemede kritik öneme sahiptir.

- **Lazer gücü**, toz ve alt tabakaya enerji girişini etkilediği için lazer kaplamada temel bir parametredir. Daha yüksek lazer gücü, daha derin bir eriyik havuzu ve kaplama tabakası ile alt tabaka arasında daha iyi bir bağlanma sağlamaktadır. Aşırı lazer gücü çatlaklar gibi kusurlara yol açabilmektedir. Örneğin, AISI 202 paslanmaz çelik üzerine nikel tozunun lazerle kaplama çalışmasında, optimum lazer gücünün 2.1 kW olduğu (Martin Vinoth vd., 2018), başka bir çalışmada ise 1100 W lazer gücünün yüksek nikel alaşımları üzerine Ni60 kaplama için etkili olduğu bildirilmiştir (Raj vd., 2024).
- **Tarama hızı**, kaplama işlemi sırasında altlık üzerine ısı girişini ve soğutma hızını etkileyen bir parametredir. Daha yüksek bir tarama hızı, ısı girişini azaltarak daha ince bir mikro yapıya ve alt tabaka malzemesinin daha düşük seyrelmesine yol açmaktadır. Tersine, daha düşük bir tarama hızı ısı girişini artırarak daha kaba bir mikroyapıya ve daha yüksek seyrelmeye neden olmaktadır. AISI 202 paslanmaz çelik üzerine nikel tozunun lazerle kaplanması üzerine yapılan çalışmada optimum tarama hızı 500 mm/dak (Martin Vinoth vd., 2018) olarak bulunmuştur.
- **Toz besleme hızı**, eriyik havuzuna gönderilen toz miktarını belirlemektedir. Kaplama tabakasının kalınlığını ve bileşimini direkt olarak etkileme özelliğine sahiptir. Optimum bir toz besleme hızı, aşırı toz israfı olmadan düzgün ve yoğun bir kaplama tabakası oluşturması gerekmektedir. Örneğin, AISI 202

paslanmaz çelik üzerine nikel tozunun lazerle kaplanması için optimum toz besleme hızının 10 g/dak1 olduğu saptanmıştır (Martin Vinoth vd., 2018).

- **Titanyum ve alaşımları**

Titanyum alaşımlı tozların lazer kaplamada kullanımı, çeşitli altlıkların yüzey özelliklerini geliştirmek için sektörel olarak aktif olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V gibi çeşitli titanyum alaşımları, lazer kaplama uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşımlar iyi bir mukavemet, süneklik ve tokluk dengesi sunarak onları çok çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun yüzeyler oluşturmaktadır. Zhao (2023) araştırması ve pek çok çalışmaya göre, titanyum alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik davranışı lazer kaplama teknikleri ile önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Tablo 2.2’de titanyum elementinin sahip olduğu genel özellikler verilmiştir.

Tablo 2.2. Titanyum alaşımının özellikleri ve sınıflandırılması (Cavaliere, 2020)

Özellik	Açıklama
Atom numarası	22
Atomik ağırlık	47.90
Kristal yapısı	Alfa (α), Kapalı Paket Heksagonal Beta (β) Hacim Merkezli Kübik
Renk	Koyu Gri
Yoğunluk	4.1 gm/cm^3
Ergime sıcaklığı	16680°C
Sertlik	460 HV

Titanyum toz boyutu, şekli ve dağılımı gibi titanyum tozlarının özellikleri, diğer malzemelerde de olduğu gibi kaplama tabakasının kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Küresel tozlar, daha iyi akışkanlıkları ve paketleme yoğunlukları nedeniyle tercih edilirken, daha düzgün ve yoğun bir kaplama tabakası elde edilmektedir. Partikül boyutu dağılımı, tozun erime davranışını vb. proses parametreleri ortaya çıkan kaplama tabakasının mikro yapısını etkilemektedir.

Titanyum alaşımları, mikroyapılarına göre üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır: alfa (α), beta (β) ve alfa-beta ($\alpha+\beta$) alaşımları. Alfa alaşımları ısıtılma işlemine tabi tutulamaz ve mükemmel korozyon direncine sahiptirler. Beta alaşımları ısıtılma işlemine tabi tutulabilir ve yüksek mukavemet ve iyi şekillendirilebilirlik sunmaktadırlar. Alfa-beta alaşımları hem alfa hem de beta fazlarının özelliklerini bir araya getirerek iyi bir mukavemet ve süreklilik dengesi sağlamaktadırlar (Zhao vd., 2023).

- **α alaşımları:** Alüminyum ve oksijen gibi elementlerle stabilize edilen alfa faz titanyumdan oluşmaktadır. Mükemmel korozyon dirençleri ve iyi kaynaklanabilirlikleri ile bilinmektedirler. Bir α alaşımı örneği, az miktarda oksijen ve demir içeren ticari olarak saf titanyumdur. CP-Ti genellikle yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluk gerektiren uygulamalarda kullanılır. CP-Ti'nin tipik bileşimi %99.2 titanyum, %0.18 oksijen ve %0.25 demir içermektedir (Zhao vd., 2023).
- **β alaşımları:** Beta fazının oluşumunu destekleyen molibden, vanadyum ve niyobyum gibi elementlerle stabilize edilmektedirler. Yüksek mukavemetleri, iyi şekillendirilebilirlikleri ve mükemmel sertleştirilebilirlikleri ile bilinmektedirler. Bir β alaşımına örnek olarak Ti-10V-2Fe-3Al verilebilir. Ti-10V-2Fe-3Al'in tipik bileşimi %10 vanadyum, %2 demir ve %3 alüminyum içermektedir (Di vd., 2022). Yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.
- **$\alpha+\beta$ alaşımları:** Alfa ve beta fazlarının bir karışımını içeren bu titanyum alaşımları, her iki türün özelliklerinin tek malzeme içerisinde birleşimi sağlamaktadır. İyi mekanik özellikleri, yüksek mukavemetleri ve mükemmel korozyon dirençleri ile bilinmektedirler. Ti-6Al-4V, lazer kaplamada en yaygın kullanılan $\alpha+\beta$ alaşımıdır. Sırasıyla alfa ve beta fazlarını stabilize eden %6 alüminyum ve %4 vanadyum içermektedirler (Zhao vd., 2023).

- **Paslanmaz çelik ve alaşımları**

Lazer kaplamada östenitik, martensitik ve ferritik paslanmaz çelikler de dahil olmak üzere çeşitli paslanmaz çelik tozları lazer biriktirme işleminde kullanılmaktadır.

AISI 316L gibi östenitik paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleriyle bilinmesi nedeniyle literatürde yaygın kullanılan alaşımlarındandır. AISI 431 gibi martensitik paslanmaz çelikler ise, yüksek sertlik ve mukavemet sunarak aşınma direnci gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir.

Ferritik paslanmaz çelikler, daha az yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, gerilme korozyonu çatlamasına ve oksidasyona karşı iyi direnç sağlamaktadırlar (Fan vd., 2023).

Diğer malzemelerde olduğu gibi paslanmaz çeliklerin proses parametreleri de kendine özgüdür. Örneğin, G20Mn5QT çelik üzerine 316L paslanmaz çelik tozu kaplamak için optimum parametreler arasında 2300 W lazer gücü, 500 mm/dak tarama hızı ve 14 g/dak toz besleme hızı tercih edilmektedir (Fan vd., 2023). Bu parametreler, gözenekler ve çatlaklar gibi kusurların minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip bir kaplama tabakası ile sonuçlanmaktadır.

SS316L/IN625 işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemenin bakır bir alt tabaka üzerine lazerle kaplanması üzerine yapılan bir başka çalışmada ise, 600 W lazer gücünün, 700 mm/dak tarama hızının ve 1.5 g/dak toz akış hızının kaplama kalitesini optimize ettiği saptanmıştır (Alam vd., 2018). Bu parametreler mikro sertliği artırmış, yüzey pürüzlülüğünü ve gözenekliliği azalmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak paslanmaz çelik tozları, lazer kaplama işleminde kullanılan önemli malzemelerden biridir. Çok çeşitli uygulamalar için gelişmiş yüzey özellikleri sağlamaktadır. Uygun toz türlerinin seçimi, proses parametrelerinin kontrolü ve altlık malzemelerin mekanizmaların anlaşılması, optimum sonuçların elde edilmesi için önemli parametrelerdendir. Bu alanda devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, paslanmaz çelik tozlarıyla lazer kaplamanın uygulama ve yeteneklerini daha da genişletecektir.

2.4.2. Metal matris kompozit tozlar ve çeşitleri

Kompozit, diğer adı ile hibrit tozlar, farklı fazların veya malzemelerin kombinasyonundan oluşan mühendislik malzemeleridir. Bu tozlar, farklı bileşenlerinin özelliklerinden yararlanarak, tek fazlı malzemelerin üstün yönlerini birleştirerek gelişmiş özellikler elde etmek üzere geliştirilmektedirler. Lazer kaplamada, kompozit hibrit tozlar, genellikle kaplanan katmanın mekanik özelliklerini, aşınma direncini ve korozyon direncini iyileştirmek için kullanılmaktadır.

Lazer kaplamada kullanılan kompozit hibrit tozlara bir örnek, Jin ve arkadaşlarının, (2022) çalıştıkları C-Al₂O₃-Cu kompozit tozudur. Bu toz karbon, alümina (Al₂O₃) ve bakır (Cu) karışımından elde edilmektedir. Ayrıca kimyasal yapısında, bağlanma

gücünü ve lazer emilimini artırmak için nikel (Ni) ve demir (Fe) gibi ek elementler içermektedir. Karbon kullanımı oksidasyonu bastırmaya ve lazer emilimini artırmaya yardımcı olurken, alümina mekanik mukavemeti ve lazer emilimini artırmaktadır. Elde edilen kaplama katmanı 406.7 ± 0.1 MPa'lık bir gerilme mukavemeti sergilemiş ve bu da saf bakır altlıktan oldukça yüksek bir değere sahiptir.

Metal Matrisli Kompozitler (MM'ler), mukavemet, sertlik ve termal stabilite gibi belirli özellikleri geliştirmek için tipik olarak seramik veya fiberler gibi ikincil bir faz ile birleştirilmiş metalik bir matristen oluşan mühendislik malzemeleridir. Metal matris alüminyum, magnezyum veya nikel gibi metallerden oluşabilirken, takviye fazı genellikle silikon karbür gibi seramik parçacıklardan, karbon veya alümina gibi fiberlerden veya tozlardan oluşabilmektedir. Bu kompozitler, metalin sünekliğini ve tokluğunu takviyenin sertliği ve mukavemeti ile birleştirmek üzere tasarlanmıştır. Bu malzemeler arasındaki sinerji, tek başına her iki bileşene kıyasla üstün mekanik ve termal özellikler sağlar ve MMK'leri havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yüksek performanslı uygulamalar için ideal hale getirmektedir (Mahamood, 2018).

MMK'lerin başlıca avantajlarından biri, malzemelerin yüksek termal ve mekanik yüklere maruz kaldığı endüstrilerde özellikle faydalı olan yüksek sıcaklıklarda mukavemeti koruma yetenekleridir. Ek olarak, MMK'ler metalik matrise gömülü sert seramik fazlar nedeniyle gelişmiş aşınma direnci göstermekte, bu da onları aşınmaya dayanıklı kaplamalar için uygun hale getirmektedir (Miguel ve Ramalho, 2019).

Takviye malzemeler, MMK'lerin nihai performans özelliklerinin oluşmasında kritik rol oynamaktadır. Her takviye malzemesi, oluşturulan kompozit yapıya üstün özelliklerini aktarabilmektedirler. MMK'lerde farklı takviyeler kullanılmakla birlikte, Şekil 2.11'de gösterildiği üzere en yaygın olarak karbürler, oksitler, nitrürler, borürler ve MAX faz tozları takviye çeşitlerine örnek olarak verilebilmektedir.



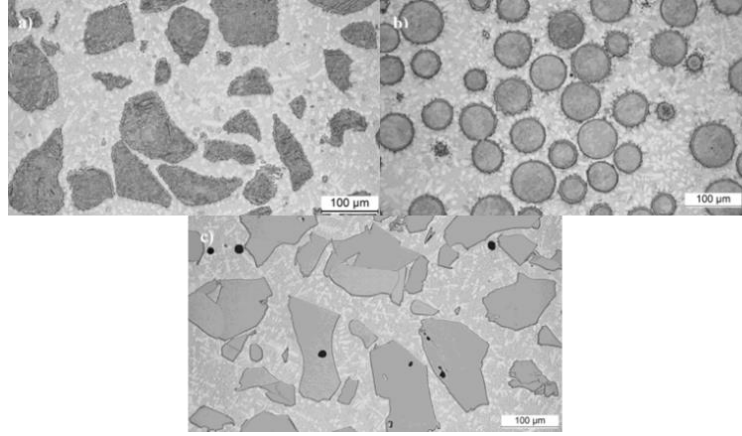
Şekil 2.10. Metal matrisli kompozit takviye çeşitleri.

2.4.2.1. Karbürler

Karbürler, olağanüstü sertlikleri ve aşınma dirençleri nedeniyle MMK'lerde en yaygın kullanılan takviyeler arasındadır. En önemli karbürler arasında silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC) ve tungsten karbür (WC) bulunmaktadır.

- **Silisyum Karbür (SiC):** SiC, yüksek sertliği, termal iletkenliği ve kimyasal kararlılığı nedeniyle MMK'lerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle havacılık ve otomotiv bileşenleri gibi aşınma direnci ve yüksek sıcaklık performansı gerektiren uygulamalarda etkilidirler (Reddy, 2018). SiC partikülleri genellikle alüminyum matrisli kompozitlerde aşınma direncini ve mukavemetini artırmak için kullanılmaktadır.
- **Titanyum Karbür (TiC):** TiC yüksek sertliği ve termal kararlılığı ile bilinmektedirler. MMK'lerde kesici takımlar ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. TiC takviyeli MMK'ler mükemmel aşınma direnci sergilemekte ve yüksek sertlik ve termal stabilitenin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Kamal K. Kar, 2017).
- **Tungsten Karbür (WC):** WC bilinen en sert malzemelerden biridir ve MMK'lerde aşırı aşınma direnci gerektiren uygulamalar için kullanılır. Tungsten karbür parçacıkları Şekil 2.12'de gösterildiği üzere farklı formlarda bulunabilmektedirler: Eritilmiş ve Ezilmiş Tungsten Karbür (FTC), WC ve W_2C fazlarından oluşan ötektik bir mikro yapıya sahiptirler ve düzensiz, bloklı bir yapıda karakterize edilmektedirler. Küresel Dökme Tungsten Karbür (SCC), bir plazma torcu ile küreselleştirilen, erimiş ve ezilmiş karbürlerdir.

Makro Kristal Tungsten Karbür (MTC), mono kristal karbür olarak bilinen tür, düzensiz bir şekle sahip altıgen WC'den oluşmaktadır (Maroli ve Dizdar, t.y.).



Şekil 2.11. Karbür mikrografik görüntüleri: a) FTC, b) SCC, c) MTC

2.4.2.2. Oksitler

Oksitler, MMK'lerde kullanılan, mükemmel termal stabiliteleri ve sertlikleriyle bilinen bir başka takviye malzemesi sınıfıdır. Yaygın oksitler arasında alüminyum oksit (Al_2O_3) ve zirkonyum oksit (ZrO_2) bulunur.

- **Alüminyum Oksit (Al_2O_3):** Alümina olarak da bilinen Al_2O_3 , yüksek sertlik ve termal kararlılık dahil olmak üzere mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Etkili bir elektrik yalıtkanı ve yüksek sıcaklıklara dayanabilen refrakter bir malzeme olarak hizmet etmektedir. Ayrıca, Al_2O_3 'ün düşük enerjili fononlar ve optik şeffaflık gibi mikroyapısal özellikleri, özellikle nadir toprak elementlerine takviyelendirildiklerinde, lazerler ve ışık emisyon cihazları gibi optik uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Kamal K. Kar, 2017).
- **Zirkonyum Oksit (ZrO_2):** Zirkonya olarak da bilinen zirkonyum oksit (ZrO_2), yüksek termal kararlılığı, mekanik mukavemeti ve korozyona karşı mükemmel direnci ile tanınan çok yönlü bir seramik malzemedir. Üç polimorfik formda bulunmaktadır: monoklinik, tetragonal ve kübik. Tetragonal ve kübik fazlar, daha yüksek toklukları nedeniyle mühendislik uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir (Kamal K. Kar, 2017).

2.4.2.3. Nitrürler

Nitrürler MMK'lerde yüksek sertlikleri, kimyasal kararlılıkları ve termal iletkenlikleri için kullanılmaktadır. Nitrürler, nitrojen ve bir veya daha fazla elementten, tipik olarak

metaller veya metaloidlerden oluşan bileşiklerdir. Sertlikleri, yüksek erime noktaları ve korozyon ve aşınmaya karşı olağanüstü dirençleri ile bilinmektedirler. Bu malzemeler, dayanıklılıkları ve aşırı koşullara dayanma kabiliyetleri nedeniyle elektronikten kesici takımlara kadar çeşitli endüstriler için çok önemlidir (Y. G. Gogotsi, 1999).

- **Titanyum Nitrür (TiN):** Sertliği ve korozyon direnci ile bilinen bir interstisyel nitrürdür. Aşınmayı azaltma ve takımın ömrünü uzatma kabiliyeti nedeniyle özellikle kesici takımlarda kaplama malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.
- **Silisyum nitrür (Si_3N_4):** Silisyum ve nitrojen atomları arasında güçlü kovalent bağlara sahip bir kovalent nitrürdür. Bu, malzemeye yüksek termal kararlılık, mukavemet ve termal şoka karşı direnç kazandırarak onu yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal hale getirmektedir.
- **Bor nitrür (BN):** Altıgen bor nitrür (h-BN) ve kübik bor nitrür (c-BN) olmak üzere farklı şekillerde bulunmaktadır. Altıgen bor nitrür yapısal olarak grafitte benzer, bor ve nitrojen atomları katmanları altıgen bir kafes içinde düzenlenmiştir. Kübik bor nitrür ise bilinen en sert malzemelerden biridir ve elmaştan sonra ikinci sıradadır (Y. G. Gogotsi, 1999).

2.4.2.4. Borürler

Borürler, bor ve diğer elementler, tipik olarak metaller tarafından oluşturulan bileşiklerdir. Bu bileşikler olağanüstü sertlikleri, yüksek erime noktaları ve önemli kimyasal kararlılıkları ile tanınmaktadır. Borürler, yüksek sıcaklıklı ortamlar ve aşındırıcı ortamlar da dahil olmak üzere aşırı koşullara dayanabilen malzemeler gerektiren endüstrilerde kapsamlı uygulamalar bulmaktadırlar (Y. G. Gogotsi, 1999).

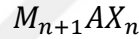
- **Titanyum Diborür (TiB_2):** Aşırı sertliği, yüksek erime noktası ve aşınma ve korozyona karşı mükemmel direnci ile karakterize edilen seramik bir malzemedir. TiB_2 genellikle kesici takımlarda ve endüstriyel makineler için koruyucu kaplamalarda kullanılmaktadırlar.
- **Zirkonyum Diborür (ZrB_2):** Olağanüstü termal ve kimyasal stabilite sergileyen bir başka yüksek derecede refrakter seramik borürdür. ZrB_2 yüksek erime noktalarına (yaklaşık $3245^{\circ}C$), düşük yoğunluğa ve iyi termal iletkenliğe sahiptir. Bu da onu özellikle yüksek hızlı uçuş bileşenleri, hipersonik araçlar

ve termal koruma sistemleri gibi havacılık ve uzay uygulamalarında kullanışlı hale getirir. ZrB₂'nin yüksek sıcaklıklarda oksidasyona dayanma kabiliyeti, aşırı ısı ve reaktif maddelerin bulunduğu ortamlarda cazibesini artırmaktadır.

- **Demir Borür (FeB):** Sertliği ve yüzey koruma uygulamalarında kullanımı ile bilinen metalik bir borürdür. TiB₂ ve ZrB₂'nin aksine, FeB daha düşük bir erime noktasına sahiptir ancak mükemmel aşınma direnci sağlamaktadır. Sertliklerini ve korozyona karşı dirençlerini artırmak için genellikle çelik ve demir bileşenlere kaplama olarak uygulanmaktadır. Genellikle borlama olarak adlandırılan bu işlem, çeliğin yüzeyinde bir borür tabakası oluşturarak malzemenin aşındırıcı ortamlardaki dayanıklılığını ve ömrünü önemli ölçüde arttırmaktadır (Y. G. Gogotsi, 1999).

2.4.2.5. MAX fazı

MAX faz tozları, seramikler ve metaller arasındaki bağı oluşturan ve onları çok çeşitli uygulamalar için birlikte kullanımını uygun kılan bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, genel formüle sahip üçlü karbürler ve nitrürlerdir (Michel W. Barsoum, 2013):



M: Geçiş metali.

A: A-grubu elementi. (Genellikle 3A ve 4A)

X: Karbon veya azot.

n: 1,2,3. (Sırasıyla 211, 312 ve 413 fazlarına karşılık gelmektedir.)

Şekil 2.13, termal ve mekanik özelliklerine katkıda bulunan katmanların periyodik sınıflandırmasını, MAX fazlarının yapısı temelde katmanlı bir yapıya sahiptir. Her bir birim hücre, A grubu katmanlarıyla iç içe geçmiş yakın paketlenmiş M atomları katmanları içermektedir. X atomları bu M katmanları arasında yer almakta ve oktahedral bölgeleri doldurmaktadır. Bu katmanların düzeni MAX fazlarının özelliklerini, özellikle de mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Michel W. Barsoum, 2013).

Periodic table showing the positions of transition metals (red), A-group elements (blue), and carbon/nitrogen (black). The table is labeled with group numbers (IA, IIA, IIIA, IVA, VA, VIA, VII, VIIIA) and element symbols.

Şekil 2.12. MAX fazlarındaki geçiş metalleri, A grubu elementleri ve karbon/azot bileşenlerinin periyodik tablo gösterimi (Barsoum ve El-Raghy, 2001).

En yaygın MAX fazları, A katmanlarını ayıran M katmanlarının sayısına göre farklılık gösteren 211, 312 ve 413 gruplarıdır. M2AX (211) fazında, A katmanları arasında iki M katmanı vardır, M3AX2'de (312) üç ve M4AX3'te (413), A katmanlarını ayıran dört M atomu katmanı bulunmaktadır. Şekil 2.14 ise MAX fazlarının 211, 312 ve 413 grupları örneklerini göstermektedir (Michel W. Barsoum, 2013).

211	Ti ₂ AlC*	Ti ₂ AlN*	Hf ₂ PbC*	Cr ₂ GaC	V ₂ AsC	Ti ₂ InN
	Nb ₂ AlC*	(Nb,Ti) ₂ AlC*	Ti ₂ AlN _{0.5} C _{0.5} *	Nb ₂ GaC	Nb ₂ AsC	Zr ₂ InN
	Ti ₂ GeC*	Cr ₂ AlC	Zr ₂ SC	Mo ₂ GaC	Ti ₂ CdC	Hf ₂ InN
	Zr ₂ SnC*	Ta ₂ AlC	Ti ₂ SC	Ta ₂ GaC*	Sc ₂ InC	Hf ₂ SnN
	Hf ₂ SnC*	V ₂ AlC	Nb ₂ SC	Ti ₂ GaN	Ti ₂ InC	Ti ₂ TiC
	Ti ₂ SnC*	V ₂ PC	Hf ₂ SC	Cr ₂ GaN	Zr ₂ InC	Zr ₂ TiC
	Nb ₂ SnC*	Nb ₂ PC	Ti ₂ GaC	V ₂ GaN	Nb ₂ InC	Hf ₂ TiC
	Zr ₂ PbC*	Ti ₂ PbC*	V ₂ GaC	V ₂ GeC	Hf ₂ InC	Zr ₂ TiN

312	Ti ₃ AlC ₂ *	Ti ₃ GeC ₂ *
	Ti ₃ SiC ₂ *	

413	Ti ₄ AlN ₃ *
------------	------------------------------------

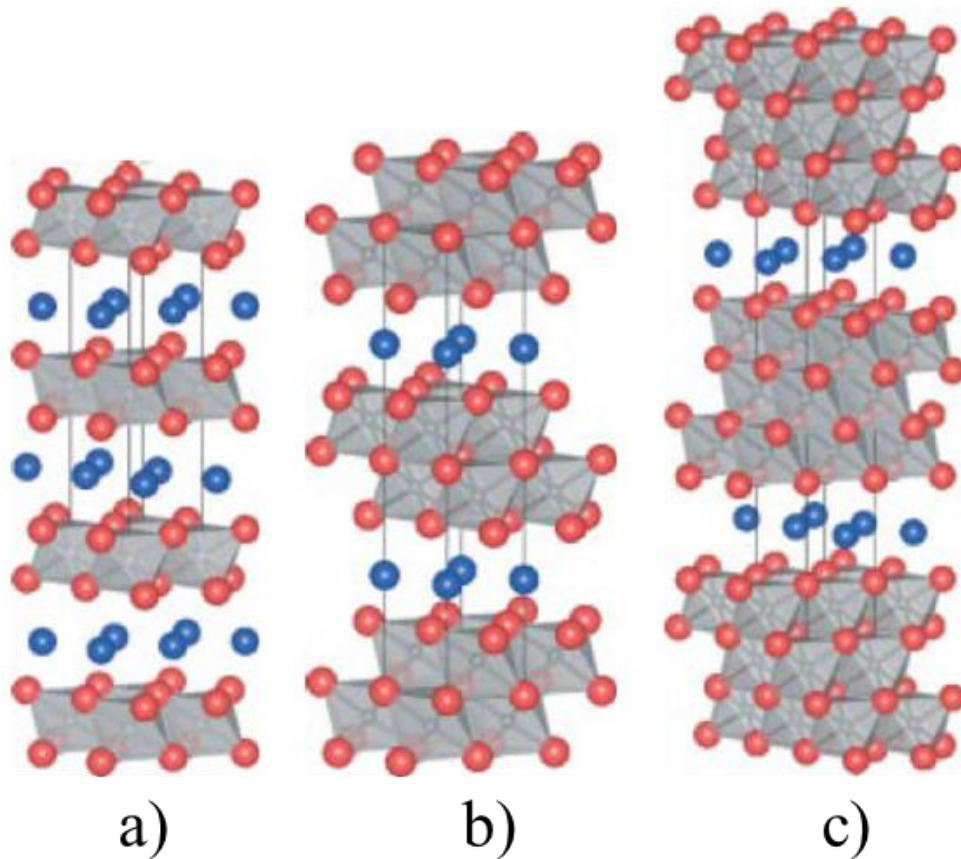
Şekil 2.13. MAX fazlarının 211, 312 ve 413 grupları örnek bileşikleri (Barsoum ve El-Raghy, 2001).

Mekanik olarak MAX fazları hasar toleransı, termal şok direnci ve yüksek sertlik göstermektedirler. Şekil 2.15'te gösterilen MAX fazlarının katmanlı kompozisyonlarını ortaya koymaktadır. Bu yapısal özellik, bu malzemelerin metalik ve seramik özelliklerinin bir kombinasyonunu nasıl elde ettiğini anlamak için çok önemlidir. Temel özelliklerinden biri, bükülme ve kesme bandı oluşumunun yanı sıra tanelerin ayrılmasını da içeren deformasyon mekanizmalarıdır. Tipik olarak gevrek kırılma ile başarısız olan geleneksel seramiklere kıyasla benzersizdirler. MAX fazlarındaki dislokasyonlar bazal düzlemlerle sınırlıdır. Deformasyon ağırlıklı

olarak bu dislokasyonların hareketi yoluyla gerçekleşmektedir (M W Barsoum - MAX phas...).

MAX fazlarının diğer önemli özellikleri ise iyi termal iletkenlik ve oksidasyon direncine sahip olmalarıdır. Bu özellikler, genellikle 1300°C'yi aşan yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğü korumalarını sağlamaktadır. Ayrıca oksidasyona karşı dirençleri özellikle dikkat çekicidir. Havacılık ve otomotiv uygulamaları gibi yüksek sıcaklıklı ortamlar için uygun hale getirmektedir (Michel W. Barsoum, 2013).

MAX faz tozlarının lazer kaplamaya entegrasyonu, kaplamaların mekanik ve termal özelliklerini geliştirme potansiyeli sağlamaktadır. MAX faz tozları ile lazer kaplama sırasında mikroyapısal evrim, hızlı katılaşma oranlarından ve sürecin doğasında bulunan termal gradyanlardan etkilenmektedir. Hossein-Zadeh ve ark. (2019) göre, MAX faz tozlarının dahil edilmesi, minimum gözenekliliğe sahip ince, homojen mikro yapıların oluşmasına yol açmaktadır. Hızlı soğutma oranları, kaplamaların gelişmiş mekanik özellikleri için çok önemli olan metastabil fazların ve ince taneli yapıların korunmasını teşvik etmektedir.



Şekil 2.14. a) 211, b) 312 ve c) 413 fazlarının atomik yapıları (Michel W. Barsoum, 2013)

Lazer kaplama sırasında elde edilen yüksek sıcaklıklar, MAX fazlarının kendilerini oluşturan elementlere veya diğer kararlı fazlara ayrışmasına neden olabilmektedir. MAX fazlarının bu koşullar altındaki kararlılığının, kaplamaların istenen özelliklerinin korunmasında önemli bir faktördür. Karbürler veya nitrürler gibi ikincil fazların oluşumu, kaplamaların sertliğini ve aşınma direncini daha da artırabilmektedir (Hosseini-Zadeh vd., 2019).

MAX faz tozları ile lazerle kaplanmış kaplamaların mekanik özellikleri, geleneksel kaplamalara kıyasla önemli ölçüde iyileştirmektedir. İnce mikro yapılar ve sert MAX faz partiküllerinin varlığı nedeniyle bu kaplamaların sertlik ve aşınma direncinin arttırmaktadır. Kaplamalar, kaplama işlemi sırasında elde edilen metalürjik bağlanmaya atfedilen alt tabakaya mükemmel yapışma sergilemektedir (Telasang vd., 2015). Ayrıca MAX faz tozlarının dahil edilmesi, kaplamaların tokluğunu ve kırılma direncini de artırabilir. MAX fazlarının katmanlı yapısının, enerjiyi emme ve dağıtma kabiliyetlerine nasıl katkıda bulunmakta ve çatlak yayılma olasılığını azaltmaktadır. MAX fazıyla güçlendirilmiş kaplamaları özellikle yüksek darbe veya döngüsel yükleme içeren uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Hosseini-Zadeh vd., 2019).

Literatürde, üzerine en fazla çalışma bulunan MAX tozları: Ti_3SiC_2 , Ti_2AlC ve Ti_3AlC_2 . MAX fazları, seramik benzeri yüksek sıcaklık kararlılığı ile metal benzeri süneklik ve işlenebilirliğin bir karışımını sağlayan katmanlı yapıları nedeniyle özellikle kaplama alanında ilgi görmektedir.

- **Titanyum Alüminyum Karbür (Ti_2AlC):** termal kararlılık ve oksidasyon direnci sergileyerek yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun bir adaydır. Ti_2AlC 'nin termal kararlılığı, yüksek sıcaklıklarda daha fazla oksidasyonu önleyen koruyucu bir Al_2O_3 tabakası oluşturma kabiliyetine sayesindedir (Ali vd., 2023). Buna ek olarak, kaplama işlemi sırasında termal gerilmeleri en aza indirmek için kritik olan malzemenin yüksek termal iletkenliğini ve düşük termal genleşme katsayısına sahip olmasından dolayıdır. Yüksek kırılma tokluğu ve hasar toleransı gibi mekanik özellikleri de kaplama katmanının aşınma direncini arttırmak için artı bir yönüdür (Radovic ve Barsoum, 2013).
- **Titanyum Silisyum Karbür (Ti_2SiC):** malzemenin işlenebilirliğine ve termal şok direncine katkıda bulunur. Termal döngü sırasında oluşan mikro çatlakları onarabilen Ti_2SiC 'nin kendi kendini iyileştirme yeteneklerini tartışmaktadır4.

Bu özellik, termal gradyanların çatlamaya neden olabileceği lazer kaplamada özellikle avantajlıdır.

- ***Titanyum Alüminyum Karbür (Ti_3AlC_2)***: üstün mekanik ve termal özellikleri nedeniyle lazer kaplamadaki uygulaması için yaygın olarak araştırılmıştır. Ti_3AlC_2 'nin yapısal uygulamalar için faydalı olan yüksek sertlik ve düşük yoğunluğun iyi bir kombinasyonunu sergilediğini göstermektedir. Ayrıca malzemenin yüksek termal iletkenliği ve düşük termal genleşme katsayısı, kaplama işlemi sırasında termal gerilmeleri azaltmak için çok önemlidir (Radovic ve Barsoum, 2013).

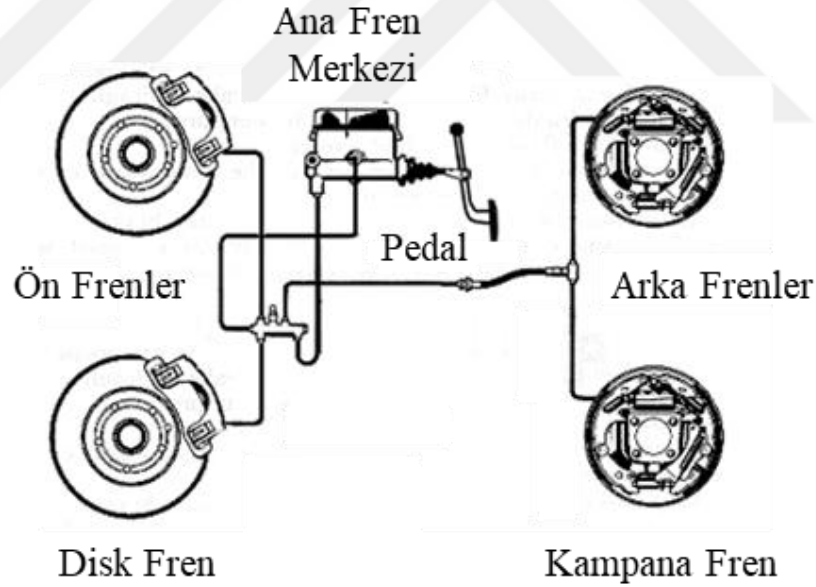




3. FREN SİSTEMLERİ VE TRİBOLOJİK MEKANİZMALARI

3.1. Fren Sistemi Yapısı

Fren sistemi, araç güvenliği açısından kritik bir bileşendir. Kinetik enerjiyi, sürtünme sayesinde ısıya dönüştürerek aracı yavaşlatmak ve durdurmakla görevli bir sistemdir. Modern frenleme sistemleri, Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemleri (ABS), Elektronik Denge Programları (ESP) ve telli fren gibi teknolojik ilerlemeler sayesinde önemli ölçüde gelişmiştir. Fakat temel prensip olarak aynı kalmıştır: tekerleklerde sürtünme oluşturmak için basınç uygulanması ile aracın yavaşlatılması. Hava veya hidrolik sıvı yardımı ile, Şekil 3.1’de gösterildiği şekilde, fren pedalından gelen kuvvet, fren hortumları sayesinde kaliperlere veya kampanaya ileterek etkili frenleme için sürücünün girdisini sağlamakta ve frenleme işlemini başlatmaktadır (Bhat, 2023).



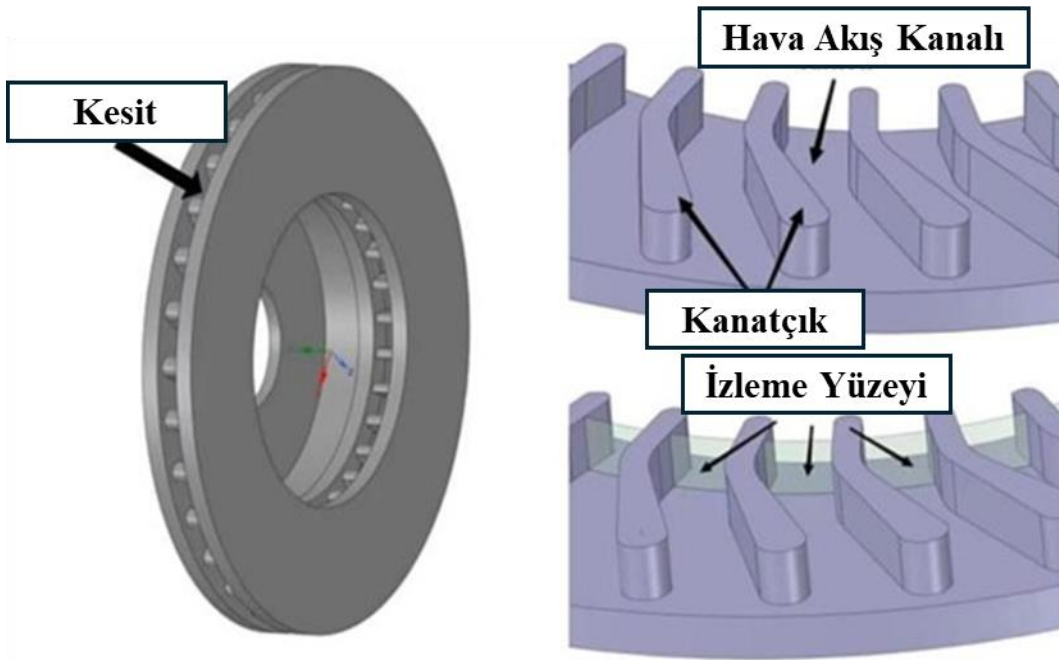
Şekil 3.1. Fren sistemi şematik gösterimi (Bhat, 2023).

Her biri farklı mekanizmalara ve uygulamalara sahip çeşitli fren sistemleri bulunmaktadır. En yaygın türleri disk ve kampanalı frenlerdir:

Disk frenler, tekerleğe bağlı bir rotor ve fren balatalarını barındıran bir kaliperden oluşan bir yapıya sahiptir. Fren pedalına basıldığında, hidrolik sıvı fren balatalarını rotora doğru iterek sürtünme yaratmakta ve tekerleği yavaşlatmaktadır. Bu fren türü,

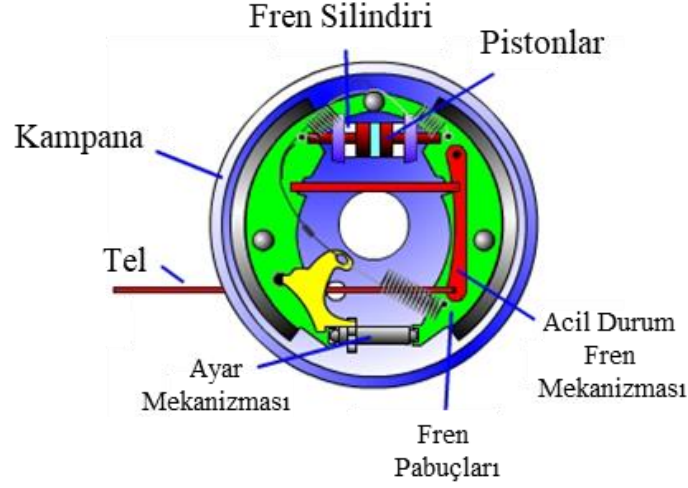
verimliliği ve ısı yayma kabiliyetleriyle bilinmektedir. Modern karayolları araçlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Hua vd., 2023).

Şekil 3.2'deki örnekte gösterildiği üzere, havalandırılmalı fren diskleri ısı dağılımını artırmak için farklı geometrilerde tasarlanmaktadır. Özellikle ani durumlarda, ağır frenleme sırasında fren boşalma riskini azaltmak için disk üzerinde oluşan ısıların güvenli bir şekilde dağıtılması kritik bir tasarım parametresidir. Kampana frenlere göre daha yüksek frenleme kuvvetlerinin üstesinden gelme kabiliyetleri ve sık bakım gerektirmemeleri, performans araçları ve ağır hizmet uygulamaları için ideal hale getirmektedir (Bhat, 2023).



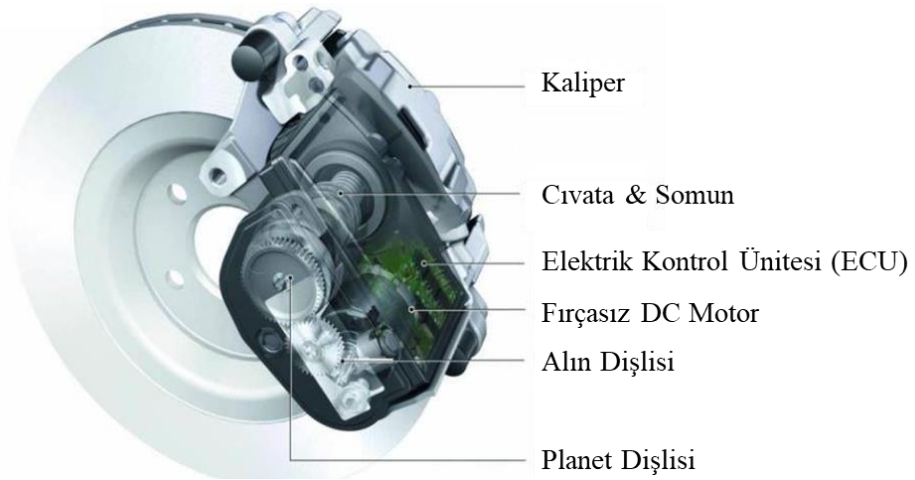
Şekil 3.2. Fren disk hava kanalları (Li ve Yang, 2023).

Frenleme teknolojisinin eski bir biçimi olan **kampanalı frenler**, Şekil 3.3'te gösterildiği üzere, dönen bir kampananın iç yüzeyine baskı yapan ve aracı yavaşlatmak için gerekli sürtünmeyi yaratan fren pabuçları prensibini benimsemiştir. İlk kampanalı frenler mekanik olarak çalıştırılmıştı. Fakat modern tasarımlarda hidrolik basınç tercih edilmektedir. Günümüzde hala bazı uygulamalarda, özellikle de bir aracı sabit tutmadaki etkinlikleri nedeniyle park frenlerinde ve ağır ticari araçlarda kullanılmaktadırlar. Kampanalı frenlerin önemli bir dezavantajı, kampanalar ısınıp genişlediğinde ortaya çıkan ve uzun süreli kullanım sırasında frenleme verimliliğini azaltan fren boşalmasıdır (Bhat, 2023). Ayrıca kampanalı frenler, pabuç aşınmasını önüne geçmek için düzenli ayarlamalar gerektirmektedir.



Şekil 3.3. Kampana şematik gösterimi (Bhat, 2023).

Elektro-Hidrolik Frenleme (EHB) ve Elektromekanik Frenleme (EMB) dahil olmak üzere kablo kumandalı fren düzeni (Brake-by-wire) gibi yeni teknolojiler yavaş yavaş geleneksel hidrolik sistemlerin yerini almaktadır. EHB sistemleri bazı hidrolik bileşenleri korumaktadır. Ancak elektronik olarak kontrol edilir ve daha hassas frenleme kuvveti dağılımına olanak sağlamaktadır. EMB sistemleri, frenleri harekete geçirmek için elektrik motorlarını kullanarak hidrolik bileşenleri tamamen ortadan kaldırması sayesinde, daha hızlı tepki süreleri, gelişmiş enerji verimliliği ve rejeneratif fren sistemleriyle daha fazla entegrasyon sağlamaktadır (Hua vd., 2023). Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, EMB sistemleri her tekerlekte, bağımsız olarak frenleme kuvveti dağılımını yöneten merkezi bir işlemci tarafından kontrol edilen aktüatörlerden oluşmaktadır.



Şekil 3.4. Elektromekanik frenleme komponentleri (Faisal vd., 2022).

3.1.1. Disk

Rotor olarak da adlandırılan fren diskleri, otomotiv fren sistemlerinin temel bileşenlerindendir. Diskler, aracı yavaşlatmak veya durdurmak için fren balatalarının sürtünme uyguladığı birincil yüzey olarak hizmet etmektedirler. Tasarımları, malzeme bileşimleri ve çalışma prensipleri, çeşitli sürüş koşullarında araç güvenliğini ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Fren disklerinin temel çalışma prensibi, kinetik enerjinin sürtünme yoluyla termal enerjiye dönüştürülmesidir. Fren pedalına basıldığı anda, basınç fren balatalarını dönen diske karşı itirmekte, tekerleğin dönüşünü ve dolayısıyla aracın hareketini yavaşlatan sürtünme oluşturmaktadır. Fren sisteminin verimliliği büyük ölçüde frenleme işlemleri sırasında oluşan ısıнын etkili bir şekilde dağıtılmasına bağlıdır. Doğru ısı dağılımı frenin zayıflamasını önlemekte ve tutarlı frenleme performansını korumaktadır (Reif, 2014).

Fren diskleri tasarımlarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Şekil 3.5'te her bir çeşit için örnekler gösterilmiştir. Her bir tip ısı dağılımı, ağırlık ve performans açısından farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır:

1. **Yekpare Disk:** Yekpare katı bir metal parçasından oluşan en basit fren disk biçimidir. Genellikle düşük performanslı araçlarda veya frenleme taleplerinin daha düşük olduğu arka akslarda kullanılmaktadır. Katı diskler uygun maliyetli ve dayanıklıdır ancak ısı yayma yetenekleri sınırlanmaktadır (Reif, 2014).
2. **Delikli Disk:** Bu diskler, ısı dağılımını daha da iyileştirmek ve temas alanındaki kalıntıları gidermek için yüzeylerinde delikler içermektedir delikli diskler, gazların ve ısıнын hızla dışarı çıkmasını sağlayarak, frenleme durumunda diskin ısı dağılımı hızlı bir şekilde gerçekleştirmektedir. Ayrıca delinmiş malzeme sayesinde disklerin ağırlığını biraz azaltırlar, bu nedenle en yaygın olarak iki tekerlekli araçlarda tercih edilmektedir (Maske vd., 2020).
3. **Oluklu Disk:** Delikliye benzer şekilde, rotorun yüzeyinde oluklu yapılar bulunmaktadır. Termal çatlamaya karşı yüksek dirence sahiptirler ve tüm sıcaklıklarda dengeli frenleme hissi, düşük disk aşınması sağlamaktadır (Maske vd., 2020).



Şekil 3.5. Fren disk çeşitleri soldan sağa, oluklu, delikli ve yekpare (Maske vd., 2020)

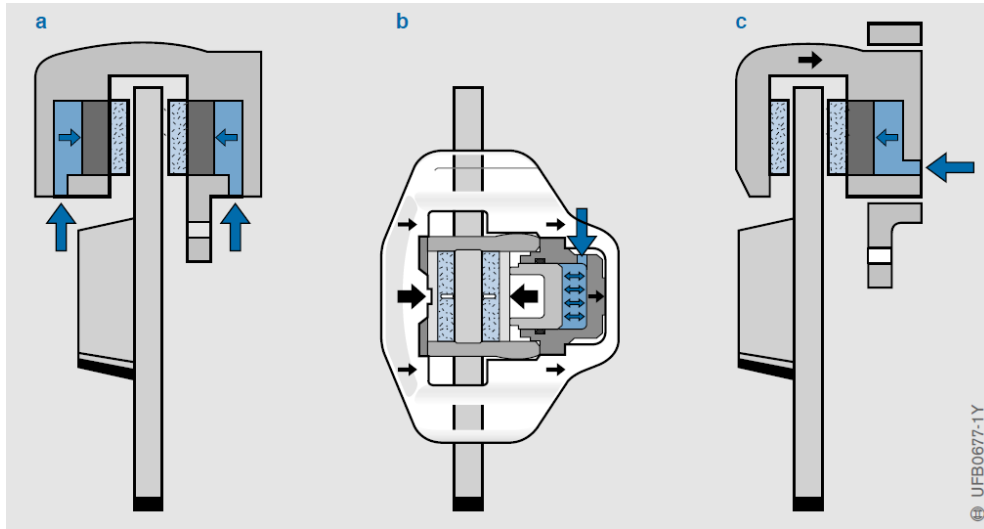
Fren sistemindeki sürtünme elemanları, çok düşükten çok yüksek sıcaklıklara kadar değişen çalışma sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmaktadırlar. Bu nedenle disk ve kampananın, mekanik ve ısıl zorlanmalara karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Fren sistemlerinde, sürtünmeden dolayı kısa sürede oluşan ısı artışının hızlı bir şekilde sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısına ve özgül ısı kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bu sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın minimum deformasyon ile bozulmadan kalabilmesi için ısıl genleşme katsayısının düşük olması istenmektedir. Frenleme sırasında kısa sürede oluşan yüksek ısı miktarı, disk veya kampana tarafından emilip dışarıya aktarılacağından, disk malzemesinin yüksek ısı iletim yeteneğine sahip olması gereklidir (Fenton, 1996). Bu nedenle fren diskü üretiminde kullanılan en yaygın malzeme, mükemmel termal iletkenliği, aşınma direnci ve maliyet etkinliği nedeniyle gri dökme demirdir. Bu malzemenin yanı sıra, teknolojik ilerlemeler sayesinde karbon seramik kompozitler ve döküm alüminyum gibi yenilikçi malzemeler de kısıtlı olsa dahi kullanımına başlanmıştır.

3.1.2. Kaliper

Fren kaliperleri diskli fren sistemlerinin temel bileşenleridir ve bir aracı yavaşlatmak veya durdurmak için fren balatalarını fren rotorlarına bastırmaktan sorumludur. Basıncı mekanik kuvvete dönüştürerek frenleme için gerekli sürtünmeyi oluşturmaktadırlar. Şekil 3.6'da gösterildiği üzere bağlantılarına göre 3 çeşidi bulunmaktadır.

1. **Sabit Kaliper:** Araca sert bir şekilde monte edilmektedir ve diskin her iki tarafında pistonlar bulunmaktadır. Güçlü, eşit frenleme kuvveti sağlamakta ve genellikle yüksek performanslı araçlarda kullanılmaktadır.

2. **Yüzer Kaliper:** Diskin bir tarafında tek veya çift pistona sahiptir ve her iki balataya da basınç uygulamak için kayar bir yapıya sahiptir. Daha basit, uygun maliyetli tasarımları nedeniyle otomobillerde daha yaygındırlar. Tek piston iç fren balatasını fren diskine doğru zorlarken silindir gövdesi aynı anda ters yönde zorlanmaktadır, böylece kayan kaliperi hareket ettirmekte ve dolaylı olarak dış fren balatasını diske doğru bastırmaktadır.
3. **Kayar Kaliper:** Yüzer kaliperlerin bir çeşididir. Tekli kayar kaliperin içindeki piston iç fren balatasını doğrudan fren diskine bastırmaktadır. Kayar mekanizma daha az piston kullanılmasına olanak sağlarken etkili frenleme sağlamaktadır (Reif, 2014).



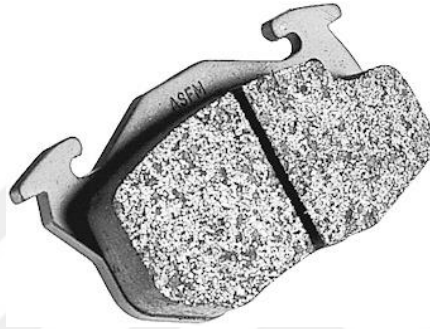
Şekil 3.6. Kaliper çeşitleri. a) sabit, b) yüzer ve c) kayar kaliper (Reif, 2014).

3.1.3. Balata

Fren balataları, özellikle diskli fren tertibatlarında olmak üzere araçlardaki fren sisteminin kritik bir bileşenidir. Aracı yavaşlatmak veya durdurmak için gereken sürtünmeyi oluşturmak üzere doğrudan fren rotoruna temas eden elemanlardır. Fren balataları, aracın kinetik enerjisini sürtünme yoluyla termal enerjiye dönüştüren parçalar olduklarından araç güvenliği ve performansı için çok önemlidir.

Balata malzemesi, fren rotoru ile temas eden birincil malzemedir. Yüksek sıcaklıklara dayanacak ve çeşitli koşullar altında tutarlı sürtünme sağlayacak şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Sürtünme malzemesi aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli bileşiklerden yapılabilmektedir:

- **Organik (Asbestsiz Organik, NAO):** Kauçuk, cam veya Kevlar gibi doğal malzemelerden imal edilmektedir. Bu balatalar genellikle daha sessizdir. Ancak daha hızlı aşınabilir.
- **Yarı-Metalik:** Organik malzemelerle karıştırılmış metal lifler içermektedir. Bu balatalar daha iyi ısı dağılımı sağlamakta ve daha dayanıklıdır. Ancak rotorlar için daha gürültülü ve daha aşındırıcı olabilmektedir. (Limpert, 2011).
- **Seramik:** Seramik liflerden ve demir içermeyen malzemelerden yapılmıştır. Bu balatalar daha sessizdir, daha az toz üretmektedir ve daha uzun ömürlüdür, ancak daha pahalı olma eğilimindedirler (Reif, 2014).

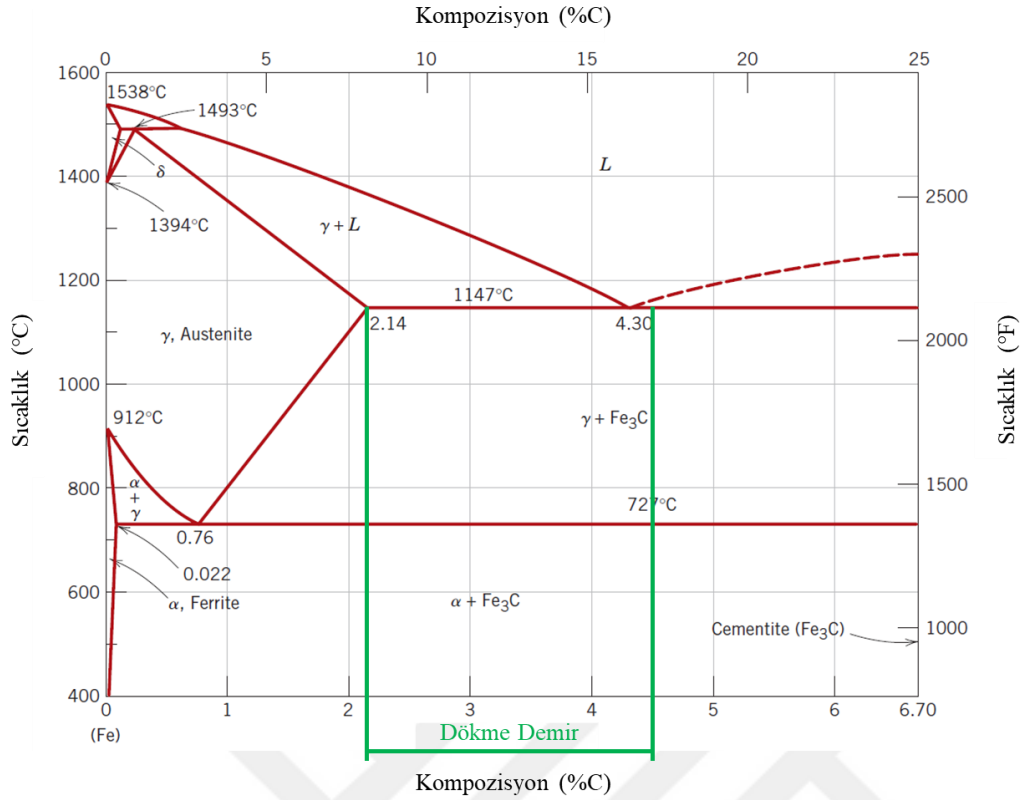


Şekil 3.7. Disk fren balatası (Reif, 2014).

3.2. Dökme Demirler: Fren Disklerindeki Uygulamaları

Dökme demirler, tipik olarak %2.14 ile %4.5 (Şekil 3.8) arasında karbon içeriği ile karakterize edilen bir grup demir alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, nispeten düşük erime sıcaklıkları, yaklaşık 1150-1300°C nedeniyle mükemmel dökülebilirlikleriyle bilinmektedirler (Callister ve Rethvisch, 2009). Bu özellikleri de onları döküm işlemleri sırasında oldukça akışkan hale getirmektedir. Dökme demirler, bileşimlerine ve soğuma hızlarına bağlı olarak çok çeşitli mikroyapılar sergileyebilmekte ve bu çeşitlilik mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Dökme demir, çeliğe benzer şekilde, geniş bir demir alaşımları kategorisini ifade etmektedir. Bu alaşımlar temel olarak demir ve karbondan oluşmakta ve ötektik bir reaksiyonla katılaşmaktadırlar. Dökme demirler karbonun yanı sıra çeşitli elementler: silikon, manganez, fosfor, titanyum ve kalay içermektedir. Alaşım elementleri de farklı oranlarda mevcut olabilmektedir. Dökme demirin özellikleri, element içeriğinin ayarlanması ve eritme, döküm ve ısıtma süreçlerinin değiştirilmesiyle önemli ölçüde değiştirilebilmektedir (ASM International, 1988).



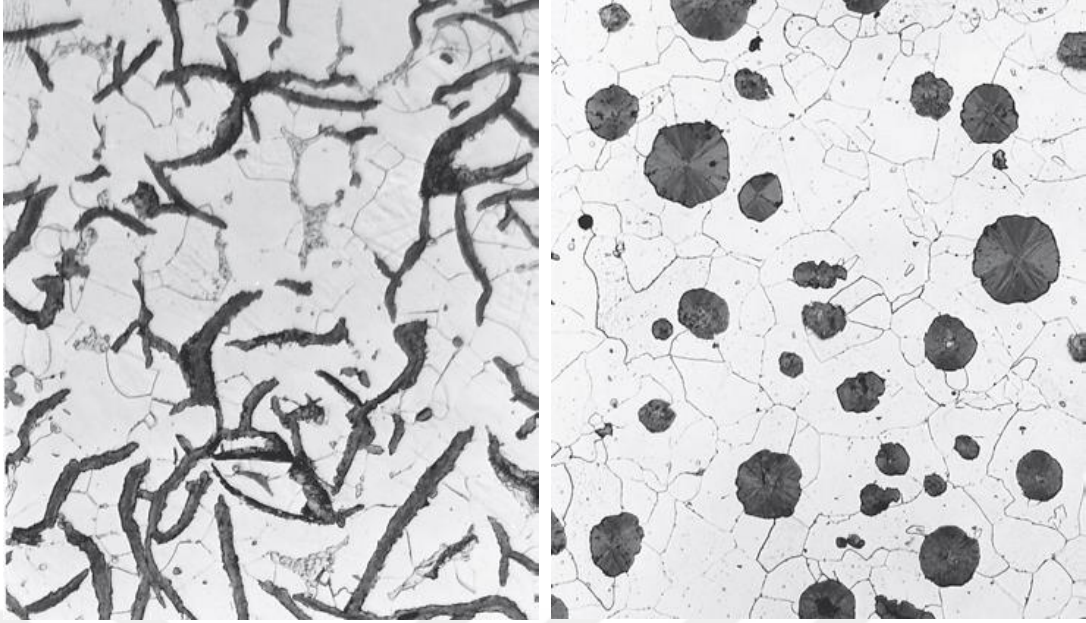
Şekil 3.8. Demir-Karbon denge diyagramı (Callister ve Rethvisch, 2009).

Dökme demirler beş ana tipte kategorize edilmektedir: gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir, temperlenmiş dökme demir ve kompakt grafitli dökme demir. Her kategori, mekanik özelliklerini ve çeşitli uygulamalar için uygunluğunu belirleyen farklı bir mikro yapıya sahiptir.

3.2.1. Gri dökme demir

Gri dökme demir veya diğer adı ile lamel grafitli dökme demir, mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan dökme demirlerden biridir. Gri dökme demirin belirleyici özelliği, malzemeye karakteristik gri görünümünü veren lamel grafit yapısıdır (ASM International, 1988).

Şekil 3.9.a’da gösterildiği gibi lamelli grafitler α -ferrit veya perlit matrisi içerisinde bulunmaktadır (Callister ve Rethvisch, 2009). Lamelli yapı, mükemmel titreşim sönümlenme ve iyi ısı iletkenliği sağlayarak gri demiri otomotiv fren diskleri gibi dinamik yüklere ve ısıya maruz kalan bileşenler için ideal hale getirmektedir.



Şekil 3.9. Çeşitli dökme demirlerin optik mikro görüntüleri: a) Gri dökme demir, b) Küresel grafitli dökme demir (Callister ve Rethvish, 2009).

Gri demirin kimyasal analizi üç ana bileşene ayrılabilir: ana elementler, minör elementler ve eser elementler. Her bir kategori, gri demirin özelliklerinin ve performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1. **Ana Elementler:** Gri demirin ana üç bileşenleri: karbon, demir ve silisyumdur. Gri demirdeki karbon içeriği tipik olarak %2.5 ila %4.0 arasında değişkenlik göstermektedir. 1.8 ile %2.5 (ASM International, 1988) arasında değişen silikon, katılaşma sırasında grafit oluşumunu destekleyerek mikro yapıyı ve mekanik özellikleri etkilediği için önemlidir. Buna ek olarak, alaşımın çoğunluğunu oluşturan ana metal demirin kendisidir.
2. **Minör Elementler:** Sülfür ve fosfor elementleri örnek olarak gösterilebilmektedir. Sülfür içeriği genellikle düşük tutunulmaktadır. (Yaklaşık %0.02 ila %0.15) çünkü demir sülfür oluşturabilir ve bu da kırılganlığa yol açabilmektedir. Tipik olarak %0.02 - %0.1'e varan miktarlarda bulunan fosfor akışkanlığı artırabilir ancak daha yüksek miktarlarda bulunması halinde demiri daha kırılgan hale getirebilmektedir (ASM International, 1988).
3. **Eser Elementler:** Sertlik, mukavemet veya aşınma direnci gibi belirli özellikleri geliştirmek için eklenen alüminyum, krom ve molibden gibi küçük miktarlardaki elementleri içermektedir. Tablo 3.1'de bazı elementler ve etkileri gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Gri dökme demirdeki eser elementlerin etkileri ve düzeyleri (ASM International, 1988).

Element	Eser seviyesi, %	Etkisi
Alüminyum	≤ 0.03	Azotu nötralize etmektedir.
Krom	≤ 0.2	İnce kesitlerde soğumayı sağlamaktadır.
Molibden	≤ 0.01	Perlit oluşunu desteklemektedir.

3.2.2. Küresel grafitli dökme demir

Sfero veya sünek dökme demir olarak da bilinen küresel grafitli dökme demir, karbonun küresel nodüller şeklinde bulunduğu grafit yapısıyla ayırt edilen bir dökme demir türüdür. Küresel grafit, ergitilmiş demire az miktarda magnezyum veya seryum eklenerek elde edilmekte, grafitin gri demirde görüldüğü gibi lamelli bir yapı yerine, Şekil 3.9.b’de gösterildiği üzere, küreler halinde oluşmasına neden olmaktadır (Callister ve Rethvisch, 2009). Sünek demir, gri demirden çok daha yüksek mukavemete ve önemli ölçüde süneklığe sahiptir; fakat gri dökme demirlere kıyasla döküm verimleri daha düşüktür. Bu özelliklerinin yanı sıra diğer birçok özelliği ısıtılışla daha da geliştirilebilmektedir (ASM International, 1988).

Sfero demirler, alaşım bileşimi ve ısıtılış işlem süreçlerinden etkilenen matris yapısına göre farklı tiplerde sınıflandırılabilir. En yaygın türleri ferritik, perlitik ve martensitik sfero demirlerdir.

1. **Perlitik Sfero Dökme Demir:** Malzeme döküldüğünde perlitik bir yapıya sahiptir, ekstra herhangi bir işlem gerektirmemektedir (Callister ve Rethvisch, 2009). Perlitik yapı, daha yüksek mekanik performans gerektiren uygulamalar için idealdir.
2. **Ferritik Sfero Dökme Demir:** Yüksek süneklik ve iyi işlenebilirlik sağlayan, esas olarak ferritten oluşan bir matrise sahiptir. Yaklaşık 700°C sıcaklıkta birkaç saat ısıtılış işlemi tabii tutulması ile bu tane yapısı elde edilmektedir (Callister ve Rethvisch, 2009).
3. **Martensitik Sfero Dökme Demir:** Perlitik sfero dökümün ısıtılış işleminden geçirilmesiyle üretilen bu tür martensitik bir matrise sahiptir. Çok yüksek sertlik ve mukavemet sağlamakta, ancak sünekliliği azalmaktadır.

Sfero dökme demirde, %0.04 - 0.06 magnezyum ilavesi genellikle tercih edilmektedir. Ergimiş demir sıcaklıklarında oldukça reaktif olan magnezyum, oksijen ve sülfür ile kolayca birleşmektedir. Optimum magnezyum kullanımı ve metal temizliği için demirin sülfür içeriği ise %0.02'nin altında olması gerekmektedir (ASM International, 1988). Tablo 3.2'de ISO 9147 (1987), standardında sınıflandırılmış Grade 3.2 sfero dökme demiri kimyasal kompozisyonu örnek olarak gösterilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirler, çelik hurdası veya elektrikli fırınlarda özel pik demir kullanılarak elde edilebilmektedir. Alternatif olarak, düşük sülfür bazik bir kupolada eritilerek de elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, asit kupoladan elde edilen demir tipik olarak daha yüksek kükürt içeriğine sahiptir ve bir potada veya özel bir kapta sürekli olarak veya gruplar halinde kükürt giderme işlemi gerektirmektedir (ASM International, 1988).

Tablo 3.2. Grade 3.1 küresel grafitli dökme demir kimyasal kompozisyonu (ISO 9147, 1987)

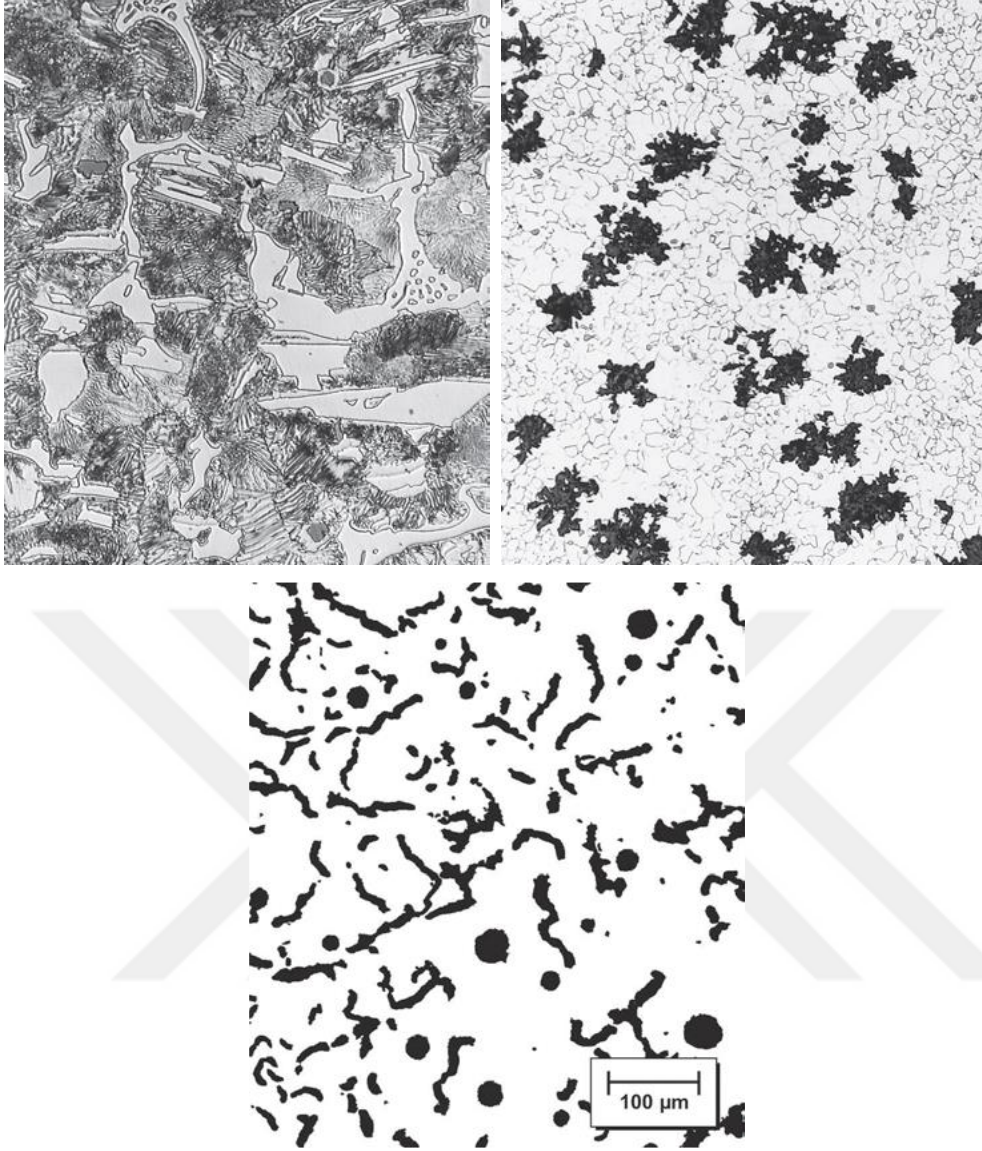
Sınıf	C	Si	Mn	P	S
3.1	3.5 - 4.6	< 3.0	< 0.1	< 0.08	0.03 max

3.2.3. Beyaz dökme demir

Beyaz dökme demir, sert ve kırılgan yapısıyla karakterize edilen ve aşınmaya karşı oldukça dirençli bir dökme demir türüdür. Beyaz dökme demirin en önemli tanımlayıcı özelliği Şekil 3.10.a'da gözüktüğü üzere grafit içermemesidir. Beyaz dökme demirdeki karbon, grafit pulları yerine demirle birleşerek sementit (Fe_3C) oluşturmaktadır. Sementitlik yapı, malzemeye sertlik kazandırırken aynı zamanda onu kırılgan hale getirmektedir. Beyaz dökme demir, grafit oluşumunu baskılayan katılaşma sırasında hızlı soğutma yoluyla üretilmektedir (ASM International, 1988).

Beyaz dökme demirleri kendi içlerinde, bileşimine ve çeşitli elementlerin özel rollerine göre genellikle iki ana türe ayrılmaktadırlar:

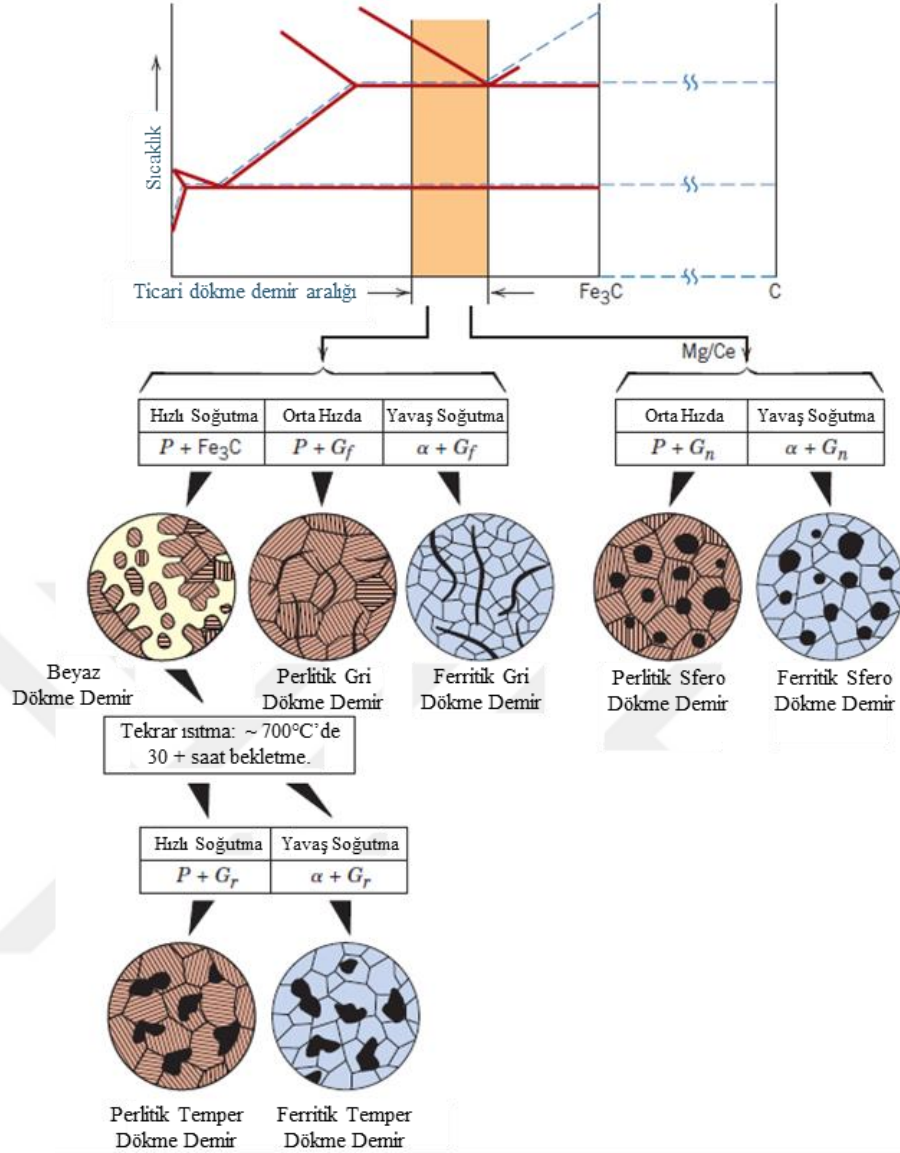
- **Alaşımsız Beyaz Dökme Demir:** Tipik olarak %2.5 ila %3.5 arasında değişen bir karbon içeriğine sahiptir ve minimum alaşım elementleri içermektedir. Soğutma hızına bağlı olarak öncelikle sementit ve perlit veya martensitten oluşur. Alaşımsız beyaz demir son derece sert ve aşınmaya dayanıklıdır, ancak kırılgan bir yapıya sahiptir (ASM International, 1988).



Şekil 3.10. Çeşitli dökme demirlerin optik mikro görüntüleri: a) Beyaz dökme demir, b) Temper dökme demir, c) Kompakt grafitli dökme demir. (Callister ve Rethvisch, 2009).

- **Yüksek Alaşımli Beyaz Dökme Demir:** Yüksek sertliği korurken, tokluğu ve korozyon direncini artırmak için krom, nikel ve molibden gibi alaşım elementleri içermektedirler. En yaygın alaşımli beyaz demir, %12-28 krom içeren *Yüksek Kromlu Beyaz Demirdir*. Krom, krom karbürlerinin oluşumunu teşvik ederek aşınma ve korozyon direncini artırmaktadır (ASM International, 1988).

Genellikle beyaz demir, bir diğer dökme demir olan temperlenmiş dökme demirin üretiminde aracı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.11. Dökme demirlerin demir-karbon faz diyagramından bileşim aralıkları. G_f , lamelli grafit; G_r çiçeksi grafit; G_n , grafit yumrusu; P, pearlite; α, ferrite. (Callister ve Rethvisch, 2009).

3.2.4. Temperlenmiş dökme demir

Dövülebilir veya temperlenmiş dökme demir, sünekliğini ve tokluğunu iyileştirmek için özel bir ısıtma işlem sürecinden geçen bir dökme demir türüdür. Başlangıçta, sementit (Fe_3C) varlığı nedeniyle sert ve kırılgan olan beyaz dökme demir olarak dökülmektedir (ASM International, 1988). Daha sonra, Şekil 3.11'de gösterildiği üzere uzun süreli, örneğin 700°C'de +30 saat bekletilerek (Callister ve Rethvisch, 2009), bir tavlama işlemiyle sementit, grafit kümeleri veya "tavlanmış karbon nodülleri(yumruları)" olarak da bilinen temper karbona ayrıştırılmaktadırlar. Bu dönüşüm, demirin mekanik

özelliklerini önemli ölçüde iyileştirerek onu geliştirilmiş mukavemet, süneklik ve tokluğa sahip bir malzemeye dönüştürmektedir (ASM International, 1988).

Dövülebilir demir, ısıtılma işleminden sonra, Şekil 3.11’de gösterildiği üzere, tane yapısına göre iki ana türe ayrılabilir:

1. **Ferritik Temperlenmiş Dökme Demir:** Matrisi ağırlıklı olarak ferritten oluşmaktadır. Ferritik dövülebilir demir, mükemmel süneklik ve darbe direnci sunar ve bu da onu kırılmadan şok yüklemesine ve deformasyona dayanması gereken bileşenler için ideal hale getirmektedir.
2. **Perlitik Temperlenmiş Dökme Demir:** Perlitik dövülebilir demir, ferrit ve sementitin dönüşümlü katmanlarından oluşan bir yapı olan perlit açısından zengin bir matrise sahiptir. Bu bileşim, ferritik dövülebilir demire kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti, sertlik ve aşınma direnci sağlamaktadır (ASM International, 1988).

3.2.5. Kompakt grafitli dökme demir

Kompakt Grafitli Demir (CGI), Şekil 3.10.b’de gösterildiği üzere, gri demirde bulunan lamelli grafit ile sfero demirin küresel grafiti arasında bir grafit yapısına sahip bir dökme demir türüdür. CGI'daki grafit, benzersiz bir mekanik özellik kombinasyonu sağlayan solucansı parçacıklar halinde oluşmaktadır. Bu yapı, sünek demirden daha iyi sönümlenme kapasitesini korurken gri demire kıyasla gelişmiş mukavemet, tokluk ve termal iletkenlik sağlamaktadır.

CGI'nın özellikleri, grafit morfolojisi ve matris bileşiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. CGI'nın mikro yapısı, genellikle ferritik, perlitik veya her ikisinin bir kombinasyonu olabilen bir matrisle çevrili grafit parçacıkları içermektedir. Ferritik CGI daha iyi süneklik ve işlenebilirlik sunarken, Perlitik CGI daha yüksek mukavemet ve sertlik sağlamaktadır. Soğutma hızını kontrol ederek ve magnezyum gibi alaşım elementlerinin eklenmesiyle, istenen grafit yapısı ve matris elde edilebilmektedir.

CGI'nın temel avantajlarından biri, gri demire kıyasla üstün mekanik özellikleridir. CGI, %75 daha yüksek çekme dayanımı, %40 daha fazla sertlik ve gelişmiş yorulma direnci sergilemekte ve bu da onu zorlu uygulamalar için tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Isıl iletkenliği de sünek demirden daha yüksektir ve bu da verimli ısı dağılımı gerektiren uygulamalar için çok önemlidir (Callister ve Rethvish, 2009).

3.3. Frenlerde Sürtünme ve Aşınma Mekanizması

Sürtünme ve aşınma, triboloji alanındaki kritik olgulardır. Mekanik çalışma sistemlerin performansını ve ömrünü önemli ölçüde belirlemektedirler. İki yüzey birbirine doğru kaydığında harekete karşı direnç olan sürtünme, mekanik etkileşimlerin temel bir özelliğidir. Yüzey pürüzlülüğü, malzeme yapısı ve çevre koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörler bu iki olgu üzerine direkt etkisini göstermektedir (ASM International, 1992). Öte yandan aşınma, mekanik etkisi nedeniyle malzemenin bir yüzeyden kademeli olarak malzeme kaldırılmasına sebep olmaktadır ve uygun şekilde yönetilmezse bileşenlerin arızalarına hatta kritik hasar almasına yol açabilmektedir (Ludema, 1996).

Sürtünme ve aşınma çalışmaları, yapışkan, aşındırıcı ve korozyif aşınma gibi altındaki temel prensipleri ve mekanizmaları anlamayı ve bunların etkilerini azaltmak için stratejiler geliştirmeyi kapsamaktadır. Kaplamalar ve yağlayıcılar da dahil olmak üzere gelişmiş malzemeler ve yüzey mühendisliği teknikleri, sürtünme ve aşınmanın azaltılmasında önemli bir rol oynamakta ve böylece mekanik sistemlerin verimliliğini ve dayanıklılığını artırmaktadır (ASM International, 1992).

Sürtünme ve aşınma, aynı zamanda fren sistemlerinin performansında ve uzun ömürlülüğünde kritik faktörlerdir. Fren balatası ve disk arasındaki etkileşim, bir aracı yavaşlatmak için gerekli sürtünme kuvvetini üretmektedir. Ancak bu süreç aynı zamanda zaman içinde malzemenin aşınması ile bozulmasına da yol açmaktadır. Sürtünme ve aşınma mekanizmalarını anlamak, fren sistemi verimliliğini, güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için çok oldukça önemlidir.

Fren sistemleri hem fren balatalarının hem de disklerin aşınma oranlarını önemli ölçüde etkileyebilen yüksek sıcaklıklar ve basınçlar dahil olmak üzere aşırı koşullar altında çalışmaktadır. Aşınma süreci sadece frenleme performansını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda çevre ve sağlık üzerinde etkileri olan partikül madde emisyonuna da etkisi bulunmaktadır. Sürtünme özelliklerini optimize etmek ve aşınmayı en aza indirmek için gelişmiş kompozitlerin ve kaplamaların kullanımı da dahil olmak üzere çeşitli malzemeler ve tasarımlar geliştirilmektedir (Walia, 2019).

Sonuç olarak, fren sistemlerindeki sürtünme ve aşınmanın kapsamlı bir şekilde anlaşılması, daha verimli ve çevre dostu frenleme çözümlerinin geliştirilmesi için çok önemlidir.

3.3.1. Sürtünme

Tribolojinin temel bir olgusu olan sürtünme, temas halindeki iki yüzey arasındaki göreceli harekete direnen bir kuvvettir. Sürtünmenin incelenmesi, imalat, malzeme seçimi ve bileşen tasarımı dahil olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında çok önemlidir. Teknik bağlamda sürtünme, her biri olgunun farklı yönlerini açıklayan birkaç temel yasa ile karakterize edilmektedir.

Sürtünme, günlük aktivitelerimizin önemli bir kısmında ve çoğu endüstriyel süreçlerde önemli rol oynamaktadır. Bir cismin hareketini başlatmaya, yönünü değiştirmeye ve daha sonra durdurmayı sağlamaktadır. Sürtünme olmadan, kolayca hareket edemez, nesneleri kavrayamaz, kibrit çakamaz veya diğer birçok günlük işi gerçekleştiremeyiz. Sürtünme olmadan, çoğu dişli bağlantı tutunamaz, haddehaneler çalışamaz ve sürtünme kaynağı açıkça var olamazdı (ASM International, 1992).

3.3.1.1. Sürtünmenin temel yasaları

Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. Amontons, Eurler ve Coulomb tarafından belirlenen sürtünmenin temel yasaları, çoğu mühendislik uygulamasında sürtünmenin davranışını anlamak için kritik öneme sahiptir:

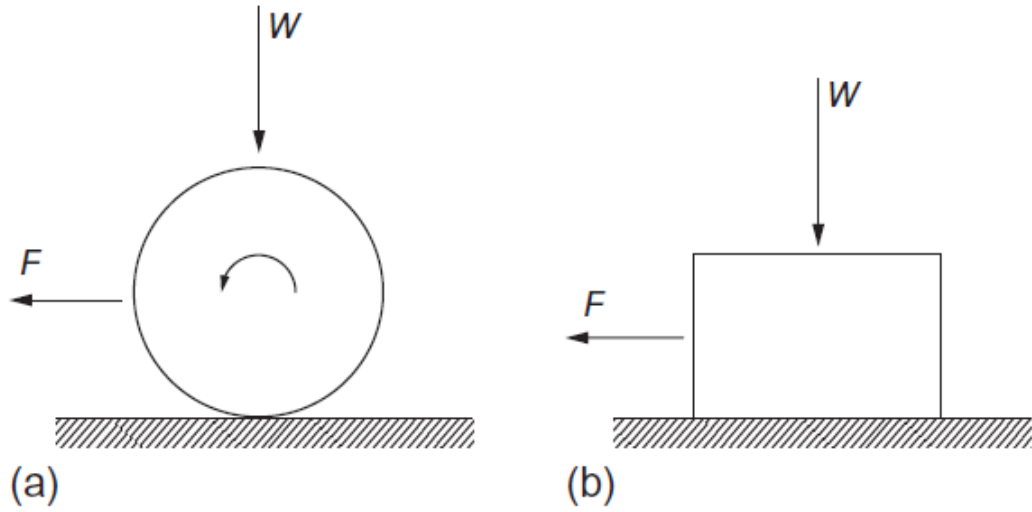
1. **Amontons'un Yasası:** Amontons sürtünmenin nedenini yüzey düzensizliklerinin çarpışması olarak açıklamıştır. Bu düzensizliklerin ölçeği makroskobiktir. Çünkü o dönemde mikroskobik düzensizlikler hakkında çok az şey biliniyordu (Ludema, 1996). Temel prensip olarak sürtünme kuvvetini, uygulanan normal yüke doğru orantılanmıştır. Matematiksel olarak bu şu şekilde ifade edilmektedir:

$$F = \mu W \quad (3.2)$$

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi hem ideal yuvarlanma hem de kaymada; F, sürtünme kuvveti. μ , sürtünme katsayısı. W: Temas halindeki yüzeylere dik olarak uygulanan normal yüküdür.

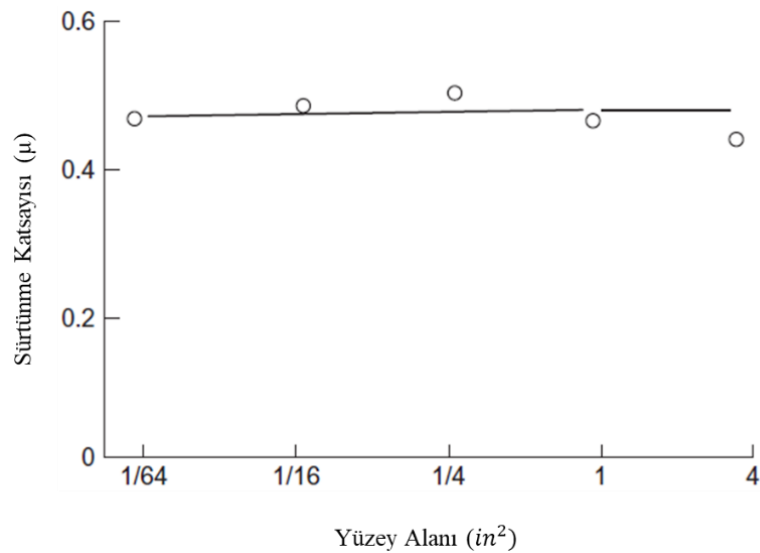
Amontons, aynı zamanda sürtünme kuvveti görünür temas alanından bağımsız olduğunu göstermiştir. İki nesne arasındaki temas yüzey alanı değişse bile, normal yük ve malzeme özellikleri değişmediği sürece sürtünme kuvvetinin sabit kalacağı anlamına gelmektedir (Ludema, 1996). Şekil 3.13, yağlanmamış bir çelik üzerindeki

ahşap ile yaptığı sürtünmenin sürtünme katsayısını göstermektedir. Normal yük sabit kalırken, görünür temas alanı yaklaşık 250 kat değişmiştir; μ değeri çok az değişmiştir.



Şekil 3.12. Sürtünmenin üstesinden gelmek ve hareket etmek için F , kuvvet. a) Yuvarlanma, b) Kayma (Hutchings ve Shipway, 2017).

2. **Coulomb Yasası:** Coulomb, 18. yüzyılda Amonton'un çalışmalarını temel alarak temel sürtünme yasalarını geliştirmiştir. sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu tespit etmiştir ve statik sürtünme katsayısını (μ_s) kaymaya başlama kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da (μ_k) hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir (Hutchings ve Shipway, 2017).



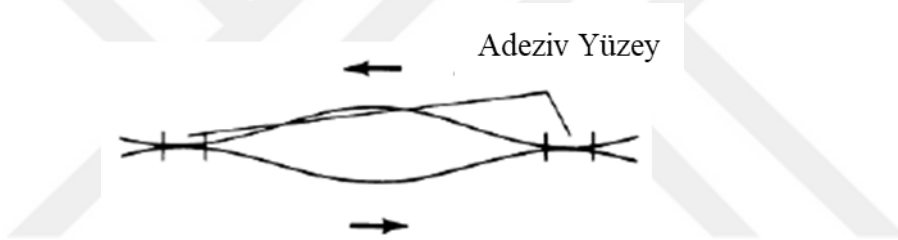
Şekil 3.13. Yağlanmamış çelik yüzey üzerindeki ahşap kaydırıcılar için sürtünme katsayısı μ 'nün görünür temas alanı ile değişimi (Hutchings ve Shipway, 2017).

3.3.1.2. Klasik sürtünme mekanizması

Bowden ve Tabor tarafından geliştirilen klasik kayma sürtünmesi modeli, iki katı yüzey arasında sürtünmenin nasıl ortaya çıktığına dair temel bir anlayış getirmektedir. Bu model sürtünme kuvvetini iki ana bileşene ayırmışlardır: *adezyon* ve *deformasyon*. Bu bileşenlerin her biri, özellikle metaller bağlamında, kayma sırasında toplam sürtünme kuvvetine katkıda bulunmaktadır.

- **Adezyon sürtünme kuvveti**

Sürtünme adezyon kuvveti, sürtünen iki yüzey arasındaki asperitelerde oluşan gerçek temas alanından kaynaklanmaktadır. Yüzeyler, parlatılmış olsalar bile, mikroskobik pürüzlülüğe sahiptirler. Şekil 3.14'te gösterilen, asperite adı verilen birkaç yüksek noktada temas etmektedirler. Bu asperite temaslarında, malzemeler çekici atomlar arası kuvvetler nedeniyle soğuk kaynağa benzer şekilde birbirine bağlanmaktadır. Bu bağlar yapışkan sürtünme oluşturmaktadır (Hutchings ve Shipway, 2017).



Şekil 3.14. Mikroskobik düzeyde sürtünme oluşturan adezyon mekanizması (ASM International, 1992).

İki yüzey birbirine karşı kaydığında, gerçek temas alanı görünen temas alanından çok daha küçüktür çünkü yüzey asperitelerinin sadece küçük bir kısmı temas halindedir. Gerçek temas alanı A gerçek normal yük W ile artar, çünkü daha yüksek yükler asperiteleri malzemeye daha derinden bastırarak temas noktalarının sayısını ve boyutunu artırır. Gerçek temas alanı şu şekilde gösterilmektedir:

$$A_{gerçek} \approx \frac{W}{H} \quad (3.2)$$

H , sürtünen iki malzemenin daha yumuşak olanının sertliğidir. Bu ilişki, gerçek temas alanının malzemenin sertliği ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Daha yumuşak malzemeler daha fazla deforme olarak daha büyük gerçek temas alanları yaratmaktadırlar.

Adezyon kuvveti F_{adz} , malzemenin kesme mukavemeti, s ve gerçek temas alanı ile orantılıdır:

$$F_{adz} = s \cdot A_{gerçek} \quad (3.3)$$

Kayma mukavemeti, temas noktalarındaki atomlar arası bağların üstesinden gelmek için gerekli olan kuvveti ve kaymayı başlatmak için ne kadar kuvvet gerektiğini belirlemektedir. Bir malzemenin sertliği akma dayanımının yaklaşık üç katı olduğundan ve akma dayanımı kesme dayanımı ile ilişkili olduğundan, adezyona bağlı sürtünme katsayısı şu şekilde tahmin edilebilmektedir:

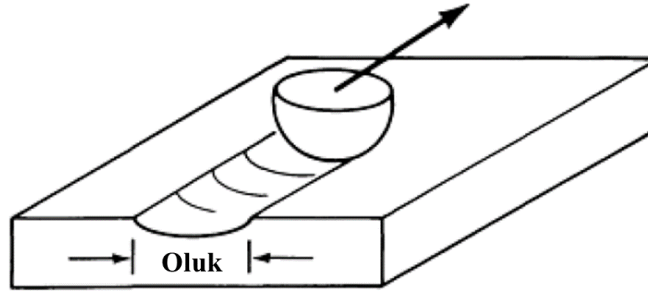
$$H \approx 3 Y \approx 5 s \quad (3.4)$$

$$\mu_{adz} \approx \frac{s}{H} \approx 0.2 \quad (3.5)$$

Adezyon sürtünme katsayısının yaklaşık olarak 0.2'lik bir değere sahip olması da normal yükün yaklaşık %20'sinin yapışma nedeniyle sürtünme kuvvetine dönüştüğünü göstermektedir.

- **Deformasyon sürtünme kuvveti**

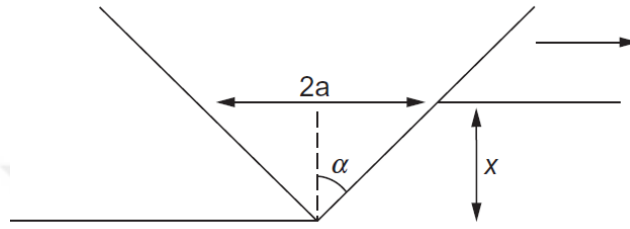
deformasyon kuvveti, asperitelerin daha yumuşak yüzey boyunca hareket ederken sürme eyleminden kaynaklanmaktadır. Bir yüzeydeki daha sert bir asperity daha yumuşak bir malzemeye karşılaştığında, plastik deformasyona neden olmakta, malzemeyi yer değiştirebilmekte ve Şekil 3.15'te gösterilen, bir oluk veya iz oluşturabilmektedir. Bu hareket, malzemeyi deforme etmek için gereken enerji nedeniyle toplam sürtünme kuvvetine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 3.15. Sürtünmede oluşturan deformasyon mekanizması (ASM International, 1992).

Daha sert yüzeydeki asperiteler yeterince keskinse veya konik yapıya sahiplerse, daha yumuşak malzemeyi kazıyacaklardır. Bu kazımaya karşı direnç sürtünme kuvvetine katkıda bulunmaktadır. Yarı açılı α , idealize edilmiş konik bir asperite için, sürme için gereken kuvvet, daha yumuşak malzemenin sertliği ve oluşan oluğun kesit alanı ile orantılıdır. r ise asperitiyenin temas yarıçapıdır:

$$F_{def} = H \cdot A_{def} = H \times (\pi r^2) \quad (3.6)$$



Şekil 3.16. Sürtünme deformasyonu konik modeli (Hutchings ve Shipway, 2017).

Konik bir asperite için, kesit alanı asperitenin daha yumuşak yüzeye nüfuz etme derinliği x , ile ilişkilidir. Deformasyon kuvveti şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_{def} = H \times \pi x^2 \cot \alpha \quad (3.7)$$

Sürtünmenin deformasyon kuvveti, malzemelerin çok farklı sertlik değerlerine sahip olduğu ve daha yumuşak malzemenin daha sert asperitelerin kayma teması altında önemli ölçüde plastik deformasyona uğradığı durumlarda önemli hale gelmektedir. Bu durum genellikle çelik gibi sert bir malzemenin bakır veya alüminyum gibi daha yumuşak bir malzemeye karşı kaydığı durumlarda gözlemlenmektedir (Hutchings ve Shipway, 2017).

- **Toplam sürtünme kuvveti**

Toplam sürtünme kuvveti F , kayma sırasında adezyon ve deformasyon bileşenlerinin toplamıdır:

$$F = F_{adz} + F_{def} \quad (3.8)$$

Normal yük normalize edildiğinde, toplam sürtünme katsayısı μ olarak ifade edilebilmektedir:

$$\mu = \frac{F_{adz} + F_{def}}{W} \quad (3.9)$$

Bu denklem, sürtünme katsayısının hem gerçek temas alanından hem de kayma sırasında meydana gelen plastik deformasyonun boyutundan etkilendiğini göstermektedir (Hutchings ve Shipway, 2017).

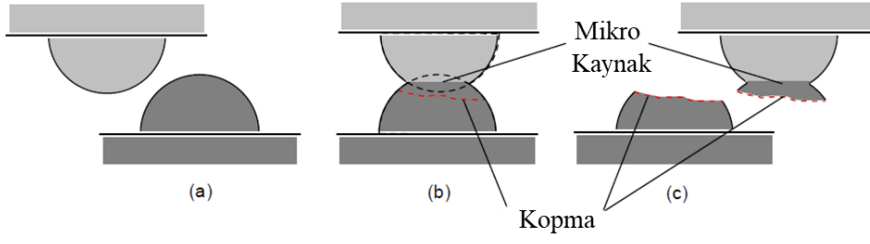
3.3.2. Aşınma

Aşınma, mühendislik sistemlerinde, özellikle de sürtünmeye bağlı olarak çalışan mekanik bileşenlerin uzun vadeli performansında ve güvenilirliğinde önemli rol oynamaktadır. Tribolojide malzeme bozulmasının önemli bir yönüdür. İki yüzey göreceli hareket yoluyla etkileşime girdiğinde, çeşitli mekanik ve çevresel faktörler nedeniyle malzemenin bir veya her iki yüzeyden kademeli olarak malzeme kaldırılması meydana gelmektedir. Aşınma mekanizmalarını ve bunları etkileyen faktörleri anlamak, dayanıklı bileşenler tasarlamak, bakım stratejilerini geliştirmek ve optimum işlevselliği sağlamak hayati önem taşımaktadır. ASM International Cilt 18'e göre (1992), aşınma sadece bir yüzey fenomeni olmayıp, yeterince kontrol edilmediği takdirde önemli ekonomik ve operasyonel etkilere yol açabilecek karmaşık etkileşimler içermektedir.

Aşınma, ilgili mekanik süreçlere dayalı olarak farklı türlere ayrılabilir ve bu kategorilerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, etkili aşınma yönetimi için gereklidir:

3.3.2.1. Adezyon aşınması

Adezyon aşınması, iki katı yüzey birbirine karşı kayarak temas noktalarındaki yapışma nedeniyle bir yüzeyden diğerine malzeme aktarımına neden olduğu bir aşınma türüdür. Bu tür aşınma, yağlamanın yetersiz olduğu veya hiç olmadığı koşullarda yaygındır ve metal-metal sürtünmesi sonucuyla oluşmaktadır. Kayma sırasında, Şekil 3.17'de gösterildiği üzere, yüzeylerdeki mikroskobik asperiteler temas etmekte ve yüksek yerel basınçlar meydana gelmesi nedeniyle malzemeler bu noktalarda soğuk kaynak benzeri şekilde birbirine bağlanmaktadır. Bağlı hareket meydana geldiğinde, bu bağlar kesilerek malzemenin bir yüzeyden kopmasına ve diğerine aktarılmasına yol açmaktadır (Ludema, 1996). Sonuçta önemli yüzey hasarına ve malzeme kaybına neden olabilmektedir.



Şekil 3.17. Adeziv aşınma mekanizması: a) temas öncesi; b) temas sırasında; c) temastan sonra (Terwey vd., 2020).

Adezyon aşınması tipik olarak aşınma partikülleri veya transfer filmlerinin oluşumu ile karakterize edilmektedir. Adezyon aşınmasının şiddeti, malzemelerin sertliği, temas basıncı ve kayma hızı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Yumuşak malzemeler genellikle yapışkan aşınmasına daha yatkındır, çünkü asperite bağlantı noktalarında daha güçlü bağlar oluşturma eğilimindedirler (Ludema, 1996).

Adezyon aşınması, Archard'ın aşınma denklemi en yaygın kullanılan modellerden biri olmak üzere çeşitli aşınma denklemleri kullanılarak ölçülebilmektedir. Archard denklemi, aşınma nedeniyle kaybedilen malzeme hacmini uygulanan yük, kayma hızı, malzemenin sertliği ve bir aşınma katsayısı ile ilişkilendirilmektedir (ASM International, 1992). Q , üretilen toplam aşınma artığı hacminin zamana bağlı değişimi; k , boyutsuz bir aşınma katsayısı; W , toplam normal yük; V , kayma hızı ve H , en yumuşak temas yüzeylerinin sertliğidir. Denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

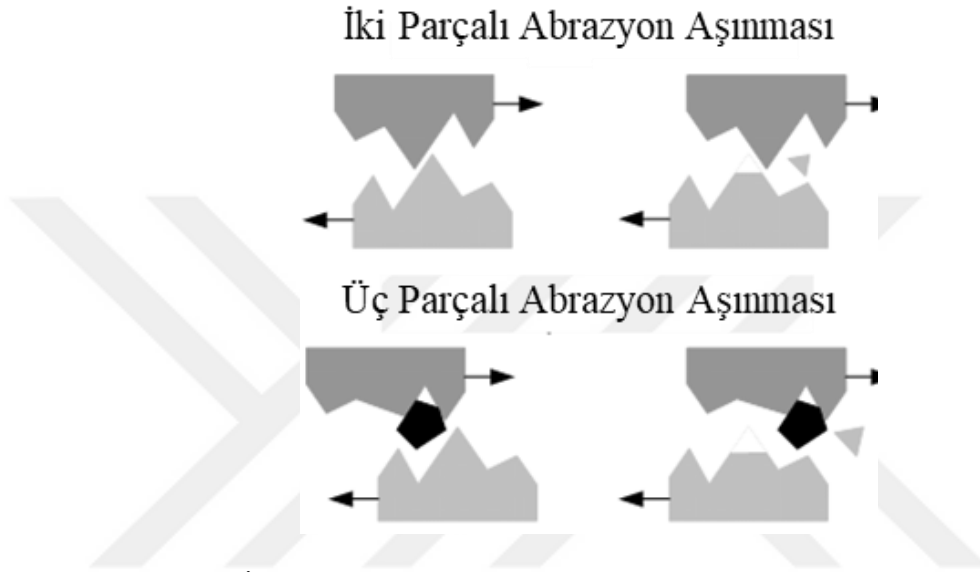
$$Q = k \frac{WV}{H} \quad (3.10)$$

Aşınma katsayısı k , malzemelerin uyumluluğu, yüzey pürüzlülüğü, yağlama ve çevresel koşullar gibi faktörlerden etkilenmektedir (ASM International, 1992). Daha yüksek bir katsayı, malzeme transferi ve aşınma için daha büyük bir eğilimi göstermektedir. Adezyon aşınması için, yetersiz yağlama olduğunda ve yüksek yapışkan özelliklere sahip malzemeler temas halinde olduğunda bu katsayı tipik olarak yüksek bir değere sahiptir.

3.3.2.2. Abrazyon aşınması

Abrazyon veya diğer ismi ile aşındırıcı aşınma, bir yüzeydeki sert parçacıklar veya asperiteler başka bir yüzey üzerinde kayarak kesme veya sürme mekanizmaları yoluyla malzeme kaldırılmasına yol açtığında oluşmaktadır. Aşınmanın etkinliği, aşındırıcı

parçacıkların şekli ve boyutunun yanı sıra parçacıklar ve aşınan malzeme arasındaki bağıl sertliğe bağlıdır. Örneğin, aşındırıcı sertliği (H_a) yüzeyin sertliğinin (H_s) 1.2 katından büyükse, yüzeyin plastik deformasyonu yoluyla önemli ölçüde malzeme kaldırma gerçekleşmektedir (Hutchings ve Shipway, 2017). Bu süreç, Şekil 3.18’de gösterildiği üzere, partiküllerin bir yüzeye sabitlendiği iki parçalı aşındırma veya serbest hareket eden partiküllerin iki yüzey arasında aşınmaya neden olduğu üç parçalı aşındırma şeklinde gerçekleşebilmektedir.



Şekil 3.18. İki ve üç parçalı abrazyon aşınma mekanizması (Salot vd., 2016).

Süreç, aşındırıcı parçacıklar ve yüzey arasında plastik temas olduğunu varsayan basitleştirilmiş bir model kullanılarak gösterilebilmektedir. Örneğin iki parçalı aşınmada, her bir partikül yüzey üzerinde kayarken malzemeyi kaldıran, bir kesici alet gibi davranmaktadır. Aşınma oranı genellikle uygulanan yük ve kayma mesafesi ile orantılıdır (Hutchings ve Shipway, 2017). Ayrıca, partikül şekli ve açısı aşınma oranları üzerinde etkiye sahiptir. Daha açısız partiküller daha agresif kesme eylemleri nedeniyle daha yüksek aşınmaya neden olmaktadır (Hutchings ve Shipway, 2017).

Bir aşındırıcı tanecik bir yüzeyi keserken aşındığında, oluşabilecek maksimum aşınma hacmi şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$W = Ad \quad (3.11)$$

Burada W , kaldırılan malzeme hacmini; A , oluşan oluğun enine kesit alanı ve d , kaydırılan mesafeyi temsil etmektedir. A , aşındırıcı tanecik şekline ve penetrasyon derinliğine (p) bağlıdır:

$$A = k_1 p \quad (3.12)$$

k_1 , şekle bağlı olan bir sabittir. Bununla birlikte, penetrasyon derinliği p , yine şekle bağlıdır. L , yük ve H , malzemenin sertliğini ifade etmektedir:

$$p = k_2 \frac{L}{H} \quad (3.13)$$

Denklem 3.11, 3.12 ve 3.13 birleştirilerek şu şekilde oluşturulabilmektedir:

$$W = k_3 \frac{Ld}{H} \quad (3.14)$$

Bu genellikle Archard denklemi (Denklem 3.10) olarak bilinmektedir ve adezyon aşınması için türetilmiştir. Ancak abrazyon aşınmasında da çok yararlı olduğu kanıtlanmıştır (ASM International, 1992).

3.3.2.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, temas eden yüzeylerdeki döngüsel gerilmeler, tipik olarak tekrarlanan yükleme ve boşaltma nedeniyle malzemenin aşamalı olarak bozulmasına yol açtığına oluşmaktadır. Yorulma aşınması, bir malzeme içinde çatlakların oluşması ve büyümesi ile sonuçlanmakta ve sonunda malzemenin tamamen kırılmasına yol açabilmektedir. Bu süreç, özellikle yuvarlanma veya kayma temaslarını içeren durumlarda, malzemenin yorulma sınırını aşan temas gerilmeleri ile daha da kötüleşmektedir (ASM International, 1992).

Döngüsel gerilmeler, Şekil 3.19'da gösterildiği üzere, özellikle temas eden yüzeyler arasında bağıl hareketin olduğu koşullarda, zamanla büyüyen yüzey altı çatlakları oluşturmaktadırlar. Bu çatlaklar sonunda yüzeye doğru ilerlemekte ve pullanma olarak da bilinen malzeme dökülmesine neden olmaktadır. Yorulma aşınması, yüzeylerin tekrarlanan Hertzian temas gerilimlerine maruz kaldığı yuvarlanma elemanı yatakları, dişliler ve kamlar gibi uygulamalarda yaygındır. (ASM International, 1992) Bu çatlaklar genişledikçe, yüzeye yakın malzeme plastik deformasyona uğrayarak daha da zayıflar ve yüzeyin bozulmasına neden olmaktadır.

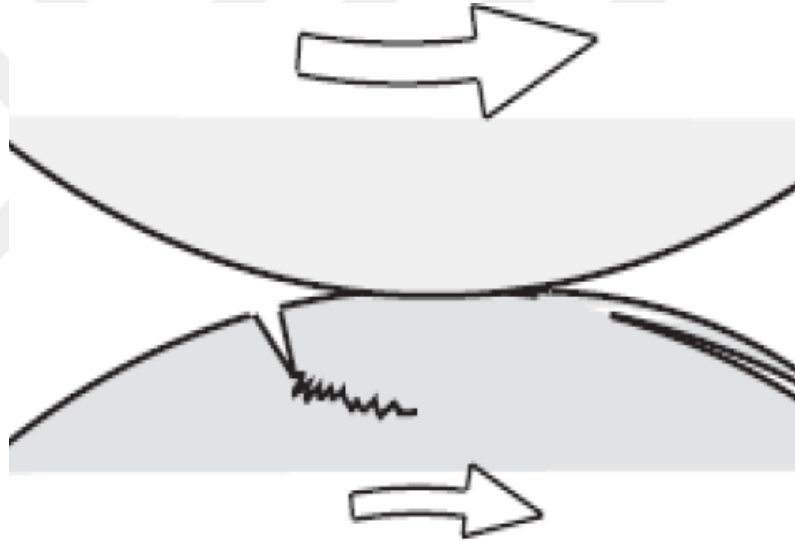
Yorulma aşınması sırasında, malzeme özelliklerine ve gerilim dağılımına bağlı olarak yüzeyde veya yüzey altında çatlaklar başlarmaktadır. Bu çatlaklar, malzeme

tekrarlanan gerilme döngülerine maruz kaldıkça aşamalı olarak büyümekte ve sonuçta parçacıkların yüzeyden ayrılmasına yol açmaktadır. (Hutchings ve Shipway, 2017) açıkladığı gibi, yorulma aşınma mekanizmaları genellikle Paris Yasası gibi yorulma çatlak büyüme yasaları kullanılarak modellenmektedir;

Çatlak büyüme oranı (da/dN), gerilme yoğunluğu faktörü (ΔK) aralığı ile ilişkilidir:

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^n \quad (3.15)$$

Denklemdaki A ve n ampirik sabitlerdir. Bu denklemin birçok malzemede yorulma çatlak büyümesi için kullanımı ve geçerliliği, malzeme bilimi ve mühendisliği ile ilgili temel metinlerde tartışılmaktadır. n üssünün değeri tipik olarak elastomerler için 1.5 ila 3.5 ve sert termoplastikler ve termosetler için 3-10 aralığındadır.



Şekil 3.19. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi (Filipe vd., 2015).

3.3.2.4. Korozyon aşınması

Tribokorozyon olarak da adlandırılan korozyon aşınması, mekanik aşınma süreçleri kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlarla birleşerek malzemenin bozulmasını hızlandığında meydana gelmektedir. Aşınma ve korozyon arasındaki bu etkileşim, genellikle her iki mekanizmanın tek başına ürettiğinden önemli ölçüde daha yüksek aşınma oranlarıyla sonuçlanmaktadır. Bu süreç çok çeşitli ortamlarda, özellikle de yüzeylerin mekanik aşınmaya uğrarken sıvılara, nemli atmosferlere veya diğer aşındırıcı maddelere maruz kaldığı durumlarda meydana gelmektedir (Hutchings ve Shipway, 2017).

Mekanik aşınma ve korozyon arasındaki sinerji, özellikle koruyucu oksit filmlerinin mekanik etkiyle kaldırıldığı ve taze malzemenin korozif ortamlara maruz kaldığı tribolojik temaslarda önemlidir. Bu durum, bir film çıkarma ve yeniden oluşturma döngüsü yoluyla sürekli malzeme bozulmasına yol açmaktadır. Yüzey filmlerinin, özellikle de oksitlerin parçalanması, pasif katmanların sunduğu korumayı azaltarak tribokorozyonun ayırt edici özelliği olan aşınma ve korozyon oranını artırmaktadır (Hutchings ve Shipway, 2017).

Tribokorozyondan kaynaklanan toplam malzeme şu şekilde yazılabilir:

$$T = W + C + S \quad (3.16)$$

W: saf mekanik aşınmadan kaynaklanan malzeme kaybını temsil eder,

C: mekanik aşınmanın olmadığı durumlarda elektrokimyasal korozyondan kaynaklanan malzeme kaybıdır,

S: sinerjik bileşendir ve korozyon nedeniyle aşınmanın hızlanmasını ve bunun tersini yakalamaktadır.

Sinerjik katkı S, neden olduğu korozyon hızındaki değişime: mekanik (aşınma) süreçleri, ΔC_w ve korozyonun neden olduğu aşınma oranındaki değişim, ΔW_c , olarak ayrılabilir. Böylece:

$$T = W + C + \Delta C_w + \Delta W_c \quad (3.17)$$

Faraday kanunlarına dayanarak, mekanik proseslerin (aşınma) ve korozyonun göreceli önemi, C/W oranı ile açıklanabilmektedir:

$$\frac{C}{W} = \frac{C_o + \Delta C_w}{W_o + \Delta W_c} \quad (3.18)$$

- Aşınma baskın: $C/W < 0.1$
- Aşınma-korozyon: $0.1 \leq C/W < 1$
- Korozyon-aşınma: $1 \leq C/W < 10$
- Korozyon baskın: $C/W \leq 10$

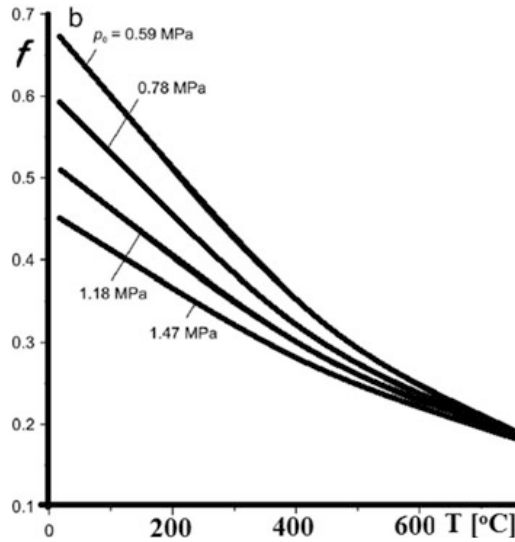
3.4. Fren Sistemlerinde Performans Gereksinimleri

Fren sistemlerinin performansı, motorlu taşıtların güvenliğini ve verimliliğini sağlamada kritik bir faktördür. İyi tasarlanmış bir fren sistemi, çeşitli koşullar altında optimum durdurma gücü, dayanıklılık ve operasyonel güvenilirlik sağlamak için gerekli olan gereksinimleri karşılamalıdır. (Reif, 2014) tarafından tanımlandığı üzere, fren sistemlerinin birincil işlevleri aracı yavaşlatmak, durma noktasına getirmek ve gerektiğinde sabit bir konumda tutmaktır.

Bu işlevselliği sağlayabilmek için modern otomotiv fren sistemleri, operasyonel verimliliklerini ve uzun ömürlülüklerini doğrudan etkileyen termal iletkenlik, aşınma direnci ve mekanik mukavemet gibi çeşitli performans kriterleri tasarlanırken göz önünde tutulmaktadır.

3.4.1. Termal iletkenlik

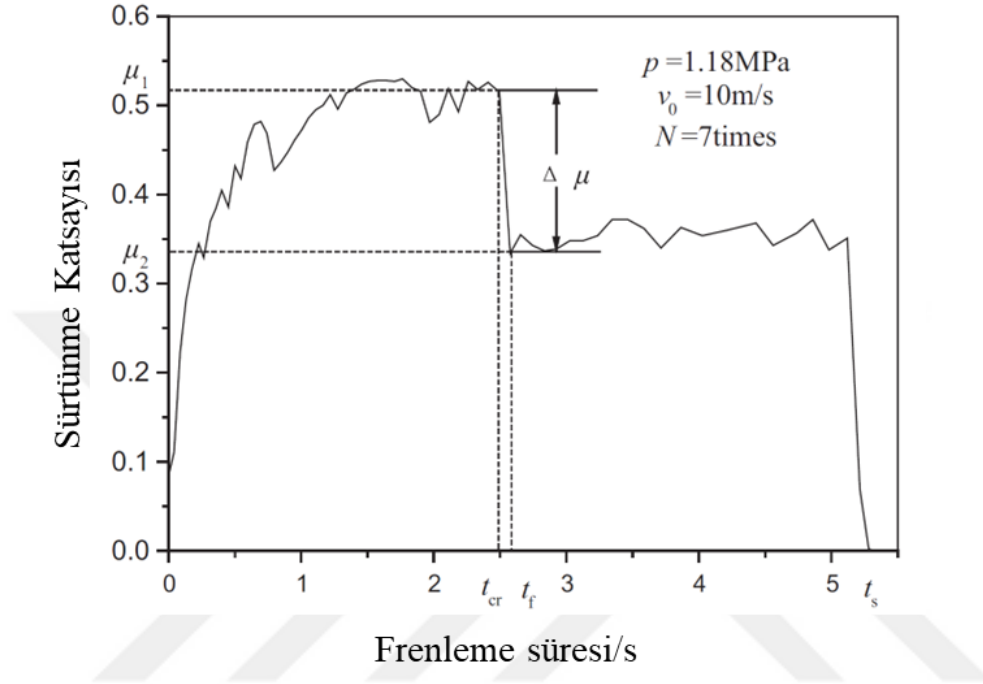
Fren sistemlerinde kullanılan malzemelerin termal iletkenliği, frenleme sırasında açığa çıkan ısı ve ısıнын dağılımını doğrudan etkilediği için genel fren performansında kritik bir parametredir. Frenler uygulandığında, fren balataları ve disk arasındaki sürtünme nedeniyle kinetik enerji termal enerjiye dönüşmekte ve fren bileşenlerinde ısı birikmesine neden olmaktadır (Mădălin-Florin ve Nicolae-Vlad, 2019).



Şekil 3.20. Sürtünme katsayılarının sıcaklık bağımlı değişimi (Mădălin-Florin ve Nicolae-Vlad, 2019).

Şekil 3.20, sürtünme katsayısının artan sıcaklıkla azaldığı göstermektedir. Metaller gibi yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler verimli ısı transferi sağlayarak, fren disklerinde aşırı ısınma ve termal bozulma riskini azaltmaktadırlar (Mădălin-Florin ve

Nicolae-Vlad, 2019). Şekil 3.21’de gösterildiği gibi, sürtünme katsayısı 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde azalmakta ve aşırı koşullar altında daha da fazla azalarak “Fren Boşalması” olarak bilinen frenleme etkinliğinde feci bir hataya yol açmaktadır (Bao vd., 2015). Etkili ısı dağılımı, disklerin ısınması ile frenleme verimliliğinde düşüşe yol açan bir olgu olan fren boşalmasını önlemektedir.



Şekil 3.21. Fren süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı karakterizasyonunun diyagramı (Bao vd., 2015).

Isı yayılımı için yüzey alanını artıran havalandırılmalı fren diskleri, yüksek performanslı fren sistemlerinde termal yönetimi iyileştirmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Fren sistemlerinde etkili termal yönetim, değişen çalışma koşulları altında tutarlı performans sağlamak ve aşırı ısı nedeniyle erken aşınma ve arızayı önlemek için gereklidir. Bu nedenle, uygun termal özelliklere sahip malzemelerin seçimi, fren sistemi performansının optimize edilmesinde kilit bir faktördür.

3.4.2. Aşınma direnci

Fren bileşenlerindeki aşınma direnci, fren sisteminin verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü korumak için kritik bir faktördür. Frenleme komponentleri sürekli sürtünme temasına maruz kaldıklarından dolayı, aşınma dirençleri performansı doğrudan etkilemektedir. Balata malzemesi tüm pratik uygulamalarda frenin temel aşınma bileşenidir. Rotor veya kampana minimum aşınma yaşarken, fren balataları

aşınacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tasarımlar ise kontrollü bozulma ve öngörülebilir bakım sağlamaktadır (Limpert, 1999).

Fren balatalarının aşınma oranı büyük ölçüde basınç dağılımı, malzeme özellikleri ve sıcaklık gibi faktörler tarafından belirlenmektedir. Limpert, (1999) balata yayı boyunca basınç dağılımının aşınma oranını belirlemede önemli olduğunu altını çizmektedir. Çünkü eşit olmayan basınç lokal aşırı ısınmaya ve daha hızlı malzeme aşınmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, temas yüzeyi boyunca basınç dağılımını yönetmek, aşınmayı azaltmanın ve eşit sürtünme sağlamanın anahtarıdır.

Balata malzemesinin aşınma davranışı bilindiğinde, balata boyunca basınç dağılımı ile aşınma nicel olarak belirlenebilmektedir (Limpert, 1999):

$$w_1 = k_1 \mu_L p v_1 \quad (3.17)$$

k_1 : aşınma sabiti, $s \, m^4/N$

p : basınç, N/m^2 .

v_1 : kayma hızı, m/s .

w_1 : balata aşınması, m^3 .

μ_L : balata tamburu sürtünme katsayısı.

Bu denklem, aşınmanın balataya uygulanan basınç ve kayma hızı ile orantılı olduğunu ve malzemenin sürtünme katsayısı ve aşınma sabitinden etkilendiğini göstermektedir. Aşınma sabiti malzemeye özgü bir özelliktir ve bir malzemenin stres altında ne kadar kolay bozulduğunu yansıtmaktadır.

3.4.3. Mekanik mukavemet

Fren bileşenlerinin mekanik mukavemeti, özellikle yüksek stres koşulları altında güvenilir ve güvenli frenleme performansı sağlamak için esastır. Fren rotorları, balatalar, kaliperler ve kampanalar gibi bileşenler, deformasyonu veya arızayı önlemek için yapısal bütünlüğü korurken frenleme sırasında önemli kuvvetlere dayanmalıdır. Mekanik mukavemetin iki yönlü önemi bulunmaktadır: dış yüklere karşı dayanıklılık ve yapısal bütünlük (Limpert, 1999). Bu mukavemet, malzemelerin termal stres ve genleşme yaşayabileceği yüksek sıcaklık koşullarında özellikle önemlidir.

Bu bileşenlerin mekanik mukavemeti, özellikle tekrarlanan ağır frenleme veya yüksek hızlı duruşları içeren uygulamalarda yorulmaya ve çatlamaya karşı koyabilmelerini

sağlamaktadır. (Limpert, 1999) malzeme seçiminin mukavemet, ağırlık, aşınma, ömür ve performans açısından maliyet etkinliğine dayandığını belirterek malzeme seçiminin önemini vurgulamaktadır. Örneğin, dökme demirden yapılmış fren rotorları, yüksek termal ve mekanik yükler altında çatlamayı önleyecek şekilde tasarlanmalı ve zamanla tutarlı fren performansı sağlanmalıdır.

Sonuç olarak, fren sistemi bileşenlerinin mekanik dayanıklılığı, malzemelerin frenleme sırasında yaşanan hem dış kuvvetleri hem de iç gerilimleri karşılayabilmesini ve uzun süreli kullanımda sistem bütünlüğünü koruyabilmesini sağlayarak performansı doğrudan etkilemektedir.

3.5. Güvenlik Standartları ve Mevzuata Uygunluk

Avrupa fren sistemleri yönetmelikleri ve standartları, araçlarda güvenliği, performansı ve çevresel uyumluluğu sağlamak için oluşturulmuştur. Bu yönetmelikler, öncelikle Avrupa'da faaliyet gösteren üreticilerin uyması gereken teknik gereklilikleri belirleyen Avrupa Ekonomik Komisyonu (ECE) tarafından yönetilmektedir. En önemli yönetmelik, performans, test prosedürleri ve ABS (Kilitlenme Önleyici Fren Sistemleri) gibi elektronik bileşenlerin entegrasyonu dahil olmak üzere araçlardaki fren sistemleri için ayrıntılı hükümleri özetleyen ECE R13'tür (UN/ECE, 2016).

ECE R13, motorlu taşıtların fren sistemleriyle ilgili teknik özellikleri ve gereklilikleri ana hatlarıyla belirtmekte, özellikle M, N ve O kategorilerindeki taşıtlarda fren sistemlerinin onaylanması için tek tip hükümlere odaklanmaktadır. Bu yönetmelik, motorlu taşıtlardaki fren sistemlerinin tasarımı, performansı ve testi için önemli bir standart görevi görmektedir.

Yönetmeliğe göre, fren sistemi servis, acil durum ve park frenleri dahil olmak üzere çeşitli çalışma koşullarında güvenli ve etkili frenlemeyi sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Yönetmelik, araçların sürücünün aracın hareketini kontrol etmesini ve tüm hız ve yük koşullarında güvenli bir şekilde durdurmasını sağlayan sistemlerle donatılması gerektiğini belirtmektedir (UN/ECE, 2016). Fren sistemleri, ayrıntılı test prosedürleri aracılığıyla belirlenen durma mesafeleri, fren kuvveti ve tepki süreleri gibi belirli performans standartlarını karşılamalıdır.

Yönetmelik ayrıca diskler ve balatalar gibi kritik fren bileşenlerinin aşınmasını ve işlevselliğini değerlendirmek için periyodik teknik incelemeler yapılmasını zorunlu

kılmaktadır. Çekme araçları ve römorklar arasındaki fren sistemlerinin uyumluluğuna ilişkin hükümler içermekte ve araç kombinasyonları arasında tutarlı ve güvenilir fren performansı sağlamaktadır. Yönetmelik ayrıca sürücüyü herhangi bir arıza veya fren verimliliği kaybı konusunda uyararak uyarı cihazlarının kullanımını şart koşmaktadır (UN/ECE, 2016).

ECE R13 regülasyonu yanı sıra, Euro 7 standartları bağlamında, fren aşınma partikülleri dahil olmak üzere hem egzoz hem de egzoz dışı emisyonları azaltmak için düzenlemeler oluşturulmaktadır. Avrupa Parlamentosu ve Konsey Yönetmeliği, araç elektrikleştirilmesi nedeniyle 2050 yılına kadar karayolu taşımacılığıyla ilgili partiküllerin %90'ını oluşturması öngörüldüğü için egzoz dışı emisyonların kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, düzenlemeler frenlerin sürtünme malzemesinden kaynaklanan emisyonları azaltmayı ve hem partikül kütlesi (PM10) hem de partikül sayısı (PN10) emisyonlarına odaklanmayı amaçlamaktadır. Yönetmeliğin Ek I'ine göre, fren emisyonları için sınırlar araç kategorilerine ve güç aktarma organı teknolojilerine bağlıdır. Örneğin, Tablo 3.3, 3 mg/km'lik partikül emisyon limitleri, Ocak 2030'dan itibaren M1 ve N1 gibi belirli araçlar için geçerlidir (The European Parliament, 2024).

Tablo 3.3. 31 Aralık 2029'a kadar standart sürüş döngüsünde geçerli olan Euro 7 fren partikül emisyon sınırları (The European Parliament, 2024)

Emisyon limitleri [mg/km]	M1 ve N1 kategori araçları, N1 hariç Sınıf III*				
Güç aktarımı teknolojisi	PEV	OVC-HEV	NOVC-HEV	FCV/FC HV	ICEV
Partikül emisyonları (PM10)	3	7	7	7	7

- PEV: Saf elektrikli araç,
- OVC-HEV: Araç dışı şarj hibrit elektrikli araç,
- NOVC-HEV: Araç dışı şarjlı olmayan hibrit elektrikli araç,
- FCV/FCHV: Yakıt hücreli araç / Yakıt hücreli hibrit araç,
- ICEV: Saf içten yanmalı motorlu araç.

Düzenleme, katı partikül emisyon limitleri uygulayarak fren emisyonlarını ele almaktadır. Düzenleyici önlemler yoluyla fren sistemlerinden kaynaklanan PM10 ve PN10 emisyonlarını azaltmaya odaklanmaktadır. Bu standartlar, Avrupa Yeşil

Mutabakatı'nda ve sıfır kirlilik hareketliliğini hedefleyen diğer girişimlerde belirtildiği gibi, uzun vadeli çevresel hedeflere ulaşmak için olmazsa olmazdır.



4. MALZEME VE METHOD

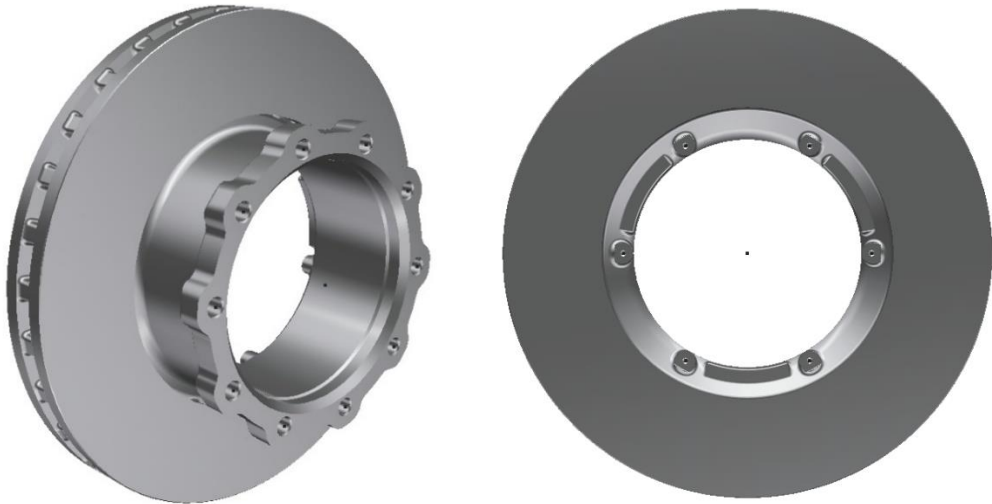
4.1. Malzemeler

4.1.1. Fren diski malzemesi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan, ticari olarak OEM'lere tedarik edilmek üzere Tier 1 firma tarafından imal edilen ağır ticari araç fren diskleri, yüksek performans özelliklerine sahip ferrit içeren gri dökme demirlerden üretilmiştir. Bu fren diskleri, özellikle yüksek ısı iletkenlik ve aşınma direnci sağlamak amacıyla seçilmiştir. Şekil 4.1'de detayları verilen disklerin çapı 430 mm, kalınlığı ise 45 mm olup, ortalama ağırlıkları 37.000 gramdır. Diskler, soğutma kanalları içeren bir tasarıma sahiptir ve endüstriyel standartlara uygun yüzey özellikleri sergilemektedir. Testlerde kullanılan fren disklerinin kimyasal kompozisyonu ise Tablo 4.1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur

Tablo 4.1. Fren diski kimyasal kompozisyonu (% kütleli)

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
%	92.9	3.7	1.7	0.5	0.02	0.04	0.03	0.006	0.008	0.002	0.8



Şekil 4.1. Ağır ticari araç fren diski.

4.1.2. Kaplama malzemesi

Kaplama işlemi için seçilen kaplama tozları: saf Nikel (Ni) ve metalik ve seramik özelliklerinin benzersiz kombinasyonuyla bilinen bir MAX faz malzemesi olan Titanyum Alüminyum Karbürdür (Ti_2AlC). Tozlar, Ti_2AlC içeriğinin artırılmasının kaplamaların mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için beş farklı bileşimde hazırlanmıştır.

1. **Saf Nikel (Ni):** Bu kaplama Ti_2AlC ilavelerinin kaplamaların özellikleri üzerindeki etkisini karşılaştırmak için temel kaplama görevi görmektedir.
2. **Ni + %5 ağırlıkça Ti_2AlC :** Mikroyapısal gelişim ve performans üzerinde düşük miktarda Ti_2AlC 'nin etkisini incelemek için ağırlıkça %5 Ti_2AlC içeren bir kompozit toz karışımı.
3. **Ni + %10 ağırlıkça Ti_2AlC :** Bu bileşim, nikel matrisi içindeki Ti_2AlC konsantrasyonunda orta düzeyde bir artışın davranışını araştırmaktadır.
4. **Ni + %15 ağırlıkça Ti_2AlC :** %10 Ti_2AlC bileşimi, daha fazla malzeme etkileşimi ve kaplama sertliği ve aşınma direncindeki potansiyel iyileştirmeler hakkında fikir vermektedir.
5. **Ni + %30 ağırlıkça Ti_2AlC :** Kaplamadaki takviyenin üst sınırını ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için en yüksek Ti_2AlC içeriği test edilmiştir.

Tozlar, Ti_2AlC parçacıklarının nikel matrisi içinde tutarlı bir şekilde dağılmasını sağlamak için düzgün bir şekilde karıştırılmıştır. Her karışım, kaplama işleminden önce homojenliği sağlamak için mekanik bir karıştırma işlemi kullanılarak hazırlanmıştır.

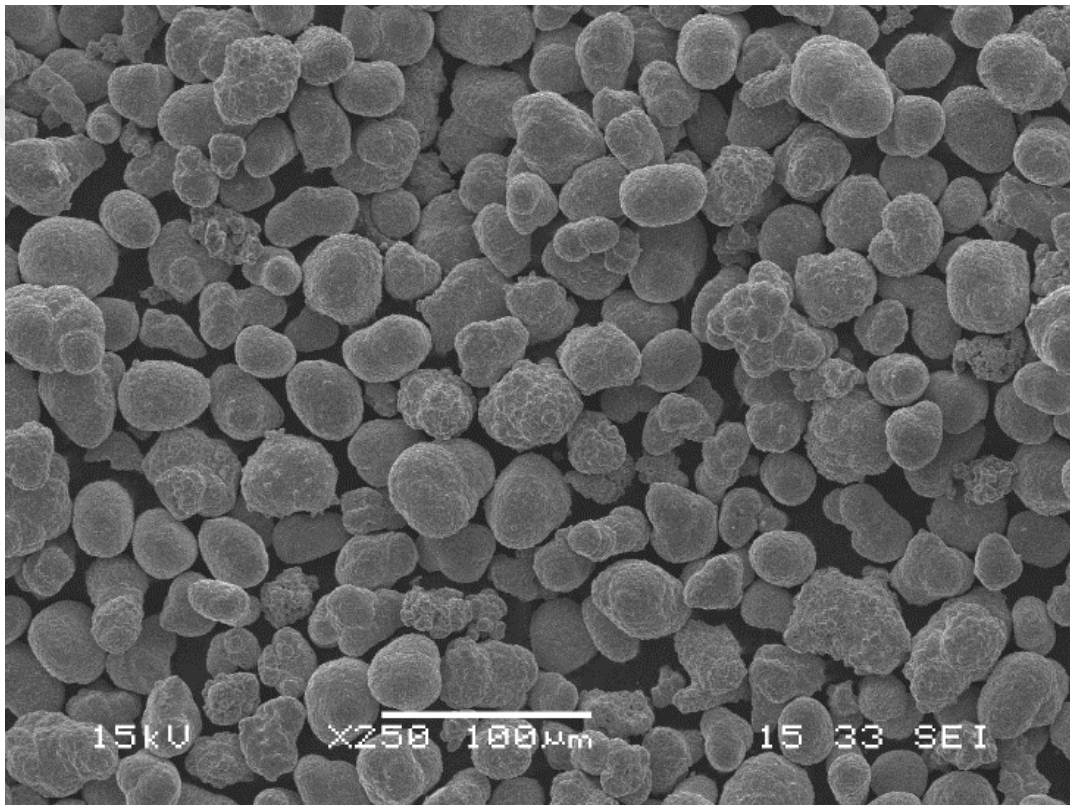
4.1.2.1. Saf nikel

Bu çalışmada kullanılan saf Nikel tozu, (GTV Verschleißschutz GmbH, 2024) firmasından temin edilmiştir. Yüksek saflığa sahip nikel tozu, kaplama uygulamalarında tutarlı kaplama performansı için kritik olan küresel bir parçacık morfolojisi ve düzgün kimyasal bileşimle sağlamaktadır.

- **Saflık:** Kullanılan saf Nikel, $\geq 99\%$ yüksek bir saflık seviyesine sahiptir.
- **Parçacık Boyutu:** Nikel tozunun ortalama parçacık boyutu yaklaşık $53 \mu m$ 'dir. Tutarlı kaplama uygulaması için düzgün ve kontrollü bir parçacık boyutu çok

önemlidir ve lazer kaplama işlemi sırasında eşit katman dağılımını sağlamaktadır.

- **Morfoloji:** Toz, karbonil işlemi nedeniyle, Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, küresel bir morfolojiye sahiptir. Küresel parçacıklar, daha iyi akışkanlık sağlamaktadır.
- **Akışkanlık:** Parçacıkların küresel şekli akışkanlığı artırır; bu, tozun kaplama işlemi sırasında toz besleyiciden kolayca akabilmesi anlamına gelmektedir.
- **Yoğunluk:** Tozun paketleme yoğunluğu, düzgün boyutu ve küresel şekli nedeniyle yüksektir.



Şekil 4.2. Saf nikel tozunun x250 SEM görüntüsü.

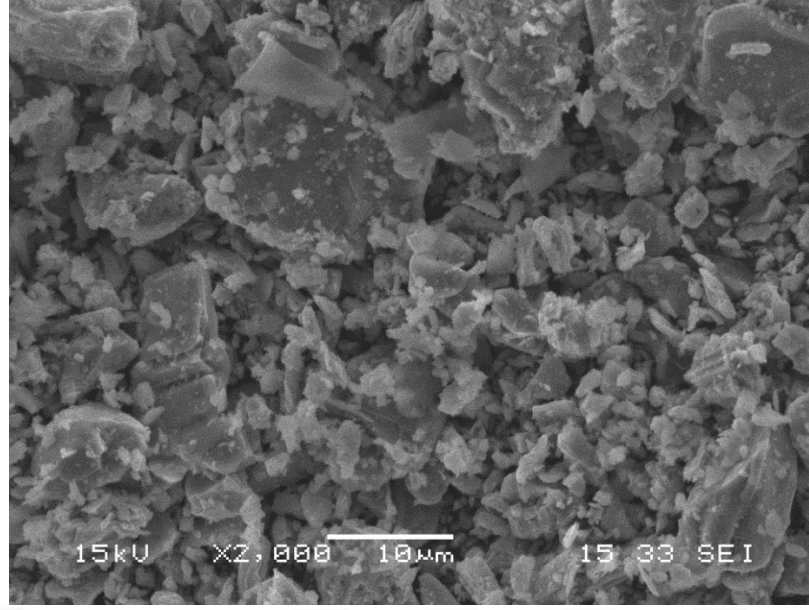
4.1.2.2. Titanyum alüminyum karbür

Bu çalışmada kullanılan Titanyum Alüminyum Karbür (Ti_2AlC), Nanografi firmasından temin edilmiştir. 325 mesh parçacık boyutuna ve %99 saflığa sahip MAX faz mikron tozundan satın alınmıştır. Ti_2AlC , metalik ve seramik özelliklerin benzersiz bir kombinasyonunu sergileyen MAX faz ailesinin bir üyesidir ve bu da onu kaplamalar için ideal bir takviye haline getirmektedir. Tozun teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Titanyum alüminyum karbür (Ti₂AlC) MAX fazı tozu teknik özellikleri (Nanografi, 2024)

Mekanik Özellikleri	
Basınç dayanımı (MPa)	764
Eğilme dayanımı (MPa)	375±15
Vickers sertliği (GPa)	3.5
Young modülü (GPa)	297
Termal Özellikleri	
Isıl genleşme katsayısı	9.0
Termal şok direnci	İyi
Yüksek sıcaklık kararlılığı	İyi
Elektriksel Özellikleri	
Tek İletkenlik	2.9 (25°C)

- **Saflık:** Ti₂AlC tozunun saflığı %99'dur ve kaplamanın performansını etkileyebilecek minimum safsızlık sağlamaktadır.
- **Parçacık Boyutu:** Ti₂AlC tozunun ortalama parçacık boyutu, yaklaşık 44 µm'ye karşılık gelen 325 mesh olarak belirtilmiştir.
- **Morfoloji:** Toz parçacıkları genellikle düzensiz şekillidir, bu da lazer kaplama sırasında matrisiyle mekanik kenetlenmeyi artırmaya yardımcı olmaktadır.
- **Termal Kararlılık:** Ti₂AlC, lazer kaplama sırasında karşılaşılan yüksek sıcaklıklara matrisle bozulmadan veya istenmeyen şekilde reaksiyona girmeden dayanabilmesini sağlayan oldukça termal olarak kararlıdır.



Şekil 4.3. Ti_2AlC tozunun x2000 SEM görüntüsü.

4.2. Lazer Metal Biriktirme İşlemi

Çalışma kapsamında, ağır ticari araç fren disklerinden hazırlanan numuneler üzerine kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Gri dökme demir numuneler üzerine, lazer metal biriktirme tekniği ile saf nikel ve titanyum alüminyum karbür MAX tozu biriktirmeleri yapılmıştır.

4.2.1. Toz hazırlığı

LMD işlemi öncesinde, başarılı bir kaplama performansı elde edebilmek için kullanılan tozların hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, kaplama malzemesi olarak seçilen nikel (Ni) ve Titanyum Alüminyum Karbür (Ti_2AlC) tozlarının çeşitli oranlardaki karışımları hazırlanmıştır. Ağırlıkça, %100 Ni, %95 Ni + %5 Ti_2AlC , %90 Ni + %10 Ti_2AlC , %85 Ni + %15 Ti_2AlC ve %70 Ni + %30 Ti_2AlC oranlarındaki toz karışımları oluşturulmuştur. Bu karışımlar, kaplama kalitesini artırmak amacıyla homojen bir dağılım sağlanarak karıştırılmışlardır.

Tozların homojen bir şekilde karışması, kaplamanın mikroyapısal özelliklerini ve kaplama kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Toz karışımlarının homojenleştirilmesi için, Şekil 4.4'te gösterilen Msetec BM – 0802 model bilyeli değirmen kullanılmıştır. Bu süreçte, her bir toz karışımı 24 saat boyunca düşük hızda öğütülerek iyice karıştırılmış ve homojen bir yapıya getirilmiştir. Hazırlanan bu tozlar, lazer metal biriktirme işlemi sırasında etkin bir şekilde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

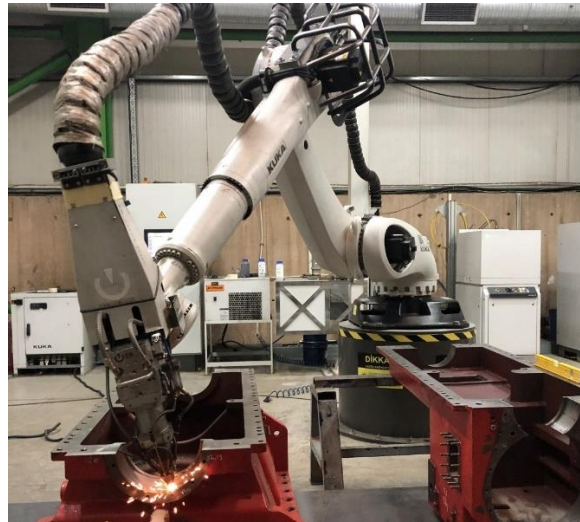


Şekil 4.4. Msetec BM-0802 bilyeli değirmen.

4.2.2. Kaplamanın biriktirilmesi

Lazer metal biriktirme işlemi, altı eksenli Kuka robotuna bağlı olan Erlazer lazer ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, yüksek hassasiyetle lazer biriktirme işlemini yapabilen gelişmiş bir teknolojiyi temsil etmektedir. Lazer biriktirme sistemi yalnızca lazer ünitesinden ibaret değildir; aynı zamanda iş parçasını sabitlemek ve döndürmek için kullanılan mekanizmalar, metal tozlarını lazer ışınının önüne ileten toz besleme sistemi ve işlem sırasında oksidasyonu önlemek için kullanılan inert gaz besleme sistemi gibi birçok yardımcı ünitelerden oluşmaktadır. Bu alt sistemler, biriktirme sürecinde sonuçlar elde edilmesi için kritik rol oynamaktadırlar.

Kaplama işlemi sırasında, lazer metal biriktirme sistemi Şekil 4.5'te gösterilen çalışır pozisyonda kullanılmıştır. İşlemin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için belirli parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler lazer gücü, lazerin tarama hızı, toz besleme hızı ve koruyucu gazın akış hızıdır.



Şekil 4.5. UniqueTech Group, (2024) lazer metal biriktirme sistemi.

Kaplama işlemi başlamadan önce, lazer altlığı ısıtma işlemine başlanmakta ve bu sırada metal tozları toz besleyici yardımıyla lazerin hedeflediği ergime bölgesine doğru iletilmektedir. Aynı anda, lazerin çalıştığı bölgenin atmosfer ile temasını kesmek amacıyla Argon gazı kullanılarak kaplama bölgesinde bir koruyucu tabaka oluşturulmaktadır. Koruyucu katman, işlem boyunca lazerin çalıştığı bölgenin oksidasyona uğramasını engellemektedir. Koruyucu gaz akışı için Argon'un debisi 0.25-0.33 l/s arasında seçilmiştir.

Lazerin oluşturduğu yüksek sıcaklık, toz partiküllerinin yüzeye çarptığı anda eriyerek kaplamanın birikmesini sağlamaktadır. Bu noktada, lazerin gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı gibi parametreler kaplamanın kalınlığını ve mikroyapısal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Kaplama kalitesini ve kaplama kalınlığını kontrol etmek amacıyla literatürde önerilen optimum parametreler dikkate alınarak, Tablo 4.3'te gösterildiği üzere, lazer gücü 600 Watt, lazer tarama hızı 100 mm/s ve toz besleme hızı 150 rpm olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, LMD işlemi sırasında homojen bir kaplama ve kaplamanın mikro yapısının istenilen özelliklerde olmasını sağlamaktadır.

Tablo 4.3. Lazer metal biriktirme parametreleri.

Proses Parametreleri	Değer
Lazer gücü	600 Watt
Lazer tarama hızı	100 mm/s
Toz besleme hızı	150 rpm
Koruyucu gaz akış hızı	0.25-0.33 l/s

4.2.3. Taşlama

Son işlem olarak, biriktirme işlemi sonrası kaplanan yüzeyin pürüzlülüğünü ve geometrik doğruluğunu iyileştirmek için yüzey taşlama işlemi uygulanmıştır. Taşlama işlemi, kaplama sırasında oluşan olası yüzey düzensizliklerini gidermek ve kaplamanın istenilen kalınlık ve düzgünlüğe ulaşmasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Yüksek hassasiyetli bir taşlama makinesi kullanılarak, düşük ilerleme hızlarında yüzey işlenmiştir.

4.3. Uygulanan Deneyler

Bu bölümde, hazırlanan kaplamalara yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ele alınmıştır. İncelenmesi hedeflenen özelliklere göre farklı deney yöntemleri kullanılmış olup, her bir yöntem aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

4.3.1. Optik mikroskop analizi

Kaplama işlemi gerçekleştirilen fren disklerinin işlenmesi ile edilen numuneler, Şekil 4.6’te gösterilen Olympus Optik Mikroskobu ile detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme, kaplı malzeme yüzeyinin yanı sıra, kaplama öncesi toz karakteristiği ve aşınma deneyi sonrası kaplama davranışı incelenmiştir. Kaplama sonrası yüzey analizi, kaplama kalitesini ve birleşim uyumunu değerlendirmeye odaklanmıştır. Mikroskobik seviyede yapılan bu inceleme, kaplamanın başarıyla uygulanıp uygulanmadığını ve aşınan bölgelerin tespit edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.6. Olympus optik mikroskobu (Olympus Global, 2024).

4.3.2. SEM ve EDS analizi

Kaplama işleminde kullanılan tozlar ve altlık malzeme karakterizasyonu ve numuneler üzerine katman uygulanan kaplama kalınlığını belirlemek, yüzey homojenliğini analiz etmek ve aşınma deneyi sonrası aşınma bölgelerini incelemek amacıyla Şekil 4’te gösterilen Jeol JSM 6060LV Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca, kaplama tozları, altlık malzeme ve kaplama bölgelerinin kimyasal bileşimlerini detaylı incelemek için malzeme üzerinde EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.7. Jeol JSM 6060LV taramalı elektron mikroskobu (JEOL Benelux, 2024).

4.3.3. XRD analizi

Bu çalışmada, gri dökme demir disk, kaplama tozları ve kaplanmış disklerin elementel analizleri X-ışını Difraksiyonu (XRD) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, malzemelerin kristal yapısını ve faz bileşimlerini belirlemekte etkili bir yöntemdir. Analizler, Şekil 4.8 gösterilen Rigaku SmartLab SE marka cihazıyla yapılmıştır. Bu cihaz, yüksek hassasiyetli X-ışını dedektörleri ve geniş tarama açısı aralığı sayesinde malzemenin kristalografik yapısını detaylı bir şekilde analiz etme yeteneğine sahiptir.



Şekil 4.8. Rigaku SmartLab SE (Rigaku, 2024)

4.3.4. Sertlik analizi

Mikrosertlik cihazı, Leica VMHT Microhardness Tester kullanılmıştır. Bu cihaz, malzemelerin sertliğini ölçmek için Vickers veya Knoop indenterlerini kullanarak mikroskobik düzeyde testler yapmaktadır. Cihaz, ASTM E-384 ve EN ISO 6507 standartlarına uygun olarak 12 farklı test kuvveti seçeneği sunmakta ve yüzeyin mikro sertlik değerlerini hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Motorize sistemi sayesinde test kuvvetleri kolayca ayarlanabilir ve otomatik odaklama fonksiyonu ile yüksek çözünürlükte görüntüleme sağlayabilmektedir. Bu cihaz, kaplamanın ve ana malzemenin sertlik profilinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 4.9. VMHT Microhardness Tester (Leica Microsystems Wetzlar GmbH, t.y.).

4.3.5. Aşınma deneyi

Çalışmada aşınma deneyi gerçekleştirmek için CMS Instruments TRB model tribometresi kullanılmıştır. Tribometre cihazları, temas halindeki yüzeyler arasında sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, aşınma miktarı ve hacimsel kayıp gibi tribolojik parametreleri ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Cihaz, “ball-on-disc” ve “pin-on-disc” mekanizmaları ile çalışmaktadır. Aşınma testleri, 0.25N ile 20N arası farklı yükler, çelik ve WC gibi farklı bilyeler ve 0.5 cm/s ile 50 cm/s arasında değişen hızlar kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 4.10 CMS Instruments, TRB model tribometresi (Anton Paar, 2024).

4.3.6. 3 boyutlu profilometre

KLA Tencor P6 Profilometre, pürüzlülük, aşınma izleri ve kademe yükseklikleri gibi yüzey topografisini ölçmek için kullanılan temas tabanlı bir cihazdır. Numuneye zarar vermeden doğru ölçümler sağlamak için 0.03 mg ile 50 mg arasında değişen kuvvetle yüzeyi tarayan bir kalem kullanmaktadır. Profilometre, nanometre ölçeğine kadar yüksek çözünürlüklü dikey ölçümler sağlamakta ve bu da onu aşınma testleri sonrasında hassas yüzey analizi için ideal hale getirmektedir.



Şekil 4.11 KLA Tencor P6 profilometre (KLA, 2024).

Çalışmanızda, KLA Tencor P6, tribolojik testlerden sonra numunelerdeki aşınma izlerini ölçmek için kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve aşınma izi boyutları gibi parametreler de dahil olmak üzere toplanan veriler, aşınma oranlarını ve genel yüzey hasarını değerlendirmek için kullanılmıştır. 3D profilometre tarama hızı 100 m/s olarak belirlenmiştir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan tozlar, fren diski ve LMD yöntemiyle kaplanmış fren disklerinin mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri kapsamında, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak numunelerin yüzey morfolojisi ve elementel dağılımı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aynı zamanda, X-ışını kırınımı (XRD) analiziyle numunelerdeki faz yapıları ve kristal yapılar belirlenmiştir.

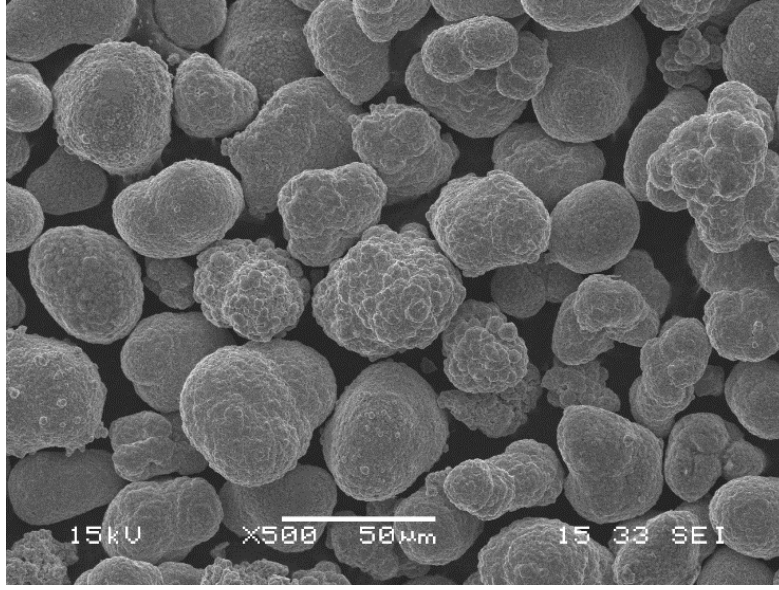
5.1.1. Toz mikroyapı incelemesi

Saf nikel ve Ti_2AlC MAX tozları mikroyapısal özellikleri açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılan analizlerde, nikel tozunun homojen bir tane yapısına sahip olduğu ve yüzey morfolojisinin düzgün olduğu gözlemlenmiştir. Ti_2AlC MAX tozu ise lamelli yapıda olup, tipik MAX fazlarının katmanlı mikroyapısal özelliklerini göstermektedir. Her iki tozun da mikroyapısal karakterizasyonu, kaplama sürecinde malzemenin davranışını anlamak ve LMD yöntemiyle elde edilen kaplamaların performansını değerlendirmek için bilgiler sunmaktadır.

5.1.1.1. Saf nikel tozu

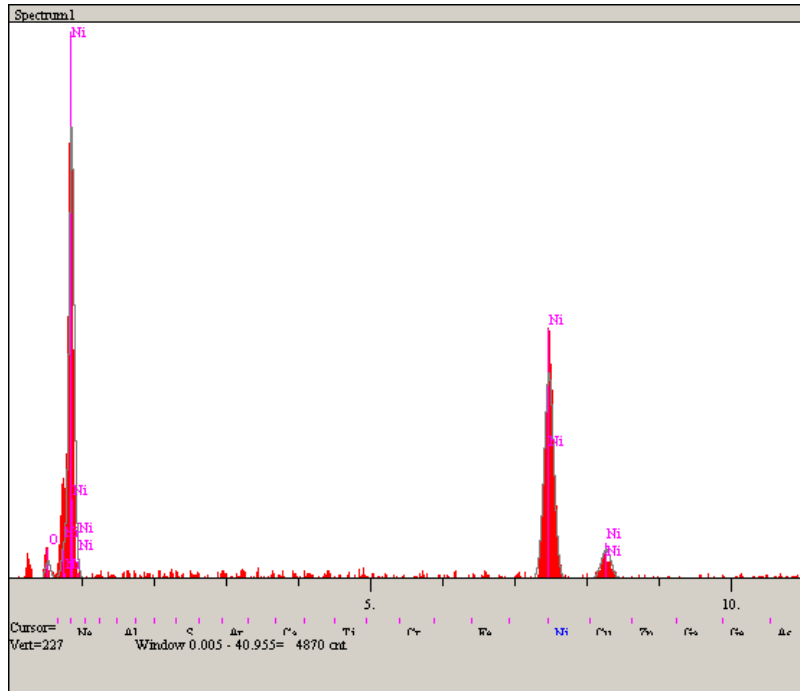
LMD kaplamada kullanılan, saf nikel tozu SEM görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu bölgeden alınan EDS analiz değerlendirmesi sonucu Tablo 5.1, grafiği ise Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

SEM görüntüleri saf nikel toz parçacıklarının nispeten pürüzsüz yüzeylere sahip küresel bir morfoloji sergilediğini göstermektedir. Kaplama işlemlerinde kullanılan atomize tozlar için gerekli olan bu tipik özelliğini göstermektedir. Toz partikül boyutlarının 18–51µm dağılımına sahip olduğu ve parçacıklar arasında minimum aglomerasyon ile oldukça düzgün görünmektedir. Bu morfoloji, lazer kaplama işlemi sırasında iyi akışkanlık ve paketleme yoğunluğunun sağlanması için faydalıdır.



Şekil 5.1. Saf nikel tozu x500 SEM görüntüsü.

EDS spektrumu (Şekil 5.2), önemli bir safsızlık tespit edilmeden baskın element olarak Ni varlığını doğrulamaktadır. EDS verilerinde, kütleli yüzde olarak %98 Ni ve %2 O elementleri saptanmıştır. Oksijen, tozun yüzeyindeki absorbe edilmiş oksijenden veya su buharından da kaynaklanabilmektedir. Kontrollü depolama altında bile havadan gelen az miktarda su buharı, EDS spektrumunda oksijen olarak tespit edilebilen parçacıkların yüzeyinde emilmiş olabilmektedir. XRD sonuçlarında nikelin oksitlendiğine dair herhangi bir bulguya rastlanmamıştır.



Şekil 5.2. Saf nikel tozu elementel EDS spektrumu.

Tablo 5.1. Saf nikel tozu EDS element kompozisyonu.

Element	Kütlesel, %
O	1.974
Ni	98.026

Ek olarak, XRD analizi sonucunda (Şekil 5.3), saf nikel tozunun nikel için tipik olan yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

- En güçlü tepe noktası, nikelin (111) düzlemine karşılık gelen 45°'de gözlemlenmiştir. Bu, nikelin FCC yapısı için birincil yansımasıdır ve tozun tipik bir FCC kristal yapısına sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bu tepe noktasının yoğunluğu en yüksektir ve (111) düzlemlerinin nikel kristal kafesinde en yoğun şekilde paketlenmiş olduğunu göstermektedir.
- 51°'deki ikinci tepe noktası, FCC nikeli için bir diğer karakteristik yansıma olan (200) düzlemine karşılık gelmektedir.
- 76°'deki daha zayıf bir tepe noktası, (220) düzlemine karşılık gelmekte ve FCC yapısını daha da doğrulamaktadır.

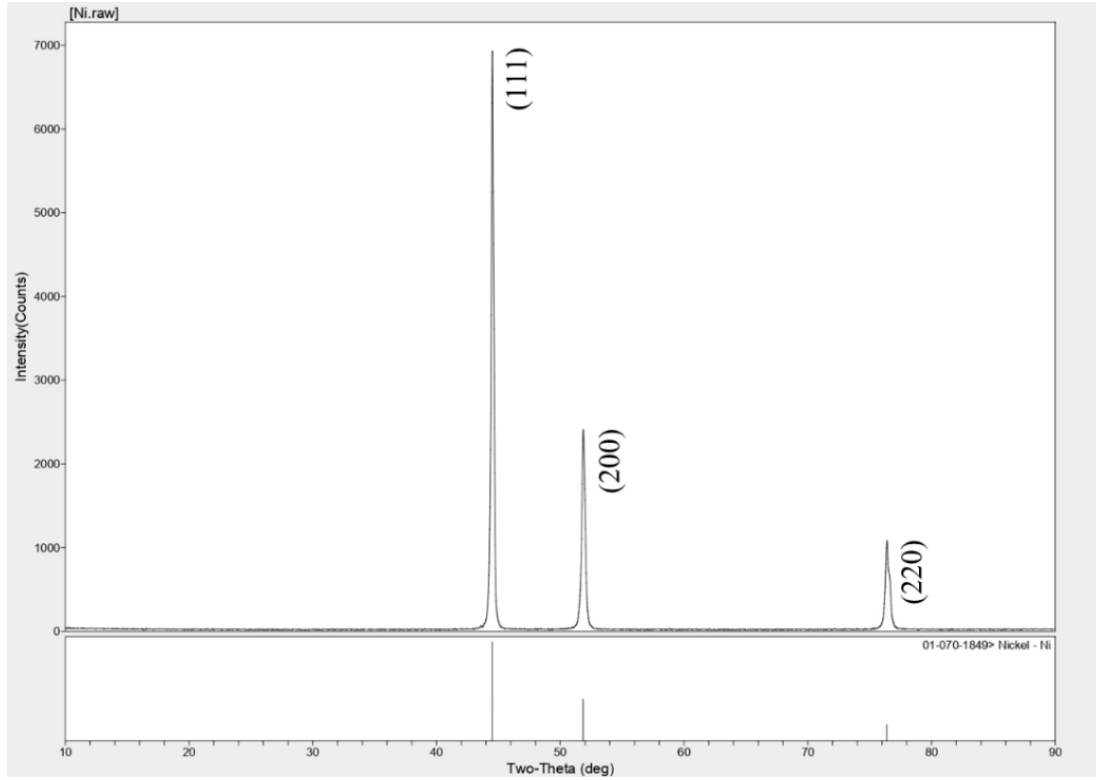
Gözlemlenen tüm tepe noktaları, saf nikel (Ni) için standart kırınım desenine uymaktadır ve tozun herhangi bir tespit edilebilmekte, nikel oksit fazları (NiO veya Ni₂O₃) gibi ikincil faz veya safsızlık olmaksızın ağırlıklı olarak tek fazlı nikel olduğunu doğrulamaktadır.

5.1.1.2. Ti₂AlC MAX tozu

Ti₂AlC tozunun, Şekil 5.4'te SEM görüntüsü verilmiştir. Aynı bölgeden alınan EDS analiz sonuçları, tozun elementel dağılımı hakkında bilgi sunmakta olup, bu değerlendirmeler Tablo 5.2'de detaylı bir şekilde verilmektedir. Ayrıca, elde edilen EDS spektrumu Şekil 5.5'te gösterilerek, analiz edilen elementlerin enerjilerine göre dağılımı görselleştirilmiştir.

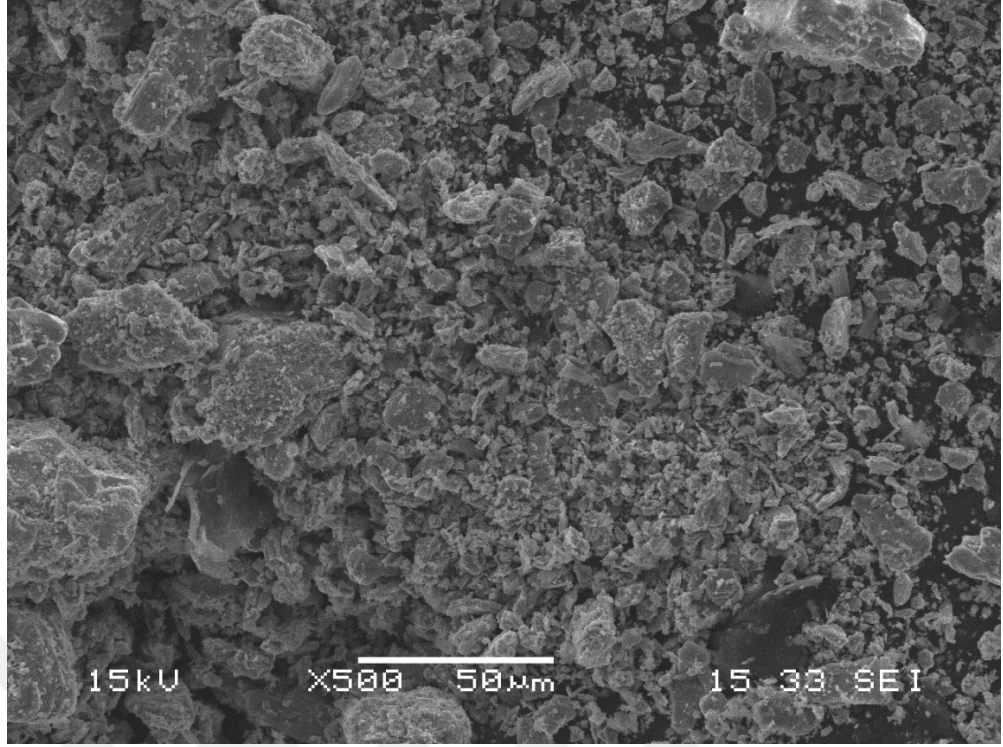
Ti₂AlC MAX faz tozunun SEM mikrofrafisi (Şekil 5.4), toz için karakteristik parçacık şekilleri ve boyutları göstermektedir. Parçacık boyutu oldukça değişkendir, ince, küçük partiküllerden daha büyük aglomeralara kadar değişmektedir. Ortalama boyutun 50 mikrometreden küçük olduğu görülmektedir; bu da lazer kaplama gibi kaplama işlemlerine yönelik tozlarla tutarlıdır. Ayrıca partiküller, lamelli yapıya sahip

MAX faz malzemelerinin tipik özelliği olan düzensiz, pul pul bir görünüme sahiptir. Görüntü, toz partikülleri üzerinde pürüzlü bir yüzey dokusu olduğunu göstermektedir. Bu pürüzlülük, kaplama işlemi sırasında daha iyi yapışma elde edilmesine yardımcı olan yüzey alanını artırmak için faydalıdır.

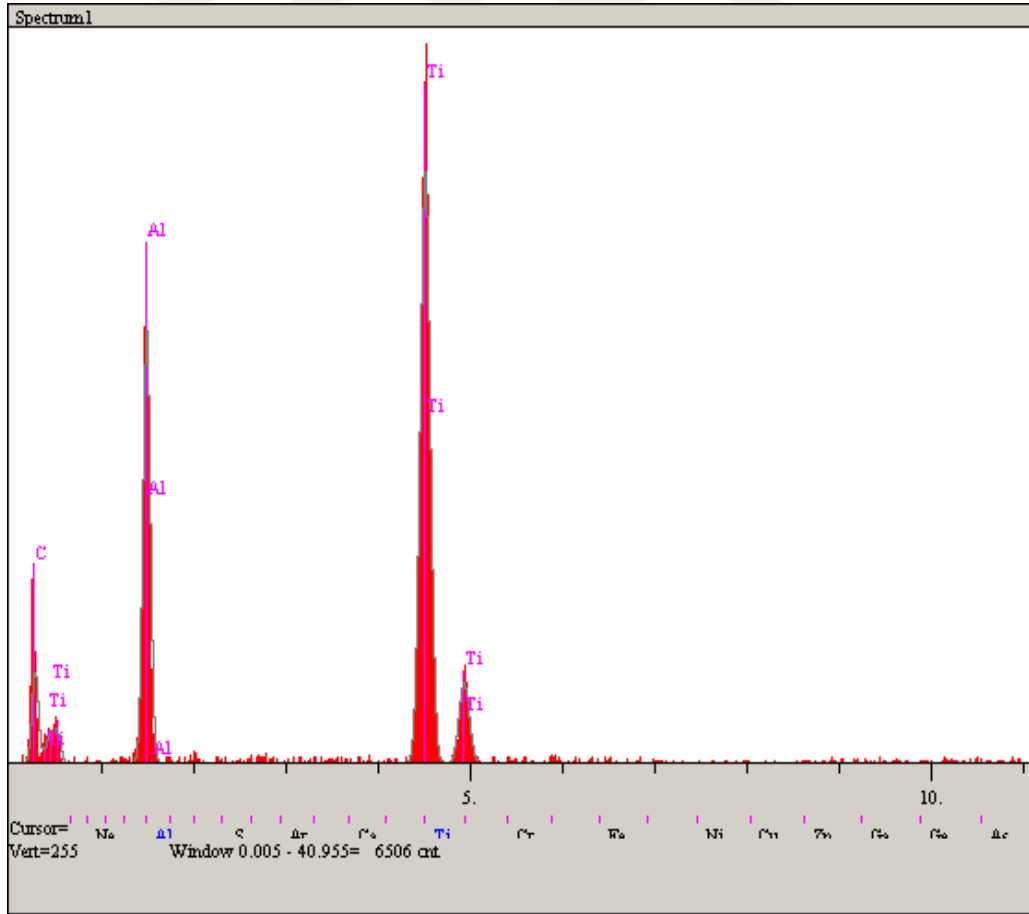


Şekil 5.3. Saf nikel tozu XRD difraktogramı.

EDS analizi, Ti_2AlC MAX faz tozunun elementel bileşimini Şekil 5.5’te doğrulamıştır. Spektrum ve ilgili nicel sonuçlarda belirtildiği gibi, tanımlanan ana elementler titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve karbon (C) olup, Ti_2AlC ’nin beklenen stokiometrisi ile uyumludur. EDS verilerinde, kütleli yüzde olarak %13 C, %9 O, %18 Al ve %60 Ti elementleri saptanmıştır. Ti_2AlC , ağırlık olarak titanyumdan oluştuğu için yüksek titanyum içeriği malzemenin bileşimiyle tutarlıdır. MAX fazının oluşumu için gerekli bir bileşen olan alüminyum da önemli seviyelerde tespit edilmiştir. Oksijenin varlığı, nikel tozuna benzer şekilde tozun yüzeyinde absorb edilmiş oksijenden veya su buharından kaynaklandığı ön görülmektedir. Karbon elementi ise, MAX yapısındaki karbür fazından kaynaklanmaktadır. Karbon elementinin varlığı toz için hayati öneme sahiptir. Çünkü malzemenin sertliğine ve mukavemetine direkt olarak katkıda bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Ti_2AlC MAX tozu x500 SEM görüntüsü.



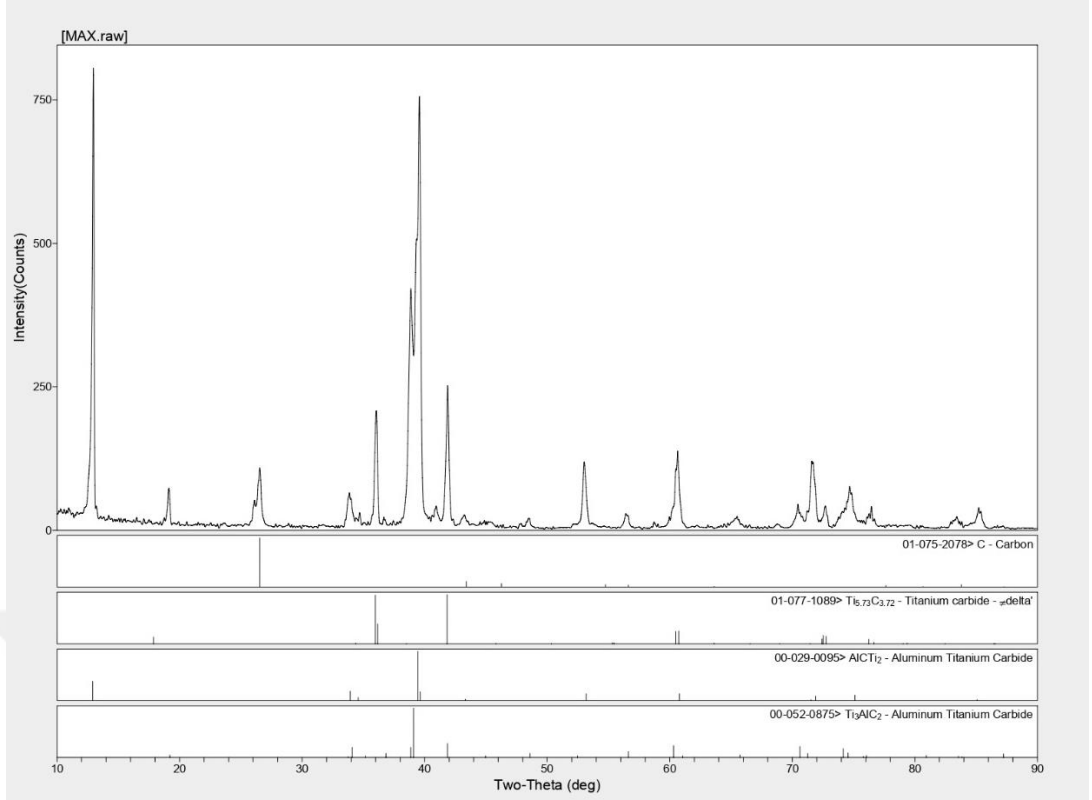
Şekil 5.5. Ti_2AlC MAX tozu elementel EDS spektrumu.

Tablo 5.2. Ti_2AlC MAX tozu EDS element kompozisyonu.

Element	Kütlesel, %
C	12.987
O	8.544
Al	18.435
Ti	60.035

XRD analizi sonucunda Şekil 5.6'daki difraktogram elde edilmiştir. Difraktogram, temel karbon, titanyum karbür ($Ti_{15.73}C_{3.72}$) ve iki MAX fazı (Ti_2AlC ve Ti_3AlC_2) dahil olmak üzere karmaşık bir faz bileşiminin varlığını ortaya koymuştur:

1. **C:** Karbon genellikle çeşitli allotroplarda (grafit, elmas, amorf karbon) görüntülenmektedir. XRD desenleri genellikle belirli aralıklarda, (111) düzlemine karşılık gelen en yoğun pik yaklaşık $26^\circ 2\theta$, farklı piklere sahip grafitin varlığını ortaya koymaktadır.
2. **$Ti_{15.73}C_{3.72}$:** Titanyum karbürler (TiC_x) stokiyometrik olmayan bileşimlerle oluşur, bu da karbon-titanyum oranının değişebileceği anlamına gelmektedir. δ' fazı, karbon içeriğinin ideal stokiyometrik TiC 'den daha az olduğu titanyum karbürün metastabil bir fazını temsil etmektedir. $Ti_{15.73}C_{3.72}$ 'nin kafes parametresi, düşük karbon içeriği nedeniyle biraz daha büyüktür.
3. **$AlCTi_2$:** Titanyum alüminyum karbür fazı, MAX fazlarına (Ti_2AlC) ait üçlü bir karbürü temsil etmektedir. Bu malzemeler, değişen metal karbür katmanları (TiC) ve "A" grubu metal (Al) katmanlarından oluşan katmanlı bir altıgen yapıya sahiptir. Ti_2AlC için en yoğun pikler (002) ve (100) düzlemlerine karşılık gelen 2θ açıları etrafında görünmektedir.
4. **Ti_3AlC_2 :** Titanyum alüminyum karbür, Ti_2AlC 'ye benzer şekilde, Ti_3AlC_2 MAX faz ailesine aittir, ancak farklı bir stokiyometrik orana sahiptir. Ti_3AlC_2 , alüminyum katmanlarla dönüşümlü olarak üç titanyum karbür katmanından oluşmaktadır. (006) düzlemlerine karşılık gelen açılarda belirgin olan en yüksek pikini almıştır.

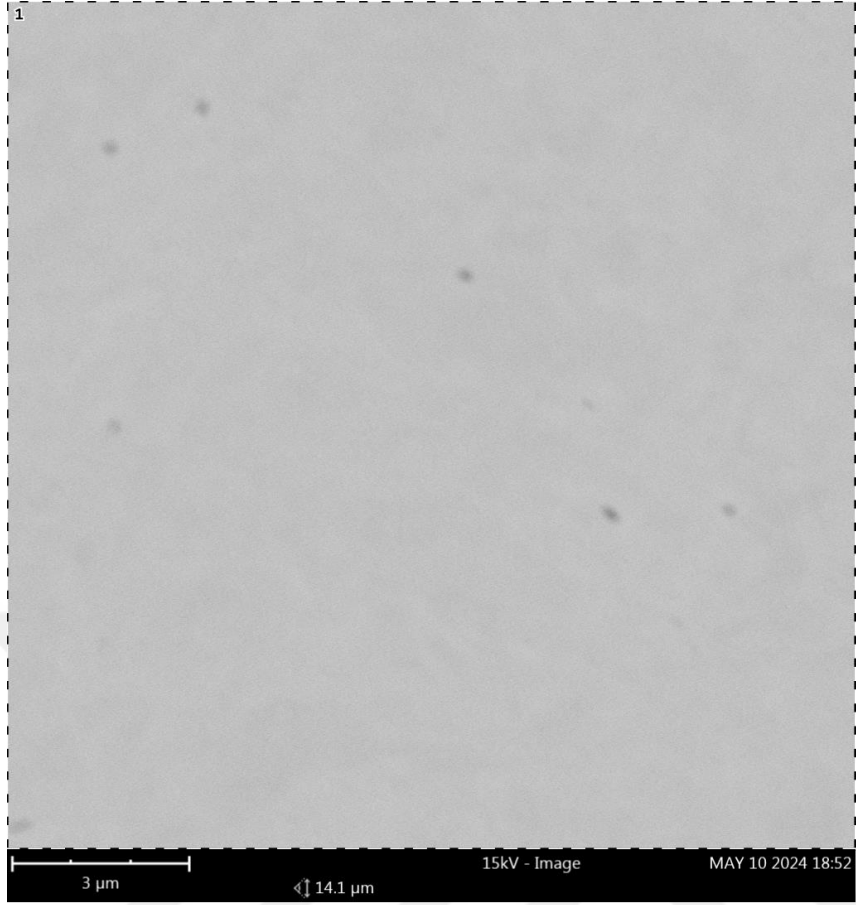


Şekil 5.6. Ti_2AlC MAX tozu XRD difraktogramı.

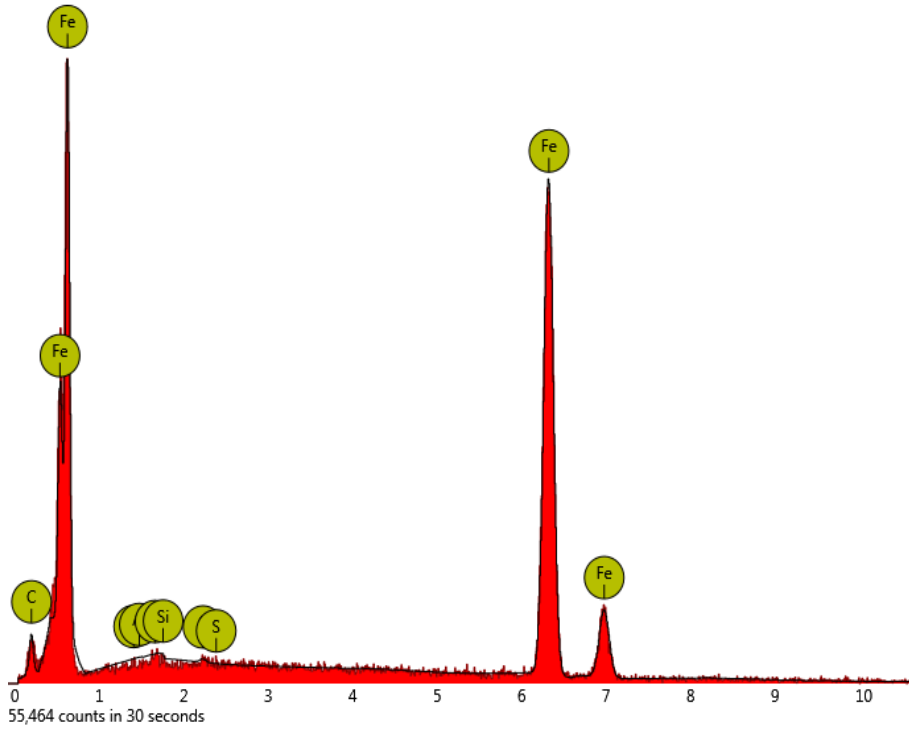
5.1.2. Kaplamasız fren diski mikroyapı incelemesi

Çalışmada kullanılan, OEM'lere tedarik edilen fren diskleri gri dökme demiri üzerinde SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüsü Şekil 5.7'de gösterildiği üzere 3 farklı bölgeden gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerden alınan EDS analiz değerlendirmesi sonucu, Tablo 5.3 grafiğinde ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

Gri dökme demirin SEM görüntüsü (Şekil 5.7) karmaşık ve heterojen bir mikro yapıyı ortaya koymaktadır. Büyük grafit yaprakları matris boyunca dağılmış olup, çevreleyen demir açısından zengin fazlara kıyasla daha düşük atom numaraları nedeniyle görüntüde koyu bölgeler olarak görünmektedir. Grafit pullarına ek olarak, malzeme içinde başka fazların veya safsızlıkların varlığına işaret etmekte, değişen kontrastlı düzensiz şekilli bölgeler bulunmaktadır. Genel olarak, SEM görüntüsü, grafit pulları ve metalik matris arasında belirgin bir kontrast ile gri dökme demirin tipik lamelli yapısını göstermektedir.



Şekil 5.7. Dağlanmamış gri dökme demir SEM görüntüsü.



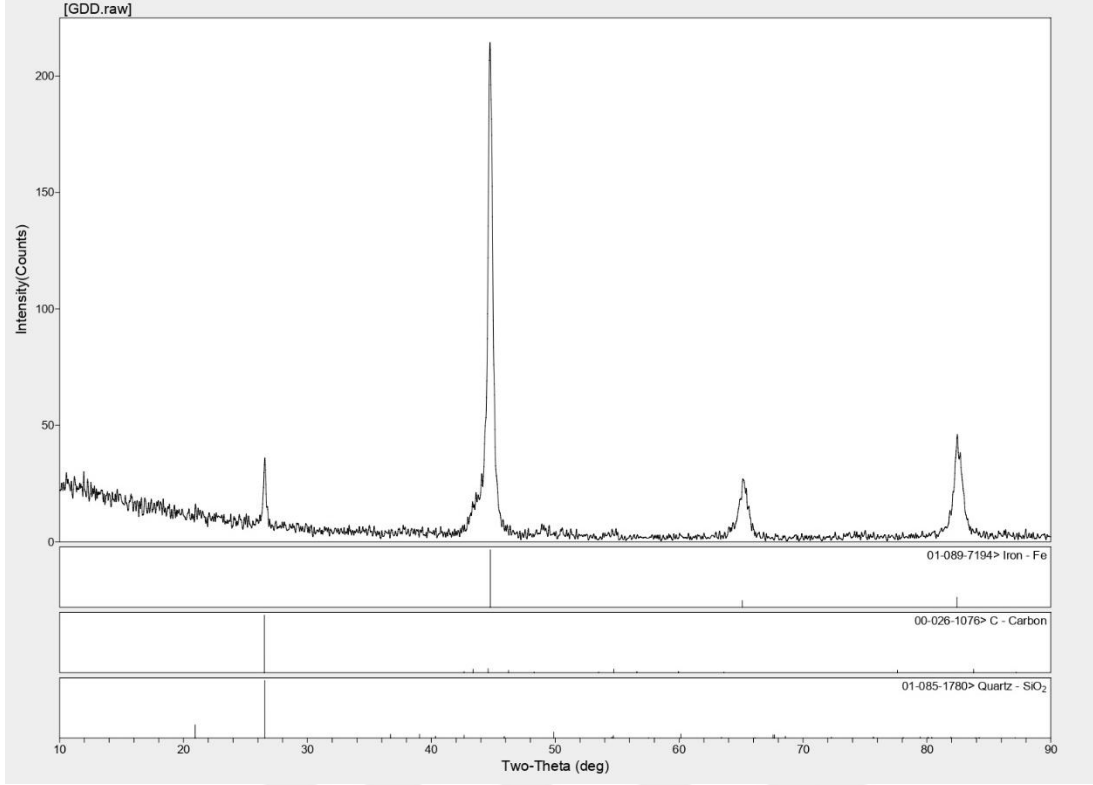
Şekil 5.8. Gri Dökme Demirin elementel EDS spektrumu.

Tablo 5.3. Saf nikel tozu EDS element kompozisyonu.

Bölge	Element	Kütlesel, %
1.	Fe	78.35
	C	10.36
	F	9.18
	O	1.26
	Si	0.85
2.	C	100
3.	O	46.4
	Al	42.6
	C	11

Üç farklı bölge için EDS analizinin sonuçları birbirlerinden farklılıklar göstermiştir:

- **Bölge 1:** Bu bölge ana malzeme olarak %78.35 kütleli yüzdesiyle de Fe oluşmaktadır. C, %10.36 oranında mevcut olup matris içerisinde grafit yapraklarının varlığına işaret etmektedir. %9.18 F ve %1.26 O oranında tespit edilmiştir. Si, grafit oluşumunu teşvik etmek için genellikle silisyum içeren gri dökme demir için tipik olan %0.85 gibi minimum bir seviyede tespit edilmiştir.
- **Bölge 2:** Bu bölge tamamen karbondan (%100) oluşmaktadır ve grafit fazını temsil ettiğini göstermektedir. Saf karbonun varlığı, gri dökme demirin karakteristik özelliği olan grafit pullarının varlığını doğrulamaktadır.
- **Bölge 3:** Üçüncü bölgede önemli miktarda O (%46.4) ve Al (%42.6) ile az miktarda C (%11) bulunmaktadır.



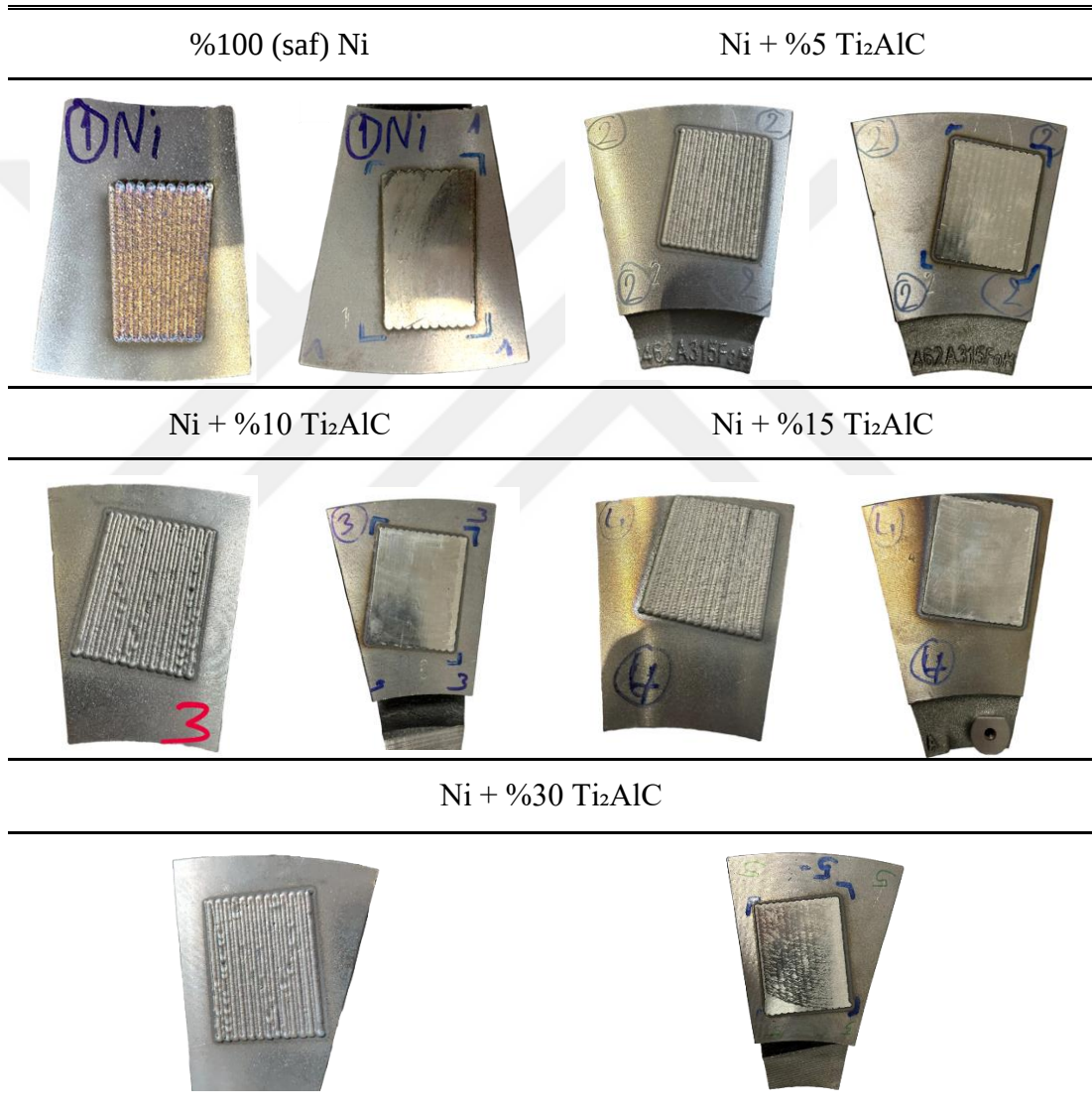
Şekil 5.9. Gri dökme demir XRD difraktogramı.

Gri dökme demir numunesinin XRD analizi üç farklı fazın varlığını ortaya çıkarmıştır: Fe, C ve SiO₂. Bu fazların her biri malzemenin genel yapısı ve özelliklerinde kritik bir rol oynamaktadır:

- **Fe:** Numunede tespit edilen birincil faz, gri dökme demirin matrisini oluşturan demirdir. XRD'de bu faz, gri dökme demirin karakteristik özelliği olan ferritik veya perlitik yapıya karşılık gelmektedir.
- **C:** Grafit pulları şeklindeki karbon fazı, gri dökme demirin tanımlayıcı bir özelliğidir. Bu grafit pulları, XRD deseninde kristal yapılarını temsil eden farklı pikler olarak görünmektedir.
- **Kuvars (SiO₂):** Silikon dioksit karşılık gelen kuvars fazı, numunede bir safsızlık veya inklüzyon olarak tespit edilmiştir. Kuvars tipik olarak gri dökme demirde istenen bir bileşen değildir, ancak varlığı üretim sırasında kullanılan hammaddelerden veya döküm işlemi sırasında kontaminasyondan kaynaklanabilir. Grafit oluşumunu teşvik etmek için gri dökme demire genellikle kasıtlı olarak silikon eklenir, ancak bu durumda tespit edilen SiO₂ muhtemelen bir oksit kalıntısıdır.

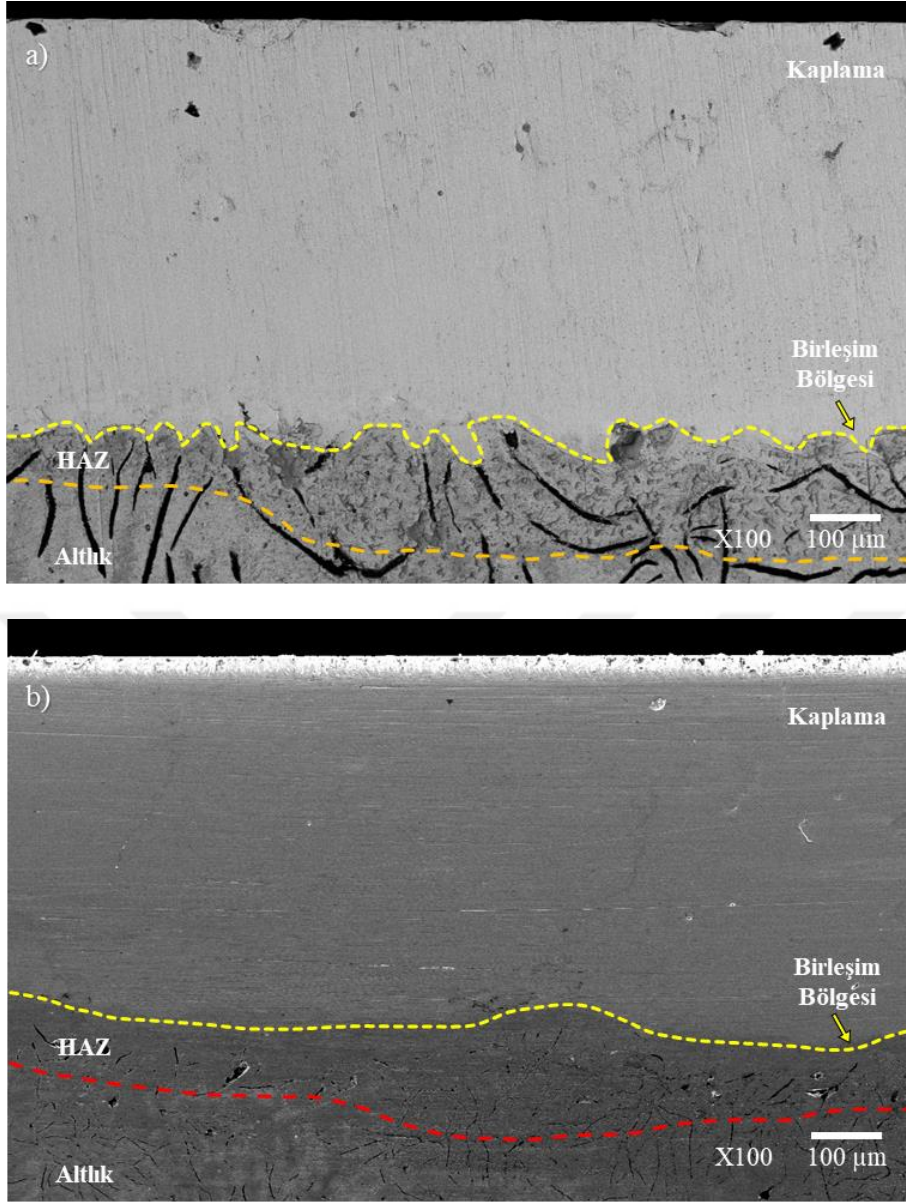
5.1.3. LMD kaplamalı fren diskleri mikroyapı incelemesi

Çalışma kapsamında, kaplama malzemesi olarak seçilen saf Ni ve Ti_2AlC tozlarının çeşitli oranlardaki kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça, %100 (saf) Ni, %95 Ni + %5 Ti_2AlC , %90 Ni + %10 Ti_2AlC , %85 Ni + %15 Ti_2AlC ve %70 Ni + %30 Ti_2AlC oranlarındaki toz karışımları ile kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Kesilmiş fren diskleri üzerine yapılan kaplamaların görselleri Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Üretilen kaplamalar ayrıca SEM ile incelenmiş, faz kompozisyonu XRD ölçümleriyle karakterize edilmiştir.



Şekil 5.10. Kaplanmış fren disklerinin taşlanmamış ve taşlanmış numuneleri.

Şekil 5.10'da kaplanmış numunelerin taşlama öncesi (sol) ve taşlanmamış sonrası (sağ) yüzeylerini gösterilmektedir. Yüzeyde lazer izleri ve kaplama işlemi sırasında oluşan pürüzlülük açıkça görüntülenebilmektedir.

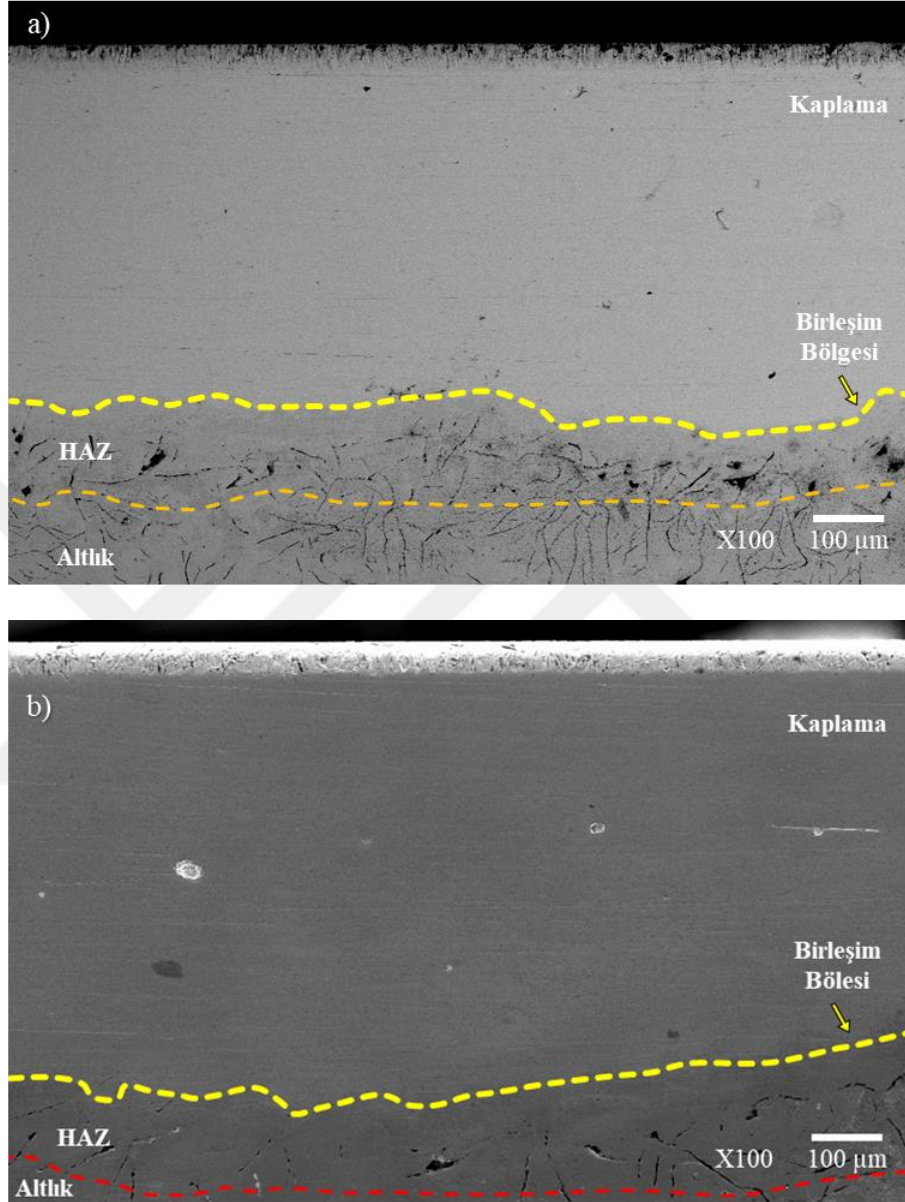


Şekil 5.11. Kaplanmış fren disklerinin SEM kesit görüntüleri, a) Ni + %5 Ti_2AlC , b) Ni + %10 Ti_2AlC .

Şekil 5.11'de gösterilen kesitsel SEM görüntüleri, lazer kaplama tekniği kullanılarak fren disklerine uygulanan Ni + %5 Ti_2AlC ve Ni + %10 Ti_2AlC kaplamalarını temsil etmektedir.

Şekil 5.11.a'da, Ni + %5 Ti_2AlC kaplaması, kaplama ile alt tabaka arasında iyi tanımlanmış bir bağlanma bölgesi göstermektedir. Kaplama tabakası, önemli bir gözeneklilik olmadan homojenlikdir. Isıdan etkilenen bölge (HAZ), bağlanma bölgesinin altında görülebilmekte ve azer kaplamanın alt tabaka üzerinde lokalize termal etkilere neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, arayüz boyunca elemanların difüzyonuna katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, Ni + %10 Ti_2AlC

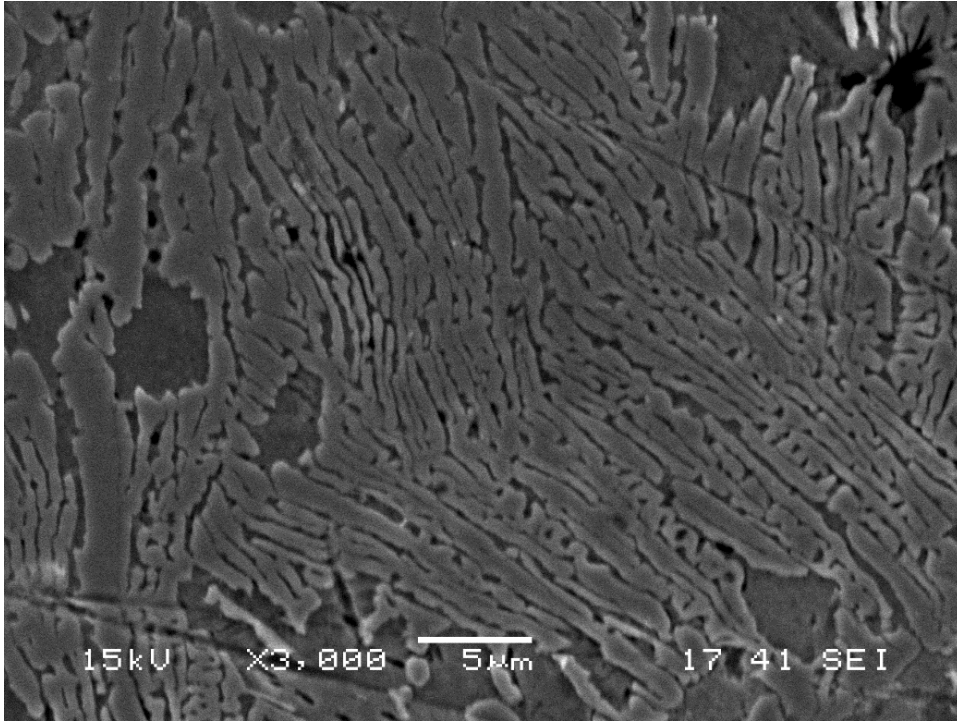
kaplamasını gösteren Şekil 5.11.b, artan Ti_2AlC içeriği, arayüz boyunca daha az kusurla daha pürüzsüz ve daha sağlam bir kaplama tabakasına yol açmış gibi görünmektedir. Bu örnekteki HAZ da açıkça tanımlanmıştır.



Şekil 5.12. Kaplanmış fren disklerinin SEM kesit görüntüleri, a) Ni + %15 Ti_2AlC , b) Ni + %30 Ti_2AlC .

Şekil 5.12'deki kesitsel SEM görüntüleri, lazer kaplama kullanılarak uygulanan fren disklerindeki Ni + %15 Ti_2AlC ve Ni + %30 Ti_2AlC kaplamalarını göstermektedir. Bu görüntüler, daha yüksek Ti_2AlC içeriğine sahip kaplamalar arasındaki mikro yapısal farklılıklar ve bunların bağlanma bölgesi, ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve genel kaplama morfolojisi üzerindeki etkileri hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır.

Şekil 5.12.a'da, Ni + %15 Ti₂AlC kaplaması, kaplama ile alt tabaka arasında düzgün bir geçişle iyi oluşturulmuş bir bağlanma bölgesi göstermektedir. HAZ açıkça görülebilmektedir ve bu, lazer kaplama işleminin alt tabaka üzerindeki termal etkisini göstermektedir. Kaplama tabakasının kendisi yoğun ve homojen görünmektedir ve minimum kusur veya gözeneklidir. Bağlanma bölgesi, kaplama ile alt tabaka arasında iyi bir yapışma göstermektedir ve bu da lazer kaplama işlemi nedeniyle etkili bir füzyon olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 5.12.b'de, Ni + %30 Ti₂AlC kaplaması benzer bir mikro yapısal düzenleme göstermektedir. Bu görüntüler, Ti₂AlC içeriğinin artırılmasının daha rafine bir mikro yapıya, daha pürüzsüz kaplama yüzeylerine ve alt tabaka ile daha iyi bağlanmaya yol açtığını doğrulamaktadır.



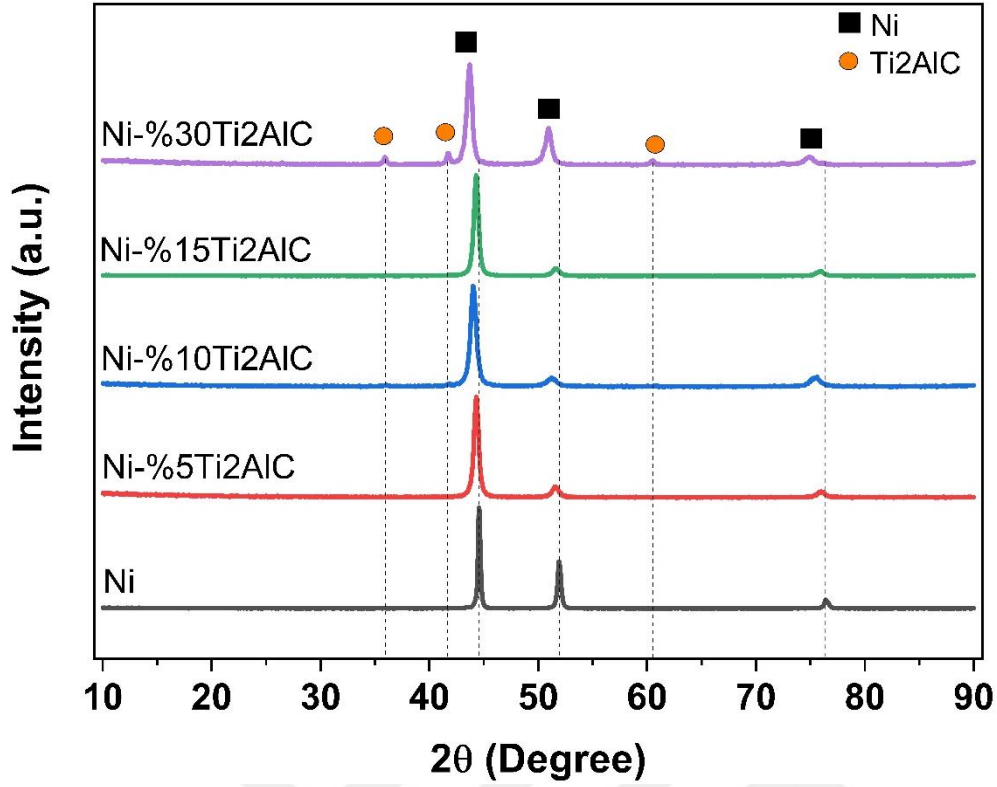
Şekil 5.13. Ni + %15 Ti₂AlC kaplı numunede kesit SEM görüntüsü.

Şekil 5.13'te ise, lazer metal biriktirme sonrası, kaplama kesitindeki büyümeleri gösterilmektedir. Lazer kaplama işlemi sırasında erimiş tabaka, çok yüksek sıcaklıklarda hızla katılaşmaya başlamaktadır. Bu katılaşma süreci, soğuma hızına bağlı olarak mikro yapıda önemli değişikliklere yol açmaktadır. Soğuma hızı malzemenin mikro yapısının nasıl şekillendiğini doğrudan etkilemekte ve sürecin bir parçası olarak, mikro yapı tiplerinin eş eksenli kristal, dendritik kristal ve düzlemsel kristal gibi farklı şekillerde oluştuğu gözlemlenmektedir.

- **Eş Eksenli Kristaller:** Lazer kaplama işleminde erimiş malzeme ilk katılaşmaya başladığında, soğuma hızının düşük olduğu yüzey kısımlarında eş eksenli kristaller (globüler kristaller) oluşturmaktadır. Bu kristaller izotropik büyüme göstermekte ve genellikle malzemenin daha yumuşak kısımlarında gözlemlenmektedir. Soğuma hızı düşük olduğunda kristallerin tüm yönlerde eşit hızda büyümesiyle bu yapı ortaya çıkmaktadır.
- **Dendritik Kristaller:** Erimiş malzeme aşağıya doğru soğudukça, soğuma hızı artmaya başlamaktadır. Orta bölgelere doğru, soğuma hızının arttığı bu bölgelerde dendritik büyüme gözlemlenmektedir. Dendritik yapı, hızlı soğuma koşullarında ortaya çıkmakta ve dallanmış bir mikro yapı oluşturmaktadır. Bu yapı, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmekte ve sertliği arttırmaktadır. Dendritlerin büyüme yönü, genellikle ısı akışının yönüne bağlı olarak gelişmektedir.
- **Düzlemsel Kristaller:** Soğuma hızı en yüksek seviyeye ulaştığında, alt katmanlarda düzlemsel (planar) kristaller oluşmaktadır. Bu kristaller, erime ve katılma cephesinin hızlı hareket ettiği durumlarda görülmektedir. Yüksek soğuma hızı nedeniyle, kristallerin düzlemsel bir şekilde büyümesi malzemenin genel sertlik ve dayanım özelliklerini güçlendirmektedir.

Lazer kaplama işlemine MAX faz tozları (Ti_2AlC gibi) eklendiğinde, bu fazlar malzemenin mikro yapısında daha belirgin bir rol oynamaktadır. Dendritik ve düzlemsel kristallerin gelişimine katkıda bulunmaktadırlar. MAX fazlarının bu dendritik yapılar içinde dağılması, malzemenin aşınma ve sürtünme performansını artırmakta. Soğuma hızı arttıkça bu fazların yapı içerisinde daha etkin rol oynaması, malzemenin genel tribolojik özelliklerini iyileştirmektedir.

Beş farklı kaplamanın XRD difraktogramı Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Grafik, her bir kaplamanın 2-Theta (derece) ve yoğunluk (Intensity) değerlerini göstermektedir. Bu desen, Ti_2AlC oranındaki artışın kaplamaların kristal yapısındaki değişimleri nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.14. %100 Ni (siyah), Ni + %5 Ti_2AlC (kırmızı), Ni + %10 Ti_2AlC (mavi), Ni + %15 Ti_2AlC (yeşil) ve Ni + %30 Ti_2AlC (mor) kaplamalarının XRD difraktogramı.

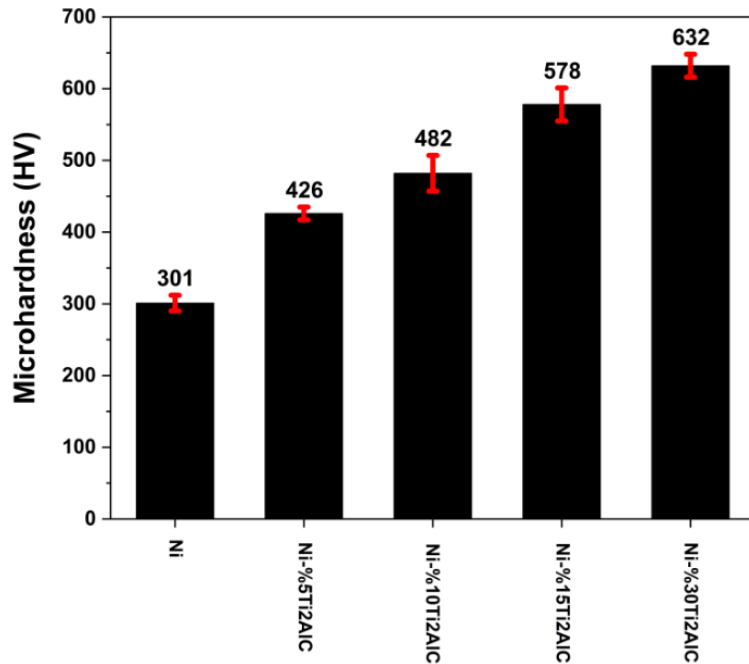
1. **Saf Nikel (Ni):** Saf nikel difraktogramında, belirgin pikler yaklaşık 44.5° ve 51.8° 'de görülmektedir. Bu tepe noktaları nikelin (111) ve (200) düzlemleriyle ilişkilidir. Saf nikel kristal yapısının karakteristik fazlarını göstermektedir. Bu desen, diğer kaplamalarla kıyaslandığında sadece nikel fazının olduğunu göstermektedir.
2. **Ni-%5 Ti_2AlC :** %5 Ti_2AlC içeren kaplamada nikelin tepe noktaları yine 44.5° ve 51.8° 'de gözlenmektedir. Ancak, bu kaplama ile Ti_2AlC 'nin karakteristik pikleri de görülmeye başlanmıştır. Yaklaşık 35° ve 60° civarında Ti_2AlC 'nin fazlarına ait küçük pikler belirgin hale gelmiştir. Bu, kaplama içerisine az miktarda Ti_2AlC 'nin başarıyla eklendiğini ve yapıya dahil olduğunu göstermektedir.
3. **Ni-%10 Ti_2AlC :** %10 Ti_2AlC içeren kaplamada, Ti_2AlC 'nin yoğunluğu daha belirgin hale gelmektedir. Ti_2AlC 'nin karakteristik fazları, 35° ve 60° civarındaki piklerde daha yoğun bir şekilde gözlemlenmektedir. Nikel pikleri hala baskın olmakla birlikte, Ti_2AlC 'nin faz yoğunluğunun arttığı net olarak görülmektedir.

4. **Ni-%15 Ti₂AlC:** %15 Ti₂AlC içeren kaplama deseninde Ti₂AlC'nin faz yoğunluğu artmaya devam etmektedir. 35° ve 60°'deki Ti₂AlC pikleri, kaplamadaki sert fazların daha fazla olduğunu göstermektedir. Nikel fazı yine baskın olmakla birlikte, Ti₂AlC'nin varlığı ve kaplama içindeki katkısı daha belirgin hale gelmiştir.
5. **Ni-%30 Ti₂AlC:** %30 Ti₂AlC içeren kaplamada, Ti₂AlC fazı en baskın hale gelmiştir. Özellikle 35° ve 60° civarındaki pikler, Ti₂AlC'nin büyük ölçüde arttığını ve kaplama içindeki fazın önemli bir bölümünü oluşturduğunu göstermektedir. Nikel pikleri hala var olsa da Ti₂AlC'nin varlığı baskındır ve bu kaplama, sert faz katkısının maksimum düzeye ulaştığını göstermektedir.

Sonuç olarak kaplamalarının XRD desenleri, nikelin ana faz olduğunu ve Ti₂AlC oranının artmasıyla birlikte Ti₂AlC fazlarının ortaya çıktığını göstermektedir. Ti₂AlC içeriği arttıkça, kaplamalardaki sert faz miktarı artmakta ve bu fazın varlığı daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle %15 ve %30 Ti₂AlC içeren kaplamalarda Ti₂AlC'nin baskın bir faz olduğu görülmektedir.

5.2. Mikrosertlik Analizi

Saf Ni ve Ni-Ti₂AlC kaplamalar için elde edilen mikrosertlik değerleri Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Nikel matrisine Ti₂AlC partiküllerinin eklenmesiyle sertlikte bir artış olduğunu gösteren net bir eğilim sergilemektedir.



Şekil 5.15. Kaplanmış fren disklerinin mikrosertlik (HV) değerleri.

- **Saf Nikel (Ni):** Saf nikelin mikrosertlik değeri 301 HV olup tüm numuneler arasında en düşük değere sahiptir. Bu, kompozit kaplamaya kıyasla saf nikelin nispeten yumuşak doğası nedeniyle beklenen sonuçtur.
- **Ni + %5 Ti₂AlC:** %5 Ti₂AlC ilavesi ile mikrosertlik önemli ölçüde artarak 426 HV'ye çıkmaktadır. Bu MAX faz partiküllerinin nikel matrisine dahil edilmesi, Ti₂AlC partikülleri tarafından sağlanan dağılım güçlendirme etkisi nedeniyle sertliği arttırmıştır.
- **Ni + %10 Ti₂AlC:** Mikrosertlik %10 Ti₂AlC ile 482 HV'ye yükselmiştir. Ti₂AlC'nin daha büyük bir hacim fraksiyonunun nikel matrisin daha fazla güçlendirilmesine katkıda bulunduğunu ve girintiye karşı daha iyi direnç sağladığını göstermiştir.
- **Ni + %15 Ti₂AlC:** %15 Ti₂AlC'de mikro sertlik 578 HV'ye ulaşarak sertlik iyileştirme eğilimini sürdürmektedir.
- **Ni + %30 Ti₂AlC:** En yüksek mikrosertlik 632 HV değeriyle Ni + %30 Ti₂AlC kaplamada gözlemlenmiştir.

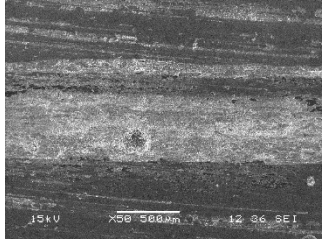
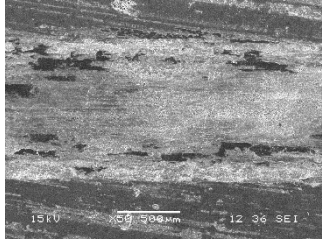
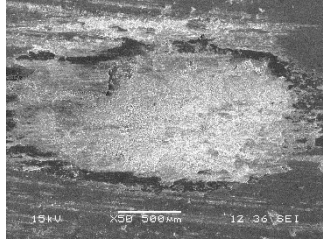
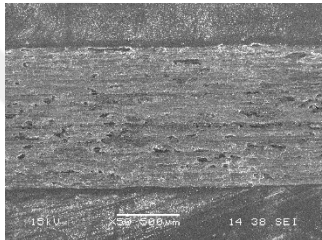
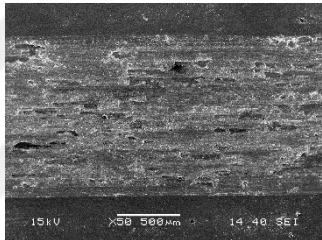
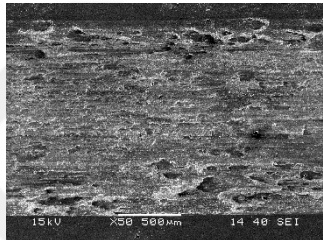
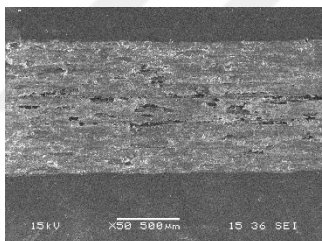
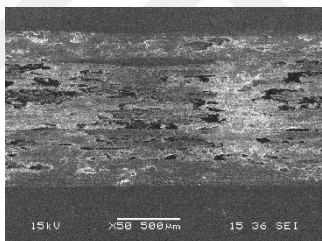
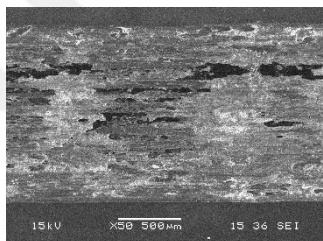
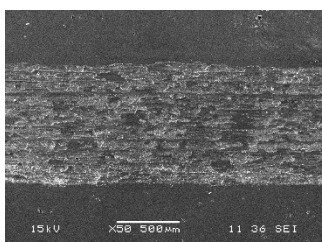
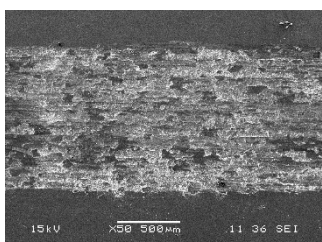
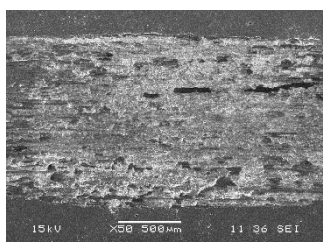
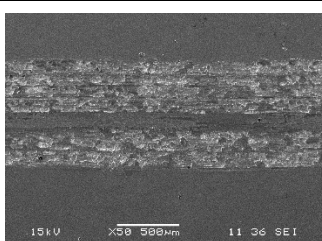
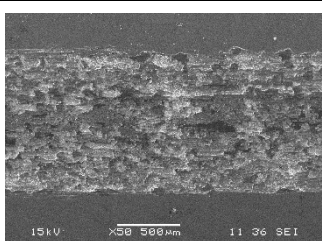
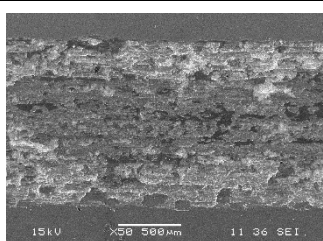
5.3. Tribolojik Parametre Karakterizasyonu

Aşınma testi görüntüleri Şekil 5.16'da, saf Ni kaplama ile Ti₂AlC katkılı Ni kaplamaların 1N, 3N ve 5N yükler altındaki aşınma davranışlarını karşılaştırmaktadır. Bu sonuçlar lazerle kaplanan numunelerin farklı aşınma koşullarında mikroyapısal özelliklerini değerlendirmektedir.

Aşınma izlerinin incelenmesi sonucunda, Ti₂AlC ilavesinin aşınma direnci üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir:

- **Saf Nikel Kaplama:** Saf nikel kaplama altında düşük yüklerde (1N), yüzeyde nispeten az deformasyon ve aşınma izleri gözlenmiştir. Yüzey düzgünlüğü korunmuş olup, aşınma mekanizması ağırlıklı olarak mikroplastik deformasyonla sınırlıdır. Yük artışıyla birlikte, aşınma izleri belirginleşmiş, yüzeyde mikroyapısal deformasyonlar ve pullanma (delaminasyon) görülmeye başlanmıştır. Özellikle 5N yükünde, saf nikel kaplamayüzeydeki aşınma daha geniş bir alanı kaplamakta ve malzemenin çıkarılmasıyla sonuçlanan yoğun bir aşınma şekli görülmektedir.

- **Ni + %5 Ti_2AlC :** 1N yükünde, yüzeyde daha ince çizikler ve hafif aşınma belirtileri gözlenmektedir. Ancak 3N ve 5N yüklerinde, Ti_2AlC 'nin katkısına rağmen aşınma izlerinde artış gözlemlenmiş, fakat saf nikel kaplamaya kıyasla deformasyon daha az yaygındır. Bu durum, Ti_2AlC katkısının sertlik ve aşınma direncini artırdığını göstermektedir.

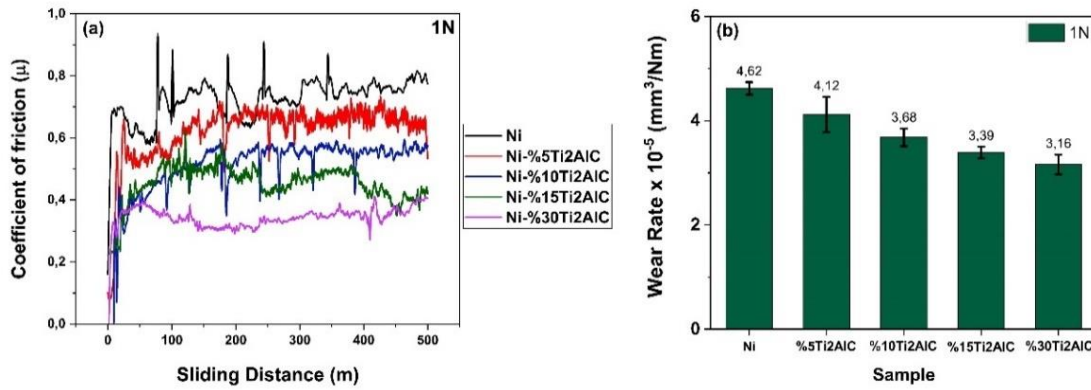
	1N	3N	5N
Saf			
Ni + %5 Ti_2AlC			
Ni + %10 Ti_2AlC			
Ni + %15 Ti_2AlC			
Ni + %30 Ti_2AlC			

Şekil 5.16. Kaplanmış numunelerin aşınma deneyi SEM görüntüleri.

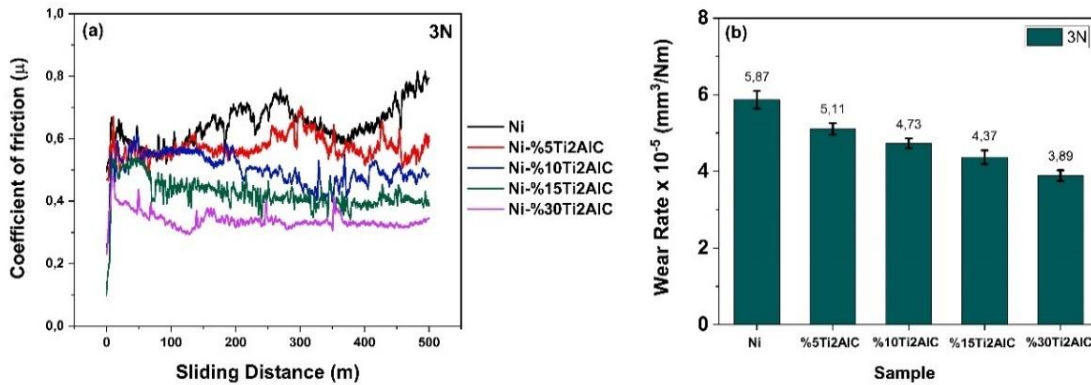
- **Ni + %10 Ti_2AlC :** %10 Ti_2AlC içeren kaplamada, aşınma izleri daha kontrollü gözükmekte olup, 3N ve 5N yüklerinde bile yüzeyin daha az zarar gördüğü

anlaşılmaktadır. Kaplamada ince çatlak oluşumu ve mikro pullanma meydana gelmesine rağmen, genel aşınma direnci saf Ni kaplamaya göre oldukça iyileşmiştir.

- **Ni + %15 Ti₂AlC:** Bu kaplama, Ti₂AlC içeriğinin daha yüksek olduğu bir kompozisyon olup, 1N yük altında yüzeyinde daha az aşınma izine rastlanmıştır. 3N ve 5N yüklerinde dahi minimal yüzey deformasyonu gözlenmiş, aşınma izlerinin genişliği diğer kompozisyonlara kıyasla daha düşük seviyededir. Ti₂AlC'nin aşınma direncine katkısı bu kompozisyonda oldukça belirgindir.
- **Ni + %30 Ti₂AlC:** En yüksek Ti₂AlC içeriğine sahip bu kaplama, 1N ve 3N yüklerinde daha az aşınma izine rastlanmıştır. 5N yükünde ise yüzeyde kısmi deformasyon ve aşınma izleri ortaya çıkmakla birlikte, aşınma davranışı oldukça kontrollüdür. Bu durum, yüksek Ti₂AlC oranının malzeme sertliğini artırarak aşınma direncini maksimum seviyeye çıkardığını göstermektedir.



Şekil 5.17. 1N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.

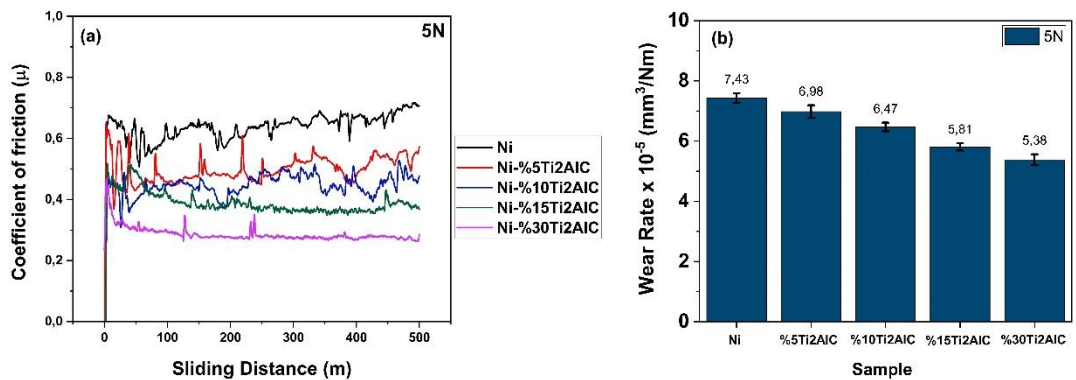


Şekil 5.18. 3N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.

Yukarıdaki şekiller, Ni ve Ti₂AlC katkılı Ni kaplamalarının farklı yükler (1N, 3N, 5N) altındaki sürtünme katsayısı sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, kaplamaların sürtünme davranışları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır ve kaplama malzemesinin aşınma direncinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Şekil 5.17’de, 1N yükünde gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçlarını sunmaktadır. Saf Ni kaplama ile Ti₂AlC katkılı kaplamalar karşılaştırıldığında, Ti₂AlC katkısının sürtünme katsayısının düşürülmesine katkı sağladığı açıkça görülmektedir. Saf Ni kaplama, başlangıçta yüksek bir sürtünme katsayısı (~0.8) ile dalgalı bir sürtünme performansı sergilerken, Ti₂AlC katkısı eklenen kaplamalarda bu durum iyileşmiştir. Ni + %5 Ti₂AlC kaplamada sürtünme katsayısı düşmesine rağmen dalgalanmalar hala belirgin olup, saf Ni’ye göre daha iyi bir performans sunmaktadır. Ni + %10 Ti₂AlC ve Ni + %15 Ti₂AlC kaplamalar, daha düşük ve stabil bir sürtünme katsayısı ile aşınma direncini artırarak daha tutarlı sonuçlar vermektedir. En iyi performans, %30 Ti₂AlC katkılı kaplamada gözlemlenmiş olup, sürtünme katsayısı yaklaşık 0.4’e düşmüş ve yüzey aşınması en düşük seviyede kalmıştır.

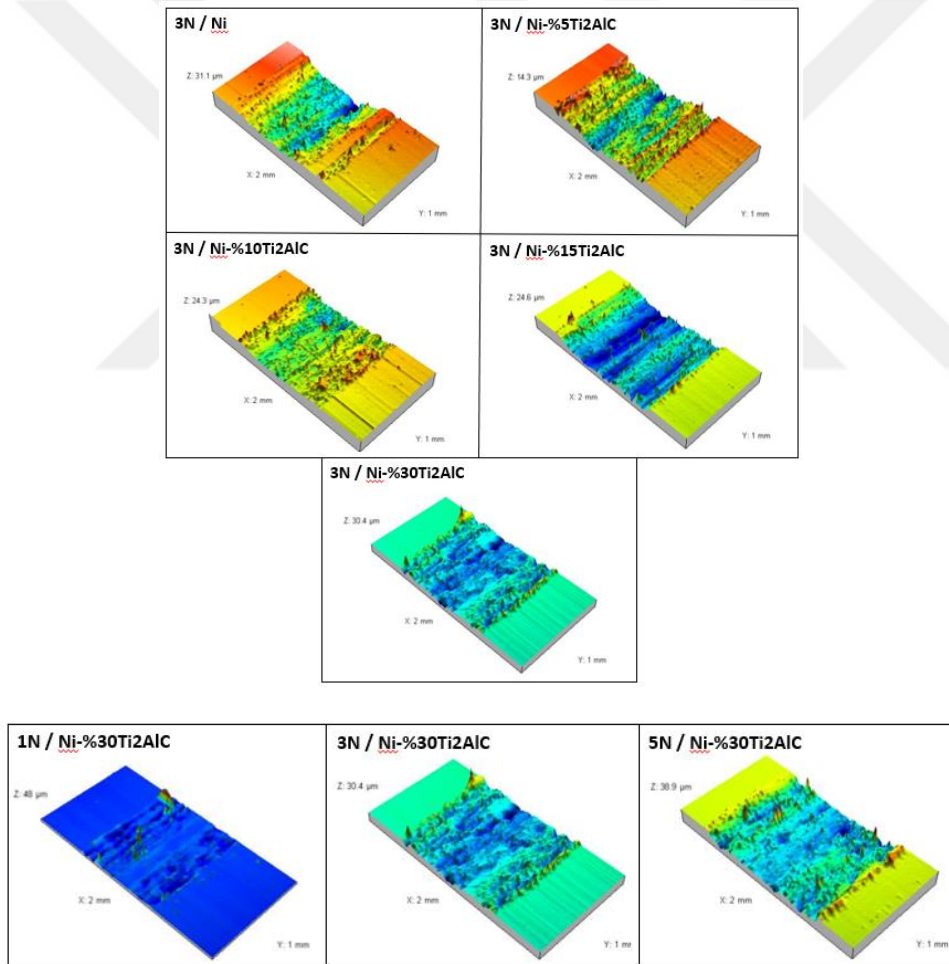
3N yükü altında yapılan aşınma testi sonuçlarına göre (Şekil 5.18), saf Ni kaplama yüksek bir sürtünme katsayısı (~0.7-0.8) sergilemeye devam etmiş ve test süresince artan bir eğilim göstermiştir. Bunun temel sebebi, yüzeydeki deformasyonla ilişkilidir. Ti₂AlC katkılı kaplamalarda ise sürtünme katsayısı daha düşük olup, %5 Ti₂AlC katkılı kaplamada dalgalanmalar görülse de saf Ni’ye göre daha iyi bir performans gösterilmiştir. %10 ve %15 Ti₂AlC katkılı kaplamalar, daha stabil bir sürtünme eğilimi sergileyerek aşınma direncini iyileştirmiştir. En iyi sonuç, %30 Ti₂AlC katkılı kaplamada gözlemlenmiş olup, en düşük sürtünme katsayısı ve dalgalanmaların neredeyse hiç olmamasıyla yüksek aşınma direnci sağlamıştır.



Şekil 5.19. 5N ile gerçekleştirilen aşınma testi sürtünme katsayısı sonuçları.

Şekil 5.19'da 5N yükü altında yapılan aşınma testi sonuçlarına göre, saf Ni kaplama diğer yük koşullarında olduğu gibi en yüksek sürtünme katsayısını (~ 0.8) göstermiş ve yüzeydeki aşınma ile deformasyon nedeniyle belirgin dalgalanmalar sergilemiştir. Ti_2AlC katkılı kaplamalar ise sürtünme katsayısını düşürmeye devam etmiştir; ancak %5 ve %10 Ti_2AlC katkılı kaplamalarda yük artışıyla birlikte dalgalanmalar görülmüştür. Buna karşın, %15 ve %30 Ti_2AlC katkılı kaplamalar en düşük sürtünme katsayısına ($\sim 0.4-0.5$) sahip olmuş ve aşınma direncinin en yüksek olduğu kaplamalar olarak öne çıkmıştır. Özellikle %30 Ti_2AlC katkılı kaplama, 5N yükü altında bile stabil ve düşük sürtünme katsayısı sergileyerek üstün aşınma direnci sağlamıştır.

5.4. Yüzey Topografisi



Şekil 5.20. Kaplama sonrası yüzey profilmetre görüntüleri.

Yukarıda (Şekil 5.20), farklı yükler altında Ni ve Ti_2AlC katkılı Ni kaplamaların profilometre ile elde edilen yüzey topografilerini göstermektedir. Bu analizler,

kaplama yüzeyindeki aşınma derinliğini ve yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

- **Ni Kaplama:** Saf nikel kaplamada aşınma bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü oldukça yüksektir ve aşınma izlerinin derinliği, yaklaşık 2.311 μm , maksimum seviyeye ulaşmıştır. Yüzeydeki dalgalanmalar ve büyük çıkıntılar aşınmanın yoğun olduğunu göstermektedir.
- **Ni + %5 Ti_2AlC :** Ti_2AlC ilavesiyle aşınma bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü azalmış ve aşınma derinliği 2.143 μm seviyelerine düşmüştür. Yüzeyde aşınma daha kontrollü olup, kaplama malzemesinin direncinin arttığı gözlemlenmektedir.
- **Ni + %10 Ti_2AlC :** %10 Ti_2AlC katkısıyla aşınma derinliği daha da azalmış (2.241 μm) ve yüzeydeki dalgalanmalar büyük oranda kontrol altına alınmıştır.
- **Ni + %15 Ti_2AlC :** %15 Ti_2AlC katkılı kaplama, daha düşük aşınma izleriyle (2.064 μm) kaplama yüzeyinde daha homojen bir yapı sergilemiştir.
- **Ni + %30 Ti_2AlC (3N):** Bu kaplama en düşük aşınma izlerine sahip olup, 2.034 μm , yüzeydeki pürüzlülük neredeyse minimum seviyededir. Ti_2AlC 'nin kaplama sertliğini ve aşınma direncini maksimum seviyeye çıkardığı görülmektedir.

Yüzey topografisi sonuçları, Ti_2AlC katkısının artmasıyla aşınma derinliğinin azaldığını ve yüzey pürüzlülüğünün kontrol altına alındığını göstermektedir. Özellikle yüksek oranda Ti_2AlC katkılı kaplamalar (Ni + %15 Ti_2AlC ve Ni + %30 Ti_2AlC), daha düşük aşınma derinlikleriyle yüksek aşınma direnci sergilemiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla lazer kaplama yöntemi ile saf nikel kaplama ve farklı oranlarda Ti_2AlC katkılı nikel kaplamalar kullanılarak, kaplamaların tribolojik performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Ti_2AlC katkısının kaplamaların aşınma direncini artırarak, tribolojik performanslarını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

- I. Saf nikel kaplamalar ile karşılaştırıldığında, Ti_2AlC katkılı kaplamaların aşınma direncinin belirgin şekilde arttığı ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Ti_2AlC katkılı nikel kaplamaların ağır ticari araç fren disklerinde kullanım için uygun olduğunu ortaya koymuştur.
- II. Lazer kaplama süreci sırasında Ti_2AlC partiküllerinin, kaplama malzemesi içinde homojen bir şekilde dağıldığı ve bu homojen dağılımın kaplama yüzeyinin sertliğini artırarak aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. SEM analizleri, kaplama kalınlığının yeterli olduğunu ve kaplamanın homojen yapısını koruduğunu göstermiştir.
- III. Mikrosertlik test sonuçlarına göre, Ti_2AlC katkısının kaplamaların mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değerinin, $Ni + \%30 Ti_2AlC$ kompozit kaplamada elde edildiği ve bu kaplamanın saf nikel kaplamalara kıyasla çok daha üstün mekanik dayanım gösterdiği saptanmıştır.
- IV. Yapılan aşınma ve tribolojik testler, Ti_2AlC katkılı kaplamaların aşınma direncinin saf nikel kaplamalara göre önemli ölçüde yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Kaplama yüzeylerinde minimum düzeyde deformasyon meydana gelmiş, katkı oranı arttıkça aşınma performansı da iyileşmiştir. Ayrıca, katkı yüzdesinin artışı ile daha düşük sürtünme katsayısına sahip olunmuştur.

- V. Yüzey topografisi analizleri, Ti_2AlC katkılı kaplamaların daha düzgün ve homojen bir yüzey yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Saf nikel kaplamalara kıyasla, Ti_2AlC katkısının yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve aşınma izlerini minimize ederek kaplamaların daha dayanıklı ve uzun ömürlü bir yüzey oluşturduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, lazer kaplama yöntemiyle üretilen Ti_2AlC katkılı nikel kaplamaların, ağır ticari araç fren disklerinde sürtünme ve aşınma performanslarını artırmada etkin olduğu, böylece bu kaplamaların gelecekte daha güvenli ve verimli fren sistemleri geliştirilmesine katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Alam, M. K., Urbanic, R. J., Nazemi, N., Edrisy, A. 2018. "Predictive modeling and the effect of process parameters on the hardness and bead characteristics for laser-cladded stainless steel". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4), 397-413.
- Ali, R., Song, P., Khan, M., Ali, S., Huang, T., Shakeel, ... Fazil, P. 2023. "Cyclic Oxidation and Diffusion-Controlled Performance of Ti₂AlC MAX-Phase Produced by Spark Plasma Sintering". *JOM*, 75(11), 4980-4992.
- Anton Paar. 2024, Eylül. "Anton Paar".
- ASM International. 1988. "*Casting*" (9th Edition, C. Volume 15). ASM International.
- ASM International. 1992. "*Friction, Lubrication, and Wear Technology*" (C. Volume 18). ASM International.
- Bao, J., Liu, J., Yin, Y., Liu, T. 2015. "Characterization and experiments on the friction catastrophe behaviors of brake material during emergency braking". *Engineering Failure Analysis*, 55, 55-62.
- Barsoum, M., El-Raghy, T. 2001. "The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials". *American Scientist*, 89(4), 334.
- Bhat, M. 2023. "*Hydraulic Regenerative Braking System*". Geliş tarihi gönderen http://www.2carpros.com/how_does_it_work/brakesystem.htm
- Bloemer, P. R. A., Pacheco, J. T., Cunha, A., Veiga, M. T., Filho, O. C. de M., Meura, V. H., Teixeira, M. F. 2022. "Laser Cladding of Inconel 625 on AISI 316L: Microstructural and Mechanical Evaluation of Parameters Estimated by Empirical-Statistical Model". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1), 211-220.
- Cai, Q., Li, G., Wu, B., Xu, S., Wang, L., Guo, Y. 2024. "Effect of TiC content on microstructure and properties of TiC/Ni60 coatings on Ti6Al4V alloy deposited by laser cladding". *Optics and Laser Technology*, 168.
- Callister, W. D., Rethvisch, D. G. 2009. "*Materials science and engineering: an introduction*" (8th ed.). Wiley.
- Cavaliere, P. 2020. "*Laser Cladding of Metals*". *Laser Cladding of Metals*. Springer International Publishing.
- Cheng, J., Xing, Y., Dong, E., Zhao, L., Liu, H., Chang, T., ... Wan, J. 2022, Ağustos 1. "An Overview of Laser Metal Deposition for Cladding: Defect Formation Mechanisms, Defect Suppression Methods and Performance Improvements of Laser-Cladded Layers". *Materials*. MDPI.
- Di, J., Yao, J., Li, M., Zhou, S., Wen, Y., Sun, H., ... Chen, C. 2022. "Research status of laser cladding material system on titanium alloy". İçinde *Journal of Physics: Conference Series* (C. 2256). Institute of Physics.

- Ding, Z., Fang, Z., Wang, G., Wu, C., Yang, S. 2023. "Microstructure and properties of Mo-Si-B-Y2O3 composite coating on nickel-based alloy by laser cladding". *Optics and Laser Technology*, 164.
- Faisal, H., Mohammed, F., Mohammed, J. 2022. "Design and Implementation of an Electromechanical Brake System". *Engineering and Technology Journal*, 40(1), 31-39.
- Fan, Y., Zhao, Y., Liu, Y., Xie, S., Ge, C., Han, X., Chen, H. 2023. "Parameter Optimization and Mechanical Properties of Laser Cladding of 316L Stainless Steel Powder on G20Mn5QT Steel". *Coatings*, 13(3).
- Fenton, J. 1996. "*Handbook of Automotive Design Analysis*". Warrendale.
- Filipe, D., Pereira Correia Da Silva, S., Delfim, D., Soares, F. 2015. "*Mechanical, fatigue and wear properties of sintered Carbon Nanotube-based functionally graded materials Universidade do Minho Escola de Engenharia*".
- Ghasempour-Mouziraji, M., Lagarinhos, J., Afonso, D., Alves de Sousa, R. 2024, Mart 1. "A review study on metal powder materials and processing parameters in Laser Metaleposition". *Optics and Laser Technology*. Elsevier Ltd.
- Gibson, Ian. · R. David. S. B. 2015. "*Additive Manufacturing Technologies*" (C. 2). Springer.
- Graf, B., Ammer, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. 2013. "Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications". *Içinde Procedia CIRP* (C. 11, ss. 245-248). Elsevier B.V.
- GTV Verschleißschutz GmbH. "GTV SPRAY POWDER CATALOGUE according to DIN EN 1274" (2024). Geliş tarihi gönderen <http://www.gtv-mbh.de>
- Hosseini-Zadeh, M., Mirzaee, O., Mohammadian-Semnani, H. 2019. "An investigation into the microstructure and mechanical properties of V 4 AlC 3 MAX phase prepared by spark plasma sintering". *Ceramics International*, 45(6), 7446-7457.
- Hua, X., Zeng, J., Li, H., Huang, J., Luo, M., Feng, X., ... Wu, W. 2023, Nisan 1. "A Review of Automobile Brake-by-Wire Control Technology". *Processes*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Hutchings, I. M. ., Shipway, Philip. 2017. "*Tribology: friction and wear of engineering materials*". Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.
- ISO 9147. "Pig-irons - Definition and classification", International Organization For Standardization § (1987). Geliş tarihi gönderen <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/063d8f95-cec9-4db4-afef->
- JEOL Benelux. 2024, Eylül. " JEOL Benelux".
- Jin, L., Jiang, K., Kang, L., Yan, B. 2022. "Laser Cladding on Copper with Composite Powder C-Al2O3-Cu". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(2), 1317-1324.
- Jing, S., Li, Y., Cai, Y., Tan, N., Li, Q., Zhang, G., Li, G. 2024. "Investigation on microstructure and tribological properties of Ti2AlC-Ni reinforced Fe-based prepared by high-speed laser cladding". *Surface and Coatings Technology*, 489.

- John Solomon, I., Sevvell, P., Gunasekaran, J., Tanushkumaar, P. 2022. "A review on additive manufacturing of alloys using laser metal deposition". *Materials Today: Proceedings*, 64, 44-50.
- Kamal K. Kar. 2017. "*Composite Materials. Processing, Applications, Characterizations*". Springer.
- KLA. 2024, Eylül. "KLA". Geliş tarihi 15 Eylül 2024, gönderen <https://www.kla.com/>
- Leica Microsystems Wetzlar GmbH. t.y. "Leica VMHT - Microhardness Tester". Leica Microsystems Wetzlar GmbH.
- Li, C., Yang, H. I. 2023. "Optimized shape for improved cooling of ventilated discs". *Alexandria Engineering Journal*, 79, 556-567.
- Limpert, R. 1999. "*Brake Design and Safety Second Edition*" (Second). SAE. Geliş tarihi gönderen www.sae.org/BOOKSTORE
- Liu, Y., Gu, X., Lou, C., Kang, L., Hou, Q., Ma, C. 2023. "Influence of WC ceramic particles on structures and properties of laser cladding Ni50-WC coatings". *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 14-21.
- Ludema, K. C. . 1996. "*Friction, wear, lubrication : a textbook in tribology*". CRC Press.
- Mădălin-Florin, P., Nicolae-Vlad, B. 2019. "Study of Brake System Parameters for Commercial Vehicles" (ss. 686-694).
- Mahamood, R. M. 2018. "*Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*" (C. 1). Springer Nature. Geliş tarihi gönderen <http://www.springer.com/series/4604>
- Maroli, B., Dizdar, S. t.y. "*Effect of Type and Amount of Tungsten Carbides on the Abrasive Wear of Laser Cladded Nickel Based Coatings*".
- Martin Vinoth, S., Dinesh Babu, P., Marimuthu, P., Phalke, S. S. 2018. "Laser cladding of nickel powder on AISI 202 stainless steel and optimization of the process parameters". İçinde *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (C. PartF7, ss. 197-203). Pleiades journals.
- Maske, P., Purnapatre, S., Agrawal, M., Chel, A., Student, U. G. 2020. "*Transient Thermal and Static Structural Analysis of Vented Disc Rotors*" (C. 7). Geliş tarihi gönderen www.jetir.org
- Michel W. Barsoum. 2013. "*MAX Phases - Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides*". Wiley.
- Miguel, F., Ramalho, Q. 2019. "*Study of the Laser Metal Deposition (LMD) technology in the automotive industry Master degree in Automotive Engeneering*" (Master degree). Institute of Leiria.
- Olakanmi, E. O. 2013. "Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties". *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8), 1387-1405.
- Olympus Global. 2024, Eylül. "Olympus Global".
- Radovic, M., Barsoum, M. W. 2013. "*MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics bulletin*". Geliş tarihi gönderen www.ceramics.org

- Rafiei, J., Soheil Shamaee, M., Ghasemi, A. R. 2024. "Process parameter optimization of WC/Inconel 625 metal matrix composites laser cladding based on the Taguchi approach and NSGA-II algorithm". *Soft Computing*.
- Raj, D., Maity, S. R., Das, B. 2024. "Optimization of Process Parameters of Laser Cladding on AISI 410 Using MEREC Integrated MABAC Method". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(8), 10725-10739.
- Reddy, A. C. 2018. *"Metal Matrix Composites-Their Properties And Applications"*.
- Reif, K. 2014. *"Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems"*. Springer.
- Rigaku. 2024, Eylül. "Rigaku ".
- Salot, M., Singh Sain, M., Shah, S., Joshi, M. 2016. *"Study On Wear Resistance Of Al-Si Alloy Using A 3-Body Dry Abrasive Wear Testing Machine"*. Geliş tarihi gönderen <https://www.researchgate.net/publication/332780432>
- Segerstark, A. 2017. *"Laser Metal Deposition using Alloy 718 Powder Influence of Process Parameters on Material Characteristics"* (PhD Thesis). University West, Trollhättan.
- Silfvast, W. T. 2004. *"Laser fundamentals"* (C. 2nd edition). Cambridge University Press.
- Telasang, G., Dutta Majumdar, J., Wasekar, N., Padmanabham, G., Manna, I. 2015. "Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad and Post-cladding Tempered AISI H13 Tool Steel". *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 46(5), 2309-2321.
- Terwey, J. T., Fourati, M. A., Pape, F., Poll, G. 2020. "Energy-based modelling of adhesive wear in the mixed lubrication regime". *Lubricants*, 8(2).
- The European Parliament. "Regulation Of The European Parliament And Of The Council - on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7)", 109 European Union § (2024).
- UN/ECE. "Regulation No. 13 Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking", Economic Commission for Europe of the United Nations § (2016). Geliş tarihi gönderen <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>
- UniqueTech Group. 2024, Eylül. "UniqueTech Group". Geliş tarihi 15 Eylül 2024, gönderen <https://www.uniquetech.com.tr/>
- Walia, M. Singh. 2019. *"Mechanical braking systems for trains : a study of temperatures, fatigue and wear by experiments and simulations"*. Department of Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers University of Technology.
- Wang, S., Shi, W., Cheng, C., Liang, F., Li, K. 2023. "Effect of Process Parameters on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni60+30%WC Coating on Q235 Steel". *Materials*, 16(22).
- Weng W. Chow, S. W. K. 1999. *"Semiconductor Laser Fundamentals"*. Springer.

- Xu, J. S., Zhang, X. C., Xuan, F. Z., Wang, Z. D., Tu, S. T. 2014. "Rolling contact fatigue behavior of laser cladded WC/Ni composite coating". *Surface and Coatings Technology*, 239, 7-15.
- Y. G. Gogotsi, R. A. A. 1999. "*Materials Science of Carbides, Nitrides and Borides*". *Materials Science of Carbides, Nitrides and Borides*. Springer Netherlands.
- Yinghua, L., Xuelong, P., Jiakai, K., Yingjun, D. 2020, Ocak 1. "Improving the microstructure and mechanical properties of laser cladded Ni-based alloy coatings by changing their composition: A review". *Reviews on Advanced Materials Science*. Walter de Gruyter GmbH.
- Zhao, H., Zhao, C., Xie, W., Wu, D., Du, B., Zhang, X., ... Sheng, L. 2023, Nisan 1. "Research Progress of Laser Cladding on the Surface of Titanium and Its Alloys". *Materials*. MDPI.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emin Emre GÖKTEPE

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ocak 2021- Haziran 2021 yılları arasında Vespro'da Proje Mühendisi olarak çalıştı.
- Haziran 2021- Ocak 2023 yılları arasında Tırsan 'da Ürün Geliştirme Mühendisi olarak çalıştı.
- Ocak 2023-Halen Ford Otosan'da Şasi Mühendisi olarak çalışmaktayım.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Göktepe E. E. ve Uysal M. (2024, 1-2, Mayıs). Investigation Of Friction And Wear Properties Of Brake Discs Used In Heavy Commercial Vehicles. *Topkapı Bilimsel Araştırmalarda Güncel Gelişmeler Kongresi- ISPEC Institute*, İstanbul, Turkey.