



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LAZER KAPLAMA PROSESİNDE WC VE B₄C TAKVİYESİNİN
METAL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARDA MİKROYAPI,
MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Necmettin IŞIK

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LAZER KAPLAMA PROSESİNDE WC VE B₄C TAKVİYESİNİN
METAL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARDA MİKROYAPI,
MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Necmettin IŞIK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR**

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Anıl İMAK

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Necmettin IŞIK tarafından hazırlanan “Lazer Kaplama Prosesinde WC ve B₄C Takviyesinin Metal Esaslı Kompozit Kaplamalarda Mikroyapı, Mekanik ve Aşınma Özellikleri Üzerindeki Etkisi.” adlı tez çalışması 26/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Anıl İMAK

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Necmettin IŞIK
Tarih: 26.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

LAZER KAPLAMA PROSESİNDE WC VE B₄C TAKVİYESİNİN METAL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARDA MİKROYAPI, MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Necmettin IŞIK

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR

İkinci Danışman: Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

2025, 91 Sayfa

Son yıllarda gelişen yüzey modifikasyon teknikleri arasında öne çıkan lazer kaplama yöntemi yüksek enerji yoğunluğu, düşük ısı girdisi, üstün kaplama-altlık dayanımı ve kontrollü mikroyapı oluşumu gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle aşınma, oksidasyon ve yüksek sıcaklık gibi zorlu servis koşullarına karşı direnç sağlamak amacıyla metal matrisli kompozit kaplamalar bu alanda dikkat çekmektedir. Bu tür kaplamalar matris fazına ilave edilen seramik takviyeler sayesinde sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi özelliklerde belirgin iyileşmeler sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, düşük karbonlu St37 çelik malzemesi üzerine lazer kaplama yöntemiyle FeCr esaslı bir matris içinde WC ve B₄C takviyeli kaplamalar uygulanmış; WC içeriği %0, 10, 20, 30 ve 40 olacak şekilde beş farklı kaplama kompozisyonu hazırlanmıştır. Lazer kaplama işleminde toz karışımları altlık yüzeye jel formunda uygulanmış ardından belirlenen sabit lazer parametreleri ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede aşınma direncinin ve yüzey sertliğinin artırılması hedeflenmiştir. Kaplamaların mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri farklı analiz ve test yöntemleri kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir. Mikroyapısal incelemelerde, WC katkısının artmasıyla birlikte mikroyapıdaki faz çeşitliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak %30' un üzerindeki takviye oranlarında çözünmemiş WC parçacıkları ve faz ayrışmaları nedeniyle yapısal sürekliliğin kısmen bozulduğu tespit edilmiştir. EDS analizleri Cr, W ve C elementlerinin çökeltiler çevresinde yoğunlaştığını, XRD analizleri ise kaplama bölgesinde WC, W₂C, M₇C₃ ve M₂₃C₆ gibi karbür fazlarının oluştuğunu göstermiştir. Mikrosertlik ölçümleri, sertlikte belirgin artışlar sağlandığını göstermiştir. N0 numunesinde ortalama sertlik 353.2 HV iken, bu değer N40 numunesinde 790.6 HV' ye ulaşmıştır. Aşınma testleri ve yüzey morfolojisi analizleri sonucunda kaplamasız K numunesinde yoğun plastik deformasyon izleri, oksitlenme ve derin aşınma olukları gözlemlenmiş, WC katkısıyla bu etkiler giderek azalmış ve N40 numunesinde yüzey deformasyonları büyük ölçüde bastırılmıştır. Aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı verileri de bu bulguları desteklemiş, N40 numunesi tüm numuneler arasında en düşük aşınma hacmi ve ortalama sürtünme katsayısı değerlerine ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer kaplama, metal matrisli kompozit, WC takviyesi, B₄C takviyesi, mikroyapı evrimi, aşınma davranışı.

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF WC AND B₄C REINFORCEMENT ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND WEAR PROPERTIES OF METAL-BASED COMPOSITE COATINGS IN LASER CLADDING PROCESS

Necmettin IŞIK

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Fatih DEMİR

Co-Advisor: Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

2025, 91 Pages

Laser cladding, a prominent surface modification technique developed in recent years, is widely preferred due to its advantages such as high energy density, low heat input, superior coating-substrate strength, and controlled microstructure formation. Metal-matrix composite coatings are attracting particular attention in this field for providing resistance to harsh service conditions such as wear, oxidation, and high temperatures. These coatings offer significant improvements in properties such as hardness, wear resistance, and thermal stability thanks to the addition of ceramic reinforcements to the matrix phase.

In this thesis, WC and B₄C reinforced coatings were applied to low-carbon St37 steel in a FeCr-based matrix by laser cladding. Five different coating compositions were prepared, with WC contents of 0, 10, 20, 30, and 40%. In the laser cladding process, the powder mixtures were applied to the substrate surface in a gel-form consistency and then the coating process was carried out using fixed laser parameters. This aimed to increase wear resistance and surface hardness. The microstructural, mechanical, and tribological properties of the coatings were investigated in detail using different analysis and testing methods. Microstructural investigations revealed that the phase diversity in the microstructure increased with increasing WC addition. However, it was determined that structural continuity was partially disrupted at reinforcement ratios above 30% due to undissolved WC particles and phase separation. EDS analyses showed that Cr, W, and C elements concentrated around the precipitates, while XRD analyses showed the formation of carbide phases such as WC, W₂C, M₇C₃, and M₂₃C₆ in the coating region. Microhardness measurements showed significant increases in hardness. While the average hardness was 353.2 HV in the N0 sample, this value reached 790.6 HV in the N40 sample. Wear tests and surface morphology analyses revealed intense plastic deformation traces, oxidation, and deep wear grooves in the uncoated K sample. These effects gradually diminished with the addition of WC, and surface deformations were largely suppressed in the N40 sample. Wear volume and coefficient of friction data also supported these findings, with the N40 sample achieving the lowest wear volume and average coefficient of friction values among all samples.

Keywords: Laser cladding, metal matrix composite, WC reinforcement, B₄C reinforcement, microstructure evolution, wear behavior.

ÖN SÖZ

Lazer kaplama prosesinde WC ve B₄C takviyesinin metal esaslı kompozit kaplamalarda mikroyapı, mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi adlı bu tez çalışması, lisansüstü eğitimim süresince hem teorik hem de uygulamalı birçok konuyla derinlemesine ilgilenme fırsatı bulmuş, bilimsel düşünme ve analiz yeteneklerimi geliştirme imkânı elde etmiş bulunmaktayım.

Bu çalışmada bana yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR' e katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmada lazer kaplama uygulamalarındaki katkılarından dolayı Prof. Dr. Mehmet EROĞLU' na, analizlerin ve testlerin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Anıl İMAK ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Necmettin IŞIK
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Hedefleri	3
1.2. Literatür Taraması.....	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Lazer Teknolojisi ve Çalışma Prensipleri	10
2.1.1. Lazer kaynak çeşitleri	12
2.1.2. Lazer-iş parçası etkileşimi	14
2.1.3. Lazer parametrelerinin etkisi	16
2.2. Yüzey Kaplama Teknolojisi	19
2.2.1. Kaplama yöntemleri sınıflandırması.....	22
2.2.2. Lazerle kaplama tekniği ve avantajları	23
2.2.3. Yüzey kaplamada kullanılan toz malzemeler	24
2.3. Malzeme Bilimi Temelleri	26
2.3.1. Demir ve alaşımlarının yapısı	28
2.3.2. WC ve B ₄ C takviye elemanları	29
2.3.3. Lazerle işlenebilir malzeme türleri	30
2.3.4. Yüzey sertliği, aşınma ve korozyon kavramları	31
3. YÖNTEM	34
3.1. Lazer Kaplama Uygulamaları	34
3.2. Mikroyapı Analizleri.....	42
3.3. Sertlik ve Aşınma Testleri	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu	50
4.1.1. OM ve SEM görüntüleri	50
4.1.2. EDS analizleri	59
4.1.3. XRD analizleri	66
4.2. Mikrosertlik Ölçümleri	68
4.3. Aşınma Testleri.....	70
4.1.1. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri.....	70

4.1.2. Aşınma hacimleri ve sürtünme katsayıları.....	74
4.1.3. Aşınma izlerinin EDS analizleri	77
4.1.2. 3D profilometre analizleri.....	81
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
5.1 Sonuçlar	83
5.2 Öneriler	84
KAYNAKLAR	86



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. St37 çelik malzemesinin kimyasal bileşimi	35
Çizelge 3.2. Kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri.....	35
Çizelge 3.3. Kaplama tozlarının karışım oranları	37
Çizelge 3.4. Lazer kaplama parametreleri	38
Çizelge 3.5. Numune numaraları ve kaplama karışımları	41
Çizelge 3.6. Aşınma testi parametreleri.....	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Lazer çalışma prensibi	11
Şekil 2.2. Bir lazer kaynak makinesinin temel elemanlar	13
Şekil 2.3. Lazerle kesim çalışma prensibi	15
Şekil 2.4. Lazer makinesinin gösterimi	17
Şekil 2.5. Lazer kaplama prosesi ve çalışma prensibi	20
Şekil 3.1. St37 çelik malzemesi	35
Şekil 3.2. Kaplama tozları	36
Şekil 3.3. Tav fırını (a) ve hassas terazi (b)	37
Şekil 3.4. Sodyum silikat (a), kaplama numuneleri (b) ve kaplama katmanının hazırlanması (c)	38
Şekil 3.5. Lazer kaplama uygulamalarının şematik gösterimi	39
Şekil 3.6. Lazer kaynak ünitesi ve yüzey kaplama işlemi	40
Şekil 3.7. Kaplamalı numuneler (a) ve kaplamasız numune (b)	40
Şekil 3.8. Kesme cihazı (a) ve parlatma cihazı (b)	41
Şekil 3.9. Metalografi numuneleri (a), aşınma numuneleri (b) ve dağlama sonrası metalografi numuneleri (c)	42
Şekil 3.10. Optik mikroskop	43
Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu	44
Şekil 3.12. X-ışını difraksiyonu analiz cihazı (a) ve toz numune kaplama cihazı (b)	45
Şekil 3.13. Mikrosertlik ölçüm cihazı	46
Şekil 3.14. Aşınma test cihazı	47
Şekil 3.15. Aşınma testi sonrası numuneler ve aşınma izleri	48
Şekil 3.16. 3D optik profilometre cihazı	49
Şekil 4.1. N0 numunesinin OM görüntüleri	51
Şekil 4.2. N10 numunesinin OM görüntüleri	51
Şekil 4.3. N20 numunesinin OM görüntüleri	52
Şekil 4.4. N30 numunesinin OM görüntüleri	52
Şekil 4.5. N40 numunesinin OM görüntüleri	53
Şekil 4.6. Kaplama tozlarının SEM görüntüleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B ₄ C tozu	54
Şekil 4.7. N0 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası	55
Şekil 4.8. N10 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası	56
Şekil 4.9. N20 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası	56
Şekil 4.10. N30 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası	57
Şekil 4.11. N40 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası	57
Şekil 4.12. Kaplama tozlarının EDS analizleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B ₄ C tozu	59
Şekil 4.13. N0 numunesinin EDS analizi; a) altlık malzeme, b) kaplama tabakası, ...	60
Şekil 4.14. N10 numunesinin EDS analizi	62
Şekil 4.15. N20 numunesinin EDS analizi	63
Şekil 4.16. N30 numunesinin EDS analizi	63
Şekil 4.17. N40 numunesinin EDS analizi	64
Şekil 4.18. Kaplama tozlarının XRD analizleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B ₄ C tozu	66
Şekil 4.19. N0, N20 ve N40 numunelerinin XRD analizleri	67
Şekil 4.20. Numunelerin mikrosertlik değerleri (a) ve kaplamaların ortalama mikro sertlikleri	69
Şekil 4.21. K numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	71
Şekil 4.22. N0 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	72

Şekil 4.23. N20 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	73
Şekil 4.24. N40 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	73
Şekil 4.25. Numunelerin aşınma hacimleri (a) ve spesifik aşınma hacimleri (b).....	75
Şekil 4.26. Numunelerin sürtünme katsayıları (50m kayma mesafesi).....	76
Şekil 4.27. Numunelerin sürtünme katsayıları (75m kayma mesafesi).....	76
Şekil 4.28. Numunelerin sürtünme katsayıları (100m kayma mesafesi).....	76
Şekil 4.29. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	77
Şekil 4.30. K numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	78
Şekil 4.31. N0 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	79
Şekil 4.32. N20 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	79
Şekil 4.33. N40 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi	80
Şekil 4.34. K numunesi aşınma izinin 3D profilometre analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi.....	81
Şekil 4.35. N0 ve N40 numunelerinin 100m kayma mesafesi sonrası aşınma izlerinin 3D profilometre analizleri.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Ar	: Argon
B	: Bor
B ₄ C	: Bor Karbür
C	: Karbon
Co	: Kobalt
CO ₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
FeCr	: Ferro Krom
FeMn	: Ferro Mangan
FeSi	: Ferro Silisyum
Fe ₃ C	: Sementit
Fe ₃ W ₃ C	: Demir-Tungsten Karbür (η-Karbür)
Fe ₆ W ₆ C	: Demir-Tungsten Karbür (η-Karbür)
HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidroflorik
HNO ₃	: Nitrik Asit
Mn	: Mangan
M ₇ C ₃	: Krom Karbür
M ₂₃ C ₆	: Krom Esaslı Karbür
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Ti	: Titanyum
TiC	: Titanyum Karbür
W	: Tungsten
WC	: Tungsten Karbür
W ₂ C	: Tungsten Karbür
ZrO ₂	: Zirkonyum Dioksit
α	: Ferrit
α'	: Martenzit
γ	: Östenit
θ	: Sementit

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BCC	: Hacim Merkezli Kübik
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
CW	: Sürekli Dalga
DED	: Doğrudan Metal Biriktirme

DF	: Döteryum Florür
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
FCC	: Yüzey Merkezli Kübik
HAZ	: Isıdan Etkilenen Bölge
HCP	: Hegzagonal Sıkı Paket
HEA	: Yüksek Entropili Alaşım
HV	: Vickers Sertliği
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	: Metal Aktif Gaz Kaynağı
MIG	: Metal İnert Gaz Kaynağı
MMC	: Metal Matrisli Kompozit
Nd:YAG	: Neodimyum Katkılı İttriyum Alüminyum
OM	: Optik Mikroskop
TIG	: Tungsten İnert Gaz Kaynağı
PTA	: Plazma Transfer Ark Kaynağı
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesi ve mekanik parça kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, farklı işlevsel özelliklere sahip birçok alaşım geliştirilmiştir. Ancak bazı zorlu uygulamalarda, bu alaşımların performansı yetersiz kalabilmektedir. Bu tür durumlarda; sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı ve sürtünme direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla malzemelerin yüzeylerine çeşitli yüzey mühendisliği işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler sonucunda, alaşım yüzeyinde koruyucu bir tabaka ya da farklı bir mikro yapı oluşturularak istenilen özellikler elde edilebilmektedir.

Yapılan araştırmalar ve uygulamalar, lazer kaynağı ile yüksek kalitede bir birleştirme elde edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle lazer kaynak, bilimde üzerine araştırmalar yapılması teknolojide ise uygulama alanlarının genişletilmesi ve geliştirilmesi gereken bir malzeme işleme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Özcan vd., 2004).

Aşırı çalışma koşulları; metal şekillendirme, 800°C–1000°C aralığındaki yüksek sıcaklıklı uygulamalar, uzay, havacılık, enerji ve otomotiv sektörleri ile maden işleme ve petrol çıkarma gibi çamurlu ve aşındırıcı ortamları içermektedir. Bu tür zorlu koşullarda, yüksek performanslı süper alaşımlar çoğu zaman kaçınılmaz hale gelmektedir.

İncelenen bir diğer değişken ise kaynak işleminde kullanılan hız parametresidir. Yapılan çalışmalarda, kaynak hızının artırılmasıyla birlikte kaynak dikişinin genişliğinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu daralmanın temel nedeni, artan hızla birlikte ısı girdisinin düşmesi ve dolayısıyla eriyen kaynak metalinin miktarının azalmasıdır. Ayrıca, kaynak hızındaki artış ısıнын iş parçasına daha sınırlı bir şekilde aktarılmasına yol açmakta ve bunun sonucunda ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) daha dar ve belirgin bir profil sergilediği görülmektedir (Uzun ve Keleş, 2012).

Bu bağlamda yüzey kaplama teknolojileri, mühendisliğin çağdaş gereksinimlerine yanıt verebilecek nitelikte çok yönlü çözümler sunmakta; temel malzemenin çekirdek özelliklerine zarar vermeden yüzeyin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini fonksiyonel olarak geliştirme olanağı sağlamaktadır. Geleneksel kaplama yöntemlerinin ötesine geçerek daha kontrollü, tekrarlanabilir ve yüksek hassasiyetli uygulamaların

gerekliliği, lazerle yüzey işleme teknolojilerinin yükselişini beraberinde getirmiştir (Zhou vd., 2025).

Lazer teknolojisi, 1960'lı yıllarda ilk defa geliştirildiğinden bu yana, optik iletişimden biyomedikal uygulamalara, savunmadan uzaya kadar geniş bir yelpazede yaygınlaşmış; son yıllarda ise özellikle malzeme işleme alanında ulaştığı doğruluk, hız, enerji verimliliği ve otomasyon kabiliyeti ile klasik yöntemlere alternatif bir platform haline gelmiştir (De Hosson, vd., 2009).

Lazer ışınının monokromatik, koherent, yönlendirilmiş ve yoğunlaştırılabilir özellikte olması, onu yüzey mühendisliği açısından eşsiz kılar. Lazer–malzeme etkileşiminin çok kısa sürede ve lokalize olarak gerçekleşmesi sayesinde, sadece hedeflenen alan işlenebilirken, komşu bölgelerde minimum termal etki ve deformasyon oluşmaktadır. Bu zellik, özellikle hassas toleransların söz konusu olduğu ileri mühendislik uygulamalarında lazer destekli yüzey kaplama ve sertleştirme işlemlerinin tercih edilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan, lazer ışınının taşıdığı enerjinin foton bazlı olması, atom düzeyinde kontrollü enerji transferine olanak tanımakta ve bu yönüyle mikroyapı mühendisliğine doğrudan katkı sunmaktadır (Liu vd., 2023).

Lazerle kaplama işlemi, yüksek yoğunluklu lazer ışını ile toz ya da tel formundaki kaplama malzemesinin temel malzeme yüzeyinde kontrollü biçimde ergitilerek bir tabaka oluşturulması esasına dayanmaktadır. Bu süreçte, lazer parametrelerinin (g, tarama hızı, odak uzaklığı, besleme debisi vb.) doğru seçilmesi ve optimize edilmesi, elde edilecek kaplamanın kalitesini, homojenliğini, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Lazerle kaplamanın, geleneksel termal spre y veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemlerine göre en büyük avantajı, yüzey ile kaplama arasında metalurjik bir bağ oluşmasına olanak tanınmasıdır. Bu bağ, yüzeyde oluşan ergiyik havuzun hızlı katılaşmasıyla birlikte oluşur ve son derece yüksek yapışma mukavemeti sağlamaktadır. Ayrıca bu hızlı katılaşma süreci, ince taneli, yönlü büyüme göstermiş ve i gerilmesi düşük mikro yapılar oluşturulmasına imkân tanımaktadır. Bu yönüyle lazerle kaplama, sadece yüzeyin sertliğini değil, aynı zamanda aşınma, korozyon, oksidasyon ve yorulma direncini de arttırarak parçanın toplam servis mrnu uzatmaktadır (Florian vd., 2020; Reif, 2018).

Bu çalışmada, lazerle yüzey kaplama teknolojisi kapsamlı bir şekilde ele alınmakta; kullanılan lazer türleri, lazer-parametre-malzeme etkileşim mekanizmaları, kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması ve kullanılan toz malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri detaylı biçimde incelenmektedir. Lazer kaplama süreçlerinde, lazer

ışını ile malzeme yüzeyi arasındaki etkileşim, ortaya çıkan ergiyik havuzun dinamiğini, katılma mikroyapısını ve son kaplamanın mekanik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, işlem sırasında kullanılan lazerin dalga boyu, güç yoğunluğu, tarama hızı, odaklama mesafesi gibi parametreler kritik rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, yüzey kaplamada sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi temel performans göstergelerinin lazer parametrelerine bağlı olarak nasıl şekillendiği, deneysel ve literatüre dayalı verilerle desteklenmektedir.

Araştırmanın özgünlüğü, lazerle kaplama işlemlerinde kullanılan toz malzemelerin yapısal ve işlevsel özelliklerini, lazer-malzeme etkileşim fiziğini ve işlem parametrelerinin mikroyapısal çıktılar üzerindeki etkisini disiplinler arası bir yaklaşımla ele alıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, yüzey mühendisliği, malzeme bilimi, lazer fiziği ve proses optimizasyonu gibi farklı alanlar arasında kurulan bağlam üzerinden, lazerle kaplama teknolojisinin endüstriyel ve bilimsel potansiyeli bütüncül bir şekilde ortaya konulmaktadır. Günümüzde özellikle savunma, havacılık, enerji, tıp ve ulaşım gibi yüksek güvenilirlik gerektiren sektörlerde, yüzey modifikasyonuna yönelik teknolojilere duyulan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Bu çerçevede, lazerle yüzey kaplama; yalnızca bir üretim tekniği değil, aynı zamanda stratejik bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmekte, malzeme performansının bütünsel olarak iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Hedefleri

Günümüzde mühendislik sistemlerinde performans beklentilerinin yükselmesi, malzeme teknolojilerinin yalnızca hacimsel özellikler üzerinden değil, özellikle yüzey özellikleri bağlamında da geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle sürtünme, korozyon, yorulma, termal gerilim ve kimyasal bozulma gibi dış çevre kaynaklı etkilere maruz kalan parçaların yüzeylerinin, işlevsel olarak güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda geliştirilen yüzey kaplama teknolojileri, geleneksel malzeme üretim tekniklerinin ötesine geçen stratejik bir müdahale biçimi haline gelmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, lazerle yüzey kaplama tekniğini; malzeme bilimi, yüzey mühendisliği ve proses optimizasyonu perspektiflerinden sistematik biçimde ele alarak, bu teknolojinin mikroyapı, yüzey sertliği, aşınma ve korozyon gibi kritik performans kriterleri üzerindeki etkilerini çok boyutlu biçimde incelemektir. Çalışma, yalnızca teknolojik bir uygulamayı tanıtmakla kalmayıp, aynı zamanda bu uygulamanın altında yatan fiziksel prensipleri,

malzeme-lazer etkileşim mekanizmasını ve bu etkileşim sonucunda oluşan mikro yapısal dönüşümleri bilimsel olarak analiz etmeyi hedeflemektedir.

Bu nedenle araştırmanın merkezinde, lazer kaplama işleminin temel parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı, odak uzaklığı, toz besleme oranı vb.) iş parçası yüzeyinde oluşturduğu mikro yapısal ve makro mekanik etkilerin anlaşılması yer almaktadır. Özellikle lazer-toz-malzeme üçlü etkileşiminin dinamik doğası, kaplama homojenliği, yoğunluk, faz dönüşümleri ve sertlik gibi özellikleri belirlemede temel bir değişken olarak değerlendirilmiştir. Araştırmada, farklı toz malzeme türlerinin ve yüzey hazırlık koşullarının lazer kaplama çıktıları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmakta; işlem parametrelerinin hangi sınırlar arasında optimize edilmesi gerektiği literatür temelli olarak irdelenmektedir.

Araştırma, lazerle kaplama teknolojisinin yalnızca yüzey modifikasyonuna odaklanmadığını; aynı zamanda malzeme sisteminin bütüncül olarak yeniden yapılandırılması bağlamında bir mühendislik yöntemi olduğunu savunmaktadır. Bu kapsamda, lazer ışını ile yüzeyde gerçekleştirilen hızlı ısıtma-soğutma çevrimlerinin, mikroyapı düzeyinde nasıl faz dönüşümleri oluşturduğu ve bu dönüşümlerin mekanik performansa olan etkileri derinlemesine analiz edilmiştir. Literatürde yer alan örnek uygulamalar ve deneysel bulgular eşliğinde, lazer kaplamayla elde edilen sertlik artışı, aşınma dayanımı, korozyon direnci ve mikro yapı homojenliği gibi nitelikler detaylı biçimde değerlendirilmiş; bu niteliklerin hangi parametre koşullarında optimize edildiği açıklanmıştır. Böylelikle çalışma, yalnızca bir uygulama tekniğini değil, bu tekniğin arkasındaki bilimsel ve mühendisliksel zemini ortaya koyarak, konuya derinlikli bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın bir diğer hedefi ise, lazerle kaplama yönteminin klasik kaplama teknikleriyle karşılaştırmalı analizini yaparak, lazer teknolojisinin sağladığı avantajların mühendislik açısından nasıl stratejik kazanımlara dönüştürülebileceğini irdelemektir. Bu çerçevede lazer kaplamanın; enerji verimliliği, işlem hassasiyeti, metalurjik bağlanma gücü, ısı etki bölgesinin minimal oluşu ve mikro yapı kontrolü açısından sunduğu olanaklar detaylı biçimde açıklanmakta, sanayi uygulamaları için sunduğu potansiyel değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda çalışmanın, hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için yol gösterici bir referans belge niteliği taşıması hedeflenmektedir. Ayrıca, yüzey mühendisliği literatürüne lazerle kaplama bağlamında bütüncül ve disiplinler arası bir katkı sunmak da çalışmanın bilimsel hedefleri arasında yer almaktadır.

1.2. Literatür Taraması

Yüzey mühendisliği, malzemelerin yalnızca hacimsel değil, yüzeysel özelliklerinin de geliştirilmesini temel alan bir mühendislik alanı olarak 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren giderek önem kazanmış ve bu bağlamda geliştirilen yüzey kaplama teknikleri, günümüzde hem akademik hem de endüstriyel anlamda derinlemesine araştırma konusu olmuştur. Özellikle aşınma, korozyon ve termal yüke maruz kalan parçaların yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilen tekniklerin başında gelen lazerle kaplama teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğu, doğrusal odaklana bilirlik, lokal işlem hassasiyeti ve yüzey–altlık arası güçlü metalurjik bağ kurabilme yeteneği sayesinde modern mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır (Wierzbicki ve Burakowski, 1998).

Literatürde yapılan çalışmalar, lazerle kaplama işleminin yalnızca yüzey sertliğini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda mikroyapı üzerinde gerçekleştirdiği faz dönüşümleri sayesinde mekanik özellikleri belirleyici düzeyde etkilediğini göstermektedir.

Lazerle kaplanan yüksek entropili alaşım (HEA) yüzeylerin mikroyapısal özellikleri, yüzey şekillenmesi ve kullanım süresi; uygulama öncesindeki hazırlık süreciyle birlikte lazer gücü, tarama hızı, lazer ışını çapı, tozun beslenme oranı, kaplama öncesi toz kalınlığı, meme açısı ve kaplama mesafesi gibi birçok değişkenin doğru biçimde ayarlanmasıyla iyileştirilebilir. Ancak her ne kadar lazer kaplama yöntemi önemli avantajlar sunsa da, uygulama sırasında ortaya çıkabilecek bazı teknik problemler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sorunlar arasında bileşimdeki düzensizlik, gözenek oluşumu, çatlaklar, yabancı madde içermesi, tam olarak erime sağlanamaması, kalıntı gerilmelerin oluşması ve kaplamanın taban malzeme ile yeterince güçlü bağ kuramaması gibi durumlar sayılabilir (Lin ve Yao, 2023).

Metal matrisli kompozit (MMC) kaplamalar, Ti-6Al-4 V titanyum alaşımını üzerine lazer kaplamayla üretildi. Kaplama malzemesi olarak Co₄₂ kendiliğinden sabitlenen toz, B₄C, SiC ve Y₂O₃ kullanıldı. Sonuçlar, lazer kaplama kaplamalarının esas olarak CoTi, CoTi₂, NiTi, TiC, TiB₂, TiB, Cr₇C₃ ve Ti₅Si₃ ile güçlendirildiğini gösterdi. Kaplama kaplamalarının mikro sertliği, Ti-6Al-4 V alt katmanın üç ila dört katına eşdeğerdi. Olağanüstü aşınma direnci sergileyen lazer kaplama, ağırlıkça %20 B₄C, ağırlıkça %7 SiC ve ağırlıkça %1 Y₂O₃ ilavesiyle üretildi. Aşınma direnci alt tabakaya kıyasla on kattan fazla arttırıldı (Weng vd., 2020).

Yüzey kaplama işlemi, yüksek enerjili bir ısı kaynağı kullanılarak HEA kaplama malzemesinin eritilmesi ve bu eriyik sayesinde kaplama ile alt tabaka arasında metalurjik bir bağ kurulması esasına dayanır. Bu sayede, yüzeyde koruyucu ve işlevsel bir kaplama tabakası oluşturulur. Kullanılan ısı kaynağının türüne bağlı olarak yüzey kaplama yöntemleri genel olarak plazma kaplama ve lazer kaplama şeklinde iki ana grupta sınıflandırılır. Öte yandan, kaplama malzemesinin uygulanma şekline göre; malzemenin önceden yüzeye yerleştirildiği veya işlemle eşzamanlı olarak beslendiği kaplama metotları da tercih edilebilmektedir (Zhang ve Xing, 2020).

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin genel performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri yüzeydir. Yüzey kaplama işlemleri, düşük dayanım özelliklerine sahip olan temel alaşımların; ısı yalıtımı, erozyon, korozyon direnci ve mekanik mukavemet gibi çeşitli zorlu koşullarda daha işlevsel hale gelmesini sağlamak amacıyla uygulanan, yüzeyin ekonomik yollarla iyileştirilmesini hedefleyen modifikasyon teknikleridir (Evans ve Bryan, 1999).

Cionea (2012), elektrolitik plazma işlemiyle lazer temelli yaklaşımları karşılaştırmalı olarak incelediği çalışmasında, yüzeyde oluşan mikroyapı değişimlerinin sadece yüzey sertliği değil, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ve iç gerilme dağılımı açısından da belirleyici olduğunu belirtmektedir. Özellikle lazerle modifiye edilen yüzeylerin daha az gözenekli, daha ince taneli ve difüzyonla güçlendirilmiş yapılar oluşturduğu; bunun da aşınma direnci üzerinde anlamlı bir artış sağladığı vurgulanmaktadır. Bu bağlamda lazerle kaplama yöntemi, plazma sprey veya termal püskürtme gibi geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla hem mekanik hem de yapısal avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar, yüksek sıcaklık gradyanlarına karşı dirençli yüzeylerin oluşturulmasında da önemli rol oynamaktadır (Cionea, 2012).

Duradzhi ve Lavrova (1986), çelik yüzeylerinin elektrolitik plazma yöntemiyle işlenmesinde, işlem parametrelerinin yüzeyde oluşturduğu faz yapılarının davranışlarını detaylı olarak analiz etmiş; yüzeyde oluşan karbür, nitrür ve oksit fazlarının sertliği artırmakla birlikte, korozyon ve oksidasyon direncine de katkı sağladığını göstermiştir. Lazer kaplama uygulamalarında da benzer şekilde, işlenen yüzeylerde hızlı ısıtma–soğutma çevrimlerinin etkisiyle metastabil fazlar oluşmakta ve bu fazlar özellikle tribolojik performans üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Aynı çalışmada, lazerle işlenen yüzeylerin yüksek mikrosertlik değerlerine ulaşabildiği, ayrıca yüzey çatlaklarının minimum düzeyde kaldığı vurgulanmaktadır. Bu da lazer kaplamanın hem

yapışma mukavemeti hem de çatlak direnci açısından etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir (Duradzhi ve Lavrova 1986).

Zhao ve çalışma arkadaşlarının yürüttüğü araştırma alüminyum alaşımlarına yönelik lazer kaplama uygulamalarını derinlemesine ele alan kapsamlı bir derleme niteliğindedir. Çalışmada, lazer kaplama yönteminin, özellikle alüminyum alaşımlarının yüzey sertliğini ve aşınma direncini iyileştirmede etkili bir yüzey modifikasyon tekniği olduğu vurgulanmaktadır. İncelemede; Al, Ni, Fe esaslı, seramik kökenli, amorf cam yapılar ve yüksek entropili alaşımlar olmak üzere altı farklı kaplama türü incelenmiştir. Mikro yapı özellikleri, mekanik dayanım (sertlik ve aşınma direnci) ile korozyon davranışı bu kaplamaların değerlendirilmesinde temel parametreler olarak ele alınmıştır. Elde edilen veriler, alüminyum alaşımlarında kaplama tasarımı ve üretim yaklaşımlarına yönelik mevcut bilgi birikimine katkı sunarken, gelecekteki bilimsel araştırmalar için de yönlendirici nitelikte öneriler içermektedir (Zhao vd., 2023).

Kumruoğlu vd. (2009), tarafından yürütülen çalışmada, orta karbonlu çeliklerin yüzeylerine uygulanan elektrolitik plazma ısı işlem teknolojisinin, yüzey mikroyapısında meydana getirdiği dönüşümler ve bunların mekanik performansa olan etkileri deneysel olarak ortaya konulmuştur. Araştırmada, yüzeyde meydana gelen karbür çökeltilerinin, sertliği belirgin ölçüde artırdığı ve özellikle aşınmaya karşı direnci anlamlı biçimde yükselttiği rapor edilmiştir. Bu bulgu, lazerle kaplama uygulamalarıyla da paralellik göstermekte olup, lazer parametrelerinin uygun şekilde optimize edilmesiyle benzer mikroyapı dönüşümlerinin yüksek doğrulukta sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca çalışma, toz malzeme yapısının ve partikül boyutunun da kaplama kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koyarak, literatürde sıkça vurgulanan “toz–lazer etkileşimi” konusuna bilimsel bir katkı sunmaktadır (Kumruoğlu vd.,2009).

Wang vd., (2010), dökme çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla tribo-oksit katkılı kaplama uygulamaları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, lazerle modifiye edilen yüzeylerde hem sürtünme katsayısında hem de aşınma oranlarında anlamlı iyileşmeler elde edildiğini göstermiştir. Lazerle kaplama sırasında oluşan ergiyik havuz içerisinde çözünen ve yeniden katılaşan oksit yapıların, yüzeyin mekanik performansına olumlu yönde katkı sunduğu ifade edilmiştir. Yazarlar ayrıca, lazer parametreleri ile bu mikroyapıların oluşum yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve bunun da yüzey mühendisliği optimizasyonunda dikkate alınması gereken temel bir değişken olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmanın önemi, lazerle yüzey işleme uygulamalarında sadece yüzey sertliği değil; aynı zamanda yüzey sürtünme davranışı,

tribo-kimyasal etkileşim ve yüzey kararlılığı gibi faktörlerin de optimize edilebilir olduğunu göstermesidir (Wang vd., 2010).

Wang ve Hwang (2004), ise lazerle yüzey sertleştirme üzerine yaptıkları çalışmada, AISI 4340 çeliği üzerinde elektron ışını kullanarak yapılan yüzey işlemlerinin mikroyapısal evrimini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlarda, lazerle modifiye edilen yüzeylerde ince taneli martenzitik yapılar gözlemlenmiş; bu yapıların yüzey sertliğinde anlamlı artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, hızlı soğuma süreci nedeniyle iç gerilmelerin kontrollü şekilde dağıldığı ve çatlak oluşumunun önlendiği saptanmıştır. Bu sonuçlar, lazerle kaplama teknolojisinin yalnızca kaplama kalitesi değil, yüzey kararlılığı ve öngörülebilir servis davranışı açısından da avantajlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca yüzeyde oluşan bu yeni mikro yapılar, yorulma direncini de artırarak parçaların uzun süreli performanslarını olumlu yönde etkilemektedir (Wang ve Hwang, 2004).

Wierzbicki ve Burakowski (1998), yüzey mühendisliğinin temel prensiplerini ele aldıkları çalışmalarında, yüzey kaplama teknolojilerinin sınıflandırılmasını ve bu yöntemlerin malzeme sistemleri üzerindeki çok boyutlu etkilerini kapsamlı biçimde tartışmışlardır. Özellikle yüzey sertliği, aşınma direnci, korozyon dayanımı ve termal kararlılık gibi mühendislik açısından kritik parametrelerin; yüzeyin mikroyapısal yapısıyla olan ilişkisinin detaylandırıldığı bu kaynak, lazerle yüzey kaplama çalışmalarının teorik çerçevesini oluşturmaktadır. Yazarlar, lazer teknolojisinin diğer yöntemlerden ayrıldığı noktaları; yüksek enerji yoğunluğunun lokalize olarak uygulanabilmesi, işlem süresinin çok kısa olması ve mikroyapının kontrollü olarak yönlendirilmesine imkân tanınması olarak belirtmişlerdir. Bu yönüyle lazerle yüzey işleme, hem fonksiyonel yüzeylerin oluşturulmasında hem de mühendislik sistemlerinde güvenilirliğin artırılmasında kritik rol oynamaktadır (Wierzbicki ve Burakowski, 1998).

Tüm bu çalışmalar göstermektedir ki, lazerle yüzey kaplama teknolojisi, klasik yüzey işleme yöntemlerinin sınırlılıklarını ortadan kaldırmakta ve çok daha hassas, verimli, düşük deformasyonlu ve uzun ömürlü yüzeyler elde edilmesine olanak tanımaktadır. Literatürdeki mevcut bilgiler, lazerle işleme süreçlerinin yalnızca malzemenin dış katmanını modifiye etmekle kalmadığını; aynı zamanda bu işlemle entegre edilen toz malzeme sistemleri sayesinde yüzeyin mikroyapısının işlevsel olarak yeniden yapılandırılabilirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda lazerle kaplama; metalurjik bağ kuvveti, yüksek çözünürlüklü işleme kabiliyeti, yönlendirilmiş katılaşma ve termal denge sağlama kapasitesi ile çağdaş mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez

bir parçası haline gelmiştir. Mevcut literatür, bu teknolojinin özellikle ileri mühendislik uygulamaları açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve gelecekte akıllı üretim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olacağını göstermektedir.

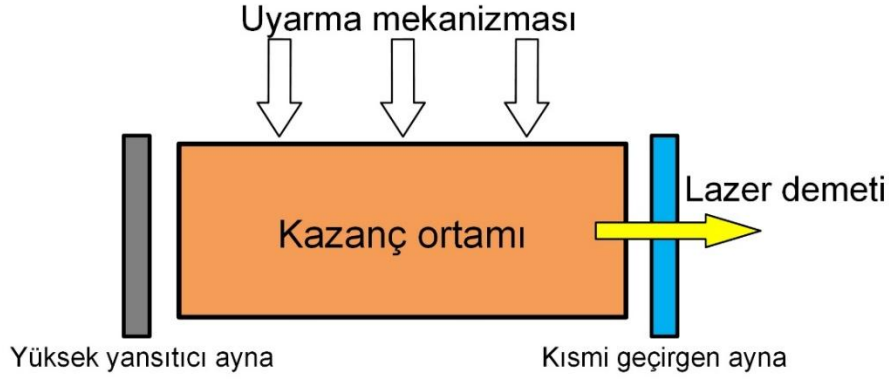


2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lazer Teknolojisi ve Çalışma Prensipleri

Lazerlerde aktif ortamın uyarılması amacıyla çeşitli pompalama teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler temel olarak üç ana gruba ayrılabilir: elektriksel pompalama, optik pompalama ve kimyasal pompalama. Elektriksel pompalama yöntemi, özellikle gaz lazerlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemde, lazer rezonatörünün uç noktalarında bulunan anot ve katot arasında oluşturulan elektriksel boşalma, aktif ortamda yer alan atom ya da moleküllerin yüksek enerji seviyelerine çıkarılmasını sağlar. Optik pompalama ise genellikle katı hâl ve sıvı lazer sistemlerinde uygulanır. Bu yöntemde aktif ortam, güçlü bir ışık kaynağı ile (örneğin kripton lambası, deşarj lambası ya da lazer diyotları) uyarılarak çalıştırılır. Yansıtıcı bir yapı içerisine yerleştirilen doğrusal ya da helisel flaş lambaları, etkin ışık enerjisi sağlar. Üçüncü yöntem olan kimyasal pompalamada ise lazer üretimi, kimyasal reaksiyonlardan açığa çıkan enerjinin doğrudan aktif ortamdaki parçacıkları uyararak daha yüksek enerji düzeylerine taşınması ile gerçekleştirilir. Bu duruma örnek olarak, flor ve döteryum gibi reaktif türler arasındaki tepkimeler sonucunda döteryum florür (DF) moleküllerinin oluşması gösterilebilir (Arcan, 2011).

Lazer teknolojisi, yoğunlaştırılmış ve koherent ışık üretimi üzerine kurulu, yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilen bir foton kaynağı olarak 20. yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkmış ve kısa sürede endüstriyel, tıbbi, askeri ve bilimsel birçok alanda vazgeçilmez bir teknolojik bileşen haline gelmiştir. Lazer ışınının temel üretim mekanizması, uyarılmış emisyon esasına dayanmaktadır. Uyarılmış emisyon; belirli bir atom ya da molekül düzeyinde bulunan elektronun dışarıdan verilen enerjiyle daha üst bir enerji düzeyine çıkarılması ve bu enerjinin aynı fazda, aynı dalga boyunda ve aynı doğrultuda bir foton olarak geri salınması süreciyle karakterize edilmektedir. Bu süreç, lazer ortamında uyarılmış atomların birbiriyle etkileşimiyle çoğaltılarak güçlendirilmekte ve optik rezonatör adı verilen iki aynalı bir düzenekle yoğunlaştırılarak dışarı yönlendirilmektedir (Artkın, 2022).



Şekil 2.1. Lazer çalışma prensibi (Demir, 2020)

Şekil 2.1’ de gösterilen rezonatör adı verilen bu aynalardan birisi tek taraflı aynadır. Aktif lazer aracının radyasyonu rezonatörde yükseltilir. Bir yandan da tek taraflı ayna ile yalnızca belirli bir miktarda radyasyon rezonatörden çıkabilir. Bunun anlamı meydana gelen enerji yarı geçirgen olan aynadan çıkarak yeni bir ışık gibi boşlukta yayılarak ilerlemesidir. Boşlukta yayılacak olan bu ışık fiziksel özellikleri farklı olan lazer ışınıdır (Demir, 2020).

Endüstriyel lazer sistemlerinin çoğunda, lazer ışınının oluşturulabilmesi için özel gazların (örneğin, karbondioksit, helyum, azot karışımları) yüksek saflıkta ve sabit basınç değerleriyle lazer tüpüne verilmesi gerekmektedir. Gazların seçimi ve saflık derecesi, lazer ışınının kararlılığı ve işleme verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Lazer sistemlerinin sahip olduğu yüksek işleme hızları, hassasiyet ve otomasyonla uyumluluk özellikleri sayesinde, makine imalatı, savunma sanayii, uzay teknolojileri ve biyomedikal cihaz üretimi gibi stratejik alanlarda geniş kullanım imkânı bulmuştur. Ayrıca lazer sistemlerinin seri üretime uygunluğu ve düşük işletim maliyetleri, bu teknolojiyi geleneksel işleme yöntemlerine göre daha cazip kılmaktadır (Dindar vd., 2021).

Lazer teknolojisinin çalışma prensipleri kapsamında bir diğer önemli unsur, ışığın madde ile etkileşim biçimidir. Bu etkileşim; yüzey sertleştirme, kesme, delme, kaynak ve kaplama gibi çok çeşitli işlemlerde kullanılabilir. Özellikle lazer kaplama teknolojisi, toz haldeki metal malzemenin yüksek enerjili lazer ışını ile yüzeye entegre edilmesi prensibine dayanmakta olup, malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmek ve yüzey aşınmasını azaltmak amacıyla tercih edilmektedir. Lazer kaplamanın etkinliği; lazer gücü, tarama hızı, toz besleme oranı ve koruyucu gazın debisi gibi işlem parametrelerine doğrudan bağlıdır. Bu parametrelerin her biri, oluşacak kaplamanın homojenliği,

mikroyapı yapısı ve mekanik dayanımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Dindar vd., 2021).

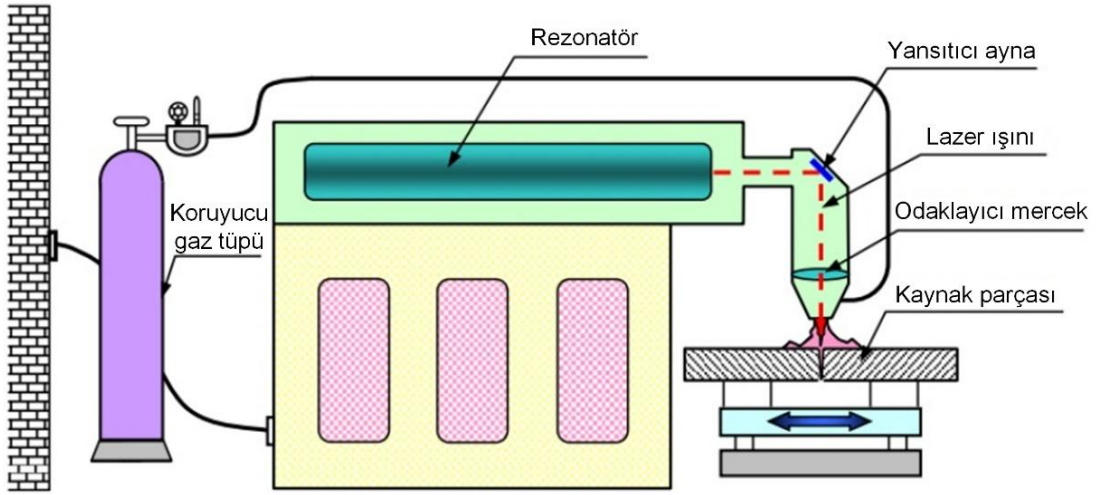
Lazer sinterleme gibi alt teknolojiler ise özellikle eklemeli imalat alanında devrim yaratmış, metalik ve seramik tozların katmanlı olarak ergitilmesiyle yüksek hassasiyetli üç boyutlu yapıların üretilmesine olanak tanımıştır. Bu tür lazer destekli imalat yöntemleri sayesinde geometrik olarak karmaşık yapıların üretimi mümkün olmuş, aynı zamanda geleneksel talaşlı imalatla ortaya çıkan malzeme israfı minimize edilmiştir (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Bunun yanında, lazer teknolojisinin enerji yoğunluğunun kontrollü biçimde yönlendirilmesi sayesinde termal deformasyon minimum seviyeye indirgenmiş, yüzeylerde kontrollü mikro yapılar oluşturularak kaplamanın aşınma ve korozyon direnci artırılmıştır (Dindar vd., 2021).

2.1.1. Lazer kaynak çeşitleri

Lazer kaynak teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğu ve odaklılığı sayesinde geleneksel kaynak yöntemlerinden ayrılmakta ve pek çok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Bu yöntem, kaynak bölgesine yoğunlaştırılmış bir lazer ışını göndererek malzemelerin ergitilmesi esasına dayanmaktadır. Lazer ışını, hedeflenen noktada küçük çaplı bir ergime havuzu oluşturur ve bu sayede termal deformasyon minimum düzeyde tutulmaktadır. Bu özelliğiyle lazer kaynağı; otomotiv, havacılık, savunma ve tıp sanayii gibi hassas toleransların talep edildiği sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dindar vd., 2021).

Lazer kaynak işlemleri, kullanılan lazer türlerine göre farklılık göstermektedir. En yaygın lazer kaynak türlerinden biri CO₂ lazerlerdir. 10.6 µm dalga boyunda çalışan bu sistemler, metal olmayan malzemelerde kesme ve kaynak uygulamaları için uygundur. Ancak, yüksek yansıtıcı özelliğe sahip metal yüzeylerde etkinliği sınırlıdır. Bu nedenle CO₂ lazerler çoğunlukla ahşap, plastik ve seramik gibi malzemelerde tercih edilmektedir (Artkın, 2022). Buna karşılık Nd:YAG lazerler, metal işleme uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu lazer türü hem darbeli hem de sürekli dalga modunda çalışabildiği için mikro ve makro düzeyde hassas kaynak uygulamalarında etkilidir. Fiber optik iletimi sayesinde robotik sistemlerle kolayca entegre edilebilmesi, özellikle otomotiv endüstrisinde tercih edilmesini sağlamaktadır (Dindar vd., 2021).



Şekil 2.2. Bir lazer kaynak makinesinin temel elemanları (Kahraman ve Gülenç, 2016)

Lazer, elektrik enerjisini elektromanyetik enerjiye çeviren elektro-optik bir cihazdır. Teorik olarak ilave metal kullanmadığından yüzey hazırlığı çok önemlidir. Lazer ışını ile kaynakta, vakum ortamı ve genellikle koruyucu gaz gerekmebilir. Parlak, yani yansıtıcı yüzeylerin kaynağında lazer ışını yüzeyden yansıdığından, yüzeye ışın emmeyi artırıcı boyalar sürülmesi gereklidir. Lazer ışın donanımının şematik görüntüsü Şekil 2.2’ de verilmiştir.

Son yıllarda lazer teknolojisinde öne çıkan bir diğer sistem fiber lazer kaynak sistemleridir. Bu lazerler, lazer ışığını fiber optik kablolar aracılığıyla iletir ve ışık kaynağı ile iletim ortamı aynı yapı içerisinde. Fiber lazerler; yüksek ışık verimliliği, düşük bakım ihtiyacı ve kompakt tasarımı ile öne çıkmaktadır. Uygulama sırasında çok düşük ısı girdisi sağladıkları için, malzeme üzerinde minimal termal etki yaratırlar. Bu sayede kaynak sonrası oluşabilecek deformasyonlar önlenir. Fiber lazerler; paslanmaz çelik, titanyum ve alüminyum gibi malzemelerde yüksek kaliteli kaynak uygulamaları için uygundur (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Disk lazer kaynak sistemleri ise, yüksek güç gerektiren derin kaynak işlemleri için geliştirilmiştir. Bu sistemlerde, disk formundaki katı bir lazer ortamı kullanılarak enerji aktarımı sağlanmaktadır. Yüksek ısı dayanımı, düşük ısı yayılımı ve daha iyi termal yönetim olanakları sayesinde kalın ve yansıtıcı metallerin kaynağında etkin bir çözüm sunmaktadır. Özellikle otomotiv ve uzay teknolojileri gibi alanlarda, yüksek yapısal bütünlük gerektiren bağlantılar için tercih edilmektedir (Dindar vd., 2021).

Darbeli lazer kaynak sistemleri ise, kısa sürede yüksek enerjiyle çalışan ve özellikle mikro elektronik, tıbbi cihaz üretimi ve hassas parça birleştirme işlemleri için

kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerin en belirgin avantajı, kaynak sırasında çok düşük ısı girdisi sağlamasıdır. Bu sayede, çevre malzemenin mikroyapısında değişim oluşmadan kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Lazer darbeleri ile yapılan bu işlemler, yüksek boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalarda başarılı sonuçlar vermektedir (Artkın, 2022).

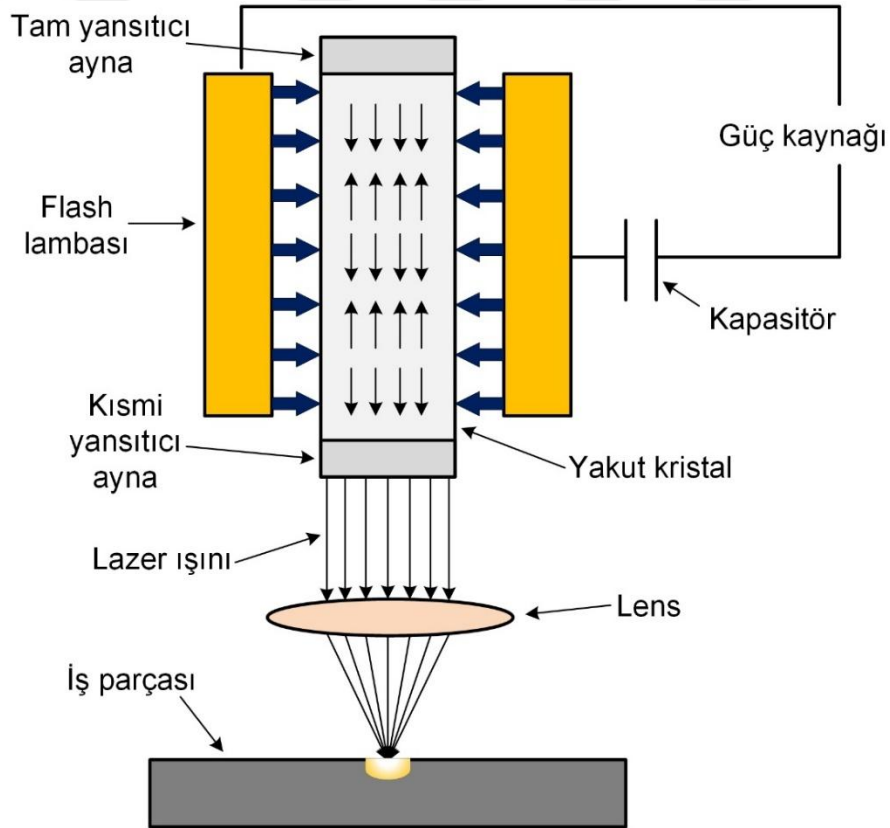
Tüm bu lazer kaynak türlerinin etkili ve verimli kullanılabilmesi, işlem parametrelerinin doğru biçimde belirlenmesine bağlıdır. Lazer gücü, ışın odak uzaklığı, tarama hızı, toz veya tel besleme oranı ve koruyucu gaz akış hızı gibi değişkenler, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu parametreler yalnızca ergime havuzunun geometrisini değil, aynı zamanda kaynak bölgesinde oluşacak mikroyapısal değişimleri de belirlemektedir. Dolayısıyla lazer kaynak süreci, hem fiziksel hem de metalurjik açıdan kapsamlı bir mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir (Dindar vd., 2021).

2.1.2. Lazer-iş parçası etkileşimi

Lazer teknolojisinin malzeme işleme uygulamalarındaki başarısı, doğrudan lazer ışınının iş parçası ile etkileşim biçimine bağlıdır. Lazer-iş parçası etkileşimi; ışının yoğunluğu, dalga boyu, odaklanma çapı, darbeli ya da sürekli çalışma modu, işlem süresi, iş parçasının termal ve optik özellikleri gibi çok sayıda parametre tarafından belirlenmektedir. Lazer ışını, yüzeye çarptığında enerjisini malzeme üzerine aktarır ve bu enerji transferi sonucunda malzemede ısınma, ergime, buharlaşma veya plazma oluşumu gibi fiziksel değişimler meydana gelmektedir. Bu bağlamda, lazer işleminin etkinliğini belirleyen temel unsur, ışın ile iş parçası arasında oluşan bu enerjik etkileşimin kontrol edilebilirliğidir (Dindar vd.,2021).

Lazer ışını ile iş parçası arasındaki etkileşim, öncelikle iş parçasının ışını absorbe edebilme (soğurma) kabiliyeti ile başlamaktadır. Malzemenin lazer ışığını ne derece absorbe edeceği, ışının dalga boyuna ve malzemenin optik özelliklerine bağlıdır. Örneğin, metalik malzemeler, kısa dalga boyundaki (örneğin fiber lazerin 1.06 μm) lazer ışınlarını CO₂ lazerlere (10.6 μm) kıyasla daha iyi absorbe etmektedir. Bu da fiber lazerlerin metal işleme uygulamalarında daha verimli olmasını sağlamaktadır. Lazer ışını, yüzeye ulaştığında ilk olarak yüzeyde fotonların maddeye çarpmasıyla başlayan bir enerji aktarımı gerçekleşmekte; bu enerji transferi ile yüzey sıcaklığı hızla artar ve termal enerji, katı-sıvı geçişe neden olarak ergime başlatmaktadır. Enerji yoğunluğunun artması halinde buharlaşma veya plazma oluşumu da gözlemlenebilmektedir (Artkın, 2022).

İlk başta lazer malzemesi CO₂ veya diğer lazer malzemesi deşarj tüpüne doldurulur. Bundan sonra, flaş lambasını yakmak için kullanılan güç kaynağı açılır. Flaş lambasından gelen ışık, atomun elektronlarını uyarmak için kullanılır. Daha sonra lazer malzemenin atomları, flaş lambasının ürettiği ışık enerjisinden enerjiyi emer, Enerjinin emilmesi nedeniyle, atomun elektronu düşük enerji seviyesinden daha yüksek enerji seviyesine atar. Ancak bu atomun kararsız durumudur. Atom soğurma sınırına ulaştığında sürekli enerji yaymaya başlar. Bu enerji yüksek oranda güçlendirilmiş aynı frekans ve aynı dalga boyunda uyumlu ışık şeklinde yayılır. Atom tarafından salınan lazer ışığı dış bükey mercekte toplanır ve iş parçasına yönlendirilir. Lazer ışık parçasının üzerine düştüğünde iş parçasının temas yüzeyinden malzemeyi eriterek veya buharlaştırarak işleme süreci başlar. Şekil 2.3' te gösterilmiştir (Tayebi vd.,2022).



Şekil 2.3. Lazerle kesim çalışma prensibi (Tayebi vd.,2022)

Lazer-ışık parçası etkileşiminde bir diğer belirleyici faktör, malzemenin termofiziksel özellikleridir. Isı iletkenliği, özgül ısı, ergime sıcaklığı ve buharlaşma ısısı gibi malzeme parametreleri, ışınla etkileşim süresince oluşacak sıcaklık dağılımını belirlemektedir. Örneğin, yüksek ısı iletkenliğine sahip metallerde (örneğin bakır,

alüminyum) lazerin oluşturduğu lokal ısıнын çevre bölgelere yayılması daha hızlı olmakta ve bu da ergime havuzunun daha sığ ve yayvan olmasına neden olmaktadır. Buna karşın düşük ısı iletkenliğine sahip alaşımlar daha konsantre bir ısıl bölge oluşturarak dar ve derin kaynaklar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle lazer kaynak ve kaplama uygulamalarında malzeme seçimi, işlem kalitesini doğrudan etkilemektedir (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Enerji yoğunluğu arttıkça iş parçası üzerinde oluşan etkileşimler daha kompleks hale gelmektedir. Yüzeyde lokalize bir şekilde biriken ısı enerjisi, metalik bağları kırarak katı fazdan sıvı faza geçişi başlatmaktadır. Bu ergime olayı sırasında malzemenin yüzey gerilim kuvvetleri, sıcaklık gradyanları ve lazerin tarama hareketleriyle birlikte ergiyik malzemenin yönlenmesine neden olmaktadır. Bu yönlenme, kaynak havuzunun simetrisi ve içyapısal homojenliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Lazer işleminde oluşan marangoni konveksiyonu ve buhar basıncı kaynaklı dinamik akışlar, ergimiş havuzun mikroyapısal özelliklerini şekillendirmektedir (Dindar vd., 2021). Ayrıca, buharlaşma noktasını aşan enerji yoğunluklarında plazma oluşumu gerçekleşmektedir. Plazma, ışıını kısmen geri yansıtabilmekte veya absorpsiyonu azaltabilmekte; bu nedenle yüksek güçlü lazer sistemlerinde plazma kontrolü, işleme verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır (Artkın, 2022).

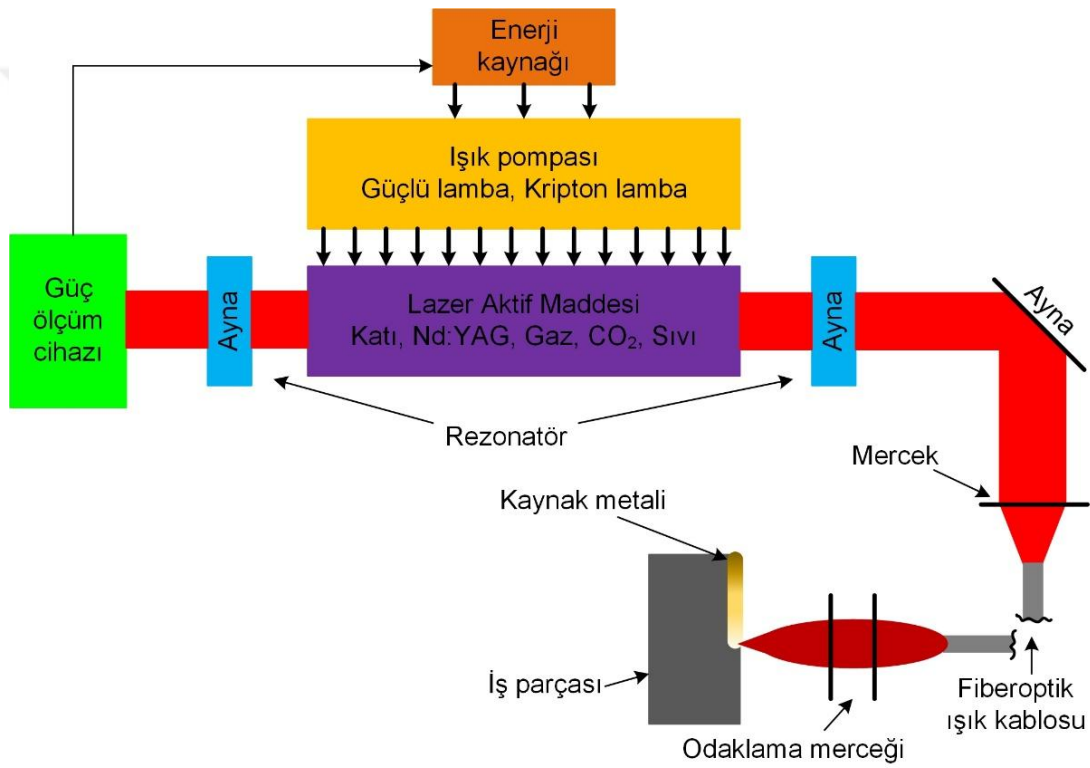
Lazer ışınının iş parçası ile etkileşimi sırasında zamanla değişen enerji dağılımları, ısıdan etkilenen bölge (HAZ) olarak adlandırılan mikro yapısal dönüşüm bölgelerini oluşturmaktadır. Bu bölgelerde oluşan faz dönüşümleri, iç gerilmeler ve mikro çatlak oluşumları, lazer işleminin kalite kriterleri açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek hızlı lazer işlemlerinde ani soğuma oranları, ince taneli mikroyapılar oluşturmakla birlikte, iş parçası üzerinde artık gerilmelerin birikmesine de yol açabilmektedir. Bu nedenle lazer işlem parametreleri, sadece hedeflenen ergimeyi değil, aynı zamanda gerilme ve deformasyon kontrolünü de sağlamalıdır (Dindar vd., 2021).

2.1.3. Lazer parametrelerinin etkisi

Lazerle işleme teknolojilerinde işlem kalitesini belirleyen temel faktörlerden biri, doğru ve optimize edilmiş işlem parametrelerinin seçilmesidir. Lazer gücü, ilerleme hızı, odak noktası konumu, toz veya tel besleme hızı, tarama stratejisi, koruyucu gaz debisi gibi parametreler, lazerin iş parçasıyla etkileşiminden doğan termal etki alanlarını ve sonuç ürünün mikroyapısal bütünlüğünü doğrudan etkilemektedir. Her bir parametre,

lazerin oluşturduğu ergime havuzu, yüzey kalitesi ve termomekanik deformasyonlar üzerinde ayrı ayrı etkiye sahiptir (Dindar vd., 2021).

En kritik parametrelerden biri olan lazer gücü, lazer ışınıyla taşınan toplam enerji miktarını belirlemektedir. Lazer gücünün artışı ile yüzeye aktarılan enerji yoğunluğu da artmakta, bu da daha geniş ve derin ergiyik havuzların oluşmasına neden olmaktadır. Ancak belirli bir sınırın üzerinde kullanılan yüksek lazer gücü, kontrolsüz buharlaşma, mikro çatlak oluşumu ve yüzey oksidasyonuna neden olmaktadır. Dolayısıyla lazer gücünün hedeflenen kaplama kalınlığı, nüfuziyet derinliği ve mikroyapısal dönüşümle uyumlu biçimde ayarlanması gereklidir (Dindar vd., 2021).



Şekil 2.4. Lazer makinesinin gösterimi (Aydın ve Karaağaç, 2018)

Şekil 2.4' te şematik olarak gösterilen lazer kaynak sisteminde, enerji kaynağına bağlı güçlü bir lamba aracılığıyla lazer aktif ortama ışık pompalanır. Bu ışık, ortamdaki atomları uyararak manyetik dalga biçiminde foton üretimini sağlar. Lazer aktif ortamı; katı, sıvı veya gaz fazında olabilir. Üretilen lazer ışınları, rezonatör aynalar sayesinde yoğunlaştırılarak güçlü bir ışık demetine dönüştürülür. Oluşan bu ışık demeti, kullanılan lazer sistemine bağlı olarak aynalar, mercekler ya da optik fiber kablolar yardımıyla hedef bölgeye iletilir (Aydın ve Karaağaç, 2018).

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte lazer sistemlerinin kullanım alanları da genişlemiş ve önemi artmıştır. Özellikle fiber optik haberleşme, yüksek güçlü lazer silah sistemleri ve lazer tabanlı bilgi işleme teknolojileri gibi alanlarda lazerin rolü giderek kritik hale gelmiştir. Günümüzde hâlen bu alanda yoğun şekilde araştırma ve geliştirme faaliyetleri sürdürülmektedir. Lazer denildiğinde genellikle akla çeşitli renklerdeki ışık huzmeleri gelse de, bu kelime aslında bir kısaltmadır. Lazer sözcüğü, “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” ifadesinin baş harflerinden oluşmakta olup, Türkçeye “uyarılmış ışımının yardımıyla ışığın güçlendirilmesi” şeklinde çevrilmiştir (Yavaş ve Arslan, 2013).

İlerleme hızı, lazer ışınının iş parçası üzerindeki hareket süresini belirleyerek yüzeye aktarılan toplam enerjiyi etkilemektedir. Düşük ilerleme hızlarında, ışının bir noktada daha uzun süre kalması nedeniyle enerji yoğunluğu artmakta, bu da daha derin nüfuziyet ve daha kalın kaplama tabakaları ile sonuçlanmaktadır. Ancak çok düşük hızlar, termal hasarı artırabilirken; çok yüksek ilerleme hızları da yeterli enerji transferine imkân tanımayarak yüzeyde eksik ergime ve zayıf yapışma gibi olumsuzluklara neden olabilmektedir (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Toz besleme hızı da kaplama kalitesini etkileyen önemli bir değişkendir. Yetersiz toz besleme, lazer tarafından oluşturulan ergiyik havuza yeterli malzeme taşınamamasına yol açarken, fazla toz beslemesi ise ergime verimini düşürerek yüzeyde porozite ve katılaşma hatalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle toz besleme hızı, lazer gücü ve ilerleme hızı ile birlikte optimize edilmelidir (Dindar vd., 2021).

Katmanlı üretim uygulamalarında da benzer şekilde tozun eşit ve kontrollü şekilde serilmesi, nihai ürünün mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğü açısından kritik rol oynamaktadır (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Ayrıca odak konumu ve lazer spot çapı gibi optik parametreler de işleme hassasiyetini ve yüzey karakterini etkilemektedir. Odak noktasının iş parçasının yüzeyine göre konumlandırılması, enerji dağılım profilini doğrudan belirleyerek, işlem sırasında oluşacak ısıdan etkilenen bölge (HAZ) büyüklüğünü ve geometrisini etkilemektedir. Bu nedenle lazer optik sistemlerinin doğru hizalanması ve sabit tutulması, homojen ve kaliteli bir işlem için ön koşuldur (Dindar vd., 2021).

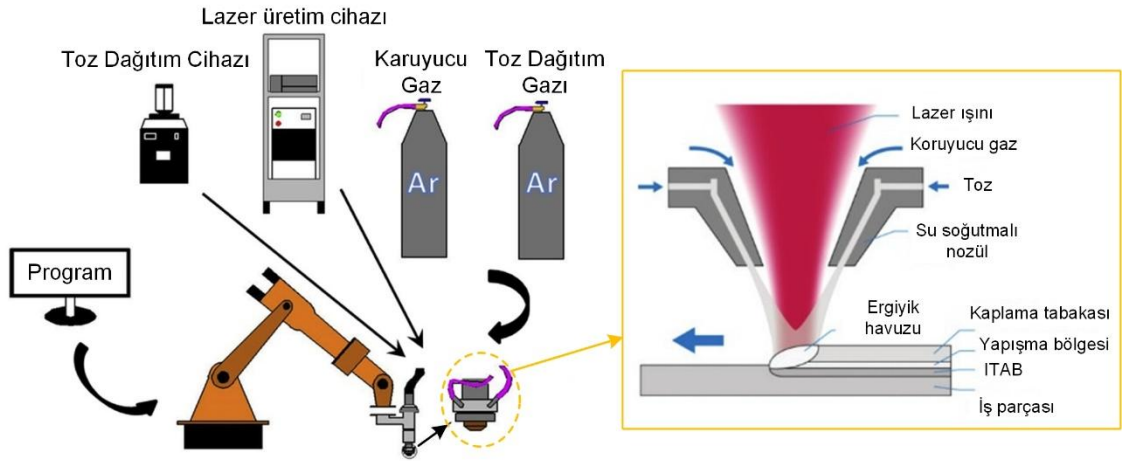
2.2. Yüzey Kaplama Teknolojisi

Lazer kaplama teknolojisi, son yıllarda hızla gelişerek endüstride özellikle tamir ve kaplama uygulamalarında kendine önemli bir kullanım alanı bulmuştur. MIG, TIG ve PTA gibi geleneksel kaynak dolgu yöntemlerine alternatif olarak; düşük ısı girdisi sağlaması ve yüksek birikim hızı sunması sayesinde, özellikle hassas yüzeylerin onarımı gibi kritik işlemlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemlerinde yüksek ısı girdisi, ısıdan etkilenen bölgelerde iç gerilme, şekil bozulmaları ve tane büyümesi gibi olumsuz yapısal değişikliklere neden olmakta; bu da mekanik dayanımda azalma ve çatlak oluşumu gibi problemlere yol açabilmektedir.

Lazer kaplama işleminde ise, belirli boyut aralıklarına sahip, genellikle metalik yapıda olan tozlar, lazer ışını yardımıyla eritilir ve bu erimiş malzeme iş parçasının yüzeyine katmanlar halinde biriktirilir. Bu sayede, döküm ve işleme kaynaklı yüzey hataları, eksik dolgu bölgeleri ya da aşınmaya bağlı hasarlar, uygun toz malzeme kullanımıyla giderilerek, parça istenilen boyutsal toleranslara kavuşturulabilir. Aynı zamanda, yüzeyde sert ve korozyona karşı dayanıklı bir tabaka oluşturarak parçanın servis ömrü anlamlı ölçüde artırılabilir.

Lazer kaplama prosesinin Şekil 2.5' teki gösteriminde; yeterli güce sahip bir lazer ışınının, koruyucu gaz (genellikle argon), toz veya tel formundaki dolgu malzemesini taşıyan bir besleme ünitesi, taşıyıcı gaz akışı, su soğutmalı sprej nozul ve iş parçası ile etkileşimi yer almaktadır. Lazer ışını yüzeye yöneltildiğinde bir ergiyik havuzu oluşur. Toz beslemesi sürdükçe, bu havuza sürekli toz girişi sağlanır ve tozlar lazer enerjisiyle ertirilerek yüzeyde katmanlı bir kaplama meydana gelir. Bu işlem sırasında nozul, yüzey üzerinde belirli bir hızla hareket ettirilir ve böylece homojen, kontrollü bir kaplama veya dolgu tabakası elde edilir.

Lazer kaplama işleminde, yüksek güçlü lazer ışın kaynağı kullanılarak yüzeyde 0,05–2 mm kalınlığında ince bir tabaka oluşturulur. Şekil 2.5'de lazer kaplama teknolojisinin çalışma prensibi şematik olarak sunulmaktadır. Lazer başlığından çıkan ışın, nozıldan iletilen toz malzeme ve koruyucu gaz ile eş zamanlı olarak temel malzeme yüzeyine yönlendirilir. Lazer ışını, hem toz malzemeyi hem de temel yüzeyi ertirerek bir kaynak havuzu meydana getirir. Kaplama yapılacak bölge boyunca lazer başlığının hareket ettirilmesiyle işlem devam eder. Bu süreçte kullanılan koruyucu gaz, ergiyik havuzunun oksitlenmesini önler ve genellikle Argon tercih edilmektedir. (Zhu vd., 2020; Li vd., 2020).



Şekil 2.5. Lazer kaplama prosesi ve çalışma prensibi (Zhu vd., 2020; Li vd., 2020)

Lazer kaplama prosesi, yüksek sıcaklıklarda bile işlenebilen malzemelere uygulanabilen, güçlü lazer enerjisiyle çalışan ve tel ya da toz formundaki besleme sistemleriyle desteklenen esnek bir yüzey iyileştirme yöntemidir. (Marin vd., 2020).

Bu yöntem literatürde doğrudan lazer metal biriktirme veya lazer dolgu kaynağı olarak da anılmaktadır. Düşük ısı girdisine sahip olması, hızlı katılaşma imkânı sunması, derin kaynak etkisi sağlaması ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimine elverişli yapısıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, homojen mikro yapılar elde edilmesine olanak tanıdığı için tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır (Toyserkani vd., 2017).

Lazer kaplama sürecinde üç temel unsur belirleyici rol oynamaktadır: ergiyik havuzun davranışı, toz akışının dinamikleri ve kaplamanın nihai özellikleri. Kaplama sırasında oluşan kaynak havuzunda hızlı bir katılaşma süreci meydana gelir. Bu süreçte yoğun sıvı hareketleri, yüzey geriliminden kaynaklanan marangoni akımları (Jiang vd., 2020), basınç değişimlerinin neden olduğu sıçrama etkisi ve difüzyon gibi çeşitli taşınım mekanizmaları, kaplama tabakasının mikroyapısını ve kimyasal bileşimini doğrudan etkiler (Zhao vd., 2020).

Yüzeyin katılaşmasıyla birlikte, hedeflenen yapısal ve mekanik özelliklere sahip bir tabaka oluşur (Zhao vd., 2020). Ancak, bu süreçte toz akışının karmaşık yapısı, lazer ışınının nozül ve temel malzeme ile etkileşimi, ısı transferi ve ergiyik havuzundaki fiziksel olayların tam anlamıyla anlaşılması oldukça zordur. Bu nedenle, deneysel yöntemlerin yanında, teorik modellemelere dayalı sayısal simülasyon çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelleme sayesinde kaynak havuzu, toz dağılımı ve ortaya

ıkan mikroyapı gibi parametreler üzerinde analizler yapılabilmektedir (Huang vd., 2016; Zhang vd., 2016).

Kaplama işlemleri, genel olarak fiziksel, kimyasal ve elektro-kimyasal esaslara dayalı olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel yöntemler arasında termal sprey, buhar biriktirme (PVD), lazer kaplama ve mekanik alaşımlama gibi işlemler yer alırken; kimyasal yöntemler daha çok kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve sol-jel kaplama gibi teknikleri içerir. Elektrokimyasal yöntemlerde ise galvanik kaplama, anodizasyon ve elektrolitik plazma işleme gibi yüzey modifikasyonları yapılmaktadır. Bu yöntemlerin seçimi, uygulama alanına, yüzey gereksinimlerine ve ekonomik faktörlere göre şekillenmektedir (Cionea, 2012). elektrolitik plazma işlemleri sırasında yüzeyde oluşan oksit ve karbür fazlarının, sadece mekanik özellikleri değil aynı zamanda korozyon direncini de anlamlı ölçüde artırdığını ifade etmiştir.

Yüzey kaplama teknolojilerinde ne çıkan en önemli faktörlerden biri, kaplamanın temel malzeme ile olan bağ yapısıdır. Metalurjik bağ, özellikle lazerle kaplama, plazma sprey ya da difüzyon kaplama tekniklerinde sağlanabilir. Bu bağ türü, yüksek sıcaklık ve kısa süreli işlem koşulları altında kaplama ve alt tabaka arasında atomik düzeyde difüzyonla oluşur ve bu sayede yüksek yapışma mukavemeti sağlanmaktadır. (Duradzhi ve Lavrova,1986), termokimyasal işlem uygulanan elik yüzeylerinde meydana gelen bağ yapısının, geleneksel kaplama yöntemlerine göre daha kararlı faz geçişleri ve daha yüksek mikrosertlik değerleri sunduğunu belirtmiştir.

Yüzey kaplama teknolojileri aynı zamanda fonksiyonel kaplamaların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda tribolojik kaplamalar (aşınma ve sürtünmeye karşı dayanım sağlayan), termal bariyer kaplamalar (ısıya karşı yalıtım sağlayan) ve biyo-uyumlu kaplamalar (vücut içinde kullanılan implant yüzeyleri) gibi çok sayıda özel amaçlı uygulama alanı bulunmaktadır. Bu kaplamalarda kullanılan toz veya film malzemeleri; metalik, seramik ya da kompozit yapıda olabilir.(Kumruoğlu vd., 2009). orta karbonlu elik yüzeylerine uygulanan elektrolitik plazma yöntemi ile elde edilen yüzey yapılarının, kompleks karbür fazları sayesinde hem tribolojik performansı artırdığını hem de sertliği yükselttiğini ortaya koymuştur.

Yüzey kaplama teknolojilerinde enerji girdisinin kontrolü, işlem kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Lazer, elektron ışını, plazma arkı gibi yüksek yoğunluklu enerji kaynakları; yüzeyde lokalize ısıtma sağlayarak istenilen alanlara kaplama yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, hem enerji verimliliğini artırmakta hem de temel malzemenin içyapısını etkilemeden sadece yüzeyin istenilen özelliklere kavuşmasını

sağlamaktadır (Wang, vd., 2010). lazerle modifiye edilen yüzeylerde oluşan tribo-oksitlerin, sürtünme davranışı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ve malzeme aşınmasını minimize ettiğini ifade etmektedir.

Yüzey kaplama teknolojisinin geleceği, akıllı kaplamalar ve çok katmanlı yapılar gibi ileri düzey tribolojik mühendislik çözümleri ile şekillenmektedir. Günümüzde nano teknolojinin katkısıyla geliştirilen çok fazlı kaplamalar; yalnızca yüksek sertlik ve aşınma direnci değil, aynı zamanda çevresel sensörlük, kendi kendini iyileştirme veya adaptif tepki verme gibi fonksiyonel özellikler de kazandırmaktadır. Bu bağlamda yüzey mühendisliği, yalnızca bir koruma veya güçlendirme tekniği değil, aynı zamanda entegre bir sistem tasarımı aracı haline gelmiştir (Wang ve Hwang,2004). AISI 4340 çeliği üzerinde uyguladıkları yüzey modifikasyonlarında, elektron ışını ile yapılan işlemlerin yüzey sertliği ve mikroyapısal kontrol açısından oldukça başarılı sonuçlar verdiğini vurgulamaktadır.

2.2.1. Kaplama yöntemleri sınıflandırması

Lazer kaplama teknolojisi, malzeme yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilen modern yüzey işleme yöntemlerinden biridir. Bu teknoloji, genel olarak üç temel kategoriye ayrılabilir: biriktirme, modifikasyon ve implantasyon esasına dayalı sınıflamalar. Biriktirme yöntemleri içerisinde daldırma, püskürtme, buhar biriktirme (PVD, CVD) gibi teknikler yer almakta olup; bu teknikler aracılığıyla kaplama malzemesi doğrudan yüzeye aktarılmakta ve fiziksel ya da kimyasal yollarla tutundurulmaktadır (Gökmen ve Kışla, 2022).

Lazer kaplama özelinde yapılan sınıflamada, besleme şekline göre farklı sistemlerden söz etmek mümkündür. Bunlar önceden yerleştirilmiş toz sistemi, eş eksenli (koaksiyal) toz sistemi, eksen dışı toz sistemi ve tel besleme sistemidir. Bu sınıflama, kaplama malzemesinin lazer ışını ile bulunduğu geometriye göre yapılmakta ve her bir yöntemin kaplama kalınlığı, yüzey homojenliği ve proses hassasiyeti gibi parametreler üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Özellikle eş eksenli besleme yöntemi, toz ve lazer ışınının aynı eksenle birleşmesiyle daha kararlı ve sürekli bir kaplama sağlayarak endüstride ön plana çıkmaktadır (Dindar vd., 2021).

Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılmasında ayrıca lazer ışınının çalışma modu ve enerji transfer biçimi de önemlidir. Sürekli dalga (CW) modunda çalışan lazer sistemleri geniş alanlı, derin penetrasyonlu kaplamalar için tercih edilirken; darbeli lazer sistemleri

ince film kaplamaları ve mikroyapı kontrollü uygulamalar için uygundur. Bu bağlamda lazerle yüzey alaşımlama, lazer sinterleme, lazer dolgu kaplama ve doğrudan metal biriktirme (DED) gibi farklı uygulama türleri, işlem geometrisi ve enerji yoğunluğu açısından birbirinden ayrılmaktadır (Artkın, 2022).

Diğer taraftan, endüstride lazer dışı tekniklerle uygulanan kaplama yöntemleri de fiziksel/kimyasal sınıflama temelinde ele alınmaktadır. Örneğin, baskı kaplama, elektroiletken kaplama ve sülfatlama gibi teknikler genellikle cam, seramik ve polimer yüzeylerde kullanılmaktadır. Bu yöntemler, genellikle düşük sıcaklıkta ve yüksek yüzey tekrarlılığı aranan alanlarda tercih edilmektedir. Ancak bu tekniklerin homojenlik, yapışma mukavemeti ve kalınlık kontrolü gibi yönlerden lazer kaplama yöntemlerine kıyasla sınırlı kaldığı da bilinmektedir (Özsoy ve Çolak, 2018).

Son olarak, kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması yalnızca fiziksel koşullara değil, aynı zamanda uygulama amacına da göre yapılmaktadır. Örneğin, anti-mikrobiyal kaplamalar, sürtünme ve aşınma direnci için yapılan tribolojik kaplamalar, termal bariyer kaplamaları ve biyo-uyumlu kaplamalar gibi işlevsel ayrımlar yapılabilmektedir. Bu doğrultuda geliştirilen çok katmanlı ve nano-kompozit kaplamalar, yüzey mühendisliği alanında yeni bir paradigma oluşturmaktadır. Nitekim günümüzde, hem fonksiyonel hem de estetik gereksinimlere yanıt verebilen kaplama teknolojilerinin sınıflandırılması, çoklu disiplinlerin katkısıyla sürekli olarak evrilmektedir (Kayaalp ve Hasırcı, 2021).

2.2.2. Lazerle kaplama tekniği ve avantajları

Lazerle kaplama tekniği, yüzey mühendisliği uygulamaları içinde yüksek hassasiyet ve kontrollü işlem kabiliyeti nedeniyle son yıllarda öne çıkan yöntemlerden biri olmuştur. Bu teknikte, yüksek yoğunluklu bir lazer ışını aracılığıyla toz ya da tel formundaki kaplama malzemesi, temel malzemenin yüzeyinde ertitilerek homojen bir kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Lazer ışınının odaklandığı noktada oluşan ergiyik havuz, hem kaplama malzemesinin hem de alt tabakanın kısmi ergimesini sağlamaktadır. Bu işlem sonucunda oluşan hızlı katılaşma, yüksek yapışma mukavemeti ve ince tane boyutu gibi mikro yapısal avantajlar sunmaktadır (Wang vd., 2010).

Tekniğin en önemli avantajlarından biri, lazer ışınının doğrusal, kontrollü ve sınırlı bir enerji girdisi sağlaması sayesinde minimum ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) oluşturmamasıdır. Bu durum, temel malzemenin içyapısının bozulmadan korunmasını mümkün kılarken aynı zamanda yüksek geometrik hassasiyetli uygulamalara da izin

vermektedir. Özellikle karmaşık şekilli bileşenlerde, minimal deformasyonla kaplama yapılabilmesi sayesinde lazerle kaplama tekniği geleneksel kaynak ve termal sprey yöntemlerinin önüne geçmektedir (Duradzhi ve Lavrova,1986).

Lazerle kaplama işleminde kullanılan yüksek soğuma hızları sayesinde ince taneli, homojen ve yoğun mikroyapılar elde edilmektedir. Bu yapıların özellikleri, kaplamanın aşınma, korozyon ve ısıl yorulma dirençlerini ciddi oranda artırmaktadır. Ayrıca difüzyon bölgesinin varlığı, kaplamanın temel malzeme ile metalurjik bağ kurmasına olanak tanımakta; bu da mekanik yükleme altındaki performansını artırmaktadır. Elektrolitik plazma, nitrüleme veya borlama gibi tekniklerde bu tür bir bağ genellikle yüzeyle sınırlı kalırken, lazerle kaplamada derinlemesine nüfuziyet mümkündür (Kumruoğlu vd., 2009).

Yöntemin endüstriyel uygulamalardaki bir diğer avantajı da, prosese dijital kontrol sistemlerinin entegre edilebilmesi sayesinde seri üretime uygunluk göstermesidir. Lazer sistemleri robotik kollarla entegre çalışabildiğinden, otomotiv, havacılık ve biyomedikal endüstrilerdeki hassas tolerans gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Ayrıca bu yöntemle yüksek enerji verimliliği elde edilmekte; klasik ısıl işlem yöntemlerine göre enerji tüketimi düşürülmekte ve işlem süresi azaltılmaktadır (Cionea., 2012).

Yüzey özelliklerini hedefe yönelik olarak değiştirilebilme kabiliyeti sayesinde lazerle kaplama, fonksiyonel gradyanlı malzeme üretimi, lokal onarım uygulamaları ve prototipleme işlemleri için de yaygın olarak tercih edilmektedir. Örneğin, AISI 4340 çeliği üzerine lazerle gerçekleştirilen kaplamalar, özellikle yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlarda gösterdiği performans ile dikkat çekmekte; lazerin ısı girdisini optimize etmesiyle daha düşük artık gerilme değerleri sağlanabilmektedir (Wang ve Hwang., 2004). Bu nedenle, lazerle kaplama tekniği, klasik yüzey kaplama yöntemlerinden farklı olarak daha özelleştirilebilir, kontrollü ve entegre edilebilir bir işlem tekniği sunmaktadır.

2.2.3. Yüzey kaplamada kullanılan toz malzemeler

Lazerle kaplama işlemlerinde kullanılan toz malzemeler, nihai kaplamanın performansını doğrudan etkileyen en önemli bileşenlerdendir. Bu tozlar yalnızca fiziksel bir örtü sağlamaktan öte, kaplama yüzeyinin mekanik, tribolojik, termal ve kimyasal özelliklerini belirlemekte ve uygulama amacına göre seçilmektedir. Tozların kimyasal bileşimi, partikül boyutu, morfolojisi, akışkanlık özellikleri, yoğunluk ve ergime sıcaklığı

gibi parametreler, kaplama verimi ve kalitesi üzerinde belirleyici role sahiptir. Lazer ışını altında meydana gelen hızlı ergime ve katılaşma süreci nedeniyle toz malzemelerin lazer ışınıyla olan etkileşim karakteristiği, diğer kaplama yöntemlerinden farklı olarak çok daha kritik bir nitelik taşımaktadır (Wang vd., 2010).

Yüzey kaplama amaçlı kullanılan tozlar genel olarak metalik, seramik ve kompozit esaslı olarak üç temel grupta incelenebilmektedir. Metalik esaslı tozlar arasında nikel, kobalt ve demir bazlı süperalaşımlar öne çıkmakta; bu alaşımlar özellikle aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direnci sağlamak amacıyla tercih edilmektedir. Örneğin, NiCrBSi esaslı tozlar, lazerle kaplamada sık kullanılan malzemelerdendir ve yüksek yüzey sertliği ile metalurjik bağlanma kabiliyeti sunmaktadır (Duradzhi ve Lavrova, 1986). Kobalt esaslı alaşımlar ise daha çok biyomedikal uygulamalarda kullanılırken, demir esaslı tozlar maliyet etkinliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde tercih edilmektedir.

Seramik tozlar ise yüksek sertlik ve ısı direnç özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Al_2O_3 , TiC, TiN, WC ve ZrO_2 gibi seramik esaslı tozlar, genellikle metalik matrisli kompozit kaplamaların içerisine katılarak hibrit özellikte yüzeyler elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tür seramikler, özellikle yüksek aşınma, oksidasyon ve sıcaklık dayanımı gerektiren uçak motor parçaları, türbin kanatları ve zırh sistemlerinde kullanılmaktadır. Seramik katkı tozlar, metalik fazlarla birlikte kullanıldığında yüksek mikroyapı sertliği ve tribolojik performans artışı sağlamaktadır (Cionea, 2012). Bununla birlikte, seramik tozlarının lazerle etkileşiminde oluşabilecek termal çatlaklar ve gözeneklilik gibi problemler, uygun lazer parametreleri ile minimize edilmeye çalışılmaktadır.

Kompozit esaslı tozlar ise, metalik ve seramik bileşenlerin birlikte kullanıldığı mühendislik malzemeleridir. Bu yapılar, hem metalik fazın tokluğundan hem de seramik fazın sertliğinden faydalanarak hibrit özellikler ortaya çıkarmaktadır. Örneğin WC-Co, Ni- Al_2O_3 ve Fe-TiC kompozitleri, aşınma direnci yüksek yüzeyler için geliştirilen çok fazlı kaplama malzemeleridir. WC-Co bazlı tozlar, yüksek basınç ve darbe etkisine maruz kalan kalıp yüzeyleri gibi alanlarda kullanılmakta; kaplama sonrası elde edilen mikro yapılar, yüksek sertlik (≥ 1200 HV) ve düşük aşınma katsayısı ile dikkat çekmektedir (Kumruoğlu vd., 2009).

Toz malzemelerin yüzey kaplamadaki başarısı, yalnızca kimyasal yapısıyla değil, aynı zamanda fiziksel özellikleriyle de ilişkilidir. Özellikle partikül boyut dağılımı ve şekli, kaplama yüzeyinin yoğunluğu ve homojenliği üzerinde belirleyici olmaktadır.

Küresel morfolojiye sahip, dar boyut dağılım aralığındaki tozlar, ergime verimi açısından daha avantajlı olup, daha düzgün kaplama yüzeyi elde edilmesini sağlamaktadır. Düzensiz şekilli ve çok geniş boyut dağılımına sahip tozlar ise ergime problemleri ve yüzey gözenekliliği gibi sorunlara yol açabilmektedir (Wang ve Hwang, 2004). Bu nedenle lazer kaplama uygulamalarında kullanılan tozların yüksek saflıkta, akışkanlığı yüksek ve lazer ışınıyla uyumlu özellikte olması önemlidir.

Endüstriyel uygulamalarda toz seçimi, sadece teknik performansa değil, aynı zamanda maliyet ve erişilebilirlik gibi ekonomik parametrelere göre de şekillenmektedir. Örneğin, yüksek performans gerektiren havacılık uygulamalarında nikel ve kobalt bazlı pahalı alaşımlar tercih edilirken, otomotiv ve ağır sanayi uygulamalarında demir esaslı daha düşük maliyetli tozlar tercih edilebilmektedir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen nano boyutlu ve yüzeyi fonksiyonelleştirilmiş tozlar da lazer kaplama teknolojisine entegre edilmekte; bu sayede yüzey özelliklerinin daha hassas ve amaca uygun biçimde kontrol edilmesi mümkün hale gelmektedir (Cionea, 2012).

2.3. Malzeme Bilimi Temelleri

Malzeme bilimi, mühendislik disiplinleri arasında köprü işlevi gören, atomik ve moleküler düzeyden başlayarak makroskopik özelliklere kadar uzanan çok katmanlı bir araştırma alanıdır. Bu alan, yapı–özellik–işlem–performans ilişkisi temelinde ilerlemekte ve malzemelerin iç yapılarının, uygulama koşulları altındaki davranışlarına etkisini incelemektedir. Malzemelerin mekanik, elektriksel, termal, manyetik ve optik özellikleri, atomlar arası bağ türleri ve kristal yapılar gibi temel fiziksel kavramlarla doğrudan ilişkilidir (Wierzbicki ve Burakowski., 1998). Özellikle yüzey mühendisliği uygulamalarında, bu temel özelliklerin mikro düzeyde kontrol edilmesi, makro düzeyde performans optimizasyonuna olanak tanımaktadır.

Malzemelerin kristal yapısı ve bu yapı içerisindeki kusurlar, mühendislik uygulamaları açısından belirleyici parametrelerdir. Kristal örgü tipi (örneğin FCC, BCC veya HCP), atomların paketlenme yoğunluğunu ve böylece malzemenin akma gerilmesini, şekil değişimine karşı direncini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca dislokasyon hareketleri ve tane sınırları gibi mikro yapısal unsurlar, özellikle plastik deformasyon davranışı üzerinde baskın etkiye sahiptir. Bu bağlamda, yüzey kaplama uygulamalarında hedeflenen performans özelliklerinin sağlanabilmesi için, uygulanan prosesin malzeme

mikroyapısını nasıl etkilediğinin detaylı biçimde anlaşılması gerekmektedir (Bhadashia ve Honeycombe, 2017).

Termomekanik işlemlerle modifiye edilen yüzeylerde meydana gelen faz dönüşümleri ve tane boyutu değişimleri, malzeme biliminin doğrudan konusudur. Lazerle kaplama veya yüzey sertleştirme gibi işlemler sonucunda oluşan hızlı soğuma, genellikle ince taneli, yönlendirilmiş ve bazen metastabil fazlardan oluşan bir mikroyapı meydana getirmektedir. Bu tür yapılar, malzemenin sertliğini artırırken, süneklik ve tokluk gibi özellikleri düşürebilmektedir. Bu nedenle yüzey mühendisliği uygulamalarında, faz dönüşüm kinetiği, difüzyon mekanizmaları ve katı çözelti oluşumu gibi temel malzeme bilimi ilkeleri dikkatle değerlendirilmelidir (Duradzhi ve Lavrova, 1986).

Elektrokimyasal yöntemlerle yapılan yüzey modifikasyonlarında da, malzeme biliminin temel ilkeleri kritik rol oynamaktadır. Özellikle anodik oksidasyon, elektrolitik plazma işleme ve elektrokimyasal difüzyon gibi yöntemlerde, iyonların yüzeyle etkileşimi, yüzeyin atomik yapısını ve bağ yapısını değiştirerek yeni fazlar oluşmasına neden olmaktadır. Bu süreçler, sadece yüzeyin kompozisyonunu değil, aynı zamanda sertlik, elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci gibi mühendislik özelliklerini de doğrudan etkilemektedir. (Kumruoğlu vd., 2009), elektrolitik plazma yöntemi ile işlenmiş çeliklerde yüzeyde oluşan kompleks oksit ve karbür fazlarının, özellikle aşınma direnci üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuşlardır.

Yüzey işlemleriyle geliştirilen kaplamaların performansı, yalnızca malzemenin yapısına değil, aynı zamanda işlem sırasında oluşan termal gerilmelere ve artık gerilme dağılımlarına da bağlıdır. Lazer veya elektron ışını gibi yüksek yoğunluklu enerji kaynakları ile yapılan işlemlerde, yüzeyin ani ısıtılması ve soğutulması sonucunda malzeme içinde mikro düzeyde artık gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler, kaplamanın çatlama eğilimi, soyulma direnci ve yorulma dayanımı üzerinde belirleyici etkiler yaratmaktadır. Cionea (2012), bu tür işlemler sonrasında oluşan mikroyapısal fazların ve gerilme dağılımlarının, yüzey sertliği ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir.

Malzeme biliminin en önemli ilkelerinden biri olan yapı-özellik ilişkisi, özellikle çok fazlı sistemlerde daha karmaşık hale gelmektedir. Kompozit kaplamalarda kullanılan farklı fazların birbirleriyle etkileşimi, ara yüzey davranışı, yük aktarımı ve termal genleşme uyumu gibi faktörler, malzemenin servis ömrü üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle, kaplama sistemlerinin tasarımında sadece tekil fazlar değil, fazlar arası uyum da değerlendirilmelidir. (Wang vd.,2010). dökme çelik üzerinde tribo-

oksit matrisli sistemlerin sürtünme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında, bu tür faz kombinasyonlarının sürtünme katsayısını düşürürken yüzey hasarını da minimize ettiğini raporlamışlardır.

2.3.1. Demir ve alaşımlarının yapısı

Dökme demirler, çeşitli özellikler barındıran bir demir esaslı alaşım grubudur. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere, bu malzemeler katı halde şekillendirilmez; bunun yerine ergitilerek kalıplara dökülüp biçimlendirilir. Genellikle %1'in altında karbon içeren çeliklerin aksine, dökme demirler %2 ila %4 oranında karbon ve %1 ila %3 oranında silisyum içerir. Malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek veya belirli uygulamalara uygun hale getirmek amacıyla, alaşıma çeşitli metalik ve ametalik elementler de eklenebilir. (Karagöz, 2008).

Gri dökme demirler, çok çeşitli kullanım alanlarına sahip malzemelerdir. Ancak, sineklikleri ve uzama kabiliyetleri oldukça sınırlıdır. Bu tür demirler, ötektik sıcaklığa ulaştığında, östenit fazının çözebileceğinden daha fazla karbon içerdiği için, yapısındaki fazla karbon lamel şeklinde grafit olarak ayrışır (Akman, 2006).

Demir esaslı alaşımların günümüzdeki mühendislik uygulamalarındaki yeri, yalnızca yüksek mukavemet ve sertlik özellikleriyle değil, aynı zamanda farklı ısı işlemleriyle değiştirilebilen mikroyapısal davranışlarıyla da açıklanmaktadır. Özellikle çelikler, karbon ve alaşım elementi katkılarına bağlı olarak geniş bir performans aralığı sunar. Düşük karbonlu çelikler (yaklaşık %0.05–0.25 C) şekillendirilebilirlik ve kaynaklara bilirlik açısından avantajlıyken; yüksek karbonlu çelikler (%0.6–1.0 C), sertlik ve aşınma direnci yönünden tercih edilmektedir (Callister ve Rethwisch, 2020).

Ferrit, perlit, martenzit, beynit gibi fazların miktarı ve dağılımı, çeliğin hem mikroyapısal hem de mekanik özelliklerini doğrudan belirlemektedir. Özellikle ısı işlem süreçleriyle elde edilen martenzitik yapı, yüksek sertlik ve dayanım sunarken; bu sertlik çoğu zaman gevreklik pahasına sağlanmaktadır. Bu nedenle çeliklerde uygulanan temperleme gibi ikincil ısı işlemler, kırılabilirliği azaltarak tokluk özelliklerinin artırılmasını mümkün kılmaktadır (Totten ve Howes, 2006).

Alaşım elementi olarak krom, nikel, molibden, vanadyum ve tungsten gibi elementlerin eklenmesiyle çeliklerin yüksek sıcaklık, korozyon ve yorulma direnci artırılabilir. Özellikle Cr içeren paslanmaz çelikler, yüzeyde oluşturdukları pasif film tabakası sayesinde kimyasal saldırılara karşı yüksek direnç göstermektedir (Sedriks,

1996). Bu tür çelikler, lazerle yüzey işleme tekniklerine de son derece uygundur çünkü lokal ısı girdisine karşı mikro yapısal dönüşümlere duyarlıdırlar.

Modern imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan yüksek alaşımlı takım çelikleri, aşınma, yüksek sıcaklık ve deformasyona karşı dayanım özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu çelikler, genellikle ısıl işlem görmüş ve mikro alaşım elementleriyle güçlendirilmiş formdadır. Lazerle yüzey kaplama gibi işlemler, bu tür alaşımlarda lokal sertlik artışı ve yüzey ömrü bakımından büyük kazanımlar sağlamaktadır (Li ve Liu, 2019).

Öte yandan, sünek dökme demirler (SG Iron) veya küresel grafitli dökme demirler (KGDD), grafit partiküllerinin küresel formda dağıtılmasıyla hem darbe dayanımı hem de işlenebilirlik açısından optimize edilmiş malzemelerdir. Bu tür dökme demirler, özellikle otomotiv ve boru sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta; lazerle modifiye edildiğinde ise yüzey sertliği ve aşınma direnci önemli ölçüde artırılmaktadır (Sahraoui vd., 2017).

Son yıllarda geliştirilen yüksek entropili alaşımlar (HEA) arasında Fe esaslı sistemler, geleneksel çeliklere göre daha yüksek dayanım/sıcaklık oranları ve termal kararlılık sunmaktadır. Bu alaşımların lazerle kaplama yöntemiyle yüzeye uygulanması, homojen ve fazca zengin mikro yapılar oluşturarak performansı ileri düzeye taşımaktadır (Zhang vd., 2019). Ayrıca, lazerle ergitme süreçlerinde oluşan hızlı soğuma nedeniyle bu tür alaşımlarda metastabil fazlar oluşabilir; bu da yüzey mukavemetinin ve korozyon direncinin ciddi biçimde artmasına neden olmaktadır.

2.3.2. WC ve B₄C takviye elemanları

Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir. Düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklık, yüksek elastik modülü, optik, mekanik, elektronik ve tribolojik özellikleri, yüksek termal kararlılığının yanında yüksek nötron yakalama kapasitesi özellikleri teknolojik açıdan bor karbüre çok önemli bir malzeme özelliği kazandırır (Lattemann ve Ulrich, 2007, Chen vd., 2006).

Bor karbürün erime sıcaklığı yaklaşık olarak 2450 °C'dir. Yüksek sertlik ve dayanıklılık açısından da üstün özelliklere sahip olması bor karbürü önemli hale getirmektedir. Bor karbür, zırh malzemesi olarak kullanılan alüminyum oksitten daha iyi özelliklere sahiptir. Sertlik ve dayanıklılık/yoğunluk oranı askeri amaçlı uygulamalarda önemli olduğu için bu alanlarda bor karbürün yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır.

(Shi vd., 2003). Bor karbür içerik bakımından yaklaşık % 78-80 B ve %20-22 C ihtiva etmektedir. Bu yüksek bor içeriği, bileşiğin yüksek erime noktasına sahip olmasına neden olmaktadır.

Tungsten karbür, "sert metal" sınıfında değerlendirilen ve tungsten ile karbon elementlerinin belirli oranlarda birleşmesiyle oluşan bir kimyasal bileşiktir. Yüksek sertlik ve dayanım özelliklerinin yanı sıra, düşük sürtünme katsayısı ve oksidasyona karşı gösterdiği yüksek direnç sayesinde, endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir (Lassner, 2000). Tungsten karbür içerik olarak %80-90 W ve %10-20 C ihtiva etmektedir.

2.3.3. Lazerle işlenebilir malzeme türleri

Lazer teknolojisinin malzeme işleme alanında yaygınlık kazanmasının temel nedeni, çeşitli malzeme gruplarına yüksek hassasiyetle müdahale edebilme kapasitesidir. Lazer ışınının odaklana bilirliliği, yönlendirile bilirliliği ve enerji yoğunluğunun kontrol edilebilir oluşu sayesinde, metalik, seramik, polimer ve kompozit malzemeler lazerle işlene bilirlilik açısından farklı düzeylerde potansiyel sunmaktadır. Ancak bu işlem başarısı, malzemenin optik ve termal özelliklerine bağlı olarak lazer ışınının absorpsiyonu, iletimi ve yansımaları gibi parametreler çerçevesinde şekillenmektedir. Dolayısıyla, yüzeyde kontrollü bir modifikasyon oluşturulabilmesi için malzeme-lazer etkileşimi dikkatle analiz edilmelidir (Wierzbicki ve Burakowski, 1998).

Metalik malzemeler, lazer işlemleri açısından en geniş uygulama alanına sahip grubu oluşturur. Bu grupta özellikle demir esaslı malzemeler, lazerle kaynak, kaplama, sertleştirme ve yüzey alaşımlama gibi çok çeşitli uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Düşük, orta ve yüksek karbonlu çelikler, lazerle yüzey modifikasyonlarında gösterdikleri faz dönüşümleri, mikro yapı kontrolü ve yüzey sertliği gibi mekanik parametrelerdeki iyileşme sayesinde kritik mühendislik alanlarında tercih edilmektedir. Örneğin (Kumruoğlu vd., 2009). orta karbonlu çeliklerin elektrolitik plazma ile işleminden geçirilmesiyle yüzeyde kompleks karbür yapılarının oluştuğunu ve bu yapıların mikroyapısal iyileşmeye ek olarak sertlik ve aşınma direncini artırdığını ortaya koymuştur. Benzer sonuçlar, lazerle yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde de gözlemlenmekte, ısıl deformasyonun minimuma indirilmesiyle parça bütünlüğü korunmaktadır.

Lamel, vermiküler ve küresel grafitli dökme demirler gibi demir esaslı alaşımlar da lazer işlemleri açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Dökme demirlerin içerdiği grafit yapılar, lazer ışınının lokal ısı yayılımını etkileyerek yüzeyde farklı termal gerilim dağılımları oluşturabilir. Ancak uygun lazer parametrelerinin seçilmesiyle, bu malzemelerde de yüksek sertlik, metalurjik bağlanma ve aşınma direnci elde edilebilmektedir. (Wang vd., 2010). tarafından yapılan çalışmalarda, tribo-oksit katkılı lazer kaplamalarla modifiye edilen çelik yüzeylerinde aşınma direncinin ve yüzey bütünlüğünün ciddi oranda geliştirildiği gösterilmiştir.

Seramik malzemeler, lazerle işlenebilirlik açısından belirli sınırlamalar barındırır da, yüksek sıcaklık dayanımı ve sertlik taleplerinin karşılandığı uygulamalarda vazgeçilmezdir. Lazerin temassız ve lokal ısı girdili yapısı, mekanik olarak kırılğan seramik yüzeylerde kontrollü mikroyapı dönüşümleri ve yüzey pürüzlülüğü düzenlemeleri yapılmasına olanak tanır (Cionea, 2012). Özellikle yüzey çatlaklarının minimize edilmesinde lazer uygulamalarının etkili olduğunu vurgulamıştır.

Polimerlerin lazerle işlenebilirliği, düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle genellikle düşük güçlü lazer sistemleriyle yürütülmektedir. Özellikle tıbbi ve mikro elektronik uygulamalarda kullanılan polimer malzemeler, lazer yardımıyla çapraz bağlama, mikro kesme veya yüzey pürüzlendirme gibi işlemlerle hassas şekilde modifiye edilebilmektedir (Duradzhı ve Lavrova, 1986).

Kompozit malzemeler ise farklı fazların lazer ışınına olan farklı tepkileri nedeniyle karmaşık etkileşimler gösterir. Örneğin, metal matrisli kompozitlerin lazerle işlenmesinde, her fazın absorpsiyon davranışı ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Kumruoğlu vd. (2009), bu tür malzemelerde lazer parametrelerinin doğru ayarlanmasıyla yüzey sertliğinde ve mikroyapı bütünlüğünde önemli iyileşmeler sağlandığını belirtmiştir.

2.3.4. Yüzey sertliği, aşınma ve korozyon kavramları

Malzeme mühendisliğinde yüzey özellikleri, bir bileşenin hizmet ömrü, işlevselliği ve güvenilirliği açısından belirleyici bir konumdadır. Yüzey sertliği, aşınma ve korozyon direnci, özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan parçaların performansını doğrudan etkileyen temel kavramlardır. Bu özellikler; malzemenin kimyasal bileşimi, mikro yapısı, yüzey işlem geçmişi ve servis koşullarıyla ilişkilidir. Yüzey mühendisliği uygulamaları, bu özellikleri optimize etmek amacıyla geliştirilmiş tekniklerin başında

gelmekte; lazerle yüzey sertleştirme, kaplama ve alaşımlama gibi yöntemler, bu bağlamda büyük önem taşımaktadır (Wierzbicki ve Burakowski, 1998).

Yüzey sertliği, malzemenin yüzey tabakasına uygulanan bir kuvvete karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Genellikle Vickers, Rockwell veya Brinell yöntemleri ile ölçülür ve mikro düzeydeki plastisite davranışı hakkında doğrudan bilgi vermektedir. Yüksek yüzey sertliği, özellikle aşınma ve deformasyona karşı dayanımı artırdığı için mekanik sistemlerde tercih edilmektedir. Sertlik, kristal yapı tipi, tane boyutu, çökelti fazlarının varlığı ve dislokasyon yoğunluğu gibi mikroyapısal parametrelerden etkilenmektedir (Cionea,2012). Elektrolitik plazma yöntemleriyle işlenmiş yüzeylerde oluşan faz dönüşümleri sayesinde yüzey sertliğinde anlamlı artışlar sağlandığını ve bunun yüzey mühendisliği uygulamalarında etkinliğini artırdığını belirtmektedir.

Aşınma ise, iki yüzeyin göreceli hareketi sonucu meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma türleri arasında yapışma, abrazyon, yüzey yorulması, erozyon ve tribo-kimyasal aşınma gibi mekanizmalar yer almaktadır. Aşınmanın gerçekleşme hızı, temas eden yüzeylerin sertliği, yüzey pürüzlülüğü, ortam koşulları (nem, sıcaklık, partikül varlığı) ve temas süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Lazerle sertleştirme ve kaplama gibi yöntemlerle yüzey sertliği artırıldığında, özellikle abrazyona karşı önemli iyileştirmeler sağlanabilmektedir (Kumruoğlu vd.,2009). Orta karbonlu çeliklerin yüzeyine uyguladıkları elektrolitik plazma işlemleri sonucunda, oluşan oksit ve karbür fazlarının tribolojik davranışı büyük ölçüde iyileştirdiğini, malzeme kaybının azaldığını ve yüzeyin hizmet ömrünün uzadığını ortaya koymuştur.

Korozyon ise, malzemelerin çevresel etkiler altında kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlarla bozulmasıdır. Korozyonun doğası gereği malzemenin içyapısı ve yüzey morfolojisi ile doğrudan ilişkisi vardır. Özellikle heterojen mikroyapı, kümelenmiş fazlar ve artık gerilmeler korozyona yatkınlığı artırabilir. Alüminyum ve paslanmaz çelik gibi bazı metallerin yüzeyinde oluşan pasif oksit tabakaları doğal bir koruyucu işlev görse de, bu tabakanın sürekliliği ve yapısal bütünlüğü kritik önemdedir (Duradzhı ve Lavrova,1986). Alüminyum ve çelik yüzeylerinde elektrolitik plazma işlemleri sonrası oluşan oksit kaplamaların, özellikle asidik ortamlarda korozyon oranlarını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Yüzey sertliği, aşınma ve korozyon arasındaki ilişki dinamik ve çok yönlüdür. Yüksek sertlik, aşınmayı azaltabilir; fakat çok sert ve gevrek yüzeyler çatlamaya daha yatkındır ve bu çatlaklar korozyonun başlangıç noktası haline gelebilir. Bu nedenle ideal yüzey yapısı, hem yeterli sertlik hem de kontrollü süneklik sağlayacak şekilde

tasarlanmalıdır. (Wang vd., 2010). Dökme çelik örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmada, tribo-oksitlerin mikro yapıda dağılımı ve matris ile etkileşiminin, yüzeyin sürtünme ve korozyon davranışı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, mikroyapı mühendisliğinin yüzey performansı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Yüzey mühendisliğinde nihai amaç, bu üç temel özelliği birlikte optimize edebilmek ve uygulama ortamına uygun yüzey tasarımları geliştirmektir. Bu bağlamda lazer destekli yüzey işlemleri; kontrollü enerji girişi, mikro yapı mühendisliği imkânı ve yerel modifikasyon kabiliyeti sayesinde, sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı üzerinde aynı anda iyileştirme yapabilen bütünleşmiş yöntemler sunmaktadır. Bu nedenle malzeme biliminin temel ilkeleri ile yüzey işlem teknolojilerinin eş güdümlü olarak değerlendirilmesi, özellikle yüksek performanslı sistemlerde uzun ömürlü ve dayanıklı yüzeylerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Wang ve Hwang, 2004).

3. YÖNTEM

Metal malzemelerin yüzeylerini dış etkenlerden korumak veya yüzey özelliklerini geliştirmek için sıklıkla yüzey kaplama yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu yöntemlerle metal esaslı malzemelerin aşınma, korozyon veya yorulma davranışları iyileştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında da güncel yüzey kaplama yöntemlerinden biri olan lazer kaplama yöntemi ile yüzey kaplama uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında altlık malzeme olarak düşük karbonlu alaşımsız bir çelik olan St37 çelik malzemesi tercih edilmiştir. Aşınma performansı dikkate değer olmayan St37 malzemesi, kimyasal bileşimindeki düşük karbon ve düşük alaşım elementi oranlarından dolayı kaynak ve kaplama işlemlerine uygun olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeplerden ötürü St37 malzemesi altlık malzeme olarak belirlenmiştir.

Kaplama malzemesi olarak Fe esaslı matris ile WC ve B₄C takviyelerinden oluşan metal esaslı kompozit bir malzeme tercih edilmiştir. Fe esaslı matris tozlarının başarılı eriyik havuzu oluşturabilme kabiliyeti, WC ve B₄C gibi seramik tozlarının yüksek sertlik ve gelişmiş aşınma performansları bu tercihte ana etkenler olmuştur.

Yüzey kaplama yöntemi olarak tercih edilen lazer kaplama yöntemi altlık malzeme ile başarılı bir arayüzey oluşturma kabiliyeti ile dikkat çekmektedir. Gelecek vaat eden yüzey kaplama yöntemlerinden biri olan lazer kaplama yöntemi altlık malzemede mikroyapı kusurlarına sebep olmadan metal esaslı kompozit kaplamaların uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kaplama malzemesindeki WC takviyesi oranının mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi çeşitli mikroyapı analizleri ve mekanik testler yardımıyla incelenmiştir. Gerçekleştirilen kaplama uygulamaları, analizler ve testler ilgili alt bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1. Lazer Kaplama Uygulamaları

Tez çalışması kapsamında kullanılacak altlık malzeme ve kaplama tozları çeşitli firmalardan ticari olarak temin edilmiştir. Altlık malzeme olarak St37 çelik malzemesinden 1000x10x10 mm boyutlarında çubuklar temin edilmiştir. Kaplama

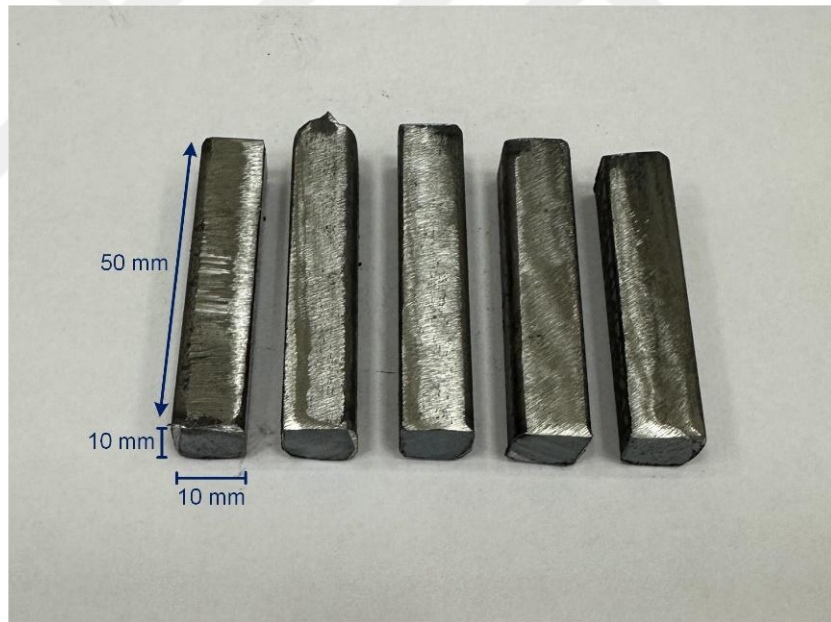
malzemesini oluşturan matris ve takviye tozları (-70 μm) ise Gensa Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. St37 malzemesinin ve kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de verilmiştir. Altlık malzeme ve kaplama tozlarının görselleri ise sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. St37 çelik malzemesinin kimyasal bileşimi

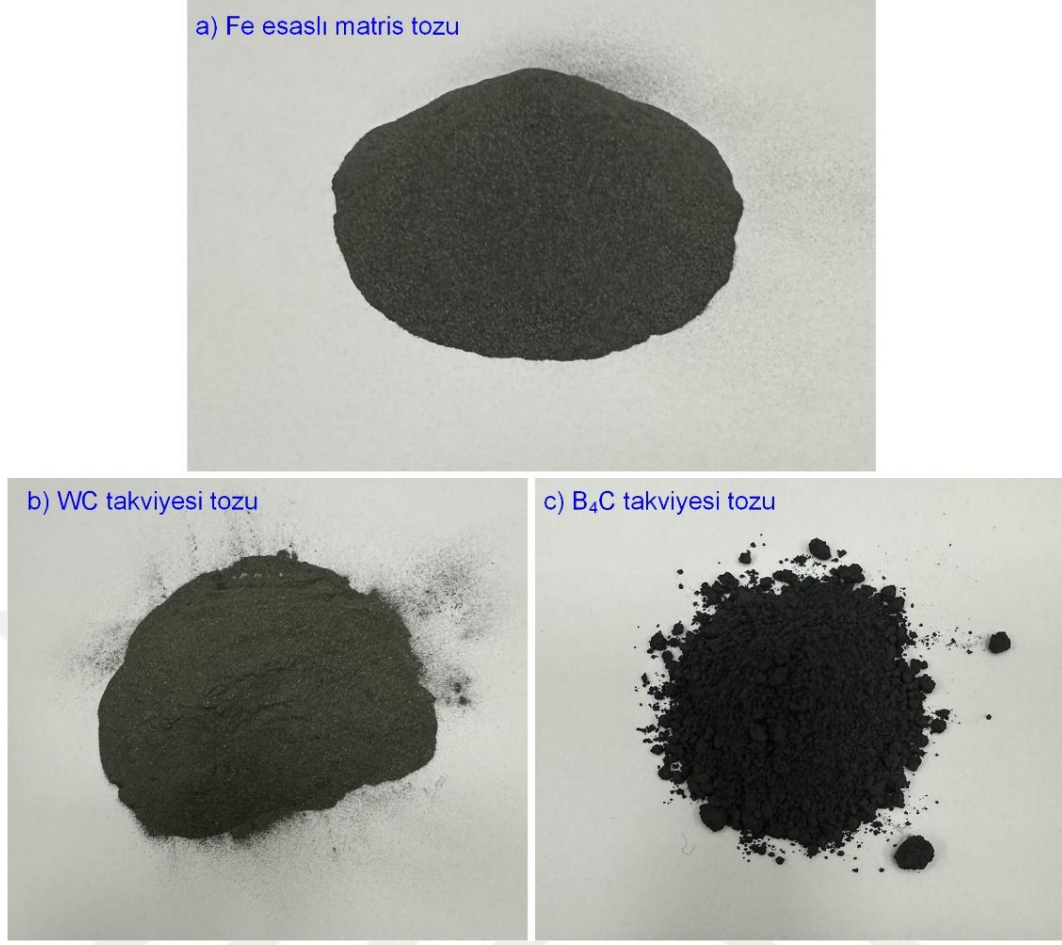
Altlık Malzeme	Kimyasal Bileşim (ağ.%)					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
St37	0.17-0.20	0.9-1.4	0.15-0.35	0.04	0.04	Kal.

Çizelge 3.2. Kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri

Kaplama Tozu	Kimyasal Bileşim (ağ.%)								
	C	Mn	Cr	Si	Al	Ni	P	S	Fe
FeCr	8-10	-	64-70	≤ 1.5	-	≤ 0.5	≤ 0.04	≤ 0.06	Kal.
FeMn	5.5-7.5	75-78	-	≤ 1.8	-	-	≤ 0.24	≤ 0.02	Kal.
FeSi	≤ 0.1	≤ 3	≤ 0.6	74-77	≤ 1	-	≤ 0.04	≤ 0.015	Kal.



Şekil 3.1. St37 çelik malzemesi



Şekil 3.2. Kaplama tozları

Kaplama uygulamaları öncesinde yapılan hazırlık çalışmaları kapsamında ilk olarak St37 çelik çubuklar spiral makinesi ile kesilerek 50x10x10 mm boyutlarında kaplama numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelerin yüzeyleri taşlanıp etil alkol ile temizlenerek yüzeyindeki kir, yağ ve tufal tabakasından arındırılmıştır (Şekil 3.1). Böylece altlık malzeme ile kaplama arasında oluşabilecek muhtemel safsızlıkların önüne geçilmiştir. Kaplama matrisini oluşturan Fe, FeCr, FeMn ve FeSi tozları ile WC ve B₄C takviye tozları karışım öncesinde Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan PROTHERM marka tav fırınında (Şekil 3.3a) 100 °C’ de 1 saat bekletilerek kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma işleminden sonra KERN marka hassas terazi (Şekil 3.3b) yardımıyla toz karışımları hazırlanmıştır. Toz karışımlarının ağırlıkça oranları Çizelge 3.3’ te verilmiştir.

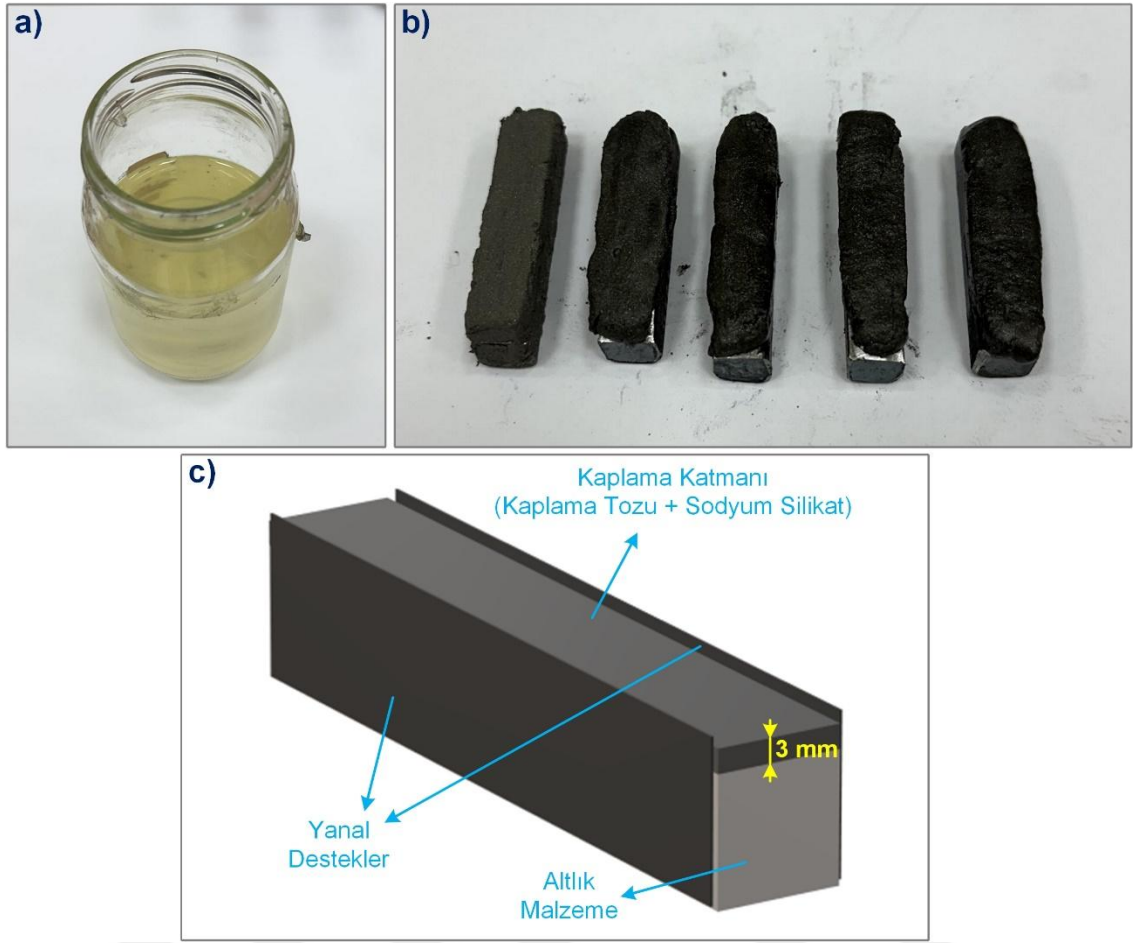


Şekil 3.3. Tav fırını (a) ve hassas terazi (b)

Çizelge 3.3. Kaplama tozlarının karışım oranları

Karışım No	Matris (ağ.%)				Takviye (ağ.%)	
	Fe	FeCr	FeMn	FeSi	B ₄ C	WC
0	72	25	1	2	-	-
1	64.1	22.3	0.9	1.8	1	10
2	56.9	19.8	0.8	1.6	1	20
3	49.7	17.3	0.7	1.4	1	30
4	42.5	14.8	0.6	1.2	1	40

Toz karışımları hazırlandıktan sonra her bir karışım ayrı ayrı sodyum silikat (Şekil 3.4a) ile karıştırılarak jel formunda altlık malzemelerin yüzeyine tatbik edilmiştir (Şekil 3.4b). Kaplama tozu katman kalınlığı 3 mm olacak şekilde uygulanmıştır (Şekil 3.4c). Son olarak kaplama numuneleri tav fırınında kurutularak (100 °C – 30 Dakika) lazer uygulamaları öncesi hazırlık işlemleri tamamlanmıştır.



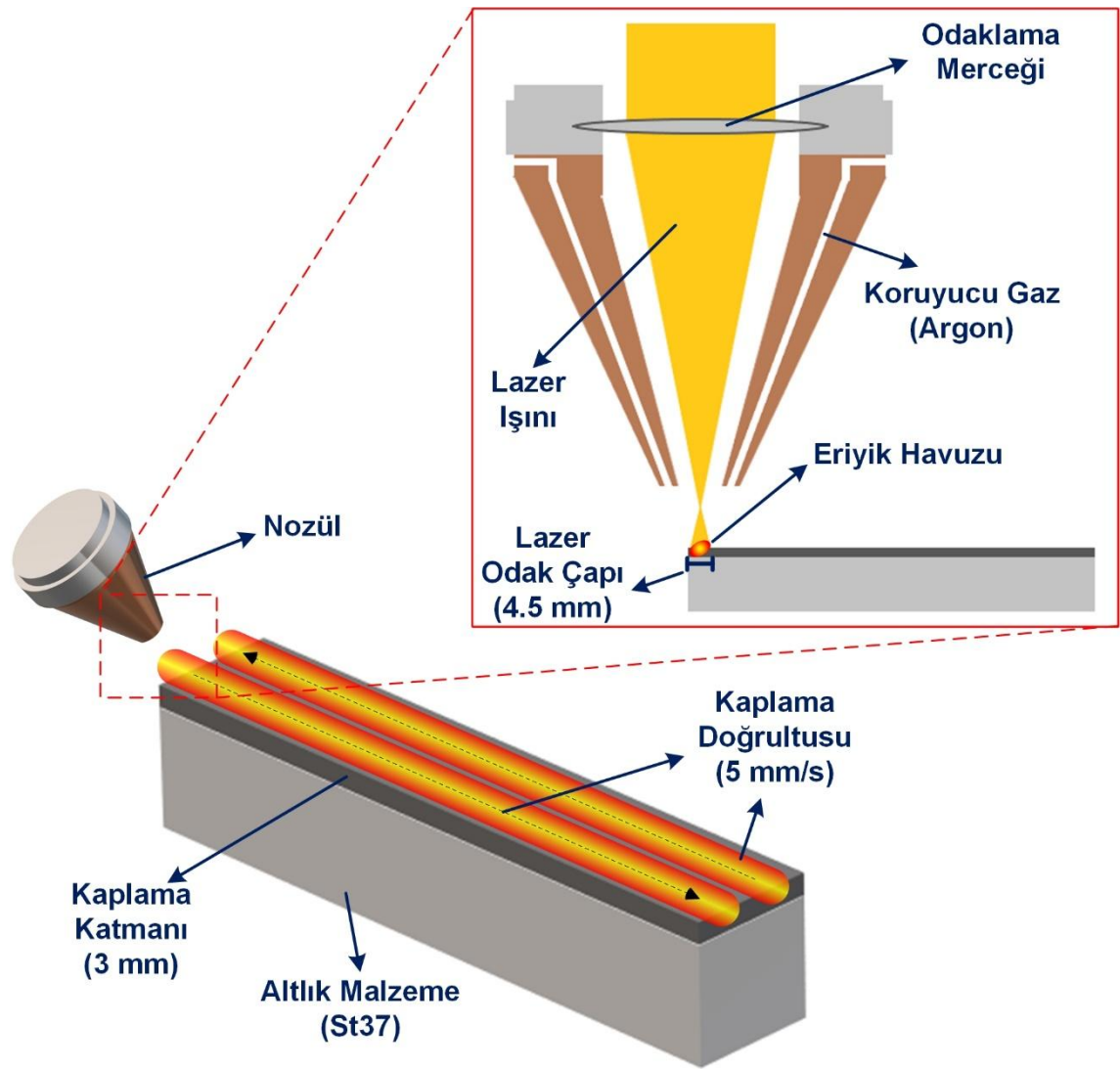
Şekil 3.4. Sodyum silikat (a), kaplama numuneleri (b) ve kaplama katmanının hazırlanması (c)

Kaplama numunelerinin hazırlık aşamaları tamamlandıktan sonra yüzey kaplama işlemleri Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan 2 kW güç kapasiteli lazer kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Koruyucu atmosfer olarak ise argon gazı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen lazer kaplama uygulamalarına ait parametreler Çizelge 3.4’ te verilmiştir.

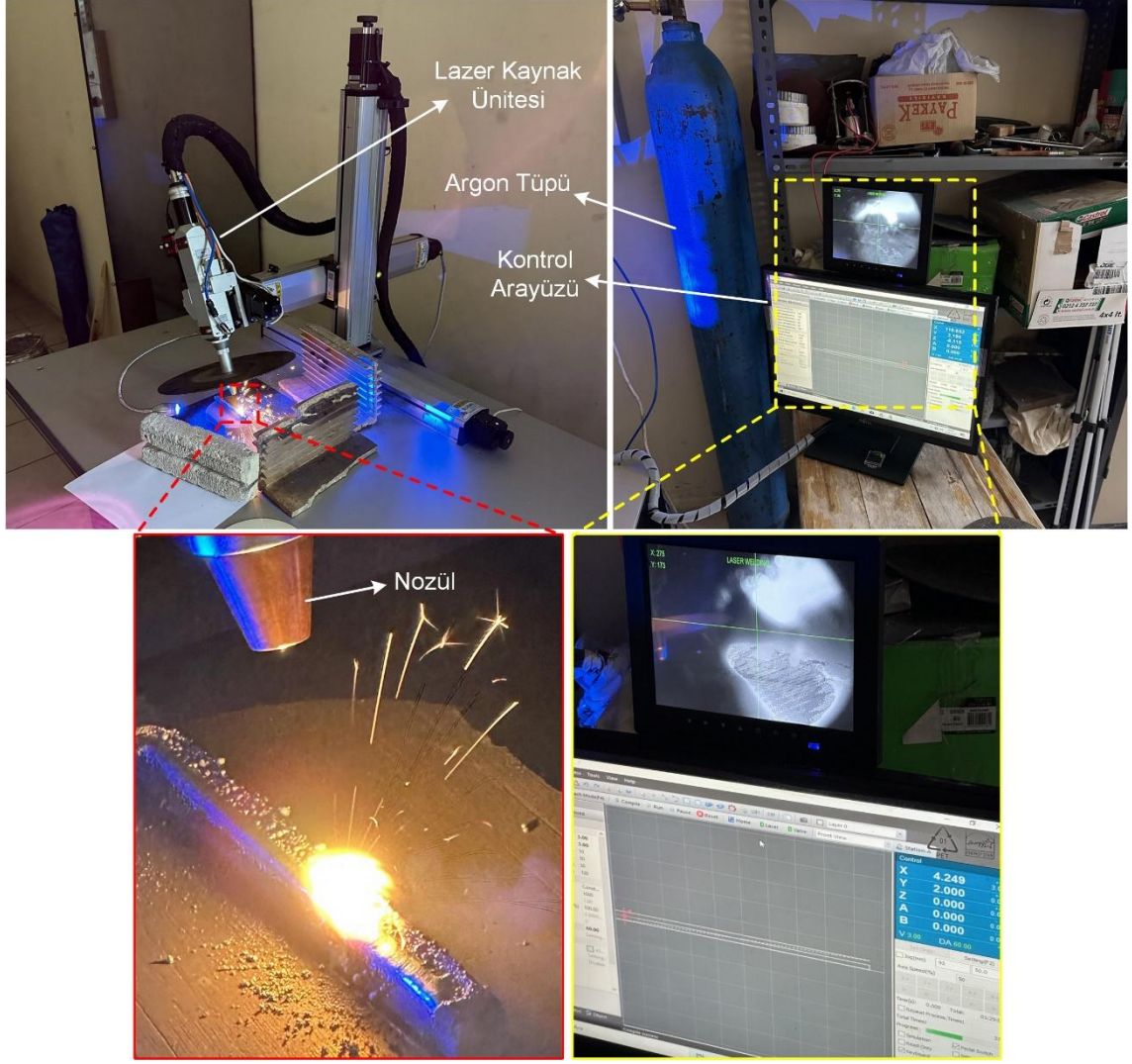
Çizelge 3.4. Lazer kaplama parametreleri

Kaplama Parametreleri	Değer
Kaplama katmanı (mm)	3
İlerleme hızı (mm/s)	5
Koruyucu gaz debisi (l/dk)	10
Lazer odak çapı (mm)	4.5
Nozül uzaklığı (mm)	40
Lazer ışını gücü (W)	1400
Lazer dalga boyu (nm)	1068
Lazer kaynağı	Fiber lazer

Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin her biri aynı koşullar altında kaplanmış olup, lazer kaplama işlemi iki adımda tamamlanmıştır (Şekil 3.5). İki adımlı kaplama doğrultusu (kaplama rotası) kontrol arayüzü üzerinden tayin edilmiştir. Lazer kaplama uygulamalarının tamamlandığı lazer kaynak ünitesi ve üretilen numuneler sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’ de görülmektedir. Kaplanmış numunelerin numaraları ve kaplama bileşimleri ise Çizelge 3.5’ te verilmiştir. Numuneler WC takviye oranına göre numaralandırılmıştır.



Şekil. 3.5. Lazer kaplama uygulamalarının şematik gösterimi



Şekil 3.6. Lazer kaynak ünitesi ve yüzey kaplama işlemi



Şekil 3.7. Kaplamalı numuneler (a) ve kaplamasız numune (b)

Çizelge 3.5. Numune numaraları ve kaplama karışımları

Numune No	Kaplama Karışımı		
	Fe Esaslı Matris (ağ.%)	B ₄ C Takviyesi (ağ.%)	WC Takviyesi (ağ.%)
N0	100	-	-
N10	89	1	10
N20	79	1	20
N30	69	1	30
N40	59	1	40
K	Kaplamasız		

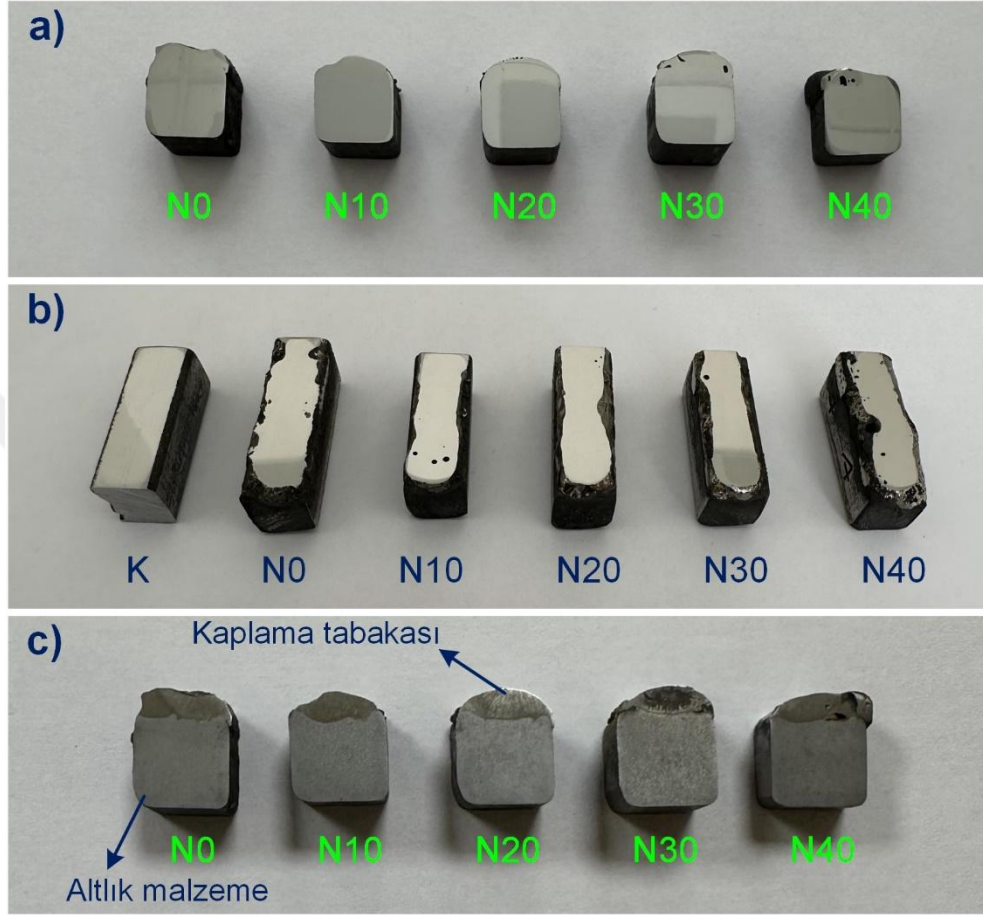
Lazer kaplama uygulamaları tamamlandıktan sonra kaplamalı numuneler kesme cihazında kesilerek bu numunelerden metalografi (10x10x10 mm) ve aşınma numuneleri (30x10x10 mm) hazırlanmıştır. Kesme işlemi Batman Üniversitesi Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan PRESİ marka Mecatome T260 model kesme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8a).



Şekil 3.8. Kesme cihazı (a) ve parlatma cihazı (b)

Metalografi numunelerinin kesit yüzeyleri, aşınma numunelerinin ise kaplama yüzeyleri sırasıyla 80, 240, 400, 800 ve 1200 grit SiC zımparalar ile parlatılmıştır. Numune parlatma işlemi Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan PRESİ marka Minitex T233 model manuel kesme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8b). Metalografi numuneleri ek olarak parlatma çuhasında 1–3 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Metalografi numunelerinin kesit yüzeyleri parlatma işleminden sonra dağlayıcı çözeltisi (%10 HF–%10 HCl–%30

HNO₃–%50 Saf Su) ile dağlanmıştır. Metalografi numuneleri ve aşınma numunelerine ait fotoğraflar şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Ayrıca metalografi numunelerinin dağlama sonrasındaki görselleri şekil 3.9c’ de verilmiştir.

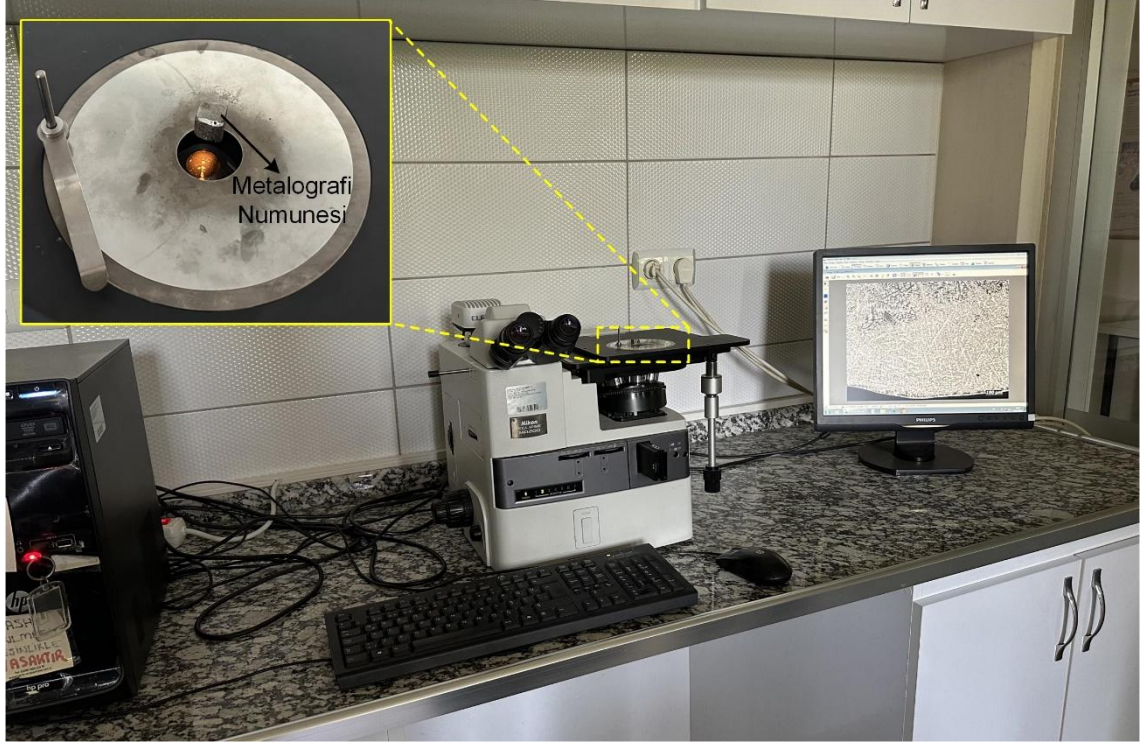


şekil 3.9. Metalografi numuneleri (a), aşınma numuneleri (b) ve dağlama sonrası metalografi numuneleri (c)

3.2. Mikroyapı Analizleri

Kaplama numunelerinin mikroyapılarını inceleyebilmek amacıyla metalografi numunelerinden optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Optik mikroskop görüntüleri, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Nikon marka ECLIPSE MA200 model optik mikroskop ile alınmıştır (şekil 3.10). Optik mikroskop görüntüleri 50x, 100x ve 200x büyütme oranlarında alınmıştır. SEM görüntüleri ise Munzur Üniversitesi, Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (MUNTEAM) bünyesinde bulunan Thermo Fisher Scientific marka Scios 2 DualBeam

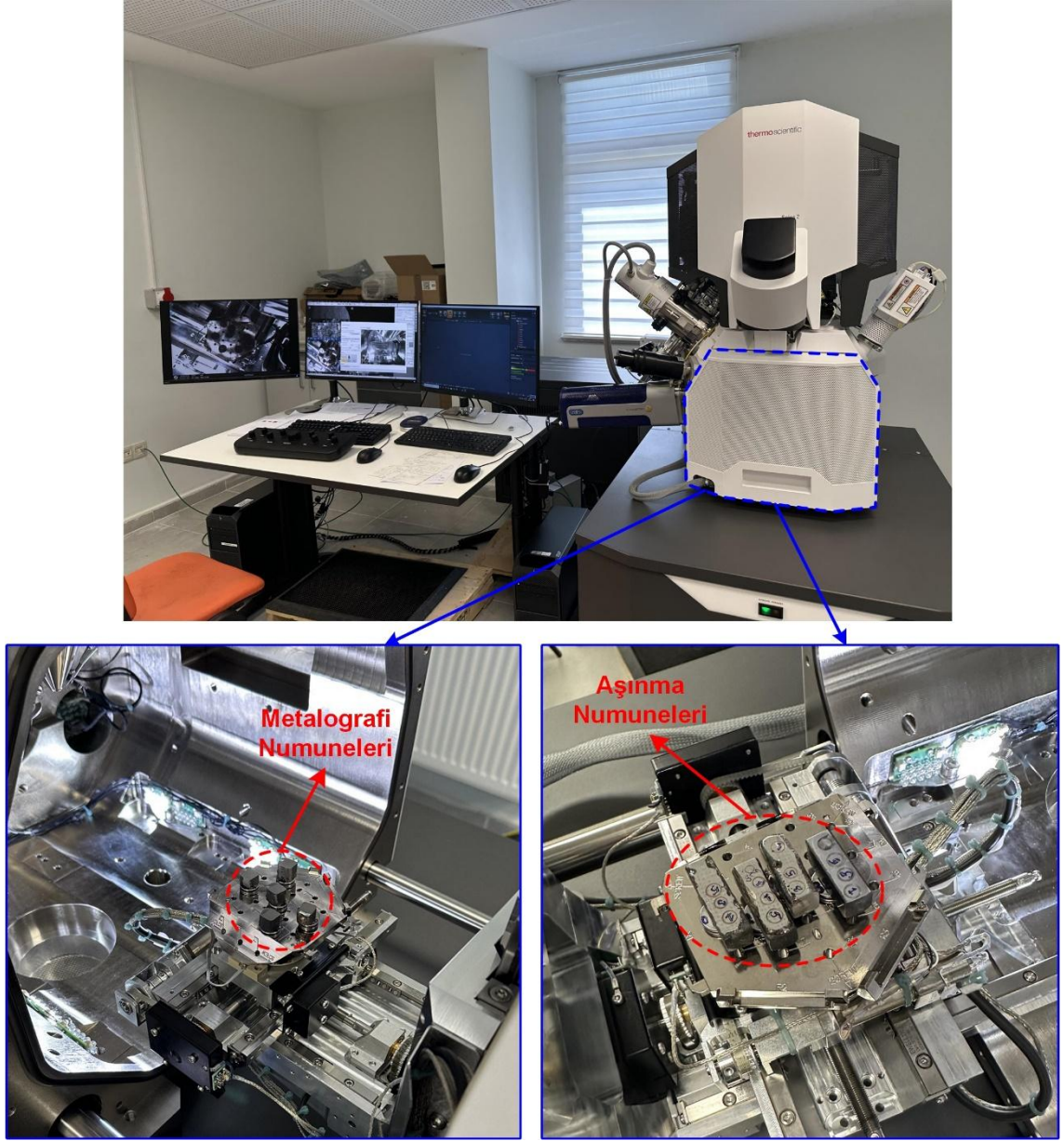
model odaklanmış iyon demeti taramalı elektron mikroskobu (FIB-SEM) ile alınmıştır (Şekil 3.11). SEM görüntüleri 250x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütme oranlarında alınmıştır. Ek olarak, Fe esaslı matris tozu ile WC ve B₄C takviye tozlarından 500x, 1000x, 2000x ve 5000x büyütme oranlarında SEM görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.10. Optik mikroskop

Metalografi numunelerinin OM görüntüleri üzerinden altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki bağlantı arayüzünün incelenmesi ve kaplama malzemesinde oluşabilecek muhtemel mikro çatlakların tespiti hedeflenmiştir. SEM görüntülerinde ise bağlantı arayüzeyi daha detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Ayrıca, kaplama malzemesinde bulunan WC oranının kaplama morfolojisi üzerindeki etkisi SEM görüntülerinin karşılaştırılmasıyla ele alınmıştır.

Metalografi numunelerinden alınan OM ve SEM görüntülerinden ayrı olarak Fe esaslı matris tozu ile WC ve B₄C seramik takviye tozlarından SEM görüntüleri alınarak kaplama malzemesini oluşturan tozların tane morfolojileri belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu

OM ve SEM görüntülerinde gözlemlenen fazları ve bu fazların mikroyapı içerisindeki dağılımlarını destekleyici nitelikte veriler elde edebilmek amacıyla metalografi numunelerine enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri uygulanmıştır. EDS analizleri Munzur Üniversitesi, MUNTEAM bünyesinde bulunan Thermo Fisher Scientific marka Scios 2 DualBeam model FIB-SEM cihazı ile bütünleşik EDS sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11). EDS analizlerinde görüntüler üzerinden elementel haritalama metodu kullanılmıştır. XRD analizleri ise Munzur Üniversitesi bünyesinde bulunan Rigaku marka MiniFlex 600

model Cu-K α radyasyon kaynaklı XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12a). XRD analizleri tarama aralığı (2 θ) 20 – 90 °, tarama hızı ise 2 °/dk. olarak uygulanmıştır.

Metalografi numunelerinin EDS ve XRD analizlerinin yanı sıra kaplama karışımında kullanılan matris ve takviye tozlarından alınan numunelere EDS ve XRD analizleri alınarak kaplama malzemesini oluşturan tozların elementel ve faz analizleri gerçekleştirilmiştir.

Toz numuneler, iletkenliğin SEM/EDS analizleri için yeterli düzeyde olabilmesi amacıyla SBC-900-C model toz kaplama cihazında altın kaplanmıştır (Şekil 3.12b).

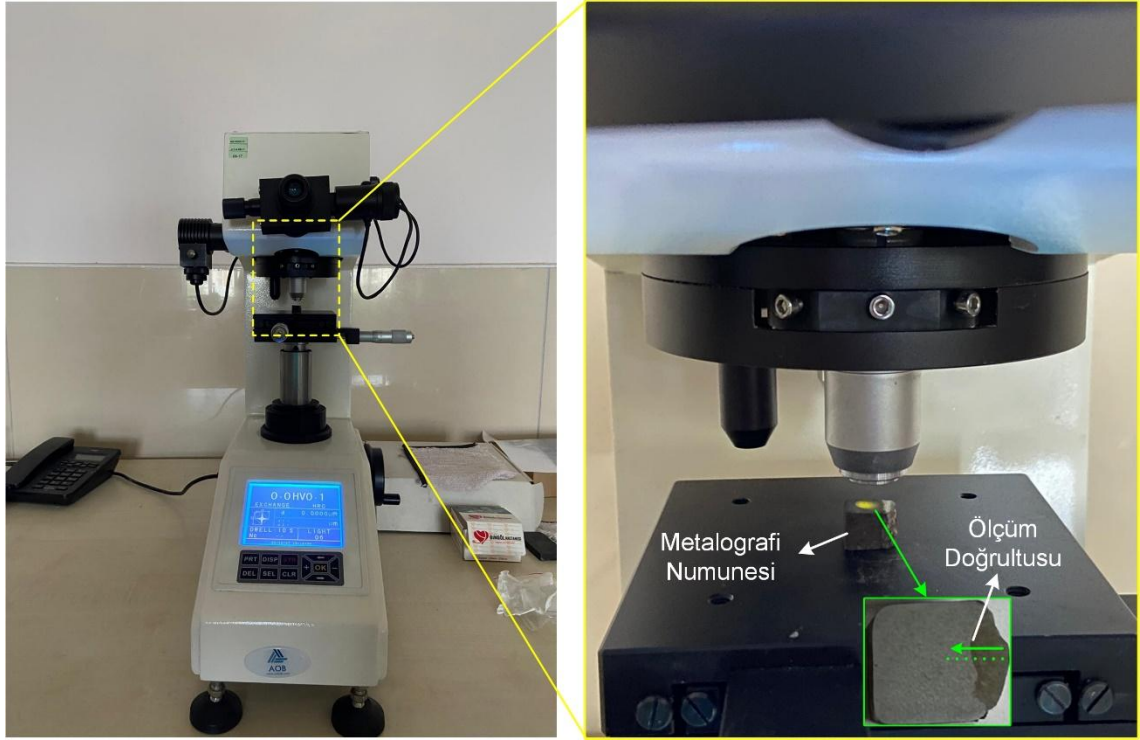


Şekil 3.12. X-ışını difraksiyonu analiz cihazı (a) ve toz numune kaplama cihazı (b)

3.3. Sertlik ve Aşınma Testleri

Kaplama malzemesindeki WC takviyesi oranının kaplama sertliği üzerindeki etkisini irdeleyebilmek amacıyla metalografi numunelerine (Şekil 3.9a) mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Mikrosertlik testleri Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan AOB marka Mikrosertlik test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13).

Mikrosertlik testleri 10 saniye süreyle 10 N yük (HV 0.1) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm doğrultusu kaplama yüzeyinden altlık malzemeye doğru olacak şekilde 250 μ m aralıklarla mikrosertlik ölçümleri tamamlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Mikrosertlik ölçüm cihazı

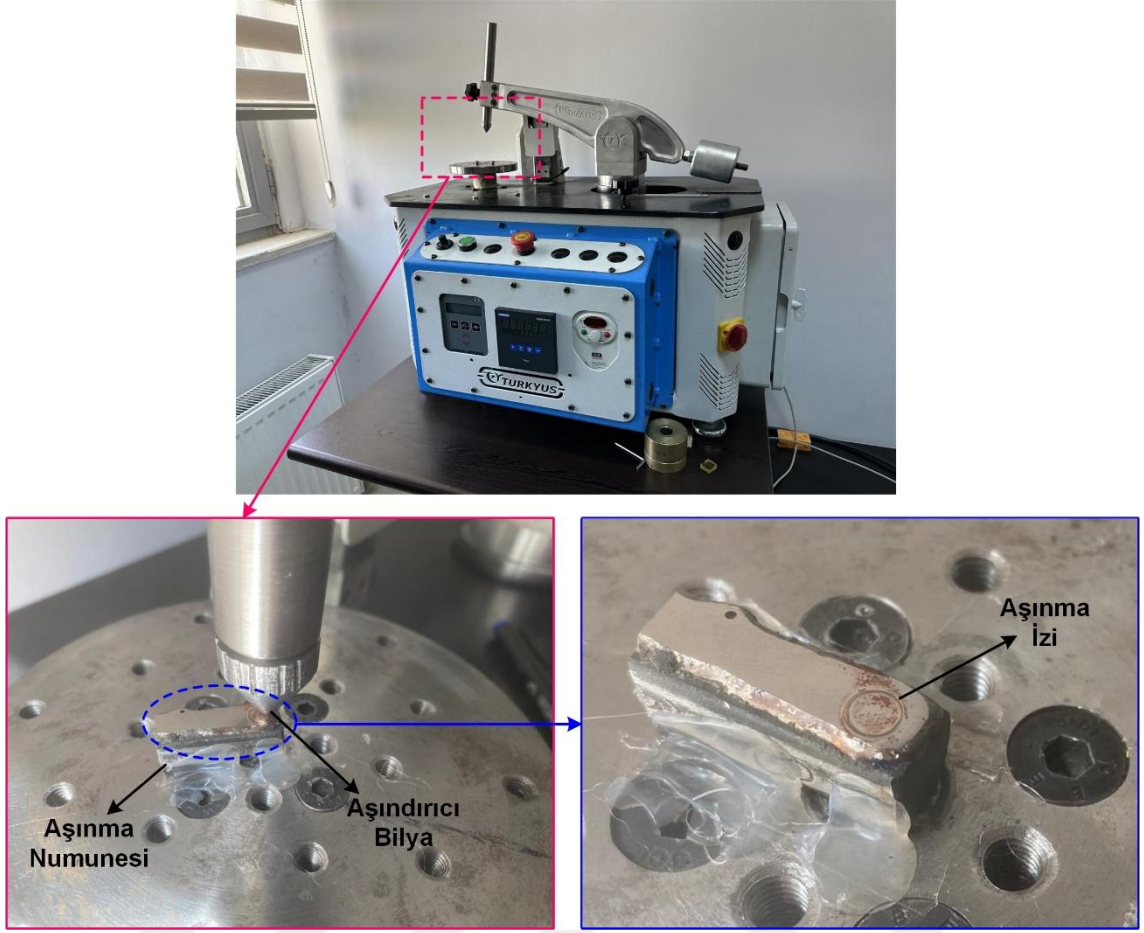
Takviyeli ve takviyesiz kaplamaların aşınma davranışlarını belirleyebilmek amacıyla hazırlanan aşınma numunelerine (Şekil 3.9b) adhezif aşınma testleri uygulanmıştır.

Numunelerin aşınma testleri Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan TURKYUS marka ball-on-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14). Aşınma numunelerinin her biri oda sıcaklığında 50, 75 ve 100 m kayma mesafesinde aşındırılarak testler tamamlanmıştır. Aşındırıcı bilye olarak 100Cr6 alaşımlı çelik bilye kullanılmış olup, aşınma testlerine ait test parametreleri Çizelge 3.6’ da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Aşınma testi parametreleri

Aşınma Testi Parametreleri				
Bilye çapı (mm)	İz çapı (mm)	Hız (mm/s)	Kuvvet (N)	Disk dönüş hızı (rpm)
6	4.5	60	10	255

Aşınma numunelerinin sürtünme katsayıları aşınma test cihazına bağlı bilgisayar tarafından testler esnasında anlık olarak kaydedilmiştir. Numunelerin anlık sürtünme katsayılarının ortalamaları alınarak ortalama sürtünme katsayıları da belirlenmiştir.



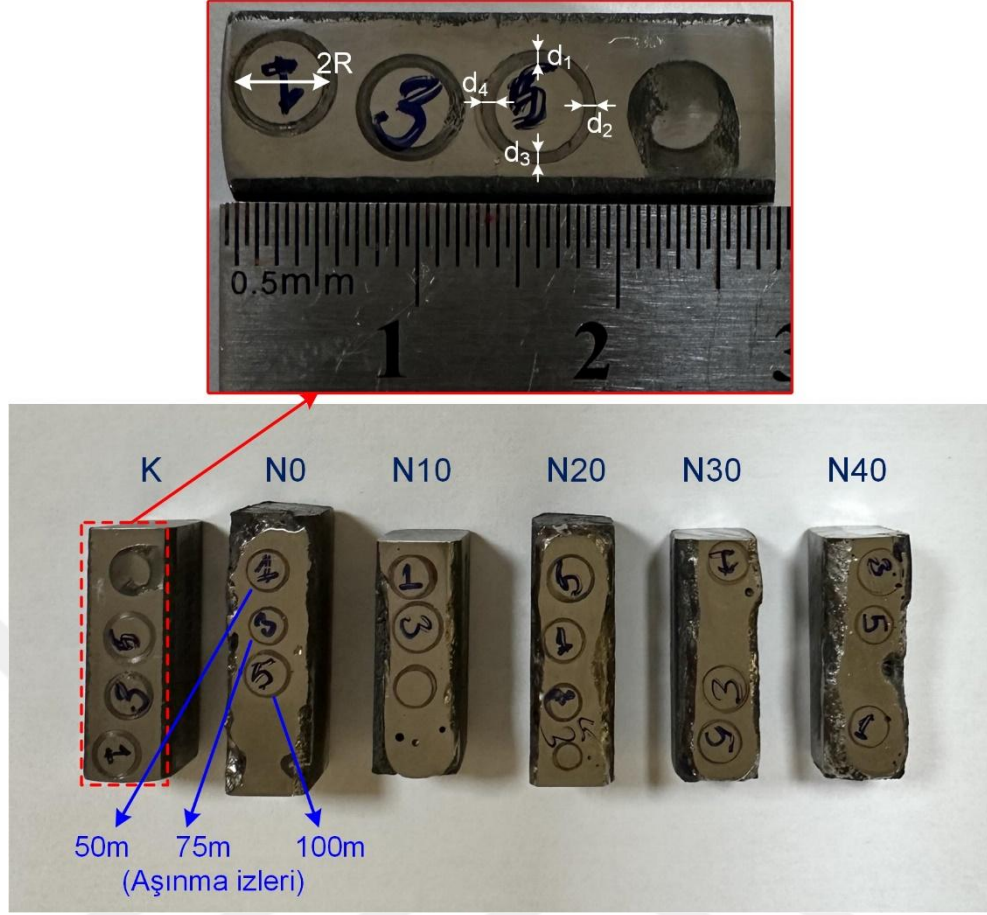
Şekil 3.14. Aşınma test cihazı

Aşınma testleri sonrasında numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin farklı noktalarından aşınma izlerinin genişlikleri ölçülmüştür (Şekil 3.15). Bu ölçümlerin ortalaması alınarak hacimsel (mm^3) aşınma oranları hesaplanmıştır. Hesaplamalar ASTM G99 standartlarına göre yapılmıştır (Denklem 3.1).

$$V = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) \sqrt{4r^2 - d^2} \right] \quad (3.1)$$

Denklemde V hacimsel aşınmayı ifade eder, R ve r ise sırasıyla aşınma izinin ve bilyenin yarıçaplarıdır. İz genişliği ölçümlerinin ortalaması denklemde d ile gösterilmektedir. Denklem 3.2 ile numunelerin spesifik aşınma oranları da (mm^3/Nm) hesaplanmıştır. Denklemde W spesifik aşınmayı ifade etmektedir. F ve S ise sırasıyla kuvvet ve kayma mesafesini temsil eder (Batı vd., 2024).

$$W = V/(F.S) \quad (3.2)$$



Şekil 3.15. Aşınma testi sonrası numuneler ve aşınma izleri

Aşınma mekanizmalarını karakterize edebilmek amacıyla aşınma izleri üzerinden SEM görüntüleri ve EDS haritalamaları alınmıştır. Aşınma numunelerinin SEM ve EDS analizleri, metalografi numuneleri analizlerinin gerçekleştirildiği Thermo Fisher Scientific marka Scios 2 DualBeam model FIB-SEM cihazı ile alınmıştır (Şekil 3.11).

SEM ve EDS analizlerinin yanı sıra aşınma izlerinin 3D profilometreleri de alınmıştır. 3D profilometre analizleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Filmetrics marka Profilm 3D model optik profilometre cihazı ile alınmıştır.



Şekil. 3.16. 3D optik profilometre cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

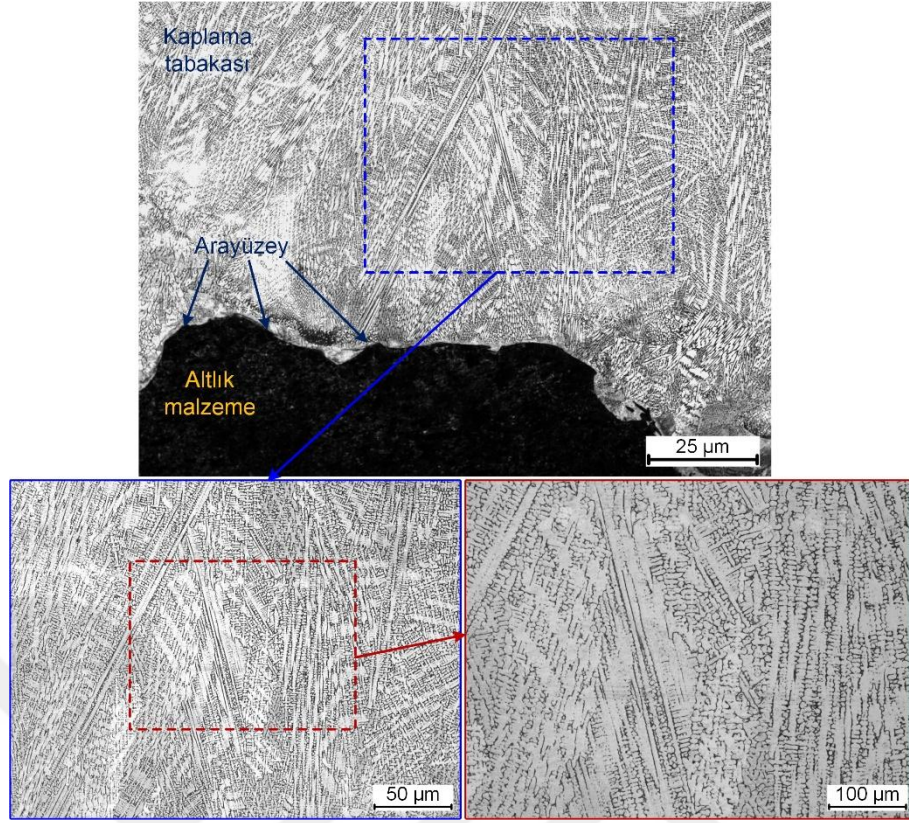
Lazer kaplama yöntemiyle üretilen numunelere yönelik gerçekleştirilen mikroyapısal ve mekanik karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular ilgili alt bölümlerde detaylıca anlatılmıştır.

4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

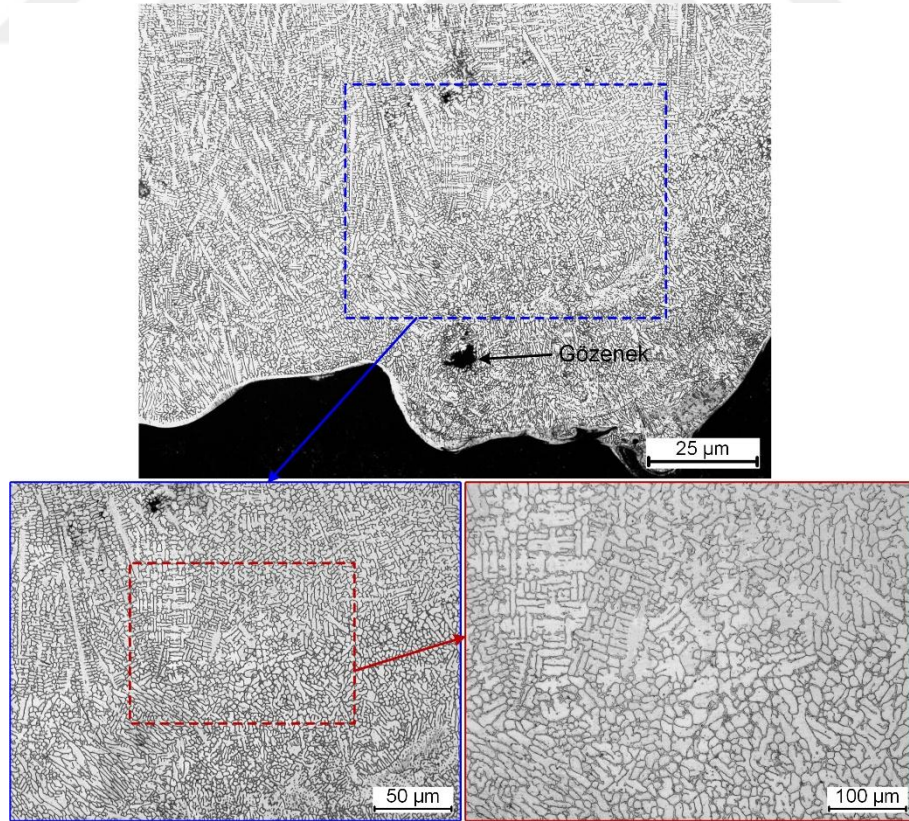
Kaplama karışımına değişen (%0, 10, 20, 30, 40) oranlarda katılan WC ve B₄C takviyesinin mikroyapı evrimi üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için metalografi numunelerine OM, SEM, EDS ve XRD analizleri uygulanmıştır. Bahsi geçen analizlerden elde edilen bulgular ilgili görseller ve grafiklerle ayrı bölümlerde verilmiştir.

4.1.1. OM ve SEM görüntüleri

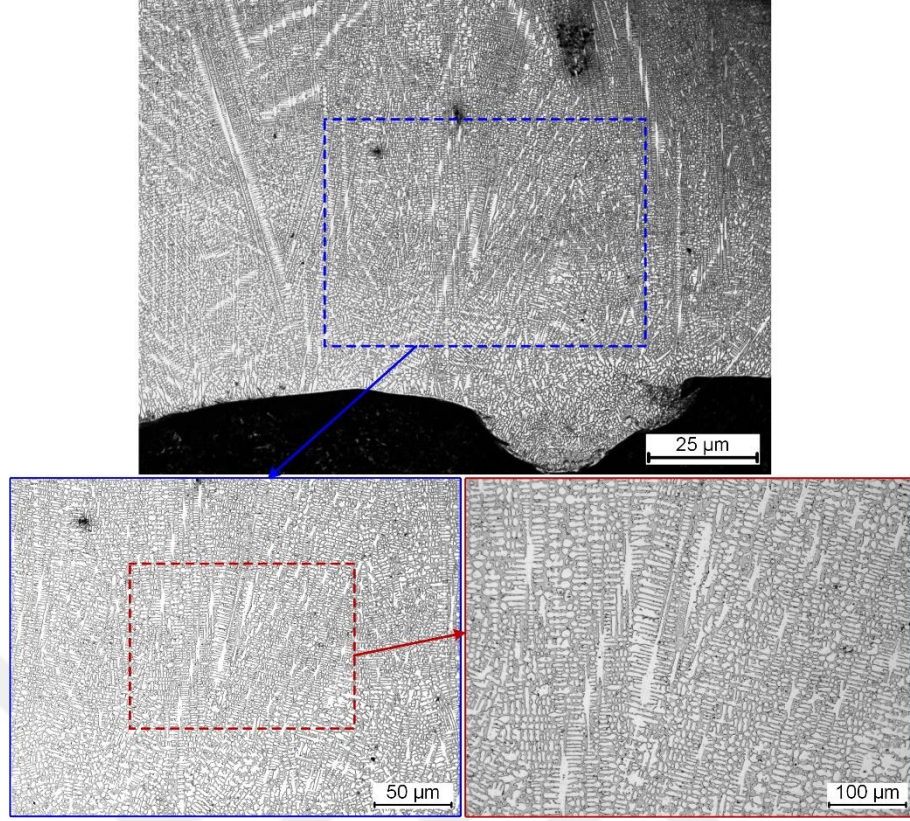
N0 numunesine ait optik mikroskop görüntüsünde (Şekil 4.1), lazerle kaplanmış Fe–Cr esaslı matrisin mikroyapısında belirgin yönlenmiş dendritik oluşumlar gözlemlenmiştir. Dendritler altlıktan yüzeye doğru uzanan ısı akışına paralel yönlenmiş bir morfoloji sergilemekte olup, bu yapı lazer kaplama işlemine özgü yüksek soğuma hızlarının tipik bir sonucudur. İkincil dendritik kolların sık ve kısa olması hızlı katılaşma koşullarının varlığını teyit etmekte ve ince taneli bir yapı gelişimini işaret etmektedir (Liu vd., 2021; Siddiqui vd., 2021). Dendritler arası bölgelerde Fe–Cr matris içerisinde ötektik yapılarla birlikte Cr esaslı karbürlerin (muhtemelen M₇C₃ veya M₂₃C₆) çökelmiş olabileceği düşünülmektedir (Gao vd., 2021). Kaplama–altlık arayüzeyi ise mikroyapısal bütünlük açısından değerlendirildiğinde süreklilik arz etmekte ve başarılı bir metalurjik bağlanma göstermektedir. Gözlemlenen mikroyapı, çatlak veya porozite gibi herhangi bir kusur içermemekte olup, uygulanan lazer parametrelerinin kaplama kalitesi açısından optimize edildiğini ve homojen, kompakt bir yüzey tabakası elde edildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, N0 numunesi takviye içermeyen referans kaplama olarak, diğer numunelerdeki WC ve B₄C katkılarının mikroyapısal etkilerinin karşılaştırılması açısından uygun bir temel oluşturmaktadır.



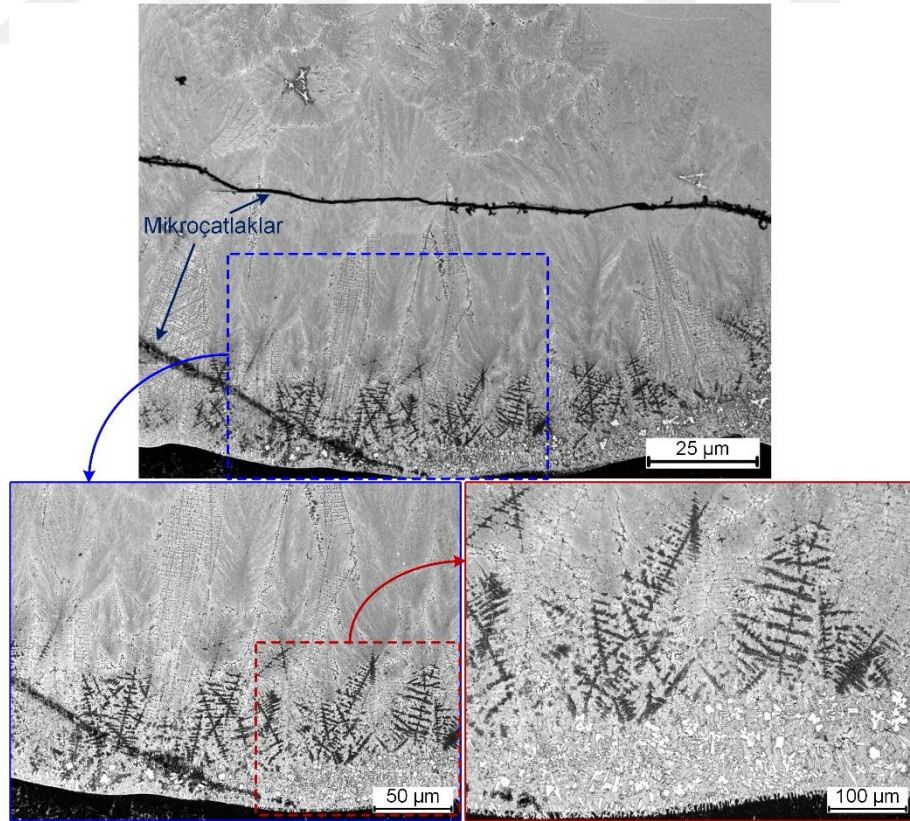
Şekil 4.1. N0 numunesinin OM görüntüleri



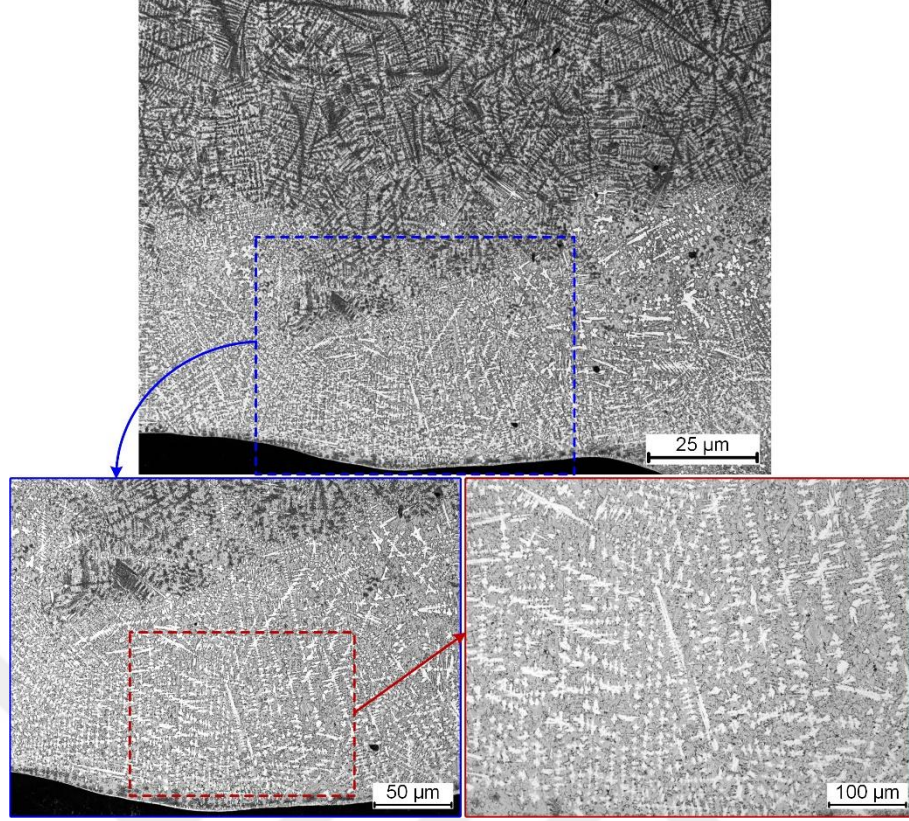
Şekil 4.2. N10 numunesinin OM görüntüleri



Şekil 4.3. N20 numunesinin OM görüntüleri



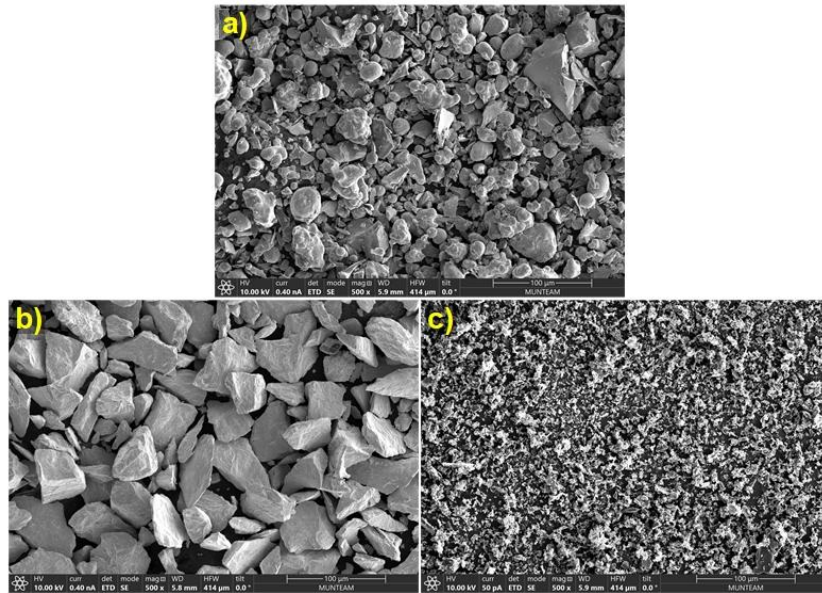
Şekil 4.4. N30 numunesinin OM görüntüleri



Şekil 4.5. N40 numunesinin OM görüntüleri

N10, N20, N30 ve N40 numunelerinin OM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.2 – Şekil 4.5), WC takviyesinin artan oranlarla Fe–Cr esaslı matrise eklenmesinin mikroyapı morfolojisi üzerinde belirgin bir evrime neden olduğu görülmektedir. Takviye içermeyen N0 numunesinde yüksek soğuma hızlarının etkisiyle yönlenmiş, dendritik bir yapı baskındır ve bu yapı oldukça homojen bir matris fazı ile karakterizedir. N10 numunesinde ise WC oranının %10’ a çıkarılmasıyla birlikte dendrit arası bölgelerde daha fazla faz ayrışması ve lamelli ötektik yapılara benzer çökelmeler gözlenmiş; ayrıca mikroyapı içinde çözünmemiş WC parçacıklarına işaret eden yoğunluk farkları oluşmuştur. Ayrıca, görüntünün alt bölümünde tespit edilen porozite (gözenek) jel formundaki ön yerleştirilmiş toz yöntemi sırasında kullanılan bağlayıcıların buharlaşmasından veya WC parçacıklarının lazerle tam erimemesinden kaynaklanabilecek gaz hapsi ya da ergime eksikliği ile ilişkilidir (Şekil 4.2) (Guo vd., 2012; Liang vd., 2023). WC katkısının artmasıyla, N20 numunesinde dendrit yapıları daha yoğun ve ince hâle gelmiştir. WC’ nin çekirdeklenme merkezleri olarak işlev görmeye başlamasıyla birlikte mikroyapıda daha ince yapılı fakat karmaşık bir katılma morfolojisi oluşmuştur (Liu vd., 2021). Giderek artan WC oranıyla birlikte, mikroyapıdaki segregasyon eğilimi ve faz zenginliği daha da belirginleşmiştir.

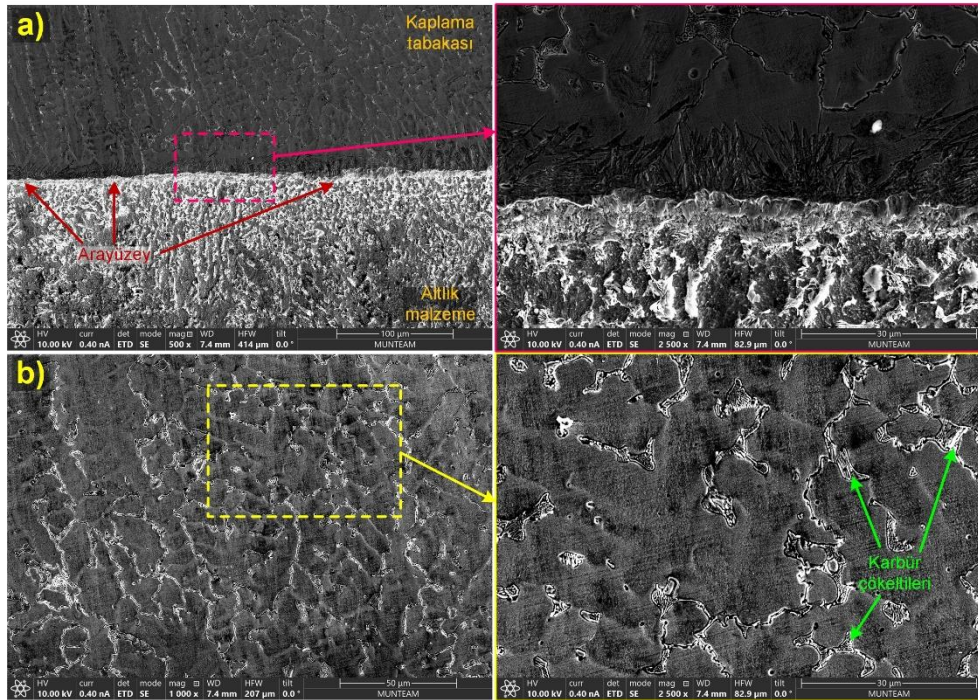
N30 ve N40 numunelerinde, WC takviyesinin kritik hacim oranını aşmasıyla birlikte mikroyapı bütünlüğünde bozulmalar, çözünmemiş WC partikül kümelenmeleri ve özellikle N30’ da mikroçatlak oluşumu gözlemlenmiştir. N30 numunesinde altlık malzeme ile kaplama arayüzeyi yakınında lokal termal gerilimlerin etkisiyle oluşmuş yatay mikroçatlaklar ve koyu tonlu ikincil dendritik yapılar dikkat çekmiştir (Farahmand vd., 2014). N40 numunesinde ise WC oranının %40’ a ulaşmasıyla birlikte yapının üst kısımlarında yoğunlaşmış, yönsüz ve iri faz kalıntıları daha baskın hâle gelmiştir. Dendrit morfolojisi zayıflamış ve fazlar arası kontrast düzensizleşmiştir. Bu yapı, WC takviyesinin sertlik ve aşınma direnci gibi özellikleri artırmasına rağmen mikroyapısal süreklilik ve termal kararlılık açısından sınıra ulaşıldığını göstermektedir. Tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde, %10–20 WC içeren numuneler hem faz bütünlüğü hem de mikroyapı homojenliği açısından optimum dengeyi sunarken, %30 ve üzeri katkılarda çatlak, partikül ayrışması ve heterojenlik gibi mikroyapısal kusurların belirginleştiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, WC oranının lazer kaplama uygulamalarında dikkatli kontrol edilmesi gereken bir parametre olduğunu göstermektedir (Lu vd., 2019).



Şekil 4.6. Kaplama tozlarının SEM görüntüleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B₄C tozu

Lazer kaplama sürecinde kullanılan tozların SEM görüntülerine (Şekil 4.6) göre FeCr esaslı matris tozları (Şekil 4.6a) genel olarak küresel ve hafif düzensiz morfolojide olup, iyi akışkanlık ve yüzeye yayılabilirlik özellikleriyle lazer ergitme için uygun bir yapıya sahiptir. WC tozları (Şekil 4.6b) ise keskin kenarlı, iri ve prizmatik yapılarıyla dikkat çekmekte; bu köşeli morfoloji, kaplama sırasında çözünmeden kalan parçacıkların

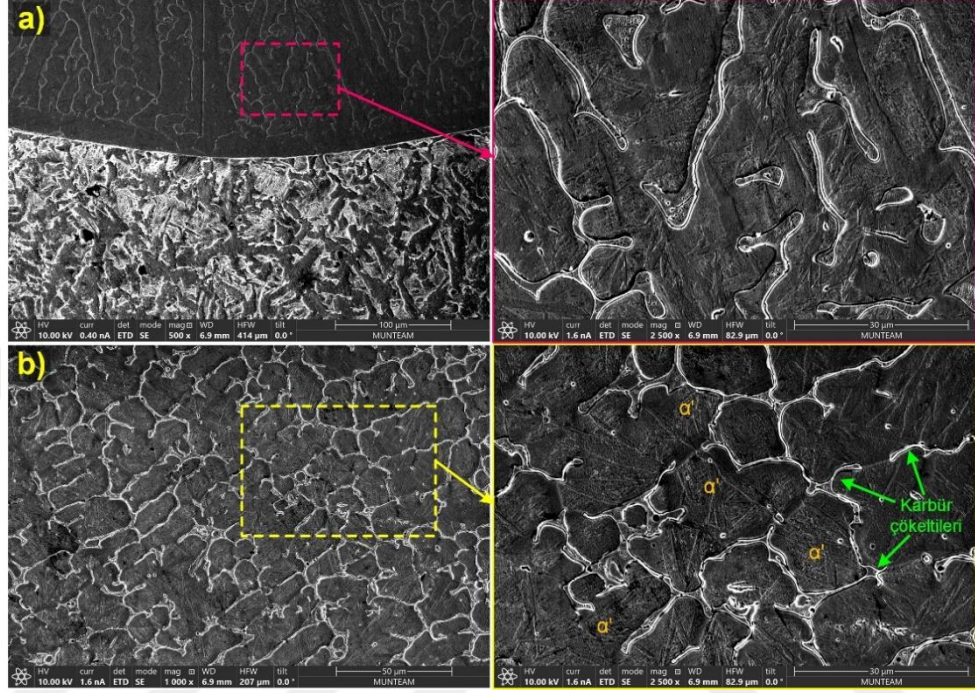
mikroyapıda kümelenmesine ve karbür çekirdeklenmesine neden olabilecek mikroyapısal bir risk oluşturmaktadır. Buna karşılık B₄C tozları (Şekil 4.6c) oldukça ince, küresel ve yüzey alanı yüksek bir morfoloji sergilemektedir. Bu durum borür fazlarının oluşumu açısından avantaj sağlarken, aynı zamanda aglomerasyon eğilimi nedeniyle ön karıştırma ve dispersiyon kontrolü açısından dikkat gerektirmektedir. Genel olarak toz morfolojileri lazer kaplamada erime davranışı, çözünme potansiyeli ve nihai mikroyapı homojenliği üzerinde doğrudan etkili olup, her bir bileşenin fiziksel karakteristiği işlem performansını belirleyen temel faktörlerden biridir (Huang vd., 2004).



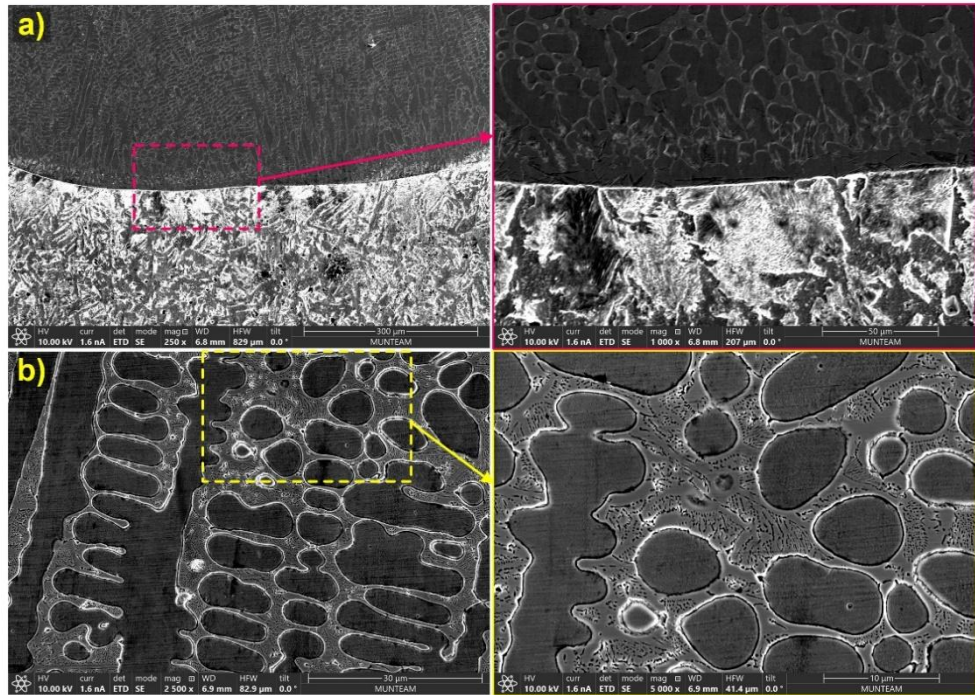
Şekil 4.7. N0 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası

N0 numunesine ait SEM görüntülerinde, lazerle kaplanmış Fe–Cr esaslı tabakanın altlık malzeme (St37) ile oluşturduğu arayüzey bölgesinin oldukça bütünlüklü ve süreksizlik içermeyen bir morfoloji sergilediği gözlemlenmektedir. Şekil 4.7a’ da, altlık ve kaplama arasında metalurjik bağın sağlandığı ve eriyik havuzunun altlığa yeterli oranda nüfuz ettiğini görülmektedir. Arayüzey boyunca herhangi bir porozite veya çatlak izi bulunmaması uygulanan lazer parametrelerinin bu matris sistemi için uygun olduğunu doğrulamaktadır. Kaplama tabakasında yer alan yönlendirilmiş ince yapıli dendritler yüksek soğuma hızına bağlı olarak oluşmuş tipik kolonsal yapılar olarak değerlendirilmektedir (Liang vd., 2023). Şekil 4.7b’ deki kaplama iç bölgesine ait SEM kesitinde ise, Fe–Cr matris içerisinde dendrit sınırlarına yerleşmiş karbür çöktürülen net şekilde

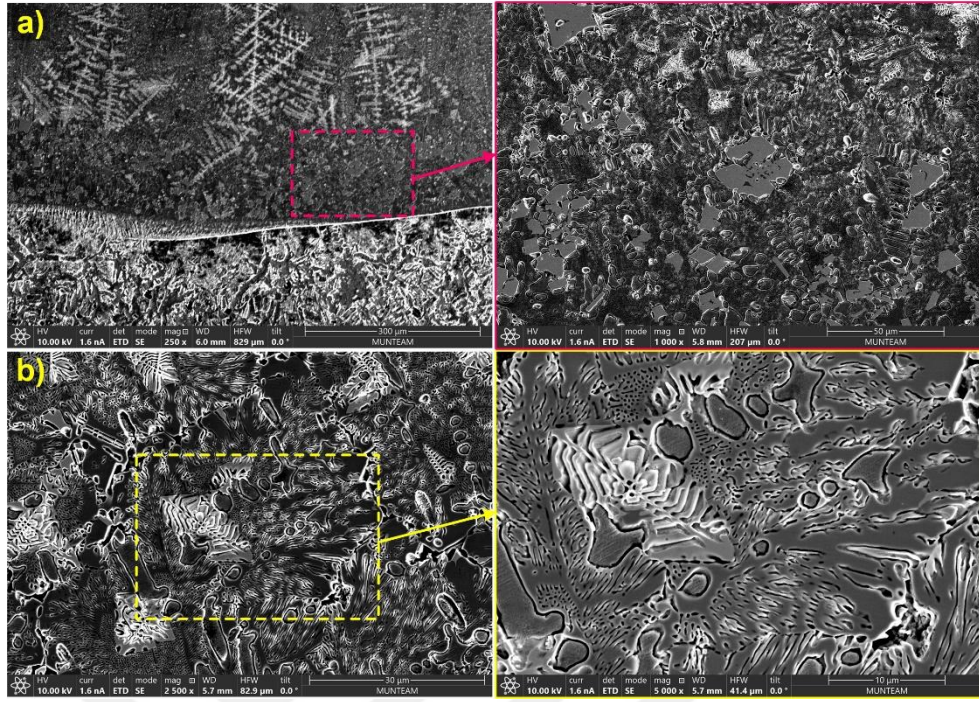
izlenebilmektedir. Bu çökeltiler, Cr bakımından zengin fazların karbonla etkileşimi sonucunda oluşan M_7C_3 veya $M_{23}C_6$ tipi karbürler olabileceği düşünülmektedir (Gao vd., 2021). Karbür çökeltileri tipik olarak interdendritik alanlarda yoğunlaşmış olup mikroyapıda homojen bir şekilde dağılmıştır.



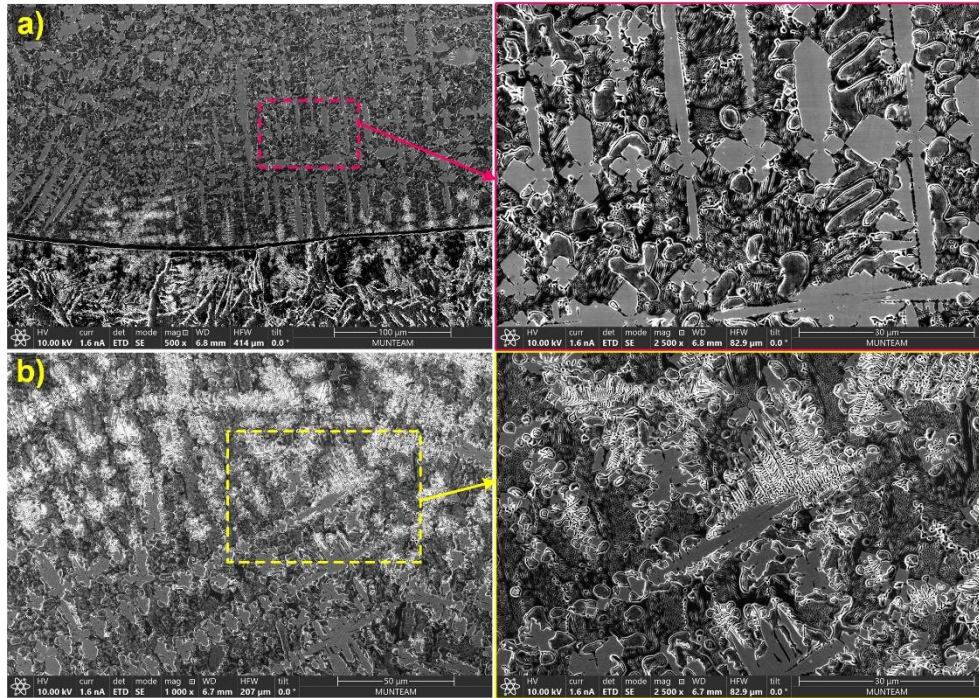
Şekil 4.8. N10 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası



Şekil 4.9. N20 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası



Şekil 4.10. N30 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası



Şekil 4.11. N40 numunesinin SEM görüntüleri; a) arayüzey, b) kaplama tabakası

Lazer kaplama işlemi sonrasında elde edilen SEM görüntülerine dayanarak yapılan mikroyapısal analizler, WC takviyesinin artan oranlarının kaplama tabakası içerisindeki faz evrimini ve morfolojik yapıyı belirgin şekilde etkilediğini ortaya

koymaktadır (Şekil 4.7 – Şekil 4.11). WC oranı %0 olan N0 numunesinde FeCr matris içerisinde homojen dağılmış karbür çökeltileri ve dendritik yapılar ön plandadır. Arayüzey bölgesinde ise altlıkla kuvvetli bir metalurjik bağ gözlemlenmektedir. WC' nin %10 ve %20 oranlarına çıkarıldığı N10 ve N20 numunelerinde, karbür çökeltileri daha belirgin ve hacimsel olarak daha yaygın hale gelmiş; dendritik yapılar içerisinde ve martenzit (α') fazlarının sınırlarında büyüyen karbür çökeltileri dikkat çekmiştir (Şekil 4.8b). Bu numunelerde mikroyapı hâlen homojenliğini korumakta, WC' nin kısmen çözünerek matris ile difüzyonel etkileşime girdiği anlaşılmaktadır (Fernández vd., 2015; Guo vd., 2012).

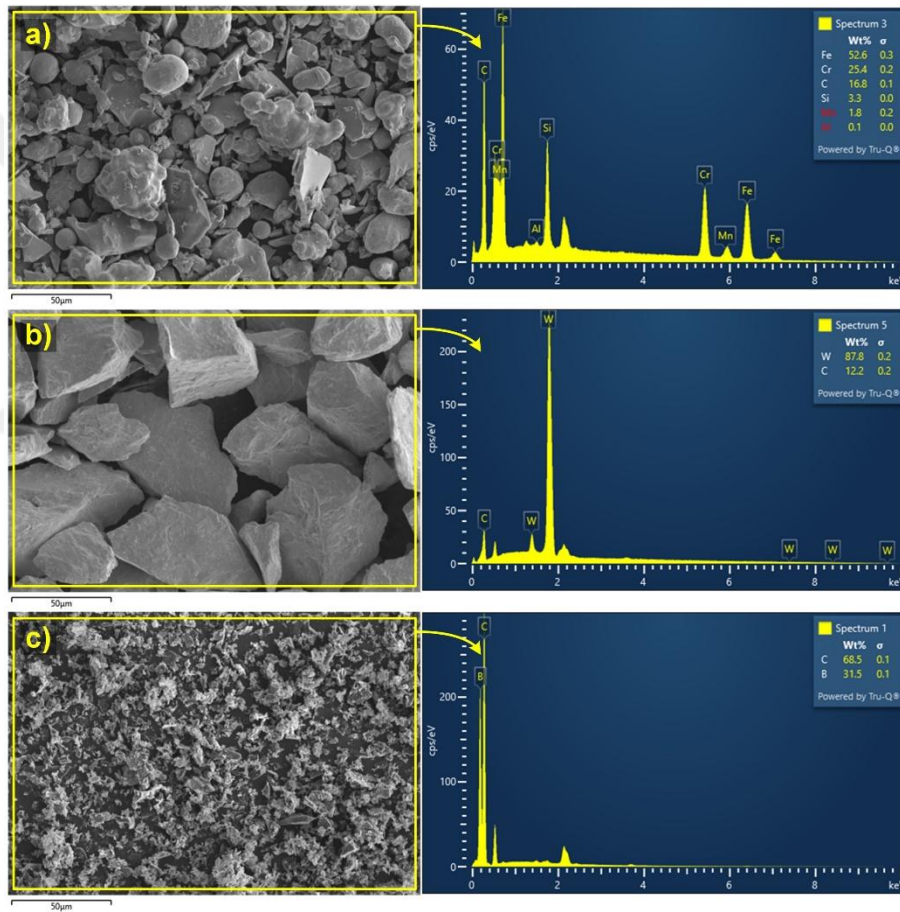
WC oranı %30 ve %40'a çıkarıldığında ise N30 ve N40 numunelerinde mikroyapıda ciddi bir heterojenleşme meydana gelmiştir (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11). WC partiküllerinin çözünmeden kaldığı, iri boyutlu ve köşeli partikül kümelerinin matris içinde serpiştirildiği bu yapılar, aynı zamanda matris – çökelti sınırlarında yoğun gerilim alanları oluşturmakta ve mikroçatlak oluşumlarını tetiklemektedir (Farahmand vd., 2014). Özellikle N30 numunesinde, FeCr matris içerisinde çok fazlı, yıldız veya rozet morfolojili karbür çökeltilerinin yanı sıra yönlenmiş büyüme gösteren ötektik yapılar gözlemlenmiştir. N40 numunesinde ise çökeltiler, matris içerisinde neredeyse gömülü ada şeklinde yapılar hâlinde bulunmakta ve fazlar arası kontrast keskinliğinden dolayı geçişlerinin ani olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum mikroyapısal sürekliliği olumsuz yönde etkilemektedir. SEM görüntüleri N30 ve N40 numunelerinde arayüzey bölgesinde belirgin bir mikro yapısal evrime ve bağ kalitesindeki bozulmaya işaret etmektedir. Özellikle N30 numunesinde (Şekil 4.10), kaplama ile altlık arasında daha keskin bir faz sınırı oluşmuş; bu da ısıl gerilmelerin yoğunlaştığı bir bölge olarak dikkat çekmiştir. Ayrıca arayüzey yakınında meydana gelen kırılğan ve yönlenmiş dendritik oluşumlar ile sert fazların varlığı, altlık ile kaplama arasındaki metalurjik bağın sürekliliğini zayıflatabilecek potansiyel bir etki oluşturmaktadır.

N40 numunesinde ise bu durum daha da belirgindir (Şekil 4.11). WC oranının %40'a çıkarılması, arayüzey bölgesinde hacimli, çözünmemiş WC partiküllerinin birikmesine yol açarak termal iletkenlik farkları ve katılma kinetiği bakımından ani geçiş bölgeleri meydana getirmiştir. Bu bölgelerde gözlemlenen boşluklar ve mikro çatlaklar, sadece kaplama tabakasında değil, aynı zamanda arayüzeyde de mikroyapısal sürekliliğin bozulmaya başladığını göstermektedir (Van Acker vd., 2005). Ayrıca SEM görüntülerinde arayüzey hattının daha pürüzlü ve düzensiz bir form kazanması, ergitme dinamiklerinin homojenliğini kaybettiğini ve bu numunelerde bağlantı kalitesinin önceki

numunelere kıyasla daha düşük olduğunu düşündürmektedir. Sonuç olarak, WC takviyesinin artışı yalnızca kaplama mikroyapısını değil, aynı zamanda arayüzeyin bütünlüğünü de olumsuz yönde etkilemiş; bu da kaplamanın servis ömrü ve yapısal dayanımı açısından dikkat edilmesi gereken bir husustur (Fernández vd., 2015).

4.1.2. EDS analizleri

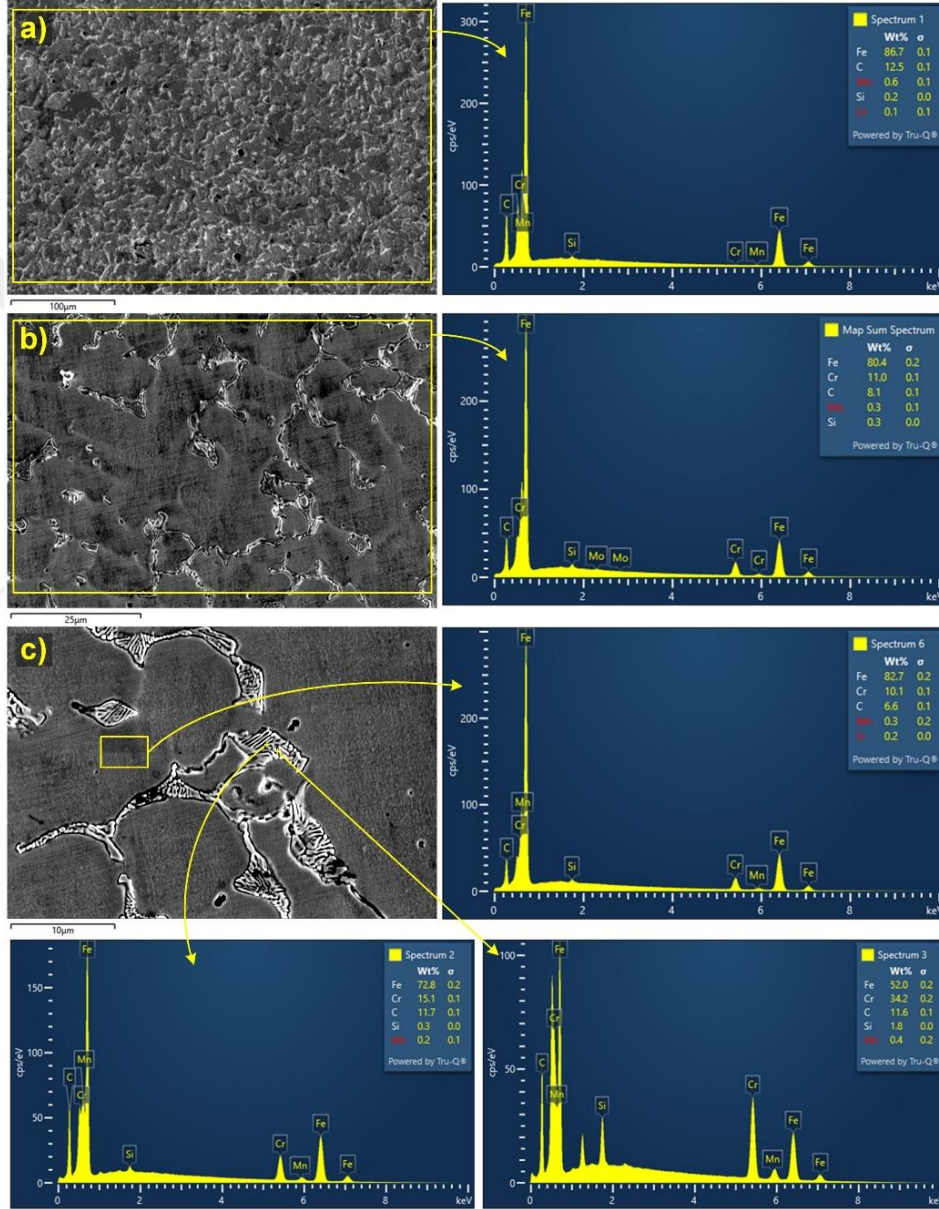
Şekil 4.12’ de kaplama malzemesinde kullanılan Fe-Cr matris tozu ile WC ve B₄C takviye tozlarının EDS analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.12. Kaplama tozlarının EDS analizleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B₄C tozu

Şekil 4.12a’ da EDS analizi yapılan matris tozu, yüksek oranda Fe (%52.6) içermekte olup, buna ilaveten Cr (%25.4), C (%16.8), Si (%3.3) ve iz miktarda Mn, Al ve Ni elementlerini de içermektedir. Bu bileşim, tipik bir Fe-Cr esaslı alaşımı işaret etmekte olup, yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci açısından elverişli bir matris altyapısı sunmaktadır. Şekil 4.12b’ de görülen WC tozu, %87.8 oranında W ve

%12.2 oranında C elementi ile neredeyse ideal stekiyometrik karbür bileşimini göstermekte ve katkı sonrası sertlik artışının temel kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Guo vd., 2012). Son olarak Şekil 4.12c'deki B₄C tozu, %68.5 C ve %31.5 B içeriği ile teorik bileşime oldukça yakın bir dağılım sergilemektedir. Sonuç olarak, her üç tozun EDS analizleri kullanılan kaplama bileşenlerinin kimyasal saflık açısından uygun olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.13. N0 numunesinin EDS analizi; a) altlık malzeme, b) kaplama tabakası, c) kaplama matrisi ve karbür çökeltileri

N0 numunesine ait EDS analizleri (Şekil 4.13), altlık, kaplama ve karbür fazlarının kimyasal bileşimini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Altlık bölgesine ait

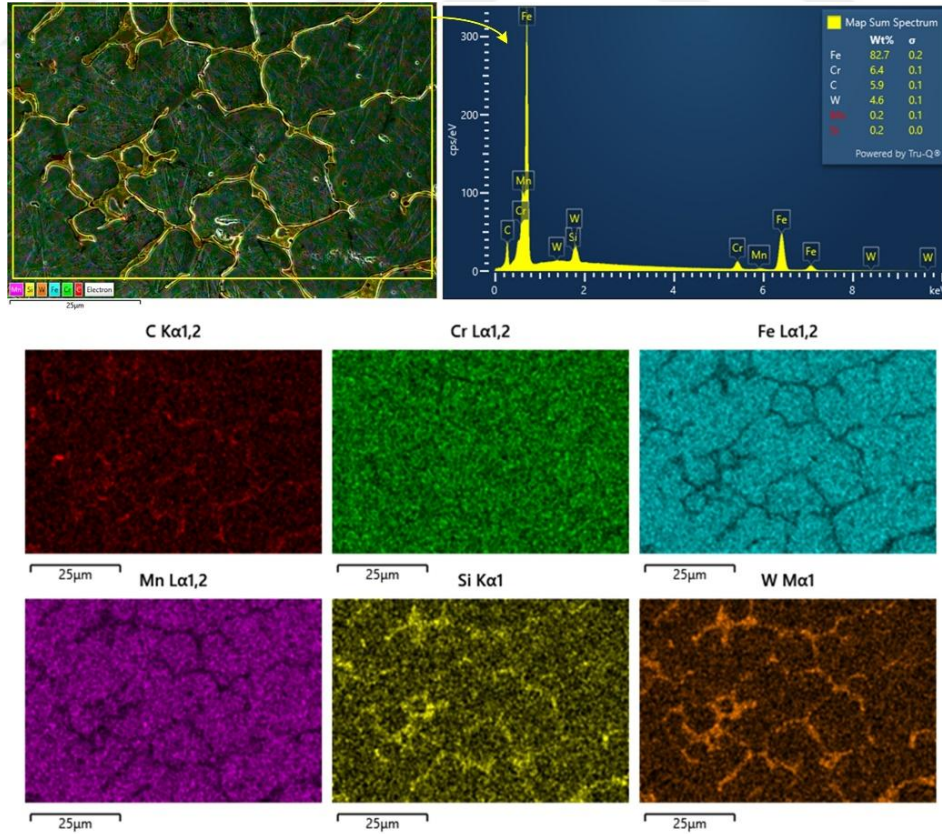
analizde (Şekil 4.13a), yüksek oranda Fe (%86.7) ve tipik St37 bileşimi olan düşük oranlı C, Mn ve Si tespit edilmiştir. Kaplama bölgesine ait genel analiz (Şekil 4.13b), Fe (%80.4) ve Cr (%11) içeriğiyle FeCr esaslı matrisin başarıyla oluştuğunu ve C (%8.1) oranıyla karbür çökeltmesi için uygun bir zemin sağlandığını göstermektedir. Spektrum 6 ise kaplama matrisini temsil etmekte olup (Şekil 4.13c), Fe (%82.7) ve Cr (%10.1) oranlarıyla çözelti fazına işaret etmektedir. Buna karşılık, karbür çökeltilerine ait olan spektrum 2 (%72.8 Fe, %15.1 Cr, %11.7 C) ve spektrum 3 (%52 Fe, %34.2 Cr, %11.6 C) verileri, Cr ve C açısından zenginleşmiş M_7C_3 ve/veya $M_{23}C_6$ tipi karbür fazlarının oluşabileceğini göstermektedir (Gao vd., 2021). Özellikle spektrum 3'te Cr/C oranının yüksekliği SEM görüntülerinde belirlenen parlak beyaz çökeltilerin kimyasal karşılığını oluşturmaktadır.

WC ve B_4C takviyeli N10, N20, N30 ve N40 numunelerinin EDS haritalama analizleri ise Şekil 4.14 – Şekil 4.17' de verilmiştir. EDS haritalama sonuçlarına göre N10 numunesinde matrisin genel bileşimi %82.7 Fe, %6.4 Cr, %5.9 C, %4.6 W şeklindedir (Şekil 4.14). Bu sonuçlar, WC takviyesinin kaplama matrisine kısmen çözünerek geçtiğini ve bu çözünmenin hem kimyasal hem de mikroyapısal etkiler doğurduğunu göstermektedir (Wu vd., 2023). Elementel haritalar dikkatle incelendiğinde; Fe tüm alana yayılan ve özellikle α' faz içinde homojen dağılmış bir yoğunluk sergilemektedir. Cr' de Fe ile birlikte matris içerisinde çözünerek yaygın bir dağılım göstermektedir. Ayrıca karbür çökeltilerine de katkı sağladığı düşünülmektedir. C elementi görece homojen olmakla birlikte, SEM görüntüsünde gözlemlenen ağsı yapıları çevreleyen bölgelerde kısmi bir zenginleşme mevcuttur. Bu durum, karbür çökeltilerinin (muhtemelen Cr bakımından zengin) oluştuğu bölgelere işaret etmektedir. W elementi özellikle SEM görüntüsünde parlak çizgilerle izlenen sınır fazlarında yoğunlaşmakta, yani çözünmemiş ya da kısmen çözünmüş WC kalıntılarının kimyasal izleri EDS haritalarında net biçimde tanımlanabilmektedir. Mn ve Si ise düşük düzeyde ve matrise dağılmış haldedir.

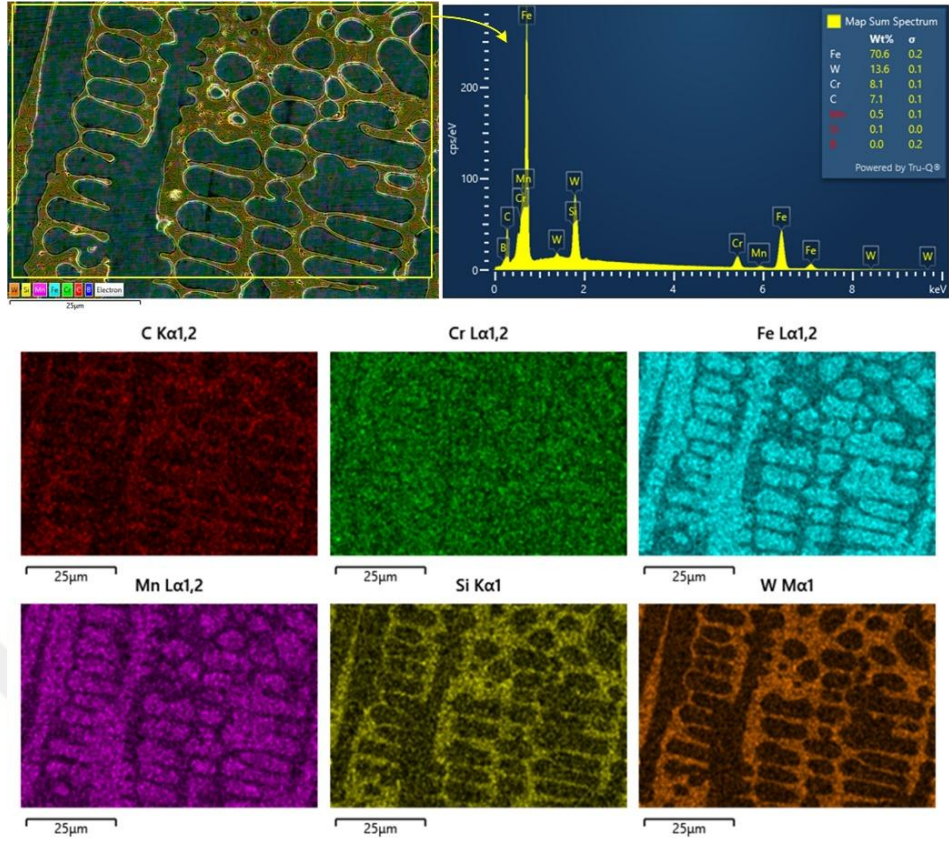
N20 numunesine ait EDS spektrumunda Fe (%70.6) ile birlikte W (%13.6) ve Cr (%8.1) oranlarının yüksekliği, matris yapısının artık karbür fazlarıyla daha yoğun biçimde zenginleştiğini göstermektedir (Şekil 4.15). SEM görüntülerinde gözlemlenen düzenli yapı, oval formlu ve yönlü dizilim gösteren çökelti bölgeleri, EDS haritalarında W ve Fe tonlarının zıt kontrast dağılımlarıyla net bir şekilde örtüşmektedir. Bu durum, çökelti bölgelerinin WC kaynaklı karbür fazlardan oluştuğunu, çevresel matrisin ise Fe bakımından zengin bir çözelti fazı olduğunu desteklemektedir. W elementinin, partikül sınırlarında keskin bir yoğunlukla sınırlanmış olması, WC' nin bu oranlarda büyük ölçüde

çözünmeden kaldığını ve matris içinde çökelti formunda ayrıştığını göstermektedir (Van Acker vd., 2005). Cr ve C elementleri ise hem çökeltilerde hem de çevreleyen bölgelerde dağılmış olup, özellikle Cr bakımından zengin karbür çekirdeklerinin oluşumuna katkı sağlayacak düzeyde homojen bir varlık sergilemektedir. Si ve Mn ise düşük düzeylerde gözlenmekte, daha çok çökelti arası bölgelerde hafifçe zenginleşmektedir.

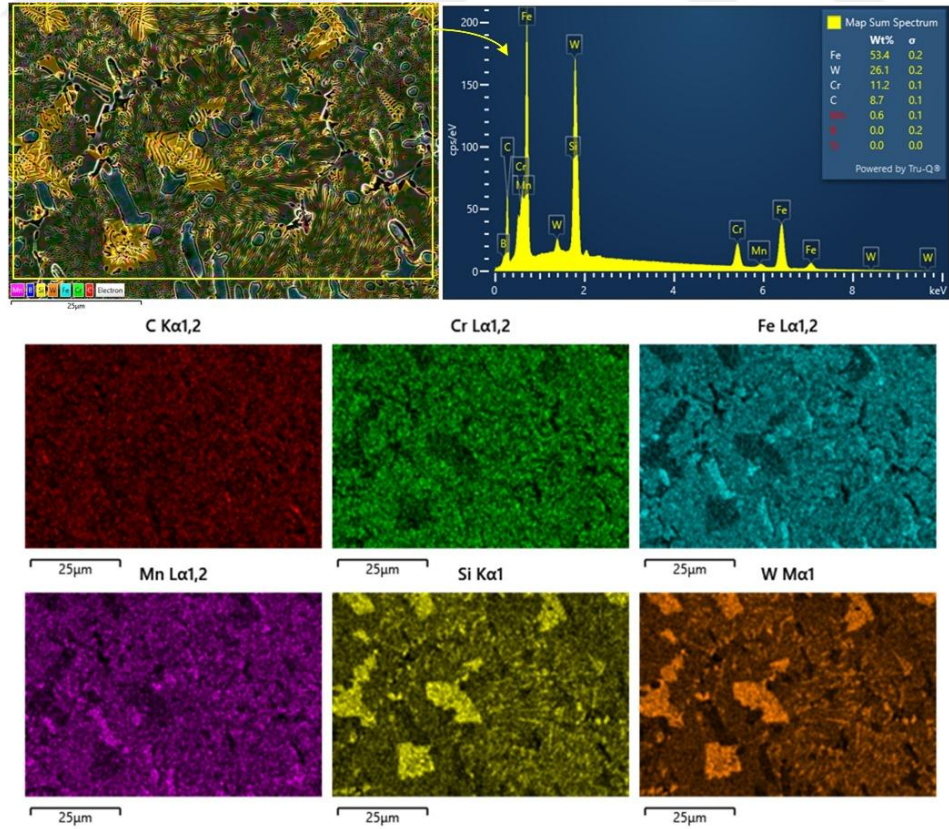
N10 ve N20 numunelerinde WC oranının sırasıyla %10 ve %20' ye çıkarılmasıyla birlikte, SEM görüntülerinde faz sınırlarının belirginleştiği, α' faz çekirdeklerinin etrafında karbür çökeltilerinin ağsı yapılar oluşturduğu ve kısmen çözünmüş WC kalıntılarının ortaya çıktığı gözlemlenmişti. EDS haritalarında bu morfolojik ayrım net biçimde izlenmiş; özellikle W elementi, matris fazına homojen olarak yayılmak yerine karbür ağlarının çevresinde veya kısmi çekirdeklenmelerin bulunduğu bölgelerde lokalize olmuştur. N20 numunesinde WC çözünürlüğü sınıra yaklaşmış, W haritalarında açıkça tanımlanabilen çökelti kümeleri oluşmuştur (Şekil 4.15). Bu durum, SEM görüntülerinde gözlemlenen yönlü dendritik oluşumları ve karbür segregasyonunu kimyasal olarak doğrulamakta, WC katkısının karbürleşmeyi yoğunlaştırarak mikroyapı heterojenliğini artırdığını göstermektedir.



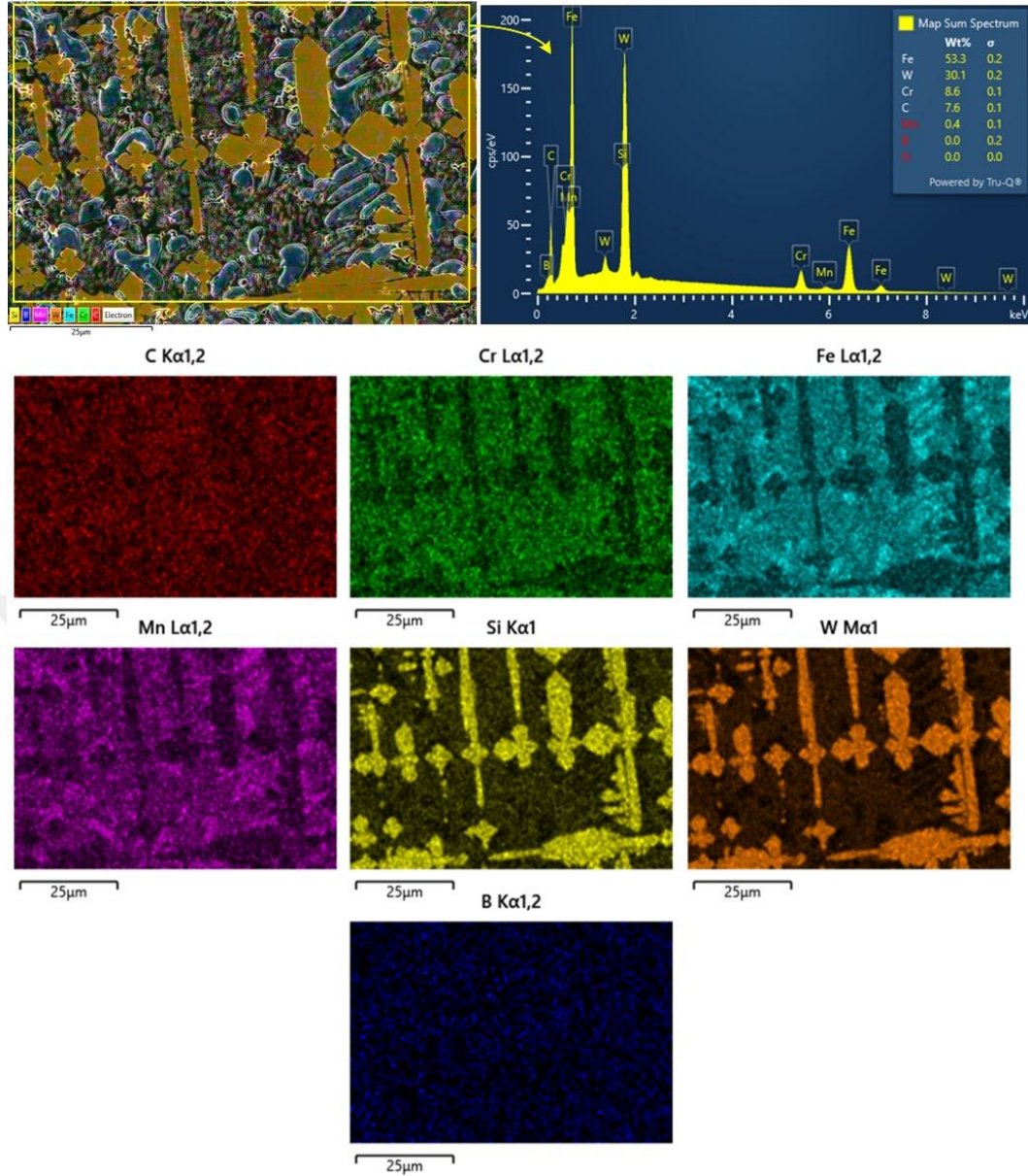
Şekil 4.14. N10 numunesinin EDS analizi



Şekil 4.15. N20 numunesinin EDS analizi



Şekil 4.16. N30 numunesinin EDS analizi



Şekil 4.17. N40 numunesinin EDS analizi

Şekil 4.16’ da sunulan EDS haritalama ve spektrum verileri, WC takviyesinin %30’ a çıkarıldığı N30 numunesine ait olup, daha önce SEM görüntülerinde belirlenen çözünmemiş WC partikülleri, karmaşık karbür yapıları ve mikroyapısal heterojenliklerin kimyasal temellerini açık biçimde doğrulamaktadır. Haritalama sonuçlarında Fe oranı %53.4’ e gerilerken, W (%26.1) ve C (%8.7) içerikleri belirgin şekilde artmıştır; bu durum, WC partiküllerinin yalnızca kısmen çözünebildiğini ve önemli bir kısmının karbür fazlar hâlinde ayrıştığını göstermektedir. W haritasında özellikle parlak alanlarda yüksek yoğunlukta tungsten tespiti, SEM’ de gözlenen keskin sınırlı ve irileşmiş çökteltelerin WC çekirdekli fazlardan oluştuğunu doğrular niteliktedir. Ayrıca Fe ve W

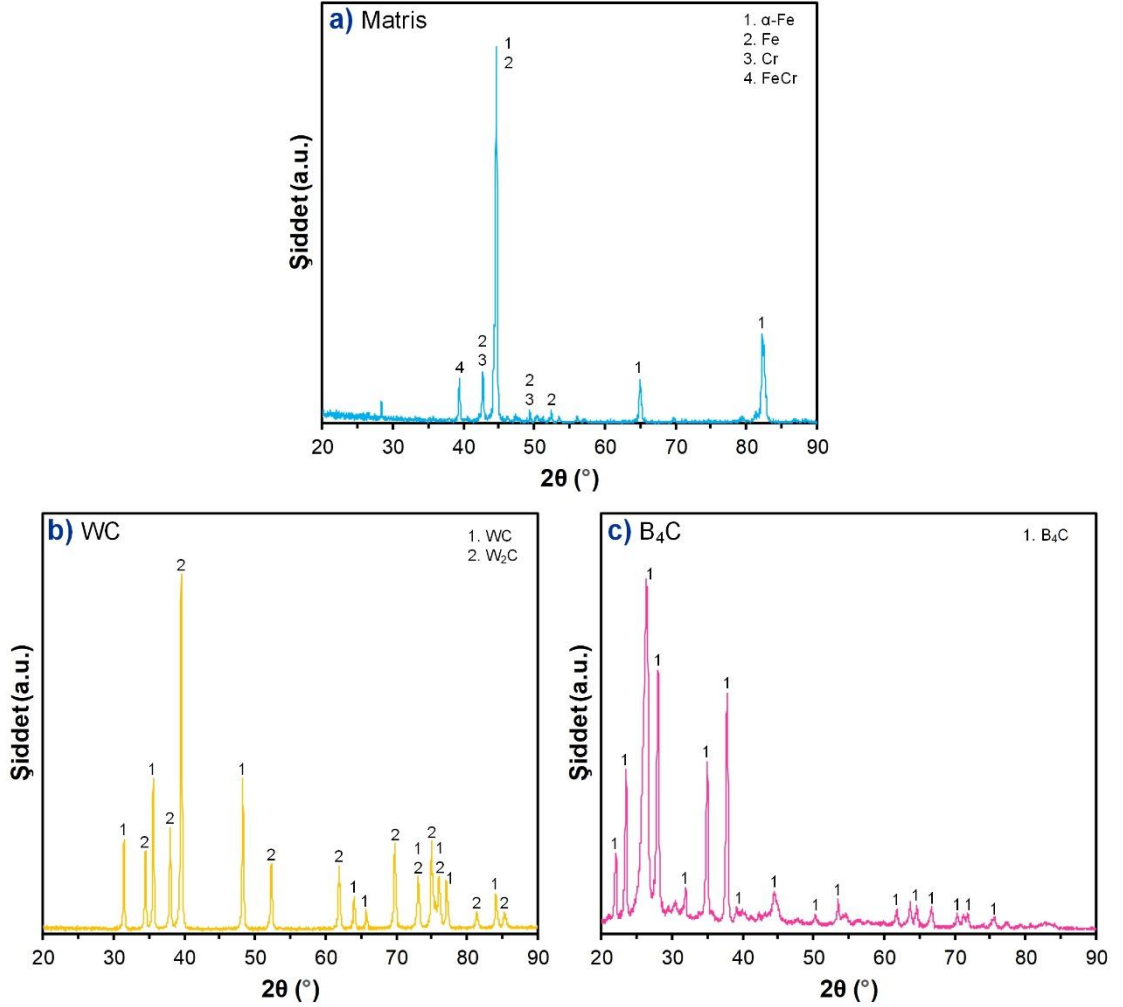
elementlerinin karşıt kontrastlı fazlarda ayrıştığı gözlemlenmekte, bu da SEM görüntüsündeki açık koyu geçişlerin kimyasal faz ayırımına dayandığını göstermektedir. Mn, Cr ve C elementleri ise daha dağınık bir dağılım sergilemekle birlikte, C özellikle çökelti–matris geçişlerinde hafifçe zenginleşmektedir.

Şekil 4.17, WC oranının %40' a ulaştığı N40 numunesine ait EDS haritalama ve spektrum verilerini içermekte olup, önceki SEM görüntülerinde belirginleşen iri, köşeli çökelti ile faz süreksizliklerinin kimyasal temellerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. EDS spektrum verisine göre, numunenin genel bileşiminde Fe (%53.3) oranında olup, buna karşılık W içeriği %30.1 gibi oldukça yüksek bir değere ulaşmıştır; bu da WC' nin büyük oranda çözünmeden kalıp mikroyapıda karbür fazlar veya çözünmemiş çekirdekler şeklinde yer aldığını göstermektedir (Farahmand vd., 2014). Cr ve C elementleri matris boyunca dağılarak homojenlik göstermemektedir. Fe elementinin daha çok matriste ve çevresel bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenirken, B elementi düşük oranda dağılmış ve homojen bir görünüm sergilemiştir. N40 numunesinin kimyasal haritaları, WC katkısının bu düzeye ulaştığında mikroyapıda kimyasal süreksizlik, faz sınırı belirginleşmesi, çözünmemiş partikül kümelenmesi ve elementel segregasyonun ileri düzeye ulaştığını açıkça göstermektedir. Sonuç olarak, bu analiz WC katkısının aşırıya kaçtığında, artık yalnızca karbür birikimi değil, aynı zamanda kimyasal heterojenlik, faz ayrışması ve yapısal bütünlük kaybı gibi olumsuzlukları da beraberinde getirdiğini doğrulamaktadır.

WC oranının %30 ve %40' a çıkarıldığı N30 ve N40 numunelerinde mikroyapısal bütünlüğün ve kimyasal homojenliğin bozulduğu açıkça gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde yoğun karbür çökelti, çözünmemiş WC partikülleri ve sert faz çekirdeklenmeleri dikkat çekerken, EDS analizlerinde Fe ve W elementlerinin keskin kontrastlarla ayrıştığı ve farklı kimyasal fazların belirgin sınırlarla ayrıldığı bir yapı ortaya çıkmıştır. N30 numunesinde Cr, W ve C elementleri karbür fazlarda zenginleşmiş, matris ise görece olarak fakirleşmiştir. N40 numunesinde ise W içeriği %30.1' e ulaşarak, SEM görüntülerinde gözlenen iri, keskin hatlı ve çoğu çözünmemiş parçacıkların W bakımından zengin çökelti olduğunu doğrulamıştır. Aynı zamanda B elementi düşük düzeyde homojen dağılmış, bu da B₄C'nin etkisinin mikroyapısal olarak sınırlı kaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, WC katkısının artmasıyla birlikte çözünürlük sınırının aşıldığını, karbür faz doygunluğunun yapının kimyasal sürekliliğini bozacak düzeye geldiğini ve lazer kaplamanın optimizasyonu açısından kritik eşiğin aşıldığını açıkça göstermektedir (Farahmand vd., 2014).

4.1.3. XRD analizleri

Şekil 4.18’ de yer alan XRD analizleri lazer kaplama işleminde kullanılan tozların faz karakterizasyonunu göstermektedir ve kaplama sonrası XRD sonuçlarının yorumlanmasında temel bir referans niteliği taşımaktadır.

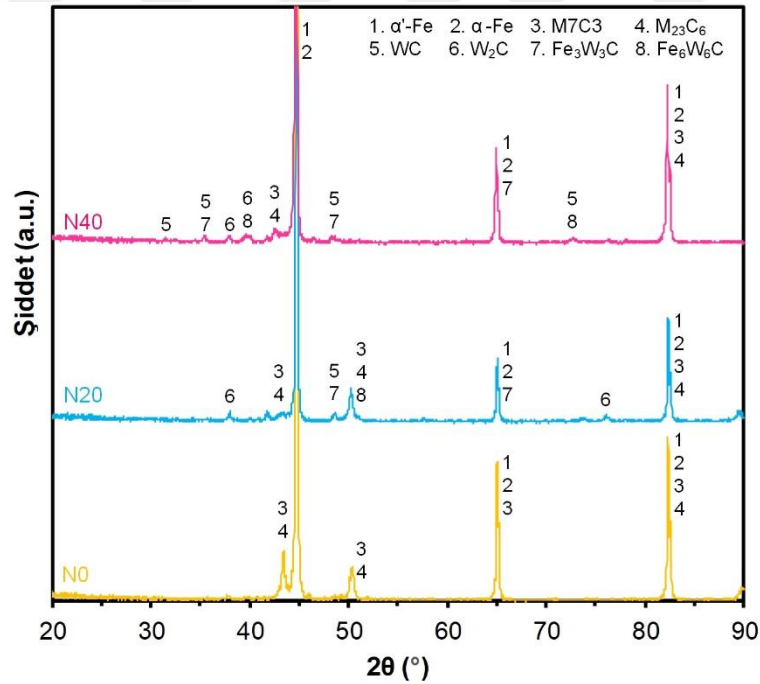


Şekil 4.18. Kaplama tozlarının XRD analizleri; a) matris tozu, b) WC tozu, c) B₄C tozu

Matris tozu olarak kullanılan FeCr esaslı toz karışımında, yaklaşık $2\theta \approx 44.7^\circ$, 65.0° ve 82.3° civarındaki belirgin pikler tipik olarak α -Fe (BCC) fazına ait olup bu yapı içinde Cr’ nin katı çözelti hâlinde çözünerek kristal yapıyı bozmadığını göstermektedir. Ayrıca düşük yoğunluklu yan pikler Fe, Cr ve FeCr yapılarını temsil etmektedir (Şekil 4.18a). WC tozu deseninde, özellikle $2\theta \approx 31.6^\circ$, 35.7° , 48.3° , 64.0° ve 74.1° civarındaki yoğun ve keskin pikler, hegzagonal kristal yapıdaki WC fazına karşılık gelmektedir. Bu yoğunluk ve düzenlilik WC tozunun yüksek kristal saflıkta ve çözünmemiş hâlde

olduğunu, lazerle kaplama sırasında çözünmeye karşı direnç gösterecek kristal fazlar taşıdığını desteklemektedir (Zhou vd., 2008). Ayrıca bazı düşük şiddetli piklerin varlığı, W_2C ile birlikte serbest W fazlarının da var olabileceğini düşündürmektedir (Şekil 4.18b). B_4C tozu için elde edilen desen, $2\theta \approx 25^\circ$ ile 45° arasında geniş bir yelpazede çok sayıda ve yoğun pik içermektedir. Bu desen, tipik rombohedral/trigonal yapıdaki bor karbür (B_4C) fazına karşılık gelmektedir (Şekil 4.18c). Bu yapı, lazer kaplama sırasında yüksek sıcaklık etkisiyle kısmi çözünme veya yeniden kristalleşmeye açık bir davranış sergileyebilir. Sonuç olarak, kaplama öncesi tozların XRD desenleri; FeCr matrisinin kristal bütünlüğünü koruyan bir α -Fe çözeltisi olduğunu, WC tozunun yüksek faz saflığında ve difraksiyon karakteristiğinde belirgin olduğunu, B_4C 'nin ise çok fazlı ve yüksek reaktiviteye sahip bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu desenler, lazer kaplama sonrası oluşacak yeni fazların (örneğin Fe_3W_3C , M_7C_3 gibi) değerlendirilmesinde karşılaştırmalı analiz açısından kritik öneme sahiptir.

Lazer kaplama yöntemi ile üretilen N0, N20 ve N40 numunelerinin XRD analiz sonuçları ise Şekil 4.19' da verilmiştir.



Şekil 4.19. N0, N20 ve N40 numunelerinin XRD analizleri

N0 numunesine ait XRD deseninde, baskın olarak α' -Fe (martenzit) ve α -Fe (ferrit) fazlarının yanı sıra M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tipi Cr esaslı karbür fazlarının bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 4.19). Bu fazlar, kaplamada kullanılan matris tozunun Cr içeriği ile

karbonun birleşimi sonucu oluşmuş olup önceki EDS analizlerinde de doğrulanan Cr ve C dağılımı ile örtüşmektedir (Changle vd., 2020). Matris içerisinde gözlenen bu karbür fazları lazer kaplama sürecinde hızlı soğuma koşullarında mikroyapı içinde çökelmiştir. N0 numunesinde WC takviyesi bulunmadığı için W esaslı fazlara rastlanmamakta, bu da numunenin yalnızca Fe-Cr-C esaslı ve karbürlü bir matris yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

N20 numunesine ait XRD deseninde (Şekil 4.19), α' -Fe ve α -Fe fazları varlığını korumakla birlikte WC, W_2C , Fe_3W_3C ve Fe_6W_6C gibi W esaslı sert fazların açıkça oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.19). WC katkısı ile birlikte yüksek sıcaklıkta kısmen çözünen WC partikülleri matris ile reaksiyona girerek karmaşık W esaslı karbür fazlarını meydana getirmiştir. Bunun yanında M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ gibi Cr esaslı karbür fazlarının da varlığını sürdürdüğü ve bu durumun hem Cr içeriği hem de karbonla olan reaksiyonlar ile bağlantılı olduğu değerlendirilmiştir. WC' nin difraksiyon piki ile birlikte Fe_3W_3C ve Fe_6W_6C gibi fazların eşzamanlı gözlenmesi takviye fazlarının mikrosertlik ve aşınma direnci üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir (Gao vd., 2021; Guo vd., 2012). Bu durum, EDS haritalarında tespit edilen W ve Cr element dağılımıyla da desteklenmektedir.

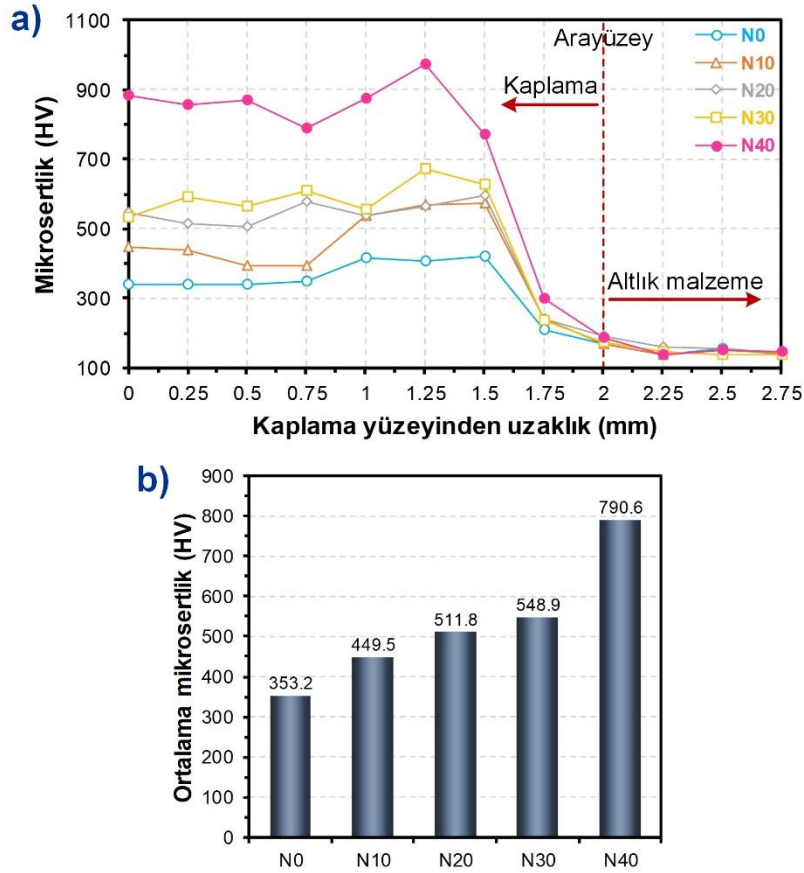
N40 numunesinin XRD deseninde ise WC, W_2C , Fe_3W_3C gibi tungsten esaslı sert fazların miktar ve şiddet bakımından belirgin şekilde arttığı, buna karşılık α' -Fe ve α -Fe fazlarının yoğunluğunun azaldığı görülmektedir (Şekil 4.19). Bu durum, yüksek WC katkısının matris içi çözünürlüğü artırarak Fe esaslı fazların mikroyapısal hâkimiyetini azalttığını ve mikroyapıda sert fazların daha fazla yer kapladığını göstermektedir. Ayrıca, Cr esaslı karbür fazları olan M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ fazları bu numunede de tespit edilmiştir.

4.2. Mikrosertlik Ölçümleri

WC ve B_4C takviyelerinin kaplama sertliği üzerindeki etkisini belirlemek için metalografik numunelerin parlatılmış yüzeylerinden alınan mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.20' de verilmiştir.

Şekil 4.20'de sunulan mikrosertlik verileri, kaplama-altlık geçişinin mekanik karakterini ortaya koymakla birlikte, WC katkı oranlarının mikrosertlik üzerindeki etkisini de açıkça göstermektedir. (Şekil 4.20a)' da görüldüğü üzere tüm numunelerde kaplama yüzeyinden altlığa doğru yapılan mikrosertlik ölçümlerinde belirgin bir düşüş gözlenmekte olup, geçiş bölgesi yaklaşık 1.75–2.00 mm aralığında tanımlanmaktadır. N0

numunesinde ortalama 353.2 HV olan sertlik değeri temel olarak FeCr matris ve Cr esaslı karbür çökeltilerinden kaynaklanmakta, herhangi bir WC katkısının bulunmaması nedeniyle kaplama sertliği sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık WC katkısı %10'a (N10) ve %20'ye (N20) çıkarıldığında, mikrosertlik değerleri sırasıyla 449.5 HV ve 511.8 HV' ye ulaşmıştır. Bu durum, SEM ve EDS analizlerinde gözlemlenen WC çökeltilerinin hacimsel olarak artmasıyla açıklanabilir (Guo vd., 2012; Xiao vd., 2021).



Şekil 4.20. Numunelerin mikrosertlik değerleri (a) ve kaplamaların ortalama mikrosertlikleri (b)

Sertlik profiline daha yakından bakıldığında, WC oranı %30 olan N30 numunesinde ortalama sertlik 548.9 HV' ye yükselmiş, ancak bu artış N20' ye kıyasla daha sınırlı kalmıştır (Şekil 4.20b). Bu durum, mikroyapıda artan miktarda çözünmemiş WC partikülünün bulunması ve bu partiküllerin mekanik süreklilik üzerindeki sınırlı katkısıyla ilişkilidir (Farahmand vd., 2014; Fernández vd., 2015). SEM görüntülerinde gözlemlenen yoğun çökelti yapısı ve karbür fazların karmaşık dağılımı mikrosertlik değerlerinde yerel olarak artış sağlasa da, ortalama mikrosertlik değerini sınırlamıştır. En yüksek ortalama mikrosertlik değeri ise, WC oranı %40 olan N40 numunesinde

gözlemlenmiştir (790.6 HV). Bu durum, XRD analizinde tespit edilen kristal haldeki çözünmemiş WC fazlarının varlığı ile tutarlıdır. W ve Cr bakımından zengin karbür fazlarının büyük hacimsel oranda bulunması, lokal sertlikte ani sıçramalar yaratmakta ve bu da ortalama mikrosertliği arttırmaktadır.

N40 numunesinin yüksek mikrosertlik değeri, her ne kadar aşınma direnci açısından avantajlı görünse de, SEM gözlemlerinde tespit edilen mikroçatlak oluşumları ve faz süreksizlikleri dikkate alındığında bu durumun kırılma riskini artırabileceği unutulmamalıdır. Bu bağlamda, mikrosertlik açısından optimum performansın WC katkısının %20–30 aralığında olduğu, bu oranların üzerinde ise sertlik artışıyla birlikte mikroyapısal bütünlük kayıplarının ve çatlak oluşumunun da eş zamanlı olarak ortaya çıkabileceği söylenebilir (Farahmand vd., 2014; Wu vd., 2023). Sonuç olarak, mikrosertlik verileri faz oluşumlarının mekanik yansımalarını net biçimde ortaya koymakta ve lazer kaplamanın fonksiyonel optimizasyonu açısından doğrudan yol gösterici nitelik taşımaktadır.

4.3. Aşınma Testleri

Aşınma numunelerine uygulanan aşınma testleri sonrasında K, N0, N10, N20, N30 ve N40 numunelerinin aşınma hacimleri, spesifik aşınma hacimleri ve ortalama sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Bunların yanı sıra takviyesiz ve takviyeli kaplamaların aşınma davranışlarını daha detaylı bir şekilde karakterize edebilmek amacıyla aşınma izlerine SEM, EDS ve 3d profilometre analizleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular alt bölümlerde ilgili görsellerle birlikte detaylı olarak sunulmuştur.

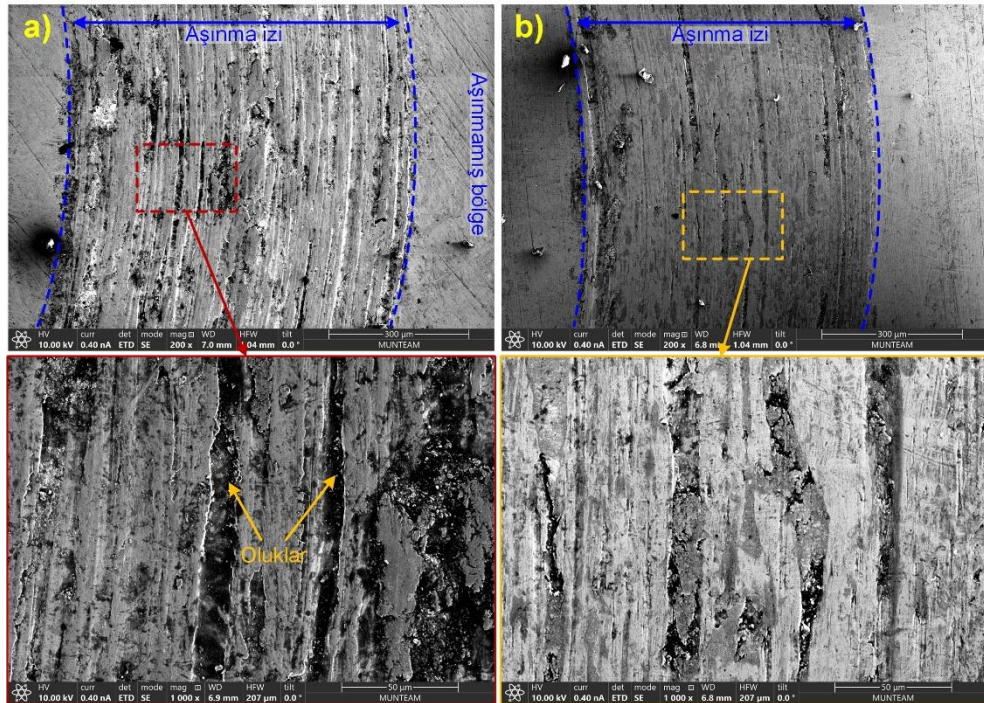
4.1.1. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.21’ de sunulan SEM görüntüleri, kaplamasız K numunesinin 50 m (Şekil 4.21a) ve 100 m (Şekil 4.21b) kayma mesafelerinde maruz kaldığı aşınma davranışını morfolojik düzeyde ortaya koymaktadır. Her iki mesafede de belirgin olarak gözlemlenen paralel yönelimli oluklar, tribolojik temas sırasında baskın olan abrazyon (aşındırıcı aşınma) mekanizmasını işaret etmektedir. Bu oluklar, karşı yüzeydeki sert faz partiküllerinin (100Cr6 çelik bilye yüzeyinden kopan mikroyapısal kalıntılar) test yüzeyine gömülerek yüzeyi kazınması sonucu oluşmaktadır (Zhen vd., 2023). Özellikle 50 m mesafede gözlenen oluklar daha belirgin, derin ve sürekli; ayrıca aşınma izlerinin

kenarlarında yer yer plastik deformasyon bölgeleri ve mikro parçacık yığılmaları da dikkat çekmektedir.

100 m' lik kayma mesafesine ulaşıldığında (Şekil 4.21b), aşınma izlerinin sayıca arttığı, olukların genişlediği ve yer yer parçalanma ve pullanma (delaminasyon) belirtilerinin başladığı görülmektedir. Bu durum, yüzey altı gerilmelerin birikmesiyle malzemenin plastik akmaya zorlandığını ve yüzeyden kopmalarla aşınma derinliğinin arttığını göstermektedir. Özellikle yüzeydeki kararsız deformasyon alanları, kaplamasız çeliğin mikroyapısal olarak düşük sertliğe ve sınırlı aşınma direncine sahip olduğunu teyit eder niteliktedir. Bu gözlemler, daha önce mikrosertlik profilinde de görülen düşük HV değerleriyle örtüşmektedir (yaklaşık 140–160 HV).

Sonuç olarak, lazer kaplama işlemi uygulanmamış K numunesi hem 50 m hem de uzun 100 m sürtünme mesafelerinde belirgin abrazyon etkisiyle malzeme kaybı göstermektedir. Daha uzun mesafelerde ise plastik deformasyon kaynaklı yüzey kırılması ve mikro parçalanma gibi hasar türleri ön plana çıkabilecektir. Bu sonuçlar, St37 çeliğinin tribolojik yük altında sınırlı performansa sahip olduğunu ve bu nedenle yüzey modifikasyonunun gerekliliğini açık biçimde göstermektedir.

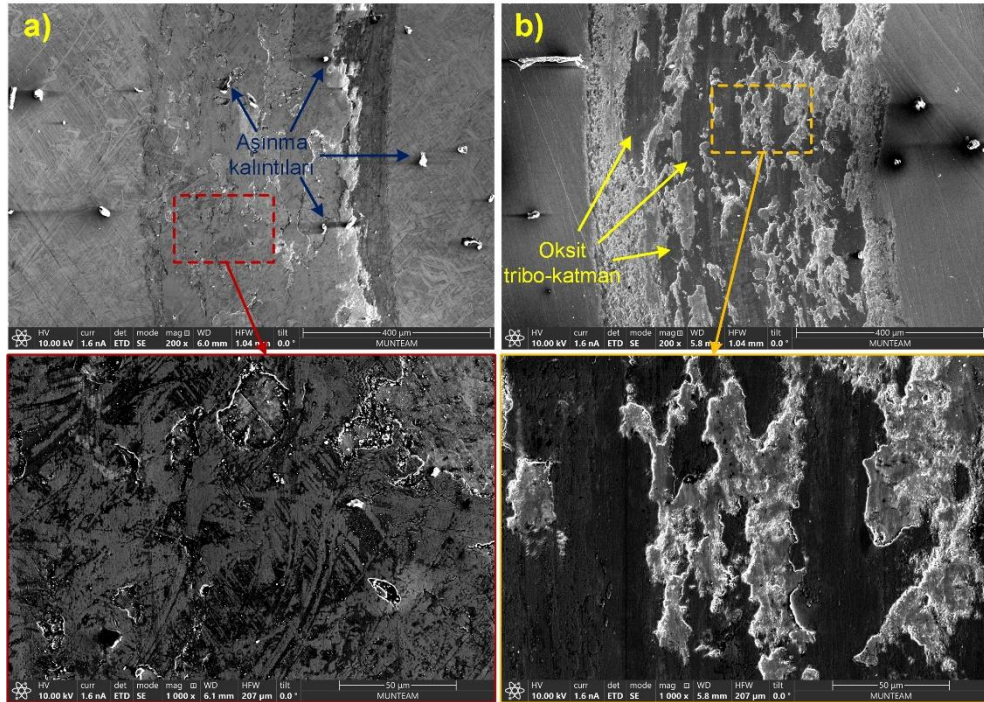


Şekil 4.21. K numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

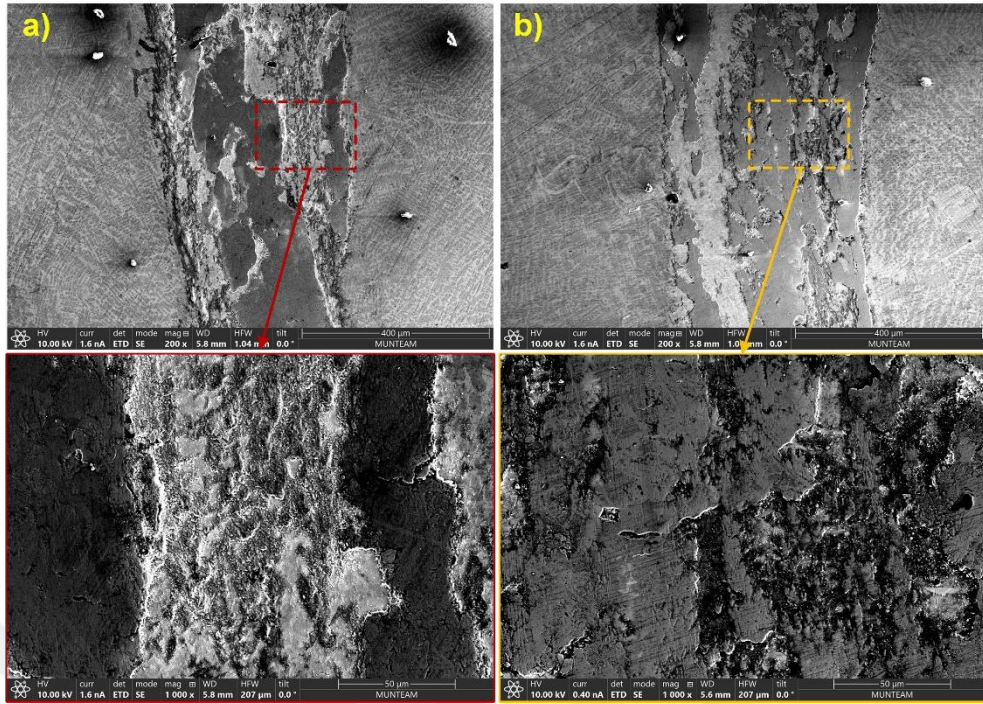
N0 numunesinin aşınma izlerine ait SEM görüntülerinde, WC takviyesi içermeyen FeCr esaslı kaplamanın ortalama mikrosertliği (353.2 HV) kaplamasız K

numunesine göre daha yüksek olsa da, sınırlı miktarda sert faz içermesi nedeniyle tribolojik yük altında sınırlı seviyede direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. 50 m kayma mesafesinde (Şekil 4.22a), yüzeyde oldukça belirgin şekilde plastik deformasyon izleri, yüzey yığılmaları ve yer yer mikro parçalanma alanları gözlemlenmektedir. Aşınma izinin merkezinde birikmiş olan aşınma kalıntıları, hem karşı yüzeyden transfer olmuş oksitli birikimleri hem de kendi yüzeyinden kopan döküntüleri içermektedir. Bu morfoloji, aşınmanın büyük oranda adhezif aşınma karakteri taşıdığını ve yüzey sürekliliğinin kırılgan çökeltiler nedeniyle bozulduğunu ortaya koymaktadır.

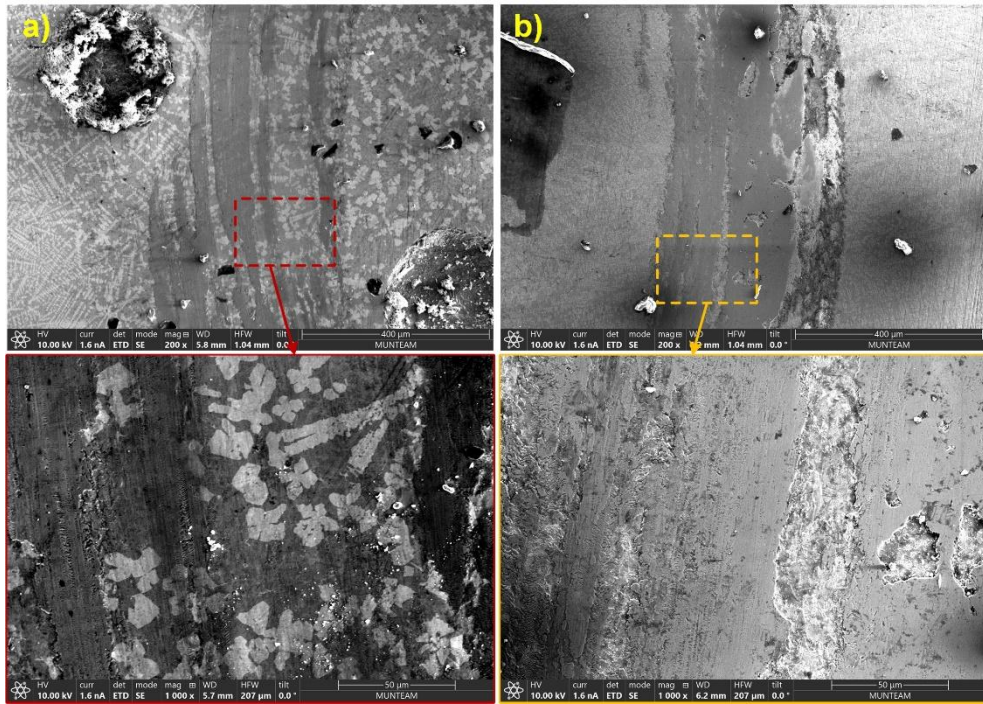
100 m mesafeye ulaşıldığında (Şekil 4.22b), yüzeyde dikkat çekici şekilde oksitlenmiş tribo-katman oluşumu göze çarpmaktadır. Bu tabakanın kesikli ve yer yer kalınlaşmış yapısı, test süresince artan sıcaklık ve mekanik sürtünme etkisiyle oluşan oksit film birikimini işaret etmektedir. Bu film tabakası teorik olarak yüzeyi kısmen koruyabilir; ancak bu durumda tabakanın süreksiz ve zayıf bağlı olması nedeniyle yük transferine karşı kararsız olduğu ve pullanarak dökülmelere neden olduğu anlaşılmaktadır (Fernández vd., 2015; Guo vd., 2012). Sonuç olarak, WC içermeyen N0 numunesi, lazer kaplama ile belirli bir sertlik kazansa da, tribolojik koşullarda sınırlı miktarda sert faz ve düşük matris rijitliği nedeniyle hem mikro parçalanma hem de oksidasyon temelli yüzey hasarlarına açık kalmaktadır.



Şekil 4.22. N0 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi



Şekil 4.23. N20 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi



Şekil 4.24. N40 numunesi aşınma izinin SEM görüntüleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

%20 WC içeren N20 numunesinde gözlemlenen aşınma yüzeyleri, WC katkısının yüzey direnci üzerindeki olumlu etkilerini yansıtmaktadır (Şekil 4.23). Sertlikteki artışa paralel olarak deformasyon bölgeleri kısmen lokalize olmuş, aşınma izlerinde gözlemlenen tribo-katmanlar daha kararlı bir yapı sergilemiştir. Yüzeydeki aşınma

izlerinin sınırlı derinliğe sahip olması ve mikroyapının bütünlüğünü büyük ölçüde koruması, WC katkılı yapının yük transferinde etkin olduğunu göstermektedir (Guo vd., 2012; Huang vd., 2004). Bununla birlikte, aşınma yüzeyinde gözlemlenen ince çatlak izleri ve tribo-katman ayrılmaları, N20 numunesinde aşınmanın hâlâ mikro parçalanma ve oksidatif aşınma mekanizmaları ile sürdüğünü ortaya koymaktadır.

%40 WC içeriğine sahip N40 numunesi ise tüm numuneler arasında en üstün tribolojik performansı sergilemiştir (Şekil 4.24). 50 m ve 100 m kayma mesafelerinde alınan SEM görüntülerinde yüzey sürekliliği korunmuş, deformasyon izleri oldukça sınırlı kalmış ve aşınma genellikle yüzeyin en üst katmanında, hafif malzeme yıpranması şeklinde gerçekleşmiştir. WC esaslı karbür fazları hem mikroyapısal dayanım hem de termal kararlılık sağlanmış, böylece oksit tribo-katman oluşumu ve mikroçatlak gelişimi sınırlı seviyede kalmıştır (Guo vd., 2012).

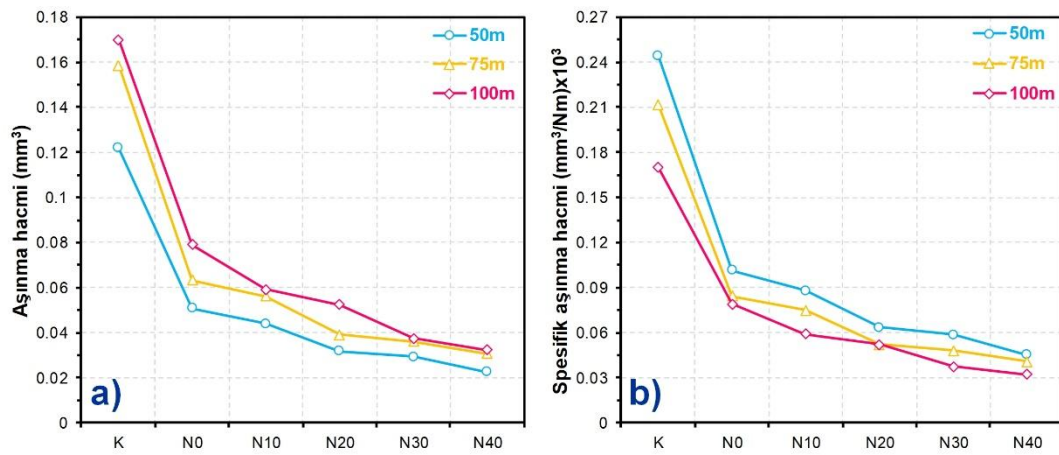
4.1.2. Aşınma hacimleri ve sürtünme katsayıları

Şekil 4.25’ te verilen grafikler, aşınma hacmi ve spesifik aşınma hacmi açısından kaplamalı ve kaplamasız numunelerin tribolojik performansını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Aşınma hacmine ilişkin veriler, hem mutlak hem de normalize edilmiş (spesifik) değerler bakımından WC katkı oranının aşınma direnci üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir. Referans olarak değerlendirilen kaplamasız K numunesi her üç kayma mesafesinde de en yüksek aşınma hacmini sergileyerek, düşük sertlik ve zayıf yüzey dayanımının aşınma direncini doğrudan olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu durum K numunesine ait SEM görüntülerinde gözlemlenen yoğun oluk oluşumu ve plastik deformasyon izleriyle de örtüşmektedir.

Kaplamalı numuneleri incelediğimizde, N0 numunesi K numunesine kıyasla belirgin şekilde daha düşük aşınma hacimleri göstermiştir. Ancak bu gelişmeye rağmen yüzeyde gözlemlenen oksit tribo-katmanlar ve yüzey bütünlüğündeki bozulmalar, aşınma mekanizmasında hâlen adhezif ve oksidatif süreçlerin etkin olduğunu ortaya koymaktadır. %10 ve %20 WC katkılı N10 ve N20 numunelerinde aşınma hacminde gözle görülür bir azalma meydana gelmiştir; bu da sert WC partiküllerinin yük taşıyıcı faz olarak yüzeyde etkin biçimde görev yaptığını ve yüzey deformasyonunu sınırladığını göstermektedir (Şekil 4.25a) (Lu vd., 2019). Spesifik aşınma hacmi bakımından da bu iki numune arasında kademeli bir iyileşme dikkat çekmektedir ve bu durum SEM

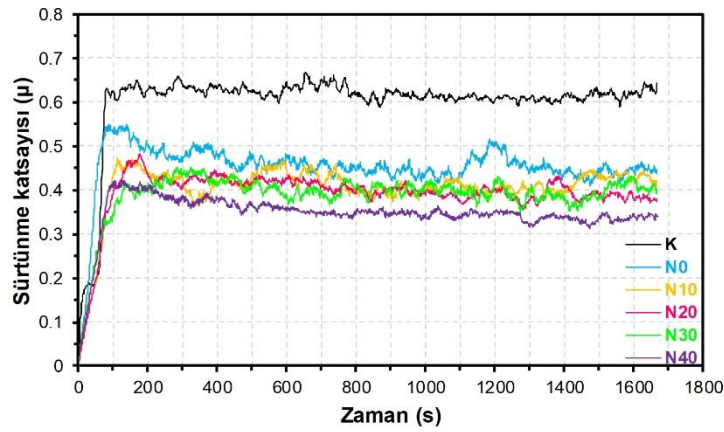
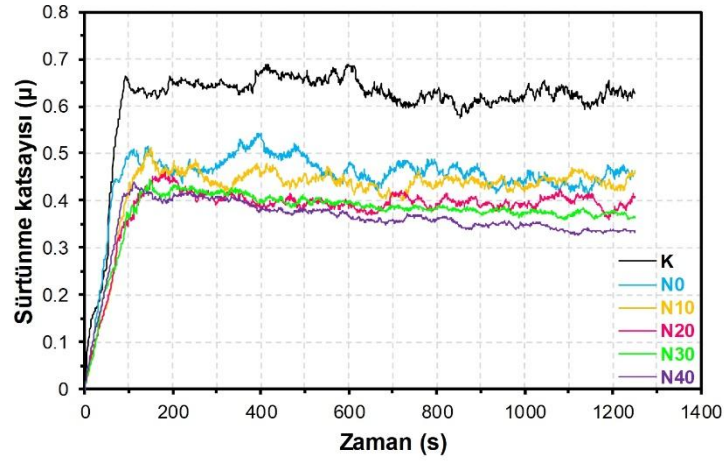
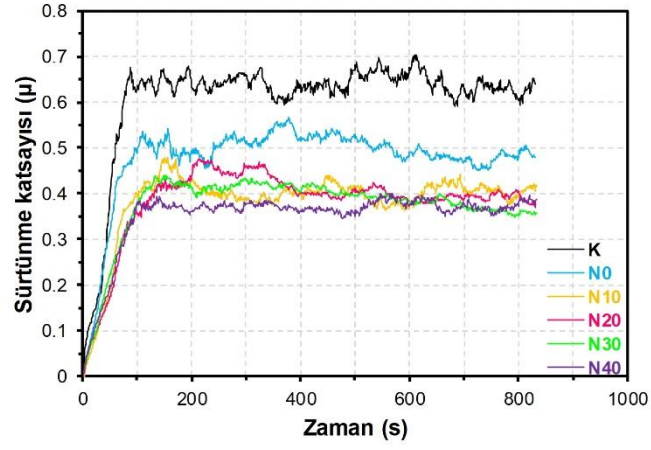
görüntülerinde de daha az bozulmuş tribo-katman morfolojisiyle desteklenmektedir (Şekil 4.25b).

Yüksek WC içeriğine sahip N30 ve özellikle N40 numuneleri, hem aşınma hacmi hem de spesifik aşınma miktarı açısından tüm kayma mesafelerinde en düşük değerleri sergilemiştir. Bu durum, artan WC oranı ile birlikte yük aktarımının yüzeydeki sert fazlar üzerinden gerçekleştirilmesi ve matrise binen yükün minimize edilmesi sayesinde açıklanabilir. N40 numunesi lazer kaplama ile elde edilen optimum mikroyapı-mekanik özellik dengesini yansıtarak, çalışma kapsamında en yüksek tribolojik performansı göstermiştir.

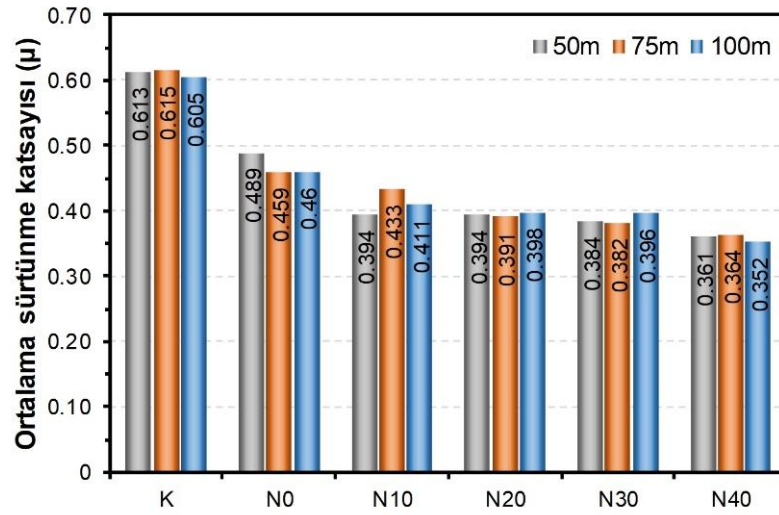


Şekil 4.25. Numunelerin aşınma hacimleri (a) ve spesifik aşınma hacimleri (b)

Numunelerin sürtünme katsayısı – zaman eğrilerinde, kaplama uygulanmamış referans numunesi olan K numunesinde tüm kayma mesafelerinde en yüksek sürtünme katsayısı değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzeyin düşük sertlik ve zayıf tribolojik özellikler sergilemesiyle ilişkilendirilebilir (Wu vd., 2023). Lazer kaplamalı numunelerde ise artan takviye oranları ile birlikte sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş görülmektedir. Özellikle N40 numunesi tüm kayma mesafelerinde en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerlerini sunarak en kararlı tribolojik davranışı sergilemiştir. Bu azalma kaplama mikroyapısında oluşan sert takviye fazlarının ve yoğun karbür çökeltilerinin sürtünme sırasında yüzey deformasyonunu minimize etmesiyle açıklanabilir (Şekil 4.26 – Şekil 4.28).



Sürtünme katsayısı verilerini daha detaylı incelediğimizde, testin başlangıcında tüm numunelerde klasik olarak artış gösteren bir geçiş bölgesi gözlemlenmekte, ardından yüzeydeki temas koşullarının oluşmasıyla değerler stabilize olmaktadır. K numunesinde yüksek ve düzensiz dalgalanmalar dikkat çekerken, kaplamalı numunelerde daha düzgün ve dalgasız eğriler elde edilmiştir (Şekil 4.26 – Şekil 4.28). Bu durum, kaplamaların daha kararlı bir temas yüzeyi sunduğunu ve temas sırasında oluşabilecek mikroyapısal bozulmaları sınırladığını göstermektedir. N40 numunesinde elde edilen düşük sürtünme katsayısı değerleri ve bu değerlerin zamanla stabil seyretmesi, kaplamanın aşınmaya karşı dirençli ve tribolojik olarak avantajlı bir yapı sunduğunu kanıtlamaktadır.



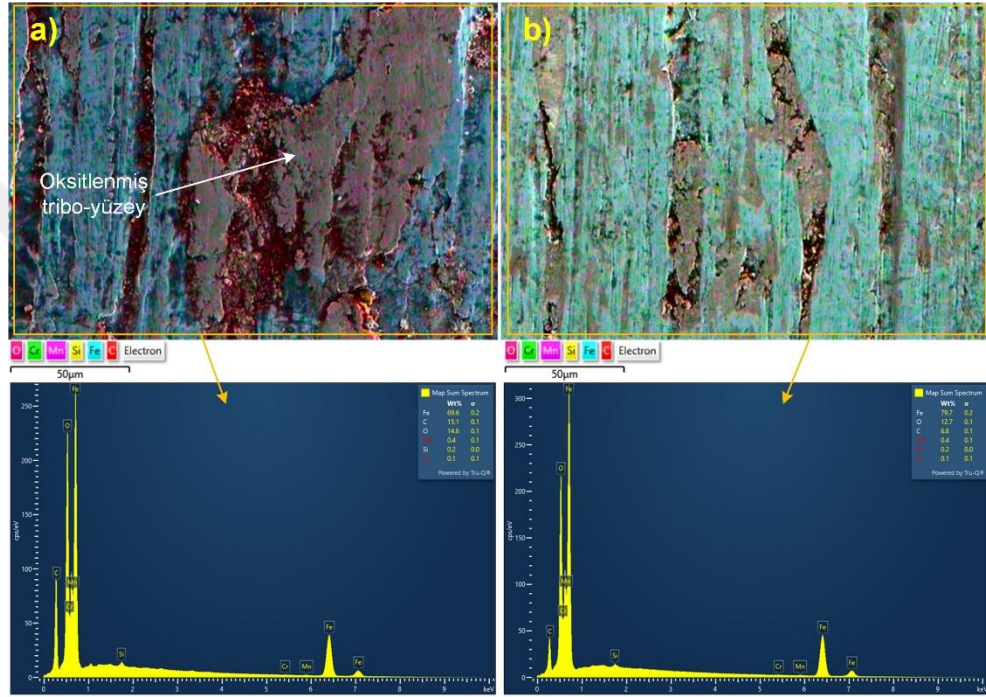
Şekil 4.29. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Ortalama sürtünme katsayısı grafiği mikroyapı ile tribolojik performans arasındaki korelasyonu daha da netleştirmektedir (Şekil 4.29). Kaplama içeriğinde WC ve B₄C gibi sert takviyelerin oranı arttıkça, yüzeyin mekanik mukavemeti ve aşınma direnci artmakta ve bu durum sürtünme katsayısına doğrudan yansımaktadır (Wu vd., 2023). Özellikle N20 ve sonrası numunelerde elde edilen düşük ortalama değerler, kaplama içerisindeki karbür çökeltilerinin yüzeydeki plastik deformasyonu sınırladığını göstermektedir. Böylece yüzey temasının daha kontrollü gerçekleştiğini göstermektedir.

4.1.3. Aşınma izlerinin EDS analizleri

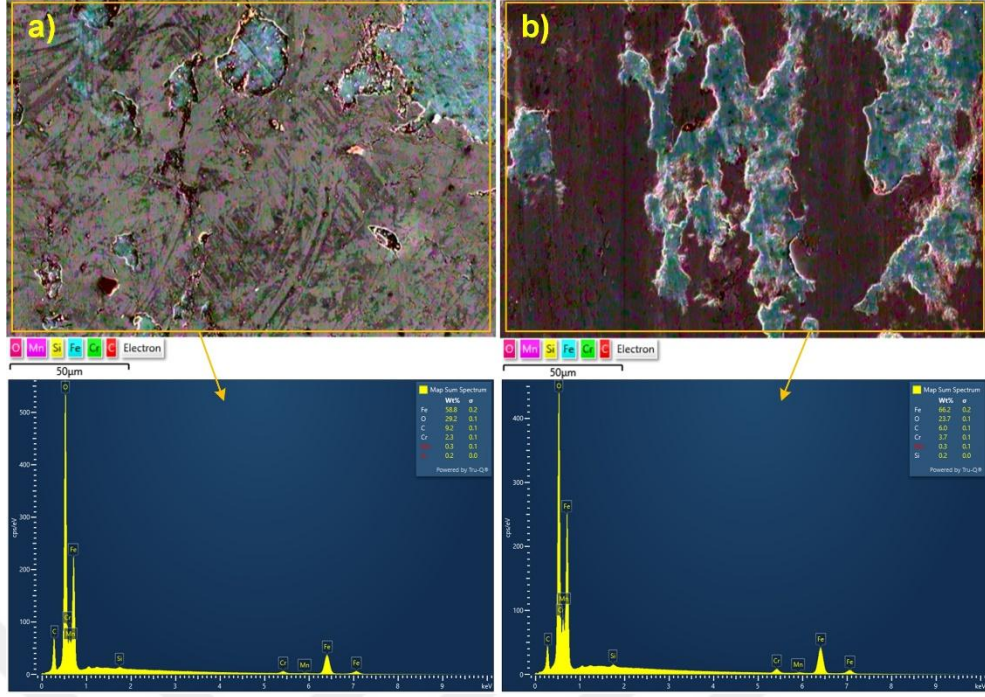
Şekil 4.30 – 4.33’ te kaplamasız (K), takviyesiz kaplamalı (N0), %20 takviyeli (N20) ve %40 takviyeli (N40) numunelerin 50 m ve 100 m kayma mesafelerinde oluşan

aşınma izlerinden alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Kaplamasız numunenin (Şekil 4.30) yüzeyinde 50 m kayma mesafesinde %14.6 oranında tespit edilen oksijen, 100 m mesafede %12.7' ye düşmüştür. Her iki durumda da demir oranı oldukça yüksektir (sırasıyla %69.6 ve %79.7). Bu durum, yüzeyin esas olarak altlık malzeme tarafından temsil edildiğini ve kaplama bulunmamasına bağlı olarak abrazif ve oksidatif aşınmanın baskın olduğunu göstermektedir. Düşük seviyelerde tespit edilen Cr, Mn ve Si elementleri ise yüzeyde aşınmaya dirençli fazların oluşmadığını teyit etmektedir.

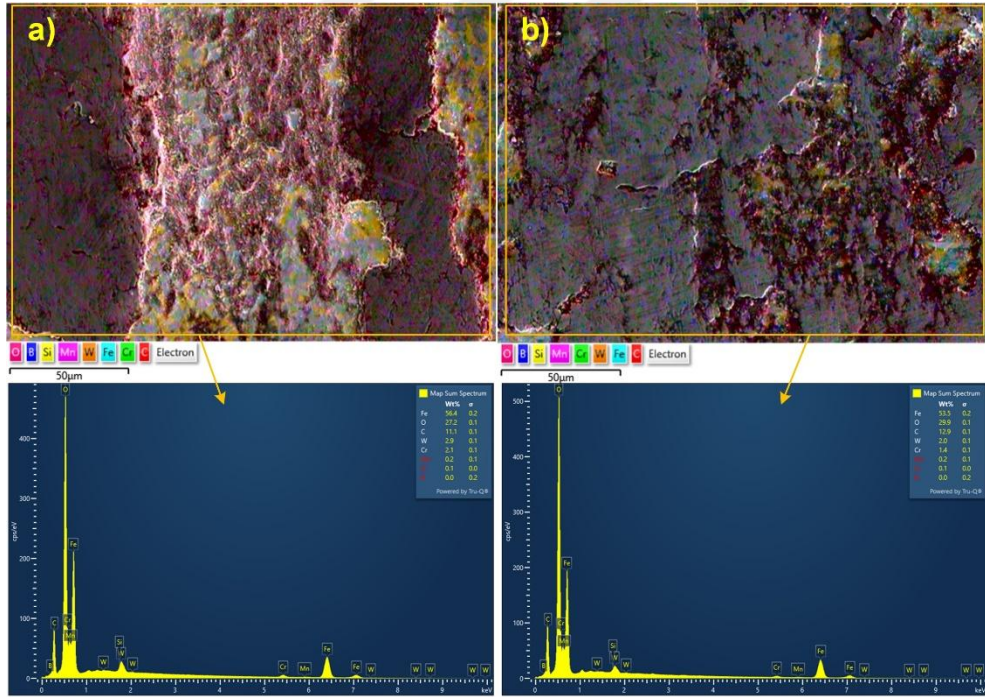


Şekil 4.30. K numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

N0 numunesinin aşınma izlerine ait EDS haritaları (Şekil 4.31) incelendiğinde, yüzeydeki oksijen oranının 50 m mesafede %29.2, 100 m mesafede ise %23.7 olduğu görülmüştür. Bu değerlere paralel olarak Fe oranı da %58.8' den %66.2' ye çıkmıştır. Cr oranındaki artış (%2.3 → %3.7) ise kayma mesafesi arttıkça Cr içeren fazların yüzeyde belirginleştiğini düşündürmektedir. Kaplamanın varlığı kaplamasız numuneye kıyasla aşınmayı daha kontrollü hâle getirmiştir. Ancak, karbon oranındaki düşüş ve oksijen oranının görece yüksek kalması, oksidatif aşınmanın hâlen etkili olduğunu göstermektedir (Fernández vd., 2015).



Şekil 4.31. N0 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

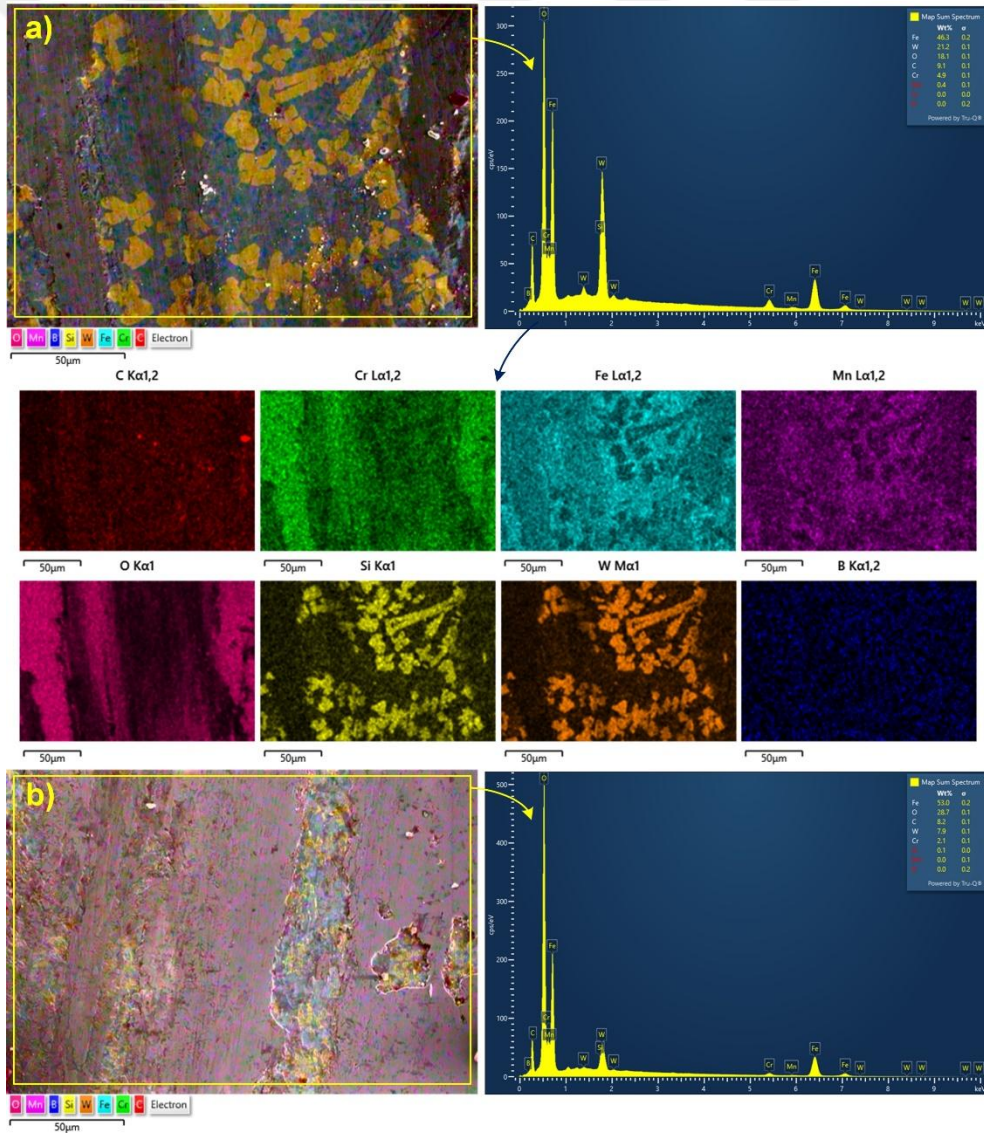


Şekil 4.32. N20 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

N20 numunesi için elde edilen EDS analiz sonuçlarında (Şekil 4.32), 50 m mesafede yüzeyde %27.2 oranında oksijen ve %2.9 tungsten (W) tespit edilmiştir. 100 m mesafede ise W oranı %2' ye düşerken, oksijen oranı %29.9' a çıkmıştır. Cr oranı ise

sırasıyla %2.1 ve %1.4' tür. Bu bulgular, W içeren sert fazların yüzeyde kısmen koruyucu etki sağladığını, ancak kayma mesafesi arttıkça bu etkinin zayıfladığını göstermektedir.

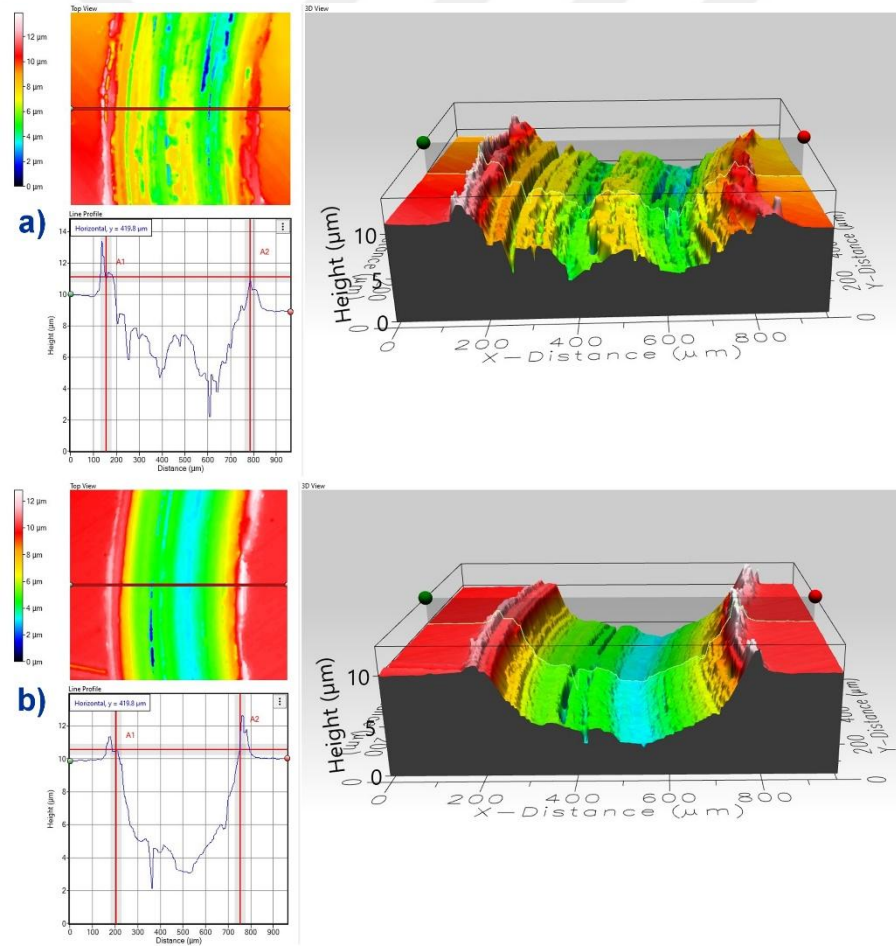
N40 numunesinin EDS analizleri (Şekil 4.33), kaplamanın aşınmaya karşı en yüksek performansı sağladığını göstermektedir. 50 m ve 100 m kayma mesafelerinde W oranı sırasıyla %21.2 ve %7.9 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Cr elementinin yüzeyde koruyucu olarak yer aldığı görülmüştür. Oksijen oranı bu numunede %21.2–28.7 aralığında kalırken, Fe oranı %46.3 ve %53 gibi görece düşük seviyelerde bulunmuştur. Bu dağılım, yüzeyin esas olarak kaplama bileşenleri ile temsil edildiğini ve matrisin daha az açığa çıktığını göstermektedir. EDS haritalarında W ve Cr' nin lokal olarak yoğunlaştığı bölgeler, sert fazların yüzeyde aşınma sırasında kalıcılığını ve etkinliğini ortaya koymakta; böylece N40 numunesinin tribolojik kararlılığını güçlendirmektedir.



Şekil 4.33. N40 numunesi aşınma izinin EDS analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

4.1.2. 3D profilometre analizleri

3D profilometre analizlerine göre, K numunesi ile kaplama uygulanmış numuneler arasında aşınma izlerinin derinliği ve yüzey topografisi bakımından belirgin farklılıklar mevcuttur. Şekil 4.34’ te yer alan K numunesine ait 50 m ve 100 m kayma mesafelerinde alınan profilometrik kesitlerde, her iki durumda da belirgin oluklaşmalar ve yüksek derinlikli aşınma izleri gözlemlenmektedir. 100 m kayma mesafesinde aşınma izinin daha derinleştiği ve genişlediği açıkça görülmekte olup, bu durum malzemenin düşük yüzey sertliği ve oksidasyona eğilimi nedeniyle artan malzeme kaybına işaret etmektedir. Elde edilen derin profiller, K numunesinde ciddi plastik deformasyon ve adhezif – abrazif mekanizmalarının etkili olduğunu göstermektedir.

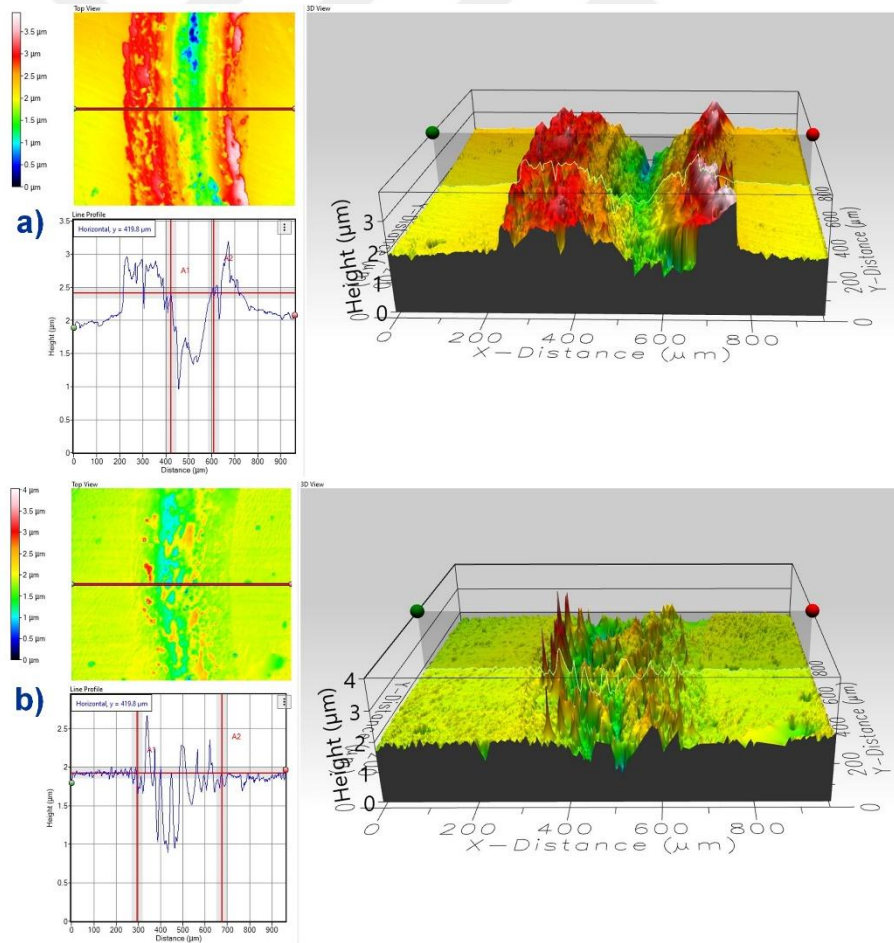


Şekil 4.34. K numunesi aşınma izinin 3D profilometre analizleri; a) 50 m, b) 100 m kayma mesafesi

Şekil 4.35’te verilen N0 ve N40 numunelerine ait 100 m kayma mesafesindeki profilometre kesitlerinde daha yüzeysel ve düzensiz aşınma morfolojileri izlenmektedir.

N0 numunesinde yer yer derinleşen bölgeler bulunsa da genel olarak daha düşük aşınma iz derinliği mevcuttur (Şekil 4.35a). Bu durum kaplama ile birlikte mikrosertliğin artması ve yüzeyin daha dirençli hale gelmesiyle açıklanabilir. N40 numunesinde ise aşınma izi belirgin şekilde daha sığ ve homojen olup, kesitteki yüzey pürüzlülüğü son derece düşüktür (Şekil 4.35b). Bu gözlem N40 numunesinde partikül takviyesinin maksimum seviyeye ulaşarak yüzey direncini önemli ölçüde artırdığını ve aşınma izlerinin hem boyutsal hem de geometrik olarak bastırıldığını göstermektedir.

Sonuç olarak, kaplama uygulaması ve özellikle N40 numunesindeki yüksek takviye oranı aşınma izlerinin derinliğini ve hacmini ciddi şekilde sınırlayarak aşınma direncinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. 3d profilometre verileri daha önce mikrosertlik ve aşınma hacmi analizlerinden elde edilen bulgularla uyumlu olup, tribolojik performans açısından kaplamalı numunelerin özellikle yüksek kayma mesafelerinde daha üstün performans gösterdiğini nicel ve nitel olarak teyit etmektedir.



Şekil 4.35. N0 ve N40 numunelerinin 100m kayma mesafesi sonrası aşınma izlerinin 3D profilometre analizleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Lazer kaplama yöntemiyle üretilen numunelere yönelik gerçekleştirilen mikroyapısal, mekanik ve tribolojik karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Yapılan optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri sonucunda, lazer kaplama işlemiyle oluşturulan kaplama tabakasının mikroyapısı üzerinde WC takviyesinin önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. N0 numunesinde dendritik yapılar ve ötektik bölgeler gözlenmiş; kaplama-altlık arayüzü net şekilde tanımlanmıştır. WC katkı oranının %10 ve %20' ye çıkarıldığı numunelerde, mikro yapıda iğnemi ve ağsı karbür çökeltilerinin belirginleştiği, matris yapısının daha yoğun ve homojen bir görünüme kavuştuğu tespit edilmiştir. Ancak WC oranının %30 ve %40'a çıkarıldığı numunelerde, çözünmemiş WC partiküllerinin sayıca arttığı ve bu partiküllerin matris içinde kümelenerek faz sürekliliğini kısmen bozduğu gözlenmiştir. Özellikle N40 numunesinde, karbür segregasyonlarının morfolojik bütünlük üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu değerlendirilmiştir.

EDS ve XRD analizleri WC katkısının hem kimyasal bileşimi hem de kristal faz yapısını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. N0 numunesi temel olarak FeCr matris ve Cr esaslı karbür içeriğiyle karakterize edilirken, WC katkılı numunelerde W, Cr ve C elementlerinin yüzeyde yoğunlaştığı ve WC, W₂C, Fe₃W₃C ve Fe₆W₆C gibi sert karbür fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. WC oranı %30' un üzerine çıktığında XRD desenlerinde WC fazına ait pikin belirginleştiği, EDS analizlerinde ise çözünmemiş WC partiküllerinin yoğunlaştığı alanlarda W içeriğinin bölgesel olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında WC' nin tam olarak matrise çözünemediğini ve mikroyapısal segregasyon eğiliminin yükseldiğini göstermiştir.

Yapılan mikrosertlik ölçümleri, WC katkı oranının kaplama sertliği üzerindeki etkisini net biçimde ortaya koymuştur. N0 numunesinde ölçülen ortalama sertlik değeri 353.2 HV iken, bu değer WC oranının %20 olduğu N20 numunesinde 511.8 HV' ye, %40 olduğu N40 numunesinde ise 790.6 HV' ye ulaşmıştır. Bu artış, yapı içerisinde

gözlemlenen W bakımından zengin karbür fazları ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Derinlik bazlı sertlik profilleri, tüm kaplamalı numunelerde yüzeye yakın bölgelerde yüksek sertlik seviyelerinin elde edildiğini, altlığa doğru ilerledikçe sertliğin kademeli olarak azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, WC oranının %30' un üzerine çıkmasıyla birlikte elde edilen lokal sertlik artışlarının yapısal süreklilik üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği değerlendirilmiştir.

Aşınma yüzeylerinden alınan SEM ve EDS analizleri, WC katkısının tribolojik yükler altındaki yüzey davranışını iyileştirdiğini göstermiştir. K ve N0 numunelerinde yoğun plastiklik izleri, tribo-katman birikimleri ve oksidasyon kaynaklı aşınma izleri gözlemlenirken; N20 ve N40 numunelerinde bu etkiler sınırlı düzeyde kalmış, yüzeyde daha dengeli ve kararlı aşınma morfolojileri elde edilmiştir. EDS haritalarında N40 numunesinde W, Cr ve B elementlerinin homojen olarak dağıldığı, oksijen sinyallerinin ise oldukça düşük düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, WC ve diğer sert faz takviyelerinin yüzeyde oksidasyona karşı direnç sağladığını ve tribo-kimyasal kararlılığı artırdığını göstermektedir.

Aşınma davranışına ilişkin olarak ölçülen aşınma hacmi, spesifik aşınma miktarı, sürtünme katsayısı ve 3D yüzey topografyası verileri birlikte değerlendirildiğinde, WC katkısının tribolojik performans üzerinde belirleyici bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Aşınma ve sürtünme değerleri, WC oranı arttıkça sistematik şekilde azalmış; N40 numunesi, tüm mesafelerde en düşük aşınma hacmi ($0.032 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) ve ortalama sürtünme katsayısı (0.352μ) değerlerini göstermiştir. Profilometre kesitlerinde de bu durum doğrulanmış; K ve N0 numunelerinde derin ve düzensiz izler gözlenirken, N40 numunesinde sıg ve düzgün aşınma izleri elde edilmiştir. Bu bulgular, WC takviyesinin yalnızca sertlik kazandırmakla kalmayıp aynı zamanda tribolojik kararlılığı da önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışması deneysel tasarımı, analiz derinliği ve literatürle uyumlu bulgularıyla kapsamlı bir nitelik taşımaktadır. Ancak araştırmanın geliştirilmesine ve gelecekteki çalışmalara ışık tutabilecek bazı akademik öneriler aşağıda sıralanmıştır.

%10' luk artışlarla yapılan WC katkıları, genel eğilimleri ortaya koysa da %20 ile %30 arasında gözlemlenen mikroyapısal bozulmalar göz önüne alındığında, bu aralık

%5' lik adımlarla daraltılarak daha hassas bir sınır belirlenebilir. Böylece optimum takviye oranı daha net şekilde saptanabilir.

Çalışmada FeCr esaslı matris kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda NiCr, CoCr gibi farklı metal matris sistemleriyle aynı takviye partikülleriyle kaplamalar üretilerek, mikroyapısal ve mekanik karşılaştırmalar yapılabilir. Böylece matris seçiminin takviye ile bütünleşik etkileri daha iyi anlaşılabilir.

Bu tezde sabit tutulan lazer parametreleri ve kaplama kalınlığı, mikroyapı üzerinde doğrudan belirleyicidir. İleriki çalışmalarda bu parametreler değişken olarak ele alınabilir ve parametre optimizasyonu ile daha kontrollü faz yapıları elde edilebilir.

Kaplamaların mikroyapı ve sertlik açısından geliştirilmesi tribolojik avantajlar sunsa da, özellikle endüstriyel uygulamalar açısından farklı aşınma davranışları ve korozyon direnci gibi ilave performans sınırları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Akman, C. (2006). *GG 22 lamel grafitli dökme demirden üretilen motor silindir gömleklerinin CNC torna tezgahında işlenebilirliğinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Balıkesir Üniversitesi.
- Arcan, A. (2011). *Lazer Işını ile Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Arslan, İ. Y. (2013). *THM kızılötesi SEL tesisinde lazer demetleri için güç ve enerji ölçümlerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Artkın, F. (2022). Endüstriyel Lazer Teknolojilerinin Makine ve İmalat Alanındaki Uygulamaları. *ASES II. International Health, Engineering and Sciences Conference*, 38–44, Kayseri, Turkey.
- Aydın, K., & Karaağaç, İ. (2018). Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(2), 693–705. <https://doi.org/10.31202/ecjse.379958>
- Bati, S., Çetkin, E., Altunkaynak, Y., & Çelik, Y. H. (2024). Effect of kaolin ratio on wear, water absorption, acidic resistance, and mechanical properties of thermoset composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 239(3), 836-848. <https://doi.org/10.1177/09544062241288170>
- Burakowski, T., & Wierzchon, T. (1998). *Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies*. CRC press.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.
- Changle, Z., Shouhai, L., Yinghua, L., Jiang, J., & Hanguang, F. (2020). Effect of boron on microstructure evolution and properties of wear-resistant cast Fe–Si–Mn–Cr–B alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5564-5576. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.081>
- Chen, Y., Chung, Y. W., & Li, S. Y. (2006). Boron carbide and boron carbonitride thin films as protective coatings in ultra-high density hard disk drives. *Surface and Coatings Technology*, 200(12-13), 4072-4077, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.164>
- Cionea, C. (2010). *Microstructural evolution of surface layers during electrolytic plasma processing* (Doctoral dissertation, The University of Texas at Arlington).

- Demir, E. (2020). *Salınlı lazer kaynak tekniğinde işlem değişkenlerinin optimizasyonu*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- De Hosson, J., Ocelik, V., de Oliveira, U. & Vainchtein, D. (2009). Fundamental and applied aspects of laser surface engineering. *International Journal of Materials Research*, 100(10), 1343-1360. <https://doi.org/10.3139/146.110203>
- Dindar, Ç., Altay, M., & Aydın, H. (2021). Lazer kaplama prosesi ve proses parametreleri: derleme çalışması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 723-736. <https://doi.org/10.17482/uumfd.798666>
- Duradzhi, V. N., ve Lavrova, T. S. (1986). Thermochemical treatment of steel in an electrolytic plasma. *Materials Science Thermochemical Corpus*, ID: 92814970.
- Farahmand, P., Liu, S., Zhang, Z., & Kovacevic, R. (2014). Laser cladding assisted by induction heating of Ni–WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃. *Ceramics International*, 40(10), 15421-15438. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.097>
- Fernández, M. R., García, A., Cuetos, J. M., González, R., Noriega, A., & Cadenas, M. (2015). Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC. *Wear*, 324, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.021>
- Florian, C., Kirner, S. V., Krüger, J., & Bonse, J. (2020). Surface functionalization by laser-induced periodic surface structures. *Journal of Laser Applications*, 32(2). <https://doi.org/10.2351/7.0000103>
- Gao, J., Liu, S., Zhao, Y., Ji, X., Yang, Y., & Tong, W. (2021). Microstructure and properties of Fe–Cr–B alloy with different WC addition. *Vacuum*, 193, 110544. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110544>
- Gökmen, G. G., & Kışla, D. (2022). Nanoteknoloji Temelli Antimikrobiyal Yüzey Kaplama Teknolojileri ve Potansiyel Uygulama Alanları. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(5), 821-837. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i5.821-837.4735>
- Guo, C., Chen, J., Zhou, J., Zhao, J., Wang, L., Yu, Y., & Zhou, H. (2012). Effects of WC–Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating. *Surface and Coatings Technology*, 206(8-9), 2064-2071. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.005>
- Huang, S. W., Samandi, M., & Brandt, M. (2004). Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers. *Wear*, 256(11-12), 1095-1105. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00526-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00526-X)
- Huang, Y., Khamesee, M. B., & Toyserkani, E. (2016). A comprehensive analytical model for laser powder-fed additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.07.001>

- Jiang, Y., Cheng, Y., Zhang, X., Yang, J., Yang, X., & Cheng, Z. (2020). Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process. *Optik*, 203, 164044. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164044>
- Kahraman, N., & Gülenç, B. (2016). Modern kaynak teknolojisi.
- Karagöz, S. (2008). Malzeme Bilgisi Ders Notu. *Adnan Menderes Üniversitesi Aydın Meslek Yüksekokulu*.
- Kayaalp, M., & Hasırcı, H. (2019). Termokimyasal yöntemle AISI 304L çeliğinin kaplanabilirliğinin incelenmesi. *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, November 7-10, 2019, Türkiye, Antalya, Turkey*.
- Kayır, S., & Hasırcı, H. (2021). katmanlı imalat yöntemi ile malzeme yüzey kaplanabilirliğinin değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina Güncel*, 49(1).
- Kumruoglu, L. C., Becerik, D. A., Ozel, A., & Mimaroglu, A. (2009). Surface modification of medium carbon steel by using electrolytic plasma thermocyclic treatment. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(7-8), 781-785.
- Lassner, E., Schubert, W. D., Lüderitz, E., & Wolf, H. U. (2000). Tungsten, tungsten alloys, and tungsten compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. https://doi.org/10.1002/14356007.a27_229
- Lattemann, M., & Ulrich, S. (2007). Investigation of structure and mechanical properties of magnetron sputtered monolayer and multilayer coatings in the ternary system Si-B-C. *Surface and Coatings Technology*, 201(9-11), 5564-5569. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.130>
- Li, X., Li, T., Shi, B., Wang, D., Adnan, M., & Lu, H. (2020). The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer. *Surface and Coatings Technology*, 391, 125706. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125706>
- Liang, Y., Liao, Z. Y., Zhang, L. L., Cai, M. W., Wei, X. S., & Shen, J. (2023). A review on coatings deposited by extreme high-speed laser cladding: processes, materials, and properties. *Optics & Laser Technology*, 164, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>
- Lin, C., & Yao, Y. (2023). Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys. *Metals*, 13(2), 205. <https://doi.org/10.3390/met13020205>
- Liu, Y., Ding, Y., Yang, L., Sun, R., Zhang, T., & Yang, X. (2021). Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 341-363. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.061>
- Liu, Y., Wang, K., Fu, H., Zong, B., & Zhang, J. (2023). Wear resistance of in situ NbC-reinforced laser cladding Ni45 coatings. *Lubricants*, 11(8), 316. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080316>

- Lu, J. Z., Cao, J., Lu, H. F., Zhang, L. Y., & Luo, K. Y. (2019). Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 369, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.063>
- Makina Eğitimi. (2025, May 11). Lazerle kesim: Çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajları. <https://www.makinaegitimi.com/lazerle-kesim-calisma-prensibi-avantaj-ve-dezavantajlari/>
- Özcan, M., & Karamanlı, Ş. (2004). Sac malzemelerin lazer kaynak parametreleri. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 3(1), 14-25.
- Özden, H., & Gürsel, K. (2004). Gemi İnşaatı ve Deniz Yapılarında Lazer Işın İmalat Yöntemlerinin Uygulanması. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, İstanbul*, 240-251.
- Özsoy, M., & Çolak, M. (2018). Cam yüzey kaplama teknolojileri. *European Journal of Science and Technology*, 2(5), 475–500. <https://doi.org/10.31202/ecjse.409685>
- Reif, J. (2018). Surface functionalization by laser-induced structuring. *Advances in the application of lasers in materials science*. ed. P. M. Ossi. 274, 63-88. Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96845-2_3
- Sahraoui, T., Abdelmoula, M., & Djebara, A. (2018). Effect of laser treatment on the mechanical properties of ductile cast iron. *Optics & Laser Technology*, 97, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.010>
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steels* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Siddiqui, A. A., & Dubey, A. K. (2021). Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Optics & Laser Technology*, 134, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106619>
- Siva Prasad, H., Brueckner, F., Volpp, J., & Kaplan, A. F. (2020). Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3), 1559-1568. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05117-z>
- Shi, L., Gu, Y., Chen, L., Qian, Y., Yang, Z., & Ma, J. (2003). A low temperature synthesis of crystalline B4C ultrafine powders. *Solid state communications*, 128(1), 5-7. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(03\)00627-6](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(03)00627-6)
- Tayebi, M., Soltani, H. M., & Rajaei, A., “Laser welding”, *Engineering Principles: Welding and Residual Stresses*, ed. Cooke, K. O., & Cozza, R. C. (IntechOpen, 2022), 3.
- Totten, G. E. (Ed.). (2006). *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. CRC press.
- Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. F. (2004). Laser cladding. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420039177>

- Uzun, R., & Keleş, Ö. (2012). Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3). 509–517.
- Van Acker, K., Vanhoyweghen, D., Persoons, R., & Vangrunderbeek, J. (2005). Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings. *Wear*, 258(1-4), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.041>
- Wang, C. C., & Hwang, J. R. (1994). Surface hardening of AISI 4340 steel by electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*, 64(1), 29-33. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(09\)90082-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(09)90082-2)
- Wang, S. Q., Wei, M. X., & Zhao, Y. T. (2010). Effects of the tribo-oxide and matrix on dry sliding wear characteristics and mechanisms of a cast steel. *Wear*, 269(5-6), 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
- Weng, F., Chen, C., Yu, H., & Li, G. (2020). Laser cladding of B₄C, SiC and Y₂O₃ reinforced Co-based coatings on Ti-6Al-4V substrate. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125368. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125368>.
- Wu, T., Shi, W., Xie, L., Gong, M., Huang, J., Xie, Y., & He, K. (2023). Study on the effect of Ni60 transition coating on microstructure and mechanical properties of Fe/WC composite coating by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 163, 109387. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109387>
- Xiao, Q., lei Sun, W., xin Yang, K., feng Xing, X., hao Chen, Z., nan Zhou, H., & Lu, J. (2021). Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 420, 127341. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127341>
- Yavaş, Ö. T. D., & Arslan, İ. Y. (2013). *THM kızılötesi SEL tesisinde lazer demetleri için güç ve enerji ölçümlerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış doktora tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Zhang, Z., Tang, X., Qian, Y., Zhang, H., Wang, W., & Wang, R. (2017). Multicolor tunable yellow-red emission in Eu/Er: LiNbO₃ under ultraviolet and blue excitation. *Optics & Laser Technology*, 97, 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.010>
- Zhang, Y., & Xing, Q. (2020). High entropy alloys: manufacturing routes. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12123-X>
- Zhang, Z., Farahmand, P., & Kovacevic, R. (2016). Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser. *Materials & Design*, 109, 686-699. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.114>

- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in materials science*, 61, 1-93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Zhao, Y., Yu, T., Sun, J., & Jiang, S. (2020). Microstructure and properties of laser cladded B4C/TiC/Ni-based composite coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105112>
- Zhen, M., Xiaoxia, L., Ping, L., Qichong, L., Shidan, Y., Xin, X., ... & Minghui, Z. (2023). Microstructure and two-body abrasive wear behavior of Fe-B surfacing alloys with different chromium and vanadium contents. *Materials Today Communications*, 34, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105441>
- Zhou, S., Zeng, X., Hu, Q., & Huang, Y. (2008). Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization. *Applied Surface Science*, 255(5), 1646-1653. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.003>
- Zhou, J., Wu, J., Tang, S., & Li, Y. (2025). Review of laser texturing technology for surface protection and functional regulation of aluminum alloys: Wettability, anti-icing, corrosion resistance, and wear resistance. *Coatings*, 15(5), 567. <https://doi.org/10.3390/coatings15050567>
- Zhu, L., Wang, S., Pan, H., Yuan, C., & Chen, X. (2020). Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 344-354. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.009>
- Zuev, N. D., & Kalugin, V. M. (1971). Spectroscopic determination of rotational temperature in rarefied hypersonic flow by glow-discharge excitation of luminescence. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 12(2), 302-305. <https://doi.org/10.1007/BF00850709>