



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
NİKEL BAĞLAYICILI TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ
TAKIMLARIN YAPISAL, TRİBOLOJİK VE TALAŞLI
İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

2024

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN NİKEL BAĞLAYICILI
TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN YAPISAL, TRİBOLOJİK VE
TALAŞLI İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Ana Bilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN NİKEL BAĞLAYICILI
TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN YAPISAL, TRİBOLOJİK VE
TALAŞLI İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Fatih YILDIZ danışmanlığında, Tevfik Oğuzhan ERGÜDER tarafından hazırlanan bu çalışma 18 / 09 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oy birliği ile (5/5)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Temel VAROL	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Fatih YILDIZ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Hikmet ÇİÇEK	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Halim KOVACI	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Süleyman Nazif ORHAN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 122M758 numaralı proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

18 / 09 / 2024

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN NİKEL BAĞLAYICILI TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN YAPISAL, TRIBOLOJİK VE TALAŞLI İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji özellikle havacılık ve diğer ileri teknoloji alanlarında teknolojik ürün ihtiyacını artırmıştır. Teknoloji ve mühendislikteki dinamik gelişmeler, talaşlı imalat endüstrisinin de değişiminde önemli bir rol oynayarak, daha iyi aşınma direnci ve mekanik özelliklere sahip iç konturlu özel kesici takımların geliştirilmesi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Bu tez çalışmasının amacı, Tungsten Karbür (WC) kesici takımların istenilen tasarımda kolaylıkla üretilebildiği Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemiyle yüksek maliyetli Co bağlayıcı yerine daha ucuz ve kolay elde edilebilen Ni bağlayıcı ile üretilebilirliğinin araştırılmasıdır. Çalışmada, akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Ni ile kaplanmış WC toz malzemenin SLE yöntemi ile üretiminde kullanılacak optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen parametreler ile tornalama uçları üretilerek yapısal, mekanik, tribolojik ve tornalama özellikleri karakterize edilmiştir. Optimum SLE üretim parametre seti; 100 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızı, 0° inşa oryantasyonu ve bu şartlarda belirlenen 85 µm duvar kalınlığı için %60 yana kayma değeri olarak belirlenmiştir. Akımsız Ni kaplama yöntemiyle yaklaşık 400 nm kalınlığında Ni tabakası elde edilmiştir. Elde edilen kaplama kalınlığının WC tozlarının bağlanması açısından yetersiz olması sebebiyle, kaplanmış toz içerisine Ni toz ilavesi yapılmış ve bu şekilde Ni kaplama ile Ni toz arasındaki etkileşim artırılarak bağlayıcılık özelliği iyileştirilmiştir. Optimum parametreler ile yapılan üretimlerde %98,8 bağıl yoğunluk ve 1962 HV_{0,3} mikrosertlik değerine sahip parçalar üretilmiştir. Ayrıca SLE ve geleneksel yöntemle üretilmiş ticari kesici uçların tornalama performanslarının oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

2024, 120 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Seçici lazer ergitme, Akımsız Ni kaplama, Tungsten karbür, Kesici takımlar

ABSTRACT

Ph.D Thesis

INVESTIGATION OF STRUCTURAL, TRIBOLOGICAL AND MACHINING PERFORMANCES OF TUNGSTEN CARBIDE CUTTING TOOLS WITH NICKEL BINDER PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Today, rapidly advancing technology has increased the demand for technological products, particularly in aviation and other high-tech industries. Dynamic developments in technology and engineering have played an important role in the change of the machining industry, and have revealed the need for the development of internally contoured special cutting tools with better wear resistance and mechanical properties. The aim of this thesis is to investigate the feasibility of producing Tungsten Carbide (WC) tools with the desired design easily with the Selective Laser Melting (SLM) method, with the cheaper and easily obtainable Ni binder instead of the Co binder. In the study, optimum SLM production parameters were determined for WC powder material coated with Ni using the electroless deposition. Turning inserts were produced with the determined parameters and their structural, mechanical, tribological and turning properties were characterized. The optimum SLM production parameter set was determined as 100 W power, 600 mm/s scanning speed, 0° build orientation and 60% hatch spacing for 85 µm wall thickness determined under these conditions. Approximately 400 nm thick Ni layer was obtained with electroless Ni deposition. Since the obtained coating thickness was insufficient for bonding WC powders, Ni powder was added into the coated powder and in this way, the interaction between Ni coating and Ni powder was increased and bonding property was improved. By using optimum parameters, the parts with 98.8% relative density and 1962 HV_{0.3} microhardness value were produced. It was also observed that the turning performances of SLMed and conventional commercial inserts were quite close.

2024, 120 pages

Keywords: Additive manufacturing, Selective laser melting, Electroless Ni plating, Tungsten carbide, Cutting tools

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden, engin bilgisi ve tecrübesiyle her aşamada yol gösteren, sabrı ve anlayışıyla beni destekleyen danışmanım, Sayın Prof. Dr. Fatih YILDIZ'a saygılarımı sunar, teşekkürü borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarımda desteğini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. İlyas HACISALİHOĞLU'na ve Sayın Arş. Gör. Gürkan KAYA'ya, toz kaplama sürecinde laboratuvarlarını bana açarak gösterdikleri misafirperverliklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Temel VAROL'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Onur GÜLER'e, kesici takımların üretimi sırasında tecrübelerini aktararak yardımcı olan Sayın Mak. Müh. Murat İbrahim SEVİM'e minnettarlığımı belirtirim. Verdikleri değerli bilgiler ve yapıcı önerileri ile, tezimin niteliğini ve kalitesini artırmada büyük rol oynayan ve desteklerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Hikmet ÇİÇEK ve Sayın Doç Dr. Süleyman Nazif ORHAN'a şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca bana rehberlik eden sevgili dedemin aziz hatırasına bu tezi ithaf ederken, bana bu süreçte manevi destek veren ve her zaman arkamda duran aileme; özellikle babama, anneme ve kardeşime teşekkür ederim. Ayrıca Öğr. Gör. Caner BULUT'a, Mak. Yük. Müh. Fırat DURLU'ya, Öğr. Gör. Furkan CENGİZ'e ve tüm mesai arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım. Özellikle her zaman yanımda olarak moral veren Mak. Yük. Müh. Simay BAYRAMOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmamda 122M758 numaralı 1002-A projesi ile finansal, 20AG048 numaralı 1004 projesi ile de burs desteği sağlayan TÜBİTAK'a ve doktora 100/2000 bursu ile destek sağlayan YÖK'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarımın yürütülmesindeki alt yapı olanakları ve çalışma dönemimdeki desteklerinden dolayı Erzurum Teknik Üniversitesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi yöneticilerine, akademik ve idari personeline teşekkürlerimi sunarım.

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER
Eylül 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Kesici Takım Teknolojileri	1
1.2. Kesici Takımlarda Aşınma.....	2
1.2.1. Kesici takımlarda aşınma mekanizmaları	2
1.2.2. Kesici takım aşınma türleri	4
1.3. Sinterlenmiş Karbür Takımların Üretim Yöntemleri.....	9
1.4. Eklemeli İmalat.....	12
1.5. Lazer Bazlı Eklemeli İmalat Yöntemleri (LBAM)	14
1.5.1. Seçici lazer sinterleme (SLS).....	16
1.5.2. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS).....	17
1.5.3. Lazer mikro sinterleme (LMS).....	18
1.5.4. Seçici lazer ergitme (SLE)	18
1.6. Akımsız Kaplama Prosesi	21
2. KAYNAK ÖZETLERİ	23
2.1. Eklemeli İmalat ile WC Esaslı Malzemelerin Üretimine ait Bibliyometrik Analiz.....	23
2.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	33
3.1. WC Toz Malzemenin Akımsız Ni Kaplama Prosesi ile Kaplanması	33
3.1.1. Akımsız Ni-P kaplama	34
3.1.2. Akımsız Ni kaplama.....	35
3.2. WC-Ni Tozları için Optimum SLE Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi.....	37
3.2.1. Optimum lazer gücü ve tarama hızının belirlenmesi (Eriyik havuzu incelemeleri)	39

3.2.2. Duvar kalınlığının belirlenmesi (Kontur numunesi üretimi)	41
3.2.3. Prizmatik numunelerin üretimi	42
3.3. Ni ile Kaplanmış WC Kompozit Tozlara ve Numunelere ait XRD Analizleri.....	43
3.4. Doluluk Oranlarının Belirlenmesi.....	44
3.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	44
3.6. Aşınma Deneyleri.....	45
3.7. Aşınma Oranları ve Yüzey Pürüzlülük İncelemeleri	46
3.8. Optimum İnşa Oryantasyonunun Belirlenmesi	47
3.9. Kesici Takımların Üretimi	48
3.10. WC-Ni Kesici Takımların Gerçek Kesme Koşulları Altındaki Davranışı.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	50
4.1. WC Numune Üzerine Gerçekleştirilen Lazer İzlerinin Yüzey ve Kesit Morfolojisi	50
4.2. WC Toz Malzeme Analizleri	53
4.3. Akımsız Ni-P Kaplanan WC Toz Malzeme Analizleri.....	54
4.4. WC-NiP Toz Malzeme ile SLE Üretimleri.....	56
4.4.1. WC-NiP toz malzeme ile kontur (single-wall) numunesi üretimleri	56
4.4.2. WC-NiP toz malzeme ile prizmatik numune üretimleri	57
4.4.3. WC-NiP toz malzeme ile kesici uç üretimleri.....	57
4.5. Akımsız Ni Kaplanan WC Toz Malzeme (WC-Ni) Analizleri.....	59
4.6. WC-Ni Toz Malzeme ile SLE Üretimleri	62
4.6.1. WC-Ni toz malzeme ile kontur üretimleri	62
4.6.2. WC-Ni toz malzeme ile prizmatik numune üretimleri.....	65
4.6.3. Prizmatik numunelere ait doluluk oranları ve mikroyapısal özellikleri.....	67
4.6.4. Prizmatik numunelere ait pürüzlülük değerleri.....	68
4.6.5. Prizmatik numunelerin tribolojik özellikleri ve mikrosertlik ölçümleri	72
4.6.6. Aşınma izlerinin karakterizasyonu.....	73
4.6.7. İnşa oryantasyonunun belirlenmesi.....	75
4.6.8. WC-Ni toz malzeme ile kesici uç üretimleri.....	79
4.7. Saf Ni Toz Malzeme	81
4.8. WC-Ni+Ni Toz Malzeme Analizi.....	82
4.9. WC-Ni+Ni Toz Malzeme ile SLE Üretimleri.....	84
4.9.1. WC-Ni+Ni toz malzeme ile kontur numunelerinin üretimi	84
4.9.2. WC-Ni+Ni toz malzeme ile prizmatik numunelerin üretimi	86

4.9.3. Prizmatik numunelere ait doluluk oranları ve mikroyapısal özellikleri.....	87
4.9.4. Prizmatik numunelere ait pürüzlülük değerleri.....	91
4.9.5. Prizmatik numunelere ait tribolojik özellikler ve mikrosertlik ölçümleri.....	94
4.9.6. Aşınma izlerinin karakterizasyonu.....	95
4.10. Kesici Uçların Üretimi	96
4.11. Üretilen Kesici Uçların Gerçek Kesme Koşulları Altındaki Performansı	99
4.11.1. CNC torna tezgahında kesme işlemi	99
4.11.2. İş parçalarına ait yüzey pürüzlülüğü değerleri	102
4.11.3. Geleneksel torna tezgahında kesme işlemi	103
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR	110



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
%	Yüzde
°	Derece
µm	Mikronmetre
Ar	Argon
B ₄ C	Bor karbür
°C	Santigrat
Co	Kobalt
dk	Dakika
Fe	Demir
g	Gram
GPa	Giga Pascal
H	Hidrojen
HF	Hidroflorik asit
J	Joule
l	Litre
m	Metre
mg	Miligram
mm	Milimetre
mm ²	Milimetre kare
N	Newton
Ni	Nikel
nm	Nanometre
P	Fosfat
rpm	Devir/dakika
s	Saniye
W	Watt
W ₂ C	Tungsten dikarbid
WC	Tungsten karbür

Kısaltmalar

EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi
HIP	Sıcak izostatik presleme
HRFESEM	Yüksek çözünürlüklü alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopisi
HRTEM	Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskopisi
HV	Vickers sertliği
LBAM	Lazer tabanlı eklemeli imalat
LMS	Lazer mikro sinterleme
PBF	Toz yatak bazlı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLE	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme
STL	StereoLithography
XRD	X-Işını difraktometresi
yk	Yana kayma değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Serbest yüzey, b) Krater, c) Çentik	6
Şekil 1.2. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Burun yarıçapı, b) Termal çatlaklar, c) Mekanik çatlaklar d) Sıvanma (BUE)	8
Şekil 1.3. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Plastik deformasyon, b) Kenar çentiklenmesi, c) Talaş vurması d) Kırılma	9
Şekil 1.4. Sinterlenmiş karbür takımların geleneksel imalatı	11
Şekil 1.5. Eklemeli imalat kullanılarak üretilen endüstriyel ürünlere ait görseller	13
Şekil 1.6. Metaller için kullanılan LBAM süreçleri	15
Şekil 1.7. Seçici lazer sinterleme yönteminin şematik gösterimi	17
Şekil 1.8. LMS yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen parçalar	18
Şekil 1.9. SLE yöntemine ait şematik gösterim	20
Şekil 1.10. Seçici lazer ergitme prosesini etkileyen parametreler	21
Şekil 1.11. Akımsız kaplamanın şematik gösterimi	22
Şekil 2.1. WC esaslı malzemelerin eklemeli imalatı hakkında yapılan bilimsel çalışmaların yıllara göre doküman sayısı (Veriler 2009-2024 aralığında Scopus veri tabanından alınmıştır)	23
Şekil 2.2. Çalışma alanlarına göre dağılım	25
Şekil 3.1. Çalışmaya ait akış şeması	33
Şekil 3.2. WC toz parçacıklarının akımsız Ni kaplama işlemi	36
Şekil 3.3. WC tozlarına Ni kaplama işleminin şematik gösterimi	37
Şekil 3.4. Concept Laser MLab R seçici lazer ergitme cihazı	38
Şekil 3.5. Optimum üretim parametre belirlenme şeması	38
Şekil 3.6. SLE parametre çalışmaları için tekli lazer vuruşu yapılan WC kesici uça ait görüntüler.	39
Şekil 3.7. Numunelere uygulanan hassas kesim işlemi	39
Şekil 3.8. Lazer izlerinin numune üzerindeki görüntüsü	40
Şekil 3.9. Lazer izlerinin kesit görüntüsü (eriyik havuz)	40
Şekil 3.10. Eriyik havuzuna ait geometrik büyüklükler (A: Eriyik havuzu genişliği, B: Eriyik havuzu derinliği).	41

Şekil 3.11. Duvar kalınlığının belirlenmesi için üretilen kontur numunelerine ait a) Üretim tablasındaki görünümü, b) Üç boyutlu modeli, c) Teknik resim görüntüsü.....	42
Şekil 3.12. Üretim tablasında farklı yana kaymalarda (%30-90 yk) üretilen prizmatik numuneler.....	43
Şekil 3.13. GNR Explorer X-ışını difraksiyon cihazı	43
Şekil 3.14. Arşimet prensibine ait deney tasarımı	44
Şekil 3.15. SHIMADZU HMV-G20 markalı mikro sertlik cihazı.....	45
Şekil 3.16. Bruker - UMT markalı tribometre cihazı	45
Şekil 3.17. Bruker Contour GT 3D optik profilometre cihazı.....	47
Şekil 3.18. SLE platformunda numunelerin çeşitli yapı açılarından şematik görünümü	47
Şekil 3.19. DNMG-150608 kesici uca ait teknik resim	48
Şekil 3.20. Kesici uçlara uygulanan taşlama işlemi	48
Şekil 3.21. Haas ST10 CNC torna tezgâhı	49
Şekil 4.1. Farklı lazer gücü ve tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait yüzey morfolojisi görüntüleri.....	51
Şekil 4.2. 100 W lazer gücü ve farklı tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait eriyik havuz görüntüleri.	51
Şekil 4.3. WC toz malzemeye ait SEM görüntüsü, toz boyutu dağılım grafiği ve EDS sonucu.	53
Şekil 4.4. WC toz malzemeye ait XRD analizi	53
Şekil 4.5. Ni-P kaplamaya ait SEM ve EDS analizleri	54
Şekil 4.6. Ni-P kaplanmış WC toz malzemeye ait SEM görüntüleri	55
Şekil 4.7. Ni-P kaplanmış WC toz malzemeye ait XRD grafiği	55
Şekil 4.8. WC-NiP toz malzemenin kontur numunelerine ait üretim görüntüsü	56
Şekil 4.9. WC-NiP toz malzeme kullanılarak farklı yana kayma parametrelerinde üretilen prizmatik numuneler	57
Şekil 4.10. WC-NiP toz malzeme kullanılarak farklı parametrelerde üretilen kesici uçlar	58
Şekil 4.11. WC-NiP malzeme kullanılarak farklı parametrelerde üretilen kesici uçlar ..	59
Şekil 4.12. WC-Ni kaplamaya ait SEM görüntüsü ve EDS analizi	60
Şekil 4.13. WC-Ni toz malzemeye ait kaplama kalınlığı görüntüleri	60
Şekil 4.14. WC-Ni toz malzemenin kaplama tabakasına ait çizgisel EDS grafikleri	61
Şekil 4.15. WC-Ni toz malzemeye ait kaplama görüntüleri.....	61

Şekil 4.16. Ni kaplanmış WC toz malzemeye ait XRD grafiği.....	62
Şekil 4.17. 100 W lazer gücünde 200, 400 ve 600 mm/s tarama hızlarında WC-Ni toz malzemeden yapılan üretim.	63
Şekil 4.18. 80 ve 100 W lazer gücünde 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemeden yapılan kontur üretimleri.....	64
Şekil 4.19. 80 ve 100 W lazer gücünde 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemeden yapılan kontur üretimlerine ait SEM görüntüleri.	64
Şekil 4.20. 100 W lazer gücü, 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemeden üretilen tek duvarların optik mikroskop görüntüleri.	65
Şekil 4.21. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numuneler	66
Şekil 4.22. WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği ve EDS analizi	66
Şekil 4.23. Arşimet metodu kullanılarak elde edilen bağıl yoğunluk değerleri	67
Şekil 4.24. WC-Ni toz malzemeden üretilen %60 yk ve %70 yk değerine sahip numunelere ait mikroyapı SEM görüntüleri.	68
Şekil 4.25. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	69
Şekil 4.26. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait üst yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.	70
Şekil 4.27. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yan yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.	71
Şekil 4.28. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait COF-süre grafiği	72
Şekil 4.29. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait aşınma oranları ve mikrosertlik değerleri.	73
Şekil 4.30. WC-Ni toz malzemeden numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 40 yk, b) 50 yk, c) 60 yk.	74
Şekil 4.31. WC-Ni toz malzeme ile üretilen numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 70 yk, b) 80 yk, c) 90 yk	75
Şekil 4.32. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen prizmatik numunelerin yüzey pürüzlülüğü 3D profilometre görüntüleri; üst yüzeyler a) 0° c) 45° e) 90°, yan yüzeyler b) 0°, d) 45°, f) 90°.	76

Şekil 4.33. Çeşitli yapı açılarında üretilen prizmatik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	77
Şekil 4.34. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin COF grafikleri	77
Şekil 4.35. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin aşınma oranı ve mikrosertliği.	78
Şekil 4.36. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerine ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 0°, b) 45°, c) 90°.....	79
Şekil 4.37. WC-Ni toz malzemeden üretilen kesici uçlar	80
Şekil 4.38. WC-Ni toz malzeme ile üretilen kesici uçlarda meydana gelen kusurlar	81
Şekil 4.39. Saf Ni tozuna ait SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	81
Şekil 4.40. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	83
Şekil 4.41. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait XRD grafiği.....	83
Şekil 4.42. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait kontur üretimleri	84
Şekil 4.43. WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilen kontur numunelerinin SEM görüntüleri	85
Şekil 4.44. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait tekli duvar kalınlıkları.....	86
Şekil 4.45. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait üretim görüntüsü	86
Şekil 4.46. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği ve EDS analizi.	87
Şekil 4.47. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait bağıl yoğunluk grafiği.	88
Şekil 4.48. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait optik mikroskop görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.....	89
Şekil 4.49. WC-Ni+Ni toz malzemeden %60 yk ile üretilen prizmatik numuneye ait mikroyapı SEM görüntüleri	90
Şekil 4.50. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri.	91
Şekil 4.51. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait üst yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.	92
Şekil 4.52. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yan yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.	93

Şekil 4.53. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen %30 yk ve %60 yk prizmatik numunelere ait COF-süre grafiği.	94
Şekil 4.54. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen 30 yk ve 60 yk numunelerin aşınma oranı ve mikrosertlik grafiği.	95
Şekil 4.55. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 30 yk, b) 60 yk.	96
Şekil 4.56. WC-Ni+Ni malzemeden üretilen kesici uçlar	97
Şekil 4.57. Taşlanmış ve kaplamalı/kaplamasız kesici uçlar	97
Şekil 4.58. TiN kaplaması uygulanan kesici uçlara ait XRD grafiği	98
Şekil 4.59. SLE ile üretilen kesici uçlarla karşılaştırılan geleneksel yöntemle üretilmiş ticari uçlar.	98
Şekil 4.60. CNC tornalama işlemi.	99
Şekil 4.61. CNC tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.	100
Şekil 4.62. CNC işleme sonrası kesici uçların yüzey ve kenarlarına ait optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.	101
Şekil 4.63. CNC işleme sonrası elde edilen iş parçasına ait yüzey profil görüntüleri a) SLE-kaplamasız, b) SLE-TiN kaplamalı, c) Ticari-TiN kaplamalı.	102
Şekil 4.64. Geleneksel tornalama işlemi	103
Şekil 4.65. Geleneksel tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.	104
Şekil 4.66. Geleneksel disk işleme sonrası kesici uçların yüzey ve kenarlarına ait optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. WC malzemenin eklemeli imalat ve SLE ile üretimine ait bilimsel çalışma verileri	24
Çizelge 3.1. WC parçacıkların akımsız Ni kaplanması için kullanılan çözelti ve karıştırma süreleri.....	35
Çizelge 3.2. Aşınma deneyi parametreleri.....	46
Çizelge 3.3. TiN kaplama parametreleri.....	49
Çizelge 4.1. 100 W gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler	52
Çizelge 4.2. WC-NiP toz malzemeye uygulanan farklı SLE stratejileri.	58
Çizelge 4.3. Farklı yana kayma değerlerinde üretilen WC-Ni prizmatik numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri.....	72
Çizelge 4.4. WC-Ni toz malzemenin optimum SLE parametre seti.....	75
Çizelge 4.5. Farklı inşa oryantasyonunda üretilen numunelere ait ortalama COF değerleri.....	78
Çizelge 4.6. Kesici uçların üretiminde kullanılan optimum SLE parametre seti	96

1. GİRİŞ

1.1. Kesici Takım Teknolojileri

Teknolojinin çok hızlı ilerlediği günümüzde, dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artışı, teknolojik ürün talebinin de hızla artmasına sebep olmuştur. Hammadde, enerji ve işçilik maliyetlerinin yüksek oluşu, üretilen makine ve sistemlerin maliyetini de önemli oranda artırmıştır. Dolayısıyla kullanıcılar, yüksek fiyatlara alınan bu ürünlerden en yüksek verimi almak istemektedir. Mühendislik ve teknolojiadaki dinamik gelişmeler, imalat sanayisi üzerinde de ciddi etkiye sebep olmuştur. Bu etki sonrasında daha iyi mekanik özelliklere ve aşınma direncine sahip takım malzemelerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Kesici takım olarak kullanılacak malzemelerin, üzerine gelen yükleri karşılayacak kadar yeterli bir dayanıma ve aynı zamanda yüksek aşınma direncine sahip olması gereklidir.

Kesici takımlar, kimyasal kompozisyonları, içyapıları, imalat şekilleri, mekanik ve fiziksel özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Yüksek hız çelikleri, sinterlenmiş karbürler, sermetler, elmas ve kübik bor nitrür takımlar talaşlı imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek aşınma direnci, iyi derecede dayanım ve yüksek kızıl sertliğe sahip olan sinterlenmiş karbürler esas olarak tungsten karbürden (WC) oluşur ve tokluğun artırılması için nispeten düşük oranda Co/Ni metal bağlayıcı elementleri içerir. Oda sıcaklığında 22 GPa'ya kadar sertliğe sahip olan sert WC fazı özelliklerini 800 °C'ye kadar koruyabilmektedir. Bu nedenle WC esaslı sinterlenmiş karbürler, kesici takımlar, kalıp vb. mühendislik malzemelerinin üretiminde sıklıkla tercih edilir ve talaşlı imalat takım piyasasının büyük bölümüne hâkim durumdadır. Sinterlenmiş karbürler, kesici takım üretiminin yanı sıra yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu diğer mühendislik uygulamalarında da öne çıkmaktadır. Sinterlenmiş karbür bileşenlerini üretmek için kullanılan en yaygın yöntem; kalıp yapımı, toz malzeme eldesi, toz presleme ve şekillendirme, ön sinterleme, sinterleme ve sinterleme sonrası şekillendirme aşamalarından oluşan toz metalürjisi teknolojisidir (Upadhyaya 1998; Liu and Li 2001; Chen et al. 2019; Ku et al. 2019).

1.2. Kesici Takımlarda Aşınma

Kesici takımların temas yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı, aşınma olarak adlandırılmaktadır. Talaş kaldırma sırasında oluşan sıcaklık ve sürtünmeler nedeniyle takım aşınır ve takım aşınmasının temel sebebi sürtünmedir. Sıcaklık ise takımın aşınmaya karşı olan direncini azaltarak aşınmayı hızlandıran bir etkidir. Aşınma, takım ile talaşın işlenen yüzey ve talaş yüzeyi ile takımın serbest yüzeyi arasında meydana gelmektedir. Burada ifade edilen sürtünme, makine elemanları arasında meydana gelen sürtünmeden farklıdır. Kesme sürtünmesi, sürekli olarak yüksek basınç, yüksek sıcaklık, farklı yüzeylerde ve küçük temas alanlarında meydana gelir.

Kesici takımın aşınarak işlevini yerine getirememesinin belirtileri şunlardır: talaş yüzeyinde krater oluşumu, serbest yüzeyde belirli bir aşınma bölgesinin oluşması, işlenen yüzey kalitesinin bozulması, kesici kenardan küçük parçacıkların kopması ve kesme kuvvetinin ve gücünün ani artışıdır. Bunlardan biri veya birkaçının meydana geldiği durumlarda, takım yeniden kullanılabilir hale getirilmekte veya yenisi ile değiştirilmektedir.

1.2.1. Kesici takımlarda aşınma mekanizmaları

Abrazif aşınma: Genellikle iş parçası malzemesinin sert taneciklerinin neden olduğu bir aşınma türüdür. Bu sert tanecikler, malzemenin yüzeyinden parçalar kopararak aşınmayı tetikler. Kopan parçacıklar, malzemelerin ara yüzeyinden uzaklaştırılır; yapışma olmaz ve sonuç olarak yüzeyde malzeme kaybı artar. Bu mekanizma, malzemenin yüzeyinde malzeme kaybının yoğun olduğu bir süreci işaret eder.

Kesici kenarın abrazif aşınma mekanizmasına karşı direnç kabiliyeti, önemli ölçüde malzemenin sertliği ile ilişkilidir. Sert parçacıkların yoğun bir şekilde kesici kenara temas etmesi, takım malzemesinin abrazif aşınma mekanizmasına karşı direnç gösterebilmesini sağlayabilir. Ancak takım, işleme sürecinde ortaya çıkan diğer yük faktörlerini karşılayacak düzeyde üstün özelliklere sahip olmayabilir. Bu durumda şayet abrazif aşınma mekanizması takımın talaş yüzeyinde gerçekleşirse, kesici takımda krater oluşumuna neden olabilir (Motorcu 2006; Karayel 2015).

Adezif aşınma: Bu aşınma, genellikle 'yıpranma aşınması' olarak da bilinir ve takımın talaş yüzeyinde genellikle düşük işleme sıcaklıklarında meydana gelir. Hem uzun talaş (akma talaşı) hem de kısa talaş (kırık talaş) oluşturan iş parçalarında (örneğin çelik, alüminyum ve dökme demir gibi) gözlemlenebilir. Bu mekanizma genellikle kesici kenar ile talaş arasında kenarda birikmiş talaş oluşumuna neden olur. Dinamik bir yapısı vardır; talaştan birbirini takip eden katmanlar talaş yüzeyine kaynaşarak sertleşir ve kesici kenarın bir parçası halini alır. Kenarda birikmiş talaş tabakası yırtılarak uzaklaşır ve tekrar birikmeye başlayabilir veya kesici kenardan küçük parçaların koparak uzaklaşmasına neden olabilir. Bazı kesici takım malzemeleri ve iş parçalarının talaşlı imalatı esnasında oluşan basınç altında kaynama eğiliminde olması sebebiyle bu mekanizma daha belirgin hale gelir. Ancak, daha yüksek işleme sıcaklıklarına ulaşıldığında, bu durum için koşullar önemli ölçüde azalır (Pul 2010; Karayel 2015).

Yorulma aşınması: Yorulma aşınması genellikle termo-mekanik bir etkileşimin sonucudur. Sıcaklık dalgalanmaları ve kesme kuvvetlerinin değişmesi, kesici kenarda çatlakların ve kırılmaların oluşmasına neden olabilir. Titreşimli ve ardışık darbeli talaş kaldırma işlemlerinde, sıcaklık etkisi altında belirli periyodik bir yüklemenin tekrarlanması, takım malzemesinin termal olarak yorulmasına yol açabilir. Yorulma sürecinde, çatlaklar ilerleyerek mikroskobik boyutta küçük parçaların kopmasına neden olur ve bu da yorulma aşınması mekanizmasının gelişmesine katkıda bulunur (Uluğ 2012).

Difüzyon aşınması: Yüzeyler arası atom transferleri ile gerçekleşen bu aşınma, takım malzemesi ile iş parçası malzemesi arasındaki etkileşime dayanır. Metalik kristallerdeki atomların, yüksek atomik konsantrasyonlu alanlardan düşük atomik konsantrasyonlu alanlara doğru hareket etmesi ile meydana gelir. Talaş yüzeyinde görülen ve krater (oyuk) şeklinde ortaya çıkan bu aşınma türü, sıcaklığa büyük ölçüde bağlıdır ve yayılma hızı sıcaklık arttıkça üstel olarak artar. Bu tür aşınma, genellikle takım çeliği ve hız çeliği takımlarında gözlemlenmez çünkü bu malzemeler, aşınmanın görüldüğü yüksek sıcaklıklara (1000 °C' den fazla) ulaşmadan sertliklerini kaybedip yumuşarlar (Kuş 2013). Sinterlenmiş karbür takımlarda ise WC'nin çözünmesi sırasında serbest kalan karbon, düşük konsantrasyonlu alanlara doğru hareket eder, yani genellikle çeliğe doğru yayılır. Karbonun yayılması, genellikle kobalt fazından geçer. Kobalt içinde

maksimum çözünürlüğe sahip olan karbon miktarı 1200°C'de yaklaşık olarak %0,7'dir. Ancak, demir (Fe) atomlarının varlığı, bu çözünürlüğü %1,5 ila %2 seviyelerine kadar artırabilir. Bu durum, serbest kalan demirin, çözünmeyi hızlandıran iki reaksiyonu yönlendirdiği anlamına gelmektedir (Gündoğdu 2006).

Oksidasyon aşınması: Hava etkisiyle yüksek kesme sıcaklıklarında meydana gelen ve yüzeylerde bir oksit tabakasının oluşmasına neden olan bir aşınma türüdür. Kesme işleminden sonra kesici takım incelendiğinde, temas yüzeylerinin yakınında renk değişiklikleri görülür. Bu renk değişiklikleri, kesici takım malzemesinin oksidasyona uğradığının bir işaretidir. Oluşan oksit tabakası, kesme ağzında çok küçük çentikler oluşturabilir. Farklı takım malzemeleri farklı oksit tabakaları oluşturur. Örneğin, tungsten ve kobalt, sürtünme ile kolayca uzaklaştırılabilen gözenekli bir oksit tabakası oluşturur. Alüminyum oksidi ise oldukça dayanıklı ve serttir. Dolayısıyla, bazı takım malzemeleri oksidasyon aşınmasına daha yatkınken, bazıları değildir (Gündoğdu 2006).

1.2.2. Kesici takım aşınma türleri

Etkin kesici takım ve iş parçası malzemesi seçimi ile doğru talaşlı imalat koşullarının belirlenmesi, işlemlerin verimliliğini optimize etmek ve operasyonları değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlardaki aşınma türleri ve bunları tetikleyen mekanizmalar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Serbest yüzey aşınması / Yan kenar aşınması (Flank wear): Genellikle abrazif aşınma mekanizmasıyla ilişkilidir.
- Krater aşınması: Abrazif ve difüzyon aşınma mekanizmaları etkili olabilir.
- Çentik aşınması: Oksidasyon, adezyon ve mekanik aşınma etkileri görülebilir.
- Burun yarıçapı aşınması: Abrazif aşınma, korozyon ve oksidasyon etkileri ile meydana gelir.
- Isıl ve mekanik yorulma çatlaklar: Termal ve mekanik yorulma mekanizmaları etkili olabilir.

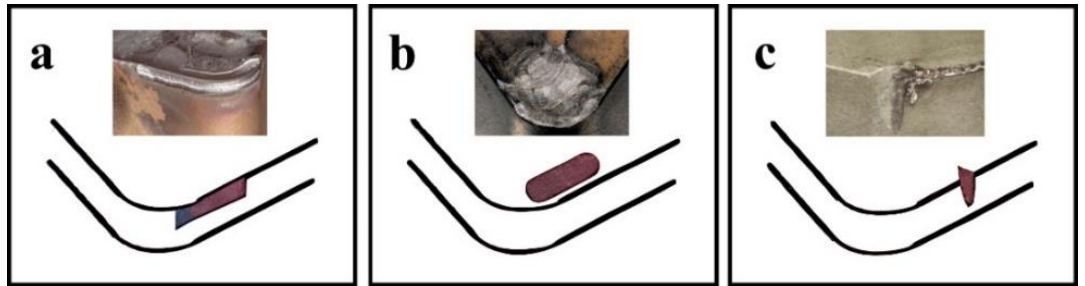
- Talaş Yığılması / Sıvanma (BUE): Adezif aşınma mekanizmalarıyla ilişkilidir.
- Plastik deformasyon: Yorulma aşınma mekanizmalarıyla ilişkilidir.
- Kenar Çentiklemesi (Chipping veya Fritting): Yorulma mekanizmalarıyla ilişkilidir.
- Kesici uç kırılması: Genellikle plastik deformasyon etkileri görülür (Özdemir ve Erten 2003; Karayel 2015).

Serbest yüzey aşınması / Yan kenar aşınması (Flank wear): Serbest yüzey aşınmasına ait görsel Şekil 1.1a'da sunulmuştur. Takımın işlenen parça ile temas eden yüzeyinde meydana gelen aşınma biçimidir. Bu aşınma, takımın kesici yüzeyinde oluşan bir bölgede gerçekleşir. İşlenen yüzeye temas eden bu aşınma bölgesi, talaşın kaldırıldığı parça yüzeyinde hasara neden olur ve bu durum, yüksek serbest yüzey kuvvetlerinin etkisiyle boyutsal doğrulukta azalmaya ve sapmalara yol açabilir. Serbest yüzey aşınması genellikle kesme kenarlarının aşınmasıyla ortaya çıkar. Aşınma miktarı, takım ucuna olan maksimum mesafe veya ortalama serbest yüzey aşınması ile ölçülür. Serbest yüzey aşınma bölgesi genellikle düzenli bir genişliğe sahiptir ve genellikle kenara yakın bir konumda bulunur. Serbest yüzey aşınma seviyesi tipik olarak takımın kullanım süresiyle doğru orantılı olarak artar. Ayrıca, kesilen malzemenin türü, kesme hızı, takım ile malzeme arasındaki temas açısı ve takım hareket hızı gibi çeşitli faktörler de serbest yüzey aşınması seviyesini etkileyebilir. Bu aşınma türü, kesici takım ömrünü belirlemede kullanılan yaygın kriterlerden birisidir. Genellikle serbest yüzey aşınma miktarı belirli bir değerin üzerine çıktığında kesme kalitesi düşerek kesici kenarların körelmesine ve iş parçası toleranslarının bozulmasına sebep olur. Serbest yüzey aşınmasını tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da azaltmak için önlemler alınabilir. Bu nedenle, kesici takımların düzenli olarak incelenmesi ve bakımının yapılması çok önemlidir. Ayrıca uygun kesme koşullarının sağlanması ile serbest yüzey aşınmasının etkilerini en aza indirilerek kesici takım ömrü uzatılabilir (Özdemir ve Erten 2003; Karagöz 2012).

Krater aşınması: Krater aşınmasına ait görsel Şekil 1.1b'de sunulmuştur. Kesici takımın talaş yüzeyinde meydana gelen bu aşınma türü, krater şeklinde bir aşınma oluşumunu ifade eder. Takımın talaş yüzeyi, iş parçasından kaldırılan talaşın takım üzerinde izlediği yüzeydir. İlginç bir şekilde, orta şiddetteki bir krater aşınması genellikle

takımın ömrünü sınırlamaz. Aslında krater oluşumu, takımın talaş açısının etkinliğini artırır ve bu da kesme kuvvetlerini azaltır. Ancak aşırı krater aşınması, kesme kenarlarını zayıflatarak takımın deformasyonuna veya kırılmasına yol açabilir. Bu nedenle, aşırı krater aşınmasından kaçınılmalıdır çünkü takımın ömrünü kısaltır ve yeniden bileme sürecini zorlaştırır. Aşırı krater aşınması genellikle difüzyon veya kimyasal aşınma mekanizmaları ile meydana gelir. Krater aşınması, takım malzemelerinin kimyasal kararlılığının artırılmasıyla en aza indirgenebilir. Bu nedenle, kesme koşullarının kontrol altında tutulması ve uygun soğutma yöntemlerinin kullanılması, krater aşınmasını azaltmaya yardımcı olur. Ayrıca, kesici takımların düzenli olarak kontrol edilmesi ve bakımının yapılması da krater aşınmasının etkilerini azaltarak takım ömrünü uzatabilir (Özdemir ve Erten 2003; Karagöz 2012).

Çentik aşınması: Çentik aşınmasına ait görsel Şekil 1.1c’de sunulmuştur. Yüzeylerin kaba talaşlı imalat işlemlerinde, takım ile işlenmemiş talaş kenarı veya yüzey arasındaki temas noktasında çentik aşınması oluşmaktadır. Kullanılan bir soğutucunun sebep olduğu ya da korozyondan dolayı oluşan oksidasyon da çentik aşınmasını meydana getirmektedir. Çok fazla çentik aşınması, özellikle seramik parçaların kırılmasına neden olmakta ve takımın yeniden bilenmesini zorlaştırmaktadır. Çok pasolu talaş kaldırırken kesme derinliğinin değiştirilmesi, iş parçası ile takım yüzeyi arasındaki temas alanını artıran dalma açısının artırılması ve takım malzemesinin ısıl deformasyon direncinin ve sertliğinin artırılması çentik aşınmasını azaltmaktadır (Özdemir ve Erten 2003; Karagöz 2012).

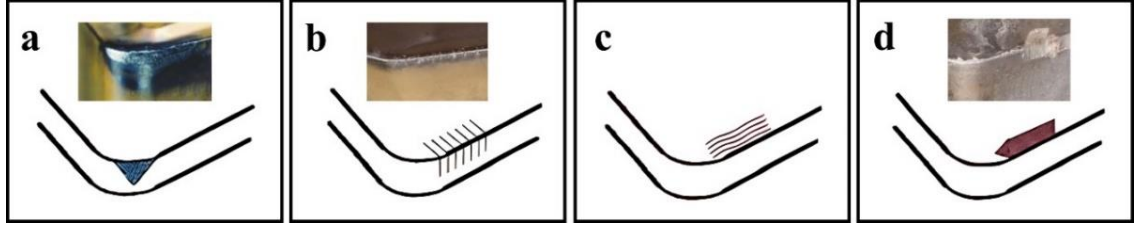


Şekil 1.1. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Serbest yüzey, b) Krater, c) Çentik (Özdemir ve Erten 2003; Sandvik Coromant 2004; Olortegui-Yume and Kwon 2007).

Burun yarıçapı aşınması: Burun yarıçapı aşınmasına ait görsel Şekil 1.2a'da sunulmuştur. Bu tür aşınma takımın burun yarıçapında, serbest yüzeyinin sonuna yakın bir bölgede iz kenarı üzerinde meydana gelir. Bu aşınma, serbest yüzey aşınmasıyla çentik aşınmasının kombinasyonuna benzer ve genellikle abrazif aşınma ile birlikte korozyon veya oksidasyon sonucu oluşur. Aşırı burun aşınması, işlenmiş yüzeyin kalitesini önemli oranda azaltır (Özdemir ve Erten 2003).

Isıl ve mekanik çatlaklar: Isıl çatlaklara ait görsel Şekil 1.2b'de, mekanik çatlaklara ait görsel ise Şekil 1.2c'de sunulmuştur. Bu çatlaklar, kesintili talaş kaldırma sırasında takımın değişken yüklerle yüklenmesi veya talaş kaldırma esnasında yüksek takım-talaş ara sıcaklıkları nedeniyle meydana gelir. Meydana gelen iki tür çatlak; özellikle bir soğutucu kullanıldığında kesme kenarlarına dik olarak oluşan çatlaklar ve değişken mekanik yükler nedeniyle kesme kenarlarına paralel olarak oluşan çatlaklardır. Çatlak oluşumu, takımın hızlı bir şekilde hasar görmesine neden olur (Özdemir ve Erten 2003).

Talaş yığılması/sıvanma: Sıvanmaya ait görsel Şekil 1.2d'de sunulmuştur. Yığılma kenar, önemli ölçüde sıcaklığa ve dolayısıyla kesme hızına bağlı olarak gelişen bir aşınma türüdür. Bu durum, takım yüzeyine malzeme yapışması sonucu oluşan ve takım yüzeyinden parçacık kopmasına neden olan istenmeyen bir durumdur. Yığılma kenar oluşumuna iş parçası ve takım arasındaki uyum da etki eder. Düşük sıcaklıklar ve yüksek basınçlar, iş parçası malzemesinin takım yüzeyine yapışmasına neden olabilir. Yığılma kenarı oluşumunu tetikleyen sıcaklık ve kesme hızları bilindiğinden, bu tür aşınmanın önlenmesi kolaydır. Modern talaş kaldırma işlemlerinde genellikle kesme hızları yığılma kenar oluşumunu engelleyecek düzeydedir ve kaliteli sonuçlar için özenle seçilir. Ancak, yığılma kenar oluşumuna izin verildiğinde yüzey kalitesi bozulur ve bu durumun devam etmesi halinde kenar kırılması veya takımın ömrünün tamamlanması gibi sorunlar ortaya çıkabilir.



Şekil 1.2. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Burun yarıçapı, b) Termal çatlaklar, c) Mekanik çatlaklar d) Sıvanma (BUE) (Özdemir ve Erten 2003; Sandvik Coromant 2004; Olortegui-Yume and Kwon 2007).

Plastik deformasyon: Plastik deformasyona ait görsel Şekil 1.3a’da sunulmuştur. Takım ile talaş arasındaki temas alanı üzerindeki kesme basınçları takım tarafından desteklenemediğinde, kesme kenarlarında plastik deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon genellikle yüksek kesme kenarı kuvvetlerinin olduğu yüksek ilerleme hızlarında veya takım sertliğinin artan kesme hızı ve sıcaklıkla birlikte azaldığı yüksek kesme hızlarında oluşur. Kesme kenarlarında meydana gelen aşırı deformasyon, boyutsal doğruluğun azalmasına, kötü bir yüzey kalitesine ve aşırı serbest yüzey aşınmasına veya takımın kırılmasına neden olabilir.

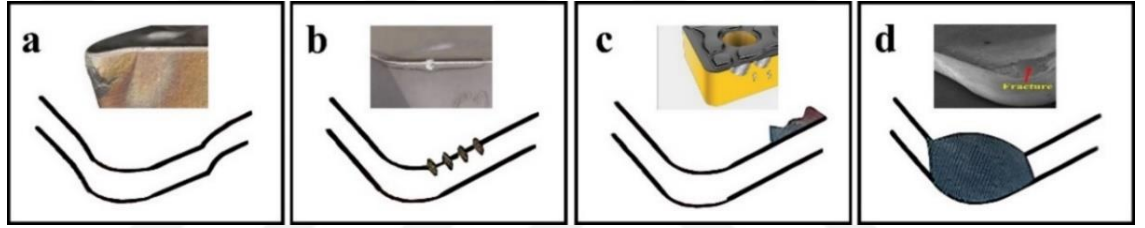
Kenar çentiklenmesi: Kenar çentiklenmesine ait görsel Şekil 1.3b’de sunulmuştur. Bu aşınma türü, seramik gibi kırılgan takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde veya sert abrazif parçacıklar içeren metal matrisli kompozitler gibi malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelir. Aşırı kesme kuvvetleri veya düşük sistem rijitliği nedeniyle ortaya çıkan titreşimler de kenar çentiklenmesine yol açabilir. Mekanik yük, tek başına çatlak oluşturacak kadar büyük olmasa da mekanik yükteki sürekli değişimler çatlak oluşumuna yol açar. Kesimin başlangıcında ve kesme kuvvetindeki büyüklük ve yöndeki değişimler, kesici ucun mukavemet ve tokluğundan daha fazla olduğunda bu tür aşınmalar gözlenir. Kenar çentiklenmesi, işlenen yüzeyin kalitesinin düşmesine, serbest yüzey aşınmasının artmasına ve sonuç olarak takımın kırılmasına neden olabilir. Bu mekanizma, takım kenarlarının düzenli olarak değiştirilmesi veya takımların kırılma dayanımlarının artırılmasıyla kontrol altına alınabilir (Özdemir ve Erten 2003).

Talaş vurması: Talaş vurmasına ait görsel Şekil 1.3c’de sunulmuştur. Paslanmaz çelik gibi tok veya abrazif özelliklere sahip malzemelerin seramik takımlarla işlenmesi durumunda, talaş vurması meydana gelebilir. Bu durum, talaşın geriye doğru kıvrıldığı

1. GİRİŞ

ve kesme kenarından uzakta takım yüzeyine çarptığı zaman ortaya çıkar. Sonuç olarak, takım yüzeyinde çukurcuklar oluşur ve bu durum devam ettiğinde takım hasar görebilir. Talaş vurması, yanlış talaş kontrolü nedeniyle ortaya çıkar. Talaş akış yönünü değiştirmek için dalma açısı, kesme derinliği, ilerleme hızı veya takım burun yarıçapı gibi parametreler ayarlanarak talaş vurması önlenabilir (Özdemir ve Erten 2003).

Takım kırılması: Takım kırılmasına ait görsel Şekil 1.3d’de sunulmuştur. Takım kırılması, takımın önemli bir parçasının veya kesme kenarlarının parçalanması anlamına gelir. Bu tür hasarları önlemek için genel stratejiler arasında kesme kuvvetlerinin azaltılması, sağlam ve daha rijit takım tertibatlarının kullanılması ve kırılma dayanıklılığı artırılmış takımların tercih edilmesi bulunmaktadır (Özdemir ve Erten 2003).



Şekil 1.3. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma türleri a) Plastik deformasyon, b) Kenar çentiklenmesi, c) Talaş vurması d) Kırılma (Özdemir ve Erten 2003; Sandvik Coromant 2004; Olortegui-Yume and Kwon 2007; Altas et al. 2020; İscar 2024).

1.3. Sinterlenmiş Karbür Takımların Üretim Yöntemleri

Mükemmel aşınma direncine sahip olan WC esaslı sinterlenmiş karbürler düşük tokluğa ve sinterlenebilirliğe sahiptir (Lyu et al. 2020). Hegzagonal kristal yapıya sahip olan WC parçacıkları arasındaki yüksek bağlanma kuvveti, yüksek sertlik ve düşük tokluk ile düşük sinterlenebilirlik özelliklerine neden olur. Bu nedenle geleneksel sinterleme (sıcak pres sinterleme ve basınçsız vakum gibi sinterleme) yöntemleri ile yoğunlaştırılmış WC malzemelerin elde edilmesi güçtür (Poetschke et al. 2012). WC malzemelerin düşük sinterlenebilirliği ve yüksek kırılabilirliğinin üstesinden gelmek ve yoğunluk ile tokluğu iyileştirmek için WC matris malzemesi Co veya Ni gibi sinterlenme kabiliyetini artırıcı ve bağlayıcı görevi görecektir metaller ile takviye edilir (Almond and Roebuck 1988). Co, WC esaslı sinterlenmiş karbür yapılarda en yaygın olarak kullanılan metal bağlayıcı elementtir (Chang and Chen 2014). Co, WC malzeme üzerinde iyi oranda ıslatabilirliğe

sahip olduğundan sinterleme sıcaklığını düşürmekte ve böylece sinterleme yoğunluğunu ve malzemenin tokluğunu artırmaktadır (Jiang et al. 2003; Guo et al. 2008). Ancak Co ilavesi, WC'nin sertliğini, aşınma ve oksidasyon direncini azaltır. Ayrıca Co ve WC'nin farklı termal genleşme katsayılarından kaynaklanan termal gerilmeler, dünya genelinde Co rezervlerinin düşük olması ve maliyetinin çok yüksek oluşu, Co'nun bağlayıcı olarak kullanılmasını sınırlayabilmektedir (Huang et al. 2006; Genga et al. 2013; Kwon et al. 2015; Tang et al. 2019). Bu nedenle araştırmacılar Co bağlayıcı yerine farklı bağlayıcıların arayışına girmiştir. Yapılan çalışmalar Ni'nin sinterlenmiş karbürlerde bağlayıcı olarak kullanılabileceğini ve korozyon-oksidasyon direncini artırdığını göstermiştir (Genga et al. 2013; Li et al. 2019). Sinterleme işleminde Ni kolayca sıvı faz oluşturabilir ve WC yüzeylerinin daha iyi ıslanabilirliğini sağlayarak WC esaslı sinterlenmiş karbürün yoğunlaşmasını hızlandırır (Lisovskii 1982). Ayrıca endüstriyel üretimler açısından bakıldığında Ni maliyetleri Co'ya göre daha düşüktür ve Ni'nin stok miktarı çok daha fazladır. Bu nedenle, WC esaslı sinterlenmiş karbürlerde Co yerine Ni bağlayıcı kullanımı önemli avantajlar sunmaktadır (Engqvist et al. 1998). Sinterlenmiş karbürlerin geleneksel üretiminde birkaç temel adım bulunmaktadır (Şekil 1.4):

Redüksiyon: Tungsten (W), titanyum (Ti) ve tantal (Ta) oksitleri indirgenerek saf metal tozlarına dönüştürülür.

Karbürizasyon: Elde edilen metal tozları, karbon ile reaksiyona sokularak karbürler oluşturulur.

Karıştırma: Karbür tozları, Co ve Ni gibi bağlayıcı malzemelerle karıştırılır.

Öğütme: Karıştırılan tozlar ince parçacıklara öğütülür ve granüller oluşturulur.

Presleme: Granüller yüksek basınç altında preslenir.

Ön Sinterleme: Preslenen yapı önceden ısıtılarak (ön sinterleme) yapısal olarak güçlendirilir.

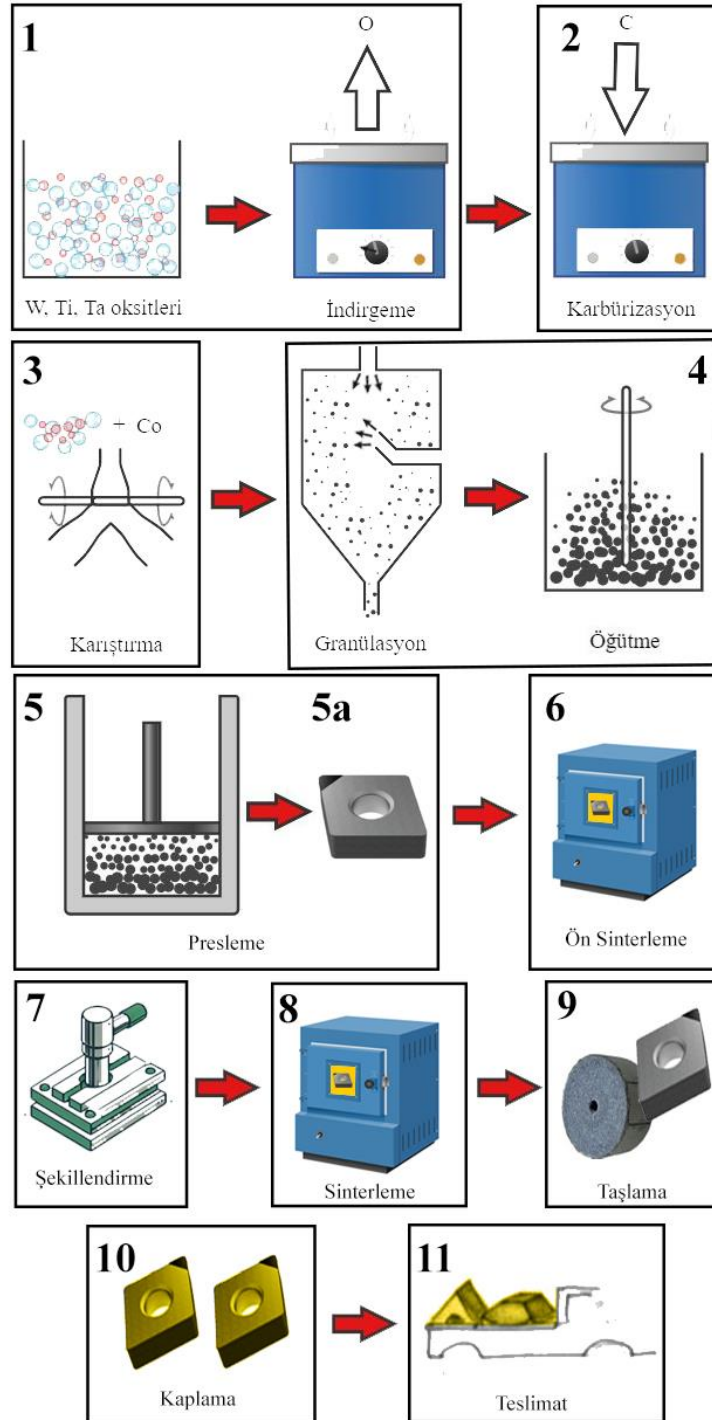
Şekillendirme: Malzeme, son şekline yakın hale getirilir.

Sinterleme: Malzeme, nihai mekanik özelliklerini kazanmak için yüksek sıcaklıklarda sinterlenir.

Son Taşlama: Ürün, son taşlama işlemine tabi tutulur ve nihai boyut ve şekil elde edilir.

Kaplama: Ürün, aşınmaya karşı dayanıklılığını artırmak için seramik ince filmlerle kaplanır (örneğin, PVD, CVD).

Teslimat: Ürün, son kullanıcıya teslim edilir.



Şekil 1.4. Sinterlenmiş karbür takımların geleneksel imalatı (Šubić et al. 2022)

Günümüzde ağırlıklı olarak sinterlenmiş karbür kesici takımlar geleneksel yöntemlerle üretilmektedir. Ancak geleneksel yöntemlerde üretilecek parçanın geometrisi ile ilgili önemli kısıtlar bulunmaktadır. Özellikle sinterlenmiş karbürlerden iç konturlu özel takımların üretimi, zaman ve maliyet açısından yoğun ve çok aşamalı süreçleri içerir. Karbür doğrudan bir diske preslendikten sonra, gerekli geometrik karmaşıklığı elde etmek için karmaşık birçok aşamalı kesme işlemi uygulanır. Soğutma kanallarının konvansiyonel üretime entegrasyonu, büyük ölçüde yüksek başlangıç maliyetleri içerdiğinden ve yalnızca sınırlı ölçüde gerçekleştirilebildiğinden büyük zorluklara yol açmaktadır. Bu nedenle takım üreticileri, özelleştirilebilir ve artan ürün yelpazesinin üretimine izin veren esnek üretim teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Gerekli kriterleri karşılayan teknolojilerden birisi eklemeli imalat olup, net şekle yakın ve iç konturlu özel takımlar bu yöntemle üretilebilir ve böylece enerji ve kaynak tasarrufu sağlanır (Uhlmann et al. 2015). Neredeyse hiç atığın oluşmadığı eklemeli imalat hem ekonomik olarak malzeme sarfıyatı azaltılırken, hem de üretim adımları azaltılmaktadır.

1.4. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, dijital bir modele dayalı olarak parçaları katman katman oluşturan ve son derece esnek bir üretim yöntemi olarak tanımlanır (Bourell and Wohlers 2020). Bu yöntem, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak kalıp veya takım kullanılmadan yüksek hassasiyetle Şekil 1.5'te olduğu gibi karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine olanak sağlar. Ayrıca, tasarım özgürlüğü sunarak, özelleştirilmiş ürünlerin kolayca ve uygun maliyetle üretilmesini sağlar (Huang et al. 2015).

Eklemeli imalat yöntemleri; metaller, seramikler, polimerler ve yapı malzemeleri gibi birçok malzeme sınıflarına uygulanabilmektedir. Teknoloji, 1980'lerde icat edildiğinden bu yana hızla gelişmektedir ve ilk teknik, polimer nesneleri basmak için uygulanmıştır. İlk eklemeli imalat ekipmanları bu dönemde geliştirilmiştir. 3D baskı, malzemenin bir yazıcı kafası, nozul veya diğer yazıcı teknolojileri kullanılarak biriktirilmesi yoluyla nesnelerin üretimi olarak tanımlanır. Üretim sürecinde, bilgisayar ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak yönergeler yazıcıya aktarılır; yazıcı da nesneleri istenen şekil ve boyutta ince katmanlar halinde oluşturur. Katmanlar,

1. GİRİŞ

işlem sırasında nesne (şekil ve boyut) tamamlanana kadar üst üste basılır ve konsolide edilir.



Şekil 1.5. Eklemeli imalat kullanılarak üretilen endüstriyel ürünlere ait görseller (Vafadar et al. 2021).

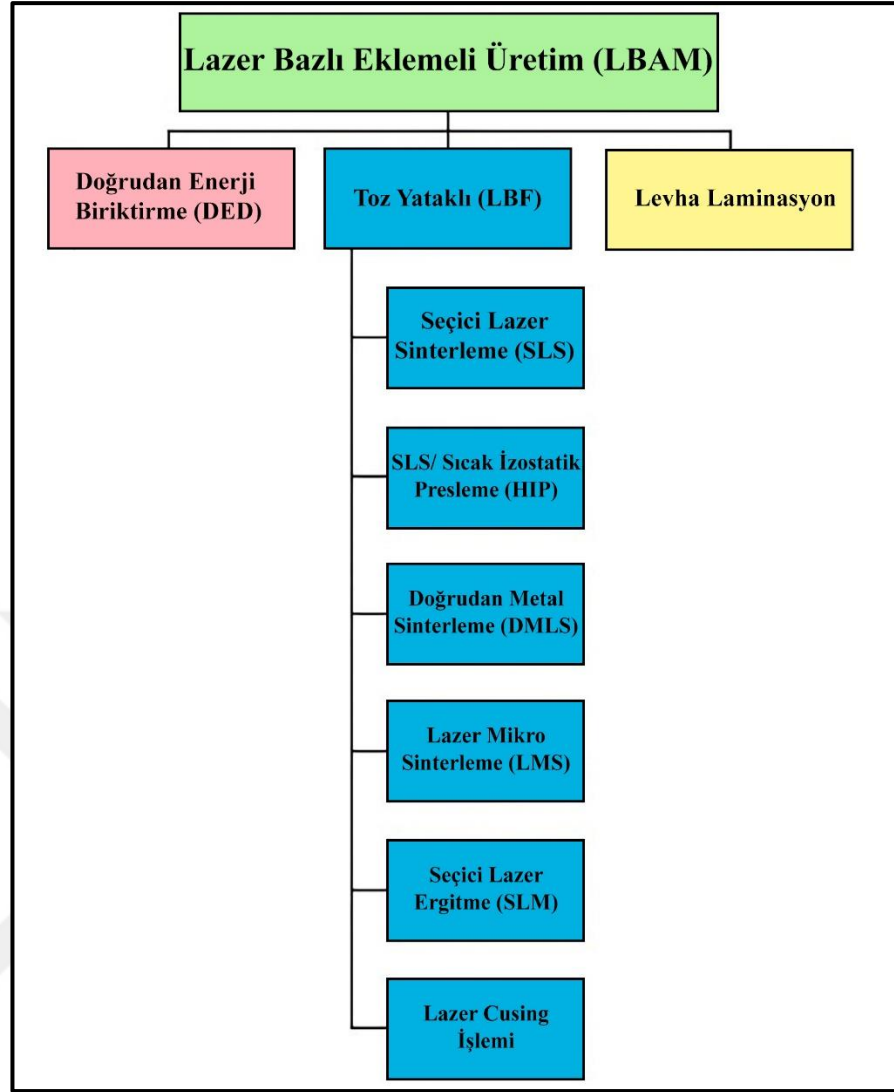
Eklemeli imalat teknolojisi, imalat sektöründen havacılığa ve otomotive kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Lim et al. 2016). Örneğin, havacılık endüstrisinde hafif ve karmaşık parçaların üretiminde eklemeli imalat büyük bir potansiyele sahiptir. Benzer şekilde, otomotiv endüstrisinde, özel tasarlanmış ve hafif parçaların üretimi için bu yöntem sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, eklemeli imalatın önünde hala aşılması gereken bazı zorluklar bulunmaktadır. Özellikle, malzeme kalitesi, üretim hızı ve parça boyutu gibi konularda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Ayrıca, eklemeli imalatın geleneksel üretim tekniklerinin yerini alma potansiyeli hakkında daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır (Mhetre et al. 2022).

Bilgisayarlar, lazerler ve kontrol cihazları, eklemeli imalat kavramını daha da geliştirmiştir. Bu teknoloji, malzemeleri tek bir parçadan ayıran işleme prosedürlerinden farklıdır çünkü malzemenin nihai şekli tek bir işlemde elde edilir. Eklemeli imalat temel olarak, 3 Boyutlu Bilgisayar Destekli Tasarım (3D CAD) programı kullanılarak önceden tasarlanmış bir modelin doğrudan üretilmesini sağlamaktadır. Her ne kadar ilk görüldüğü kadar basit olmasa da eklemeli imalat teknolojisi, CAD verilerinden karmaşık 3 boyutlu nesneler oluşturma sürecini önemli ölçüde basitleştirmektedir. Yazılım, üç

boyutlu verilerin düzenini belirleyen ve modelin yüzey geometrisini küçük üçgenlere bölerek yeniden yapılandıran STereoLithography (STL) olarak adlandırılan bir kod dosyası oluşturmaktadır. 3 boyutlu bir model oluşturmak için "Slicer" veya dilimleyici olarak bilinen bir yazıcı ara yüz programı kullanılmaktadır. Her katman, CAD verilerinden alınan parçanın ince bir kesitidir. Malzemenin nihai şeklini belirlemek için her katmanın belirli bir kalınlığı vardır. Ek bir işlem gerekmeksizin çeşitli şekiller ve geniş bir boyut aralığında nesneler üretilebilir, böylece karmaşık formlar tek işlem adımıyla üretilebilir. Nesne işleme döngüsü nispeten kısa bir sürede gerçekleşir ve bu işlemin önemli bir özelliği, üretim sırasında bilgisayar tarafından kolayca değişiklik yapılabilmesidir. Ek mekanik operasyonlara ihtiyaç duyulmaksızın sağlanan bu esneklik, önemli miktarda maliyet tasarrufuna neden olur (Peleg 2020).

1.5. Lazer Bazlı Eklemeli İmalat Yöntemleri (LBAM)

LBAM (Laser Based Additive Manufacturing) / LBEİ (Lazer Bazlı Eklemeli İmalat) teknikleri genellikle üç ana tipe ayrılabilir. Bunlar; toz yatağı tabanlı veya toz yatağı füzyonu – Powder Bed Fusion (PBF), akış tabanlı veya yönlendirilmiş enerji birikimi ve levha laminasyonudur. Şekil 1.6'da metaller için kullanılan LBAM süreçlerinin detaylı bir sınıflandırması sunulmuştur.



Şekil 1.6. Metaller için kullanılan LBAM süreçleri (Bian et al. 2017)

Eklemeli imalat tekniklerinde toz, tel ve levha dahil olmak üzere farklı türde malzemeler kullanılabilir. Toz yatağı bazlı yöntemlerde yalnızca toz kullanılabilir de akış bazlı yöntemlerde toz veya tel kullanılabilir. Levha laminasyon tekniklerinde ise kullanılan tek malzeme türü levha formudur.

Toz kullanımı, tel veya levha kullanımına göre genellikle daha fazla tercih edilir ve bunun nedeni, küçük boyutlu ve yüksek geometrik doğrulukta parçaların üretilmesine olanak tanımasıdır. Genellikle küresel formda olan toz malzemenin partikül çaplarının küçük olması, üretim sırasında daha ince katmanların kullanılmasını mümkün kılar. Ayrıca, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle parçaların üretilmesi de mümkündür. Diğer bir bakış açısından tel kullanımı, tehlikeli tozun yayılmasıyla ilişkilendirilmediği için daha temiz ve çevre dostu bir işlemdir. Ayrıca, tel hazırlığı

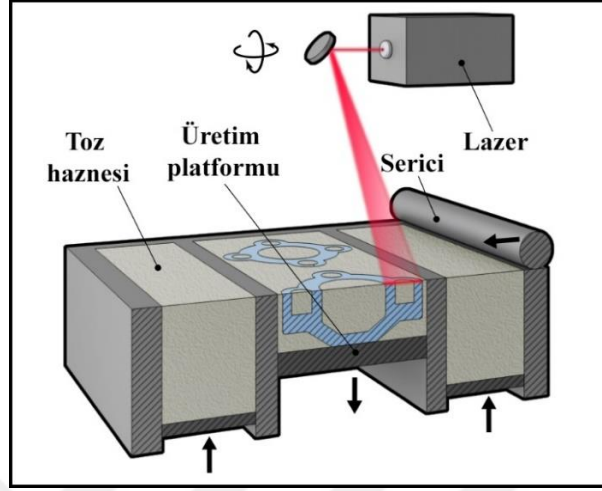
genellikle toz hazırlığından daha kolay ve daha az maliyetlidir. Son olarak, tel kullanımı, üretim sırasında neredeyse sıfır atık ile daha yüksek malzeme kullanım verimliliğine sahiptir (Bian et al. 2017).

PBF süreçleri arasında bir dizi temel prosedür bulunmaktadır. Bunlar, toz parçacıkları arasında füzyonu başlatmak için bir veya daha fazla termal kaynak kullanılması, her katmanın belirli bir bölgesi için toz füzyonunun kontrol edilmesi ve toz katmanlarının eklenmesi prosedürleridir. PBF'de kullanılan en yaygın termal kaynak lazerlerdir. Toz yatak bazlı lazer eklemeli imalat yöntemleri, lazer ışığının toz yatağı üzerinde hareket ettirilerek metal veya polimer malzemelerin katman katman birleştirilmesini sağlayan bir eklemeli imalat sürecidir (Cobbinah et al. 2020). Bu yöntemde lazer ışını, bir toz yatağı üzerindeki malzemeyi ergiterek veya bağlayarak bir katman oluşturur ve ardından yatağın üzerine yeni bir tabaka toz serpilir. Bu işlem katman katman tekrarlanarak istenen nesne oluşturulur. Metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerle kullanılabilen çok yönlü bir tekniktir (Singh et al. 2020).

1.5.1. Seçici lazer sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme, 3D bir yazıcı kullanarak toz halde bulunan malzemeyi lazer ışını ile birleştiren bir eklemeli imalat tekniğidir. Bu yöntem, tozların tamamen ergitilmeden birleştirilmesini sağlamaktadır. SLS'nin temel çalışma yöntemi Şekil 1.7'de şematik olarak gösterilmiştir ve diğer tüm SLS süreçleri, makine verimliliğini artırmak, farklı malzemelerin işlenmesini sağlamak ve belirli patentli özelliklerden kaçınmak için bu temel yaklaşımı bir veya daha fazla şekilde değiştirmektedir. SLS yönteminde, termal kaynak ve toz parçacıkları arasındaki etkileşimi kullanarak parça üretimi gerçekleştirilir. Isı kaynağı genellikle bir elektron ışını veya lazer tarafından sağlanmaktadır. SLS işlemi sırasında, lazer ışını, bir katman toz malzemesini (genellikle polimer veya metal tozu) seçilmiş bir desene göre lokal olarak sinterlemek için kullanılır. Lazer, toz malzemenin belirli bir bölgesini ergiterek veya sinterleyerek bir katman oluşturur. Daha sonra, platformun altına bir sonraki katman toz serilir ve lazer ışını bu katmana uygulanır. Bu işlem, istenen nesnenin tabakalarını birleştirmek için tekrarlanır ve sonunda istenen nesne oluşturulur. Toz yatağı termal kaynakla ısıtıldığında, erimekte olup erime noktasının

da hemen altında ısıtılır. Üretim esnasında, vakum ortamının kullanılması ve argon gibi inert gazların vakum ortamına verilmesi ile malzemenin oksidasyonu önlenir (Ian Gibson 2015).



Şekil 1.7. Seçici lazer sinterleme yönteminin şematik gösterimi (Manufacturing Guide 2021).

SLS bileşenlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek ve yoğunluğunu artırmak için üretim sonrası genellikle Sıcak İzostatik Presleme (HIP) uygulaması tercih edilmektedir. Bu yöntemde parça üretilirken özel destek yapıları gerekmemektedir. SLS ile yüksek mukavemetli parçalar üretilebilmekte ve hızlı kalıp üretimi, konsept model üretimi ve fonksiyonel parça üretimi gibi alanlarda öncelikli olarak kullanılmaktadır.

1.5.2. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)

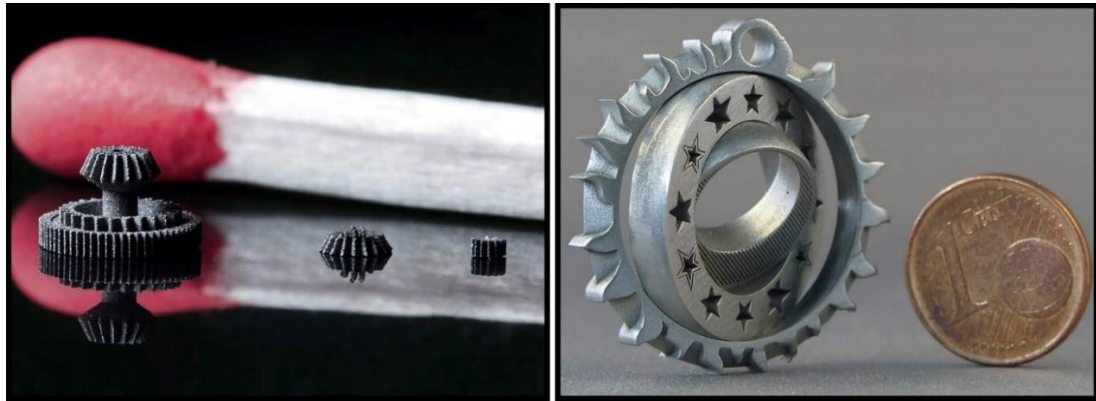
DMLS, 1994 yılında EOS GmbH ve Rapid Product Innovations (RPI) tarafından geliştirilmiştir (Shellabear and Nyrhilä 2004). SLS yönteminde yapılan bazı değişiklikler, doğrudan metal lazer sinterleme yöntemini geliştirmiştir. Bu işlem, iki farklı toz veya iki farklı tane boyutuna sahip tek bir toz kullanılarak yapılmaktadır (Tatlı 2020). Lazer gücünün seviyesine bağlı olarak, düşük erime noktalı bileşenler ergitilir ve bir matris olarak kullanılır, yüksek erime noktalı bileşen ise bunun içinde bulunmaktadır. DMLS yönteminde, toz halindeki malzeme platformun üzerine mekanik elemanlar kullanılarak serilmektedir. Üç boyutlu parça tamamlanana kadar bu işlem adımları tekrarlanmaktadır. DMLS'nin en büyük avantajı, yüksek mukavemetli, iç kusurlardan ve metal içindeki kalıntı gerilmelerden büyük oranda arınmış parçalar üretilmesidir. Ancak bazı

1. GİRİŞ

dezavantajları yüksek maliyetleri ve yüksek enerji gereksinimleridir (Sürmen 2019; Özer 2020).

1.5.3. Lazer mikro sinterleme (LMS)

Yakın zamana kadar ticari SLS üniteleri ile 100 μm 'den küçük mikro parçaların üretimi mümkün değilken, Laser Institut Mittelsachsen e.V tarafından geliştirilen SLS'nin yeni bir modifikasyonu ile birlikte, yüksek çözünürlüklü ($<30 \mu\text{m}$) ve minimum pürüzlülüğe ($R_a=1,5 \mu\text{m}$) sahip parçaların üretimi gerçekleştirilebilmiştir (Petsch et al. 2004; Regenfuss et al. 2004, 2007). 1 μm kalınlığında sinterlenmiş katmanlardan oluşan adımlarla düşük ergime noktalı metallerin yanı sıra refrakter tozlardan takımlar için mikro aletler veya mikro bileşenlerin üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Geleneksel proseslerin toz partikül boyutu 30 ile 45 μm arasındadır. LMS prosesinde ise 5 μm veya daha küçük boyuttaki partiküller kullanılabilir. Bu küçük partiküller, 30 μm eşit veya daha küçük bir lazer nokta çapı (lazer ışınının malzemeye çarptığı andaki boyutu) ile birlikte küçük baskıların alınmasına olanak sağlar. LMS yöntemi, tıp, mücevherat ve saat, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde Şekil 1.8'deki gibi çok küçük boyutta parçaların üretilmesinde kullanılabilir bir yöntemdir (Marsh 2023).



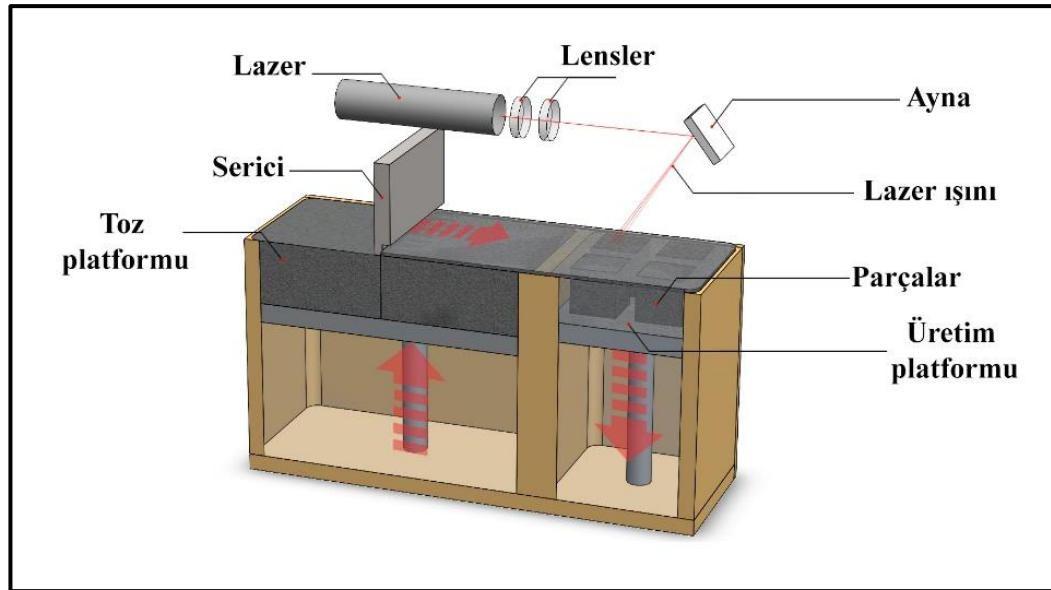
Şekil 1.8. LMS yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen parçalar (Marsh 2023)

1.5.4. Seçici lazer ergitme (SLE)

SLE yüksek güçte bir lazer ışını kullanarak metal veya seramik tozların ince katmanlarını ergiterek birleştirebilen ve karmaşık parçaların üretilmesini sağlayan bir eklemeli imalat yöntemidir. Yöntemde kullanılan toz parçacıklarının boyutu genellikle

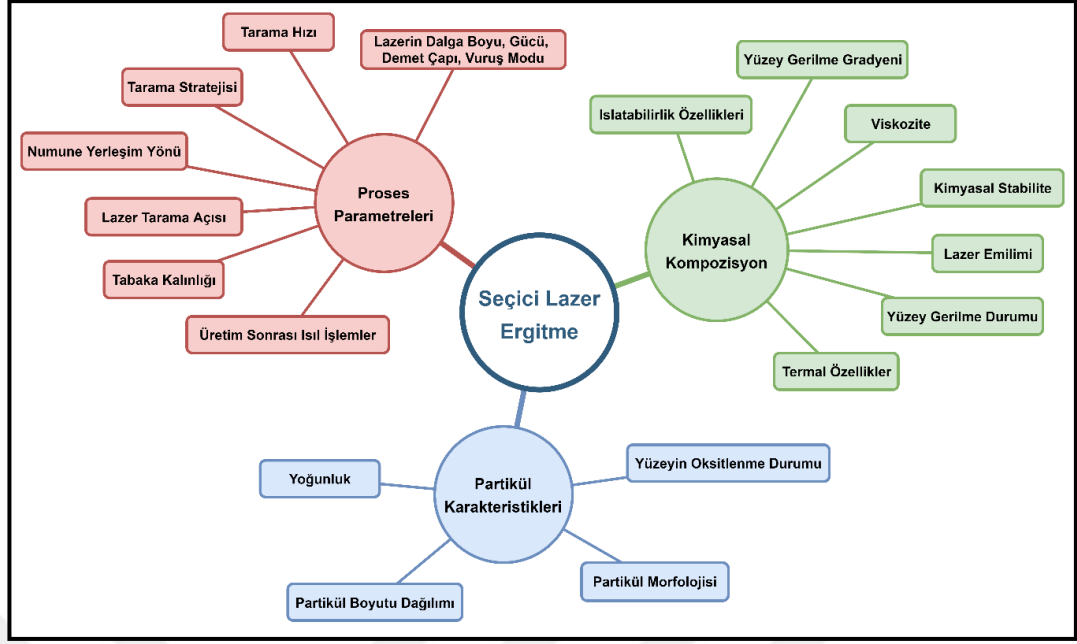
30-200 μm arasındadır (Gu et al. 2012). Bu yöntemde lazerin sağlamış olduğu termal enerji katı formdaki toz malzemenin tamamını ergiterek sıvıya çevirmekte ve ardından ise eriyen metal hızla katılaşmaktadır. Bu durumda toz parçacıkları yoğun bir şekilde birleşmektedir. SLE ile ilgili sorunlardan biri, ergime ve hızlı katılaşma işlemleri sonrasındaki malzemedeki yüksek termal değişimlerden kaynaklanan kalıntı gerilmelerdir. Bu kalıntı gerilmeler parçanın bozulmasına neden olmaktadır. Ancak malzemeye ön ısıtılma yapılması ve hazne içindeki sıcaklığın sabit yüksek bir seviyede tutulması kalıntı gerilmeyi en aza indirmektedir (Mercelis and Kruth 2006). Ayrıca üretim sonrası uygulanan ikincil işlemler (ısıl ve yüzey işlemleri), mikroyapı homojenizasyonunu, kalıntı gerilmelerin azaltılmasını ve üretimi tamamlanan parçaların yüzey kalitesinin iyileştirilmesini sağlamaktadır (Mezzetta 2017). Sunduğu bu avantajlar nedeniyle SLE yöntemi eklemeli imalat için yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir.

SLE yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.9'da sunulmuştur. Sürecin ilk adımı, motor kontrollü pistonun üzerinde duran metal bir plaka (üretim platformu) üzerine ince bir toz tabakasının serilmesiyle başlamaktadır. Toz malzemesi ile üretim platformunun yapıldığı malzemenin aynı olması önemli bir husustur. Bu sayede üretimi gerçekleştirilen parça platforma daha iyi tutunur ve imalat süresi boyunca sabit kalır. Plaka ince toz tabakasıyla kaplandıktan sonra bir dizi ayna, lazer ışını toz yatağının eritileceği bölgeye yönlendirir. Lazer ışını, tozun ilgili bölgesinin tamamen erimesini sağlar ve yeni toz tabakası serilmeden önce eritilen bölge hızlı bir şekilde katılaşır. Her bir katmandan sonra tarama yönü değişir, böylece kısa bir sürede meydana gelen erime-soğuma sorunlarının ilerlemesi önlenmektedir. Erime işlemi tamamlandıktan sonra plaka katman kalınlığı kadar aşağı indirilmektedir. Daha sonra katılaşmış olan tabaka üzerine ince toz tabakası serilerek işlem adımları tekrarlanır ve üç boyutlu bir parça elde edilir. Üretim sırasında meydana gelebilecek oksidasyonu önlemek amacıyla tüm üretim süreci argon (Ar) ve azot (N_2) gibi koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilir (Mezzetta 2017).



Şekil 1.9. SLE yöntemine ait şematik gösterim

SLE yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisi olup, kullanımı birçok endüstriyel alanda yaygınlaşmaktadır (Yan et al. 2014; Thompson et al. 2015; Guo et al. 2017b). Yöntem, nihai ürüne yakın geometrilerin sağlanması, ürün geliştirme süreçlerinde farklı tasarımların hızlı üretilmesi ve atık malzeme miktarının azaltılması bakımından çevre dostu bir yaklaşımdır (Levy et al. 2003; Ahn 2011; ElMaraghy et al. 2013; Ituarte et al. 2015; Piili et al. 2015; Ford and Despeisse 2016). SLE yöntemi ile oluşturulan nihai ürüne ait kimyasal, morfolojik ve mikroyapısal özelliklerin değişimine neden olan etkenler Şekil 1.10'da verilmiştir. SLE yönteminde temel proses parametreleri olarak bilinen lazer gücü, lazer tarama hızı, katman kalınlığı ve iki eriyik havuzu arasındaki bindirme mesafesinin (yana kayma mesafesi) değişimi ile kontrol edilen lazer enerji yoğunluğu ve bu enerjinin eriyikten uzaklaştırılma hızı, üretilen parçaların yapısal ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir (Thijs et al. 2010). Dolayısı ile istenilen mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için söz konusu lazer üretim parametre/stratejilerinin optimize edilmesi ve en uygun proses şartların belirlenmesi son derece önemlidir.



Şekil 1.10. Seçici lazer ergitme prosesini etkileyen parametreler (Rombouts 2006; Hacısalihoğlu 2020).

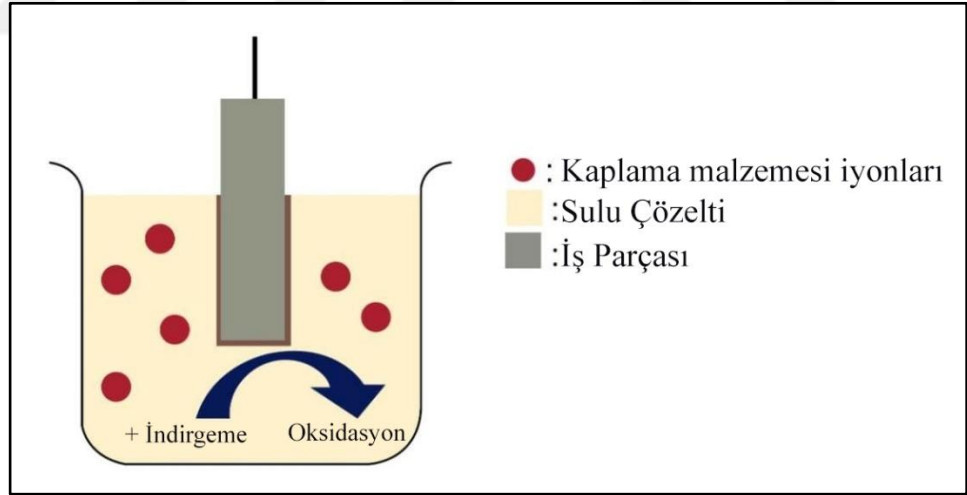
1.6. Akımsız Kaplama Prosesi

Akımsız kaplama, bir indirgeyici madde içeren sulu bir çözeltiden metalik bir iyonun katalitik indirgenmesine ve daha sonra metalin elektrik enerjisi kullanılmadan biriktirilmesine dayanan bir kimyasal indirgeme işlemidir (Balaraju et al. 2003). Bu işlem, dışarıdan elektrik gücü kullanmadan sulu bir çözeltide eşzamanlı olarak meydana gelen birkaç reaksiyonu içerir. Reaksiyon, genellikle sodyum hipofosfit gibi bir indirgeme ajanı tarafından serbest bırakılan hidrojenin oksitlenmesi ve parçanın yüzeyinde negatif bir yük üretmesiyle gerçekleşir (Loto 2016). Bu yöntem kullanılarak kaplanabilen çeşitli metaller arasında, elektrolitik nikel, mükemmel korozyon ve aşınma direncine sahip kaplamalar üretme konusunda üstünlüğünü kanıtlamıştır (Gavrılov 1979; Riedel 1991). Akımsız Ni kaplamalar otomotiv, elektronik ve havacılık gibi güvenilir ve uzun ömürlü bileşenlerin gerekli olduğu çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Güler 2023).

Akımsız Ni kaplama sürecinde, nikel metal iyonlarının indirgenmesi ve çökmesi için gereken itici güç, çözelti içerisindeki kimyasal indirgeme ajanı tarafından sağlanır. Bu itici potansiyel, metal iyonları ve indirgeme ajanlarının homojen bir şekilde karışmasını sağlamak için yeterli ajitasyon olması durumunda bileşenin yüzeyinin her

1. GİRİŞ

noktasında neredeyse sabittir. Bu nedenle, akımsız kaplamalar, parçanın şekli ve boyutu ne olursa olsun kalınlık bakımından oldukça homojendir. Sürecin yaygın kullanımını sağlayan temel özelliklerinden biri, valfler, derin boşluklar, delikler, iç yüzeyler ve dişli parçalar gibi zor yerlerde bile homojen kaplama sağlayabilmesidir. Diğer özellikleri arasında mükemmel korozyon direnci, aşınma ve aşındırma direnci, şekil verme kabiliyeti, yağlayıcılık, lehimlenebilirlik, elektriksel iletkenlik ve sertlik yer almaktadır. Yüksek korozyon direnci ve sertliği sayesinde, bu kaplama yöntemi, özellikle petrol sahaları ve deniz sektörlerinde zorlu hizmet koşullarına maruz kalan valfler ve pompa parçaları gibi bileşenlerin ömrünü uzatmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer tipik kullanımları arasında havacılık donanımları, otomotiv parçaları, gıda işleme ekipmanları, akışkan gücü bileşenleri, tekstil makineleri, hidrolikler, plastik kalıplar, elektronik bileşenler, kimyasal işleme ekipmanları ve baskılı devre kartları bulunmaktadır. Eloksal nikel alaşımının homojenliği, yapısı, metalurjik bileşimi ve düşük gözenekliliği, çoğu organik sıvıya, zayıf asitlere ve halojenlere, kuru amonyak gazına, nötr veya alkali sulu tuz çözeltilerine, hidrokarbonlara ve ketonlara karşı mükemmel korozyon direncine katkıda bulunduğu bilinmektedir (Loto 2016).

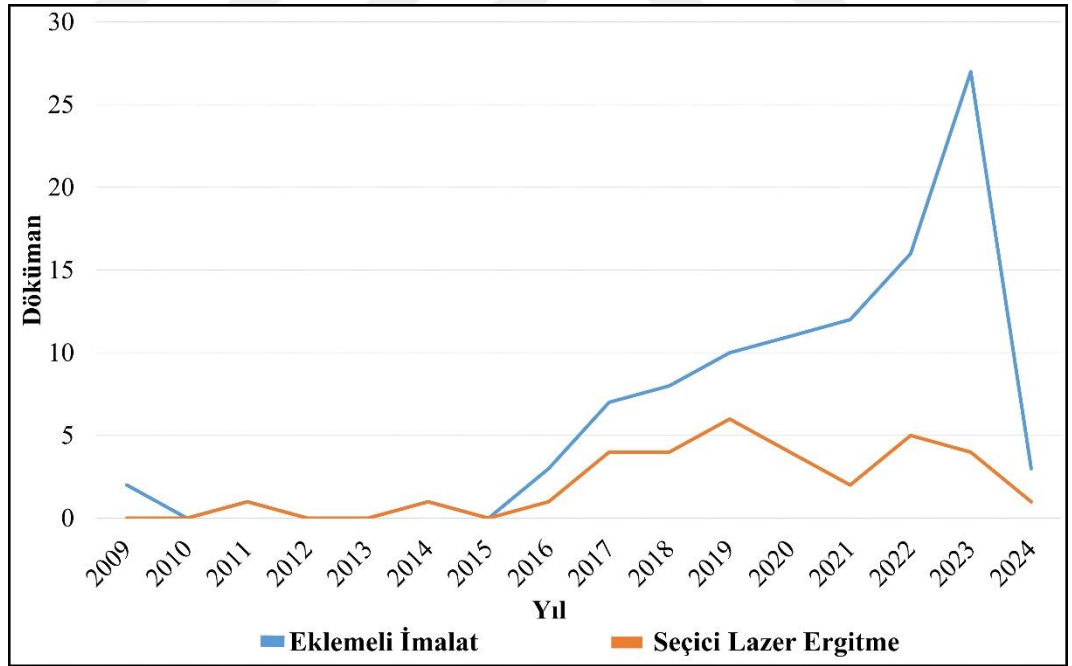


Şekil 1.11. Akımsız kaplamanın şematik gösterimi (Maus 2024)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Eklemeli İmalat ile WC Esaslı Malzemelerin Üretimine ait Bibliyometrik Analiz

Bu tez çalışmasında literatür incelemesi yapılmadan önce, çalışma konusunun dünya genelindeki potansiyelini ve genel perspektifini ortaya koymak amacıyla bir bibliyometrik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, farklı oranlarda bağlayıcı eklenmiş WC malzemenin eklemeli imalatı ve özellikle SLE yöntemiyle üretilebilirliği konusunda dünya genelinde yapılan çalışmaların sayısı Şekil 2.1’de sunulmuştur. Grafiğin arama dizesinde anahtar kelime olarak "additive manufacturing", "tungsten carbide", ifadeleri kullanılmış ve 2009-2024 tarih aralığında 197 çalışma Scopus veri tabanından elde edilmiştir. Bu arama dizesinde "selective laser melting" ibaresi eklendiğinde 50 adet doküman elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 2.1’de sunulmuş olup, WC malzemeyle ilişkili eklemeli imalat/SLE alanındaki çalışmalar, makale, inceleme (review), kitap, bildiri, konferans vb. gibi çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

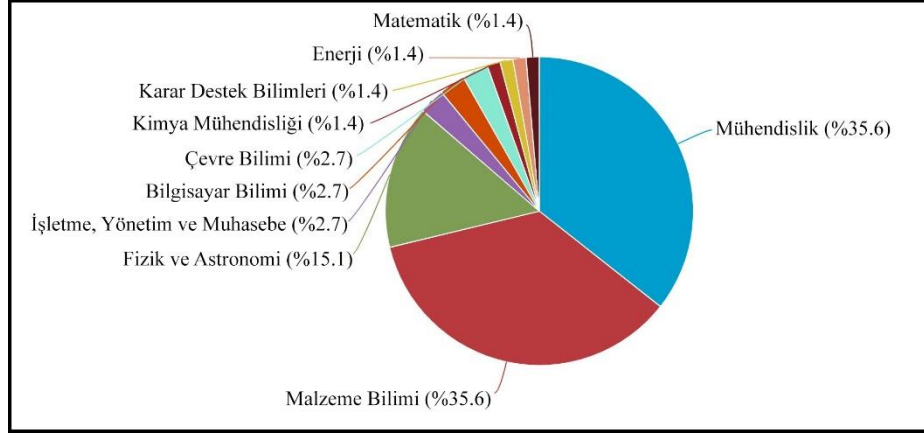


Şekil 2.1. WC esaslı malzemelerin eklemeli imalatı hakkında yapılan bilimsel çalışmaların yıllara göre doküman sayısı (Veriler 2009-2024 aralığında Scopus veri tabanından alınmıştır).

Çizelge 2.1. WC malzemenin eklemeli imalat ve SLE ile üretimine ait bilimsel çalışma verileri.

Eklemeli İmalat	Tanım	Sonuç	SLE	Tanım	Sonuç
	Yıl	2009:2024		Yıl	2010:2024
	Doküman	197		Doküman	50
	Makale	92		Makale	34
	Kitap bölümü	5		Kitap bölümü	-
	Konferans/Bildiri	47		Konferans/Bildiri	14
	Konferans Review	45		Konferans Review	-
	İnceleme/Review	5		İnceleme/Review	2
	İngilizce	194		İngilizce	47
	Çince	3		Çince	2
	-	-		Rusça	1

Şekil 2.1’de eklemeli imalat ile WC malzemenin üretilebilirliğine dair çalışmaların 2015 yılı itibariyle yoğunlaşmaya başladığı ve günümüze kadar bir ivmelenmenin olduğu görülmektedir. Ancak SLE ile bu malzeme grubunun üretimi hakkındaki çalışmalar 2015-2024 yılları aralığında stabil bir durum sergilememektedir. Bu malzeme grubunun üretilebilirliği/işlenebilirliği oldukça zor olduğundan bugüne kadarki çalışmalar için çoğunlukla toz metalürjisi yöntemi tercih edilmiştir. Bilindiği gibi bu üretim yönteminin avantajları olduğu gibi birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemiyle metal tozlarının işlenmesi 2010 yılından itibaren yoğunlaşmıştır. Birçok malzeme grubu için özellikle tekil imalata olanak tanınması ve kalıp ihtiyacının olmaması eklemeli imalatın en büyük avantajlarındandır. Dolayısıyla yeni bir alternatif üretim yöntemi olan eklemeli imalat ile bu malzeme grubu üzerine yapılması gereken birçok çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Günümüzde eklemeli imalat yöntemlerinden en çok tercih edilen SLE yöntemi de bu malzeme gruplarının üretilebilirliğine imkân tanımaktadır. Ancak verilerden de anlaşıldığı üzere SLE yönteminde de çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Dolayısıyla SLE ile WC esaslı malzemelerin üretimi üzerine araştırmacıların ilgisinin olduğu ancak yeterli düzeyde olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum tez konusunun özgünlüğünü destekler niteliktedir. Şekil 2.2’de ise çalışma alanlarına göre yüzdelik dağılım sunulmuştur. Şekilde %35,6 mühendislik, %35,6 malzeme bilimi ve kalan bölümün ise diğer bilim alanlarına dağıldığı görülmektedir.



Şekil 2.2. Çalışma alanlarına göre dağılım

2.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen literatür incelemesi, akımsız Ni kaplama prosesleri, WC malzemenin eklemeli imalatı ve WC malzeme için kullanılan bağlayıcılar gibi özel konulara odaklanarak, bu alanlardaki mevcut bilgi birikimini derinlemesine analiz etmiştir. Bu değerlendirme, ilgili literatürdeki güncel araştırmaları özetleyerek, bahsi geçen konuların temel prensiplerini anlamak ve bu alandaki bilgi boşluklarını belirleyerek gelecekteki araştırmalara ışık tutmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Akımsız kaplama, sulu bir çözelti içinde bir indirgeyici madde kullanılarak bir metal iyonunun katalitik olarak indirgenmesi ve daha sonra elektrik enerjisi kullanılmadan metalin biriktirilmesi işlemidir (Balaraju et al. 2003). Akımsız Ni kaplamalar otomotiv, elektronik ve havacılık gibi güvenilir ve uzun ömürlü bileşenlerin gerekli olduğu çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Güler 2023). WC tozlarını bir arada tutmak, işlenebilirliklerini artırmak ve nihai ürünlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli bağlayıcı yöntemleri kullanılmaktadır. WC ve bağlayıcı karışım homojenliği, malzemenin performansında çok önemli bir rol oynamaktadır. WC/Co ve WC/Ni kompozit tozları gibi tozların hazırlanmasında, akımsız kaplama yöntemi ile metal kaplamanın eşit dağılımını sağlamak mümkündür (Liu et al. 2006). Bu nedenle birçok bilim insanı WC tozlarının akımsız kaplanması üzerine kapsamlı araştırmalar yürütmüştür (Liu et al. 2006; Luo et al. 2011; Jafari et al. 2014; Guo et al. 2017a; Jiang et al. 2023).

Liu et al. (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, WC tozu üzerine Co filmi kaplamak için yeni geliştirilen akımsız kaplama işlemi tartışılmıştır. Ayrıca CO₂ lazeri kullanılarak çelik numunelerin yüzeyine kompozit WC-Co tozunun kaplanması da gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış katmanın mikroyapısı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Çalışma parametrelerinin WC-Co kaplama üzerindeki etkileri araştırılmış ve aşınma direnci, ticari WC-Co toz kaplama ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen yeni kompozit WC-Co toz kaplamanın ince taneli bir mikroyapıya ve iyi aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Jafari et al. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, yeni bir elektroforetik nikel kaplı nano yapıda WC-Co tozunun sinterleme aşamasında nanoboyutlu WC'nin mikroyapısal evrimi araştırılmıştır. Ticari mikro kristalin WC-Co'nun mekanik öğütülmesi ile nano yapıda WC-Co tozu elde edilmiş ve ardından elektroforetik nikel kaplama ile kaplanmıştır. Mikroyapısal karakterizasyonlar, X-Işını Difraktometresi (XRD), yüksek çözünürlüklü alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopisi (HR FESEM) ve Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskopisi (HRTEM) kullanılarak yapılmıştır. Bilye öğütme işlemi, ~15 nm ortalama tane boyutuna sahip nano boyutlu WC içeren nc-WC tozu ve belirli bir kalınlıkta homojen bir nikel tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Luo et al. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geleneksel aktivasyon adımları atlanarak oda sıcaklığında ultrason destekli akımsız kaplama kullanılarak homojen bir şekilde Ni kaplanmış WC kompozit tozlar sentezlenmiştir. Bu çalışma, nikel tabakalarının büyüme mekanizmasını ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Bu mekanizma, önceden işlenmiş WC tozlarının yüzeylerinde bulunan basamak benzeri kusurların aktive edilmiş bölgeler olarak hareket etmesini, bu aktive edilmiş bölgelerde çekirdeklenmesini, Ni tanelerinin büyümesinin gerçekleşmesini ve sürekli bir şekilde Ni hücrelerinin oluşumunu içermektedir. Bu yöntem ile geleneksel sensitizasyon ve aktivasyon adımlarına ihtiyaç duymadan, oda sıcaklığında homojen bir şekilde Ni kaplanmış WC kompozit tozlar elde etmeyi başarmışlardır.

Guo et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada akımsız kaplama yöntemi ile ultra-ince WC/Co kompozit tozların hazırlanması, akımsız kaplama koşullarının

kompozitler üzerindeki etkileri ve ağırlık kazanımı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Kaplama koşullarının, WC partikülleri üzerindeki Co kaplama tabakasını etkilediği gözlemlenmiştir. $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ içeriğinin artışı, ağırlık kazanımında ve kaplama hızında artışa neden olduğu, ancak belirli bir seviyeden sonra artan içeriklerde ağırlık kazanımının azaldığı tespit edilmiştir. Belirlenen optimum akımsız kaplama koşulları altında, Co kaplı WC kompozit tozlarının ağırlık kazanımı 185,1 mg/g'ye ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Literatürde WC malzemenin lazer eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretildiği ve karakterize edildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan bu çalışmalar genel olarak farklı oranlarda Co'nun bağlayıcı olarak kullanıldığı WC-Co bileşimindeki malzemelerin üretimini içermektedir. Aşağıda konu ile ilgili literatür çalışmalarından bir özet sunulmuştur.

Kumar (2009) tarafından yapılan bir çalışmada enjeksiyon kalıp parçaları WC-12Co ve WC-9Co tozlarına farklı oranlarda bakır ve kalay ilavesi ile Seçici Lazer Sinterleme (SLS) tekniği kullanılarak üretilmiştir. İki farklı lazer gücü ve katman kalınlığında gerçekleştirilen üretimler ile parçaların fretting aşınma davranışı incelenmiştir. Numunelerin oldukça yüksek gözenekliliğe sahip olduğu ve %96'lık bir nihai bağıl yoğunluğa ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Liu et al. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, WC-20Co tozunun SLE prosesi sonrası numunelerdeki mikroyapısal değişim incelenmiştir. SLE işleminin WC-20Co kompozitlerinin mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel ve analitik yöntemler kullanılmıştır. İşlem sırasında değişen parametreler, özellikle lazer gücü, tarama hızı ve tarama stratejisi gibi faktörler, WC-20Co kompozitlerin mikroyapısını etkileyerek malzemenin yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olmuştur. WC-Co karbürlerin SLE sürecinde, lazer enerji yoğunluğu arttıkça sıvı faz sinterleme havuzunun tepe sinterleme sıcaklığının arttığı ve bu durumun önemli oranda WC tane büyümesine yol açtığı belirlenmiştir. WC-Co malzemenin SLE süreci sırasında yeniden ergitme bölgelerinden etkilendiği ve bu bölgelerin varlığının, bazı WC tanelerinin normalden daha büyük boyutlarda oluşmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu durumun SLE süreci sırasında WC tane büyümesinde dengesizliğe yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Liu et al. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı Co içeriklerine (ağırlıkça %12-32) sahip WC-Co malzemeler, yoğunluk, mikroyapı ve mekanik özellikler açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yoğunluğun, SLE süreci sırasında Co içeriğinin artmasıyla iyileştiği gözlemlenmiştir. SLE işlemiyle hazırlanan WC-12Co'nun, WC-20Co ve WC-32Co'ya kıyasla daha büyük ortalama tane boyutuna sahip olduğu görülmüştür. Mikroyapı karakterizasyonu, sonlu eleman simülasyonu ile birleştirildiğinde, WC tane büyüme mekanizmalarının SLE süreci sırasında WC'nin aglomerasyonu, çözünme-çökelme olduğu ve özellikle %12 gibi düşük Co içeriğine sahip WC-Co malzeme için WC'nin aglomerasyonunun önemli bir mekanizma olduğu sonucuna varılmıştır. Karbürlerin yatay (lazer ışınına dik) ve dikey (lazer ışınına paralel) kesitlerinin karşılaştırılması, SLE sürecinin WC-12Co, WC-20Co ve WC-32Co için belirli bir derecede mikroyapı ve mekanik davranış anizotropisi oluşturduğu tespit edilmiştir.

Uhlmann et al. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, WC toz malzemenin SLE yöntemi ile üretilmesi sırasında yüksek yoğunluk elde edilebilmesi için çeşitli lazer parametreleri araştırılmıştır. Daha yüksek yoğunlukların termal çatlamaya yol açtığı, düşük yoğunlukların ise WC-Co numunelerinde gözenekliliğe yol açtığı tespit edilmiştir. Ayrıca (Enneti et al. 2018), ağırlıkça %12 Co içeren WC malzeme için benzer bir çalışma gerçekleştirmiş ancak Co bağlayıcının aşırı buharlaşması sorunu oluşmuştur. Sonuç olarak numunede büyük, kontrolsüz ve sütunlu tane büyümesi gözlemlenmiştir.

Ku et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, üretim sonrası işlemeyi azaltmak için WC'nin nihai üretim şekline yakın bir şekilde eklemeli imalatının fizibilitesi gerçekleştirilmiştir. Düşük demir bazlı alaşım bağlayıcı içeriğine sahip küboid WC numuneleri üretilmiş olup, farklı işleme koşullarının malzemenin elde edilen yoğunluğu ve mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Başlangıç partikül boyutu mikron altı olmasına rağmen, SLE ile işlenmiş numunede tane boyutunun birkaç mikrona kadar büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca üretilen numunelere uygulanan HIP işleminin yoğunluk değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Chen et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, WC-20Co toz malzemeden numune üretimi için SLE yöntemi kullanılmıştır. SLE ile üretim sonrası önemli ölçüde yüksek olan %96'nın üzerinde bir bağıl yoğunluk elde edilmiştir. Ancak sonuçlar, SLE kullanılarak üretilen WC-20Co'da hala önemli kusurlar olduğunu göstermiş ve SLE kullanılarak üretilen WC-Co kompozitinin henüz geleneksel sıvı faz sinterleme ile üretilen parçalara eşdeğer kaliteye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

Fortunato et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise SLE yöntemi ile WC-Co toz malzemeden dişli kesme takımının üretimi ve üretimden sonra HIP prosesi ile yoğunluk ve tokluğun artırılması hedeflenmiştir. Üretimde toz boyutu ve kimyasal bileşiminin SLE sürecine etkisi hem bileşenin kendisi hem de destekleyici yapılar için incelenmiştir. Ayrıca farklı üretim parametreleri ve tarama stratejileri kullanılarak basit silindirik numuneler üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışmada çoklu tarama stratejisi ile çatlak oluşumu azaltılarak yüksek yoğunluklu bileşenlerin üretilmesi sağlanmıştır.

Co'nun bağlayıcı toz olarak kullanıldığı bu çalışmalar dikkate alındığında, WC toz üzerine herhangi bir kaplama yapılmadan karışım olarak kullanıldığı görülmektedir. Karışım toz yerine WC tozlarının bağlayıcı element ile kaplanması birçok açıdan avantaj sağlamaktadır. WC tozun bağlayıcı ile kaplanarak kullanılması durumunda yüksek bir bağlayıcı dağılımı homojenliği elde edilmekte ve tozun akıcılığı bozulmamaktadır. Kaplanmış tozların geleneksel toz metalürjisi yöntemi ile üretimini ele alan çok sayıda çalışma yapılmıştır (Fernandes et al. 2004, 2008; Hirschberg et al. 2019). Ancak WC toz malzemenin metalik bağlayıcı ile kaplanarak SLE ile üretimini ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Cavaleiro et al. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, WC-metal kompozit tozları hazırlamak ve WC yüzeylerinin nanokristalin yapıda bir metalik bağlayıcı malzeme filmi (paslanmaz çelik) ile püskürtme kaplaması yapılarak bir toz yüzey modifikasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Kaplama, WC partiküllerinin termal davranışını ve reolojisini iyileştirmiş ve aynı zamanda bağlayıcının homojen dağılımını sağlamıştır. Eklemeli imalat esnasında, paslanmaz çelik kaplama sıvı bir bağlayıcı olarak çalışmış ve WC tozlarının sinterlenmesini desteklemiştir. Üretim sırasında, WC'den gelen karbonun bir kısmı kaplamaya ve kaplama çeliğinin bazı elementleri de WC partikülüne yayılarak

M₆C fazlarının oluşumuna yol açmıştır. Buharlaşmaya bağlı bazı bağlayıcı kayıplarına rağmen (ağırlıkça %3), bir eklemeli imalat tekniği ile nanokristalin paslanmaz çelik bağlayıcı tarafından modifiye edilmiş WC toz malzemeden üretimin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur.

Li et al. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, SLE tekniği kullanılarak WC-W₂C-8.3 wt% Ni bazlı malzemenin üretimi ve mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada toz malzeme olarak Ni ile kaplanmış ötektik WC-W₂C malzeme kullanılmış olup SLE ile üretimler tek enerji yoğunluğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada blok şeklinde standart test numuneleri üretilmiş ve SLE yöntemindeki temel lazer üretim parametrelerinin mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri irdelenmemiştir.

Davydova et al. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, yaklaşık 2 µm Co bazlı katmanlarla çevrelenmiş 5–35 µm bor karbür (B₄C) toz parçacıkları kullanılarak SLE ile üç boyutlu sermet parçaların imalatının fizibilitesi araştırılmıştır. Üretilen parçanın mikroyapısı, bileşimi, gözenekliliği, basınç dayanımı ve mikro sertliği araştırılmıştır. Co bazlı matris içine gömülü 2900-3200 HV sertliğe sahip B₄C taneleri içeren oldukça gözenekli (%37) bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca SLE sırasında B₄C'nin kobalt bazlı matris ile etkileşimi sonucu yeni fazların oluştuğu da tespit edilmiştir.

Domashenkov et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, geleneksel ve nanokompozit WC/Co₁₂ tozlarından SLE yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri, aynı parametre seti ile üretildikten sonra karşılaştırılmıştır. XRD analizi, WC/Co karışımında ve SLE sonrasında mevcut olan mikroyapıda ve kristal fazlarda önemli değişiklikler olduğunu göstermiş olup, WC'nin termal ayrışması, W₂C fazının oluşumuna ve karmaşık Co-W-C üçlü fazının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Nanokompozit tozdan üretilen numunelerin mikrosertliği, geleneksel tozdan elde edilen numuneyle karşılaştırıldığında bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.

Khmyrov et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemiyle metal matrisli kompozit WC-Co üretimi incelenmiştir. Mikron boyutlarında olan Co tozu, düzlem hareketli bir bilyeli değirmen kullanılarak WC nanoparçacıkları ile karıştırılmış

ve homojen kompozit bir toz haline getirilmiştir. Sinterlenmiş WC-Co alt tabakaları üzerine bu kompozit tozdan farklı parametrelerde tek sıra toz tanecikleri ergitilmiş ve katmanlar elde edilmiştir. Elde edilen katmanların alt tabakaya oldukça iyi bir yapışma sergilediği ve çatlakların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Lazer tarama hızını arttırılmasıyla birlikte, mikroyapının iyileştirilmesi ve balling etkisinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca katmanların yüzey pürüzlülüğünün işlem parametreleri ile etkin bir şekilde kontrol edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Gu and Meiners (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, WC/Ni₂W₄C(M₆C) bazlı sert bileşenlerin üretilmesi için W-Ni-grafit toz karışımından SLE yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiştir. WC fazı, çok katmanlı bir büyüme mekanizması ile geliştirilerek doğrusal enerji yoğunluğunun azaltılması üzerine morfolojik değişimler incelenmiştir. Üretim sırasında M₆C fazı miktarı artmış olup, daha düşük lazer enerjisi kullanımında mikroyapının granüler formdan halka şekline dönüştüğü gözlenmiştir. SLE ile üretilen karbür esaslı malzemenin, %96,3'lük yüksek bir bağıl yoğunluk seviyesine ve 1870,9 HV_{0,1}'lik bir mikrosertliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Grigoriev et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, WC-Co sisteminin metal tozu bileşimlerinin SLE prosesi, nano boyutlu Co tozu kullanılarak incelenmiştir. Toz metalürjisi yöntemleriyle nano ölçekli tozlar kullanılarak ağırlıkça %94 WC ve %6 Co oranına sahip aşınmaya dirençli sermet malzemesi üretilerek SLE yöntemi için hazır hale getirilmiştir. SLE ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin aşınma oranı, geleneksel yöntemle elde edilen numunelerden 1,3 kat daha düşük ve sertliği 2500 HV olarak elde edilmiştir.

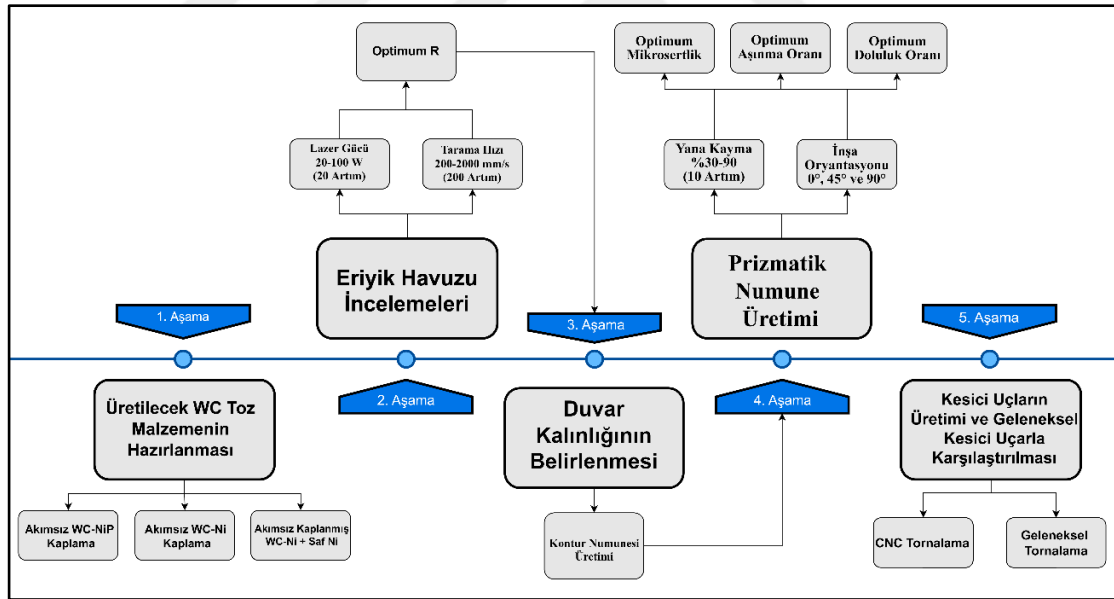
Campanelli et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemi kullanılarak bir WC/Co/Cr kompozit tozun üretimi incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numuneler, yoğunluk, kusurlar, mikroyapı ve sertlik açısından karakterize edilmiştir. SLE ile gerçekleştirilen üretimler 120 µm yana kayma miktarı ve 40 mm/s lazer tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Sabit 100 W lazer gücü ve 30 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. 12,5 J/mm² enerji yoğunluğunda %97,53'e kadar bir bağıl yoğunluk elde edilmiştir. Mikroskopik inceleme sonucunda ise numune yüzeylerinde küçük çatlakların olduğu ve tane boyutunun heterojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir.

Literatürde WC esaslı malzemelerin lazer eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretildiği ve karakterize edildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmalar genellikle bağlayıcı olarak farklı miktarlarda Co'nun kullanıldığı WC malzemelerin (WC-Co) üretimini içermektedir (Kumar 2009; Uhlmann et al. 2015; Enneti et al. 2018; Chen et al. 2019; Fortunato et al. 2019; Ku et al. 2019). Co'nun bağlayıcı toz olarak kullanıldığı bu çalışmalara bakıldığında WC tozunun üzerine herhangi bir kaplama yapılmadan karışım halinde kullanıldığı görülmektedir. WC tozlarının karışım toz yerine bağlayıcı bir elemanla kaplanması birçok açıdan avantaj sağlamaktadır. WC tozunun bağlayıcı ile kaplanarak kullanılması durumunda yüksek düzeyde bağlayıcı dağılımı homojenliği elde edildiği ve toz akışkanlığının iyileştiği görülmüştür. Geleneksel toz metalürjisi yöntemi kullanılarak kaplanmış tozların üretimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Fernandes et al. 2004, 2008; Hirschberg et al. 2019). Ayrıca literatürde WC toz malzemenin SLE ile metalik bir bağlayıcı ile kaplanarak üretilmesini konu alan çalışmalar da mevcut olup (Gu and Meiners 2010; Davydova et al. 2016; Domashenkov et al. 2017; Khmyrov et al. 2017a; Cavaleiro et al. 2018; Campanelli et al. 2019; Grigoriev et al. 2019), Ni bağlayıcı ile SLE yöntemi kullanılarak üretilen WC ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu gözlemlenmiştir (Li et al. 2018; Tan et al. 2022).

Bu tez çalışmasında, literatürde oldukça sınırlı olan seçici lazer ergitme ile Ni bağlayıcılı WC kesici takımların üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, üretilen karbür esaslı kesici takımların yapısal, mekanik, tribolojik özelliklerinin karakterizasyonu, gerçek kesme koşulları altında talaşlı imalat performanslarının belirlenmesi ve geleneksel yöntemle üretilen ticari WC kesici takımlar ile takım ömrü açısından bir karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, araştırmanın her aşaması belirli bir sıra ile uygulanmıştır. İlk olarak, üretimde kullanılacak toz malzemeler hazırlanmıştır. Ardından parametre belirlenmesi için WC levhaya lazer vuruşları yapılmıştır. Daha sonra hazırlanan toz malzemelerden kontur üretimleri yapılarak duvar kalınlıkları belirlenmiştir. Duvar kalınlığı belirlendikten sonra farklı yana kaymalarda prizmatik numuneler üretilerek yapısal, tribolojik testler uygulanmış ve optimum yana kayma (yk) değerleri belirlenmiştir. Optimum yk değeri kullanılarak farklı inşa oryantasyonlarında numuneler üretilmiş ve optimum inşa oryantasyonu belirlenmiştir. Daha sonra kesici uçlar üretilerek tornalama işlemleri yapılmış ve geleneksel olarak üretilen ticari kesici uçlarla performansları karşılaştırılmıştır. Bu süreçlerin bütüncül olarak anlaşılması için çalışma adımları bir akış diyagramı ile görselleştirilmiştir. Şekil 3.1’de diyagramda çalışmada izlenen temel adımlar ve bu adımların ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 3.1. Çalışmaya ait akış şeması

3.1. WC Toz Malzemenin Akımsız Ni Kaplama Prosesi ile Kaplanması

Tez çalışması kapsamında WC tozlarına Ni-P ve Ni olmak üzere iki farklı akımsız kaplama işlemi uygulanmıştır. Her bir kaplama prosesine ait detaylar alt başlıklarda sunulmuştur.

3.1.1. Akımsız Ni-P kaplama

WC tozlarının akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Ni-P ile kaplanması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında yapılmıştır. Holleck tarafından yapılan bir patent çalışmasında karbür malzemelerde ağırlıkça %12-15 Ni oranının yüksek aşınma ve korozyon direnci sağladığı ifade edilmiştir (Holleck et al. 1984). Tez çalışmasında Ni-P kaplama kalınlığının 1 µm olarak uygulanması öngörülmüştür. Ortalama toz boyutu yaklaşık 25-30 µm aralığında olan WC tozları üzerine 1 µm Ni-P kaplanması durumunda ağırlıkça Ni oranı %12,8 olmakta ve literatürde ifade edilen optimum oran aralığı sağlanmaktadır. Altlık olarak kullanılacak olan WC esaslı tozların düşük elektriksel iletkenliği ve Ni-P parçacıklarının indirgenmesi için yeterli yüzey aktivitesine sahip olmamasından dolayı, tozlar akımsız kaplamadan önce aktivasyona tabi tutulmuştur (Palaniappa et al. 2007). Aktivasyon işlemi, WC parçacıklarının bir sinterleme fırınında 380 °C'de, ortam atmosferinde 1 saat ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ön işlemden (aktivasyon) sonra, WC tozları akımsız nikel kaplama banyosuna alınmıştır. Nikel kaplama işlemi, 30 g/l nikel sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 35 g/l sodyum hipofosfit ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 20 g/l sodyum sitrat ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$) ve 20 g/l amonyum sülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) çözeltisi içerisine 5 g/l oranında WC tozlarının eklenmesi ile karıştırma işlemi uygulayarak, pH=10 değerinde ve 90 °C'de manyetik karıştırıcı bir sıcak plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. pH ayarlama işlemi seyreltik NH_3 (amonyak) damlatılarak yapılmıştır. Burada, nikel sülfat metal Ni iyonlarının kaynağı olarak davranırken, sodyum hipofosfit Ni indirgeyici ajan olarak görev almıştır. Sodyum sitrat bir kompleks oluşturucu ajan olarak kullanılırken, amonyum sülfat kaplama işlemi sırasında kaplama çözeltisinin pH'ını kontrol etmek için dengeleyici görevi görmüştür. Kaplama işlemlerinde kullanılan kimyasalların tümü analitik reaktif derecesinde olup, kaplama süresi 30 dk olarak ayarlanmıştır. Akımsız kaplamadan sonra Ni kaplanmış WC tozları çözeltiden filtre kâğıdı yardımıyla süzülerek birkaç kez damıtılmış su ile iyice yıkanarak ve son yıkama etil alkol ile yapılarak, tozlar saat 90 °C'de bir etüvde kurutulmuştur. Elde edilen Ni kaplanmış WC tozlarının kaplama kesiti incelemeleri ve elementel dağılımı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) analizi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemlerinden sonra oluşan faz yapısı, oksit veya diğer istenmeyen fazların oluşup oluşmadığı hakkında bilgi edinmek için XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

3.1.2. Akımsız Ni kaplama

WC tozlarının akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Ni ile kaplanması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında yapılmıştır. Kaplama yapılması istenen WC toz parçacıklarının yüzeyleri 60 ml/l HF, 30ml/l HNO₃ çözeltisi ile temizlenmiş ve ardından aktivasyon işlemine tabi tutulmuştur. Beher içerisine alınan WC parçacıklarının aktivasyon işlemi manyetik karıştırıcılı bir sıcak plaka üzerinde ve ortam atmosferinde Çizelge 3.1’de verilen 2 ve 3 numaralı çözeltiler sırasıyla kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. WC parçacıkların akımsız Ni kaplanması için kullanılan çözelti ve karıştırma süreleri.

	Kullanım Amacı	Kullanılan Çözelti	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)
1	Yüzey temizleme / dağlama	60 ml/l HF, 30ml/l HNO ₃	50	15
2	Aktivasyon	22 gr/l SnCl ₂ , 40ml/l HCl	90	30
3	Aktivasyon	0,5 gr/l PdCl ₂ , 100ml/l HCl	90	30
4	Kaplama	30 g/l Nikel (II) klorür hekza-hidrat (Cl ₂ Ni.6H ₂ O)	90	30
5	İndirgeyici	80 ml/l hidrazin (N ₂ H ₄)	90	30
6	pH düzenleyici	Sodyum Hidroksit (NaOH)	90	30

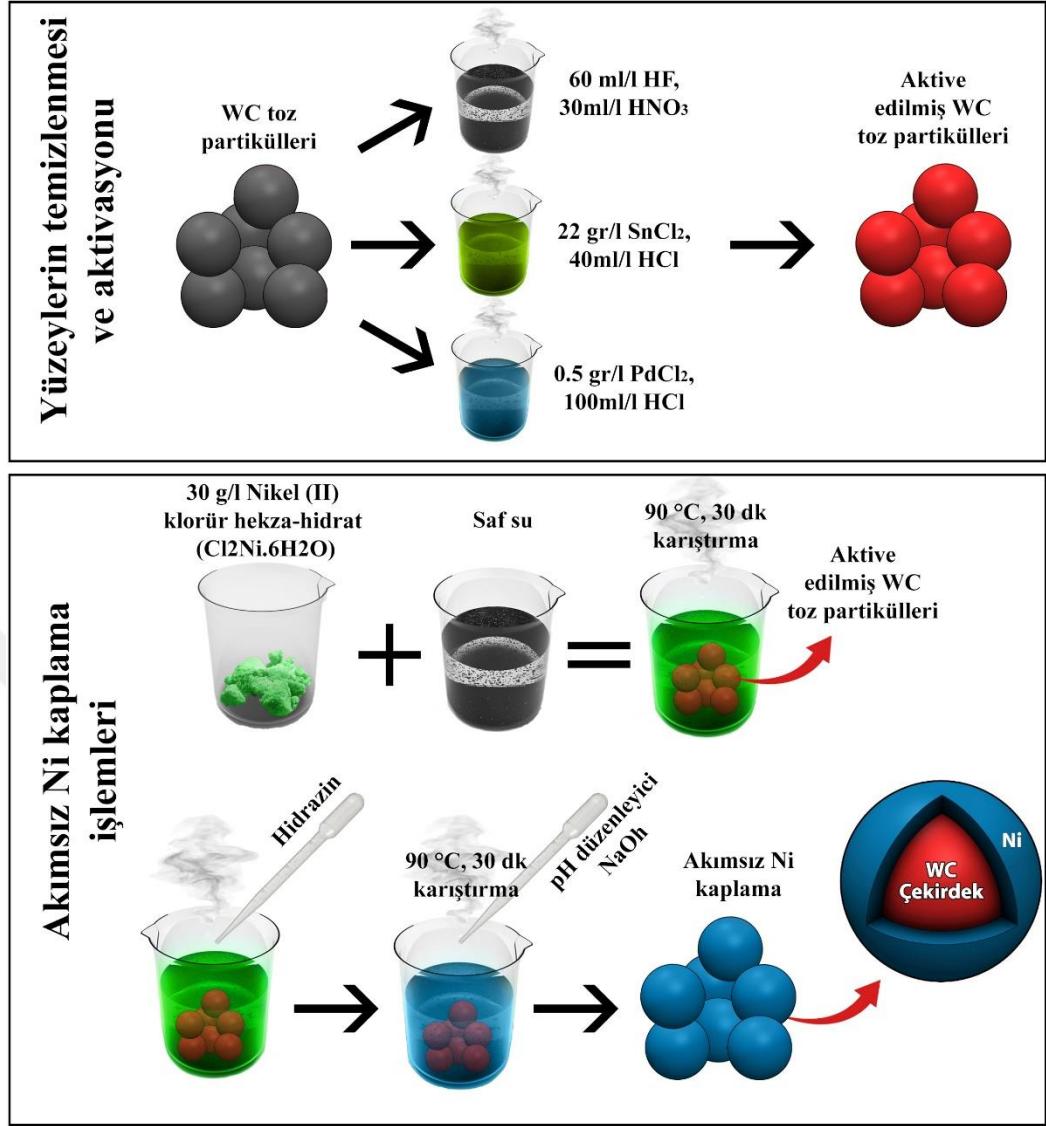
Ön işlem (aktivasyon) sonra, WC tozları akımsız nikel kaplama banyosuna alınmıştır. Nikel kaplama işlemi, 30 g/l nikel (II) klorür hekza-hidrat (Cl₂Ni.6H₂O), 80 ml/l hidrazin (N₂H₄), çözeltisi içerisine 5 g/l oranında WC tozlarının eklenmesi ile karıştırma işlemi uygulanarak, pH=10 değerinde ve 90 °C’de Şekil 3.2’de gösterildiği gibi manyetik karıştırıcılı bir sıcak plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. pH ayarlama işlemi seyreltik NaOH (sodyum hidroksit) damlatılarak yapılmıştır. Burada, nikel (II) klorür hekza-hidrat metal Ni iyonlarının kaynağı olarak davranırken, hidrazin Ni indirgeyici ajan olarak görev almıştır. Hidrazin hidrat bir kompleks oluşturucu ajan olarak

kullanılırken, NaOH kaplama işlemi sırasında kaplama çözeltisinin pH'sini kontrol etmek için dengeleyici görevi görmüştür.



Şekil 3.2. WC toz parçacıklarının akımsız Ni kaplama işlemi

Kaplama işlemlerinde kullanılan kimyasalların tümü analitik reaktif derecesine sahip olup kaplama süresi 30 dk olarak ayarlanmıştır. Akımsız kaplamadan sonra Ni kaplanmış WC tozları çözeltiden filtre kâğıdı yardımıyla süzülerek birkaç kez damıtılmış su ile iyice yıkanarak ve son yıkama etil alkol ile yapılarak, tozlar saat 90 °C'de bir etüvde kurutulmuştur. WC tozlarının Ni kaplama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir. Kaplama kesiti incelemeleri ve elementel dağılım, SEM ve EDS analizi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemlerinden sonra oluşan faz yapısının belirlenmesi için XRD analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. WC tozlarına Ni kaplama işleminin şematik gösterimi

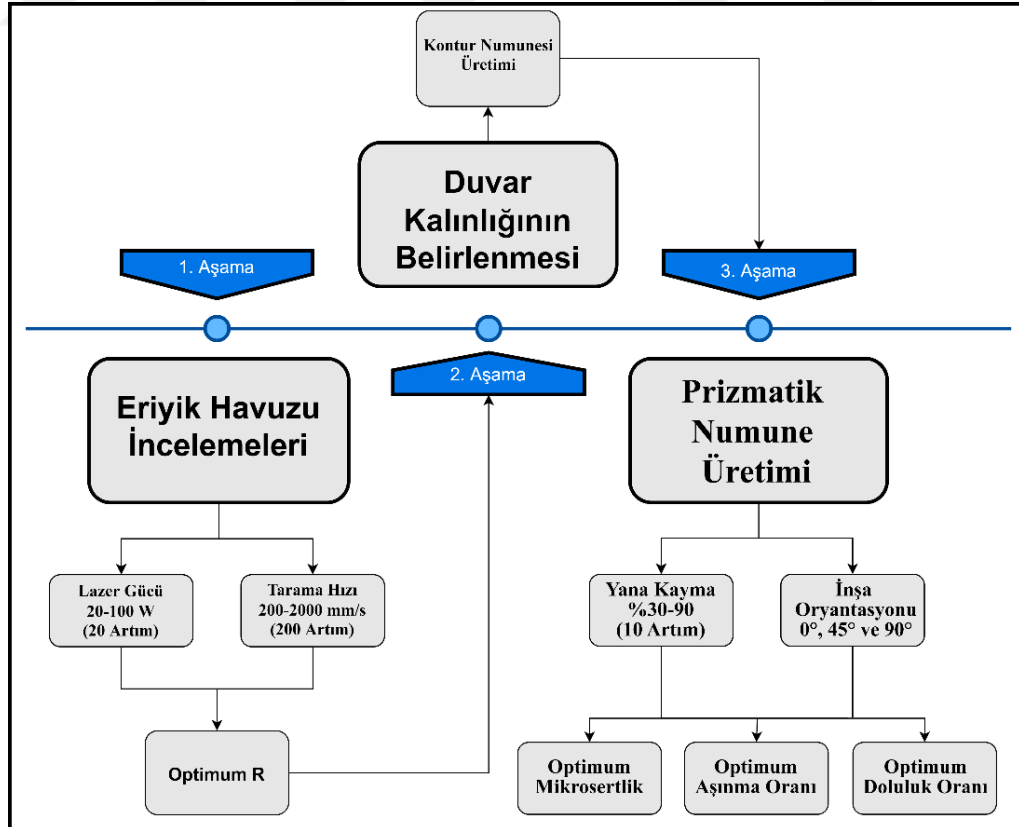
3.2. WC-Ni Tozları için Optimum SLE Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm SLE parametre çalışmaları ve üretimler, Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (ETÜ-YÜTAM) bünyesinde bulunan Concept Laser MLab R cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Cihaz maksimum 100 W lazer gücünde olup, 80x80x90 mm boyutlu bir hacimde üretim yapabilmektedir. Çalışma sırasında SLE cihazında gerçekleştirilen tüm işlemler, Argon (Ar) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiş ve oksijen miktarı %1'in altında tutulmuştur. Üretimlerde sürekli ve adacıklı olmak üzere iki farklı lazer vuruş stratejisi denenmiştir.



Şekil 3.4. Concept Laser MLab R seçici lazer ergitme cihazı

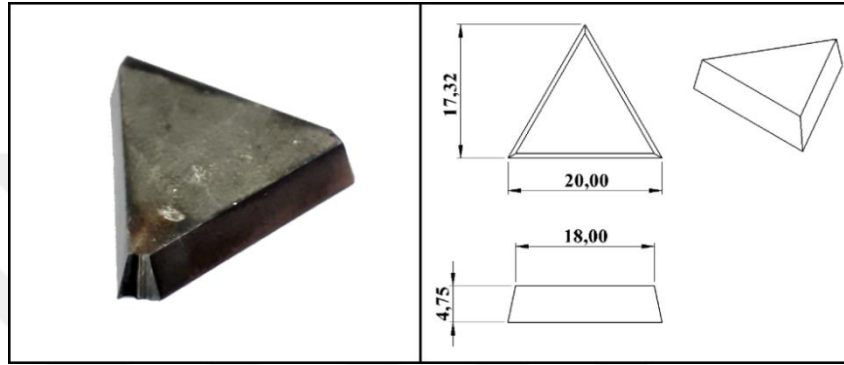
SLE yöntemi ile gerçekleştirilen üretim işlemlerinde çok sayıda üretim parametresi sürece dahil olduğundan tez kapsamında optimum üretim parametreleri belirlenirken Şekil 3.5'te sunulan iş akış şeması baz alınarak sistematik olarak parametre azaltılması suretiyle malzeme ve zaman tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 3.5. Optimum üretim parametre belirlenme şeması

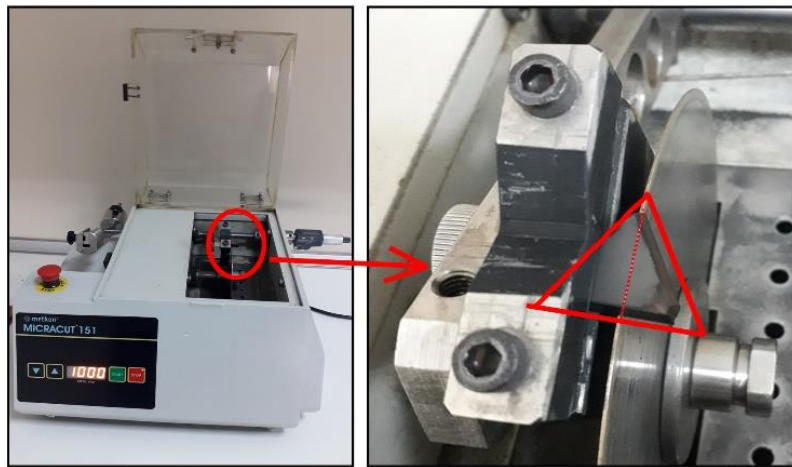
3.2.1. Optimum lazer gücü ve tarama hızının belirlenmesi (Eriyik havuzu incelemeleri)

İş akış şemasında 1. Aşama olarak gösterilen eriyik havuzu incelemelerini gerçekleştirmek üzere lazer vuruşlarının yapılabilmesi için Şekil 3.6'da gösterilen yüzeyi olabildiğince düz ve kalınlıkları aynı olan WC kesici uçlar (insert) Diriliş Kesici Takımlar Ltd. Şti. (Eskişehir) firmasından temin edilmiştir.



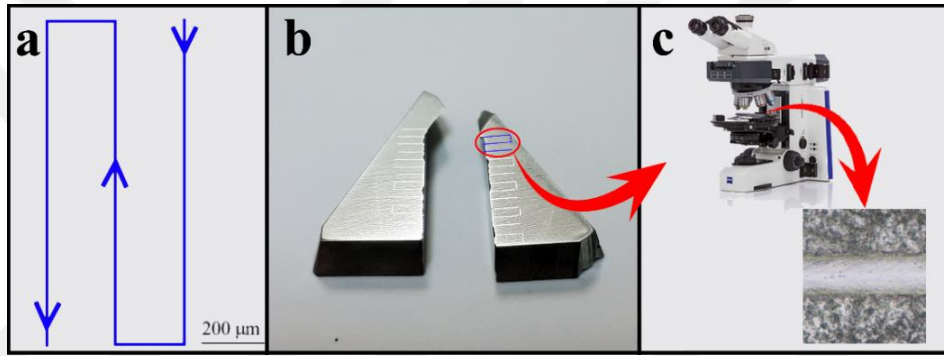
Şekil 3.6. SLE parametre çalışmaları için tekli lazer vuruşu yapılan WC kesici uça ait görüntüler.

Temin edilen WC kesici uçlar daha sonra 240-1200 grade SiC zımparalar yardımı ile zımparalandıktan sonra Metkon Micracut 151 markalı hassas kesme cihazı ile Şekil 3.7'de gösterildiği gibi köşegenlerinden ikiye bölünmüş ve daha sonra Concept Laser MLab-R SLE cihazında tekli lazer vuruşuna hazır hale getirilmiştir.



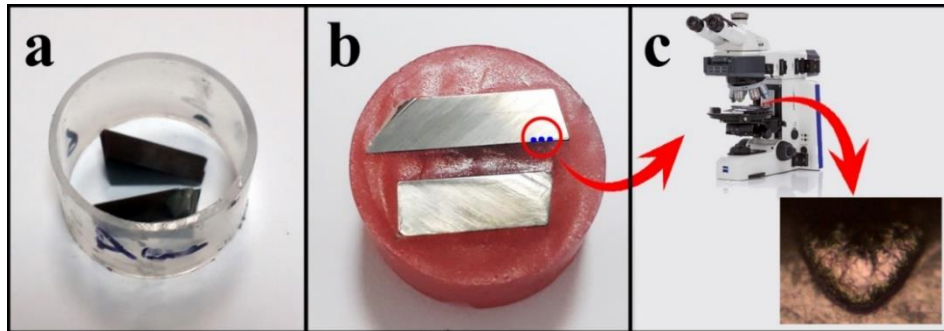
Şekil 3.7. Numunelere uygulanan hassas kesim işlemi

Farklı lazer gücü (20 W'den başlayıp 100 W'ye kadar 20 W artışla) ve tarama hızı (200 mm/s'den başlayıp 2000 mm/s'ye kadar 200 mm/s artışla) parametreleri kullanılarak WC kesici uçlar üzerine tekli lazer vuruşları gerçekleştirilmiştir. Lazer vuruşlarının mikroskop altındaki incelemeleri hem üstten hem de kesitten yapılacağı için lazer izleri kesici uç kenarlarından taşacak şekilde ayarlanmıştır. Doğrulama yapmak amacıyla her bir parametre için üç adet lazer izinin bulunduğu Şekil 3.8a'daki yörünge seçilmiştir. Seçilen yörünge numune üzerine Şekil 3.8b'de görüldüğü üzere sırayla her bir parametre için yan yana olacak şekilde uygulanmıştır. Daha sonra lazer vuruşları tamamlanan numuneler ultrasonik banyoda temizlenerek, ZEISS AXIO A1 markalı optik mikroskop ile incelenmiş ve üst yüzeyinden görüntüler alınmıştır (Şekil 3.8c).



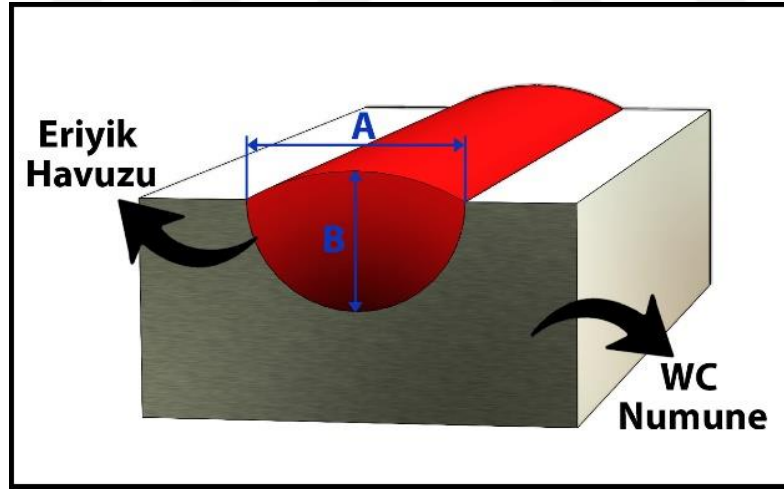
Şekil 3.8. Lazer izlerinin numune üzerindeki görüntüsü

Kesici uç üst yüzeyindeki lazer izleri alındıktan sonra Şekil 3.9a'da görüldüğü gibi kesilen kesici uçların köşelerindeki fazlalıklar taşlanıp bakalite alınarak, kesitteki lazer iz derinliği görüntüleri elde edilecek şekilde sabitlenmiştir (Şekil 3.9b). Bakalite alınan kesici uçların kesit yüzeyindeki lazer iz derinlikleri ZEISS AXIO A1 markalı optik mikroskop ile incelenmiş ve Şekil 3.9c örneğindeki gibi görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.9. Lazer izlerinin kesit görüntüsü (eriyik havuz)

Metalografik parlatma aşamalarından geçirilen kesit numunelerinin optik mikroskopla elde edilen eriyik havuzlarına ait genişlik (A) ve derinlikleri (B) ölçülerek Şekil 3.10’da gösterilen $R=A/2B$ oranları (aspect ratio) hesaplanmıştır. $R \geq 1$ değerleri eriyik havuzunun elips şeklinde olduğu iletken modu (conductive mode) temsil ederken, $R < 1$ değerleri anahtar deliği modunu (keyhole mode) temsil etmektedir. Anahtar deliği formu lazer gücünün yüksek ve lazer tarama hızının küçük olduğu değerlerde meydana gelmektedir. Aynı güç değerinde artan tarama hızı değerleriyle birlikte eriyik havuzu formu anahtar deliği biçiminden yarı küresel forma dönüşmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada anahtar deliği moduna sahip eriyik havuzlarında, üretimin ilerleyen aşamalarında eriyik havuzlarının bindirilmesi sonrası gözenekli yapıların ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Hu et al. 2019; Gençoğlu et al. 2022). Eriyik havuz formunun incelendiği birçok çalışmada eriyik havuzu içerisinde daha dengeli ısı dağılımının bir sonucu olarak gözeneksiz bir yapı oluşturması sebebiyle iletken moda sahip eriyik havuzlarının elde edildiği üretim parametreleri tercih edilmektedir (Wei et al. 2017). Dolayısı ile lazer gücü ve tarama hızı değerlerine bağlı olarak elde edilen R değerinin 1’e en yakın olduğu parametreler seçilip lazer gücü ve tarama hızı belirlenmiştir.

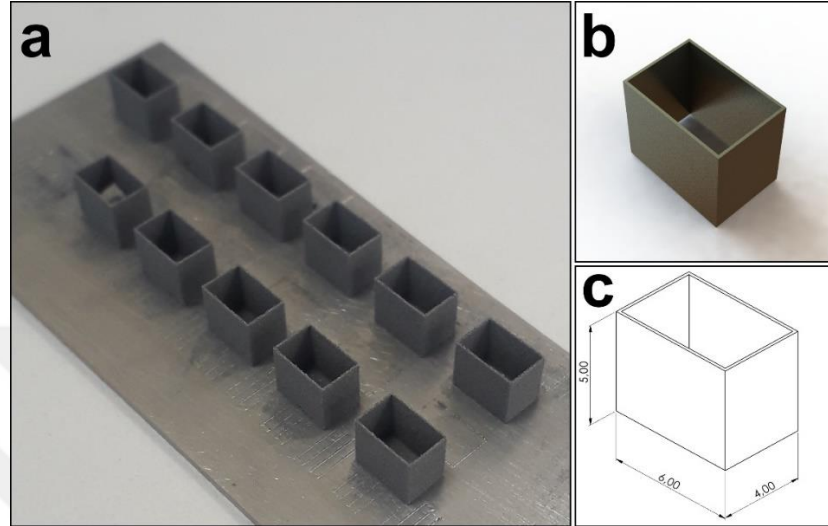


Şekil 3.10. Eriyik havuzuna ait geometrik büyüklükler (A: Eriyik havuzu genişliği, B: Eriyik havuzu derinliği).

3.2.2. Duvar kalınlığının belirlenmesi (Kontur numunesi üretimi)

Sistematik olarak parametre azaltılması yolu ile SLE üretim parametrelerinin optimize edilmeye çalışıldığı bu tez çalışmasında, 1. aşamada lazer gücü ve tarama hızı değerleri belirlendikten sonra 2. aşama olarak duvar kalınlığının belirlenmesi için Şekil

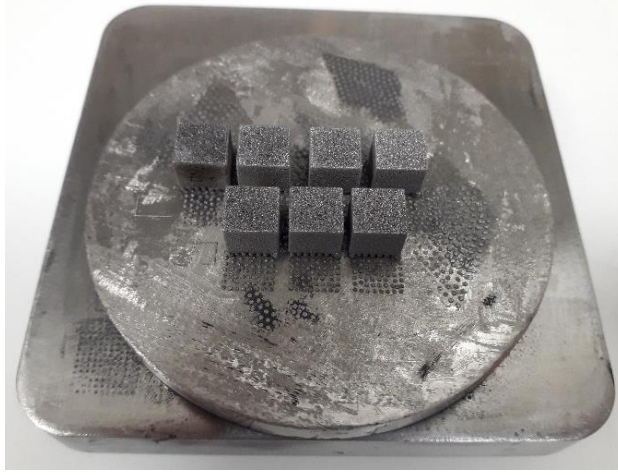
3.11’de gösterildiği gibi 6x4x5 boyutlarında kontur (single-wall) numuneleri üretilmiştir. Daha sonra üretilen numunelerin duvar kalınlıkları ve yapısı hem ZEISS AXIO A1 optik mikroskopunda hem de Quanta FEG 250 markalı taramalı elektron mikroskopunda (SEM) belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Duvar kalınlığının belirlenmesi için üretilen kontur numunelerine ait a) Üretim tablasındaki görünümü, b) Üç boyutlu modeli, c) Teknik resim görüntüsü.

3.2.3. Prizmatik numunelerin üretimi

Tez çalışmaları kapsamında, lazer gücü ve tarama hızı değerleri belirlendikten sonra optimum yana kayma mesafesi değeri belirlenmiştir. Yana kayma miktarı iki ergime havuzunun merkezleri arasındaki mesafe olarak tanımlanabilmektedir. Yana kayma miktarının yapısal ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemek için, belirlenen en iyi R oranına sahip parametreler seçilerek Şekil 3.12’de görüldüğü gibi farklı yana kayma miktarlarında Ni tabla üzerinde prizmatik numuneler üretilmiştir. Belirlenen duvar kalınlığı değerine göre yana kayma miktarı %30-90 aralığında %10 artımla uygulanmıştır. En yüksek doluluk oranını ve mikrosertlik değerini sağlayan yana kayma parametresi ile 10x10x5 mm boyutlarında prizmatik mikroyapı ve aşınma numuneleri üç farklı inşa oryantasyonu kullanılarak (0°, 45° ve 90°) üretilmiştir.



Şekil 3.12. Üretim tablasında farklı yana kaymalarda (%30-90 yk) üretilen prizmatik numuneler.

3.3. Ni ile Kaplanmış WC Kompozit Tozlara ve Numunelere ait XRD Analizleri

X-ışını difraksiyon ölçümleri, Cu-K α anot X-ışını kaynağı kullanılarak 1.5405 Å dalga boyuyla Şekil 3.13'te gösterilen GNR Explorer XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler simetrik tarama konfigürasyonu kullanılarak saniyede 0.05° adımlarla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler hem toz hem de katı formdaki malzemeler üzerinde yapılmış olup elde edilen sonuçlar, Match yazılımı ile analiz edilerek JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) verileri ile faz içerikleri belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen XRD sonuçları literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13. GNR Explorer X-ışını difraksiyon cihazı

3.4. Doluluk Oranlarının Belirlenmesi

Üretilen prizmatik numunelerin doluluk oranlarının belirlenebilmesi için ZEISS AXIO A1 markalı optik mikroskoptan alınan kesit görüntüleri üzerinde görüntü analizi yapılmıştır. Numuneler taşlanıp, sırasıyla 240, 400, 800, 1200 ve 1500 grade zımpara kağıdıyla zımparalanarak alümina süspansiyon ile parlatılmıştır. Sonrasında her bir numune yüzeyi üzerindeki farklı bölgelerden farklı büyütmelelere sahip en az 5 adet görüntü alınmıştır. Alınan görüntülerin ZEN yazılımı vasıtasıyla analizi gerçekleştirilmiştir. Doluluk oranları parlatılmış yüzeyde oluşan boşlukların dolu alana oranı yardımıyla belirlenmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden üretilen prizmatik numunenin yüzeyine ait sadece tek katmanına göre doluluk hesabı yapılabildiği için, yapının bütünü hakkında sağlıklı bir sonuca ulaşabilmek adına doluluk oranları ayrıca Arşimet prensibi kullanılarak da hesaplanmıştır. Arşimet prensibine ait deney tasarımı Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Arşimet prensibine ait deney tasarımı

3.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik değerleri, Şekil 3.15’te gösterilen SHIMADZU HMV-G20 markalı mikrosertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, Vickers yöntemi kullanılarak ve 300 gr yük altında 10 saniye bekleme süresi ile numune yüzeyinin farklı bölgelerinden en az 5 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. SHIMADZU HMV-G20 markalı mikro sertlik cihazı

3.6. Aşınma Deneyleri

Numunelerin aşınma deneyleri Şekil 3.16’da gösterilen Bruker Universal Mechanical Tester (Bruker – UMT) markalı tribometre test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler Viewer programı yardımıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 3.16. Bruker - UMT markalı tribometre cihazı

Aşınma deneylerine ait deney parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiş olup, her bir parametre için numune yüzeyindeki farklı bölgelerde 3 ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri öncelikle Al_2O_3 karşı bilye malzemesi üzerinde denenmiştir. Fakat Al_2O_3 bilye ile prizmatik numuneler üzerinde yeterli bir aşınma izi oluşturulamadığından deneylerde daha sonra 50 N yük ve WC karşı bilye malzemesi kullanılmıştır.

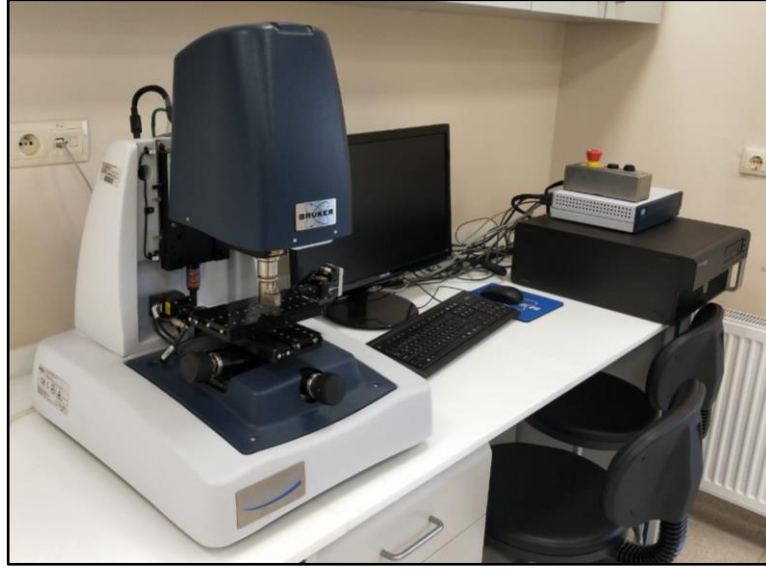
Çizelge 3.2. Aşınma deneyi parametreleri

Deney parametreleri	Değerler
Test türü	İleri – Geri (Reciprocating)
Normal yük (N)	50 - 100
Aşınma stroğu (mm)	4
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Aşındırma süresi (s)	3600
Karşı bilye malzemesi	Al ₂ O ₃ - WC
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru şartlar

3.7. Aşınma Oranları ve Yüzey Pürüzlülük İncelemeleri

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma hacimlerinin ve üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.17’de verilen Bruker Contour GT 3D optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma izlerinden 10 ölçüm alınarak görüntüler Vision64 yazılımı yardımıyla işlenmiştir. Aşınma izindeki aşındırılan alan (P_{area}) ve aşınma iz boyu çarpılarak aşınma hacmi hesaplanmıştır. Elde edilen aşınma hacmi sonuçlarından Denklem 3.1 kullanılarak spesifik aşınma oranı değerleri hesaplanmıştır (Burris and Sawyer 2009). Yüzey pürüzlülüğü için numune yüzeyinin 3 farklı bölgesinden görüntüler alınıp, Vision64 programı yardımıyla farklı 5 doğru üzerindeki yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) değerleri okunarak ortalaması alınmıştır.

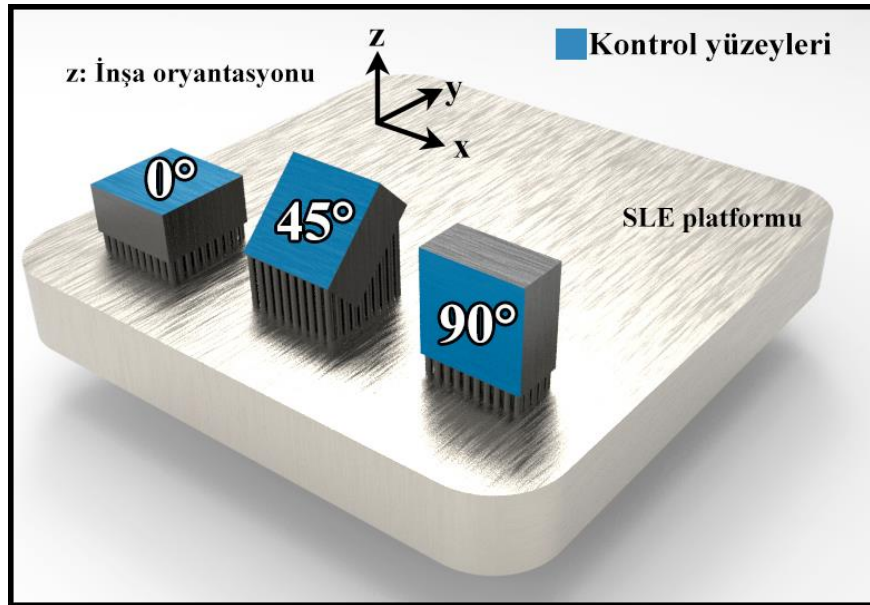
$$Aşınma Oranı \left(\frac{mm^3}{Nm} \right) = \frac{Aşındırılan Hacim (mm^3)}{Uygulanan Yük (N) \times Aşınma Mesafesi (m)} \quad (3.1)$$



Şekil 3.17. Bruker Contour GT 3D optik profilometre cihazı

3.8. Optimum İnşa Oryantasyonunun Belirlenmesi

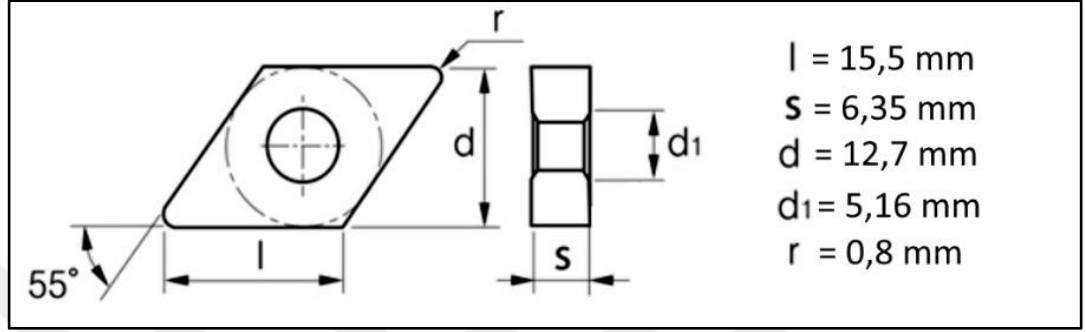
Optimum lazer parametre seti belirlendikten sonra optimum inşa oryantasyonunun belirlenmesi için çeşitli inşa oryantasyonlarında (0° , 45° ve 90°) numuneler üretilmiştir. Şekil 3.18’de gösterilen kontrol yüzeylerine mikroyapı incelemeleri yapılarak mikrosertlik ve aşınma testleri uygulanmıştır. Ayrıca hem kontrol yüzeylerinden hem de yan yüzeylerden yüzey pürüzlülüğü alınmıştır.



Şekil 3.18. SLE platformunda numunelerin çeşitli yapı açılarından şematik görünümü

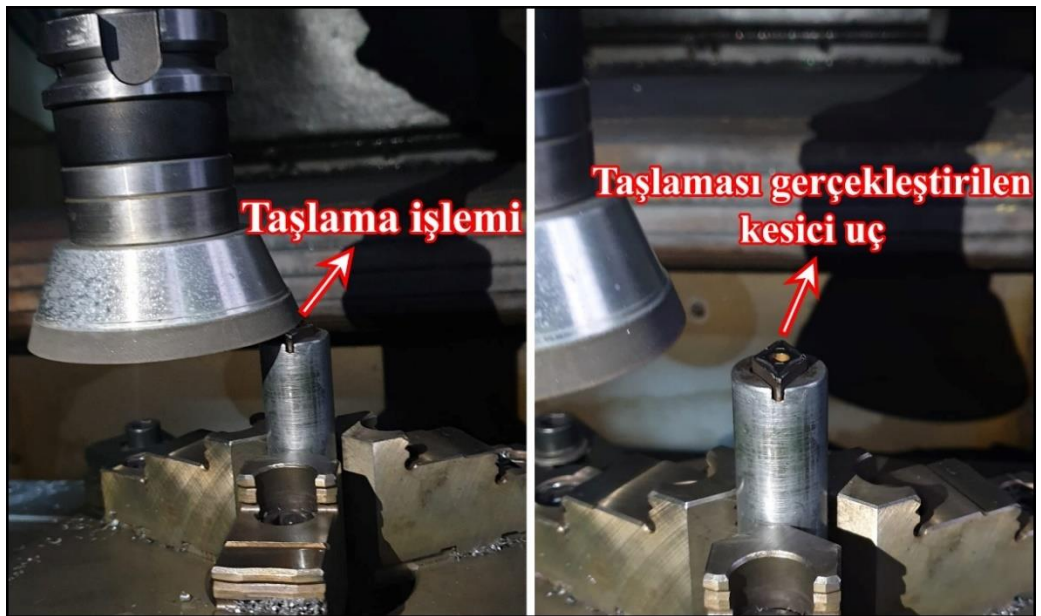
3.9. Kesici Takımların Üretimi

Doluluk oranı, mikrosertlik ve aşınma testleri sonrası optimize edilen SLE üretim parametreleri ile nihai ürün olan Şekil 3.19’da teknik resmi verilen WC-Ni DNMG-150608 kesici uç imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19. DNMG-150608 kesici uca ait teknik resim

SLE ile DNMG-150608 kesici uçların üretimi sonrası taşlama ve fırçalama işlemleri Diriliş Kesici Takımlar Ltd. Şti. (Eskişehir) firmasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de gösterilen taşlama cihazı kullanılarak kesme açıları verilen ve kenar güçlendirmesi gerçekleştirilen kesici uçlara takım endüstrisinde sıkça kullanılan TiN ince film kaplaması uygulanmıştır. Bu kaplamaya ait yöntem ve parametreler Çizelge 3.3’te sunulmuştur.



Şekil 3.20. Kesici uçlara uygulanan taşlama işlemi

Çizelge 3.3. TiN kaplama parametreleri

Kaplama Yöntemi	Katodik ark fiziksel buhar kaplama
Bias (V)	50
Katot Akımı (A)	60
Basınç (mbar)	1,2
Sıcaklık (°C)	450
Biriktirme Süresi (dk)	70

3.10. WC-Ni Kesici Takımların Gerçek Kesme Koşulları Altındaki Davranışı

SLE ile imalatı gerçekleştirilen tungsten karbür kesici takımlar Şekil 3.21’de gösterilen HAAS ST10 CNC torna tezgâhı yardımıyla alın tornalama işleminde kullanılarak, geleneksel yöntemlerle imal edilmiş ticari kesici uçlarla takım aşınması açısından karşılaştırılmıştır. Tornalama işlemleri için önce 18 mm çapında 60 mm uzunluğunda kestamit, daha sonra 20 mm çapında ve 90 mm uzunluğunda GG25 pik döküm silindirik iş parçası kullanılmıştır. Takımlardaki aşınma analizleri için yan kenar aşınma genişliği (flank wear width) referans olarak alınmıştır. Ayrıca yapılan tornalama işlemi sonrası, iş parçası yüzeyinden Bruker Contour GT 3D optik profilometre cihazı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri alınmıştır.



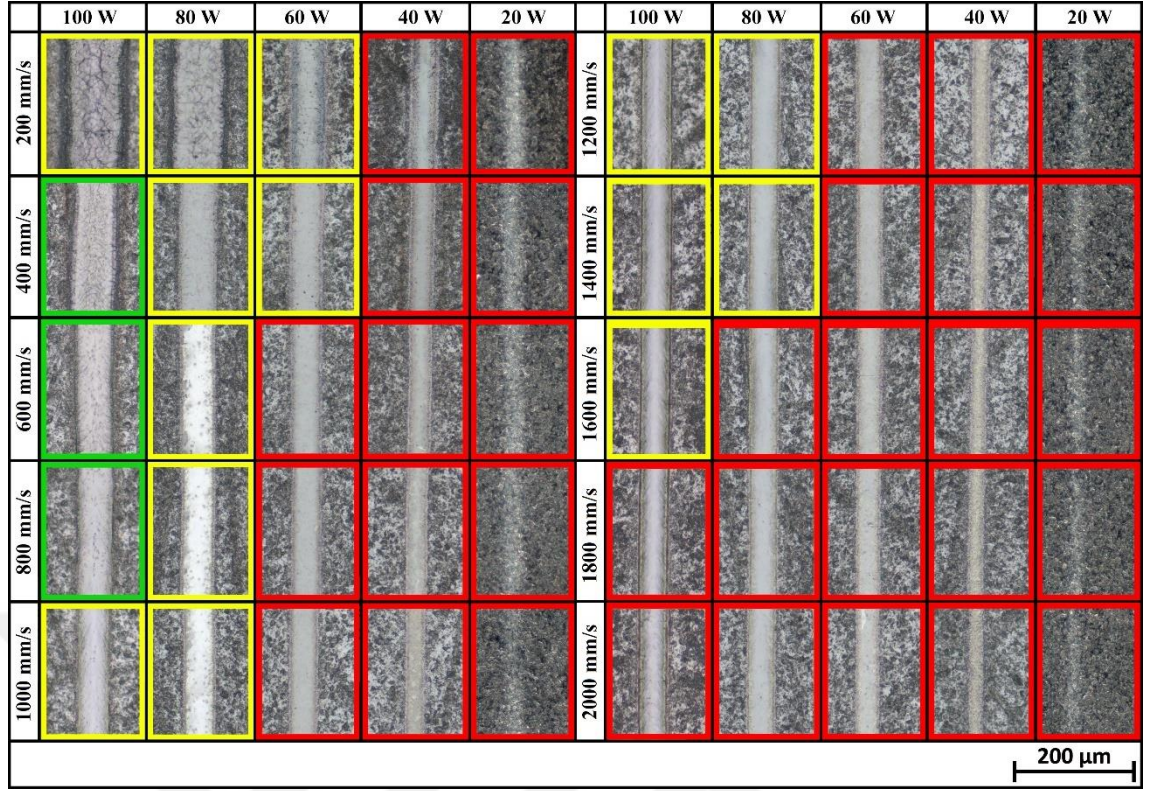
Şekil 3.21. Haas ST10 CNC torna tezgâhı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Akımsız Ni kaplı WC toz malzeme kullanılarak SLE yöntemi ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar; kaplanan WC toz malzemenin özelliklerinin belirlenmesi, optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi, bu parametrelerin yoğunluk ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi adımlarıyla sunulmuştur. SLE üretim işlemleri karmaşık bir dizi parametre içerdiği için, optimum üretim koşullarını belirlemek için parametrelerin sistematik olarak değerlendirilmesi, malzeme ve zaman tasarrufu hedeflenmiştir. Belirlenen optimum üretim parametre seti ile tornalama kesici uçları üretilmiş ve uçların gerçek koşullar altındaki kesme davranışları geleneksel yöntemlerle üretilen ticari uçlarla karşılaştırılıp elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

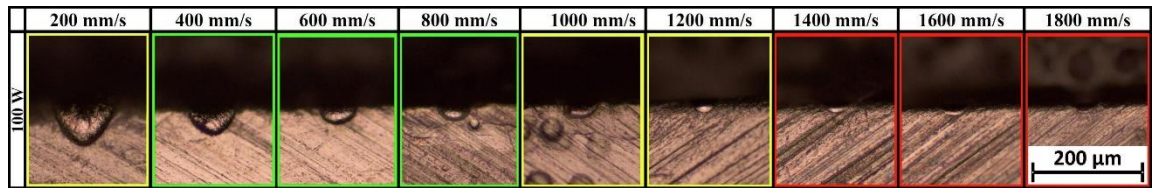
4.1. WC Numune Üzerine Gerçekleştirilen Lazer İzlerinin Yüzey ve Kesit Morfolojisi

Üretim parametrelerinin belirlenmesi aşamasında lazer gücü ve tarama hızının etkileşimi sonucu oluşan lazer izlerinin homojenliğinin incelenmesi amacıyla 5 farklı lazer gücü ve 10 farklı tarama hızı ile SLE cihazında Ar gazı atmosferinde WC malzeme üzerinde tekli lazer vuruşları gerçekleştirilmiştir. Tekli lazer vuruşları sonrası parça kesitindeki lazer iz derinlikleri ve genişlikleri incelenmiştir. Farklı lazer gücü (20 W-100 W) ve tarama hızlarında (200-2000 mm/s) gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait yüzey morfolojisi tablo haline getirilerek Şekil 4.1’de sunulmuştur. Hem lazer gücü hem de tarama hızı değerlerinin tekli lazer izlerinin oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Düşük lazer gücü kullanılarak yapılan lazer vuruşlarında enerji yoğunluğunun gereken güçte olmamasından dolayı ergimenin yetersiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle 20 W lazer gücü ve 200-2000 mm/s tarama hızı aralığında gerçekleştirilen lazer vuruşları sonucunda WC numunede sadece yüzeysel bir iz görülmüş olup, mikroskopta bulunan farklı bir filtre yardımı ile görüntülenebilmiştir. Diğer bölgelerde ise sürekli izler görülmekle birlikte lazer izlerinin homojen olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı lazer gücü ve tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait yüzey morfolojisi görüntüleri.

100W lazer gücü ve farklı tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait kesit görüntülerinden elde edilen eriyik havuzu görselleri Şekil 4.2’de sunulmuştur. 100 W gücünde gerçekleştirilen lazer vuruşlarında eriyik havuzları görünmüş olup, diğer lazer gücü değerleri için enerji girdisinin oldukça düşük olması sebebiyle yeterli ergime derinliğine ulaşılamamış ve kesit görüntüleri elde edilememiştir.



Şekil 4.2. 100 W lazer gücü ve farklı tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait eriyik havuz görüntüleri.

100 W lazer gücüne için eriyik havuzlarına ait boyutsal özellikler (genişlik ve derinlik) ve eriyik havuz formunu temsil eden en/boy oranı (R) değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Eriyik havuzlarına ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, elips havuz formu dikkati çekmektedir. $R \geq 1$ değerleri eriyik havuzunun elips şeklinde olduğu

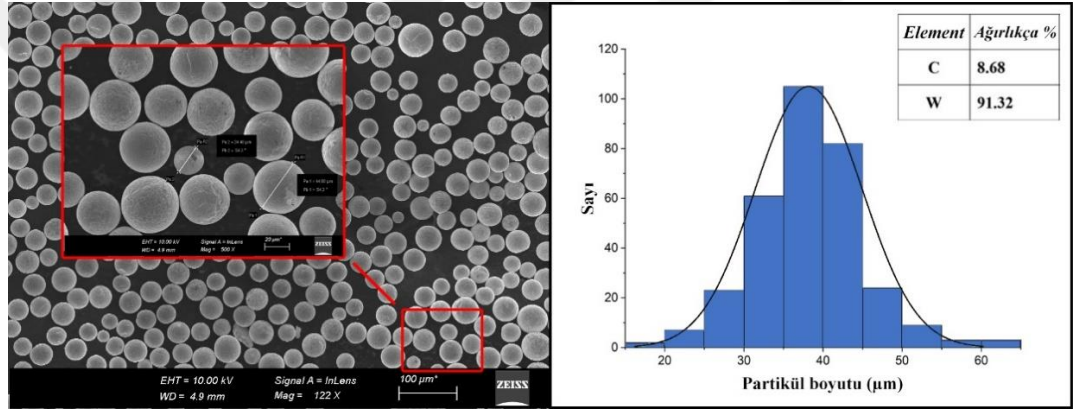
iletken modu (conductive mode) temsil ederken, $R < 1$ değerleri anahtar deliği modunu (keyhole mode) temsil etmektedir. Anahtar deliği formu genellikle lazer gücünün yüksek ve tarama hızı değerlerinin düşük olduğu üretim şartlarında oluşmaktadır. Eriyik havuz formunun anahtar deliği modundan iletken moda geçtiğinde eriyik havuz geometrisi V şeklinden elips şekline dönüşmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada anahtar deliği moduna sahip eriyik havuzlarında, üretimin ilerleyen aşamalarında eriyik havuzlarının bindirilmesi sonrası gözenekli yapıların ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Hu et al. 2019). Eriyik havuz formunun incelendiği birçok çalışmada eriyik havuzu içerisinde daha dengeli ısı dağılımının bir sonucu olarak gözeneksiz bir yapı oluşturması sebebiyle iletken moda sahip eriyik havuzlarının elde edildiği üretim parametreleri tercih edilmektedir (Wei et al. 2017). Çizelge 4.1’de verilen en-boy oranı (R) değerleri dikkate alındığında iletken moda sahip ve en-boy oranının 1’e yaklaştığı 100 W lazer gücünde, 400, 600 ve 800 mm/s tarama hızı parametrelerinin optimum eriyik havuzu formunu sağladıkları tespit edilmiştir. 2000 mm/s tarama hızında ise eriyik havuzu görüntüsü alınamamıştır.

Çizelge 4.1. 100 W gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler.

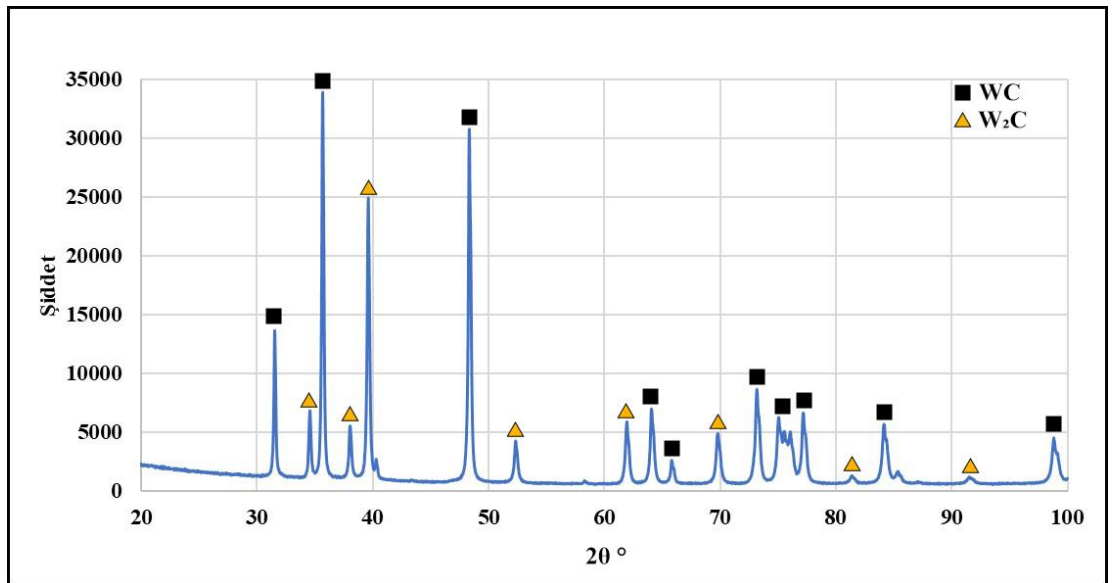
Lazer gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Genişlik-A (μm)	Derinlik-B (μm)	Oran-R ($R=A/2B$)
100	200	116,270	78,341	0,742
	400	87,775	44,062	0,996
	600	68,500	29,716	1,153
	800	61,181	23,885	1,281
	1000	58,908	21,621	1,362
	1200	44,088	12,014	1,835
	1400	40,278	9,304	2,165
	1600	39,560	10,018	1,974
	1800	47,117	10,404	2,264

4.2. WC Toz Malzeme Analizleri

Ticari olarak temin edilen küresel formdaki WC toz malzemeye SEM ve EDS analizleri uygulanarak toz boyutu ve kompozisyonu belirlenmiştir. Şekil 4.3'te WC toz malzemeye ait SEM görüntüleri, boyut dağılımı ve EDS sonucu sunulmuştur. Şekil 4.4'te ise WC toz malzemeye ait XRD grafiği verilmiştir. Toz boyutu dağılım grafiği incelendiğinde toz partikül boyutlarının 30-40 μm aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. EDS sonuçları incelendiğinde ise malzeme içerisinde ağırlıkça %91,32 W ve %8,68 C elementinin bulunduğu görülmektedir. XRD grafiği incelendiğinde WC ve W_2C fazlarının yoğunluğu dikkat çekmektedir.



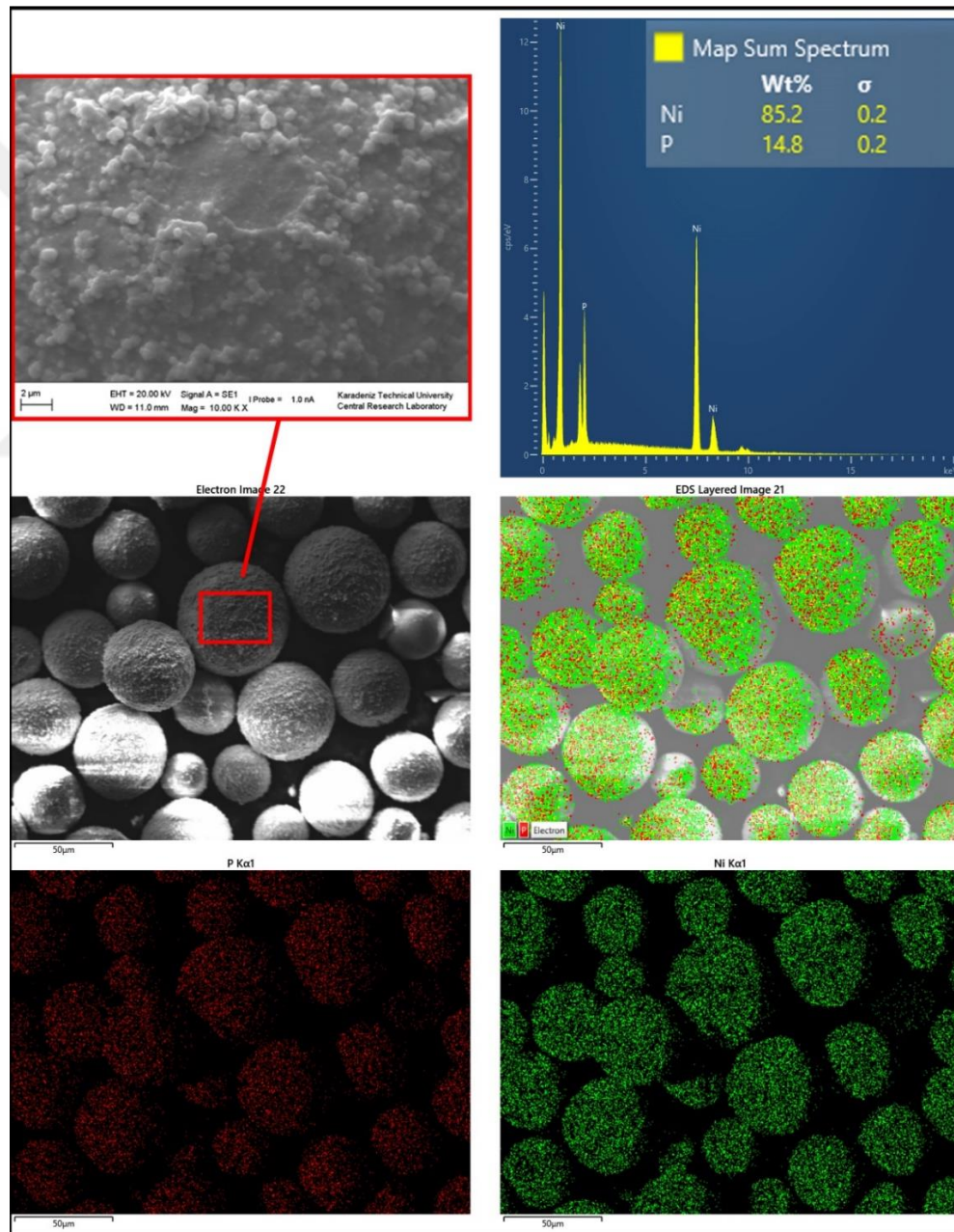
Şekil 4.3. WC toz malzemeye ait SEM görüntüsü, toz boyutu dağılım grafiği ve EDS sonucu.



Şekil 4.4. WC toz malzemeye ait XRD analizi

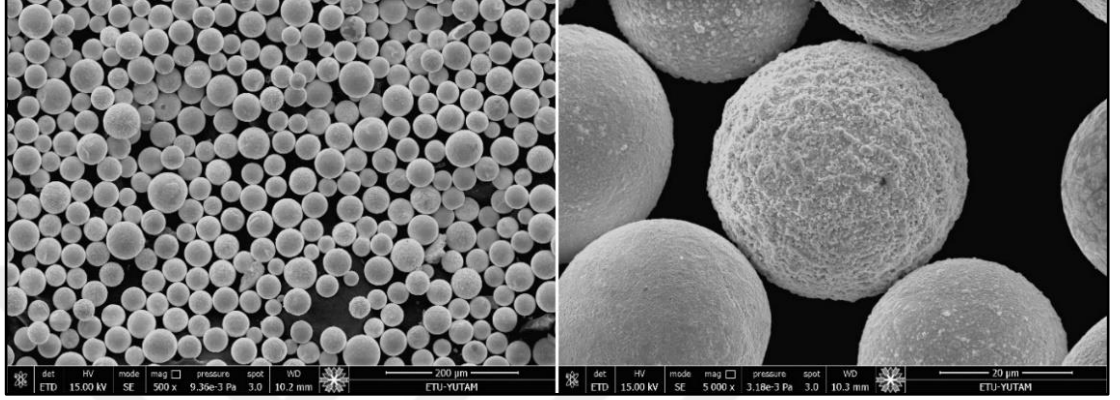
4.3. Akımsız Ni-P Kaplanan WC Toz Malzeme Analizleri

Ni-P kaplamaya ait SEM ve EDS analizleri Şekil 4.5'te sunulmuştur. WC toz malzeme üzerindeki kaplamaya ait SEM ve EDS analizleri incelendiğinde %85,2 oranında Ni içerdiği %14,8 oranında ise P içerdiği gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen EDS analizi, WC toz malzemenin Ni-P ile başarılı bir şekilde kaplandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca kaplamanın toz malzeme üzerinde Ni ve P'nin homojen bir şekilde dağıldığı da görülmüştür.



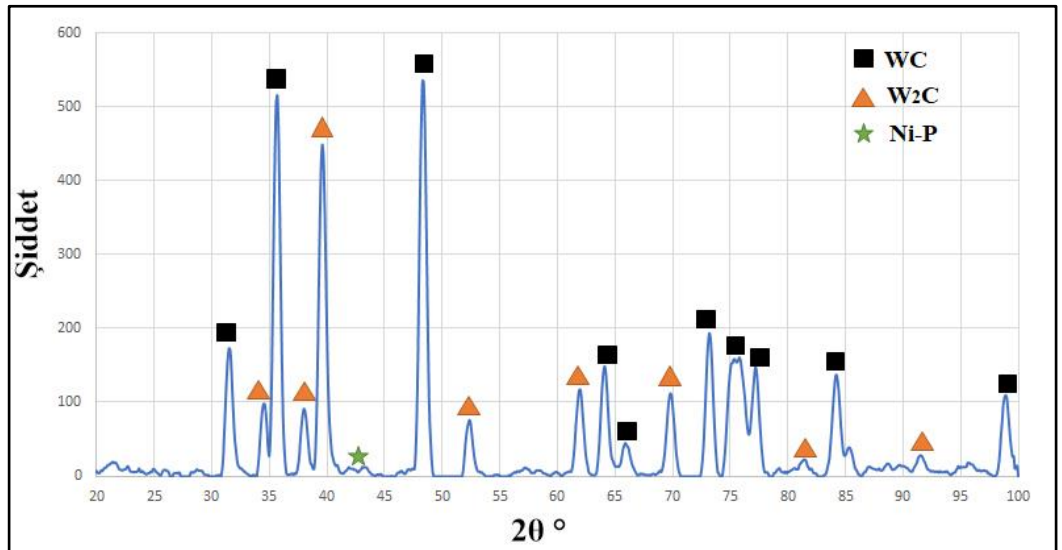
Şekil 4.5. Ni-P kaplamaya ait SEM ve EDS analizleri

Ayrıca Ni-P kaplı WC toz malzemenin Şekil 4.6’da sunulan SEM görüntüleri incelendiğinde, toz malzemenin yapısında bir değişiklik olmadığı ve küresel formunun korunduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, özellikle toz yatak esaslı eklemeli imalatta önemli bir parametre olan toz malzemenin akıcılık özelliğini koruması açısından büyük önem arz etmektedir.



Şekil 4.6. Ni-P kaplanmış WC toz malzemeye ait SEM görüntüleri

Ni-P kaplı WC toz malzemeye ait XRD grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. XRD profili, üç fazın varlığını göstermekte olup bunlar, Ni-P, WC ve W_2C ’dür (Li et al. 2018; Pascal et al. 2018; Liu et al. 2020; McDonnell et al. 2021; Tan et al. 2022; Zhao et al. 2022). Grafik incelendiğinde, kaplama kalınlığının nispeten düşük olması sebebiyle WC fazlarının daha yoğun şiddette olduğu, Ni-P fazlarının ise bir bağlayıcı olarak toz malzemede bulunduğu açıkça görülmektedir.



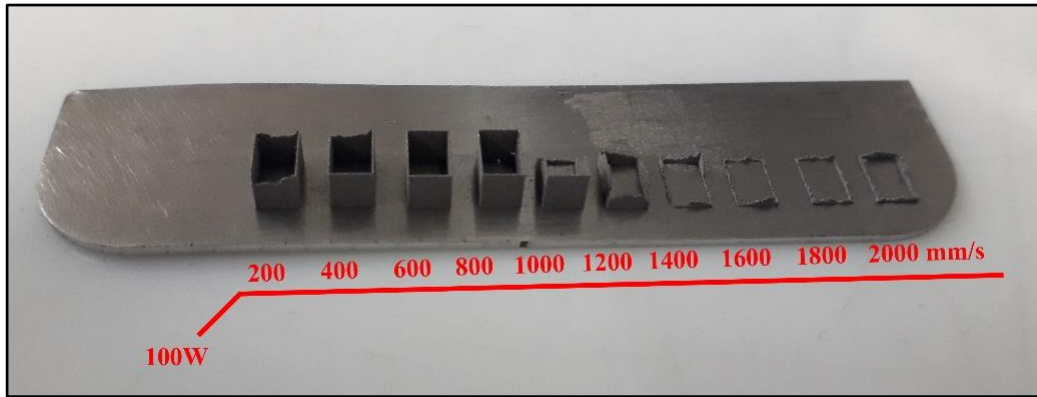
Şekil 4.7. Ni-P kaplanmış WC toz malzemeye ait XRD grafiği

4.4. WC-NiP Toz Malzeme ile SLE Üretimleri

Tez çalışmasının birinci aşamasında numune üzerine lazer vuruşları sonrası 100 W lazer gücünde, 400, 600 ve 800 mm/s tarama hızı parametrelerinin optimum eriyik havuzu formunu sağladıkları tespit edilmiş ve bu parametreler optimum tarama hızı için öncül değerler olarak seçilmiştir. Tez çalışmasının ikinci aşaması olan duvar kalınlığının belirlenmesi için kontur numunelerinin üretimine bu değerlerden yola çıkılarak başlanmıştır. Ayrıca toz boyutu dağılım grafiklerinden elde edilen verilerden yola çıkılarak katman kalınlığı 30 µm olarak alınmıştır.

4.4.1. WC-NiP toz malzeme ile kontur (single-wall) numunesi üretimleri

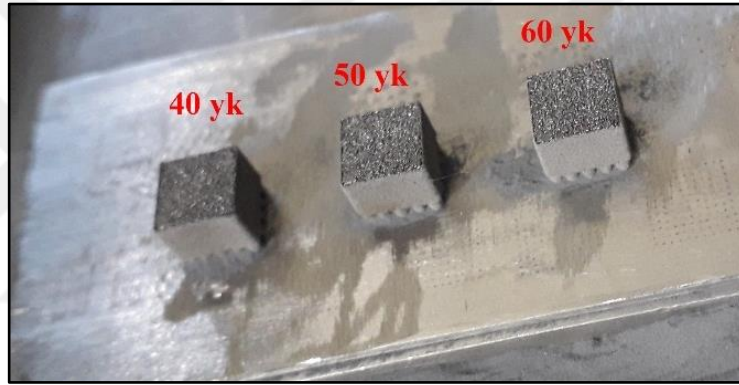
WC-NiP kaplanmış toz malzemedan 100 W lazer gücünde 200'den 2000 mm/s lazer tarama hızlarına 200 mm/s artım ile kontur üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu üretime ait görseller Şekil 4.8'de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, üretimi gerçekleştirilen kontur yapılarda katmanlar arası birleşmesinin yetersiz olduğu ve bu yüzden 1000 mm/s ilerleme hızından sonraki tarama hızlarında kontur yapılarının kırıldığı tespit edilmiştir. Bu üretim sırasında en iyi parametrenin 100 W lazer gücünde 600 mm/s tarama hızı olduğu tespit edilmiş ancak üretilen yapıların yine de kırılmaya karşı oldukça hassas olduğu belirlenmiştir. Ayrıca WC-NiP toz malzemenin yapısında bulunan P elementinin, üretimdeki lazer taraması esnasında kıvılcım oluşumunu ve lazer yansımalarını artırarak üretime olumsuz yönde etki ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. WC-NiP toz malzemenin kontur numunelerine ait üretim görüntüsü

4.4.2. WC-NiP toz malzeme ile prizmatik numune üretimleri

WC-NiP toz malzeme ile kontur numunelerindeki kalınlık net olarak belirlenemediği için daha sonra, farklı yana kayma değerlerinde prizmatik numuneler üretilmiştir. Ni-P kaplı WC toz kullanılarak 6x6x4 mm boyutunda 100 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızı, farklı yana kayma miktarları (%30-90 arası 10'ar artım) ve sürekli lazer stratejisi kullanılarak 316L paslanmaz çelik üretim tablası üzerinde prizmatik numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Ancak üretim sırasında %30, %70, %80 ve %90 yana kayma değerine sahip prizmatik numuneler tabladan ayrılarak üretim tablasındaki diğer numunelere de zarar vermiştir. Bu yüzden daha sonra yalnızca üç adet %40, %50 ve %60 yk olmak üzere prizmatik numuneler Şekil 4.9'daki gibi üretilmiştir.



Şekil 4.9. WC-NiP toz malzeme kullanılarak farklı yana kayma parametrelerinde üretilen prizmatik numuneler.

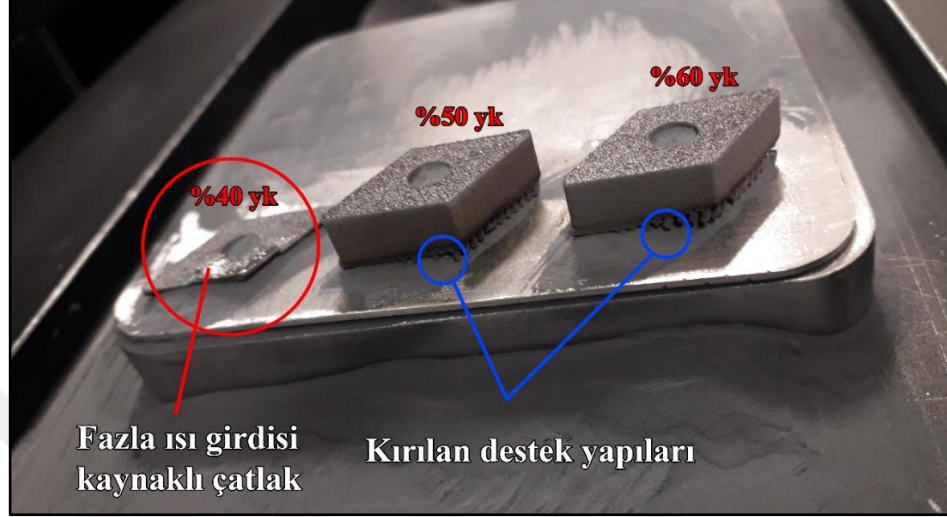
Şekil 4.9 incelendiğinde destek yapılarının oldukça hassas olduğu ve ufalanarak kırıldığı görülmüştür. Ancak numune yüzeylerinin destek yapılarına göre daha iyi birleştiği ve ufalanma sorununun olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Ni-P kaplanmış WC malzemede bağlayıcı olarak görev yapan Ni miktarının yeterli oranda bulunmaması sebebiyle, %70, %80 ve %90 yana kayma miktarlarında prizmatik numunelerin üretimi gerçekleştirilememiştir.

4.4.3. WC-NiP toz malzeme ile kesici uç üretimleri

Prizmatik numunelerin üretiminde bağlayıcının yetersiz olduğu gözlemlenmiş olup, gözlem sonucunda nihai üretilecek kesici uç üretimleri gerçekleştirilmiş ve uçlar

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

100 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızında, %40 yk, %50 yk ve %60 yk parametresi kullanılarak üretilmiştir. Şekil 4.10’da verilen kesici uç üretimi sırasında %40 yk değerine sahip ucun bir süre sonra katmanlar arası ayrılmaya uğrayarak kırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca diğer parametrelerdeki uçların da destek yapısında kırılmalar göze çarpmıştır.

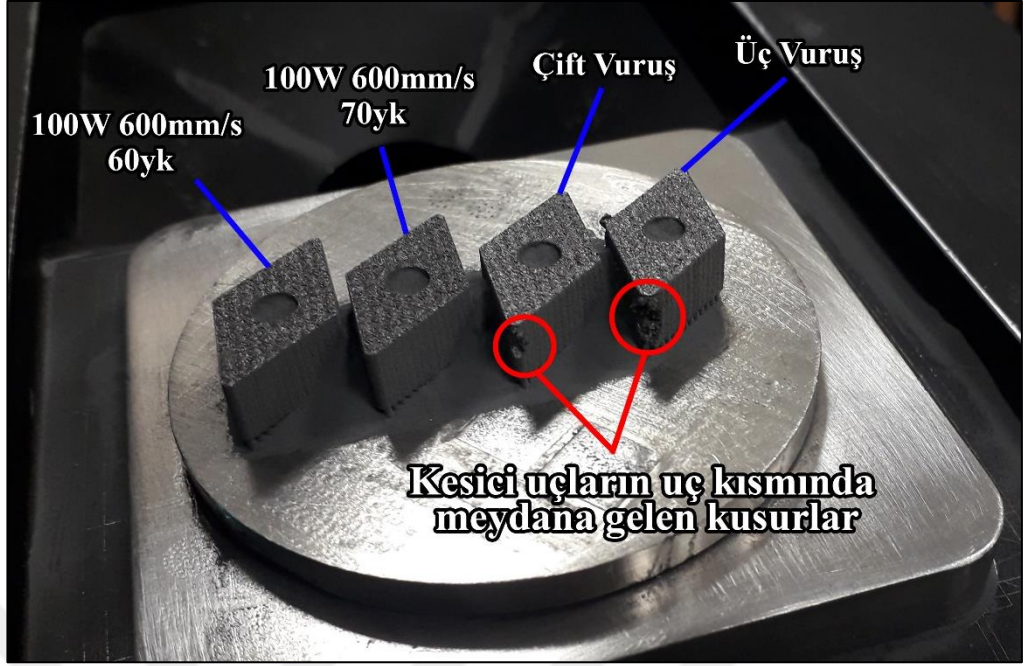


Şekil 4.10. WC-NiP toz malzeme kullanılarak farklı parametrelerde üretilen kesici uçlar

Kesici uçların destek yapılarında meydana gelen kırılmaların önüne geçmek amacıyla 316L paslanmaz çelik üretim tablası yerine Ni üretim tablası kullanılarak üretimlere devam edilmiştir. Ayrıca sürekli lazer vuruş stratejisinden chessboard tipi adacıklı vuruş stratejisine geçilerek 4 farklı parametrede üretimler yapılmıştır. Bu parametreler Çizelge 4.2’de sunulmuş olup, tablodaki parametreler kullanılarak gerçekleştirilen üretime ait görsel Şekil 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. WC-NiP toz malzemeye uygulanan farklı SLE stratejileri

Parametre No	Lazer Vuruş Sayısı	Lazer gücü (W)			Tarama hızı (mm/s)	Yana kayma miktarı (%)	Katman kalınlığı (µm)	Lazer vuruş stratejisi
1	Üç Lazer Vuruşu	60	80	100	600	60	30	Chessboard
2	Çift Lazer Vuruşu	80		100	400	60		
3	Tek Lazer Vuruşu	100			600	60		
4	Tek Lazer Vuruşu	100			600	70		



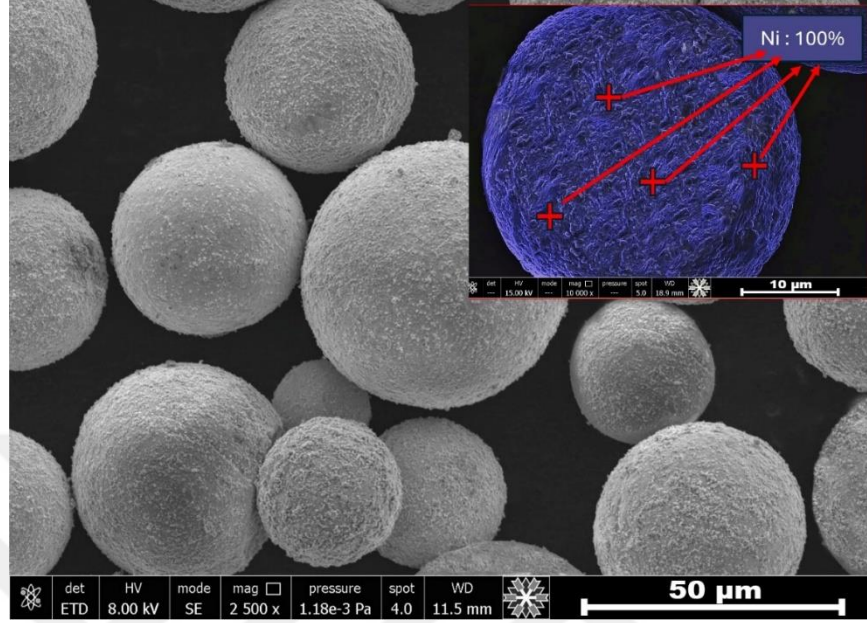
Şekil 4.11. WC-NiP malzeme kullanılarak farklı parametrelerde üretilen kesici uçlar

Üretimi gerçekleştirilen kesici uçlar incelendiğinde aynı katman üzerine tek lazer vuruşu yapılan %60 yk ve %70 yk miktarına sahip numunelerin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Aynı katman üzerine çift vuruş ve üç vuruş yapılan numunelerin uçlarında birleşme kaynaklı sorunların olduğu gözlemlenmiş ve kullanılan bu toz malzeme için yüksek enerji değerine sahip olan çift vuruş ya da üç vuruş gibi stratejilerden uzaklaşmıştır. Ayrıca yapıda bulunan P elementinin üretim sırasında kıvılcım oluşumunu ve lazer yansımalarını artırarak üretime olumsuz yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapıda bağlayıcı olarak bulunan Ni oranının artırılması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden tekrar toz kaplama prosesine dönülmüş ve yapıdan P'nin ayrılması ve Ni oranının artırılması için farklı bir toz kaplama prosedürü uygulanmıştır.

4.5. Akımsız Ni Kaplanan WC Toz Malzeme (WC-Ni) Analizleri

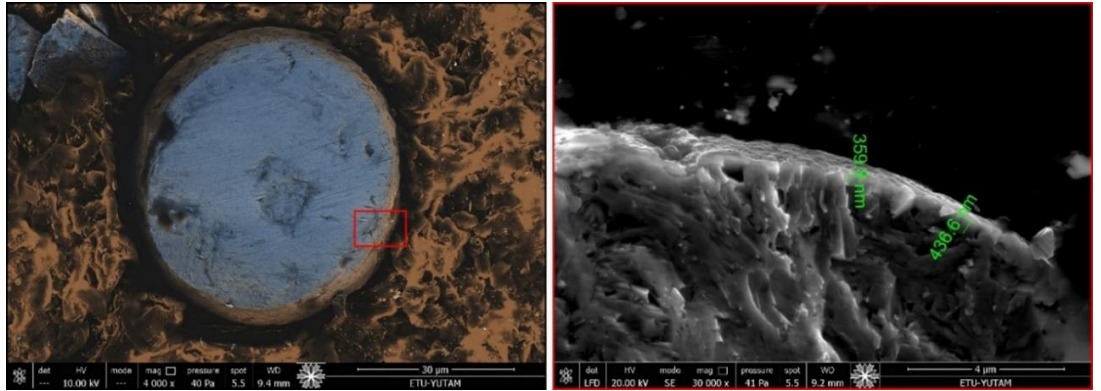
Akımsız Ni-P kaplanan WC toz malzeme ile gerçekleştirilen üretim denemeleri sonucunda malzeme içerisinde bağlayıcı olarak görev yapan Ni-P'nin oldukça düşük olduğu ve yapıdaki P'nin üretim sırasında olumsuzluklara sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden WC toz malzeme üzerine sadece Ni ile kaplama prosesi gerçekleştirilmiş ve

başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu toz malzemeye ait SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. WC-Ni kaplamaya ait SEM görüntüsü ve EDS analizi

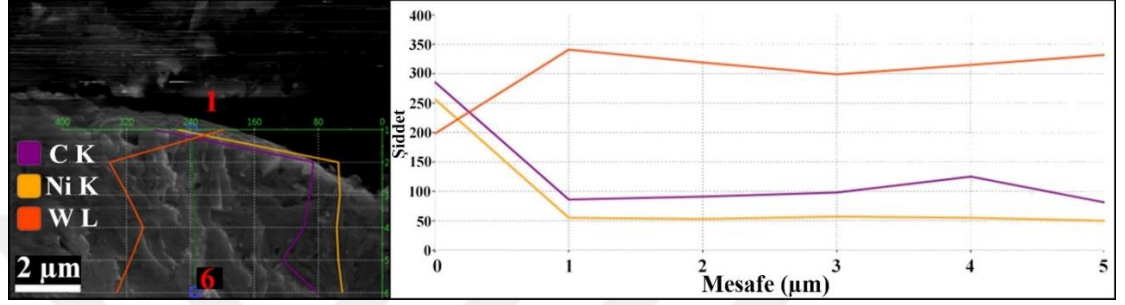
Şekil 4.12’deki SEM görüntüsü incelendiğinde WC toz malzeme üzerinde Ni kaplamanın homojen bir şekilde dağıldığı ve başarılı bir şekilde kaplandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. WC-Ni toz malzemeye ait kaplama kalınlığı görüntüleri

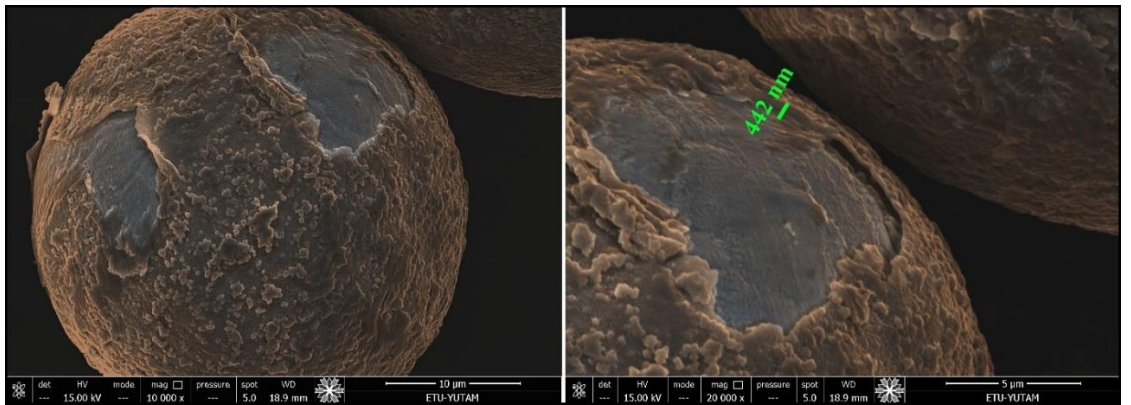
Toz malzemedeki kaplama kalınlığının belirlenmesi için iki farklı yol izlenmiştir. İlk yöntem olarak, tozlar bakalite alınarak zımparalanmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan SEM görüntüleri Şekil 4.13’te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde kaplama kalınlığının yaklaşık 400 nm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çizgisel olarak EDS alınarak

sonuçlar Şekil 4.14'te sunulmuştur. Bu EDS sonuçları incelendiğinde 1 noktasından 6 noktasına doğru Ni ve C oranının azaldığı W oranının arttığı görülmektedir. Toz malzemeden EDS alınırken karbon bant kullanılmıştır ve 1 noktasında bu banttandır. C oranının yüksek çıktığı, banttandır uzaklaştıkça ise düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak 1 noktasındaki Ni oranının fazlalığı ve 6 noktasına gidildikçe Ni oranının düşmesi akımsız Ni kaplamanın başarılı bir şekilde WC toz malzeme üzerine uygulandığını göstermiştir.



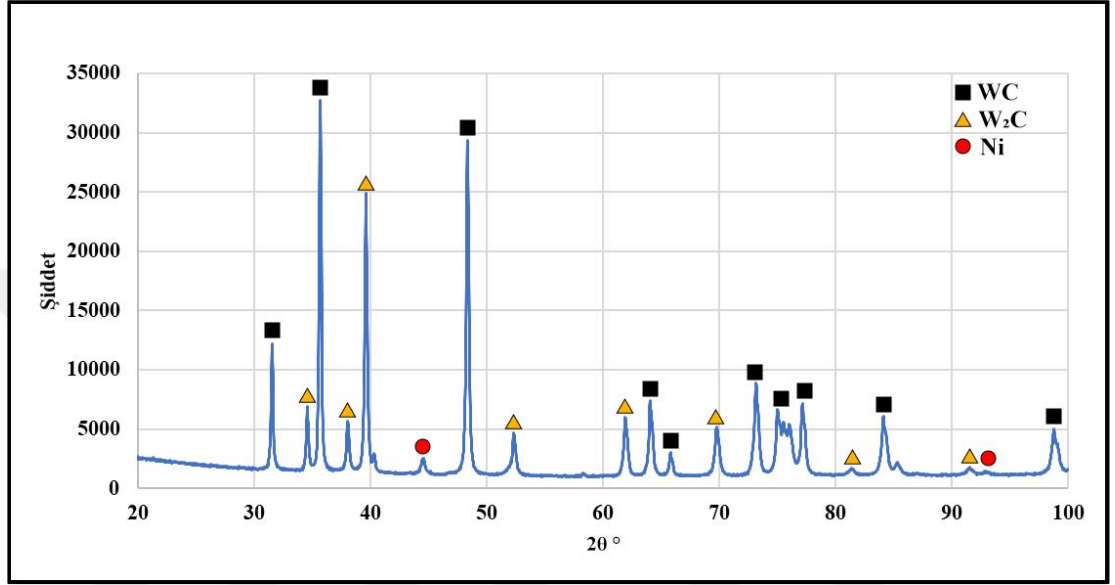
Şekil 4.14. WC-Ni toz malzemenin kaplama tabakasına ait çizgisel EDS grafikleri

Toz partiküllerinin üzerindeki kaplama kalınlığının belirlenmesi için ikinci yöntem olarak da kaplama kalınlığının SEM'de görüntülenebilmesi adına kaplamanın bir kısmında kırılmış bir bölge oluşturmak amacıyla bir poşet içerisine alınan toz malzeme çekiçe deforme edilmiştir. Daha sonra toz partikülleri SEM cihazında analiz edilerek kaplamanın hasar aldığı yerler tespit edilmiş ve elde edilen görüntü Şekil 4.15'te sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere kaplama kalınlığı yaklaşık 400 µm olarak tespit edilmiştir. Her iki yöntemle de elde edilen kaplama kalınlığının birbirini doğrular nitelikte olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. WC-Ni toz malzemeye ait kaplama görüntüleri

WC-Ni toz malzemesine ait XRD grafiği Şekil 4.16’da sunulmuştur. XRD grafiği incelendiğinde WC ve W_2C fazlarının yanı sıra bir de Ni fazları tespit edilmiştir. WC-NiP toz malzeme ile karşılaştırıldığında Ni piklerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu da akımsız Ni kaplamanın NiP kaplamaya göre WC toz partiküllerine daha iyi bir tutunma sergilediğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.16. Ni kaplanmış WC toz malzemeye ait XRD grafiği

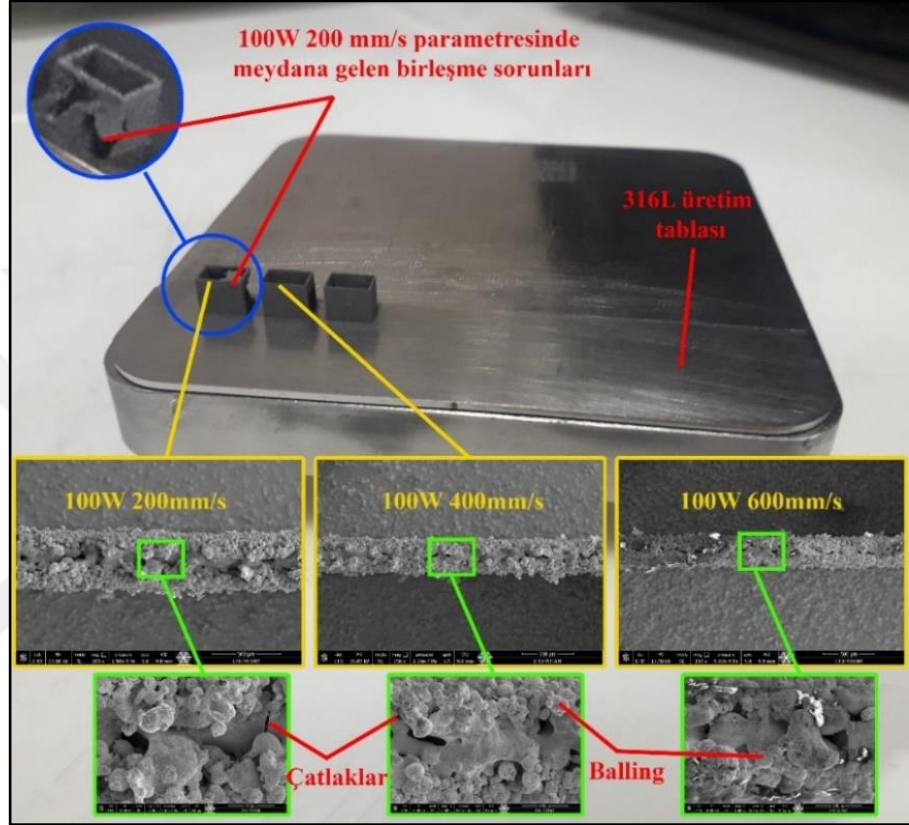
4.6. WC-Ni Toz Malzeme ile SLE Üretimleri

Akımsız kaplama ile elde edilen WC-Ni toz malzeme kullanılarak kontur yapıları, prizmatik numuneler ve kesici uç üretimleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen üretimler, bir önceki bölümde detayları verilen WC-NiP toz malzemeyle gerçekleştirilen üretimler ile karşılaştırılmıştır.

4.6.1. WC-Ni toz malzeme ile kontur üretimleri

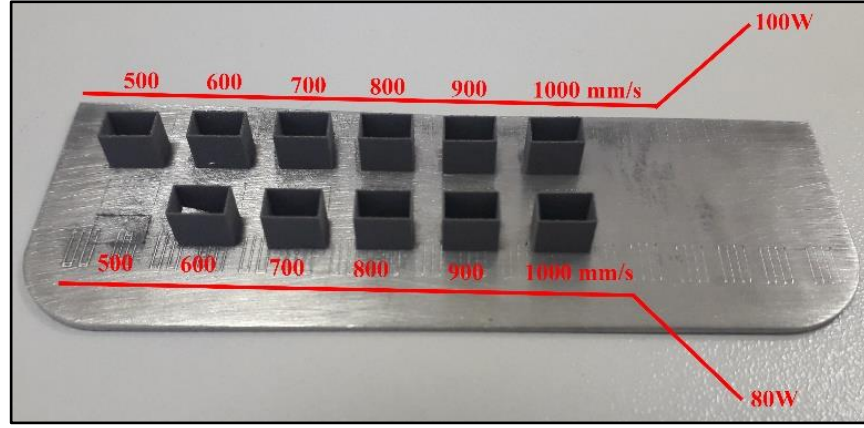
WC tozlarının akımsız Ni ile kaplanması sonrası elde edilen WC-Ni toz malzeme ile kontur yapılarının üretimi ilk önce 100 W lazer gücünde 200, 400 ve 600 mm/s tarama hızlarında yapılmıştır. Bu toz malzeme üzerinde denenen 3 farklı üretim parametresi ile başarılı bir şekilde kontur numuneleri üretilmiştir. Ancak sadece 100 W lazer gücü ve 200 mm/s tarama hızına sahip parametrede üretilen kontur yapısında birleşme sorunları

(kırılmalar) meydana gelmiştir. Bu kırılmaların düşük ilerleme hızı ve yüksek lazer gücü kullanılmasının bir sonucu olan yüksek enerji yoğunluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek lazer tarama hızına sahip parametrelerde ise topaklanma etkisi (balling effect) görülmüştür. Şekil 4.17’de bu kontur yapılarının üretimine ait üretim ve SEM görüntüleri sunulmuştur.



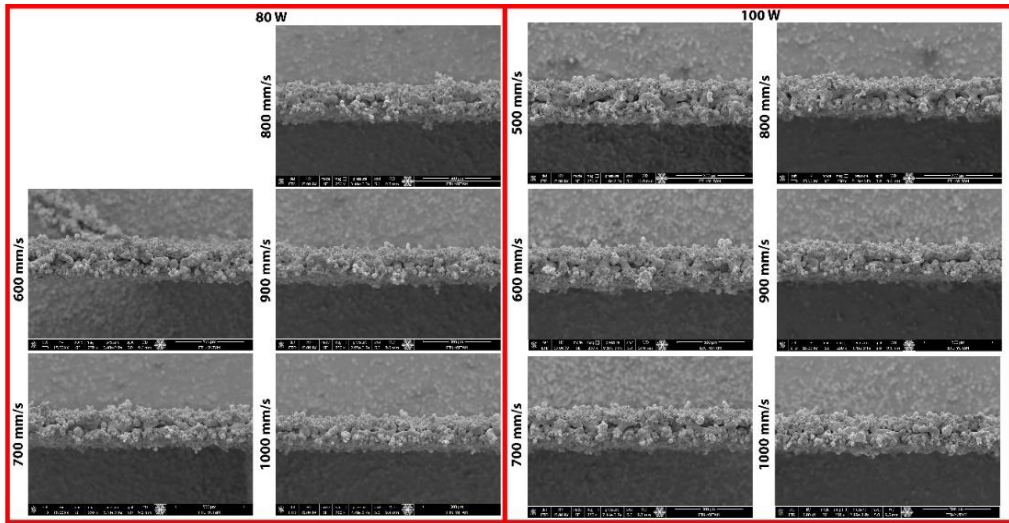
Şekil 4.17. 100 W lazer gücünde 200, 400 ve 600 mm/s tarama hızlarında WC-Ni toz malzemedan yapılan üretim.

100 W lazer gücü ve 200, 400 ve 600 mm/s lazer tarama hızlarında gerçekleştirilen kontur üretimleri istenilen özelliklere sahip olmadığından dolayı, bir seri de 100 W ve 80 W lazer güçlerinde 500, 600, 700, 800, 900 ve 1000 mm/s lazer tarama hızlarında kontur üretimi yapılmıştır. 80 W lazer gücünün kullanılmasının ısı girdisini azaltarak çatlakları iyileştirmesi beklenmiştir. Bu üretime ait görseller Şekil 4.18’de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde üretimi gerçekleştirilen kontur yapılarında katmanlar arası birleşmenin zayıf olduğu bu yüzden de 80 W lazer gücü ve 500 mm/s lazer tarama hızına sahip olan tek duvar yapısının kırıldığı göze çarpmaktadır. Ayrıca bazı kontur yapılarında bariz çatlakların bulunduğu ve bu çatlakların katmanlar arası birleşmede sorun oluşturduğu gözlemlenmiştir.



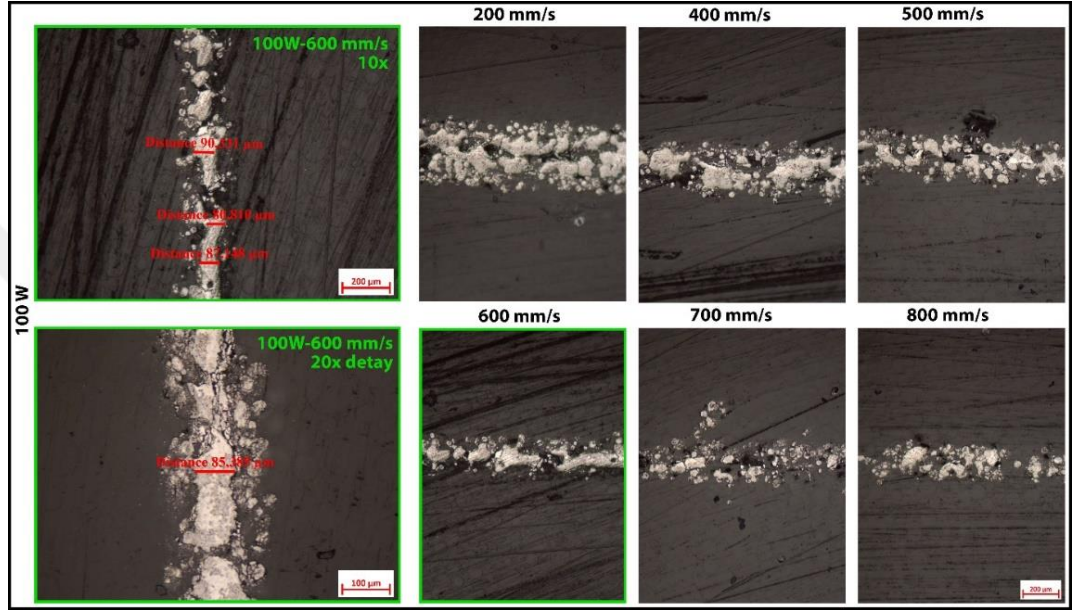
Şekil 4.18. 80 ve 100 W lazer gücünde 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemedan yapılan kontur üretimleri.

Kontur üretimlerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.19’da sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde görüntüler arasında önemli bir farkın göze çarpmadığı, 80 W lazer gücüne sahip kontur yapıların 100 W lazer gücüne sahip olan kontur yapılara göre kalınlığının daha az olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca 80 W ile 100 W lazer güçleri kıyaslandığında 100 W lazer gücü ile üretilen konturlar üzerinde bir eriyik bölge oluşturulduğu görülmüş olup, 80 W lazer gücünün yeterli bir eriyik bölge oluşturmadığı ve WC-Ni toz malzeme için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca 80 W lazer gücünün ısı girdisini azaltarak kontur yapılarının kalınlığını düşürdüğü fakat çatlak oluşumunun önüne geçemediği görülmüştür. 100 W lazer gücü kullanılarak üretilen kontur yapıları incelendiğinde, en iyi geometrik bütünlük ve homojenliğe sahip yapının 600 mm/s tarama hızı ile üretilen numuneler için elde edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. 80 ve 100 W lazer gücünde 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemedan yapılan kontur üretimlerine ait SEM görüntüleri.

100 W lazer gücüne sahip kontur yapılar, üretim tablasından ayrılarak bakalitile kalıplandıktan sonra metalografik parlatma işlemlerinden geçirilmiş ve duvar kalınlığının belirlenmesi için optik mikroskopta incelenmiştir. Optik mikroskoptan alınan görüntüler Şekil 4.20’de sunulmuştur. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde en iyi birleşmenin 100 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızında olduğu görülmüş ve bu parametreler için duvar kalınlığı yaklaşık 85 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.20. 100 W lazer gücü, 500-1000 mm/s tarama hızları arasında WC-Ni toz malzemeden üretilen tek duvarların optik mikroskop görüntüleri.

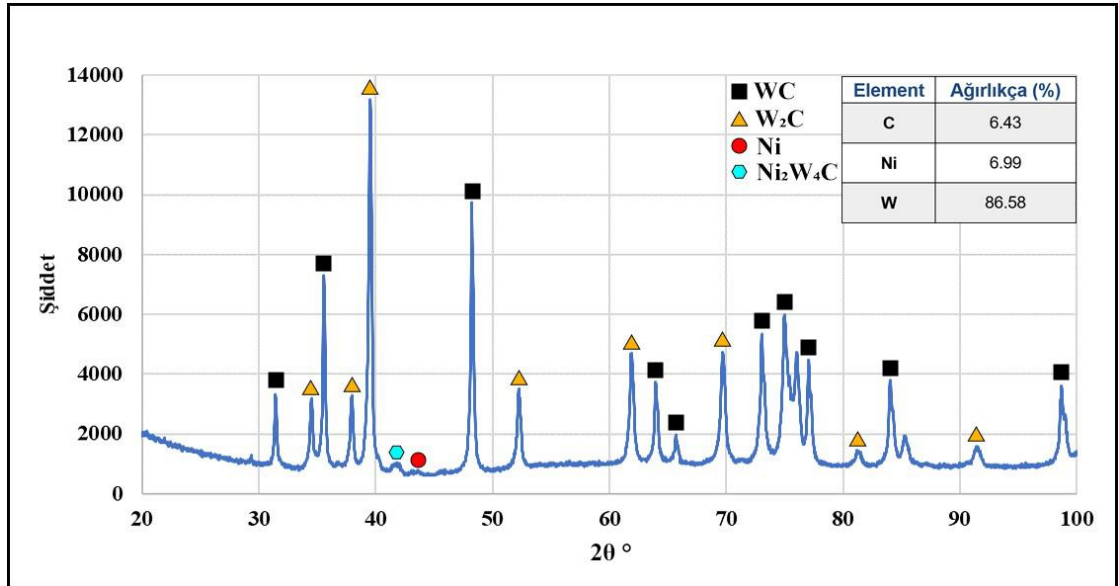
4.6.2. WC-Ni toz malzeme ile prizmatik numune üretimleri

Tez çalışmaları kapsamında, lazer gücü ve tarama hızı değerleri belirlendikten sonra en uygun yana kayma mesafesi değeri belirlenmeye çalışılmıştır. WC-Ni toz malzeme ile 100 W lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı değerlerinde gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen 85 μm duvar kalınlığı esas alınarak farklı yana kayma miktarları (%30-90 arası 10’ar artım) ve sürekli lazer stratejisi kullanılarak nikel üretim tablası üzerinde 8x8x6 mm boyutunda prizmatik numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu üretime ait görseller Şekil 4.21’de sunulmuştur. Üretilen numuneler incelendiğinde, WC-Ni toz malzemenin bütünlük ve destek yapılarının kalitesi açısından WC-NiP toz malzemeye nazaran açık bir şekilde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 4.21. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numuneler

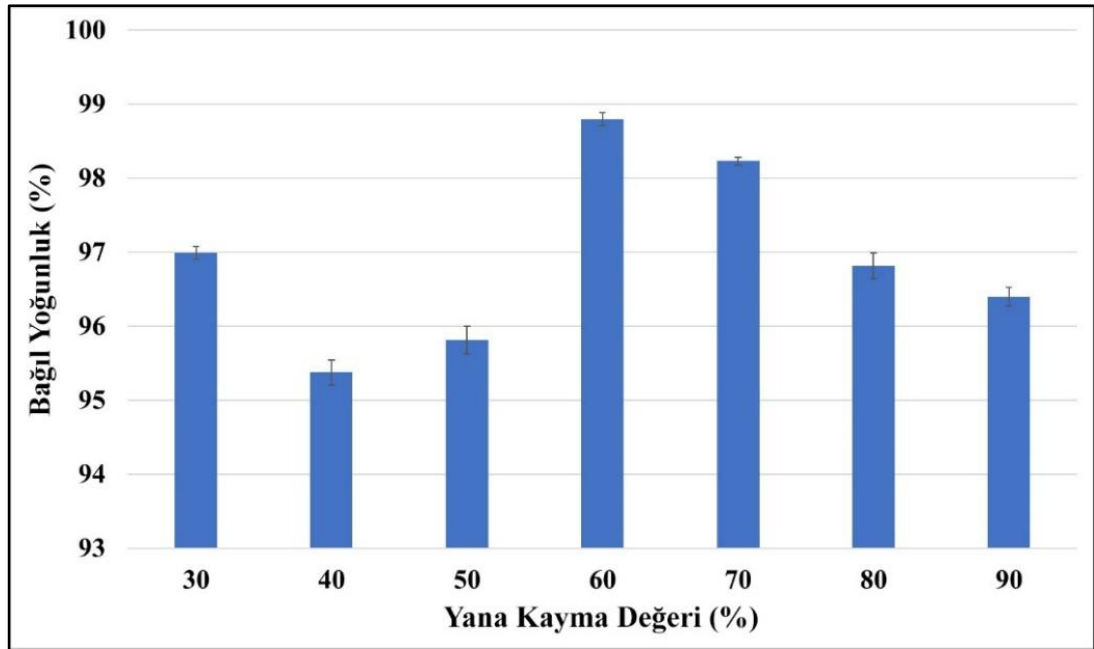
WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği Şekil 4.22’de sunulmuştur. XRD sonuçları incelendiğinde, WC-Ni malzemeden üretilen numunelerde 151 girdisi kaynaklı nikelin buharlaşması sonucunda yapıdaki Ni oranının düştüğü ve bu sebeple XRD piklerindeki şiddetin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca WC-Ni malzemesi kullanılarak üretilen numunede $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ fazının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Guo et al. 2011). Ek olarak, piklerdeki bu düşüşü doğrulamak üzere numunelere EDS analizleri gerçekleştirilmiş ve EDS sonuçları da Şekil 4.22’de verilmiştir. Yapılan EDS analizi incelendiğinde, Ni oranının WC-Ni toz malzemenin sahip olduğu Ni oranından oldukça düşük geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, EDS ve XRD analizlerinin birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.22. WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği ve EDS analizi

4.6.3. Prizmatik numunelere ait doluluk oranları ve mikroyapısal özellikleri

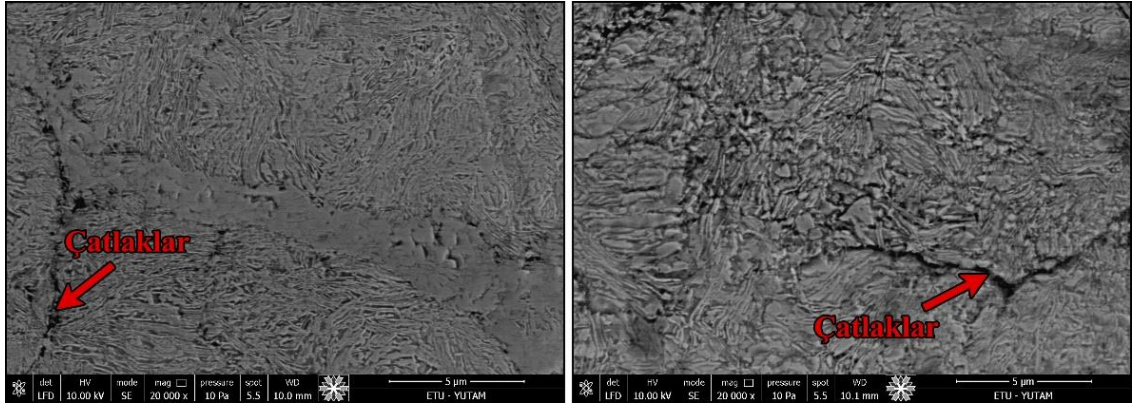
SLE yöntemi ile üretilen WC-Ni prizmatik numunelerin yoğunluk hesaplaması, Arşimet prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tungsten karbür ve nikelin teorik yoğunlukları sırasıyla 15,63 ve 8,9 g/cm³ olarak alınmıştır. Kaplanmış tozun teorik yoğunluğu karışım yasasına göre belirlenebilir. Bu nedenle, kompozit numunelerin teorik yoğunluğunu belirlemek için görünür yoğunluğun karşılaştırılmasıyla kompozitlerin bağıl yoğunluğu belirlenebilir (Amiri-Moghaddam and Kalantar 2017). Bağıl yoğunluk hesaplanırken, WC çekirdek boyutu 30 µm ve Ni kaplama kalınlığı ise 400 nm olarak alınmıştır. Daha sonra, bu değerlere göre toz partikülleri bir küre olarak SolidWorks yazılımında modellenmiş ve hacimsel hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre, WC-Ni toz partikülünün hacmi 15298,57 µm³ olarak ve kaplanmamış WC toz partikülünün hacmi 14137,17 µm³ olarak belirlenmiştir. Hacim oranına göre Ni oranı yaklaşık olarak %8 olarak belirlenmiştir. Belirlenen hacim oranına göre, teorik ağırlık oranı hesaplanmış olup, bu hesaplama sonucunda, Ni oranı yaklaşık olarak %5 olarak ve tam dolu numune yoğunluğu 15,2935 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Elde edilen tam dolu yoğunluk değerinin literatürle uyumlu olduğu gözlenmiştir (Li et al. 2018). Bağıl yoğunluklar, tam dolu yoğunluk ile karşılaştırma yapılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.23'te sunulmuştur.



Şekil 4.23. Arşimet metodu kullanılarak elde edilen bağıl yoğunluk değerleri

Bu yöntemle göre, en yüksek bağıl yoğunluğa sahip numune yaklaşık olarak %98,8 ile %60 yk değerinde üretilen numune için elde edilmiştir. %70 yk değeri ile üretilen numunenin ise %98,3 bağıl yoğunluk değeri ile %60 yk numunesine oldukça yakın bir değere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

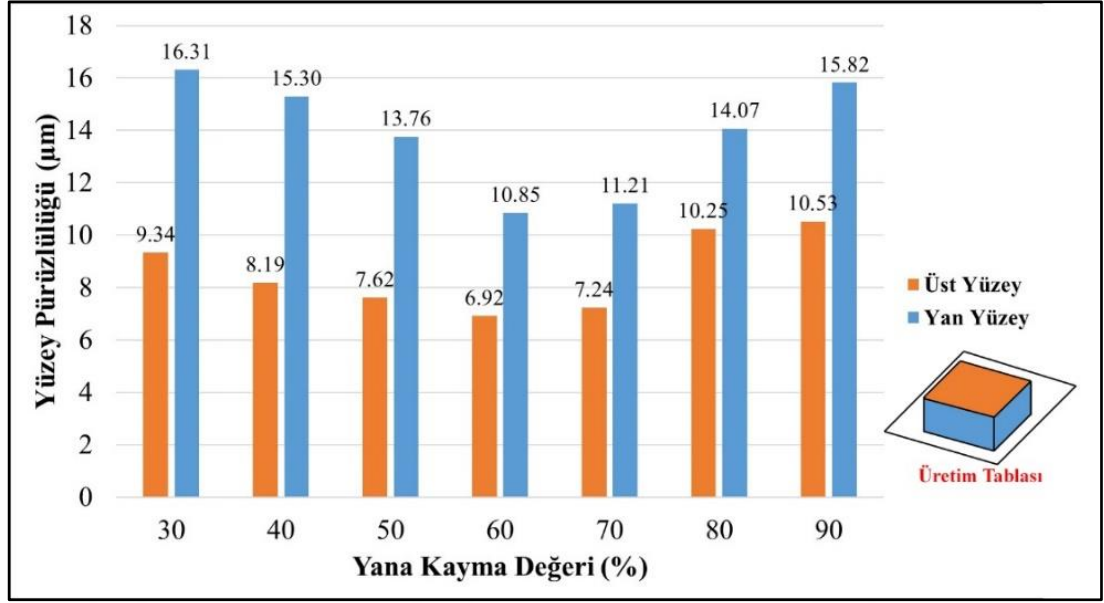
WC-Ni toz malzemeden üretilen en yüksek doluluk oranına sahip prizmatik numunelerin (%60 yk ve %70 yk) mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 4.24'te sunulmuştur. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde numunelerdeki mikroyapının literatürdeki sermet yapılarına benzerlik gösterdiği (Khmyrov et al. 2017b; Li et al. 2018; García et al. 2019; Mendoza Jimenez et al. 2022) ve %60 yk parametresinde üretilen numunenin %70 yk parametresinde üretilen numuneye göre daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu tespit edildi. Ayrıca %60 yk değerine sahip numunede taneler arası boşluğun %70 yk değerine sahip numuneye göre daha az olduğu ve tanelerin homojen bir yapı sergilediği dikkat çekmiştir.



Şekil 4.24. WC-Ni toz malzemeden üretilen %60 yk ve %70 yk değerine sahip numunelere ait mikroyapı SEM görüntüleri.

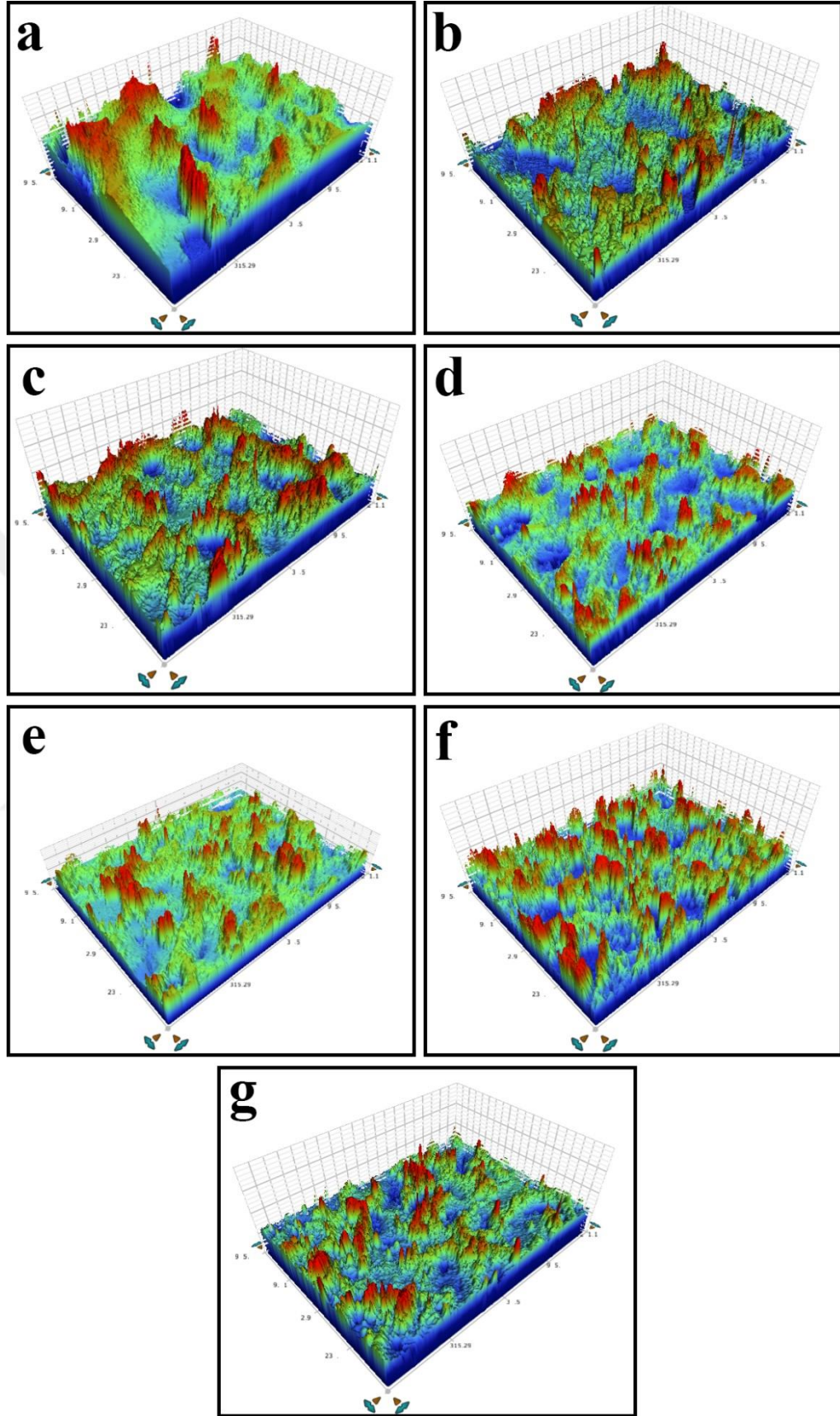
4.6.4. Prizmatik numunelere ait pürüzlülük değerleri

Yana kayma miktarının değiştirilmesi yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Tian et al. 2017; Aqilah et al. 2018; Balbaa et al. 2020). Üretilen prizmatik numunelerin imalat sonrası yüzey pürüzlülüğü hem üst yüzey hem de yan yüzeyler olmak üzere iki ayrı bölgeden alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü grafiği Şekil 4.25'te sunulmuştur.

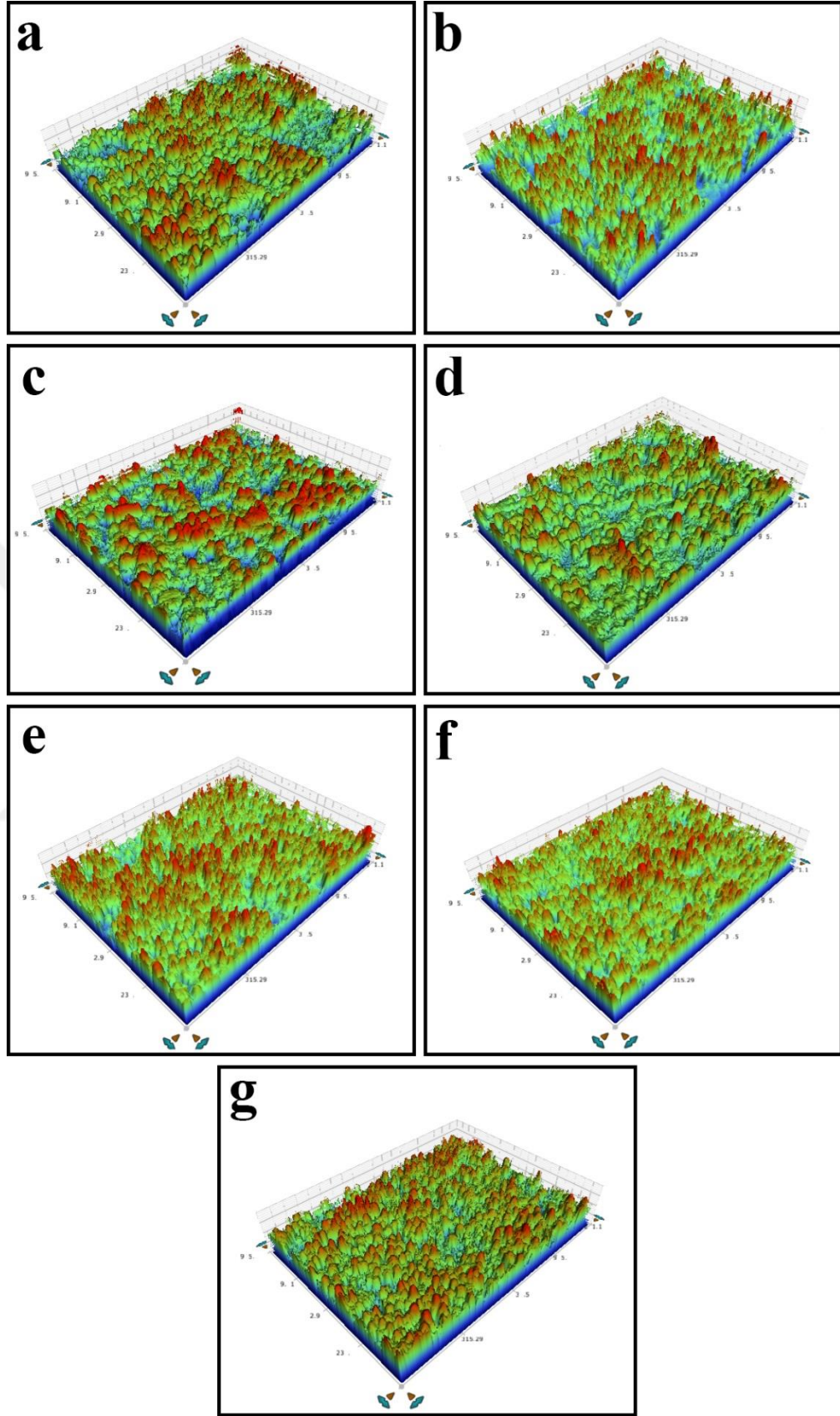


Şekil 4.25. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri.

Yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde düşük ve yüksek yana kayma değerlerine sahip numunelerde daha pürüzlü bir yapının, optimum parametre olan %60 ve %70 yk değerlerinde ise minimum pürüzlülüğe sahip bir yapının olduğu gözlemlenmiştir. Yan ve üst yüzey pürüzlülüklerine ait 3D profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de sunulmuştur.



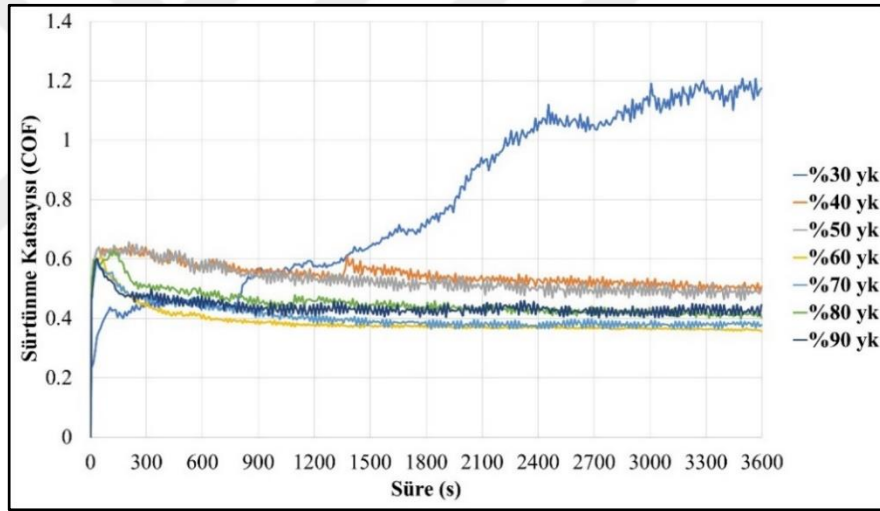
Şekil 4.26. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait üst yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.



Şekil 4.27. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yan yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.

4.6.5. Prizmatik numunelerin tribolojik özellikleri ve mikrosertlik ölçümleri

WC-Ni toz malzeme ile farklı yana kayma değerlerinde üretilen prizmatik numunelere ait sürtünme katsayısı (COF)-süre grafiği Şekil 4.28’de sunulmuştur. Sunulan grafik incelendiğinde, tüm numuneler için COF değerleri aşınma testinin başlangıcında ilk temas ile yükseldiği ve karşıt aşındırıcı ile yüzeylerin birbirine alışması sonrası testin ilerleyen kısımlarında daha kararlı bir form aldığı tespit edilmiştir. %30 yk değerine sahip numunenin yüzeyinde ayrılmalar ve sonrasında aşınma debrisleri meydana geldiğinden 1200’üncü saniyeden sonra COF değeri yükselme rejimine girmiştir. Numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.3’te sunulmuştur. En düşük ortalama COF değeri aynı zamanda en yüksek doluluk oranına sahip olan %60 yk değeri ile üretilen numune için elde edilmiştir.

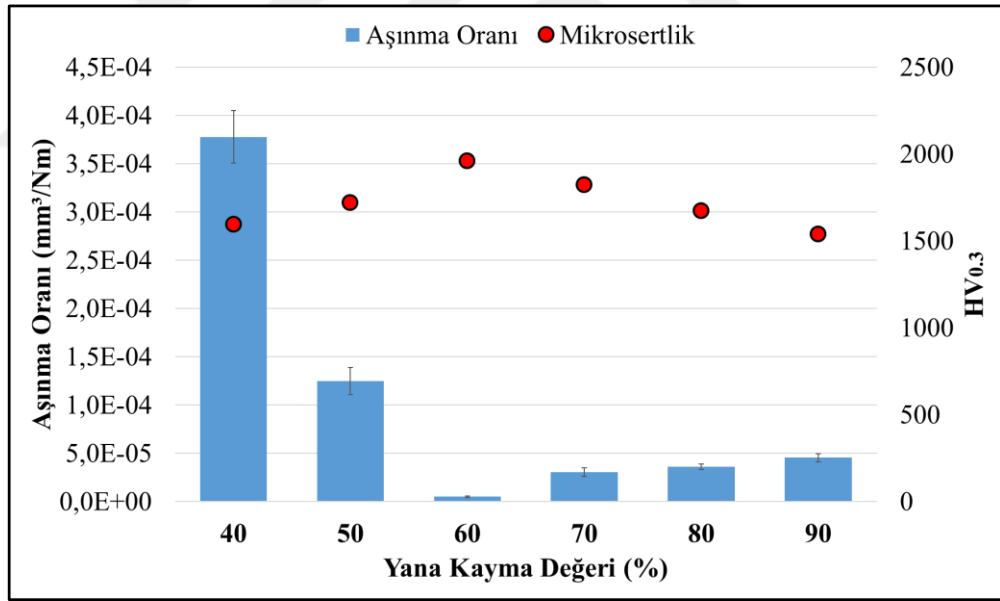


Şekil 4.28. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait COF-süre grafiği

Çizelge 4.3. Farklı yana kayma değerlerinde üretilen WC-Ni prizmatik numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri.

Yana Kayma Değeri (%)	COF
30	0,786
40	0,548
50	0,530
60	0,386
70	0,406
80	0,452
90	0,438

WC-Ni toz malzeme ile üretilen numunelere ait aşınma oranı ve mikrosertlik değerleri Şekil 4.29’da sunulmuştur. Aşınma oranı grafiği incelendiğinde en düşük aşınma oranı %60 yk değeri ile üretilen numunede görülmüş olup, en yüksek aşınma oranı ise %30 yk değeri ile üretilen numunede görülmüştür. Aşınma oranı ve mikrosertlikler birlikte değerlendirildiğinde aşınma oranının sertlikle ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma oranları yüzey pürüzlülüğü ile karşılaştırıldığında en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip numunenin en düşük aşınma oranına sahip olduğu, en yüksek yüzey pürüzlülük değerine sahip olan numunenin ise en fazla aşınma oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Mikrosertlik dağılımları incelendiğinde, en yüksek sertlik değeri %60 yk ile üretilen numune için, en düşük sertlik değeri ise %30 yk ile üretilen numune için elde edilmiştir. Bu çalışmada WC-Ni toz malzeme ile üretilen prizmatik numunelerin en düşük sertlik değerinin 1495 HV_{0,3}, en yüksek sertlik değerinin ise 1962 HV_{0,3} olduğu görülmüştür. Literatürle karşılaştırıldığında mikrosertlik sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür (Kim et al. 2006; Gu and Meiners 2010).

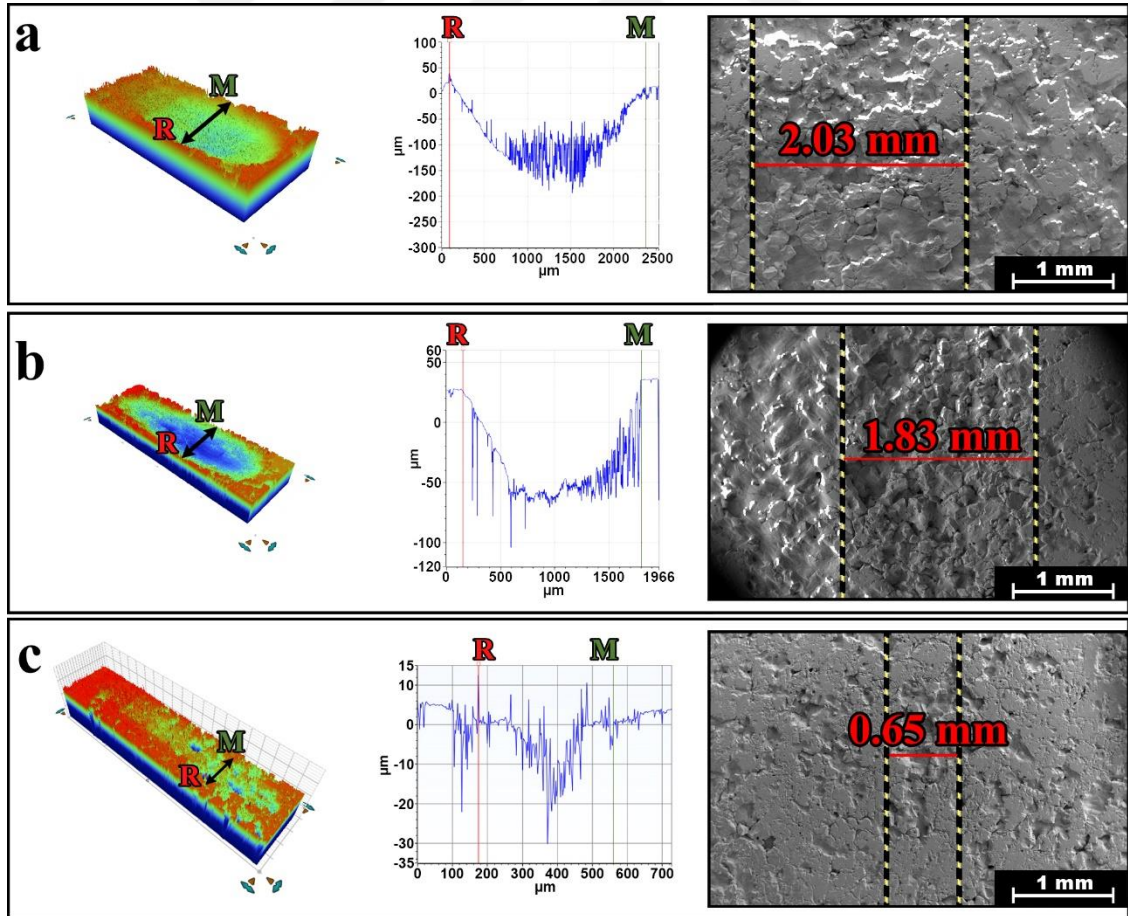


Şekil 4.29. WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait aşınma oranları ve mikrosertlik değerleri.

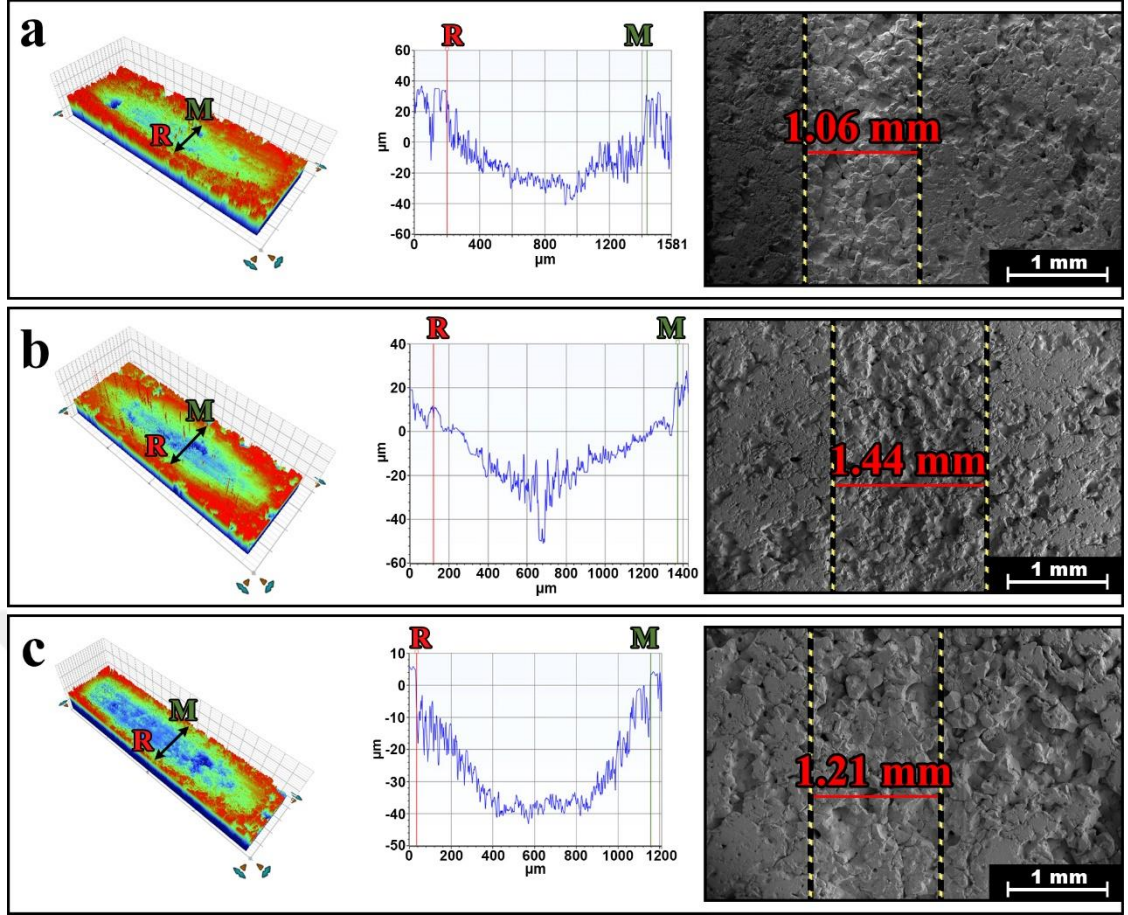
4.6.6. Aşınma izlerinin karakterizasyonu

WC-Ni toz malzeme ile üretilmiş prizmatik numunelere ait aşınma izi 3D optik profilometre ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.30’da ve Şekil 4.31’de sunulmuştur. Aşınma izleri incelendiğinde en yüksek doluluğa ve mikrosertliğe sahip olan %60 yk

değerine sahip numunenin en düşük aşınma izi genişliği ve derinliğine sahip olduğu, testlerde çok yüksek bir normal kuvvet uygulanmasına rağmen bu numune için aşınma izinin neredeyse hiç oluşmadığı gözlemlenmiştir. %60 yk değeri ile üretilen numunelerde mikrosertlik değerinin yüksek oluşu aşındırıcı karşıt pin ile temas alanının azalmasını sağlayarak adeziv aşınmayı azaltması, bağıl yoğunluğun ve WC tozlarının Ni ile bağlanabilirliğinin yüksek olması sebebiyle de abrazif aşınmanın düşük seviyelerde kalması mümkün olmuştur. Nispeten düşük mikrosertlik ve bağıl yoğunluğun bir sonucu olarak %30 yk değeri ile üretilen numunede çok büyük miktarda aşınma gözlenmiş ve en yüksek aşınma oranı değeri elde edilmiştir. Aşınma izlerinden 3D optik profilometre ile ölçüm alınırken %30 yk değerindeki numunenin profilometre sınırlarını aştığından dolayı tam olarak aşınma hacmi elde edilememiştir. Ayrıca SEM görüntülerinde de aşınma izine ait genişlik okunamamış makroskopik olarak ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüme göre %30 yk değerine sahip numunedeki aşınma izi genişliğinin 4 mm boyuna ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.30. WC-Ni toz malzemeden numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 40 yk, b) 50 yk, c) 60 yk.



Şekil 4.31. WC-Ni toz malzeme ile üretilen numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 70 yk, b) 80 yk, c) 90 yk.

Bu aşamaya kadar gerçekleştirilen üretim, test ve analizler bir bütün olarak ele alındığında, SLE ile üretim için belirlenen optimum parametre seti Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

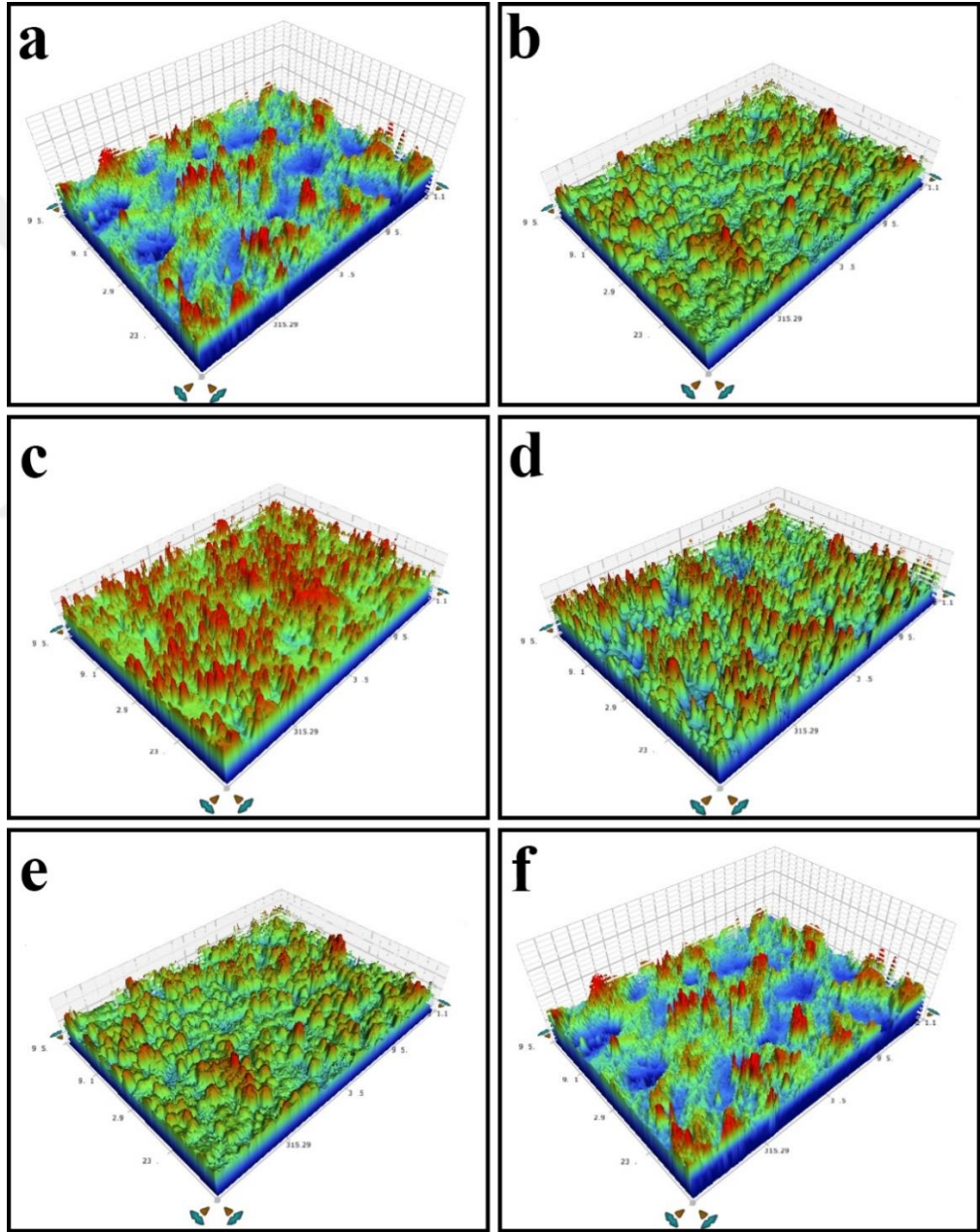
Çizelge 4.4. WC-Ni toz malzemenin optimum SLE parametre seti

Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Yana Kayma (%)
100	600	30	60

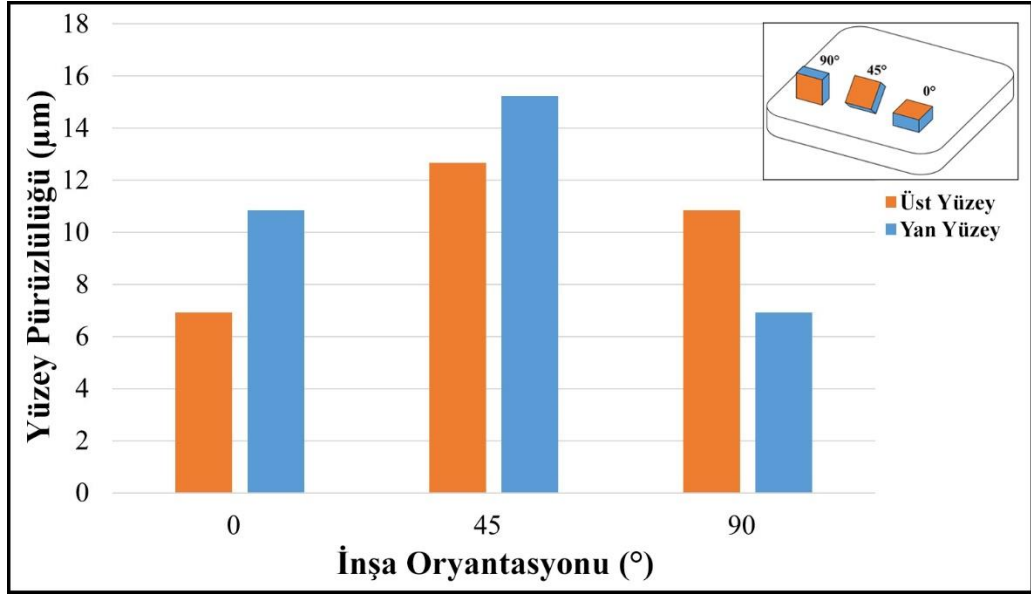
4.6.7. İnşa oryantasyonunun belirlenmesi

WC-Ni toz malzeme için 0° inşa oryantasyonunda optimum parametre seti belirlendikten sonra optimum inşa oryantasyonunun belirlenmesi için Çizelge 4.4'te verilen parametre seti kullanılarak üç farklı oryantasyonda (0° , 45° ve 90°) prizmatik

numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüklerine ait 3D optik profilometre görüntüleri de Şekil 4.32’de, yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.33’te sunulmaktadır. Grafik ve ilgili görseller incelendiğinde, en yüksek pürüzlülüğün 45°’lik inşa oryantasyonu ile, en düşük pürüzlülüğün ise 0°’lik inşa oryantasyonu ile üretilen numuneler için elde edildiği tespit edilmiştir. 45° inşa oryantasyonunda üretilen numunelerdeki yüksek pürüzlülük değerlerinin SLE ile üretimdeki merdiven benzeri oluşumdan kaynaklandığı düşünülmüştür.

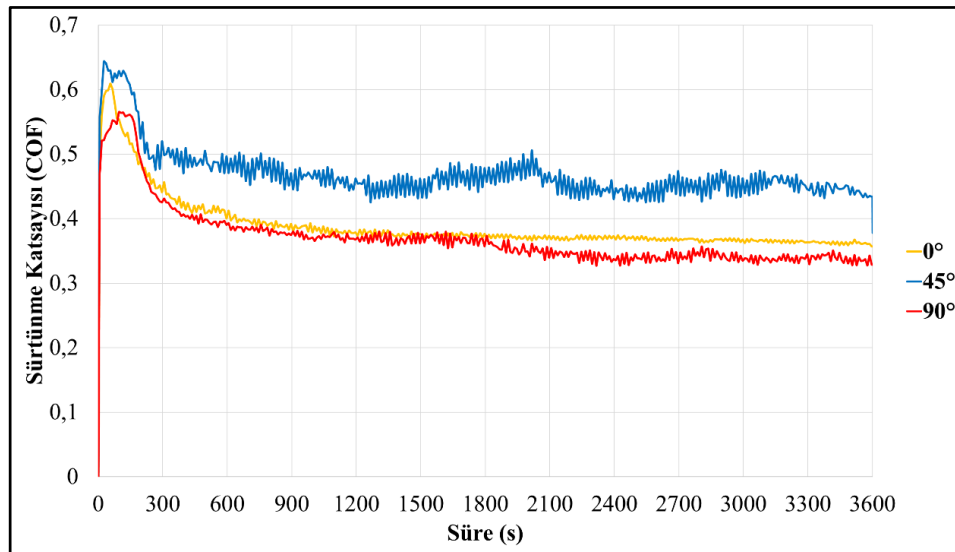


Şekil 4.32. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen prizmatik numunelerin yüzey pürüzlülüğü 3D profilometre görüntüleri; üst yüzeyler a) 0° c) 45° e) 90°, yan yüzeyler b) 0°, d) 45°, f) 90°.



Şekil 4.33. Çeşitli yapı açılarında üretilen prizmatik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Farklı inşa oryantasyonunda üretilen numunelerin sürtünme katsayısı-süre grafikleri Şekil 4.34'te, ortalama COF değerleri ise Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Numunelerin aşındırma süresine göre COF değişimlerinin benzer formda olduğu ve en yüksek ortalama COF değerine sahip olan numunenin aynı zamanda en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerini veren 45° inşa oryantasyonuna ile üretilen numune olduğu tespit edilmiştir. En düşük ortalama COF değerinin ise 90° inşa oryantasyonuna sahip numuneden elde edildiği, ancak 0° inşa oryantasyonuna sahip numune ile karşılaştırıldığında ortalama COF değerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

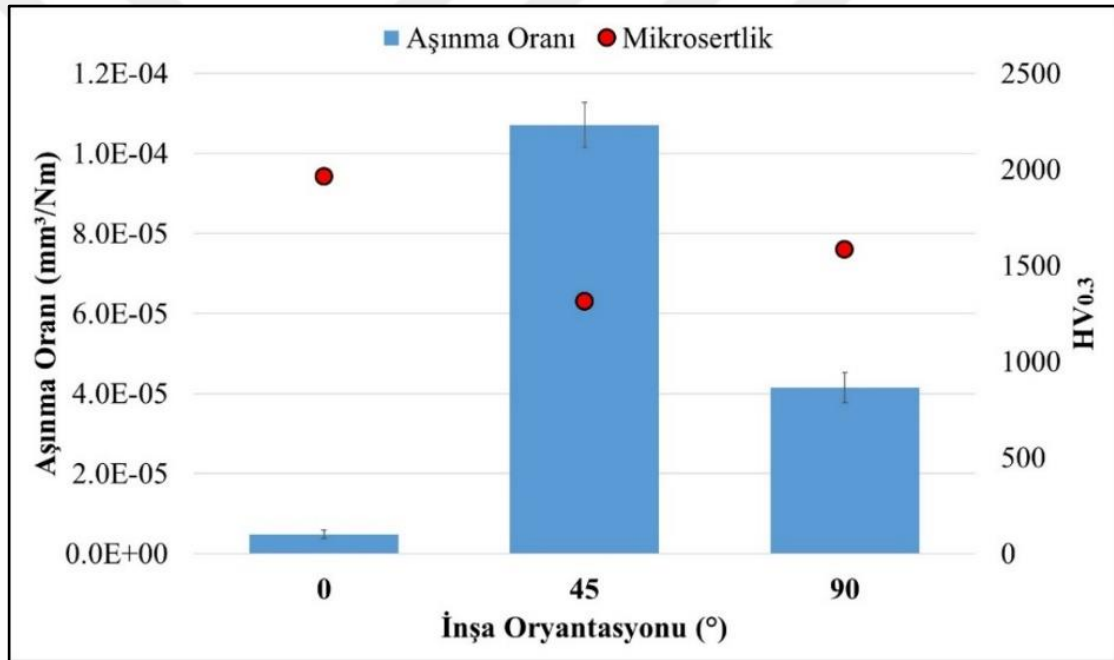


Şekil 4.34. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin COF grafikleri

Çizelge 4.5. Farklı inşa oryantasyonunda üretilen numunelere ait ortalama COF değerleri

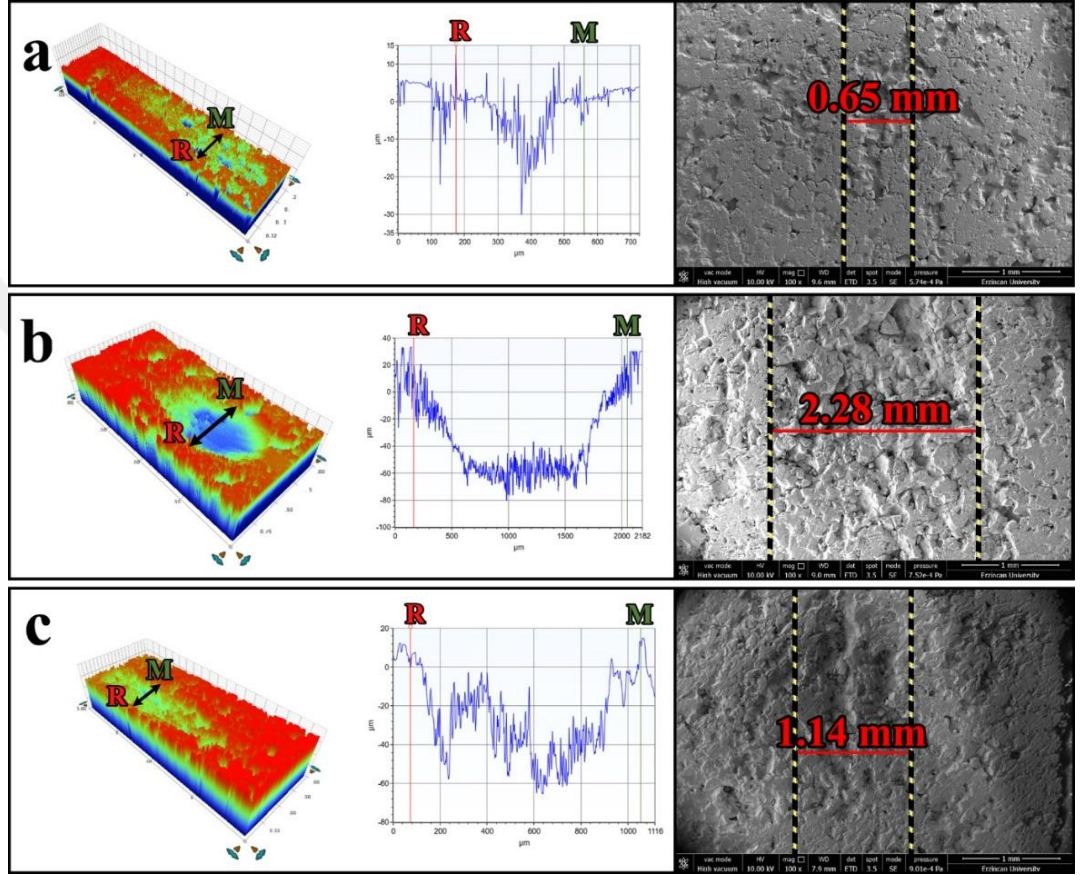
İnşa Oryantasyonu (°)	0	45	90
COF	0,389	0,469	0,371

Farklı inşa oryantasyonlarıyla üretilen numunelerin aşınma oranı ve mikrosertlik grafiği Şekil 4.35'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, 45° inşa oryantasyonu ile üretilen numunenin en düşük mikrosertliğe sahip olduğu, 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numunenin ise en yüksek mikrosertliğe sahip olduğu görülmektedir. Aşınma oranları karşılaştırıldığında ise en yüksek aşınma direncinin yine en yüksek mikrosertliğe sahip olan 0° inşa oryantasyonu kullanılarak üretilen numune için elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 4.35.** Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin aşınma oranı ve mikrosertliği.

WC-Ni toz malzemesi kullanılarak çeşitli inşa oryantasyonlarında üretilen prizmatik numunelerin aşınma izlerine ait 3D-profilometre ve SEM görüntüleri Şekil 4.36'de sunulmuştur. Aşınma izleri incelendiğinde, 0° inşa oryantasyonuna sahip numunenin, en düşük aşınma izi genişliğine ve derinliğine sahip olduğu ve neredeyse hiç aşınma izi oluşmadığı gözlemlenmiştir. 45° inşa oryantasyonuna sahip örneğin ise en yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü, aşınma hızı, mikrosertlik ve mikroyapılar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, 0° inşa

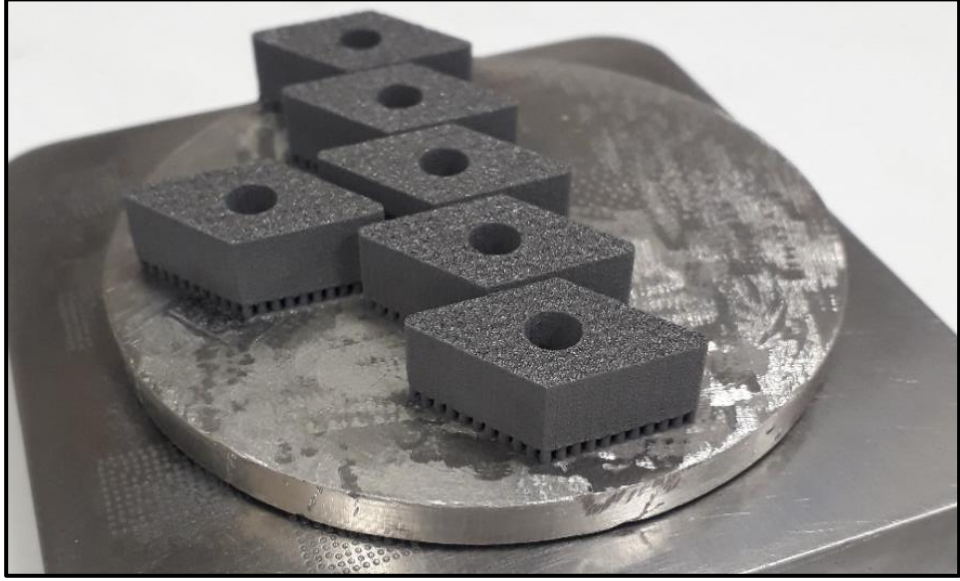
oryantasyonuna sahip numunenin tüm testlerde üstün olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 45° ve 90° inşa oryantasyonuna sahip numunelerin üretim sürelerinin neredeyse 0° inşa oryantasyonuna sahip numunenin iki katı olduğu ve bu nedenle maliyetleri artıracığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle, 0° inşa oryantasyonu optimum inşa oryantasyonu olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.36. Farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerine ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 0°, b) 45°, c) 90°.

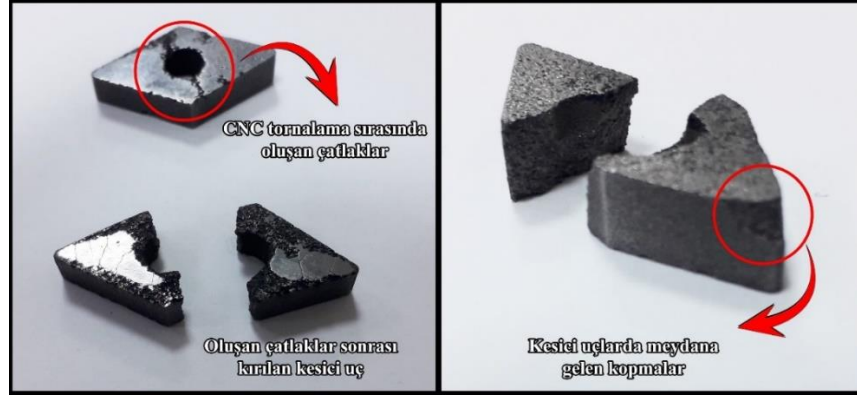
4.6.8. WC-Ni toz malzeme ile kesici uç üretimleri

WC-Ni kaplama toz malzemesi ile belirlenen optimum parametre seti ve inşa oryantasyonu kullanılarak kesici uç üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretime ait görseller Şekil 4.37’de sunulmuştur.



Şekil 4.37. WC-Ni toz malzemeden üretilen kesici uçlar

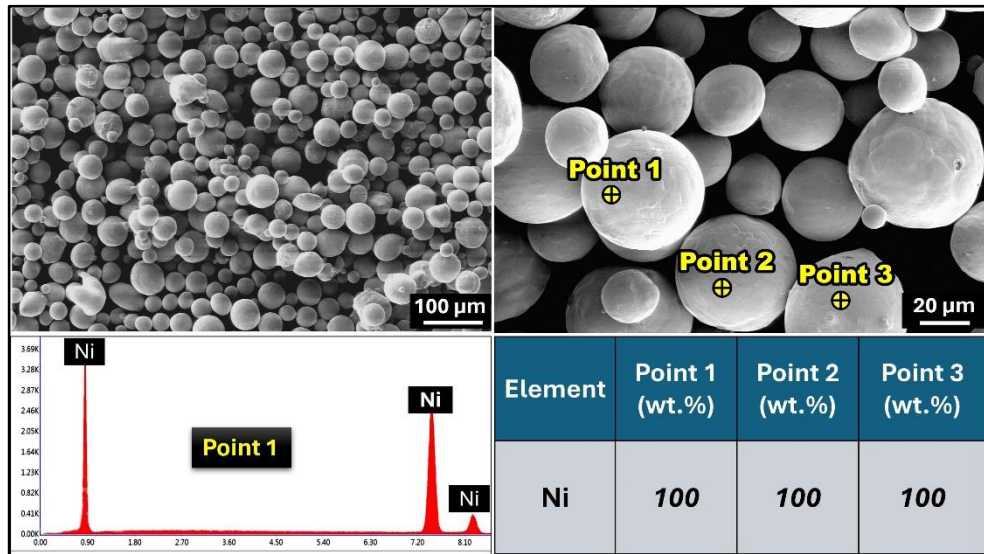
Şekil 4.37 incelendiğinde, WC-Ni toz malzeme ile gerçekleştirilen üretimlerde WC-NiP toz malzemeden üretilen kesici uçlara göre daha iyi bir sonuç alındığı görülmektedir. WC-NiP toz malzemeden üretilen kesici uçlarda özellikle radyus kısımlarında meydana gelen kırılmalar ve katmanlar arası birleşme sorunları WC-Ni toz malzemedeki giderilmiştir. Elde edilen kesici uçlar taşlama ve kenar fırçalama işlemleri sonrası CNC torna tezgahında önce GG25 pik döküm silindirik iş parçası üzerinde denenmiş ancak işleme sırasında Şekil 4.38’de gösterildiği gibi takımların uç kısımlarında kırılmalar ve çatlak oluşumu ile birlikte ortadan ikiye ayrılmalar gözlemlenmiştir. Daha sonra bu kesici uçlar kullanılarak kestamit iş malzemesi üzerinde denenmiş olup, kestamit üzerinde alın ve yüzey tornalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak kullanılacak kesici uçların sadece kestamit iş malzemesi üzerinde performans göstermesi bir başarı kriteri olarak değerlendirilmemiştir. Bu yüzden üretilen kesici uçlardaki bağlayıcılığın daha da iyileştirilebilmesi için WC-Ni toz malzemedeki Ni oranını artırmak amacıyla, WC-Ni toz malzemeye ticari olarak temin edilen küresel formda saf Ni tozu eklenerek çalışma adımları tekrarlanmıştır.



Şekil 4.38. WC-Ni toz malzeme ile üretilen kesici uçlarda meydana gelen kusurlar

4.7. Saf Ni Toz Malzeme

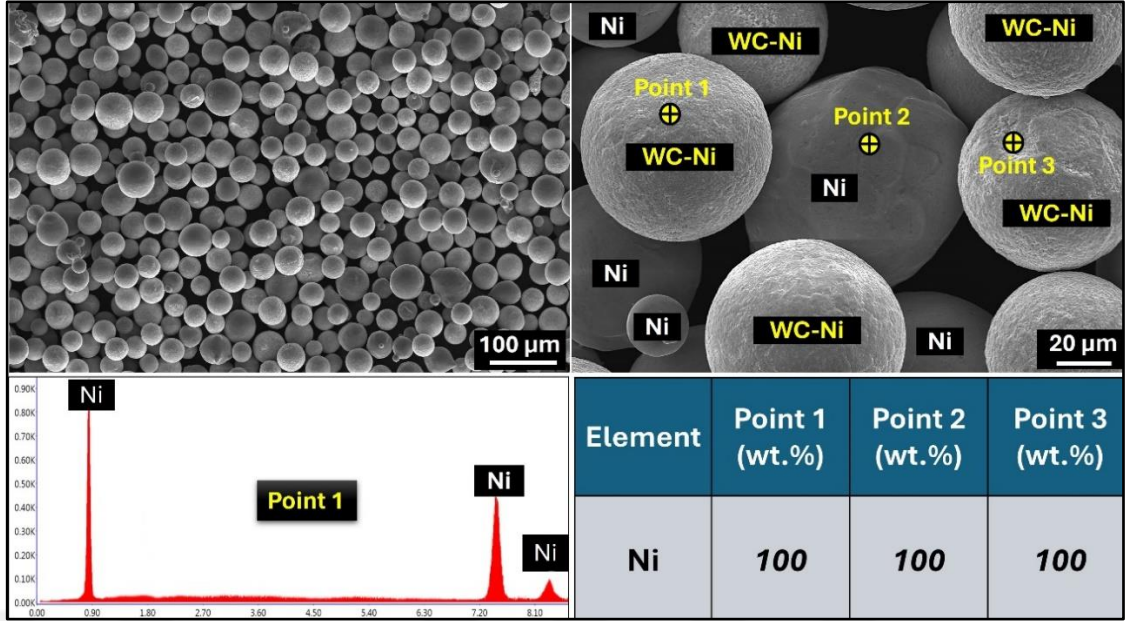
WC-Ni toz malzeme ile tornalama kesici uç üretimleri sonrası, Ni içeriğinin yetersiz olmasından dolayı uçlarda kırılmalar gözlemlenmiştir. Kullanılan toz malzemedeki Ni oranının artırılmasıyla katmanlar arasındaki bağlanma özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla WC-Ni toz malzemeye saf Ni tozu eklenmiştir. Saf Ni tozun SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.39’da sunulmuştur. EDS sonuçları kullanılan tozun %100 Ni içeriğinde olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca SEM görüntüleri, kullanılan Ni tozlarının ortalama parçacık boyutunun 20 ile 50 μm arasında değiştiğini, bazı parçacıkların ise 50 μm 'ye kadar ölçüldüğünü göstermektedir. Küresel bir morfoloji sahip olan tozların parçacık boyutu aralığının karışım toz hazırlandıktan sonra SLE ile üretim için uygun olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 4.39. Saf Ni tozuna ait SEM görüntüleri ve EDS analizi

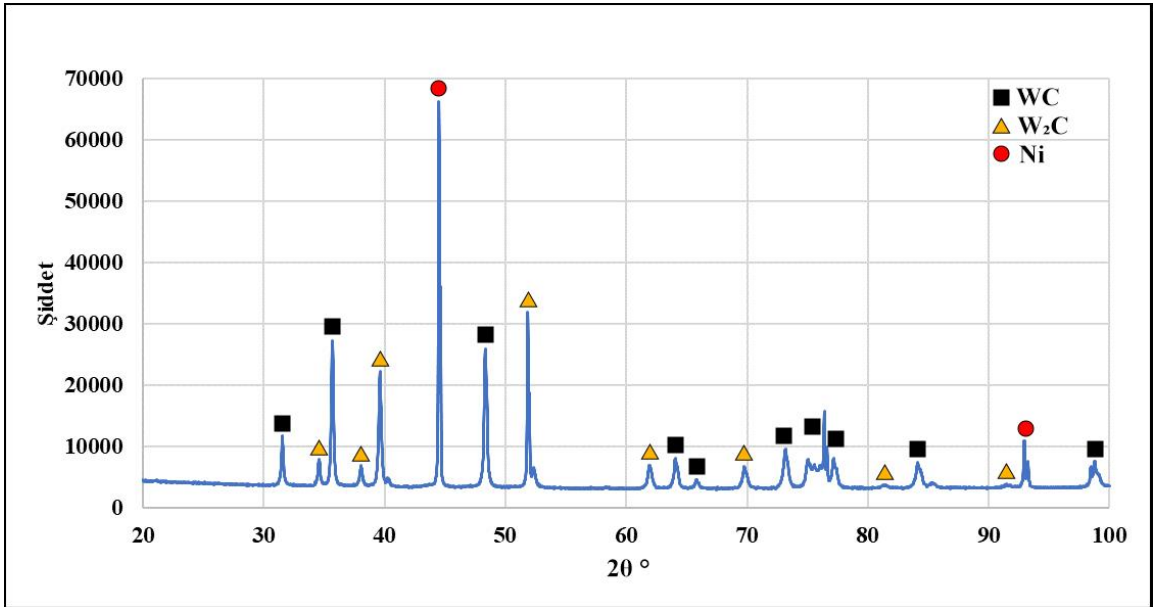
4.8. WC-Ni+Ni Toz Malzeme Analizi

Tez çalışmasında Ni kaplama kalınlığının istenilen düzeye ulaşamaması sebebiyle üretilen numunelerde istenilen doluluk değerleri elde edilememiştir. Bu yüzden kaplama prosesleri WC-Ni toz malzeme üzerinde tekrar denenmiş fakat kaplama kalınlığının artırılmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu işlem sırasında farklı kaplama süreleri de denenmiş olup, elde edilen toz kaplama kalınlığı en fazla yaklaşık 400 nm olarak elde edilmiştir. Bundan dolayı WC-Ni toz malzemedeki Ni oranının artırılması ve bağlayıcılık özelliğinin geliştirilmesi için WC-Ni toz malzemeye 300 gr saf Ni toz malzeme eklenmiştir. Bu karışım daha sonra Ni tozunun homojen dağılımını sağlamak için laboratuvar tipi spiral karıştırıcıda 2 saat süre ile karıştırılmıştır. Elde edilen bu yeni bileşimdeki toz malzeme WC-Ni+Ni olarak adlandırılmış olup, bu tozun SEM ve EDS sonuçları Şekil 4.40'ta sunulmuştur. Şekilde WC-Ni tozlarının saf Ni tozları ile aynı boyut aralığına ve küresel forma sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca WC-Ni+Ni toz karışımının SEM analizi incelendiğinde WC-Ni ve Ni tozlarının homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. WC-Ni+Ni tozlarının SEM görüntüleri daha detaylı olarak incelendiğinde tane sınırları görünür ve düzgün yüzey morfolojisine sahip tozların Ni tozları olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.39). Bunun aksine, WC-Ni tozlarındaki pürüzlü ve dokulu yüzey morfolojisi, daha önceki bir çalışmamızda da ifade edildiği gibi yüzeylerinde akımsız Ni iyonlarının dağılmasıyla oluşan Ni çöktirilerinden kaynaklanmaktadır (Ergüder et al. 2024). Kanıt olarak hem Ni tozlarının hem de WC-Ni tozlarının yüzeylerinin ağırlıkça %100 Ni'den oluşan bir elementel bileşime sahip olduğunu gösteren nokta EDS analizi sonuçları gösterilebilir. Ayrıca WC-Ni tozlarından alınan EDS analizi, yalnızca Ni elementine yönelik tepe noktaları olan bir spektrum göstermektedir. Bulgular, hem akımsız Ni kaplı WC tozlarının hem de saf Ni tozlarının, SLE işlemleri için avantajlı olan boyut ve morfoloji açısından benzer faydalı özellikleri paylaştığını göstermektedir. Ni ve WC-Ni tozlarının WC-Ni+Ni karışımındaki homojen dağılımı, SLE işlemi sırasında tutarlı malzeme özellikleri ve düzgün erime davranışı sağlamaktadır. Ni tozlarının pürüzsüz yüzeyleri iyi akışkanlığı ve katman oluşumunu kolaylaştırırken, WC-Ni tozları üzerindeki Ni çöktirileri genel Ni içeriğine katkıda bulunarak ve WC ile Ni arasındaki bağı güçlendirmektedir.



Şekil 4.40. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait SEM görüntüleri ve EDS analizi

WC-Ni+Ni toz malzemeye ait XRD grafiği Şekil 4.41’de sunulmuştur. XRD grafiği incelendiğinde WC ve W_2C piklerinin yanı sıra yine Ni pikleri belirgin bir şekilde bulunmaktadır. WC-Ni malzeme ile kıyaslandığında Ni piklerinin şiddetindeki önemli ölçüde artış göze çarpmaktadır.



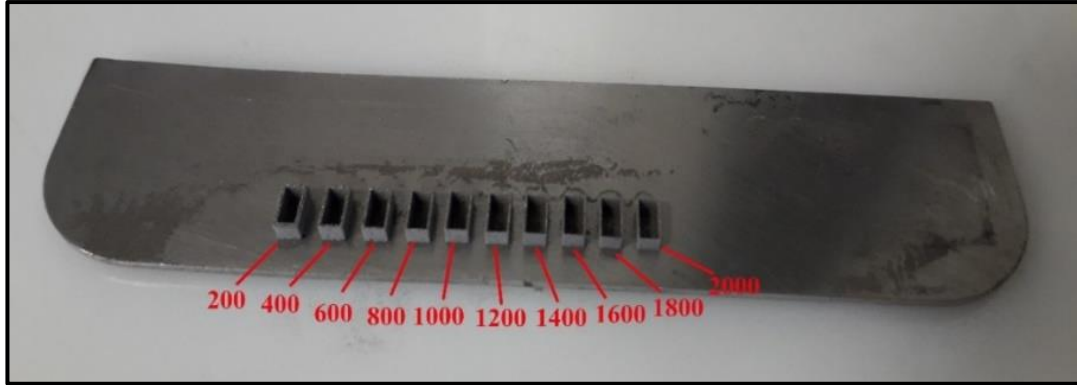
Şekil 4.41. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait XRD grafiği

4.9. WC-Ni+Ni Toz Malzeme ile SLE Üretimleri

WC-Ni toz malzeme kullanılarak üretilen kontur numunelerinde belirlenen duvar kalınlığının kontrol edilmesi amacıyla WC-Ni+Ni toz malzemeden de kontur üretimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu malzeme kullanılarak prizmatik aşınma ve mikroyapı numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen üretimler daha sonra WC-Ni toz malzeme ile üretilen numuneler ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra elde edilen WC-Ni+Ni toz malzemesi ile kesici uçlar üretilmiş ve gerçek kesme koşulları altında işlemeye tabi tutulmuştur.

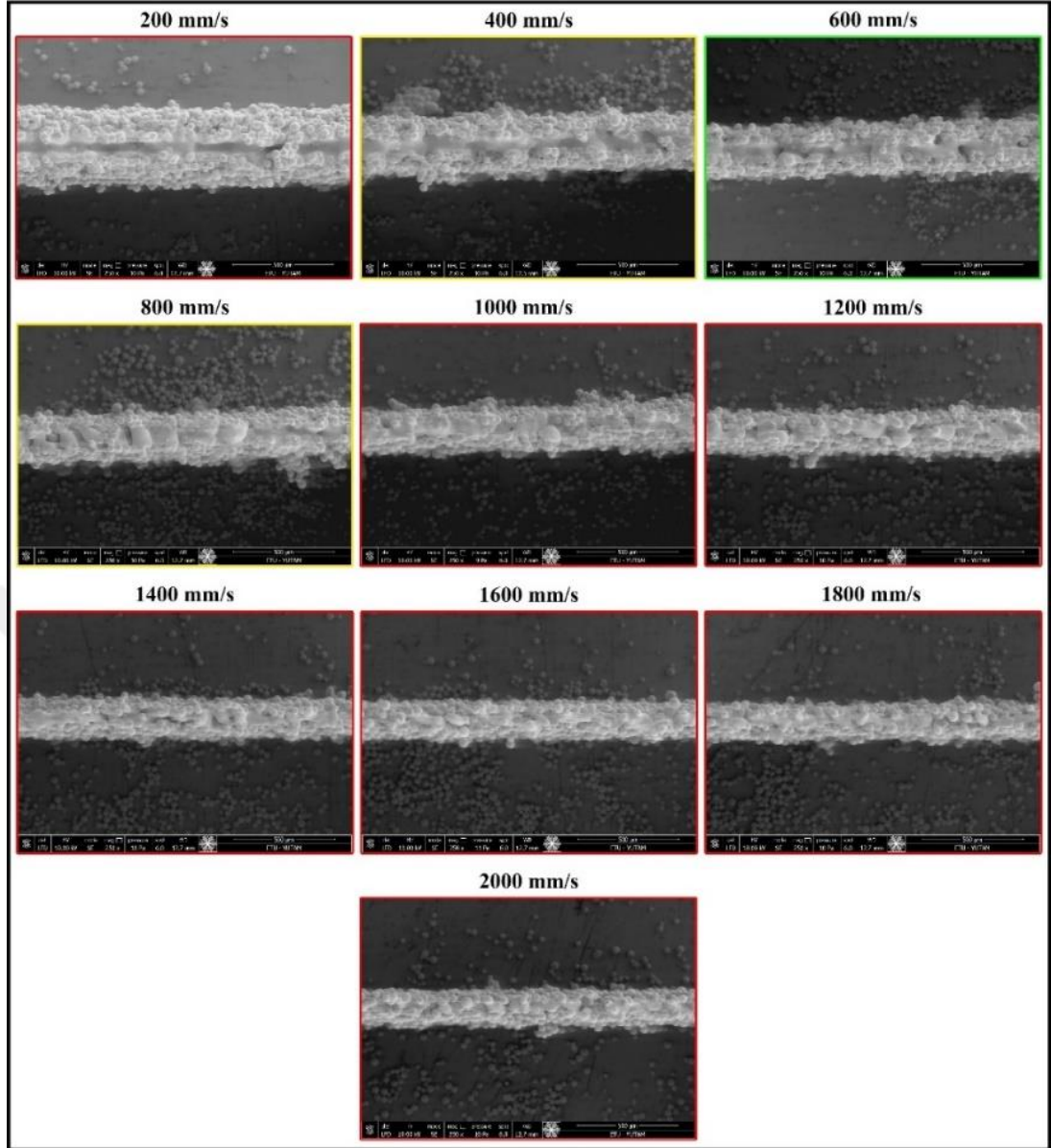
4.9.1. WC-Ni+Ni toz malzeme ile kontur numunelerinin üretimi

WC-Ni toz malzeme ile üretilen konturlarda istenilen homojenlik elde edilemediğinden dolayı daha sonra toz malzemeye 300 gr küresel saf Ni toz malzeme eklenmiş ve daha sonra tekrar kontur üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu üretime ait görsel Şekil 4.42’de sunulmuştur.



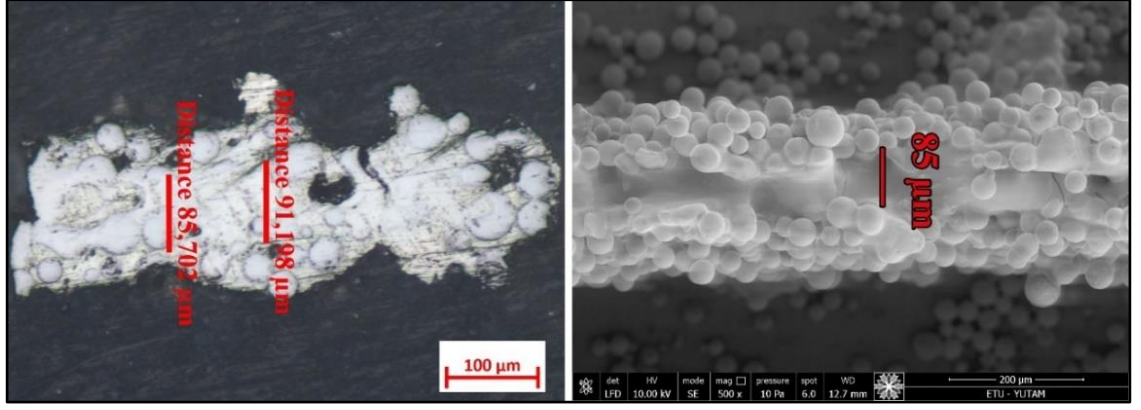
Şekil 4.42. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait kontur üretimleri

Üretim sonrası tekli duvar yapılarından SEM görüntüleri alınmış ve Şekil 4.43’te sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde Ni oranının artması nedeniyle birleşmenin diğer toz malzemelere göre çok daha iyi olduğu ve homojen bir eriyik bölge sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca ilerleme hızının artmasıyla birlikte balling etkisi sebebiyle kontur numunelerinde 800 mm/s ve sonrasındaki lazer tarama hızlarında eriyik bölgenin neredeyse görülemediği tespit edilmiştir.



Şekil 4.43. WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilen kontur numunelerinin SEM görüntüleri

Duvar kalınlıkları üretilen kontur yapıları için hem SEM kullanılarak hem de bakalite alınıp zımparalandıktan sonra optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 4.44'te duvar kalınlığına ait optik mikroskop ve SEM görüntüleri sunulmuştur. Optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde WC-Ni+Ni toz malzemenin duvar kalınlığı yaklaşık 85 μm olarak ölçülmüş olup, WC-Ni malzemenin duvar kalınlığı ile aynı değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Böylece tez çalışmasında duvar kalınlığı belirlenmiş ve bu duvar kalınlığı kullanılarak optimum yana kayma değerinin belirlenmesi için prizmatik numunelerin üretimine geçilmiştir.



Şekil 4.44. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait tekli duvar kalınlıkları

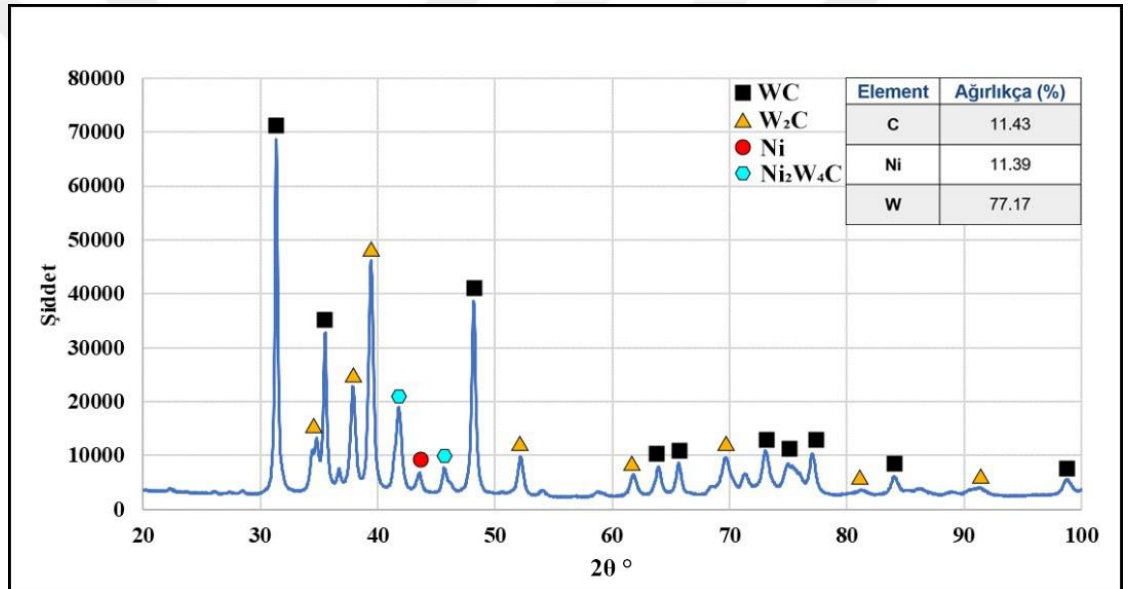
4.9.2. WC-Ni+Ni toz malzeme ile prizmatik numunelerin üretimi

Kontur numunelerine ait duvar kalınlıkları belirlendikten sonra tez çalışmasının üçüncü aşaması olan prizmatik numune üretimi aşamasında, nihai olarak kullanılan WC-Ni+Ni toz malzemeden 100 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızı ve farklı yana kayma miktarları (%30-90 arası 10’ar artım) kullanılarak 8x8x6 mm boyutlarında WC-Ni için elde edilen en iyi inşa oryantasyonu olan 0° inşa oryantasyonunda prizmatik numuneler üretilmiştir. Bu üretime ait görsel Şekil 4.45’te sunulmuştur. Numuneler incelendiğinde WC-Ni toz malzemeye göre Ni oranının artması ile bağlayıcılığın arttığı ve diğer prizmatik numunelere kıyasla daha homojen ve pürüzsüz yüzeylerin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.45. WC-Ni+Ni toz malzemeye ait üretim görüntüsü

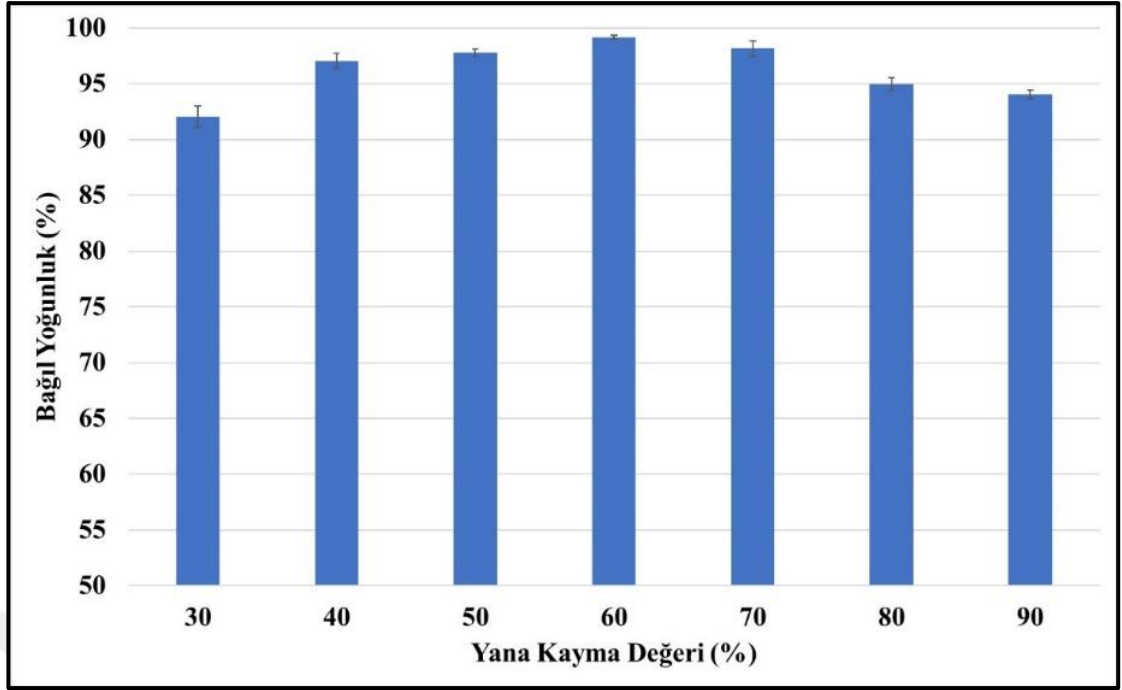
WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği Şekil 4.46’da sunulmuştur. XRD sonuçları incelendiğinde, WC-Ni+Ni malzemeden üretilen numunelerde diğer toz malzemelerde olduğu gibi ısı girdisi kaynaklı Ni’nin buharlaşması sonucunda yapıdaki Ni oranının düştüğü ve bu sebeple XRD piklerindeki şiddetin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak WC-Ni malzemede düşük Ni oranı sebebiyle neredeyse kaybolan Ni pikleri bu malzemede belirginliğini korumaya devam etmiş ve aynı zamanda $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ fazının daha da belirginleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca EDS sonuçları da Şekil 4.46’da verilmiştir. Yapılan EDS analizi incelendiğinde, Ni oranının WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunenin sahip olduğu Ni oranından oldukça düşük olduğu ancak WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelerden fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait XRD grafiği ve EDS analizi.

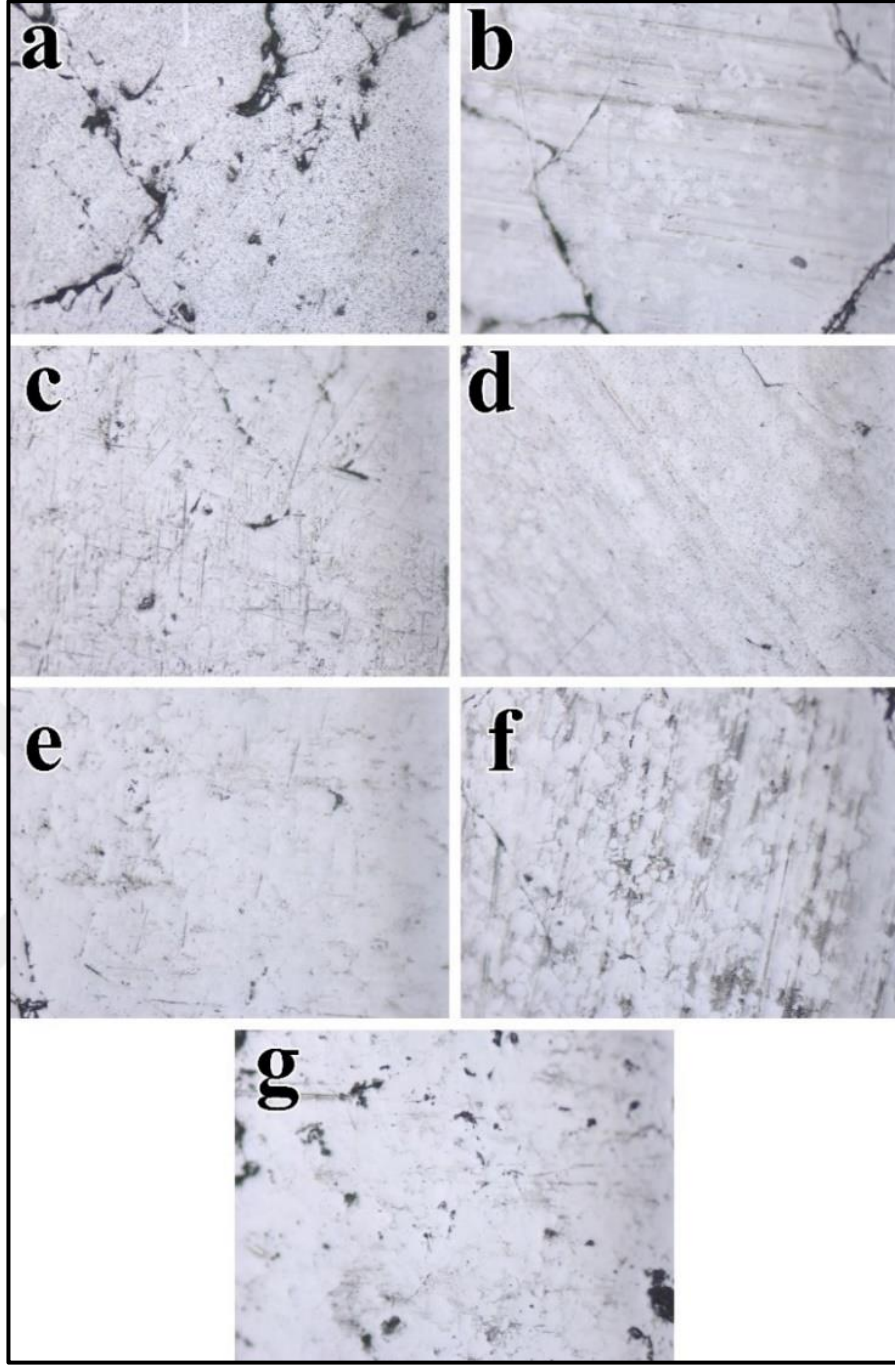
4.9.3. Prizmatik numunelere ait doluluk oranları ve mikroyapısal özellikleri

Tez çalışmasında kullanılan üçüncü grup toz malzeme olan WC-Ni+Ni toz malzemeden üretimler gerçekleştirilmiş ve doluluk oranının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait doluluk oranlarına ait grafik Şekil 4.47’de, parlatılan yüzeylere ait optik mikroskop görüntüleri ise Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.47. WC-Ni+Ni toz malzemedan üretilen prizmatik numunelere ait bağlı yoğunluk grafiği.

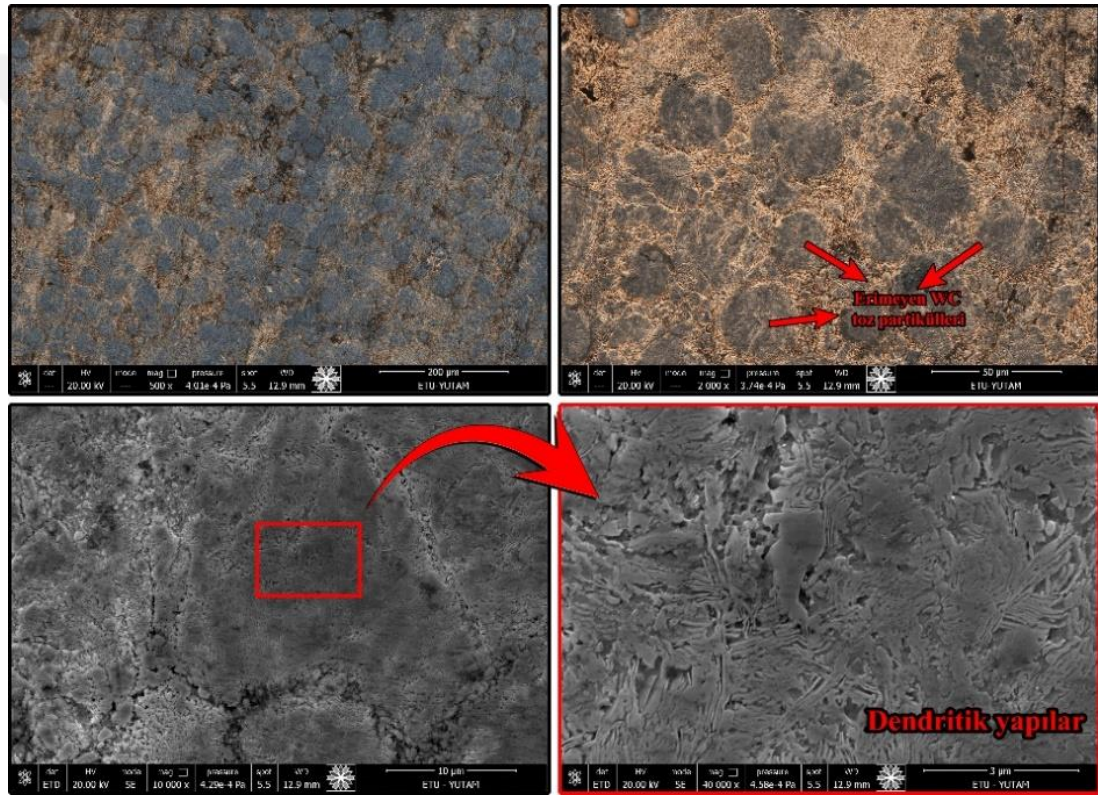
Şekil 4.48 ve Şekil 4.47 birlikte irdelendiğinde Ni katkılı toz malzemedan üretilen numunelerin bağlı yoğunluklarında önceki bağlı yoğunluklara göre önemli bir artış gözlenmiştir. Bu bağlamda WC toz malzemesine herhangi bir Ni kaplama yapılmadan sadece Ni tozunun eklenmesiyle benzer sonuçların elde edilemeyeceği değerlendirilmiştir. Ni kaplı WC toz malzemeye Ni tozunun eklenmesi, SLE işleminde erime sonucu Ni-Ni etkileşimini sağlamaktadır. Bu durum da WC tozlarının ıslanabilirliğine önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve katmanlar arası bağlanma özelliklerini geliştirmektedir. Bağlı yoğunluktaki bu artışın nedeninin toz malzemede bağlayıcı görevi gören Ni oranının artması olduğu söylenebilir. Bu artış sonrasında WC partiküllerinin daha iyi birleştirilerek homojen bir yapı oluşturması ve böylece gözenekliliği azaltılmış bir yapı elde edilmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.47’de en yüksek bağlı yoğunluğa (%99) sahip yana kayma parametresinin %60 olduğu, ikinci en yüksek bağlı yoğunluğa (%98) sahip numunenin ise %70 yk numunesine ait olduğu görülmüştür. Ayrıca en düşük bağlı yoğunluğa sahip numunelerin %30 yk ve %90 yk numunelerine ait olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.48. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait optik mikroskop görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.

Literatür özeti bölümünde detaylı olarak verildiği üzere, WC malzemeden bir bileşen üretmek için katmanlı imalatın kullanıldığı oldukça az sayıda çalışma vardır. Genellikle bu çalışmalar, bağlayıcı olarak farklı oranlarda Co'nun kullanıldığı WC-Co bileşimindeki malzemelerin üretimini içermektedir. Kumar, 2009 tarafından yapılan bir çalışmada WC-12Co ve WC-9Co tozlarına çeşitli oranlarda bakır ve kalay ilavesiyle

seçici lazer sinterleme (SLS) tekniği kullanılarak enjeksiyon kalıp parçaları üretildi. İki farklı lazer gücü ve katman kalınlığı ile üretilen parçaların aşınma aşınma davranışı incelenmiş ve %96'lık nihai bağıl yoğunluğa ulaşıldığı belirtilmiştir. Chen et al. 2019 tarafından yapılan bir çalışmada, WC-20Co toz malzemeden numune üretimi için SLE yöntemi kullanılmış ve üretim sonrasında %96'nın üzerinde bir bağıl yoğunluğa ulaşıldığı ifade edilmiştir. Literatürdeki bağıl yoğunluklar ile karşılaştırıldığında, tez çalışmasında kullanılan Ni bağlayıcının Co bağlayıcıya göre daha iyi bir bağıl yoğunluk sağladığı gözlemlenmiştir. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen en yüksek doluluk oranına sahip %60 yk prizmatik numunelerin mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 4.49'da sunulmuştur.

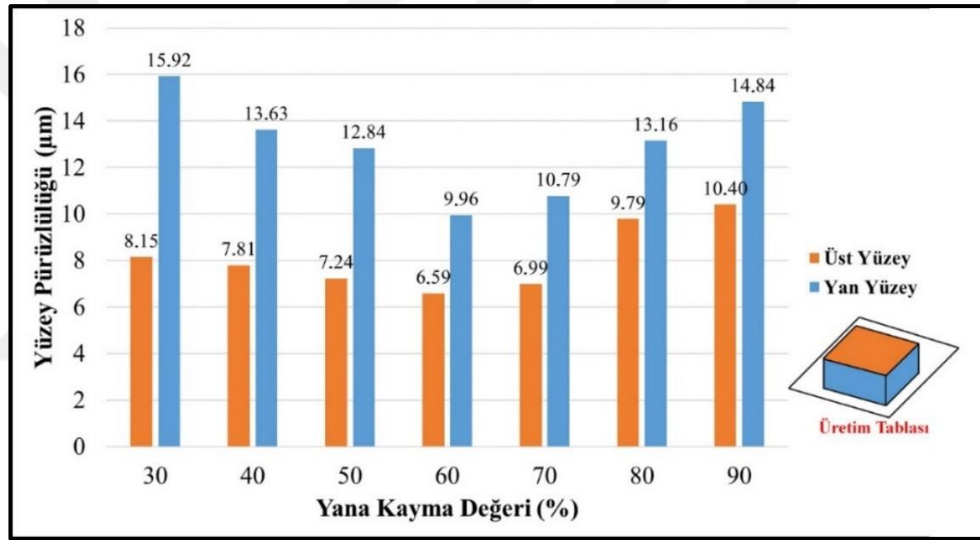


Şekil 4.49. WC-Ni+Ni toz malzemeden %60 yk ile üretilen prizmatik numuneye ait mikroyapı SEM görüntüleri.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde numunelerdeki mikroyapının literatürdeki sermet yapılarına benzerlik gösterdiği (Khmyrov et al. 2017b; Li et al. 2018; García et al. 2019; Mendoza Jimenez et al. 2022) belirlenmiştir. WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelere kıyasla çatlakların azaldığı ve gözlemlenmiştir. Ayrıca görsel incelendiğinde erimemiş WC toz partikülleri ve dendritik yapılar göze çarpmaktadır.

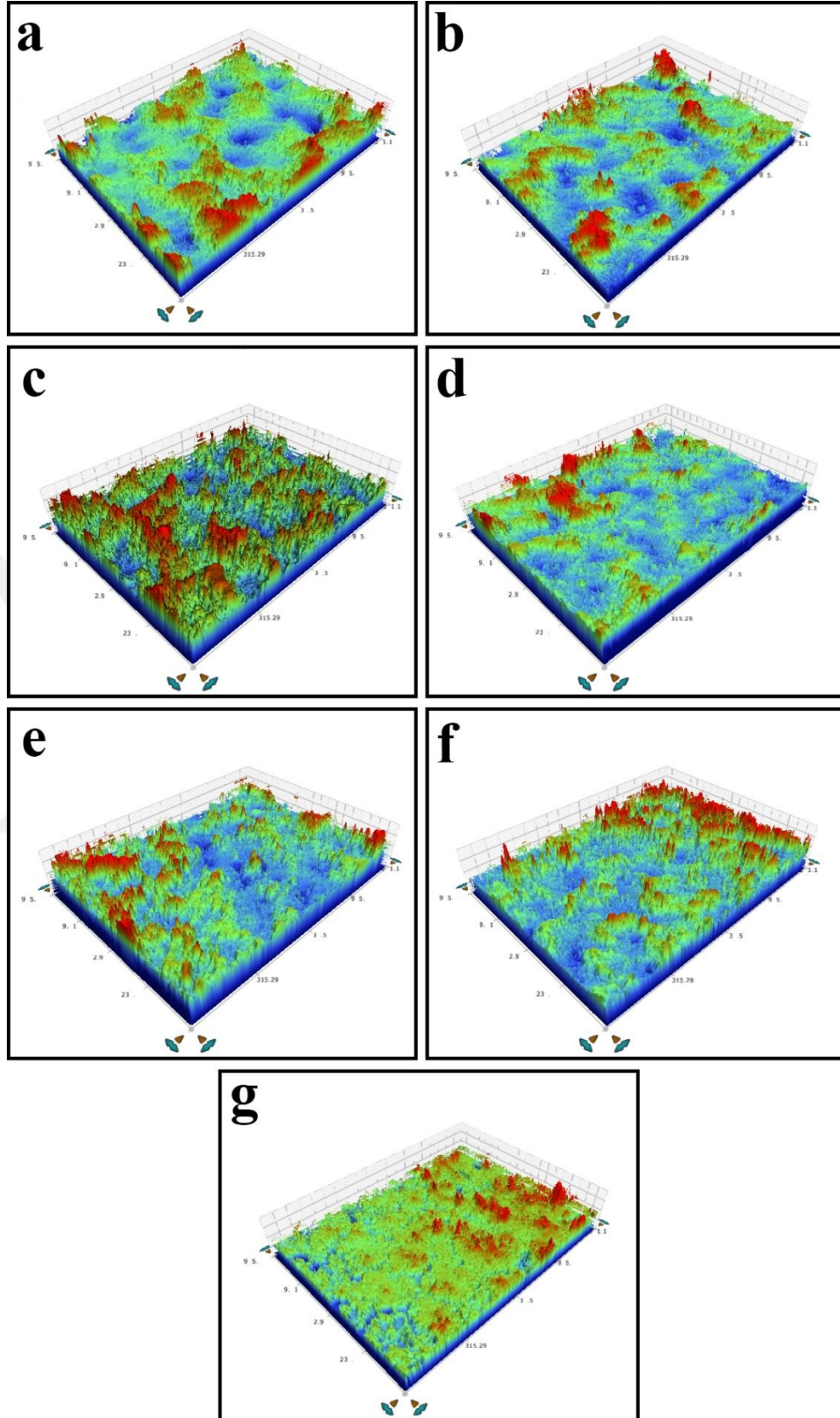
4.9.4. Prizmatik numunelere ait pürüzlülük değerleri

WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilen prizmatik numunelerin imalat sonrası yüzey pürüzlülüğü WC-Ni toz malzemedan üretilen numunelerde olduğu gibi hem üst yüzey hem de yan yüzeyler olmak üzere iki ayrı bölgeden alınmıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü grafiği Şekil 4.50'de sunulmuştur. Yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde WC-Ni toz malzemeye göre tüm yana kayma değerlerinde hem üst yüzey hem de yan yüzey pürüzlülüklerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün en büyük sebebinin toz malzemede Ni oranının artmasıyla birlikte bağlayıcılığın artması ve buna bağlı olarak yüzeydeki WC toz partiküllerinin Ni içerisinde daha iyi tutunması olarak değerlendirilmiştir.

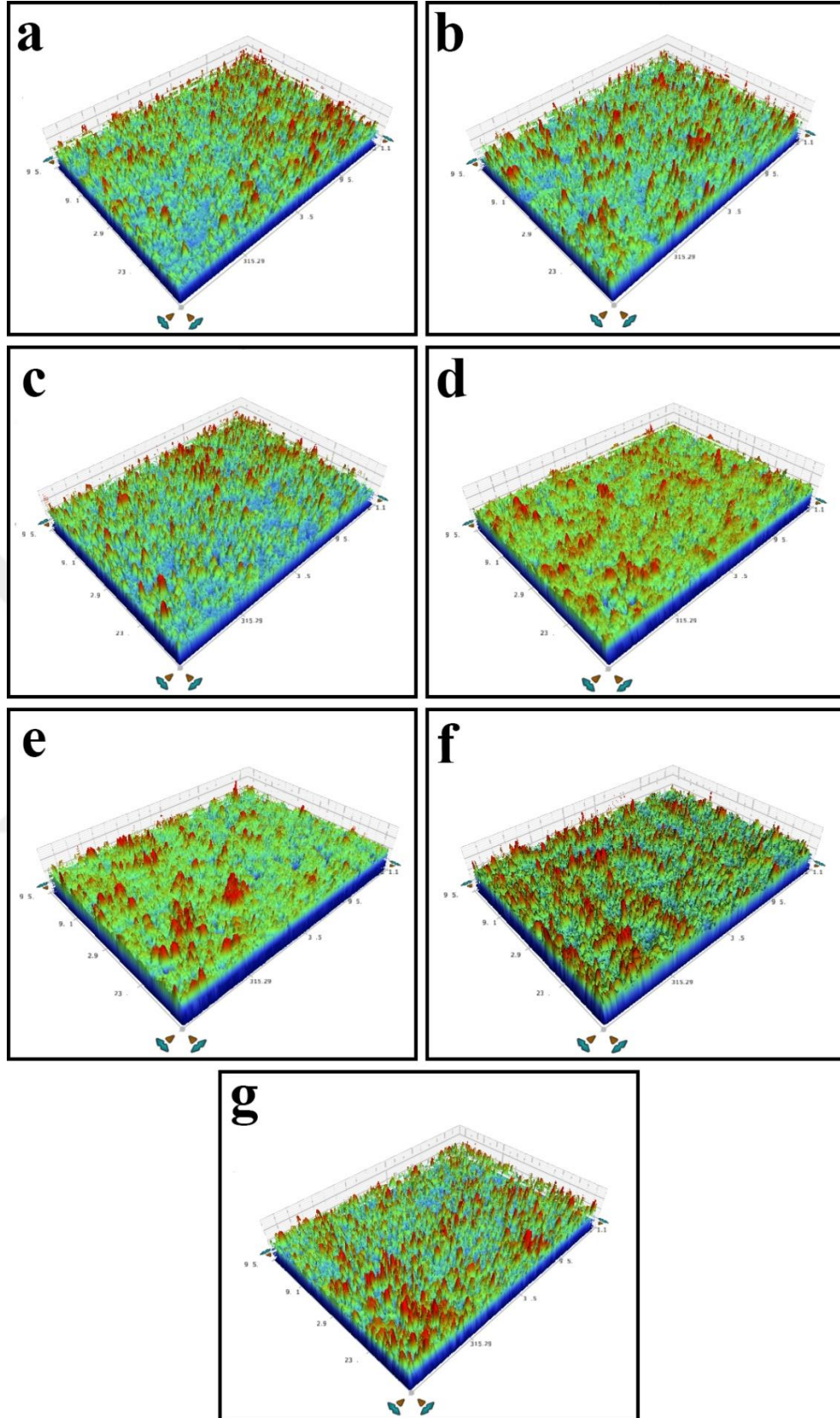


Şekil 4.50. WC-Ni+Ni toz malzemedan üretilen prizmatik numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri.

Yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde WC-Ni toz malzemeye benzer şekilde düşük ve yüksek yana kayma değerlerine sahip numunelerde daha pürüzlü bir yapının, optimum parametre olan %60 yk değerinde ise minimum pürüzlülüğe sahip bir yapının olduğu gözlemlenmiştir. Üst ve yan yüzey pürüzlülüklerine ait 3D profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de sunulmuştur.



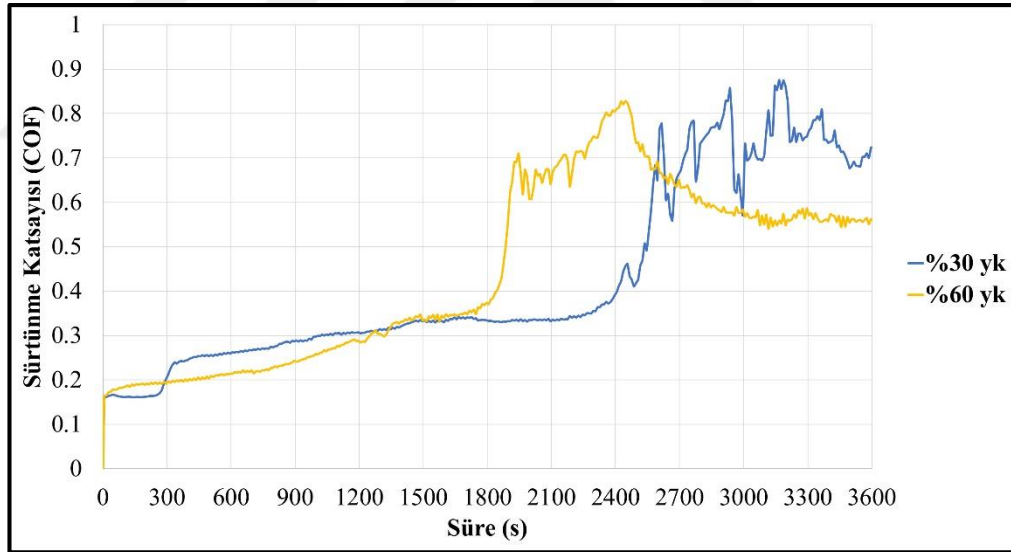
Şekil 4.51. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait üst yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.



Şekil 4.52. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelere ait yan yüzey pürüzlülük 3D profilometre görüntüleri a) 30 yk, b) 40 yk, c) 50 yk, d) 60 yk, e) 70 yk, f) 80 yk ve g) 90 yk.

4.9.5. Prizmatik numunelere ait tribolojik özellikler ve mikrosertlik ölçümleri

WC-Ni+Ni toz malzeme ile farklı yana kayma değerlerinde üretilen prizmatik numunelere önce 50 N yükte aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ancak gerçekleştirilen bu test sonucunda ölçülebilir bir aşınma izi derinliği elde edilemediğinden daha sonra yük sırasıyla 75 N ve 100 N'ye yükselttilerek aşınma testleri tekrarlanmıştır. 75 N yükte de 50 N'de olduğu gibi istenilen aşınma izi derinliğine ulaşamamış ve bu kez aşındırma süresi 3600 sn'den 7200 sn'ye çıkarılmıştır. Ancak yapılan bu testler sonucunda yükün aşınma izi derinliğine süreden daha fazla etki ettiği tespit edilmiş ve sadece 100 N ile yapılan testler sonucunda ölçülebilen aşınma izi derinliğine ulaşılmıştır. 100 N'de yapılan testler kullanılan tribometre cihazının sınırlarını zorladığından dolayı parametreler arası eleme yapılmıştır. Yapılan bu elemeye göre 0° inşa oryantasyonunda %30 yk ve %60 yk ile üretilen numuneler tribolojik incelemeler için aday numuneler olarak seçilmiştir. Bu numunelere ait COF grafiği Şekil 4.53'te sunulmuştur.

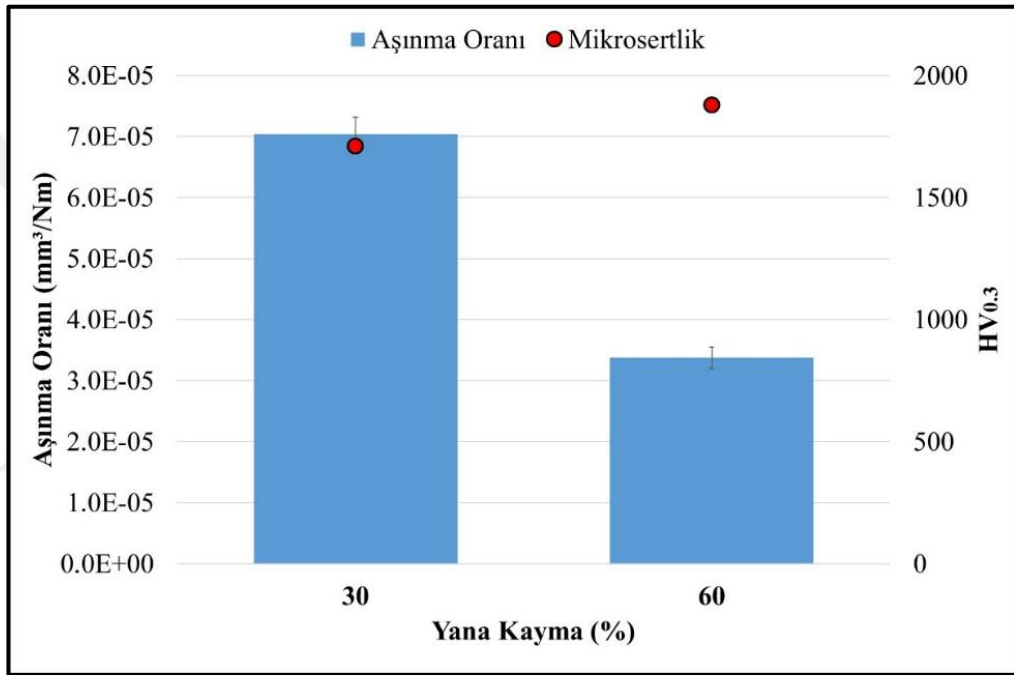


Şekil 4.53. WC-Ni+Ni toz malzemedan üretilen %30 yk ve %60 yk prizmatik numunelere ait COF-süre grafiği.

COF-süre grafiği incelendiğinde WC-Ni+Ni toz malzemedan üretilen %30 yk değerine sahip numunenin 2400'üncü saniyeden sonra COF değeri oldukça yükselmiştir. Daha önceki WC-Ni toz malzemedan üretilen %30 yk numunesinin COF grafiği ile karşılaştırıldığında 1200'üncü saniyede yüzeyinde meydana gelen kopmaların görülmediği ve oldukça homojen bir şekilde aşındığı gözlemlenmiştir. Ayrıca

numunelere ait ortalama COF değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve %30 yk numunesi için 0,43, %60 yk numunesi için ise 0,44 değerlerini aldığı tespit edilmiştir.

WC-Ni+Ni ile üretilen numunelere ait aşınma oranı ve mikrosertlik değerleri grafiği Şekil 4.54'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, %60 yk değeri ile üretilen numunenin aşınma oranı değerinin, %30 yk ile üretilen numuneye kıyasla yaklaşık iki kat azaldığı görülmüştür. Aşınma oranı ve mikrosertlik değerleri karşılaştırıldığında aşınma oranının sertlikle ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

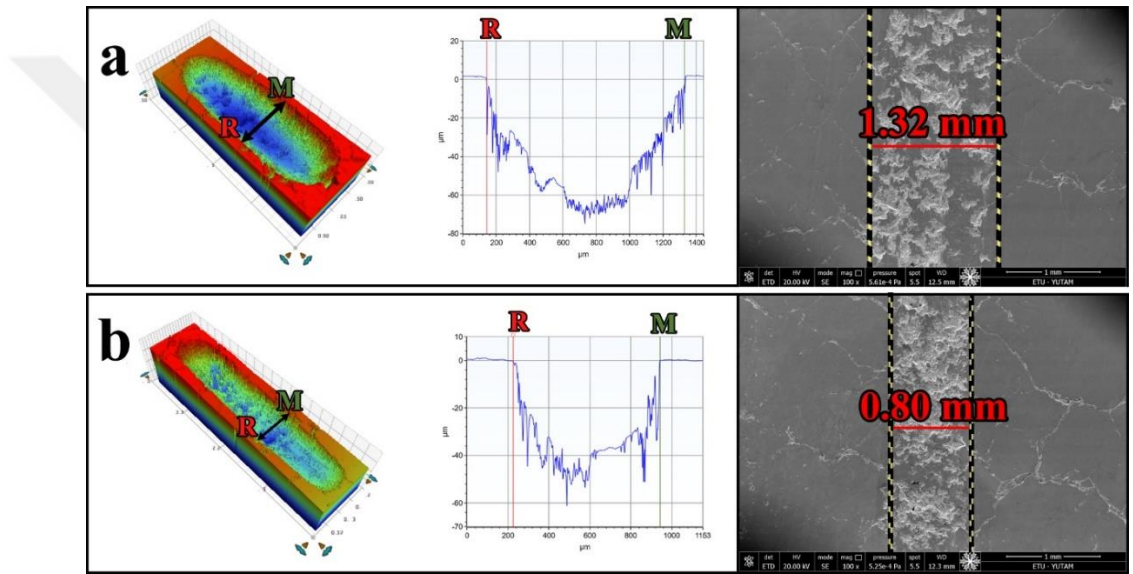


Şekil 4.54. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen 30 yk ve 60 yk numunelerin aşınma oranı ve mikrosertlik grafiği.

4.9.6. Aşınma izlerinin karakterizasyonu

WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilmiş prizmatik numunelere ait aşınma izi 3D optik profilometre ve SEM görüntüleri Şekil 4.55'de sunulmuştur. Aşınma izleri incelendiğinde, en yüksek doluluğa sahip olan %60 yk değerine sahip numunenin aynı zamanda düşük aşınma izi genişliği ve derinliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. WC-Ni toz malzeme ile üretilen 30 yk numunesindeki aşınma izinden elde edilen aşınma oranı yaklaşık 0,0016 mm³/Nm iken WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilen %30 yk numunesindeki aşınma oranı 7,03E-05 mm³/Nm olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu

verilere göre WC-Ni toz malzemesine Ni ilavesinin aşınma oranının yaklaşık 2 kat iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durum WC-Ni malzemesindeki düşük bağlayıcılığın, aşınma testi sırasında tabakalar arası ayrılmaya neden olmasıyla yüksek aşınma oranına ulaşıldığı, WC-Ni+Ni malzemesinde ise artan bağlayıcılık özelliğinin numunede daha iyi birleşme sağlamasıyla ilişkilendirilmiştir. WC-Ni ile üretilen numunelere kıyasla WC-Ni+Ni tozundan %60 yk ile üretilen numunedeki aşınma oranında görülen bir miktar artışın, hem numunedeki Ni oranının artmasından dolayı mikrosertlikteki düşüş hem de uygulanan yükün aşınma testlerindeki kritik nokta olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



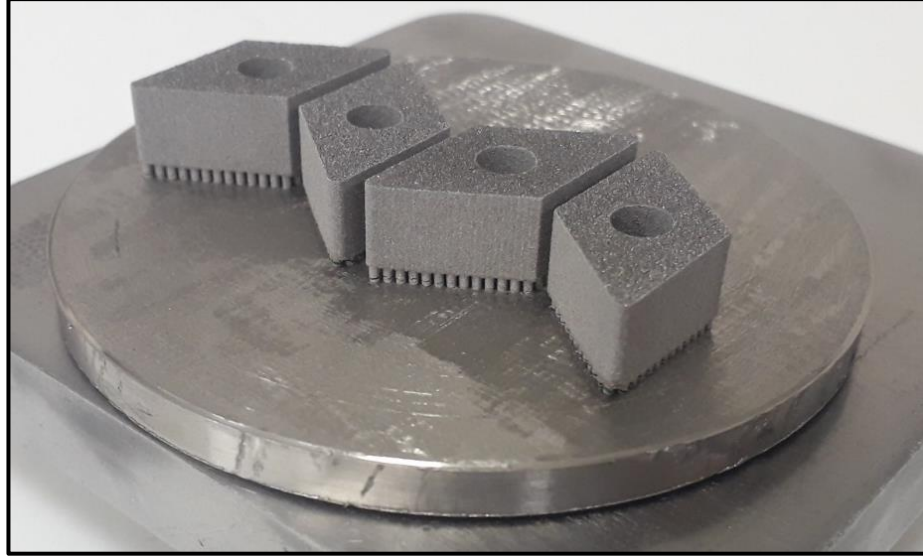
Şekil 4.55. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelere ait aşınma izi 3D profilometre ve SEM görüntüleri a) 30 yk, b) 60 yk.

4.10. Kesici Uçların Üretimi

Gerçek çalışma koşulları altında test edilecek kesici uçların üretimi için nihai üretim malzemesi ve parametreleri Çizelge 4.6'da, üretime ait görsel ise Şekil 4.56'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Kesici uçların üretiminde kullanılan optimum SLE parametre seti

Kullanılan Toz Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Yana Kayma (%)	İnşa Oryantasyonu (°)
WC-Ni+Ni	100	600	30	60	0



Şekil 4.56. WC-Ni+Ni malzemeden üretilen kesici uçlar

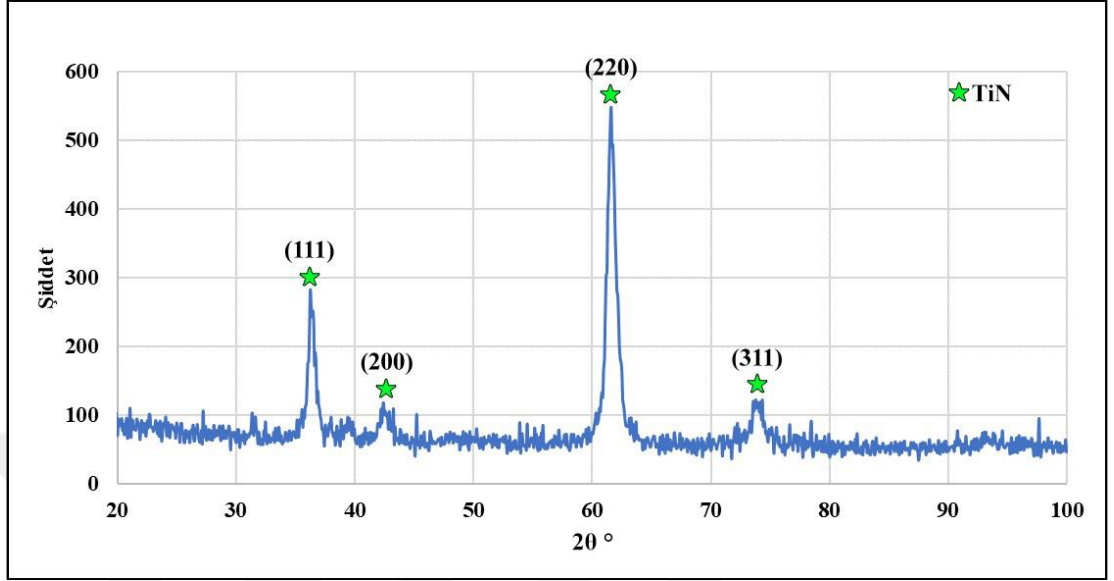
Nihai üretimi gerçekleştirilen kesici uçlar diğer toz grupları kullanılarak üretilen uçlar ile makroskobik olarak karşılaştırıldığında yüzey ve kenarlarında herhangi bir kusur bulunmadığı gözlemlenmiştir. SLE ile üretilen kesici uçların yüzey taşlaması, kenar açılarının verilmesi ve Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama yöntemi kullanılarak TiN ince filmi ile kaplanması işlemleri Diriliş Kesici Takımlar Ltd. Şti. (Eskişehir) firmasına tarafından gerçekleştirilmiştir. SLE ile üretilen ve TiN kaplaması gerçekleştirilen kesici uçların sertliği yaklaşık 2002 HV_{0,3} olarak ölçülmüştür. Ayrıca kaplamalı ve kaplamasız takımları test etmek amacıyla üretilen uçların bir bölümüne kaplama işlemi uygulanmamıştır. Elde edilen bu kesici uçlara ait görseller Şekil 4.57’de sunulmuştur.



Şekil 4.57. Taşlanmış ve kaplamalı/kaplamasız kesici uçlar

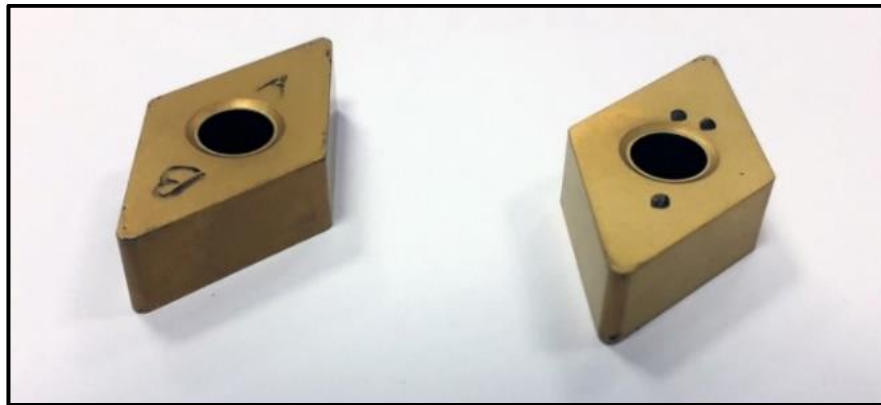
TiN kaplaması gerçekleştirilen kesici uçlara ait XRD grafiği Şekil 4.58’de sunulmuştur. XRD grafiği incelendiğinde, sırasıyla TiN kristalinin (111), (200), (220),

(311) ve (222) kristal düzlemleri, $36,7^\circ$, $42,62^\circ$, $61,86^\circ$, $74,1^\circ$ ve $78,02^\circ$ 'de belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir (Chakravarthy et al. 2012).



Şekil 4.58. TiN kaplaması uygulanan kesici uçlara ait XRD grafiği

Taşlama ve kaplama işlemleri gerçekleştirilen kesici uçların gerçek çalışma koşullarında performanslarını değerlendirmek ve geleneksel yöntemlerle üretilen ticari kesici uçlarla karşılaştırmak amacıyla piyasada kullanılan uçlar temin edilmiştir. Temin edilen kesici uçların mikrosertlik değeri $2050 \text{ HV}_{0,3}$ olarak ölçülmüştür. Bu uçlara ait görsel Şekil 4.59'da sunulmuştur.



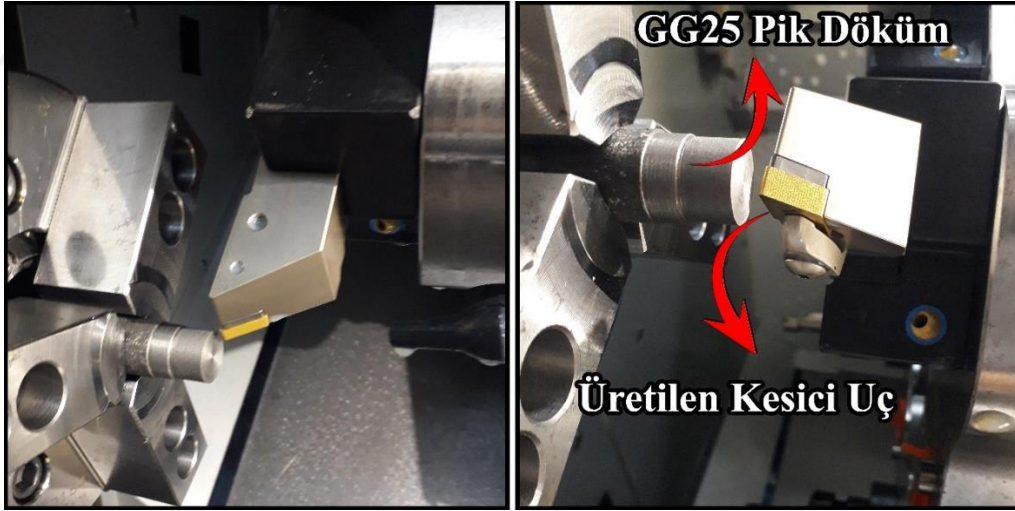
Şekil 4.59. SLE ile üretilen kesici uçlarla karşılaştırılan geleneksel yöntemle üretilmiş ticari uçlar.

4.11. Üretilen Kesici Uçların Gerçek Kesme Koşulları Altındaki Performansı

Üretimi ve kaplaması gerçekleştirilen kesici uçlar CNC torna tezgahında hem GG25 pik döküm malzemesi kullanılarak performansları değerlendirilmiş hem de geleneksel torna tezgâhı kullanılarak döküm fren diski tornalaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca piyasada kullanılmakta olan geleneksel yöntemle üretilmiş kesici uçların performansı ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu çalışmalara ait detaylı bilgiler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

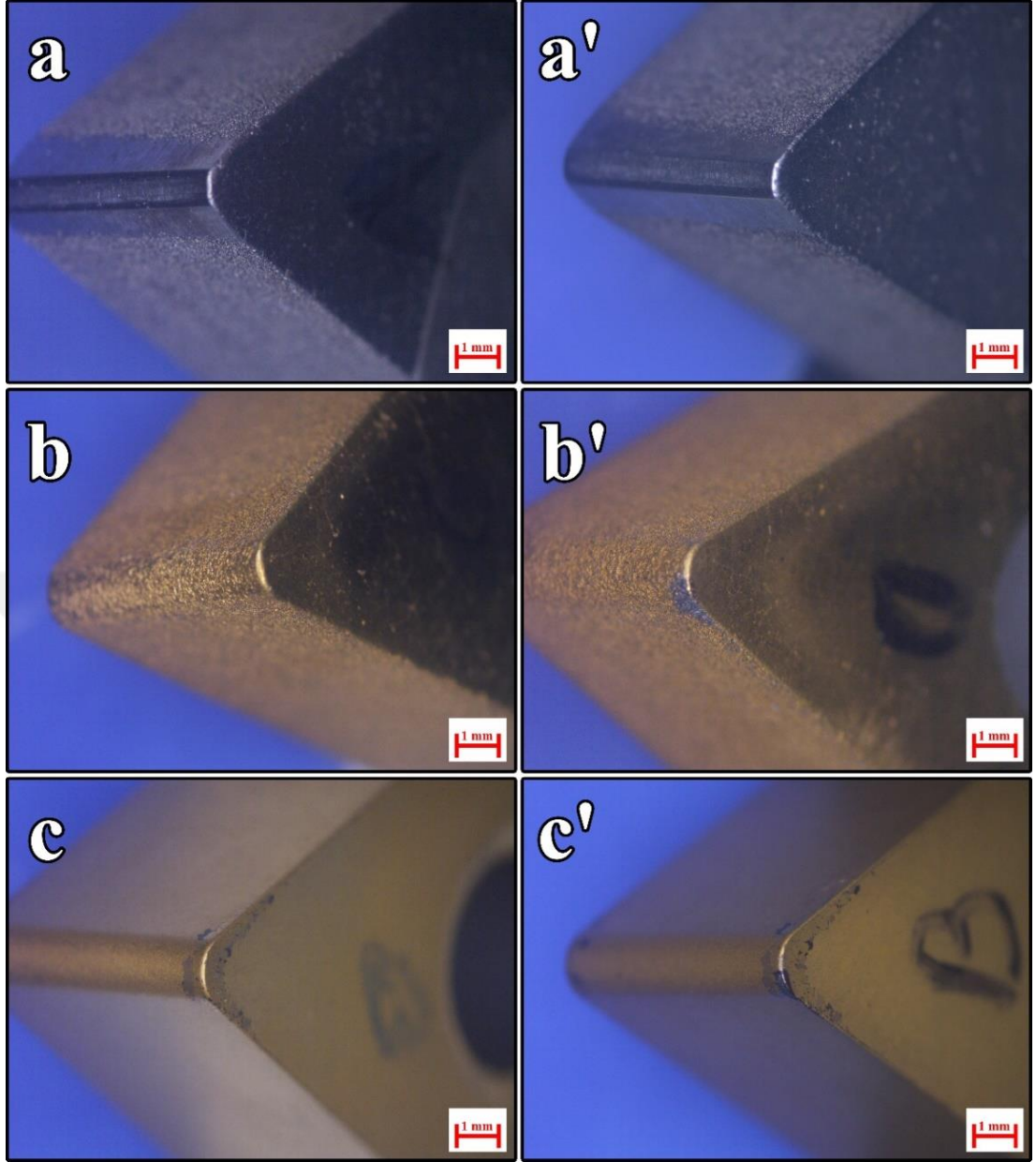
4.11.1. CNC torna tezgahında kesme işlemi

SLE yöntemiyle üretilen kesici uçların performansı değerlendirilirken CNC torna tezgahında 17 mm çapta GG25 pik döküm silindirik iş parçası kullanılarak 1000 rpm devirde, kesme sıvısı altında, 0,5 mm adım kullanılarak toplam 20 mm alın tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tornalama işlemine ait görsel Şekil 4.60’da sunulmuştur.



Şekil 4.60. CNC tornalama işlemi

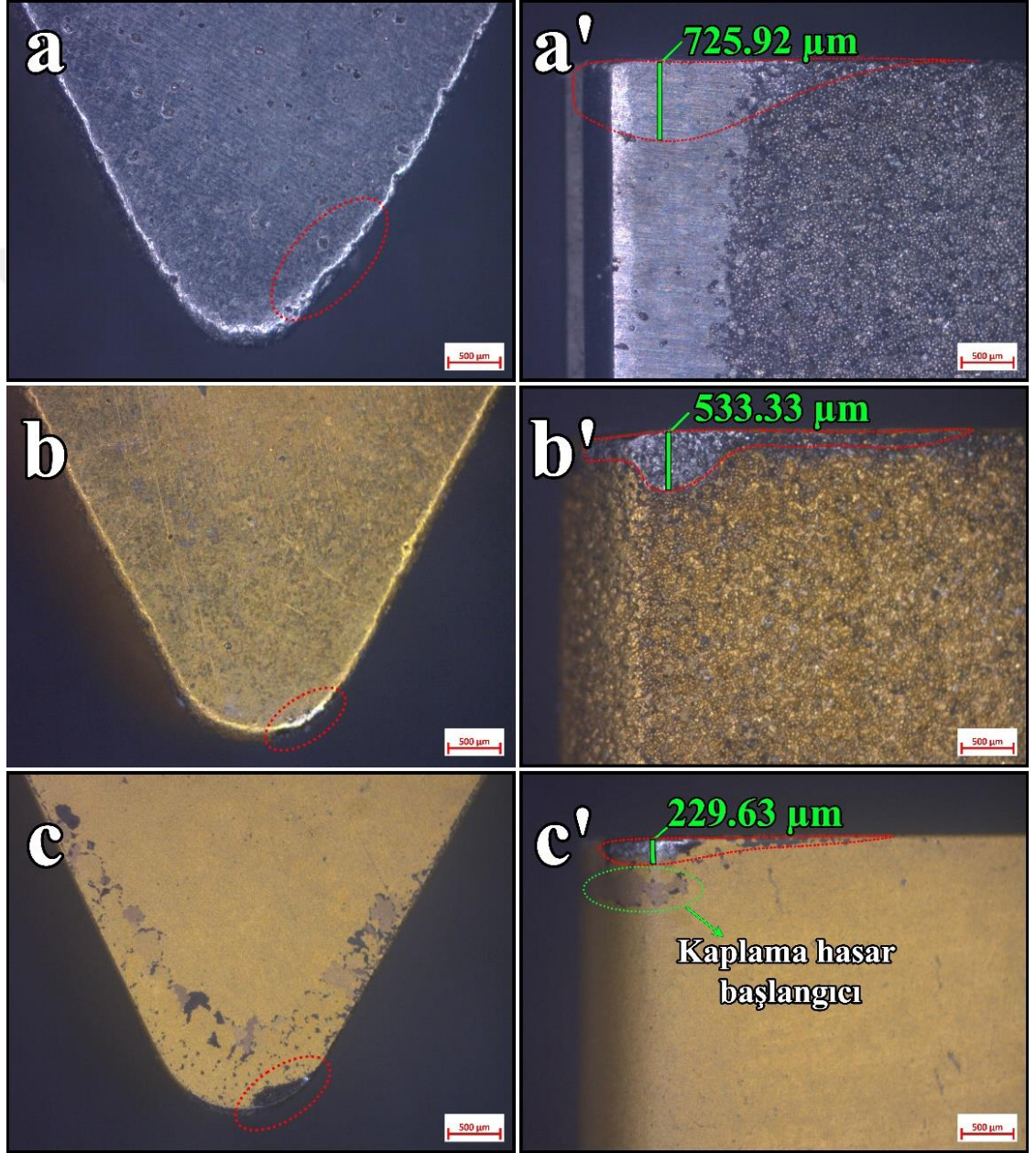
CNC tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların aşınma yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.61’de sunulmuştur. Kesici uçlarda meydana gelen aşınma görüntüleri incelendiğinde SLE yöntemi ile üretilen uçların geleneksel yöntemle üretilen ticari uçlara yakın bir performans sergilediği, uçların burun bölgesinde herhangi bir kırılma olmadığı ve SLE yöntemi ile üretimde tabakalar arası bağlanmanın oldukça iyi düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.61. CNC tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.

Tornalama işlemine tabi tutulan kesici uçlara ait kenar ve yüzey detay görüntüleri optik mikroskop kullanılarak incelenmiş ve görüntüler Şekil 4.62’de sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde, SLE ile üretilen kaplamasız uçtaki yan kenar aşınma genişliğinin hem SLE ile üretilen uç hem de ticari uca göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. SLE ile üretilen TiN kaplamalı ucun sadece üst yüzeyine taşlama işlemi gerçekleştirilebilmiştir. Bu durum geleneksel yöntemle üretilmiş ticari uca göre daha pürüzlü bir kenar oluşmasına sebep olmuştur. Ticari ve SLE ile üretilen TiN kaplamalı uçlardaki bu pürüzlülük farkı, SLE-TiN kesici ucundaki yan kenar aşınma genişliğinin

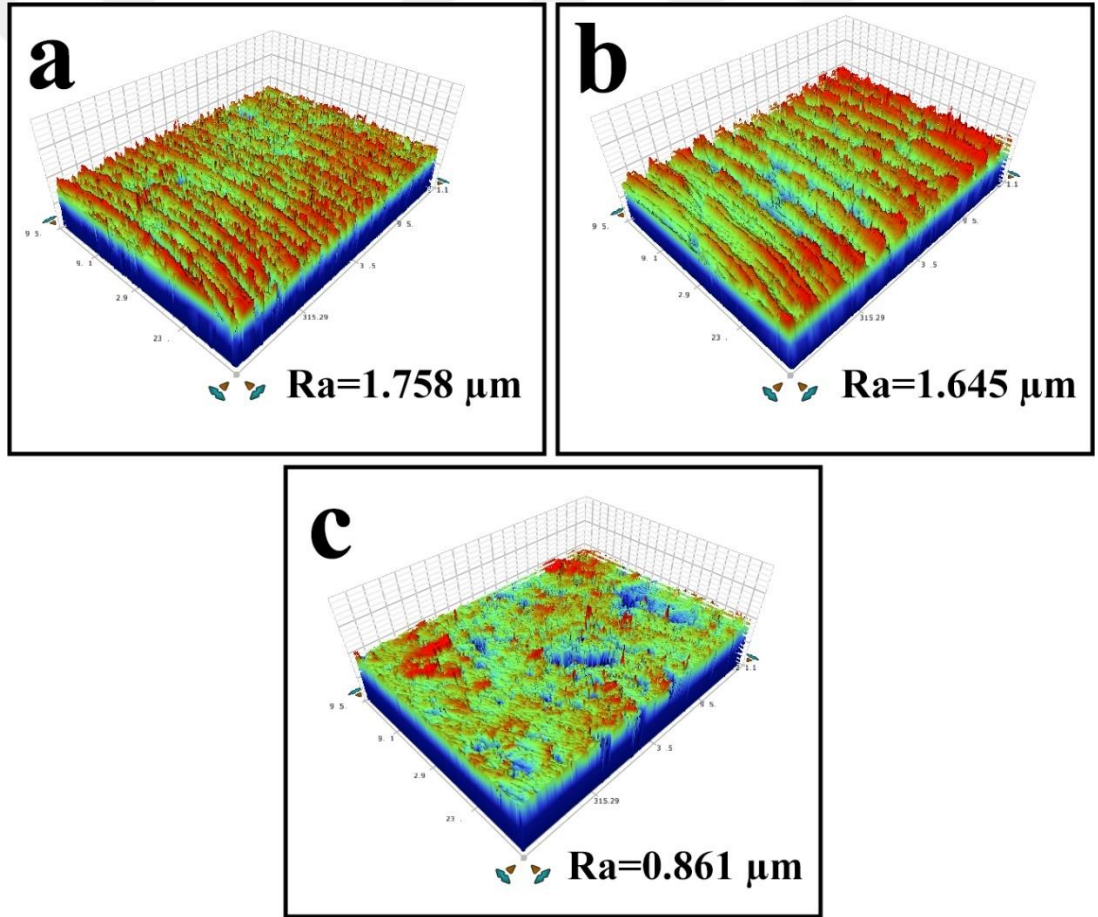
daha fazla olmasına neden olmuştur. Ancak geleneksel olarak üretilen ticari uçta da kaplamanın hasar aldığı bölge açıkça görülmektedir. Bu bağlamda kesici uçlara ait kenar ve yüzey görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, TiN kaplamalı SLE uç en düşük yüzey aşınmasına sahip iken geleneksel olarak üretilen ticari ucun ise en düşük yan kenar aşınmasına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.62. CNC işleme sonrası kesici uçların yüzey ve kenarlarına ait optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.

4.11.2. İş parçalarına ait yüzey pürüzlülüğü değerleri

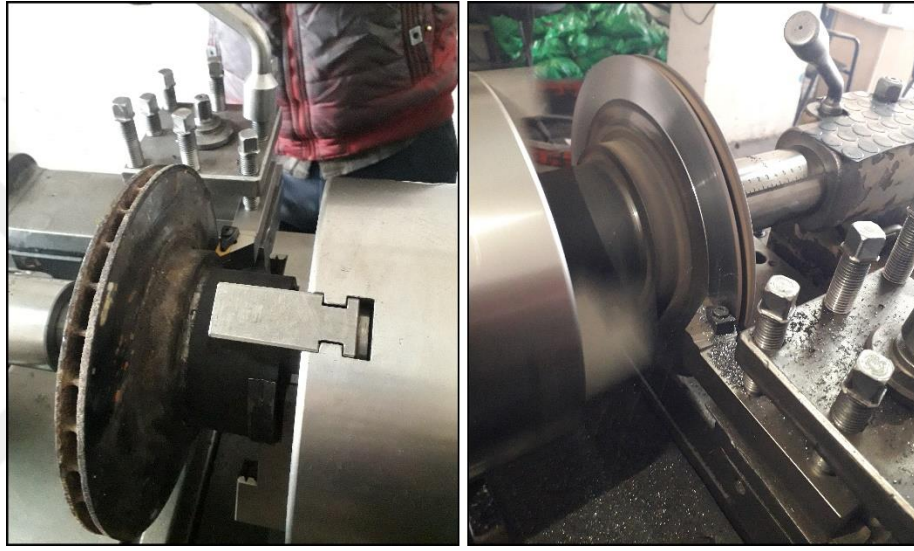
CNC tornalama sonrası elde edilen GG25 pik döküm silindirik iş parçalarına ait yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.63'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde en pürüzlü yüzeyin SLE ile üretilen kaplamasız kesici ucun işleme sırasında oluştuğu, en pürüzsüz yüzeyin ise geleneksel yöntemle üretilen TiN kaplamalı uçta oluştuğu gözlemlenmiştir. Geleneksel yöntemle üretilen kesici ucun özellikle yanal yüzey pürüzlülüğünün SLE ile üretilen uçlara göre düşük olması iş parçalarının yüzey pürüzlülüğüne de yansımıştır. Ayrıca TiN kaplamasının SLE ile üretilen uçlarda yüzey pürüzlülüğünü azaltarak daha pürüzsüz bir yüzey oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.63. CNC işleme sonrası elde edilen iş parçasına ait yüzey profil görüntüleri a) SLE-kaplamasız, b) SLE-TiN kaplamalı, c) Ticari-TiN kaplamalı.

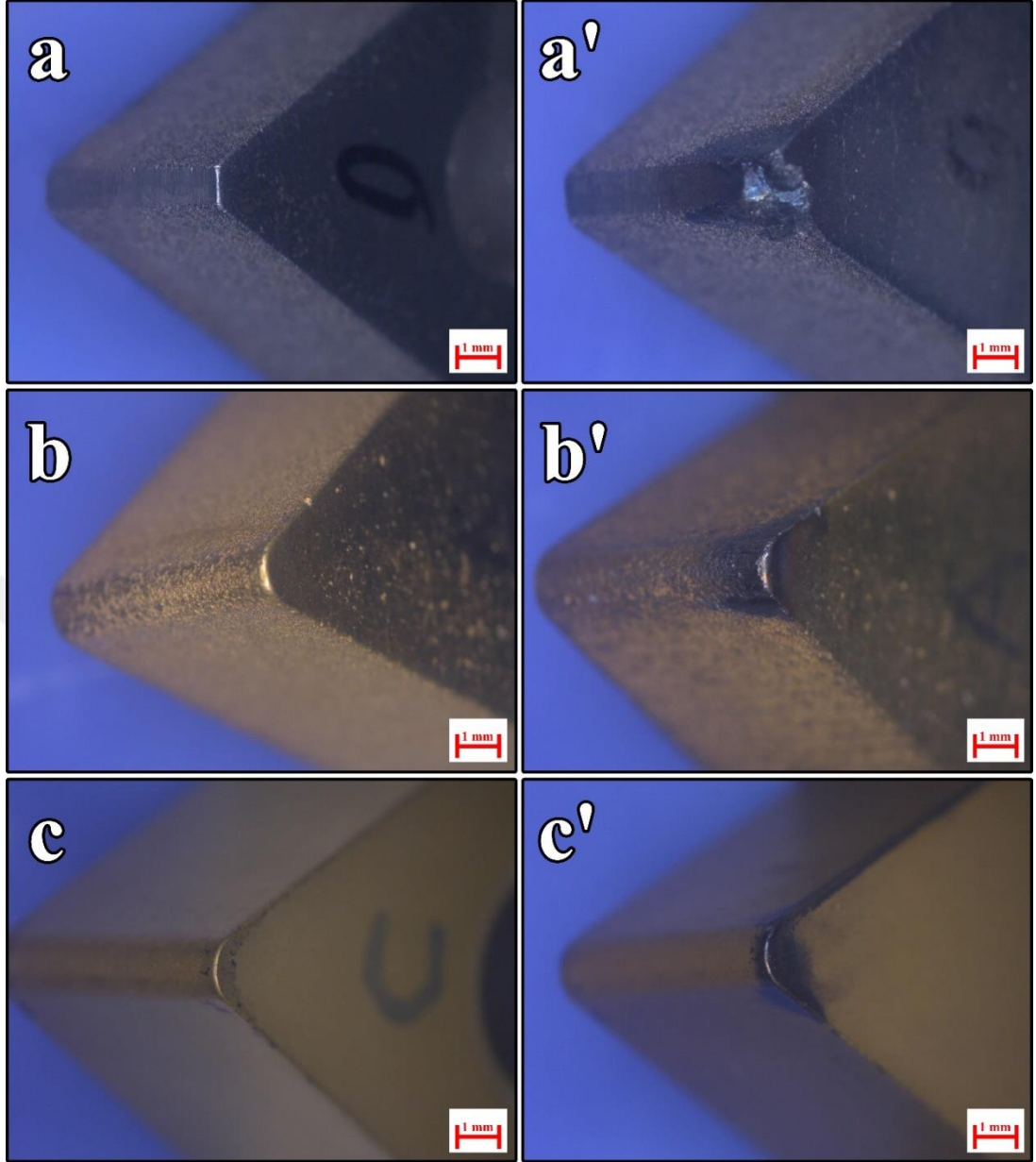
4.11.3. Geleneksel torna tezgahında kesme işlemi

Tez çalışmaları sonucunda üretilen kesici uçların, nispeten daha agresif kesim şartlarında performanslarını değerlendirmek için geleneksel torna tezgahında disk tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel torna tezgahında döküm fren diski iş parçası kullanılarak 90 rpm’de, soğutma sıvısı kullanılmadan ve 1,5 mm paso adımlaması kullanılarak disk tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel disk tornalama işlemine ait görsel Şekil 4.64’te sunulmuştur.



Şekil 4.64. Geleneksel tornalama işlemi

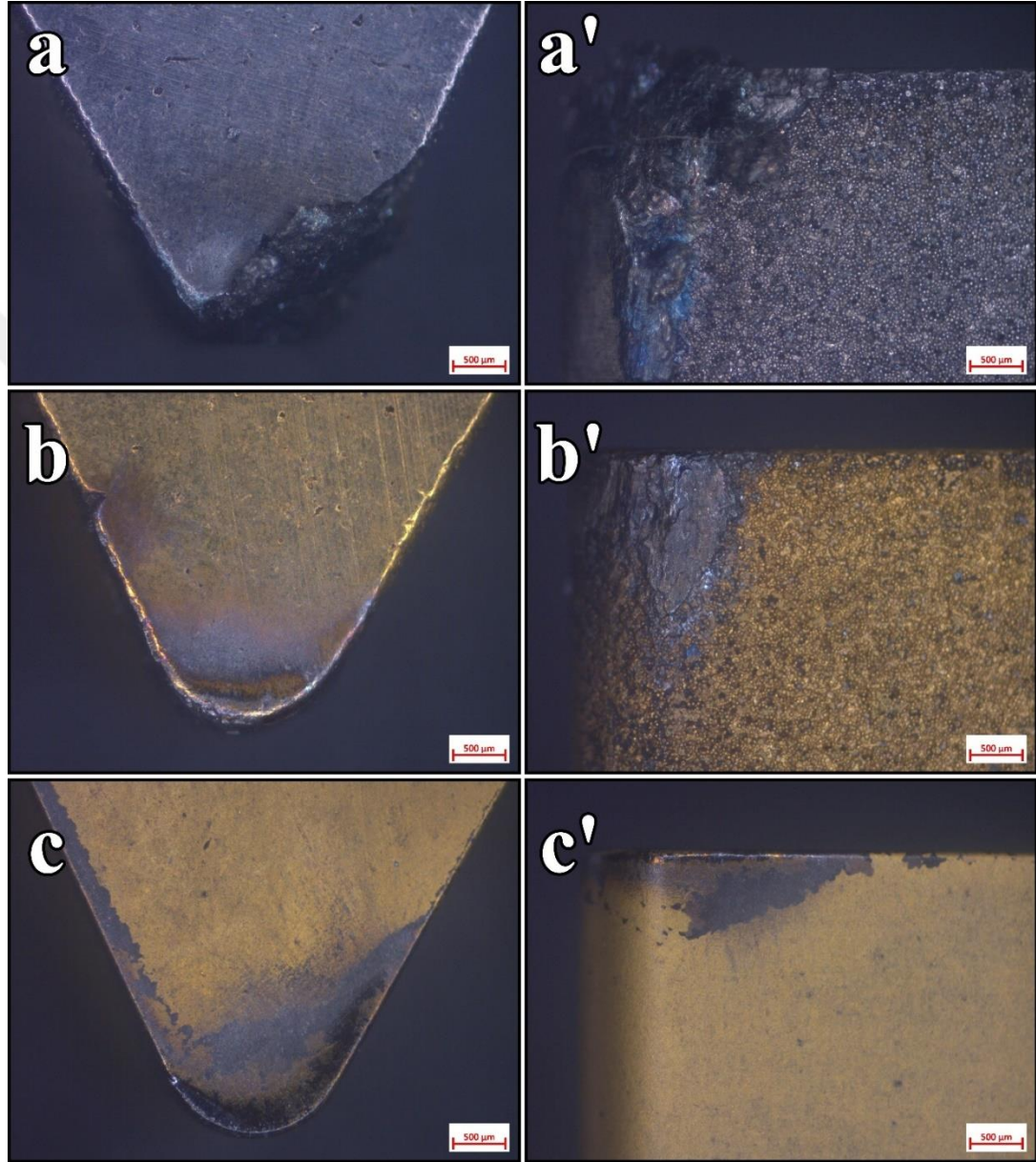
Geleneksel tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların aşınma yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.65’de sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde paso adım miktarının artmasıyla birlikte kesici uçlardaki aşınmanın daha da arttığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Özellikle SLE ile üretilmiş kaplamasız uçta meydana gelen deformasyon miktarının diğer numunelere kıyasla oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Bu belirgin artış taşlama sırasında TiN kaplamanın soğutma sıvısı kullanılmadan tornalama sırasında sürtünmeyi ve deformasyonu azaltmasından kaynaklanmıştır. Ticari ve SLE yöntemiyle üretilen kaplamalı uçlarda ise yakın bir aşınma performansı göze çarpmakta olup, özellikle ticari uçta yanal aşınma miktarının SLE ile üretilen kaplamalı uca göre daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Ancak SLE ile üretilen kaplamalı uçta burun aşınmasının ticari uca göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.65. Geleneksel tornalama öncesi ve sonrası kesici uçların optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.

Geleneksel disk tornalama işlemine tabi tutulan kesici uçların kenar ve yüzeyleri optik mikroskop kullanılarak incelenmiş ve görüntüler Şekil 4.66'da sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde, yüksek paso adımı ve soğutma sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilen kesme işlemleri sonucunda tüm kesici uçların ısı etkisine maruz kaldığı görülmüştür. Bu ısı etkisinden en fazla etkilenen ve en fazla aşınma oranına sahip olan SLE ile üretilen kaplamasız uç olmuştur. Bu kesici ucun burun kısımlarında şekilde görüldüğü gibi kırılmalar meydana gelmiştir. TiN kaplaması uygulanmış ticari ve SLE ile üretilen kesici uçlar ise kaplamanın etkisiyle ısıya daha fazla direnç göstermiş ve

herhangi bir kırılma görülmemiştir. Ayrıca, ticari ve SLE ile üretilen kaplamalı uçlar karşılaştırıldığında, her ikisinde de kırılma olmamakla birlikte, ısı etkisi nedeniyle yüzeylerinde renk değişiklikleri gözlemlenmiş ve iş parçası ile temas yüzeylerinde kaplamanın kalktığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.66. Geleneksel disk işleme sonrası kesici uçların yüzey ve kenarlarına ait optik mikroskop görüntüleri a-a') SLE-kaplamasız, b-b') SLE-TiN kaplamalı, c-c') Ticari-TiN kaplamalı.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, SLE yöntemi kullanılarak Ni bağlayıcılı WC kesici takımların üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Ni ile kaplanmış WC toz malzemenin SLE yöntemi ile üretiminde kullanılacak optimum lazer üretim parametrelerinin belirlenmesi, belirlenen parametreler ile tornalama uçlarının üretilmesi ve üretilen uçların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri ile talaşlı imalat performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Toz malzeme analizleri sonucunda kaplamasız WC toz malzemenin yaklaşık 30-40 μm aralığında boyut dağılımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ni kaplama işlemi ile kaplamanın WC toz malzemesi üzerine homojen bir şekilde dağıldığı ve başarılı bir şekilde kaplandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca WC toz malzeme üzerine kaplanan Ni tabakasının kalınlığının yaklaşık 400 nm olduğu belirlenmiştir.
- Tekli lazer vuruşları sonucunda hem lazer gücü hem de tarama hızı değerlerinin tekli lazer izlerinin oluşmasında önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı lazer gücü için tarama hızı arttıkça iz genişliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Eriyik havuzu incelemelerine göre, R oranını 1'e en fazla yaklaştıran parametrelerin 100 W lazer gücünde 400, 600 ve 800 mm/s tarama hızı değerleri olduğu belirlenmiştir.
- Tekli duvar numunelerinin kalınlığını belirlemek için WC-Ni toz malzemedan üretilen kontur yapılarının incelenmesi sonucunda, geometrik bütünlüğün ve homojenliğin 100 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı ile gerçekleştirilen üretimlerde sağlandığı ve bu parametreler için duvar kalınlığının yaklaşık 85 μm olduğu belirlenmiştir.
- WC-Ni toz malzemedan üretilen prizmatik numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle göre %60 yk ile üretilen numunede yaklaşık %98,8 ile en yüksek bağıl yoğunluk değeri elde edilmiş, %70 yk değerine sahip numunenin ise %60 yk numunesine çok yakın bir yoğunluk (%98,3) sergilediği görülmüştür.

- WC-Ni toz malzemeden üretilen bağıl yoğunluğu en yüksek (%60 yk ve %70 yk) prizmatik numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, bu numunelerdeki mikroyapının literatürde bulunan sermet yapılarına benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca %60 yk parametresi ile üretilen numune, %70 yk parametresi ile üretilen numuneye göre daha ince taneli bir yapı sergilemiştir. Aynı zamanda %60 yk numunesindeki taneler arası boşlukların %70 yk numunesine göre daha az belirgin olduğu ve tane boyutunun daha homojen olduğu gözlemlenmiştir.
- WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre yana kayma değeri düşük ve yüksek olan numunelerin pürüzlülük değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. %60 yk ve %70 yk ile üretilen numunelerin pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğu ve bu değerlerin bağıl yoğunluk oranları açısından daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- Farklı yana kayma değerlerinde WC-Ni toz malzemeden üretilen prizmatik numunelerin sürtünme katsayısı (COF) sonuçlarına göre, tüm numuneler için COF değerlerinin aşınma testinin başlangıcında ilk temasla birlikte arttığı ve daha sonra aşınma çifti yüzeylerin birbirine alışmasının ardından testin ilerleyen kısımlarında daha kararlı bir form aldığı gözlemlenmiştir. %30 yk ile üretilen numunenin COF değerinin 1200. saniyeden sonra numune yüzeyinde kırılmalar ve tabakalar arası ayrılmalar meydana geldikçe önemli ölçüde arttığı gözlemlenirken, en düşük COF değeri ise %60 yk değeri ile üretilen ve aynı zamanda en yüksek doluluk oranına sahip olan numunede elde edilmiştir. Bu sonuç, doluluk oranı değerinin üretilen parçanın aşınma testi esnasında bütünlüğünü koruması ve sürtünme performansı açısından önemli olduğunu desteklemiştir.
- WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelerin aşınma oranı ve mikrosertlik değerlerine göre en düşük aşınma oranı %60 yk değerine sahip numunede gözlenirken, en yüksek aşınma oranı %30 yk değerine sahip numunede gözlenmiştir. Mikrosertlik dağılımları incelendiğinde, üretilen prizmatik numunelerin en düşük sertlik değeri %30 yk'de 1495 HV_{0,3}, en yüksek sertlik değeri ise %60 yk'de 1962 HV_{0,3} olarak tespit edilmiştir. Ayrıca aşınma oranı ve mikrosertlik değerleri birlikte değerlendirildiğinde aşınma oranının sertlik

ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ile birlikte aşınma oranları incelendiğinde en düşük pürüzlülüğe sahip numunenin en düşük aşınma oranına sahip olduğu, en yüksek pürüzlülük değerine sahip numunenin ise en yüksek aşınma oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda SLE ile üretim için optimum parametre seti 100 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızı ve 85 µm duvar kalınlığı değeri için %60 yana kayma miktarı olarak belirlenmiştir.

- Optimum parametre seti ile farklı inşa oryantasyonlarında WC-Ni toz malzemeden üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü, aşınma oranı, mikrosertlik ve mikroyapıları değerlendirildiğinde, 0° inşa oryantasyonuna sahip numunenin tüm testlerde üstün olduğu tespit edilmiş ve optimum inşa oryantasyonu olarak belirlenmiştir.
- WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen tekli duvar yapılarının WC-Ni toz malzemeden üretilen yapılara göre daha yüksek homojenlik gösterdiği tespit edilmiş ve duvar kalınlığı 85 µm olarak belirlenmiştir. WC-Ni ve WC-Ni+Ni toz malzemelerden üretilen numunelerin bağıl yoğunlukları karşılaştırıldığında, WC-Ni+Ni malzeme ile üretilen numunelerin bağıl yoğunluklarının WC-Ni malzeme ile üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. WC-Ni+Ni toz malzemeden üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre, WC-Ni toz malzemeye göre tüm yana kayma değerlerinde hem üst yüzey hem de yan yüzey pürüzlülüklerinde düşüş gözlemlenmiştir. WC-Ni toz malzeme ile üretilen 30 yk numunesindeki aşınma izinden elde edilen aşınma oranı yaklaşık $0,0016 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken WC-Ni+Ni toz malzeme ile üretilen 30 yk numunesindeki aşınma oranı $7,03\text{E}-05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre WC-Ni toz malzemesine Ni ilavesinin aşınma oranını yaklaşık 2 kat iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- SLE ve geleneksel yöntem ile üretilmiş kaplamalı ticari kesici uçların CNC tornalama performansları incelendiğinde, SLE ile üretilen TiN kaplamalı uç en düşük yüzey aşınmasına sahip iken geleneksel olarak üretilen ticari ucun ise en düşük yan kenar aşınmasına sahip olduğu belirlenmiştir.

- Geleneksel tornalama performansları, ticari ve SLE yöntemiyle üretilen kaplamalı kesici uçlar açısından incelendiğinde yakın bir aşınma performansı göze çarpmakta olup, özellikle geleneksel yöntemle üretilen kaplamalı ticari uça yanal aşınma miktarının SLE ile üretilen kaplamalı uca göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ancak SLE ile üretilen kaplamalı uça burun aşınmasının kaplamalı ticari uca göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Öneriler

Doktora tez çalışması ve eşzamanlı olarak yürütülen 122M758 numaralı 1002-A TÜBİTAK projesi, yenilikçi üretim yöntemlerinden seçici lazer ergitme (SLE) ve WC-Ni esaslı kesici takım malzemesinin bu yöntemle üretilebilirliği üzerine gerçekleştirilmiştir. SLE yöntemi ile üretilen parçaların yapısal, mekanik ve aşınma özellikleri üretimde kullanılan parametre ve stratejilerden büyük oranda etkilenmektedir. Dolayısı ile üretimde kullanılacak parametrelerin, malzemenin bu özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi/kontrol edilmesi ve optimum üretim şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Tez çalışmasında, söz konusu üretim parametrelerinin akımsız kaplama yöntemiyle Ni kaplanmış WC kesici takım malzemesinin yapısal, mekanik, aşınma ve talaşlı imalat performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. SLE yönteminde kullanılan üretim parametre/stratejilerinin malzemenin performans özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasıyla birlikte yeni ve üstün özellikli kesici takımların eklemeli imalat ile geliştirilmesine ve gerekli bilgi havuzunun oluşturulmasına önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında tez çalışmasındaki üretim metodolojisi kullanılarak, farklı bileşim ve geometrideki kesici takım malzemelerinin SLE eklemeli imalat yöntemiyle üretimi ve üretim parametrelerinin optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilebilir. Özellikle SLE yönteminin üretim esnekliği kullanılarak işe özel takımların kalıp veya diğer araçlara gereksinim duyulmadan kısa sürede üretiminin yapılması hedeflenebilir. Ayrıca SLE ile üretim sonrası post-proses işlemlerinin (ısı ve yüzey işlemleri gibi) kesici takım malzemelerinin özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Ahn, D. G. 2011. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools - state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(5), 925–938.
- Almond, E. A. and Roebuck, B. 1988. Identification of optimum binder phase compositions for improved WC hard metals. *Materials Science and Engineering: A*, 105–106, 237–248.
- Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M. A. and Ozkan, D. 2020. Analysis of surface roughness and flank wear using the taguchi method in milling of niti shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 10(12), 1–17.
- Amiri-Moghaddam, A. and Kalantar, M. 2017. In-situ synthesis of WC-X% Co composite in the WO₃-Co₃O₄-C system by carbothermal reduction method. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53(2), 839–845.
- Aqilah, D. N., Mohd Sayuti, A. K., Farazila, Y., Suleiman, D. Y., Nor Amirah, M. A. and Wan Nur Izzati, W. B. 2018. Effects of process parameters on the surface roughness of stainless steel 316L parts produced by selective laser melting. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(4), 1673–1683.
- Balaraju, J. N., Sankara Narayanan, T. S. N. and Seshadri, S. K. 2003. Electroless Ni–P composite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, 33(9), 807–816.
- Balbaa, M., Mekhiel, S., Elbestawi, M. and McIsaac, J. 2020. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. *Materials & Design*, 193, 108818.
- Bian, L., Shamsaei, N. and Usher, J. M. 2017. Laser-based additive manufacturing of metal parts: Modeling, optimization, and control of mechanical properties. *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties* (Vol. 148).
- Bourell, D. and Wohlers, T. 2020. Introduction to additive manufacturing. *Additive Manufacturing Processes* (Vol. 24). ASM International.
- Burris, D. L. and Sawyer, W. G. 2009. Measurement uncertainties in wear rates. *Tribology Letters*, 36(1), 81–87.

- Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Posa, P. and Angelastro, A. 2019. Printability and Microstructure of Selective Laser Melting of WC/Co/Cr Powder. *Materials*.
- Cavaleiro, A. J., Fernandes, C. M., Farinha, A. R., Gestel, C. V., Jhabvala, J., Boillat, E., Senos, A. M. R. and Vieira, M. T. 2018. The role of nanocrystalline binder metallic coating into WC after additive manufacturing. *Applied Surface Science*, 427, 131–138.
- Chakravarthy, G. V, Chandran, M., Bhattacharya, S. S., Rao, M. S. R. and Kamaraj, M. 2012. A comparative study on wear behavior of TiN and diamond coated WC–Co substrates against hypereutectic Al–Si alloys. *Applied surface science*, 261, 520–527.
- Chang, S. H. and Chen, S. L. 2014. Characterization and properties of sintered WC-Co and WC-Ni-Fe hard metal alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 407–413.
- Chen, Huang, M., Fang, Z. Z., Koopman, M., Liu, W., Deng, X., Zhao, Z., Chen, S., Wu, S., Liu, J., Qi, W. and Wang, Z. 2019. Microstructure analysis of high density WC-Co composite prepared by one step selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84(June), 104980.
- Cobbinah, P. V., Nzeukou, R. A., Onawale, O. T. and Matizamhuka, W. R. 2020. Laser powder bed fusion of potential superalloys: a review. *Metals*, 11(1), 58.
- Davydova, A., Domashenkov, A., Sova, A., Movtchan, I., Bertrand, P., Desplanques, B., Peillon, N., Saunier, S., Desrayaud, C., Bucher, S. and Iacob, C. 2016. Selective laser melting of boron carbide particles coated by a cobalt-based metal layer. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 361–366.
- Domashenkov, A., Borbély, A. and Smurov, I. 2017. Structural modifications of WC/Co nanophased and conventional powders processed by selective laser melting. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(1), 93–100.
- ElMaraghy, H., Schuh, G., Elmaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M. and Bernard, A. 2013. Product variety management. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(2), 629–652.
- Engqvist, H., Botton, G. A., Axén, N. and Hogmark, S. 1998. A study of grain boundaries in a binderless cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 16(4–6), 309–313.

- Enneti, R. K., Prough, K. C., Wolfe, T. A., Klein, A., Studley, N. and Trasorras, J. L. 2018. Sintering of WC-12%Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 71(October 2017), 28–35.
- Ergüder, T. O., Güler, O. and Yıldız, F. 2024. Determination of selective laser melting process parameters of tungsten carbide powders coated with nickel via electroless plating for improved interface properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 122, 106735.
- Fernandes, C. M., Senos, A. M. R. and Vieira, M. T. 2004. Study of sintering variables of tungsten carbide particles sputter-deposited with stainless steel. *Materials Science Forum*, 455–456, 295–298.
- Fernandes, C. M., Senos, A. M. R., Vieira, M. T. and Antunes, J. M. 2008. Mechanical characterization of composites prepared from WC powders coated with Ni rich binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 26(5), 491–498.
- Ford, S. and Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.
- Fortunato, A., Valli, G., Liverani, E. and Ascari, A. 2019. Additive manufacturing of WC-Co cutting tools for gear production. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 247–262.
- García, J., Collado Ciprés, V., Blomqvist, A. and Kaplan, B. 2019. Cemented carbide microstructures: a review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80(December 2018), 40–68.
- Gavrilov, G. G. 1979. Chemical (electroless) nickel-plating. Portcullis Press.
- Gençoğlu, U., Kaya, G., Ergüder, T. O., Hacısalıhoğlu, İ. and Yıldız, F. 2022. Investigation of the structural and tribological properties of 316L stainless steel manufactured using variable production parameters by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(May), 3688–3703.
- Genga, R. M., Cornish, L. A. and Akdogan, G. 2013. Effect of Mo₂C additions on the properties of SPS manufactured WC-TiC-Ni cemented carbides. *International*

Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 41, 12–21.

- Grigoriev, S., Tarasova, T., Gusarov, A., Khmyrov, R. and Egorov, S. 2019. Possibilities of manufacturing products from cermet compositions using nanoscale powders by additive manufacturing methods. *Materials*.
- Gu, D., Hagedorn, Y.-C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R. J. S., Wissenbach, K. and Poprawe, R. 2012. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia*, 60(9), 3849–3860.
- Gu, D. and Meiners, W. 2010. Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering A*, 527(29–30), 7585–7592.
- Güler, O. 2023. The effect of candle-soot reinforced electroless Ni-P particle interface on tribological performance in copper-based materials produced by flake powder metallurgy method: Transfer of candle-soot from waste to solid-lubricant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 673, 131858.
- Gündoğdu, H. E. 2006. Kesme sıvılı ve kuru talaşlı işleminin iş parçası ve kesici takım üzerindeki etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Guo, C., Zhou, J., Chen, J., Zhao, J., Yu, Y. and Zhou, H. 2011. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, 270(7), 492–498.
- Guo, L., Xiao, L. R., Zhao, X. J., Song, Y. F., Cai, Z. Y., Wang, H. J. and Liu, C. B. 2017a. Preparation of WC/Co composite powders by electroless plating. *Ceramics International*, 43(5), 4076–4082.
- Guo, P., Zou, B., Huang, C. and Gao, H. 2017b. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 12–22.
- Guo, Z., Xiong, J., Yang, M. and Jiang, C. 2008. WC-TiC-Ni cemented carbide with enhanced properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 465(1–2), 157–162.
- Hacısalıhoğlu, İ. 2020. Seçici lazer ergitme yöntemi ile Ti-6Al-4V ELI alaşımından

üretilen farklı kafes yapıların yapısal-mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum.

Hirschberg, C., Jensen, N. S., Boetker, J., Madsen, A. Ø., Kääriäinen, T. O., Kääriäinen, M.-L., Hoppu, P., George, S. M., Murtomaa, M., Sun, C. C., Risbo, J. and Rantanen, J. 2019. Improving powder characteristics by surface modification using atomic layer deposition. *Organic Process Research & Development*, 23(11), 2362–2368.

Holleck, H., Karlsruhe, K., Application, F. and Data, P. 1984. United States Patent (19), (19).

Hu, Z., Nagarajan, B., Song, X., Huang, R., Zhai, W. and Wei, J. 2019. Formation of SS316L single tracks in micro selective laser melting: Surface, geometry, and defects. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.

Huang, B., Chen, L. D. and Bai, S. Q. 2006. Bulk ultrafine binderless WC prepared by spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 54(3), 441–445.

Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J. and Donmez, A. 2015. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 14001.

Ian Gibson, I. 2015. Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. springer publication.

İscar. 2024. ISO turn inserts wear problems and solutions.

<https://www.iscar.com/products.aspx/countryid/1/productid/12344> from retrieved.

Ituarte, I. F., Coatanea, E., Salmi, M., Tuomi, J. and Partanen, J. 2015. Additive manufacturing in production: A study case applying technical requirements. *Physics Procedia*, 78, 357–366.

Jafari, M., Enayati, M. H., Salehi, M., Nahvi, S. M. and Park, C. G. 2014. Microstructural evolution of nanosized tungsten carbide during heatup stage of sintering of electroless nickel-coated nanostructured WC–Co powder. *Ceramics International*, 40(7, Part B), 11031–11039.

Jiang, G., Zhuang, H. and Li, W. 2003. Parameters investigation during simultaneous synthesis and densification WC-Ni composites by field-activated combustion. *Materials Science and Engineering A*, 360(1–2), 377–384.

- Jiang, H., Tong, J., Zhan, Z., Yao, Z., Yu, S., Min, F., Wang, C., Noudem, J. G. and Zhang, J. 2023. Comparative study on the densification, microstructure and properties of WC-10(Ni, Ni/Co) cemented carbides using electroless plated and coprecipitated powders. *Materials*.
- Karagöz, İ. 2012. Kesici takım malzemesi seçiminin kesici takım kaynaklı hatalar üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Kalıp Dünyası Dergisi*, 76, 118–123.
- Karayel, B. 2015. Ç4140 malzemesinin tornalanmasında ilerleme, kesme hızı ve kesici takımın yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve aşınmaya etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Khmyrov, R. S., Safronov, V. A. and Gusarov, A. V. 2017a. Synthesis of nanostructured WC-Co hardmetal by selective laser melting. *Procedia IUTAM*, 23, 114–119.
- Khmyrov, R. S., Shevchukov, A. P., Gusarov, A. V. and Tarasova, T. V. 2017b. Phase composition and microstructure of WC-Co alloys obtained by selective laser melting. *Mechanics and Industry*, 18(7).
- Kim, H. C., Shon, I. J., Yoon, J. K., Doh, J. M. and Munir, Z. A. 2006. Rapid sintering of ultrafine WC-Ni cermets. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 24(6), 427–431.
- Ku, N., Pittari, J. J., Kilczewski, S. and Kudzal, A. 2019. Additive manufacturing of cemented Tungsten Carbide with a cobalt-free alloy binder by selective laser melting for high-hardness applications. *Jom*, 71(4), 1535–1542.
- Kumar, S. 2009. Manufacturing of WC-Co moulds using SLS machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 3840–3848.
- Kuş, A. 2013. AISI 52100 rulman çeliğinin tornalanmasında uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karabük.
- Kwon, H., Suh, C. Y. and Kim, W. 2015. Microstructure and mechanical properties of (Ti,W)C-Ni cermet prepared using a nano-sized TiC-WC powder mixture. *Journal of Alloys and Compounds*, 639, 21–26.
- Levy, G. N., Schindel, R. and Kruth, J. P. 2003. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), 589–609.

- Li, C. W., Chang, K. C., Yeh, A. C., Yeh, J. W. and Lin, S. J. 2018. Microstructure characterization of cemented carbide fabricated by selective laser melting process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 75(May), 225–233.
- Li, Z., Xu, K. and Pan, Y. 2019. Recent development of Supercapacitor Electrode Based on Carbon Materials. *Nanotechnology Reviews*, 8(1), 35–49.
- Lim, C. W. J., Le, K. Q., Lu, Q. and Wong, C. H. 2016. An overview of 3-D printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE potentials*, 35(4), 18–22.
- Lisovskii, A. F. 1982. Anomalous behavior of liquid metals in flat capillaries formed by sintered composite solids. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 21(7), 536–540.
- Liu, J., Chen, J., Liu, B., Lu, Y., Wu, S., Deng, X., Lu, Z., Xie, Z., Liu, W., Liu, J., Wang, Z. and Qu, Z. 2020. Microstructure evolution of WC-20Co cemented carbide during direct selective laser melting. *Powder Metallurgy*, 63(5), 359–366.
- Liu, J., Chen, J., Zhou, L., Liu, B., Lu, Y., Wu, S. H., Deng, X., Lu, Z., Xie, Z., Liu, W., Liu, J. and Qu, Z. 2021. Role of Co content on densification and microstructure of WC–Co cemented carbides prepared by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34, 1245–1254.
- Liu, K. and Li, X. P. 2001. Ductile cutting of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1–3), 348–354.
- Liu, Z., Jian, L. and Tao, W. 2006. Preparation of WC-Co composite powder by electroless plating and its application in laser cladding. *Materials Letters*, 60(16), 1956–1959.
- Loto, C. A. 2016. Electroless nickel plating – a review. *Silicon*, 8(2), 177–186.
- Luo, L., Wu, Y., Li, J. and Zheng, Y. 2011. Preparation of nickel-coated tungsten carbide powders by room temperature ultrasonic-assisted electroless plating. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1091–1095.
- Lyu, X., Lyu, X., Jiang, X., Jiang, X., Sun, H., Sun, H., Shao, Z. and Shao, Z. 2020. Microstructure and mechanical properties of WC-Ni multiphase ceramic materials with $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as a binder. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 543–557.
- Manufacturing Guide. 2021. Selective Laser Sintering, SLS.

<https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls> from retrieved.

Marsh, R. 2023. Micro laser sintering technology to 3D print tiny metal parts. New Atlas. <https://newatlas.com/micro-laser-sintering-3d-prints-tiny-metal-parts/30115/> from retrieved.

Maus, L. 2024. 8 fascinating facts about electroless plating. facts.net.

McDonnell, L. P., Viner, J. J. S., Ruiz-Tijerina, D. A., Rivera, P., Xu, X., Fal'ko, V. I. and Smith, D. C. 2021. Superposition of intra- and inter-layer excitons in twistrionic MoSe₂/WSe₂ bilayers probed by resonant Raman scattering. 2D Materials, 8(3), 35009.

Mendoza Jimenez, E., Reeja-Jayan, B. and Beuth, J. 2022. Process development for the laser powder bed fusion of WC-Ni Cermets using sintered-agglomerated powder. International Journal of Applied Ceramic Technology, 19(3), 1328–1340.

Mercelis, P. and Kruth, J. 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid prototyping journal, 12(5), 254–265.

Mezzetta, J. 2017. Process-property relationships of Ti6Al4V fabricated through selective laser melting. McGill University (Canada).

Mhetre, G. N., Jadhav, V. S., Deshmukh, S. P. and Thakar, C. M. 2022. A review on additive manufacturing technology. ECS Transactions, 107(1), 15355.

Motorcu, A. R. 2006. Ç1050, Ç4140 ve Ç52100 çeliklerinin işlenebilirliği ve modeller geliştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara.

Olortegui-Yume, J. A. and Kwon, P. Y. 2007. Tool wear mechanisms in machining. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2(3–4), 316–334.

Özdemir, U. ve Erten, M. 2003. Talaşlı imalat sırasında kesici takımında meydana gelen hasar mekanizmaları ve takım hasarını azaltma yöntemleri. Journal of Aeronautics and Space Technologies, 1(1), 37–50.

Özer, G. 2020. Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 606–621.

- Palaniappa, M., Babu, G. V. and Balasubramanian, K. 2007. Electroless nickel-phosphorus plating on graphite powder. *Materials Science and Engineering A*, 471(1–2), 165–168.
- Pascal, D. T., Kazamer, N., Muntean, R., Valean, P. C., Marginean, G. M. and SSerban, V. A. 2018. Electrochemical corrosion behavior of high temperature vacuum brazed WC-Co-NiP functional composite coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1).
- Peleg, J. 2020. Additive and traditionally manufactured components a comparative analysis of mechanical properties. *Additive and Traditionally Manufactured Components*.
- Petsch, T., Regenfuß, P., Ebert, R., Hartwig, L., Klötzer, S., Brabant, T. H. and Exner, H. 2004. Industrial laser micro sintering. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics in (Vol. 2004, p. M705)*. Laser Institute of America.
- Piili, H., Happonen, A., Väistö, T., Venkataramanan, V., Partanen, J. and Salminen, A. 2015. Cost estimation of laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 78(August), 388–396.
- Poetschke, J., Richter, V. and Holke, R. 2012. Influence and effectivity of VC and Cr 3C 2 grain growth inhibitors on sintering of binderless tungsten carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31, 218–223.
- Pul, M. 2010. Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi. *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara*.
- Regenfuss, P., Ebert, R. and Exner, H. 2007. Laser micro sintering—a versatile instrument for the generation of microparts. *Laser Technik Journal*, 4(1), 26–31.
- Regenfuss, P., Hartwig, L., Klotzer, S., Ebert, R. and Exner, H. 2004. Microparts by a novel modification of selective laser sintering. *Technical Papers-Society of Manufacturing Engineers-All Series-*.
- Riedel, W. 1991. *Electroless nickel plating*. ASM International.
- Rombouts, M. 2006. Selective Laser Sintering/Melting of Iron-Based Powders, (september), 268.

Sandvik Coromant. 2004. Kesici kenarlarda aşınma.

<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges> from retrieved.

Shellabear, M. and Nyrrhila, O. 2004. DMLS-Development history and state of the art. Laser assisted netshape engineering 4, proceedings of the 4th LANE, 21–24.

Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., Rajput, S. K., Sonia, P., Singhal, P. and Saxena, K. K. 2020. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. Materials Today: Proceedings, 26, 3058–3070.

Šubić, J., Slokar Benić, L., Selanec, M. and Erman, Ž. 2022. Effect of hard metal production on the environment. Holistic Approach to Environment, 12(3), 102–109.

Sürmen, H. K. 2019. Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 373–392.

Tan, C., Hu, J., Shi, Q., Khanlari, K., Xie, H. and Liu, X. 2022. Enhanced hardness and toughness in WC/W2C-Ni-Cu composites fabricated by selective laser melting. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 105(July 2021), 105805.

Tang, S., Li, P., Liu, D., Li, P. and Niu, Q. 2019. Cutting performance of a functionally graded cemented carbide tool prepared by microwave heating and nitriding sintering. High Temperature Materials and Processes, 38(2019), 582–589.

Tatlı, O. 2020. Üç boyutlu yazıcı tasarımı, imalatı ve dolgu geometrisinin mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.

Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van and Kruth, J. P. 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. Acta Materialia, 58(9), 3303–3312.

Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N. and Yadollahi, A. 2015. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. Additive Manufacturing, 8, 36–62.

Tian, Y., Tomus, D., Rometsch, P. and Wu, X. 2017. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. Additive Manufacturing, 13, 103–112.

- Uhlmann, E., Bergmann, A. and Gridin, W. 2015. Investigation on additive manufacturing of Tungsten Carbide-cobalt by selective laser melting. *Procedia CIRP*, 35, 8–15.
- Uluğ, D. 2012. Kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür takımlar için takım ömrü modeli'ndeki 'n' üstel değerinin deneysel olarak araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Upadhyaya, G. S. 1998. Cemented tungsten carbides: production, properties and testing. William Andrew.
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A. and Hayward, K. 2021. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*.
- Wei, K., Wang, Z. and Zeng, X. 2017. Preliminary investigation on selective laser melting of Ti-5Al-2.5Sn α -Ti alloy: From single tracks to bulk 3D components. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 73–85.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P. and Rayment, D. 2014. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials and Design*, 55, 533–541.
- Zhao, Y., Wang, H., Zhang, L., Li, X., Guo, Z., Zhang, J., Yi, D., Liu, B. and Bai, P. 2022. Study on the microstructure and properties of WC-12Co cemented carbide fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 3512–3521.