

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

ÖNSÖZ

“Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Bakır Esaslı Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu çalışma TÜBİTAK 119M398 No’lu proje kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca, bana her zaman destek olan, çalışmamın her safhasında yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Temel VAROL’a, karakterizasyon çalışmalarında özveri ile yardım eden Arş. Gör. Onur GÜLER’e ve değerli ekip arkadaşım Metalurji ve Malzeme Mühendisi Serhatcan Berk AKÇAY’a, eklemeli imalat çalışmalarındaki üstün katkılarından dolayı Erzurum Teknik Üniversitesinden Prof. Dr. Fatih YILDIZ’a, Dr. Öğretim Üyesi İlyas HACISALİHOĞLU’na ve Arş. Gör. Gürkan KAYA’ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu günlere ulaşmamı sağlayan ve meslek hayatımda bana yol gösteren Kadir Tolga TEKKOL hocam olmak üzere tüm Ali Osman SÖNMEZ Teknik Lisesi öğretmenlerine, anneme, babama, kardeşime ve bana maddi ve manevi destek olan Dayım Halil ÇİLBAŞ olmak üzere tüm aile bireylerime teşekkürlerimi borç bilirim.

Hüseyin Can AKSA

Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Bakır Esaslı Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Temel Varol’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 09/12/2021

Hüseyin Can AKSA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ.....	2
1.1. Bakır ve Bakır Alaşımları.....	2
1.1.1. Bakır	2
1.1.2. Saf Bakır	2
1.1.3. Saf Bakırın Genel Özellikleri	2
1.1.4. Bakır Alaşımları.....	3
1.1.5. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	3
1.2. Elektrik Kontak Malzemeleri	4
1.2.1. Genel Bilgiler.....	4
1.2.2. Elektrik Kontak Direnci.....	6
1.2.3. Ark Erozyonu ve Malzeme Taşınımı.....	6
1.2.4. Kaynak Oluşumu	8
1.2.5. Eriyik Metal Köprü Oluşumu	9
1.2.6. Elektrik Kontak Malzemelerinin Kullanım Alanları	10
1.3. Akımsız Kaplama Yöntemi	10
1.3.1. Akımsız Kaplama Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler.....	10
1.3.2. Akımsız Kaplama Banyo Bileşenleri.....	11

1.3.3. Gümüş Kaynağı	11
1.3.4. İndirgeyici.....	12
1.3.5. Akımsız Kaplama Kullanım Alanları	12
1.4. Eklemeli Üretim Yöntemleri	13
1.4.1. Genel Bilgiler.....	13
1.4.2. Metal Eklemeli Üretimi	14
1.4.3. Toz Yataklı Birleştirme	15
1.5. Literatür Özeti.....	18
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	22
2.1. Kullanılan Malzeme.....	22
2.2. Parçacık Boyut Ölçümü	22
2.3. Akımsız Kaplama	23
2.3.1. Bakır Tozlarının Akımsız Kaplama Yöntemi ile Gümüş Kaplanması	23
2.3.2. Bakır Tozlarından Oksit Tabakasının Temizlenmesi	24
2.3.3. Gümüş Kaynağının pH değerinin Ayarlanması.....	28
2.3.4. Akımsız Gümüş Kaplama.....	30
2.3.5. Oksidasyon Direnci Ölçülmesi	34
2.4. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi ile Kontak Malzemesi Üretimi	35
2.4.1. SLE Yöntemi ile Üretimde Kullanılan Enerji Yoğunluğu	36
2.4.2. Lazer Gücü ve Tarama Hızı Parametrelerinin Değişiminin Neden Olacağı Efektif Lazer Çapının Belirlenmesi.....	37
2.4.3. Yana Kayma Miktarı	37
2.4.4. Düşük Tarama Hızlarının ve Ön-Maruziyet Stratejisinin Yoğunluğa Etkisi.....	40
2.4.5. SLE Yöntemi ile Çekme Test Numunelerinin Üretimi ve Üretim Yönünün Dayanıma Etkisi.....	41
3. BULGULAR.....	45

3.1.	Parçacık Morfoloji İncelemeleri	45
3.2.	Kristal Yapı İncelemeleri.....	45
3.3.	Akımsız Gümüş Kaplama Sonrası Toz Morfolojisi ve Kristal Yapı İncelemeleri	46
3.4.	Gümüş Kaplı Bakır ve Saf Bakır Tozlarının Oksidasyon Direncinin Ölçülmesi.....	47
3.5.	Tek Kontur Lazer Vuruşları Bulguları	48
3.6.	Yana Kayma Miktarı ve Yüzde Doluluk Oranları.....	57
3.7.	Düşük Tarama Hızlarının ve Ön-Maruziyet stratejisinin Yoğunluğa Etkisi.....	69
3.8.	Çekme Testi Bulguları ve Optimize Edilmiş Çekme Testi Bulguları	70
3.9.	Fraktrografik İncelemeler	72
3.10.	SLE ile Üretilmiş Numunelerin Elektriksel İletkenlikleri	74
3.11.	SLE Ürünlerinin Üretim Sonrası Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Geliştirme Çalışmaları	76
4.	TARTIŞMA	79
5.	SONUÇLAR.....	82
6.	ÖNERİLER.....	85
7.	KAYNAKÇA	86
	ÖZGEÇMİŞ.....	

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZET

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE BAKIR ESASLI ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Hüseyin Can AKSA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Temel VAROL
2021, 90 Sayfa,

Bu çalışmada, akımsız kaplama yöntemi ile Gümüş (Ag) kaplanan Bakır (Cu) tozlarının, seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi ile elektrik kontak malzemesi elde edilmesi ve SLE üretim parametrelerinin yansıtıcılığı yüksek olan Gümüş kaplı Bakır esaslı metal tozları adına optimizasyon çalışması yapılmıştır. Lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı gibi SLE parametrelerinin çekirdek-kabuk parçacıklarından üretilen kompaktların mikro yapısı, yoğunluğu ve elektriksel iletkenliği gibi önemli özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma, Bakır-Gümüş esaslı malzemelerin SLE yöntemi ile üretiminde kullanılan parametrelerin, kompaktların özelliklerini doğrudan etkilediği gerçeğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca SLE üretimi sonrası farklı metotlar denenerek elde edilen ürünlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek adına denemeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu Yazıcı, Metal Eklemleri Üretimi, Seçici Lazer Ergitme, Akımsız Kaplama, Bakır, Gümüş, Elektrik Kontak Malzemeleri.

MASTER THESIS

SUMMARY

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF COPPER BASED ELECTRICAL CONTACT MATERIALS BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Hüseyin Can AKSA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Material Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Temel VAROL
2021, 90 Pages

In this study, Silver (Ag) coated Copper (Cu) powders with electroless plating method, electrical contact material is obtained by selective laser melting (SLE) method and optimization work has been carried out for Silver coated copper-based metal powders with high reflectivity of SLE production parameters. The effects of SLE parameters such as laser power, scanning speed and scanning range on important properties such as microstructure, density and electrical conductivity of compacts produced from core-shell particles were investigated. This study contributes significantly to the fact that the parameters used in the production of Copper-Silver based materials by SLE method directly affect the properties of compacts. In addition, after the production of SLE, different methods were tried and tests were made in order to improve the mechanical and physical properties of the products obtained.

Key Words: 3D Printer, Metal Joint Production, Selective Laser Melting, Electroless Coating, Copper, Silver, Electrical Contact Materials.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Bakır ve Genel Özellikleri [5].	2
Şekil 2. Kontak malzemelerinin çalışma prensibi 1) Hareketli kontak 2) Sabit kontak 3) Kontak mesafesi	5
Şekil 3. Kontakların temas hali ve ergimiş metal köprü oluşumunun şematik gösterimi [18].	6
Şekil 4. Malzeme Transferi şematik gösterimi [18].	7
Şekil 5. Malzeme transferinin durumları (T_M : Ergime Sıcaklığı T_B : Kaynama sıcaklığı) [20].	7
Şekil 6. Statik kaynak oluşum aşamaları [22].	8
Şekil 7. Dinamik Kaynak oluşum aşamaları [22].	8
Şekil 8. Erimiş Köprü Oluşumu. a) Statik Kontak, b) Kontak a-noktası yumuşaması, c) Erime, d) Köprü uzaması, e) Köprü kırılması [25].	9
Şekil 9. ASTM F2792-12a'da belirtilen üretim yöntemlerine göre eklemeli imalat çeşitleri.	14
Şekil 10. Elektron ışın ergitme [45].	16
Şekil 11. DMLS ve SLS'in çalışma prensibi [47].	16
Şekil 12. SLE çalışma prensibi şematik gösterimi [49].	18
Şekil 13. Toz yataklı füzyon EÜ'de çok ölçekli, fiziki olayların şematik bir gösterimi [50].	18
Şekil 14. Deneylerde kullanılan bakır tozlarının başlangıç morfolojisi.	22
Şekil 15. Parçacık boyut dağılımını gösteren grafik.	22
Şekil 16. Bakır tozunun tartılması.	24
Şekil 17. Saf su cihazındaki iletkenlik değeri.	25
Şekil 18. $(NH_4)_2SO_4$ tartımı.	25
Şekil 19. 100 mL Saf Su.	26
Şekil 20. 50 mL NH_3 .	26
Şekil 21. a) Oksit giderme çözeltisinin hazırlanması. b) Sıcaklık kontrolü.	27
Şekil 22. a) Bakır tozlarının ilavesi. b) Oksit giderme işleminin gerçekleştirilmesi.	27
Şekil 23. Temizleme işlemi sonrası çözeltideki renk değişimi.	28

Şekil 24.	a) AgNO_3 , b) AgNO_3 sulu çözeltisinin hazırlanması.....	29
Şekil 25.	a) Başlangıç pH değeri, b) NH_4OH eklenmesi ile değişen pH ve çözelti rengi.....	29
Şekil 26.	a) NH_4OH eklenmeye devam edilerek pH değerinin yükseltilmesi, b) Hedef pH değerine ulaşılması ve çözeltinin tekrar saydam hale gelmesi.	30
Şekil 27.	1,625 gram $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	30
Şekil 28.	a) $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve 50 mL saf su ile indirgeyici çözeltisinin hazırlanması, b) Bakır tozlarının çözeltiye ilavesi.	31
Şekil 29.	a) Bakır tozu ilave edilmiş $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisinin sıcaklık kontrolü, b) pH değeri 11 olan AgNO_3 çözeltisinin sıcaklık kontrolü.....	31
Şekil 30.	a) AgNO_3 çözeltisinden pipet yardımı ile çözeltinin alınması, b) Bakır tozları bulunan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisine damlatma sureti ile AgNO_3 'ün ilavesi, c) 10 mL sonrası kalan AgNO_3 çözeltisinin ilavesi.....	32
Şekil 31.	a) AgNO_3 çözeltisinin tamamının bakır tozları bulunan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisine eklenmesinden sonraki görüntüsü, b) 30 dk. sonrası kaplama çözeltisinin görüntüsü.....	33
Şekil 32.	a) Gümüş kaplanmış bakır tozlarının etanol ile yıkanması, b) Tozların yıkama sonrası petri kabındaki görüntüsü.....	33
Şekil 33.	a) Kurutma fırını, b) kurutma sonrası gümüş kaplı bakır tozları.....	34
Şekil 34.	Eklemeli imalat cihazı (Concept Laser MLab R).....	35
Şekil 35.	AutoFab yazılımı ile STL dosyasının SLE üretimi için hazırlanması.....	36
Şekil 36.	100 W lazer gücünde, 25 μm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki numunelerin a) üretim, b) üretim sonrası görüntüleri.	37
Şekil 37.	Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim.....	38
Şekil 38.	a) Dolu numunelerin ilk katmanının üretimi b) İkinci katmanın üretimi.....	39
Şekil 39.	Üretimi tamamlanmış dolu numuneler.....	40
Şekil 40.	Çekme numunesi boyutları.....	41
Şekil 41.	SLE yöntemi ile üretilmiş çekme numuneleri.....	42
Şekil 42.	SLE ile üretilmiş 2. Parti çekme numuneleri.	43
Şekil 43.	Kullanılan Bakır tozlarının morfolojik görüntüsü.....	45
Şekil 44.	Bakır tozlarına ait X-Işını kırınım desenleri.....	46
Şekil 45.	Kaplama sonucunda elde edilen metalik tozlara ait morfoloji; (a) genel morfoloji, (b) kaplama kalınlığı	46

Şekil 46.	Kaplama sonucunda üretilen Gümüş kaplı Bakır tozlarına ait X-ışını kırınım desenleri.....	47
Şekil 47.	Gümüş kaplı tozların ve Saf Bakır tozlarının % ağırlık değişimleri.	47
Şekil 48.	Sırasıyla 100W lazer gücünde farklı ilerleme hızları ve yana kayma değerlerinde üretilmiş numunelerin doluluk oranları [54].	68
Şekil 49.	100 W lazer gücü, 50 W ön maruziyet gücü, farklı tarama hızlarında ve yana kayma değerlerinde üretilen numunelerin yüzey optik mikroskop görüntüleri, (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-50 (d) 300-40 (e) 300-45 (f) 300-50 (g) 400-40 (h) 400-45 (i) 400-50 [54].	69
Şekil 50.	Yana kayma ve tarama hızına bağlı olarak % doluluk oranı değişim grafiği [54].	70
Şekil 51.	SLE üretim parametrelerine göre belirlenen çekme gerilmesi değerleri.....	70
Şekil 52.	SLE üretim parametrelerine göre belirlenen % uzama değerleri.	71
Şekil 53.	Optimize edilmiş SLE üretim parametrelerine göre belirlenen gerilme (MPa) değerleri.....	71
Şekil 54.	Optimize edilmiş SLE üretim parametrelerine göre belirlenen % uzama değerleri.....	72
Şekil 55.	Çekme numunelerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri (500X büyütme), (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-40yty (d) 250-45yty.	72
Şekil 56.	Çekme numunelerinin kırılma SEM görüntüleri (1000X büyütme), (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-40yty (d) 250-45yty.	73
Şekil 57.	Bakır – Gümüş faz diyagramı. Ötektik bileşim ağırlıkça %28,1 Cu-ağırlıkça %71,9 Ag'dir ve Gümüş'ün Bakır'daki katı çözünürlük limiti ağırlıkça %8 Ag'dir [55].	73
Şekil 58.	100 W-250 mm/s Elektriksel iletkenlik sonuçları.....	74
Şekil 59.	100W-300mm/s Elektriksel iletkenlik sonuçları.	75
Şekil 60.	100W-400mm/s Elektriksel iletkenliği sonuçları.....	75
Şekil 61.	Sinterleme sonrası SLE analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.	76
Şekil 62.	Sıcak pres sonrası SLE numunesi analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.	77
Şekil 63.	Sıcak Haddelme sonrası SLE numunesi analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.	78

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Saf Bakırın genel özellikleri [8].	2
Tablo 2. Elektrik kontak malzemeleri ve kullanım alanları [22].	10
Tablo 3. Akımsız Gümüş Kaplama Parametreleri	24
Tablo 4. TGA Deney Parametreleri.	34
Tablo 5. Dolu numunelerin üretilmesinde kullanılan lazer parametreleri.	39
Tablo 6. SLE proses parametreleri [54].	41
Tablo 7. Sinterleme Parametreleri.	43
Tablo 8. Sıcak Pres Parametreleri.	43
Tablo 9. Sıcak Haddeleme Parametreleri.	43
Tablo 10. 100 W lazer gücünde, 25 µm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki iz genişliğinin SEM görüntüleri [54].	48
Tablo 11. 100 W lazer gücünde, 25 µm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki iz genişliğinin optik mikroskop kesit görüntüleri.	54
Tablo 12. 100W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında ve farklı yana kayma değerlerinde üretilmiş numunelerin yüzey optik görüntüleri [54].	57
Tablo 13. SLE numuneleri sinterleme sonrası deney sonuçları.	76
Tablo 14. SLE numunelerinin sıcak pres parametreleri ve deney sonuçları.	77
Tablo 15. SLE numunelerinin sıcak haddeleme parametreleri ve deney sonuçları.	78
Tablo 16. Gümüş kaplı bakır parçacıklara ait karşılaştırmalı morfoloji görüntüleri [56-58].	79

SEMBOLLER DİZİNİ

Ag	:	Gümüş
Ag ⁺	:	Gümüş İyonu
Ag ⁰	:	0 değerlikli Gümüş İyonu
Cu	:	Bakır
Cu ⁰	:	0 değerlikli Bakır İyonu
Cu ²⁺	:	2 değerlikli Bakır İyonu
IACS	:	Uluslararası Tavlı Bakır Standartı (International Annealed Copper Standard)
OFHC	:	Oksijensiz Yüksek İletkenlik (Oxygen-Free High Conductive)
ASTM	:	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
SAE	:	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers)
UNS	:	Birleşik Numaralandırma Sistemi (Unified numbering system)
cm	:	Santimetre
mm	:	Milimetre
µm	:	Mikrometre
MPa	:	Megapascal
GPa	:	Gigapascal
u	:	Atom Ağırlığı birimi Dalton
g(gr.)	:	Gram

cm ³	:	Santimetreküp
J	:	Joule
K	:	Kelvin
W	:	Watt
Ω	:	Ohm
n Ω	:	NanoOhm
°C	:	Selsiyus Derece
Al	:	Alüminyum
Si	:	Silisyum
Ni	:	Nikel
Sn	:	Kalay
Zn	:	Çinko
ECR	:	Elektrik Kontak Direnci (Electrica Contact Resistance)
L	:	Litre
mL	:	Mililitre
W	:	Tungsten
WC	:	Tungsten Karbür
Mo	:	Molibden
C	:	Karbon
CdO	:	Kadmiyum Oksit
Cr	:	Krom

AgNO_3	:	Gümüş Nitrat
CuO	:	Bakır Oksit
$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$:	Potasyum Sodyum Tartarat
NH_3	:	Amonyak
NO_3	:	Nitrat
OH^-	:	Hidroksil İyonu
$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6^{2-}$:	2 değerlikli Tartarat İyonu
H_2O	:	Su
Ag_2O	:	Gümüş (I) Oksit
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
EÜ	:	Eklemeli Üretim
TYB	:	Toz Yataklı Birleştirme
DMLS	:	Direkt Metal Lazer Sinterleme
SLS	:	Seçici Lazer Sinterleme
EIE	:	Elektron Işın Ergitme
SLE	:	Seçici Lazer Ergitme
2B	:	2 Boyutlu
3B	:	3 Boyutlu
Ar	:	Argon
N_2	:	Azot
H_2	:	Hidrojen

SiC	:	Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	:	Alümina (Alüminyum Oksit)
SiO ₂	:	Silisyum Oksit
SnO	:	Kalay Oksit
XRD	:	X-Işını Difraksiyonu (X-Ray Diffraction)
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Elektron Microscope)
UK	:	Birleşik Krallık (United Kingdom)
((NH ₄) ₂ SO ₄)	:	Amonyum Sülfat
NH ₄ OH	:	Amonyum Hidroksit
C ₂ H ₅ OH	:	Etil Alkol-Etanol
dak.	:	Dakika
Nd:YAG	:	Neodyum emdirilmiş İtriyum Alüminyum Garnet
STL	:	Standart Üçgen Dili (Standart Triangle Language)
P	:	Lazer Gücü
t	:	Katman Kalınlığı
v	:	Lazer Tarama Hızı
h	:	İki Eriyik Havuz Arasındaki Mesafe
E	:	Enerji Yoğunluğu
s	:	Saniye
TGA	:	Termogravimetrik Analiz

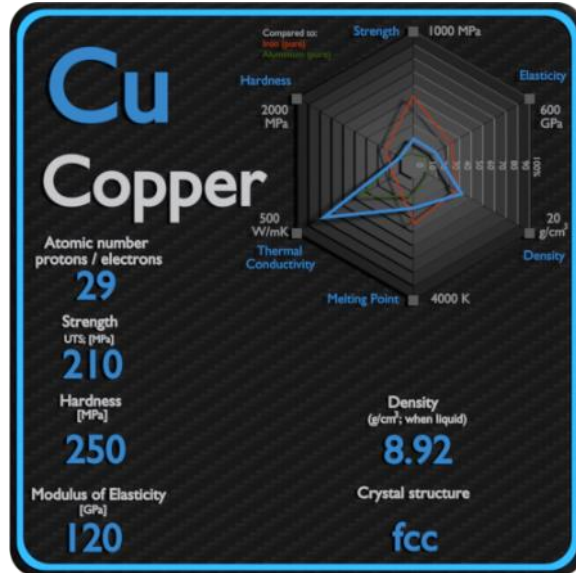
1. GİRİŞ

1.1. Bakır ve Bakır Alaşımları

1.1.1. Bakır

Bakır (Cu), doğada doğrudan kullanılabilir metallerin başında gelmektedir. Bu nedenle, MÖ 8000 civarında ilkel insanların bazı bölgelerde dikkatini çekerek kullanılmaya başlanmıştır. Bundan binlerce yıl sonra, MÖ 5000 civarında, sülfürlü cevherinin metale dönüştürüldüğü ilk metal olarak kayıtlara geçmiştir. Bunu takiben MÖ 4000 civarında bir kalıba dökülen ilk metal olmuş ve MÖ 3500 civarında kalay elementi ile alaşımlandırılarak bronz elde edilmiştir [1].

Bakırın atom numarası, yoğunluğu, erime noktası ve elektriksel iletkenliği sırasıyla 29, 8.94 g/cm³, 1083 °C ve %100 Uluslararası Tavlı Bakır Standardı'na (IACS) eşittir [2]. Yenilenen teknoloji açısından bakır, mükemmel elektriksel ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı yeni nesil malzeme olarak kabul edilmektedir [3]. Şekil 1'de görülen özelliklerinden dolayı bakır ve bakır alaşımları, elektrik motorları, demiryolları, küresel iletişim ağları vb. gibi hemen hemen her türlü elektrikli ve elektronik cihazlarda geniş kullanım alanına sahiptir [4].



Şekil 1. Bakır ve Genel Özellikleri [5].

1.1.2. Saf Bakır

Cu içeriği %99,3 ve daha fazla bakır oranına sahip malzemeler saf bakır olarak tanımlanmaktadır. Oksijen içeriği milyonda 10 (ppm)'un altında olan bakır oksijensiz-yüksek iletkenlikte bakır (OFHC) olarak adlandırılmaktadır. OFHC dereceli bakırın oda sıcaklığında elektrik iletkenliği %100 IACS'ye eşittir [6]. IACS = 20 °C'de 17.241 nΩ*m değerine tekabül etmektedir. ASTM/SAE birleşik sayı sistemine (UNS) göre C10100, C10200, C10400, C10500 ve C10700 olan bakır kaliteleri OFHC bakır olarak sınıflandırılmaktadır [7].

1.1.3. Saf Bakırın Genel Özellikleri

Tablo 1. Saf Bakırın genel özellikleri [8].

Fiziksel Özellikleri	Yoğunluğu (20 °C): 8,94 g/cm ³
Kimyasal Özellikleri	Atomik Ağırlık: 65,546 u Atom Numarası: 29
Mekanik Özellikleri	Sertlik (Vickers): 50 Çekme Dayanımı: 210 MPa Akma Dayanımı: 33,3 MPa Kopma Uzaması: %60 Elastisite Modülü: 110 GPa Esneklik Modülü: 140 GPa Poissons Oranı: 0,343 Kayma Modülü: 46 GPa
Elektriksel Özellikleri	Elektriksel Direnç: 0,00000170 Ω*cm Manyetik Alınganlık: -8,00x10-8
Termal Özellikleri	Füzyon Isısı: 204,8 J/g Buharlaştırma Isısı: 5234 J/g Spesifik Isı kapasitesi: 0,385 J/g*°C Termal İletkenlik: 398 W/m*K Erime Noktası: 1083,2 – 1083,6 °C Kaynama Noktası: 2562 °C

1.1.4. Bakır Alaşımları

Alaşımlandırılma suretiyle Saf Bakır'ın mekanik dayanımı önemli ölçüde iyileştirebilmekte ve yumuşama sıcaklıkları yükseltebilmektedir. Ancak bu avantajların yanında, alaşım elementlerinin ihtivası elektriksel ve termal iletkenliği azaltmaktadır. Üç temel alaşım geliştirme mekanizması olan katı çözeltili sertleştirilmesi, çökelti sertleştirilmesi ve dispersiyonla güçlendirme yöntemleri içinde katı çözeltili sertleştirilmesi iletkenlik değerlerini önemli oranda azaltmakta ve bundan dolayı da yüksek mukavemetli bakır alaşımlarını elde etmek için çok sık tercih edilmemektedir [9].

Bakır alaşımlarının oluşturmak için sıklıkla kullanılan metaller Alüminyum (Al), Nikel (Ni), Silisyum (Si), Kalay (Sn), ve Çinko (Zn) metallere aittir. Diğer elementler, korozyon direnci veya işlenebilirlik gibi belirli malzeme özelliklerini geliştirmek için düşük miktarlarda alaşım elementi olarak kullanılmaktadırlar. Bakır ve alaşımları dokuz ana gruba ayrılmaktadır. Bu ana gruplar şunlardır [6]:

1. Minimum %99,3 Cu içeren Saf Bakırlar,
2. %5'e kadar alaşım elementleri içeren yüksek bakır alaşımları,
3. %40'a kadar Zn içeren Cu-Zn alaşımları (Pirinçler),
4. %10'a kadar Sn ve %0,2 P içeren Cu-Sn alaşımları (Fosfor Bronzları),
5. %10'a kadar Al içeren Cu-Al alaşımları (Alüminyum Bronzları),
6. %3'e kadar Si içeren Cu-Si alaşımları (Silisyum Bronzları)
7. %30'a kadar Ni içeren Cu-Ni alaşımları
8. %27'ye kadar Zn ve %18 Ni içeren Cu-Zn-Ni alaşımları (Nikel Gümüşler)
9. Örneğin işlenebilirlik gibi belirli bir özelliği veya özelliği geliştirmek için alaşım elementleri içeren özel alaşımlar.

1.1.5. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kullanım Alanları

Bakır ve Bakır alaşımlarının kullanım alanları genel olarak şöyle sınıflandırılabilir;

I. Elektrik enerjisi ve elektronik endüstrisindeki uygulamalar

Yüksek elektriksel iletkenlik istenilen bu uygulama alanında bakırın kullanım türlerine çeşitli örnekler verilebilmektedir. Tel ve kablo, transformatörler, anahtarlar, fiş bileşenleri

ve konektörler vb. gibi elektrik güç iletimi; örneğin stator, rotor, mil başı ve içi boş tel, vb. olarak motor üretimi; iletişim kabloları ve konut elektrik devreleri de büyük miktarda bakır tel kullanımına ihtiyaç duymaktadır.

Yüksek frekanslı ve ultra yüksek frekanslı tüpler, kateterden geçen, magnetron vb. gibi vakumlu elektronik cihazlar. Bakır baskılı devreler, çok sayıda Bakır folyo ve Bakır tabanlı lehim malzemesi gerektirmektedir. Entegre devrelerde bakır, ara bağlantı ve kurşun çerçeveler için silikon yongalarda alüminyumun yerini almaktadır

II. Mekanik ve metalurji endüstrilerindeki uygulamalar

Yüksek termal ve korozyon dayanımının istenildiği bu uygulama alanında silindirik gömlekleri, dişliler, bağlantı parçaları, bağlantı elemanları, büküm vb. gibi her türlü şanzıman parçası ve sabit parçalar, sürtünme önleyici ve yağlama için bakır veya bakır alaşımları kullanılmaktadır. Ayrıca sürekli döküm teknolojisindeki metalürjik ekipmanın önemli bir parçası olan kristalleştirici, çoğunlukla yüksek mukavemet ve iletkenliğe sahip bakır-krom ve bakır-gümüş veya diğer bakır alaşımlarından yapılmaktadır. Metalurji ve elektro cüruf fırınlarındaki elektrik vakumlu ark fırınları, su soğutmalı potalar bakır borudan yapılırken, her türlü endüksiyon bobini bakır veya bakır sargılar ile üretilmektedir. Alaşım elementi olarak bakır, çelik ve alüminyum endüstrisinde önemli bir katkı elementidir. Düşük alaşımlı yapı çeliğine az miktarda bakır eklenerek çeliğin hava ve sudaki korozyon direnci artırılabilir. Korozyona dayanıklı dökme demir ve paslanmaz çelikte bakır katkısı, korozyon direncinin daha da geliştirilebileceği anlamına gelmektedir.

III. Yeni endüstrilerde ve yüksek teknoloji alanlarında uygulamalar

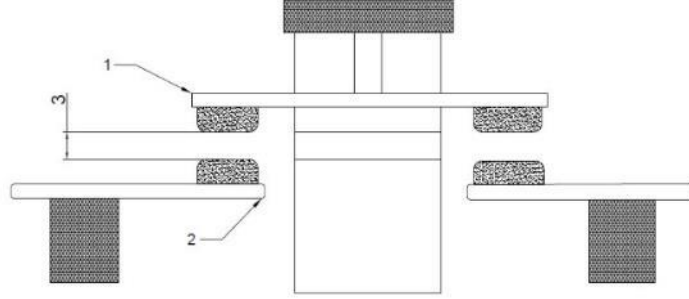
Süper iletken alaşımların kaplanması, kriyojenik ortam kapları ve boru hatları, roket motorlarının soğutma astarları ve yüksek enerjili hızlandırıcılarda mıknatıs sargıları vb. alanlarda bakır ve bakır alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

1.2. Elektrik Kontak Malzemeleri

1.2.1. Genel Bilgiler

Elektrik kontağı, elektrik devrelerini açık kapatarak akım iletimin sağlayan elektriksel olarak iletken bir malzeme olarak tanımlanmaktadır [11]. Kontak çifti yalıtkan bir boşlukla ayrıldığında, akım iletimi kesilmektedir. Kontaklar temas halinde iken anahtar kapalı

konumdadır; kontakların teması kesildiğinde, anahtar açık konumda bulunmaktadır. Kontak çiftleri temas konumunda iken, yüzey yapısına, yüzey kimyasına ve temas süresine bağlı olarak belirli bir temas direnci ile elektrik akımını aktarmaktadır [12].



Şekil 2. Kontak malzemelerinin çalışma prensibi 1) Hareketli kontak 2) Sabit kontak 3) Kontak mesafesi

Elektrik temasının önemli özellikleri iletkenlik, korozyon direnci, sertlik, akım yükü, şekil ve boyuttur. Bu özelliklerin çoğu, malzemenin doğal özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bunlar;

1. İletkenlik: bir malzemenin elektrik akımını taşıma veya iletme yeteneğinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. İletkenlik değeri genellikle %100 IACS olan bir Cu standardının yüzdesi olarak verilmektedir. Saf gümüşün elektriksel iletkenliği %105 IACS'dir ve gümüş en yüksek iletkenliğe sahip olan metaldir.
2. Korozyon direnci: malzemenin kimyasal bozulmaya karşı direncini tanımlamaktadır. Korozyon direnci az olan bir malzeme büyük olasılıkla gözle görülür şekilde bozulacak ve daha kısa bir ömre sahip olacaktır.
3. Sertlik: malzemenin uygulanan bir kuvvetten kaynaklanan kalıcı deformasyonlara direncinin bir ölçüsüdür.
4. Akım yükü: malzemenin kaldırabileceği, önerilen maksimum akım yüküdür. Statik kontaklar veya konnektörler için nominal akım, bir cihazın aşırı ısınmadan sürekli olarak taşıyabileceği akımdır. Devre kesiciler, kontaktörler veya anahtarlar gibi cihazlarda kontakları açmak ve kapatmak için kullanılan nominal akım, bir cihazın anahtarlama sırasında taşıyabileceği akımdır.
5. Form: bir elektrik malzemesinin çalışmasını gerçekleştirmek için en uygun şekli ifade etmektedir. Örnek olarak temas uçları, pimler, soketler, damgalar, levhalar, teller ve tekerlekler vb. gösterilmektedir.

6. Boyut: bir malzemenin aldığı çalışma şekline bağlı olarak kalınlığı, uzunluğu ve genişliği veya dış çapı belirtmektedir [13].

1.2.2. Elektrik Kontak Direnci

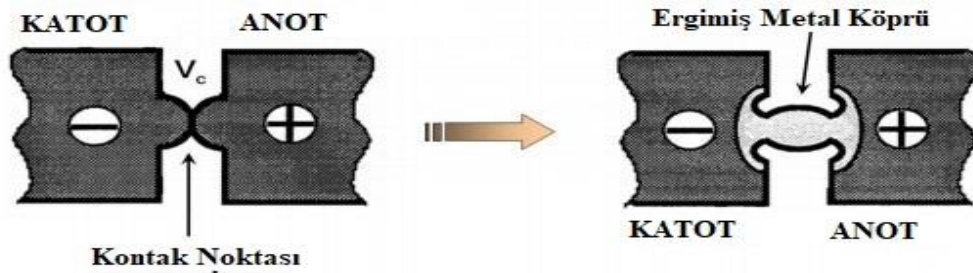
Kontak direnci terimi, ölçüm yönteminden bağımsız olarak doğal bir özellik olan iç direncin aksine, elektriksel iletkenlerin ve bağlantıların temas eden ara yüzeylerine atfedilebilecek bir sistemin toplam direncine olan katkısını ifade eder. Bu etki, genellikle elektriksel temas direnci (ECR) ile tanımlanır ve direnç sünmesi olarak bilinen bir işlemde zamanla, çoğunlukla azalır [14]. Fiziksel ve mekanik malzeme özellikleri için, elektriksel temas direncinin (ECR) büyüklüğünü ve bir ara yüzdeki değişkenliğini yöneten parametreler, öncelikle yüzey yapısı ve uygulanan yük ile ilgilidir [15, 16].

Elektrik kontak direncini belirleyen 4 ana faktör şunlardır;

- Kontak için kullanılan malzemenin türü
- Yüzey durumu ve pürüzlülüğü
- Temas yüzeylerinin şekli
- Kontaklar arasında hareket eden mekanik basınç

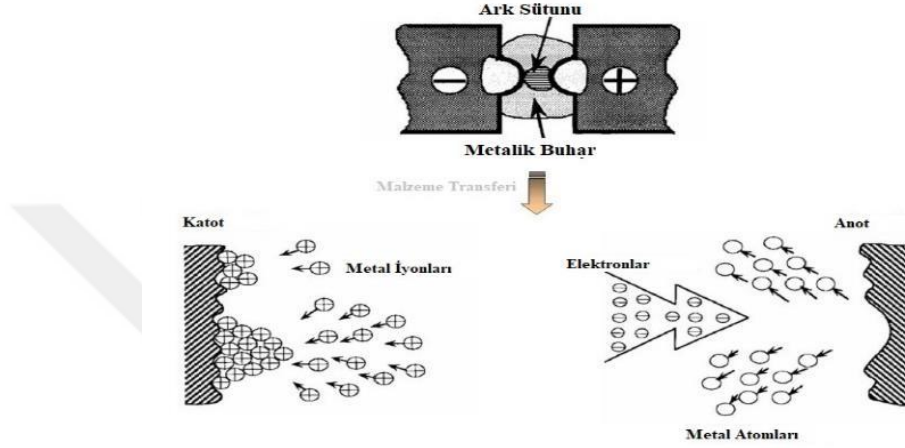
1.2.3. Ark Erozyonu ve Malzeme Taşınımı

Ark etkisi altında oluşan erozyon, elektrik kontak malzemelerinin çalışma ömrünü etkileyen ana faktörlerdendir. Ark esnasında temas yüzeylerinden malzeme kaybı veya malzeme transferi meydana gelmektedir [17]. Kontak çevrimi boyunca oluşan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, temas bölgesi küçülebilmekte ve belirli bölgelerdeki akım yoğunluğu artarak yerel ergimelere sebep olabilmektedir.



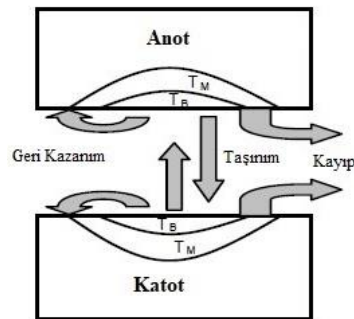
Şekil 3. Kontakların temas hali ve ergimiş metal köprü oluşumunun şematik gösterimi [18].

Birkaç on mili amperden daha büyük akımlara ve birkaç volttan daha büyük sürücü gerilimlerine sahip devrelerde elektrik kontakları açıldığında bir ark oluşmaktadır. Temasın kesildiği ilk aşamada, ark oluşmadan önce, erimiş metal, vakum dâhil tüm ortamlarda temas boşluğunu kapatmaktadır. Ark, ancak erimiş metal köprüsünün kopmasından sonra belirmektedir ve ilk oluştuğunda, başlangıçta erimiş metal köprüsünün yırtılmasından kaynaklanan metal buharında oluşmaktadır [19].



Şekil 4. Malzeme Transferi şematik gösterimi [18].

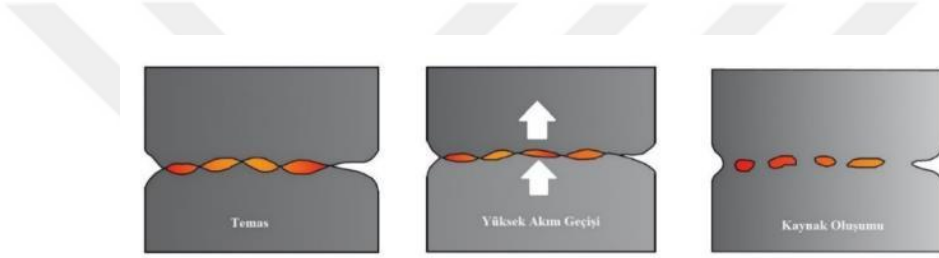
Ark erozyonu sırasında malzeme, anot ve katot arasında transfer edebilmekte, temas yüzeyine yeniden biriktirilebilmekte veya cihaz duvarlarında biriken gaz buharı veya Şekil 5'de gösterildiği gibi temastan çıkan erimiş damlacıklar nedeniyle çevreye sıçrayabilmektedir [20].



Şekil 5. Malzeme transferinin durumları (T_M : Ergime Sıcaklığı T_B : Kaynama sıcaklığı) [20].

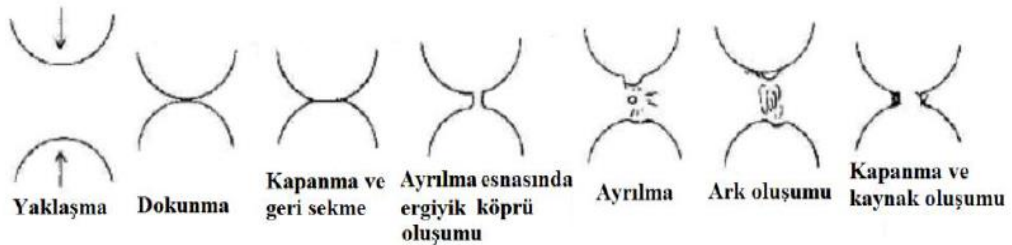
1.2.4. Kaynak Oluşumu

Kaynak oluşum mekanizmalarından ilki “statik kaynak” olarak adlandırılmaktadır. Bu durum kontaklar kapalıyken yüksek akım darbesi geçmesiyle, temas noktalarında oluşmaktadır. Bu durum devre sigorta ile korunsa dahi kısa devre koşullarında oluşabilmektedir. Bunun nedeni sigortanın devreyi kesmesinden önce ulaşılan maksimum akım, sigortanın karşılayacağı değerin katbekat üstünde olabilmektedir. Sonuç olarak, anahtar daha önce kullanılmamış olsa bile kontaklar birbiri ile kaynak yapabilirler. Statik kaynak ayrıca kontakları kapalı tutan kuvvete karşı çıkan akım dalgalanmasının yol açtığı manyetik etkilerden de etkilenir. Temas kuvvetinde ortaya çıkan azalma, temas direncini artmasına ve daha fazla ısı üretilmesine neden olmaktadır [21].



Şekil 6. Statik kaynak oluşum aşamaları [22].

İkinci kaynak oluşum mekanizması ise “dinamik kaynak” olarak adlandırılmaktadır. Dinamik kaynak oluşumu, kontakların kapalı durumda ve yüklü durumda oldukları zaman meydana gelen kontak sekmesi nedeniyle oluşan ark ile meydana gelmektedir. Ark tarafından oluşturulan ergimiş metal havuzlarına temas eden noktalarda kaynak oluşumu gözlenmektedir [21].



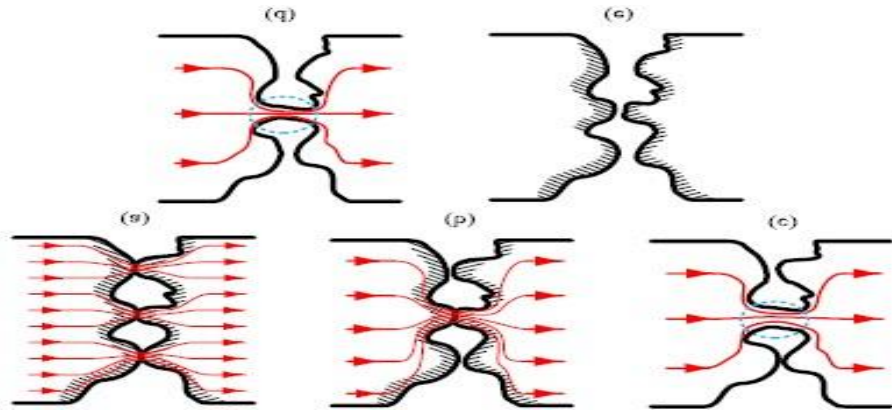
Şekil 7. Dinamik Kaynak oluşum aşamaları [22].

1.2.5. Eriyik Metal Köprü Oluşumu

Akım taşıyan iki kontak elemanı birbirinden ayrıldığında, daraltılmış alandaki akım yoğunluğu artmaktadır. Bu durum kontak malzemesinin ergime sıcaklığına kadar ısınmasını ortaya çıkartmakta ve ergime sonucu ergimiş metal köprü meydana gelmektedir. Ayrılmanın artması ile birlikte ergimiş metal köprünün sıcaklığında da artış meydana gelmekte ve malzeme kaynama noktasına ulaşıldığında köprünün kırıldığı gözlemlenmektedir. Geometrik şekline bakılmaksızın, temas potansiyeli ile ergiyik köprünün sıcaklığı arasında basit bir ilişki bulunmaktadır.

Bu ilişki Kohlrausch tarafından 1900'de keşfedilen ve geçmişte başarıyla kullanılmış olan “ $\varphi-\theta$ ” teoremi olarak adlandırılmaktadır [23]. Dr. Holm tarafından bu teoremin köprü hacminde sabit durumlu bir ısı akışı gerektirdiği ve sadece statik köprü için çeşitlendirildiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, voltaj-sıcaklık ilişkisinin bu teorem tarafından öngörülen değerden sapmasının statik ve dinamik köprüler arasındaki geçiş bölgesi yakınında çok küçük kalması beklenmektedir.

Statik ve dinamik köprülerin kriteri, köprüye yapılan toplam ısı girişinin, elektrotların kütleindeki toplam ısı iletimi kaybına eşit veya ondan daha büyük olup olmasına bağlıdır. Bu nedenle, eğer ayrılma hızını veya temas akımını arttırsak, köprünün küçük merkez hacminin sabit durumda kalması mümkün olsa bile, köprü belirli bir noktada dinamik olmaya başlayacaktır. Köprü potansiyeline katkının çoğu bu merkez hacminden gelmektedir. Gerilim-sıcaklık ilişkisinin teorem tarafından tahmin edilenden sapmasının, her iki köprü tipi için geçiş bölgesi çevresinde küçük olması beklenmektedir [24].



Şekil 8. Erimiş Köprü Oluşumu. a) Statik Kontakt, b) Kontakt a-noktası yumuşaması, c) Erime, d) Köprü uzaması, e) Köprü kırılması [25].

1.2.6. Elektrik Kontak Malzemelerinin Kullanım Alanları

Elektrik kontak malzemelerinin seçimi, kullanım alanında istenilen özelliklere göre değişim göstermektedir.

Tablo 2. Elektrik kontak malzemeleri ve kullanım alanları [22].

Kontak	Kullanım Yeri
Ag	Düşük akım röleleri, devre elemanları, otomobil jeneratör kontakları
Ag-W	Hava üflemeli devre kesici, kontaktörler, motor işletme anahtarı, yarı iletkenler, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler, voltaj düzenleyiciler, klima kontakları
Ag-WC	Hava üflemeli devre kesiciler, düşük ve yüksek akım röleleri, şalterler
Ag-Mo	Hava üflemeli devre kesiciler, kontaktörler, motor işletme anahtarı, yarı iletkenler, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler
Ag-C	Reostalar, kaygan kontaklar, röleler, devre kesiciler, kontaktörler, düşük ve yüksek akım röleleri, devre kesici ve temas etmeyen düğmeler için sürgü halkaları
Ag-Ni	Hava üflemeli devre kesici, kontaktörler, motor işletme anahtarı, düşük ve yüksek akım röleleri, salterler, otomobil devreleri, uçak röleleri, buzdolabı asırı yük düğmeleri, motor koruyucuları
Ag-Ni-C	Hava üflemeli devre kesiciler, salterler, sürgü parçaları
Ag-Cu	Isık röleleri, elektrik fırın kontaktörleri, küçük motor koruyucuları
Ag-CdO	Motor işletme anahtarları, kontaktörler, düşük ve yüksek akım röleleri, şalterler, devre anahtarları
Cu-C	Motor işletme anahtarı, salterler, sürgü parçaları, kontaktörler
Cu-W	Yağlı devre kesiciler, devre kesici ark uçları ve ark baslatıcıları
Cu-Cr	Vakum devre kesiciler, ark uçları ve baslatıcıları

1.3. Akımsız Kaplama Yöntemi

1.3.1. Akımsız Kaplama Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler

Kimyasal kaplama veya otokatalitik kaplama olarak da bilinen akımsız kaplama, metal katyonlarının sıvı bir banyoda otokatalitik kimyasal indirgenmesiyle çeşitli malzemeler

üzerinde metal kaplamalar oluşturan bir endüstriyel kimyasal işlemler dizisini tanımlamaktadır. Bu kimyasal işlemler dizisi, indirgemenin harici olarak üretilen bir elektrik akımı ile sağlandığı, galvanizleme gibi galvanik proseslerle farklılık göstermektedir [26-27]. Akımsız kaplama yönteminde, kaplama işlemi soy metal tuzunun, kendinden daha az bir soy metalin katalitik aktif yüzeyine çözelti yardımı ile biriktirilmesi ile gerçekleşmektedir. Elektrolitik ortamda, reaksiyon, elektronu indirgeme reaksiyonu için tedarik eden uygun bir indirgeme ajanı kullanılarak katalize edilmekte ve metal kaplanacak ana malzemenin üzerinde biriktirilmektedir [28].

1.3.2. Akımsız Kaplama Banyo Bileşenleri

Uygulamada, metal banyoları iki ayrı banyo birleştirilerek yapılmaktadır. Bu banyolardan birincisi gümüş iyon çözeltisi diğeri ise indirgeyici madde çözeltisidir. Örnek olarak aşağıda bazı banyo bileşenleri verilmiştir.

Rochelle tuzu (sodyum potasyum tartarat) metodu (en yaygın kullanılan);

- Gümüş Nitrat 450 g, doymuş amonyak çözeltisi 350 mL ve su 5.5 L
- Rochelle tuzu 1600g, su 3.6 L

Glikoz metodu;

- Gümüş Nitrat 3.5 g, gerektiği gibi amonyak çözeltisi, su 60 mL, sodyum hidroksit çözeltisi 2.5 g / 100mL
- Glikoz 45 g, tartarik asit 4 g, su 1 L, etil alkol 100 mL

Hidrazin metodu;

- Gümüş Nitrat 100 g, amonyak çözeltisi 230 mL
- Hidrazin sülfat 43 g, amonyak çözeltisi 45 mL [29].

1.3.3. Gümüş Kaynağı

Gümüş Nitrat (AgNO_3), kokusuz ve acı metalik bir tada sahip, şeffaf ila beyaz kristalimsi bir katıdır. Saf halde, bileşik ışıktan etkilenmemekte, ancak eser miktarda organik safsızlıklar gümüş iyonlarının (Ag^+ ; pozitif yüklü gümüş atomları) tuza grimsi bir renk veren grimsi nötr gümüş atomlarına (Ag^0) dönüşümünü katalize edebilmektedir [30]. AgNO_3 , tüm gümüş bileşikleri arasında en yaygın olarak kullanılanıdır ve diğer gümüş bileşiklerinin

sentezinde, belirli endüstriyel kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak, antiseptik ve mikrop öldürücü olarak ve fotoğrafik işlemlerde kullanım alanı bulunmaktadır [31].

1.3.4. İndirgeyici

Sodyum Potasyum Tartarat, yaygın olarak Seignette tuzu veya Rochelle tuzu olarak bilinir. 1672 yılında La Rochelle'de çalışan bir eczacı olan Pierre Seignette tarafından keşfedilmiştir. Ampirik formülü $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ olarak bilinmektedir. Genel olarak kullanım alanları şöyledir;

- Akımsız kaplamada biriktirme ve verim artırıcı olarak,
- Elektronikte ve piezoelektrikte,
- Gümüş Nitrat ile ayna yapımında indirgeyici olarak,
- Laboratuvar reaktifi olarak (Fehling çözümünün bileşenlerinden biridir.),
- Sigara kağıdı üretiminde, yanma düzenleyici olarak kullanılmaktadır [32].

1.3.5. Akımsız Kaplama Kullanım Alanları

Otomotiv: Isı alıcıları, karbüratör parçaları, yakıt püskürtme, yuvarlak başlı vidalar, diferansiyel pinyon milleri, disk fren pistonları, transmisyon boşluk ayar pulları, sessiz kavramalı dişli düzenleri, mafsal pimleri, egzoz manifoldları ve boruları, susturucu, amortisörler, kilit parçaları, esnek boru bağlantıları, vites ve parçaları,

Havacılık ve Uzay: Hidrolik tahrik yayları, sızdırmaz contalar, iniş takım parçaları, otomatik pilot parçaları, motor süspansiyonları, yağ meme parçaları, türbin ön yatak kovanları, motor süspansiyon izolasyon gömlekleri,

Elektronik: Bilgisayar çalıştırma düzenleri, bağlayıcılar, diotlar, transistör muhafazası, iç kilitler, bağlantı yerleri ve PCB,

Sağlık Bilimleri: Bir defa kullanımlık ameliyat araç ve gereçleri, tablet ayırıcılar, besleme vidaları ve ekstrüderler gibi alanlarda kullanılmaktadır [34].

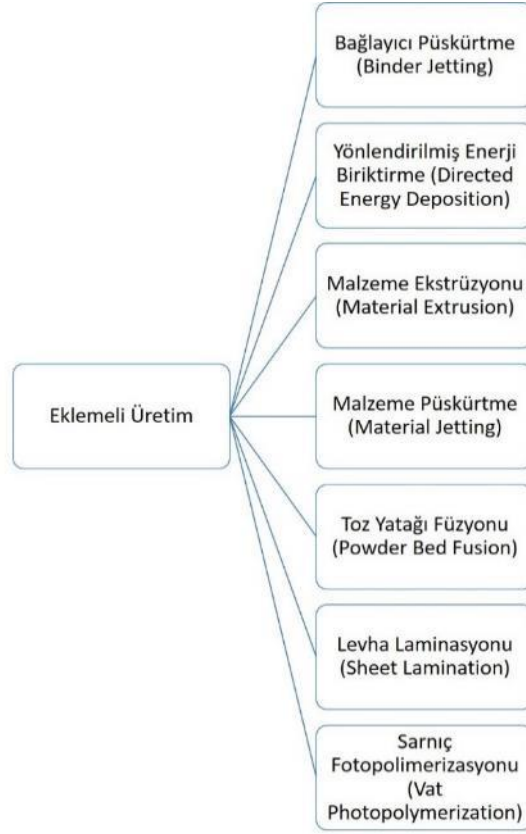
1.4. Eklemeli Üretim Yöntemleri

1.4.1. Genel Bilgiler

Hızlı prototipleme, 1980'lerde modelleme ve prototip parçalar oluşturmak için bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanılarak katmanlı bir şekilde üç boyutlu bir ürün tasarlamak için geliştirilmiştir. Eklemeli üretimin önceki süreçlerinden biri olan hızlı prototipleme, mühendislerin düşündüklerini canlandırılmasına yardımcı olmak için oluşturulmuştur. Sadece modellerin değil basılı parçaların da üretilmesine yardımcı olabilmektedir [35]. Günümüzde, hızlı prototipleme teknolojileri sadece model oluşturmak için kullanılmamakla birlikte, plastik malzemelerdeki avantajları ile bitmiş ürünler oluşturmak mümkün hale gelmiştir, elbette başlangıçta prototipleme sürecinde test edilen durumları genişletmek için geliştirilmişlerdi [36]. Bu teknolojilerin üç boyutlu baskı (3D Printing) gibi başka isimleri bulunmaktadır, ancak hepsi kökeninde hızlı prototip oluşturmaya dayanmaktadır [37-40].

ASTM, eklemeli üretimi (EÜ) eksiltmeli üretim (talaşlı imalat vs.) metodolojilerinin aksine, üç boyutlu model verilerinden ürünler yapmak için malzemeleri genellikle katman üzerine katman şeklinde birleştirme süreci olarak tanımlamıştır [41]. Eklemeli üretimin tanımı, genel olarak metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve biyolojik sistemler dahil olmak üzere tüm malzeme sınıfları için geçerli olmaktadır. Eklemeli üretim, tartışmasız, yirmi yıldan fazla bir süredir malzeme işleme aracı olarak bulunsa da son zamanlarda önemli bir ticari üretim teknolojisi olarak ortaya çıkmaya başlamıştır [42].

ASTM, eklemeli üretim için hazırladığı standart F2792-12a olup, üretim yöntemlerini ve bu teknolojide kullanılan kelimeleri optimal hale getirmiştir. Aşağıdaki grafikte F2792-12a'ya göre üretim yöntemleri gösterilmiştir [43].



Şekil 9. ASTM F2792-12a'da belirtilen üretim yöntemlerine göre eklemeli imalat çeşitleri.

1.4.2. Metal Eklemeli Üretimi

Metal Eklemeli üretimleri üç grupta incelenebilmektedir. Bunlar;

1. Kısmi ergime veya hiç ergime olmayan, son işlem gerektiren eklemeli üretim teknolojileri.
2. Tam ergime teknolojileri.
3. Bilgisayarlı imalatın ve eklemeli üretimin bir olduğu eklemeli üretim [36].

Levy ve diğerleri, kısmi ergime ve tam ergime konusunda araştırma yapmış ve bunları aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır;

- Kısmi ergime ile çalışan seçici lazer sinterleme,
- Kısmi ergime ile çalışan lazer mikro sinterleme,
- Tam ergime ile çalışan seçici lazer eritme,
- Nozul ile beslemeli tam ergimeli 3B kaplama [37].

1.4.3. Toz Yataklı Birleştirme

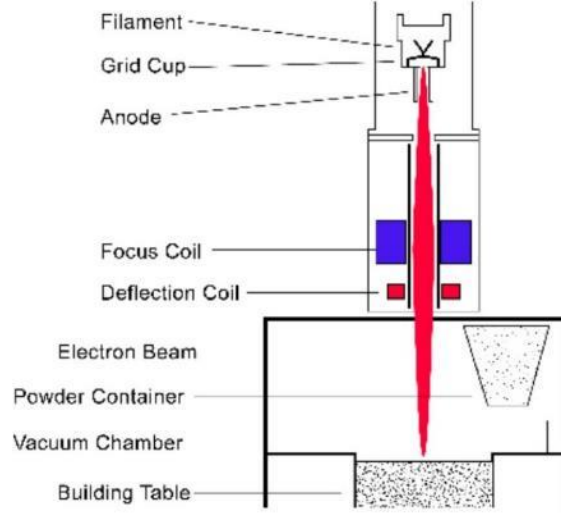
Toz yataklı birleştirme (TYB) yöntemleri, malzeme tozunu ergitmek ve sinterlemek için bir lazer veya elektron ışını kullanmaktadır. Tüm TYB işlemleri, tozun bir yatak şeklinde her bir katmana serilmesi mantığı ile çalışmaktadır. Tozun serilmesi silindirik ya da bıçak şeklinde bir besleyici ile gerçekleştirilmektedir. Üretim haznesi ve yeni katmana beslenecek tozun bulunduğu hazne piston sistemleri ile hareket etmektedir. Toz yataklı birleştirme proseslerini genel olarak direkt metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışın ergitme (EIE), seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici lazer ergitme (SLE) oluşturmaktadır [44].

Toz yataklı proseslerin çalışma mantıkları sırasıyla şu şekilde açıklanabilmektedir;

- Yapı platformunun üzerine tipik olarak 0,1 mm kalınlığında bir malzeme tabakası yayılır.
- Bir lazer, modelin ilk katmanını veya ilk kesitini birleştirir.
- Bir rulo kullanılarak önceki katmana yeni bir toz katmanı yayılır.
- Diğer katmanlar veya enine kesitler kaynaştırılır ve eklenir.
- İşlem, tüm model oluşturulana kadar tekrarlanır. Gevşek, kaynaşmamış toz yerinde kalır ancak işlem sonrası sırasında çıkarılır [44].

I. Elektron Işın Ergitme

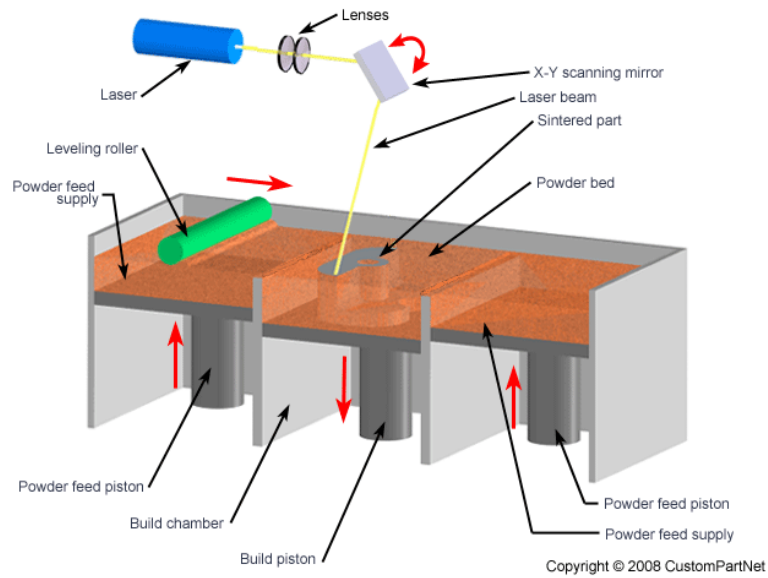
Elektron ışın ergitme (EIE) işlemi, elektromanyetik bobinler tarafından oluşturulan ve odaklanan bir elektron ışın demeti tarafından metal tozlarının ergitilmesi mantığı ile çalışmaktadır. 3.000 Watt'lık elektron tabancasının doğal yapısı göz önüne alındığında, işlem bir vakum odasında gerçekleştirilmektedir. EIE, havacılık ve tıp endüstrileri dâhil olmak üzere birçok türden karmaşık parça ve bileşenleri üretmek için kullanılmaktadır [45].



Şekil 10. Elektron ışın ergitme [45].

II. Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ve seçici lazer sinterleme (SLS) çalışma mantıkları birbiri ile tamamen aynı olmakla birlikte üretimlerinde kullanılan malzemeleri farklılık göstermektedir. DMLS, Almanya'dan EOS tarafından geliştirilen bir eklemeli metal üretim teknolojisidir ve sadece metaller ile çalışmaktadır [46]. SLS ise polimerler seramikler ve metaller ile çalışabilmektedir [44]. İki üretim şekli de sıcaklık olarak malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında, sinterleme sıcaklıklarında çalışmaktadır.



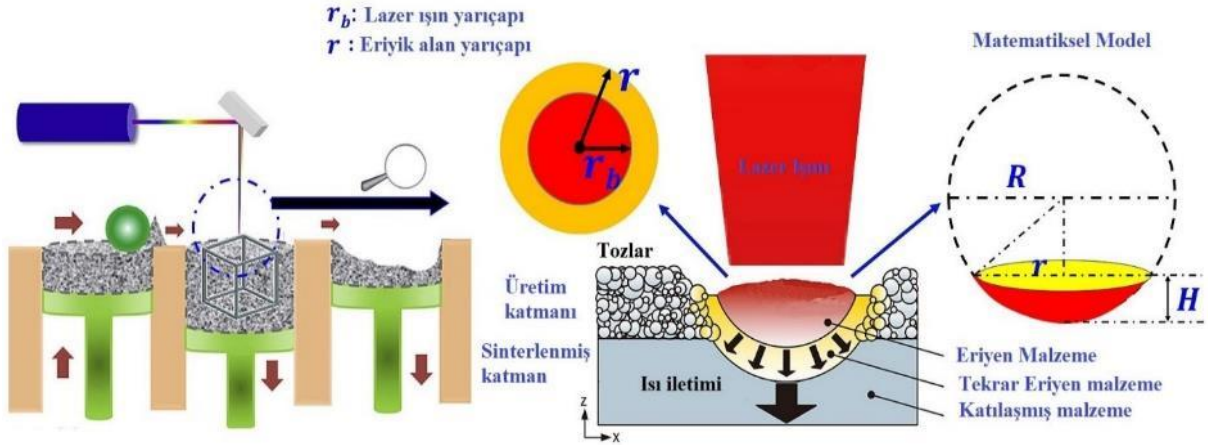
Şekil 11. DMLS ve SLS'in çalışma prensibi [47].

III. Seçici Lazer Ergitme (SLE)

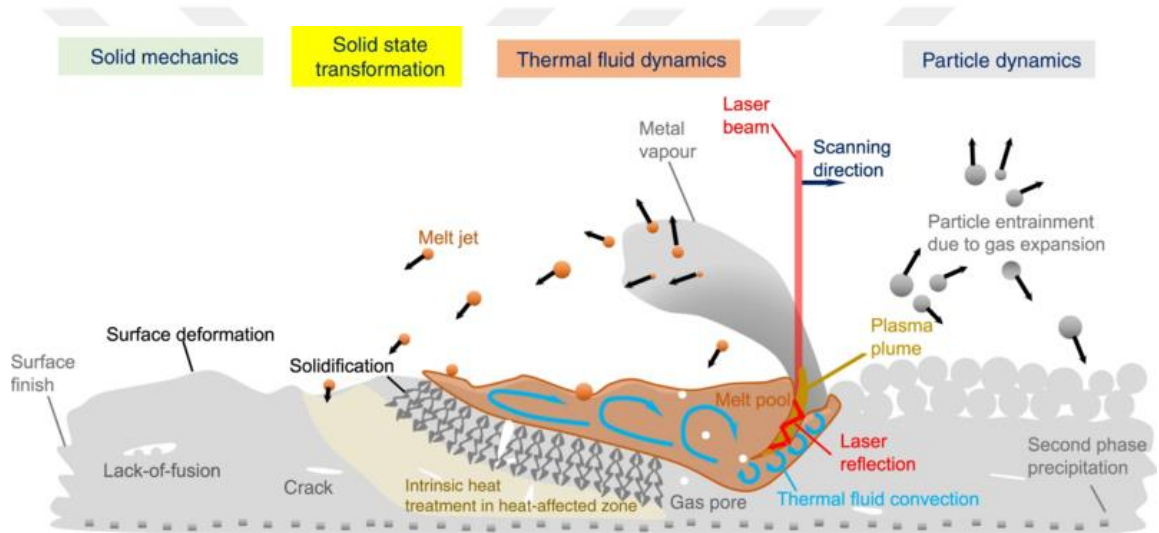
Seçici lazer ergitme (SLE), metal tozlarını DMLS ve SLS'e göre daha güçlü bir lazer sistemi ile metal tozlarının ergime sıcaklığında çalışan bir toz yataklı eklemeli üretim yöntemidir [48]. Seçici lazer ergitme, karmaşık tasarımların üretiminde, hızlı prototiplemede rahatça kullanılmaktadır. Üretimde hızlı bir geri dönüş gerekliliği veya karmaşık geometrilere ihtiyaç duyan özel uygulamalara sahip olma gibi talepler açığa çıkabilmektedir. SLE, yalnızca parçaların oluşturulması ve satılması sürecini iyileştirmekle kalmamakta, aynı zamanda özelliklerin sahada ihtiyaç duyulan her şeyle uyumlu olmasını da sağlamaktadır [48].

İşlem, 3B CAD dosya verilerini, genellikle 20 ila 100 mikrometre kalınlığında katmanlara bölerek, her katmanın 2B görüntüsünü oluşturarak başlamaktadır; bu dosya biçimlerini genellikle "stl" uzantılı dosyalar oluşturmaktadır. Dosya daha sonra dilimleyici adı verilen ve üretilecek malzemenin her bir katmanını kendi yazılımına, üreticinin ayarladığı parametrelere göre hesaplayarak ürünün üretilmesine hazır hale getirilmektedir [45].

SLE ile, metal toz katmanlarının oluşturulabilmesi için, bir toz serme mekanizması kullanılarak, genellikle metal olan ve dikey (Z) ekseninde hareket eden bir pistonla sabitlenen bir plaka üzerine eşit olarak dağıtılmaktadır. Üretim milyonda 5 gibi çok düşük oksijen seviyeleri altında veya argon ya da nitrojen gibi kontrollü soy gaz atmosferini içeren bir üretim alanının içinde gerçekleşmektedir. Her katman dağıtıldıktan sonra, parça geometrisinin her 2B dilimi, tozun seçici olarak ergitilmesi ile birleştirilmektedir. Üretim, genellikle yüzlerce Watt'lık yüksek güçlü bir iterbium fiber lazer ışını ile gerçekleştirilmektedir. Lazer ışını, iki yüksek frekanslı tarama aynası ile X ve Y yönlerine yönlendirilmektedir. Lazer enerjisi, katı metal oluşturmak üzere parçacıkların tamamen ergimesine izin verecek kadar yoğundur. İşlem, ürün tamamlanana kadar katman katman tekrarlanmaktadır [45].



Şekil 12. SLE çalışma prensibi şematik gösterimi [49].



Şekil 13. Toz yataklı füzyon EÜ'de çok ölçekli, fiziki olayların şematik bir gösterimi [50].

1.5. Literatür Özeti

Stefan Szemkus ve diğerleri (2018), eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme yöntemi ile Cu-Cr, tozlarından kontak malzemesi üretimini denemiştir. Burada bakır ve krom tozlarını 25 ile 150 μm elde etmek için elekten geçirdikten sonra nihai oran olarak Cu-%25Cr elde etmek için 15 dakika karıştırıcıda karıştırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemede krom parçacıkları, bakır parçacıkları arasında dendritik yapıda oldukları gözlemlenmiştir. İstenilen kompozisyonlar elde edildikten sonra tozlar Yb-Fiber lazer, maksimum lazer gücü 400 Watt olan seçici lazer ergitme cihazı ile kontak malzemelerinin üretimi yapılmıştır. Cihaz 120 °C ön ısıtma, Ar, N₂ gibi (N₂/H₂ oranı

95/5) koruyucu gaz atmosferi ve 10-12 mbar koşullarında çalıştırılmıştır. Cu-Cr toz parçacıklarının yeterli bir derecede erimiş olduğu ve ~200 W ve 400 mm/s tarama hızında lazer güçlerinde kararlı erime izleri gözlemlenmiştir. Ergime işlemi sonrası bakır matris yapıyı oluştururken krom erimemiş varsayılmaktadır ve matrise dağılmış haldedir. Katılma sırasında, mikron altı parçacık katılaşmaları olduğu gözlemlenmiştir ancak bu parçacıkların lazer ergitmeden kaynaklı hızlı soğuma nedeniyle çok fazla büyümedikleri vurgulanmıştır. Ayrıca sıvı faz sinterlemesi yapılarak geleneksel yöntemlerle de karşılaştırılıp, lazer ergitme yönteminin Cu-Cr parçacıklar için uygun bir imalat yöntemi olduğu fakat uzun süren imalat süresi, yüksek maliyet ile üretilen parçanın toz yatağından ayrılmasının zorluğu ve sıvı faz sinterlemesindeki yavaş soğuma sayesinde mikron altı parçacık oluşumunun gözlenmediği vurgulanmıştır [51].

Shou Chang ve diğerleri (1999), yüksek elektrik ve termal iletkenlik için bakır ile gümüşü matris malzemesi olarak kullanarak, farklı boyutta ve şekillerdeki Silikon Karbit whiskers (SiC_w), Alümin parçacıkları (Al_2O_{3p}), Kısa karbon elyaf ve Kısa Saffil elyaf (%3,8 SiO_2 - %96,2 Al_2O_3) gibi seramik malzemelere (hacimce %10-40 seramik malzeme) akımsız kaplama ve sıcak presleme uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Akımsız kaplama yapılmadan önce seramik malzemelere yüzey temizleme, hassaslaştırma ve aktivasyon işlemleri yapıldığı görülmektedir. Çalışmada Silikon Karbit ayrı ayrı bakır ve gümüş kaplanırken diğer malzemelere sadece gümüş kaplanmıştır. Kaplama ardından numuneler normal atmosferde 600 °C'de 300 MPa basınç kuvveti altında sıcak preslenmişlerdir. Sonuç olarak, hazırlanan bakır-gümüş matrisli kompozit malzemelerin elektrik iletkenliği, çok daha fazla takviye elemanı kullanılmasına karşın yaygın kullanımda olan CdO/Ag ile benzer, SnO/Ag'den nispeten yüksek kaldığı gözlemlenmiştir. Elektrik iletkenliği, artan parçacık miktarı ayrıca azalan parçacık ya da elyaf boyuna bağlı olarak azalma göstermiştir [52].

Yuanjie Zhang ve diğerleri (2019), Ag/SnO₂ düşük voltajlı cihazlarda yaygın olarak kullanılmasından yola çıkılarak, tozların seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilip, mikro yapı ve mekanik incelemelerini yapmışlardır. Tozlar ağırlıkça %1-1.5 Bi ile Cu içermektedir ve SnO₂ ağırlıkça %12 ye tekabül etmektedir. Tozların XRD sonuçlarında güçlü gümüş pikleri, normal karakteristikte SnO₂ pikleri ve çok düşük miktarda Bi₂ fazı tespit edilmiştir. XRD sonuçlarında bakır oranı ihmal edilebilecek düzeydedir. Koruyucu yüksek saflıkta bir argon atmosferi altında birkaç numune üretmek için 0.08 mm spot büyüklüğüne sahip 400 W fiber lazer içeren kendi geliştirdiği bir HRPM-II tipi SLE makinesi kullanılmıştır. Numuneler,

0.02 mm'lik sabit bir tabaka kalınlığı ve 0.08 mm'lik sabit tarama aralığı ile üretilmiş, tarama hızının, lazer gücünün ve koruyucu gazın SLE tarafından üretilen örnekler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seçici lazer ergitme işleminin asıl amacı “Enerji Yoğunluğu” parametresine bağlı olarak en uygun parametreyi belirlemektir. Enerji Yoğunluğu Formülü;

$$E = P/v*h*t \quad (1)$$

Burada P lazer gücü (Watt), v hız (mm/s), h tarama aralığı (mm), t katman kalınlığı (mm) ve E enerji yoğunluğudur (J/mm^3). Yapılan çalışmanın sonucunda, Seçici lazer ergitme, elektrik kontak malzemeleri üretiminde kullanılabildiği kanıtlanmıştır. Seçici lazer ergitme tekniğinin avantajları ve dezavantajları vurgulanarak, avantaj olarak seçici lazer ergitme yönteminin tek seferde birden fazla farca üretimine olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber lazer ergitmede daha düzgün dağılım ve daha iyi nispi yoğunluk elde edilmiştir. Ancak lazer ergitmeden kaynaklı erimemiş toz varlığı ve faz ayrılıkları meydana gelmektedir. Bu oluşumlar uygun olmayan parametrelere ve daha düşük özelliklere yol açmaktadır. Ayrıca enerji yoğunluğunun düşük olması tozların istenilen ergime sıcaklığına ulaşamamasına neden olmaktadır. Enerji yoğunluğu düşük olduğunda, lazerin denk geldiği tozların merkezi erime için yeterli enerji sağlayabilirken merkezden uzaklaştıkça ortaya çıkan düşük enerji yoğunluğu porozitelerin oluşmasına ve erimemiş metal tozlarının varlığına neden olmaktadır. Bu da nispi yoğunluğu ve malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir [53].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzeme

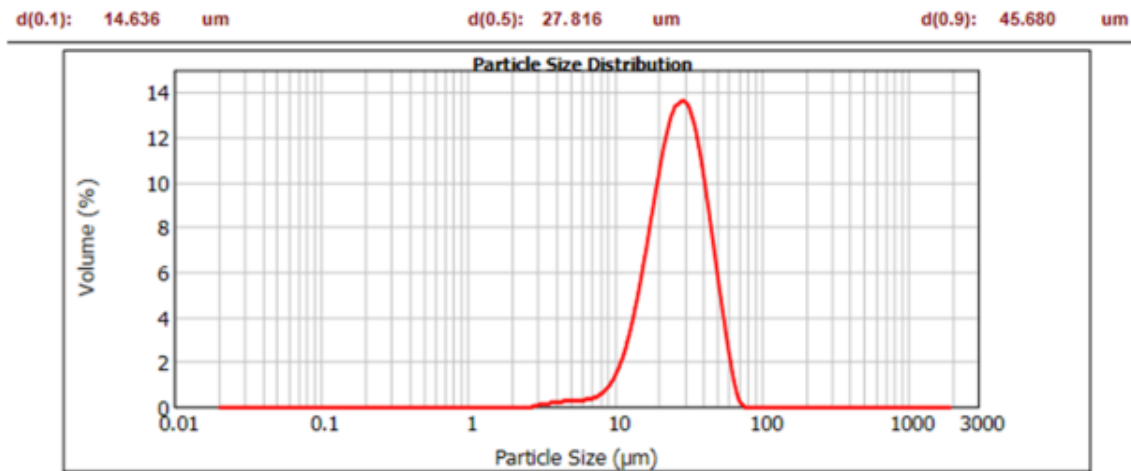
Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan bakır tozları, küresel morfolojiye sahip olup %99,99 saflıkta ve Alfa Easer firmasından temin edilmiştir. Yoğunluğu 8.96 g/cm^3 olup ortalama toz boyutu $28 \mu\text{m}$ 'ye tekabül etmektedir.



Şekil 14. Deneysel çalışmada kullanılan bakır tozlarının başlangıç morfolojisi.

2.2. Parçacık Boyut Ölçümü

Çalışma kapsamında kullanılan Bakır tozlarının boyut ölçümleri MasterSizer 2000 cihazında yapılmış olup Bakır tozlarının ortalama boyutu $28 \mu\text{m}$ gelmektedir. Şekil 15'te parçacık boyut dağılımına ait grafik verilmiştir.



Şekil 15. Parçacık boyut dağılımını gösteren grafik.

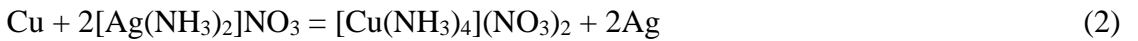
2.3. Akımsız Kaplama

Bu çalışmada kullanılan tüm kimyasal ürünler yüksek saflık derecesine (%99,99) sahiptir. Amonyak çözeltisi (NH₃), Amonyum Sülfat ((NH₄)₂SO₄), potasyum sodyum tartarat (KNaC₄H₄O₆·4H₂O), Gümüş Nitrat (AgNO₃), Amonyum Hidroksit (NH₄OH) ve Etanol (C₂H₅OH), Merck Group, Darmstadt, Almanya'dan temin edilmiştir. Saf su, saf su cihazı ile üretilmiştir. Bakır partiküller üzerindeki oksit tabakalarını temizlemek için saf su, amonyak çözeltisi ve amonyum sülfat kullanılmıştır. Akımsız kaplama işlemi sırasında gümüş iyonlarını indirgemek için indirgeyici ajan olarak potasyum sodyum tartarat kullanılmıştır. Kaplama katmanları için gümüş iyonları kaynağı olarak gümüş nitrat kullanılmıştır. Kaplama pH düzenleyicisi ve temizleme solüsyonu olarak sırasıyla amonyum hidroksit ve etanol kullanılmıştır.

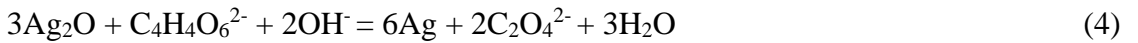
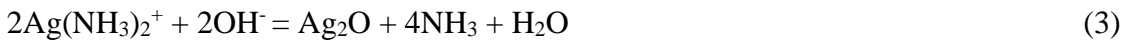
2.3.1. Bakır Tozlarının Akımsız Kaplama Yöntemi ile Gümüş Kaplanması

Gümüş indirgeme işlemi amonyak çözeltisi içinde esas olarak yüzey oksitlerinin ile hidroksitlerin çözünmesini ve kaplama yönteminin gümüş tarafından kontrol edildiği ileri sürülmektedir. Gümüş iyon çözeltisi, bakır tozlarının bulunduğu çözeltilere aktarılınca anında iki işlem gerçekleşmektedir [33];

Bakır parçacıklarının aktif yüzeyleri ve gümüş iyonları arasındaki yer değiştirme reaksiyonu:



Tartarat ve gümüş iyonları arasında gerçekleşen indirgeme tepkimeleri ardından, metal Gümüş türleri oluşur;



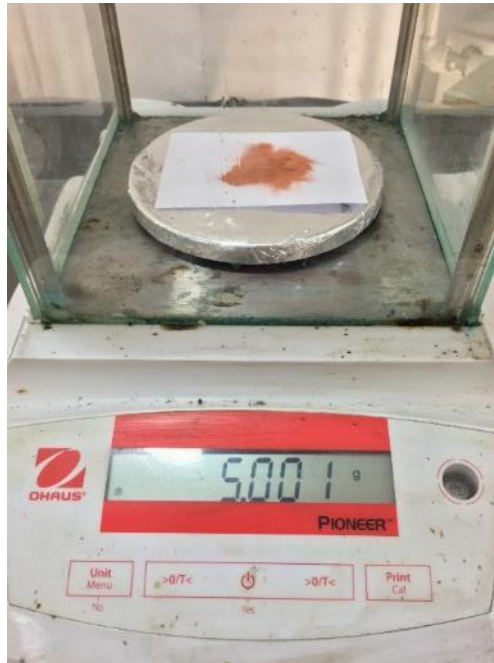
Reaksiyondaki bakır parçacıklarının aktif yüzeyinde oluşan gümüş çekirdekler, reaksiyonda bir otokatalitik işlemle üretilen gümüş türlerinin daha fazla birikimi için aktif bölgeler olarak işlev görmektedir [33]. Tablo 3'te deney parametreleri verilmiştir.

Tablo 3. Akımsız Gümüş Kaplama Parametreleri

Deney Kodu	Bakır Tozu Miktarı (gr.)	Gümüş Kaynağı Miktarı (gr.)	İndirgeyici Ajan Miktarı (gr.)	pH	Sıcaklık (°C)	Süre (dk.)
Deney-1	5 gram	0,963 gram	1,625 gram	11	40	30

2.3.2. Bakır Tozlarından Oksit Tabakasının Temizlenmesi

Bakır düşük sıcaklıklarda bile oksijenle hızla reaksiyona girer ve yüzeyinde oksit tabakası oluşumuna izin vermektedir. Akımsız kaplama işleminde bu oksit tabakası kaplama tabakası ile bakır arasındaki ara yüzey özelliklerini zayıflatacağı için tozların akımsız kaplama öncesinde oksit giderme işlemine tabi tutulması gerekmektedir, akımsız kaplama yönteminden önce oksit temizleme işlemine tabi tutulmuştur. İdeal kaplama tabakasını yakalamak için ilk önce 5 gram bakır tozu ile deneysel çalışma yapılmıştır.



Şekil 16. Bakır tozunun tartılması.



Şekil 17. Saf su cihazındaki iletkenlik değeri.

Bakır tozları oksit tabakalarının giderilmesi için 6 gr amonyum sülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 100 mL saf su ve 50 mL amonyak (NH_3) çözeltisi kullanılarak hazırlanan sulu çözelti içerisinde karıştırma hızı 250 devir/dakika ve 40 °C sıcaklık koşullarında 5 dakika süreyle oksit giderme işlemine tabi tutulmuştur.



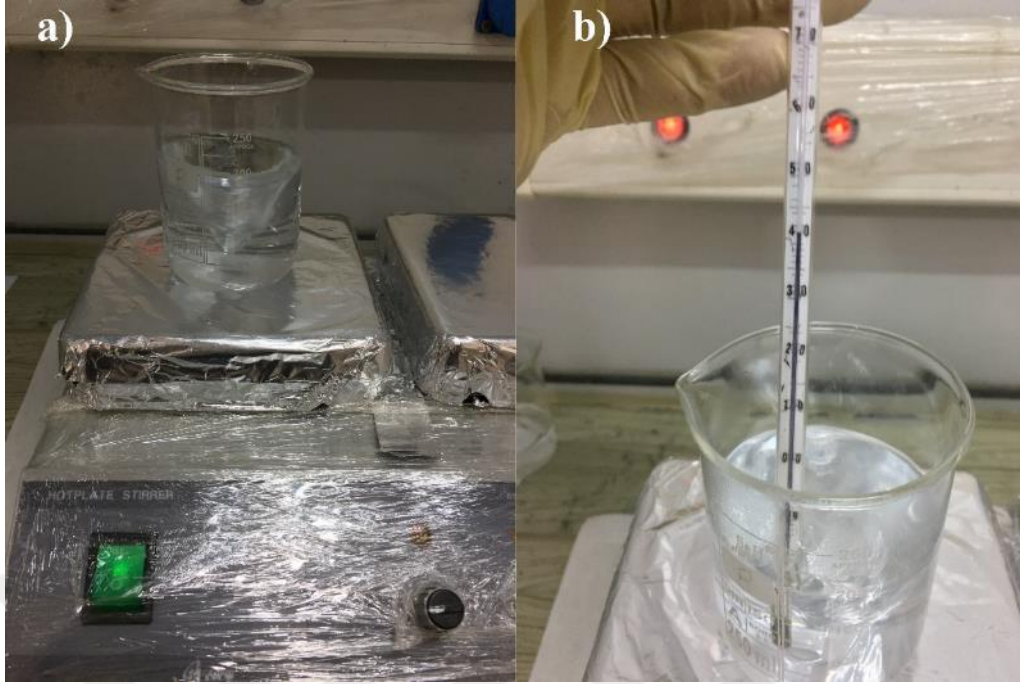
Şekil 18. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ tartımı.



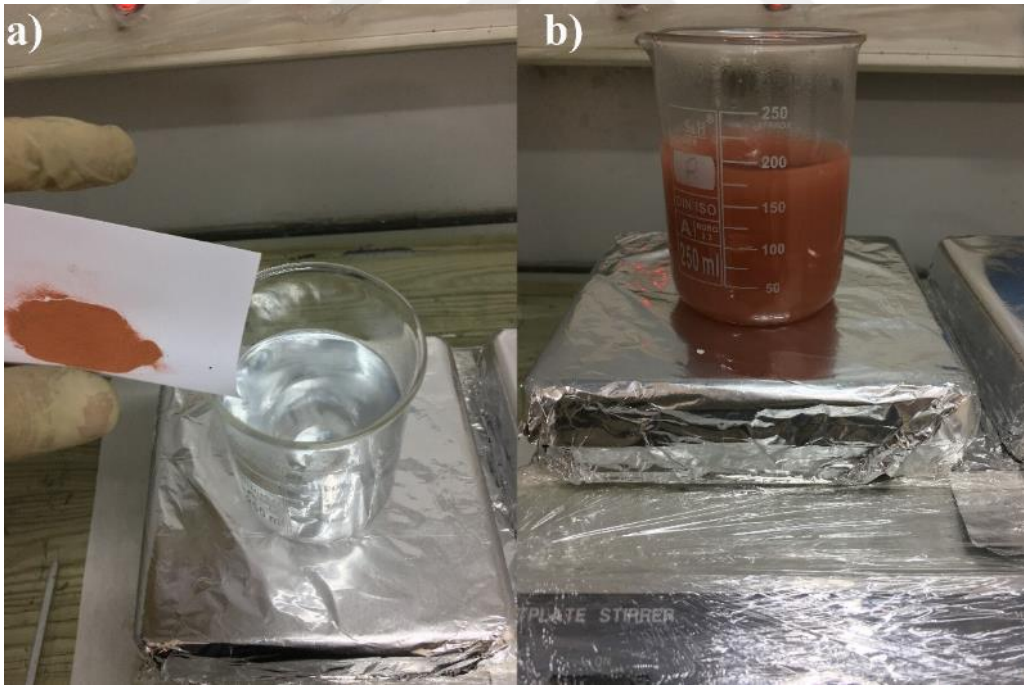
Şekil 19. 100 mL Saf Su.



Şekil 20. 50 mL NH₃.

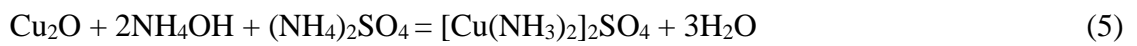


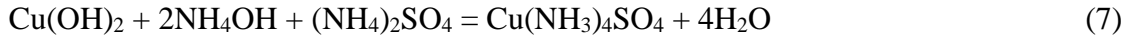
Şekil 21. a) Oksit giderme çözeltisinin hazırlanması. b) Sıcaklık kontrolü.



Şekil 22. a) Bakır tozlarının ilavesi. b) Oksit giderme işleminin gerçekleştirilmesi.

Yüzey oksitlerinin ve hidroksitlerin çözünmesi aşağıdaki denklemde sırasıyla verilmiştir.





Şekil 23'teki çözelti renk değişiminin nedeni, temizleme işleminin sonunda Bakır Cu^0 değerlikten Cu^{2+} değerliğe yükseltgenmektedir ve Cu^{2+} suda çözünebilen ve mavi renge sahip bir iyonudur.



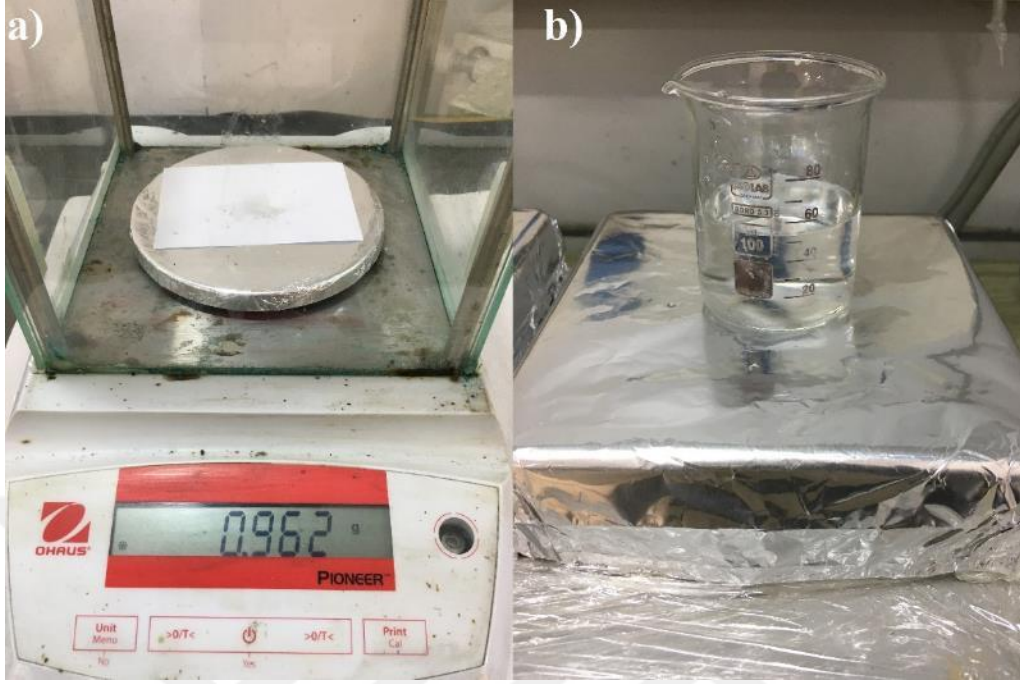
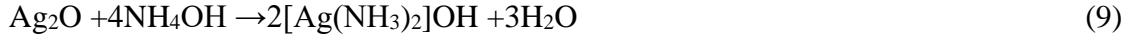
Şekil 23. Temizleme işlemi sonrası çözeltideki renk değişimi.

2.3.3. Gümüş Kaynağının pH değerinin Ayarlanması

Akımsız kaplama deneylerinde gümüş kaynağı olarak kullanılan AgNO_3 , Tablo 2'de belirtilmiş olan akımsız kaplama parametreleri doğrultusunda 50 mL sulu çözelti olarak hazırlanmıştır. Daha sonrasında bu çözeltiliye, NH_4OH eklenerek akımsız kaplama için ideal olan pH 11 değerine ayarlanmıştır.

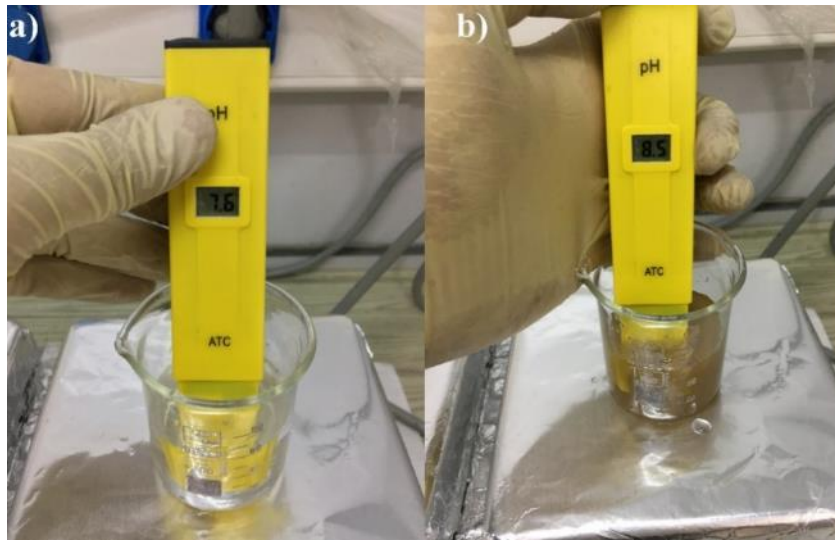
AgNO_3 ve NH_4OH reaksiyonları:



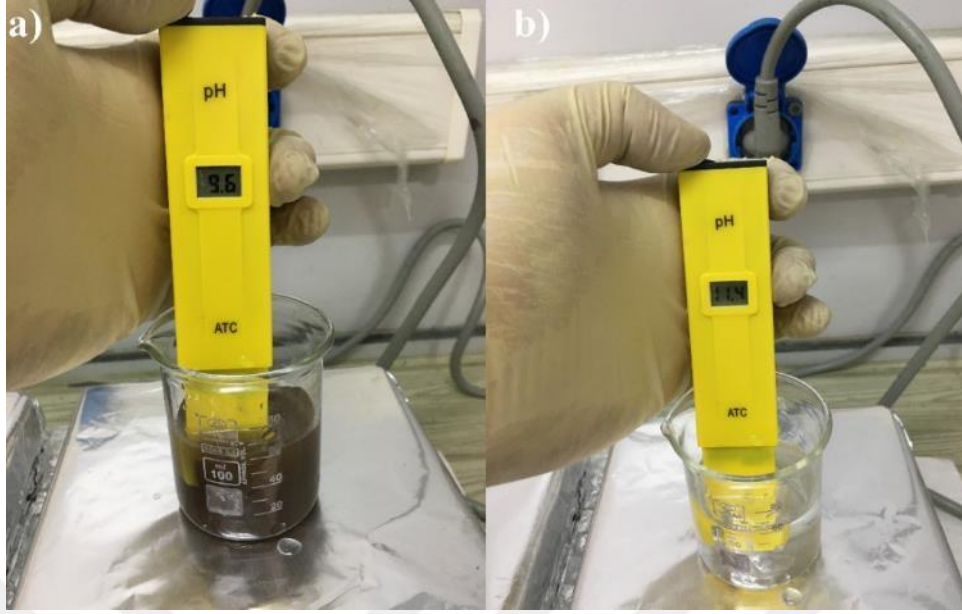


Şekil 24. a) AgNO_3 , b) AgNO_3 sulu çözeltisinin hazırlanması.

Şekil 25 ve Şekil 26 AgNO_3 sulu çözeltisinin NH_4OH eklenerek pH ayarlama işlemini göstermektedir. Başlangıç pH değerinde saydam bir çözelti olarak görünen AgNO_3 , NH_4OH eklemesi ile birlikte ilk önce renk değiştirip daha sonra hedef pH değerinde tekrar saydam hale gelmektedir.



Şekil 25. a) Başlangıç pH değeri, b) NH_4OH eklenmesi ile değişen pH ve çözelti rengi.



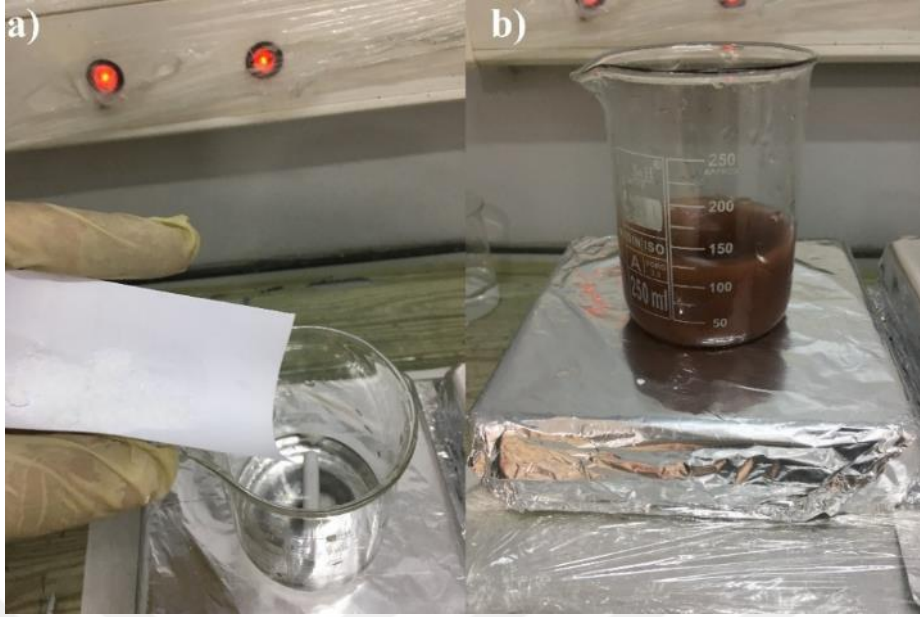
Şekil 26. a) NH_4OH eklenmeye devam edilerek pH değerinin yükseltilmesi, b) Hedef pH değerine ulaşılması ve çözeltinin tekrar saydam hale gelmesi.

2.3.4. Akımsız Gümüş Kaplama

Akımsız kaplama deneylerinde gümüş kaynağı olarak kullanılan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Tablo 2'de belirtilmiş olan akımsız kaplama parametreleri doğrultusunda 50 mL sulu çözelti olarak hazırlanmıştır. Oksitten arındırılmış bakır tozları $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sulu çözeltisinin içine eklenerek 600 devir/dakika ile karıştırılma ve $40\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir.

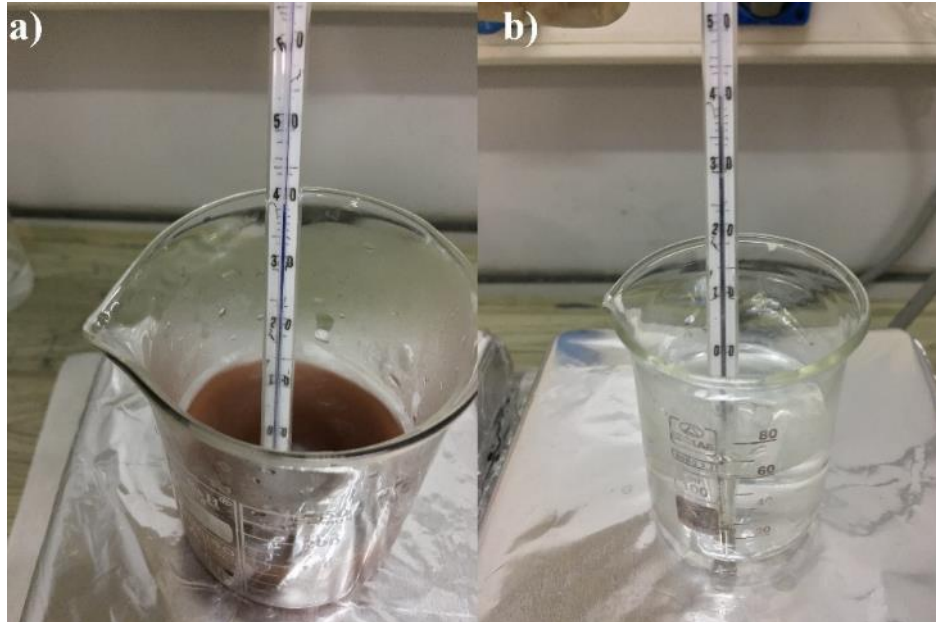


Şekil 27. 1,625 gram $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.



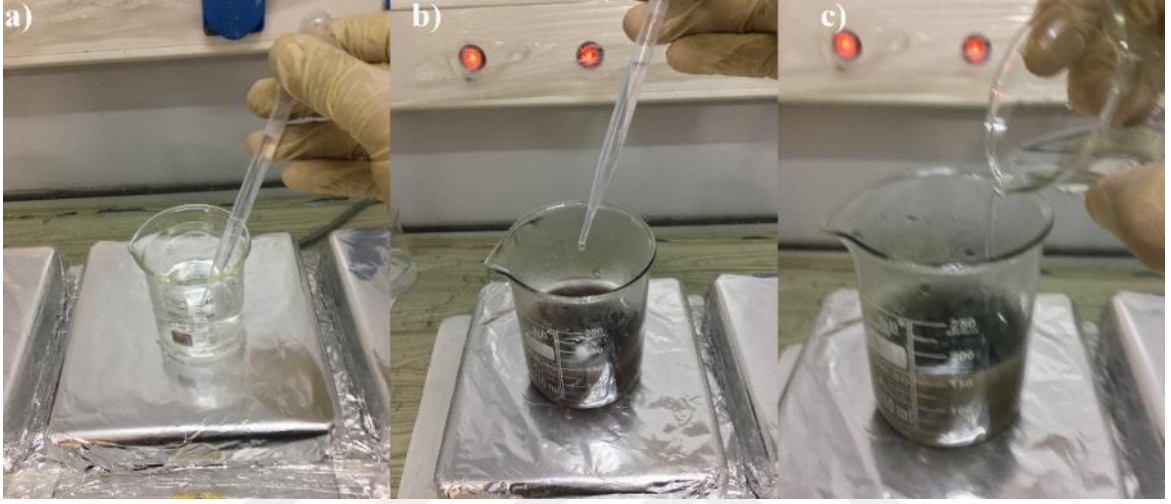
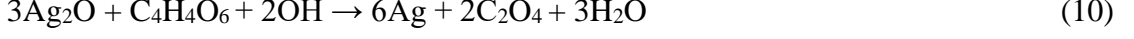
Şekil 28. a) $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve 50 mL saf su ile indirgeyici çözeltisinin hazırlanması, b) Bakır tozlarının çözeltiye ilavesi.

Aynı zamanda başka bir beherde pH değeri 11 olan AgNO_3 sulu çözeltisi de 600 devir/dakika ile karıştırılarak sıcaklığı $40\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşması sağlanmıştır. Kaplamanın homojen olarak gerçekleşebilmesi için iki sulu çözeltinin de sıcaklıkların aynı seviyede yani $40\text{ }^\circ\text{C}$ de olması gerekmektedir.



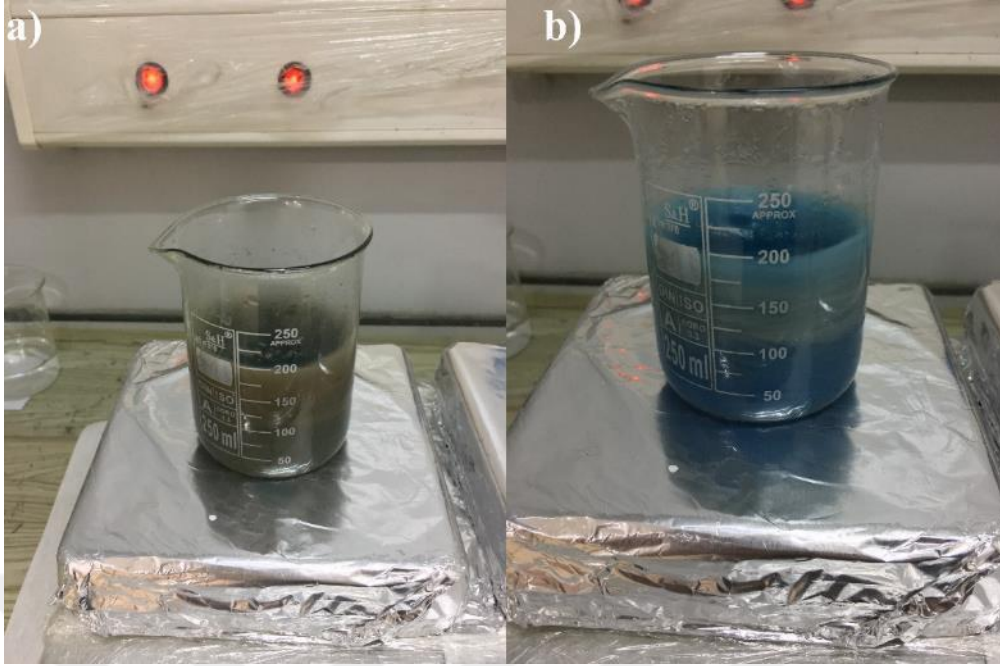
Şekil 29. a) Bakır tozu ilave edilmiş $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisinin sıcaklık kontrolü, b) pH değeri 11 olan AgNO_3 çözeltisinin sıcaklık kontrolü.

Sıcaklık değerleri eşit olduktan sonra AgNO_3 sulu çözeltisi, içinde bakır tozları bulunan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sulu çözeltisine damlatılmıştır. Damlatma işlemi başlangıçta 4ml/dk olacak şekilde uygulanmakta ve 10 ml ilave edildikten sonra geri kalan gümüş kaynağı çözeltisinin tamamı çözeltiliye doğrudan ilave edilmiştir.



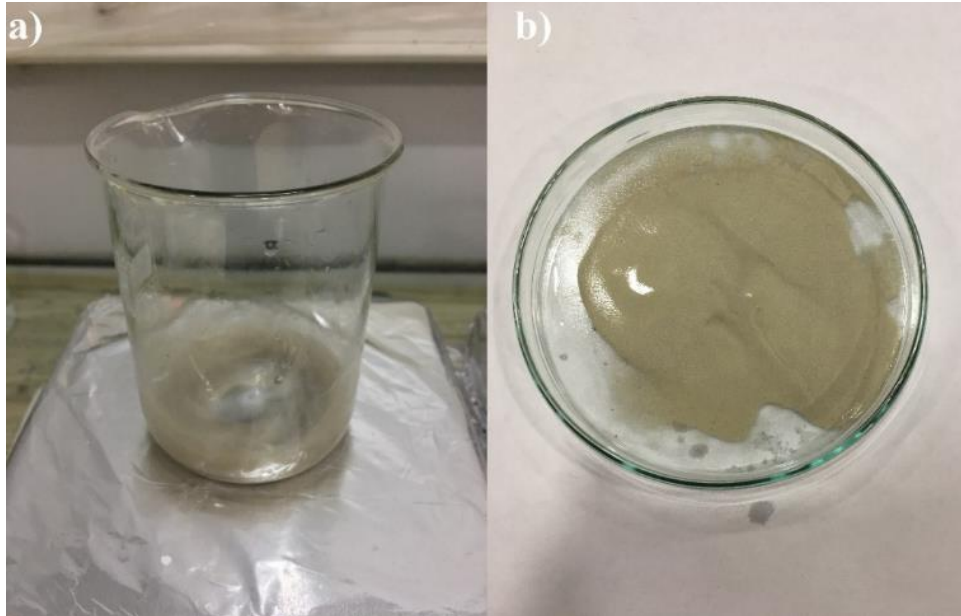
Şekil 30. a) AgNO_3 çözeltisinden pipet yardımı ile çözeltinin alınması, b) Bakır tozları bulunan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisine damlatma sureti ile AgNO_3 'ün ilavesi, c) 10 mL sonrası kalan AgNO_3 çözeltisinin ilavesi

Homojen kaplama işlemi gerçekleşmesi için AgNO_3 çözeltisinin damlatılması tamamlandıktan sonra 30 dakika boyunca tüm çözelti 600 devir/dakika hızla karıştırılmaya devam edilmiştir. Şekil 31'de de görüldüğü üzere kaplama çözeltisinin rengi 30 dk. sonunda ilk haline göre çok farklı olduğu gözükmemektedir. Bakır tozları ilave edilen AgNO_3 çözeltisindeki gümüş iyonlarını indirgeyici sayesinde yakalamış ve artık beyaza yakın gri rengini almıştır.



Şekil 31. a) AgNO_3 çözeltisinin tamamının bakır tozları bulunan $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ çözeltisine eklenmesinden sonraki görüntüsü, b) 30 dk. sonrası kaplama çözeltisinin görüntüsü.

Kaplama işlemi sonunda, akımsız gümüş kaplanmış bakır tozları ilk önce saf su ile daha sonrası etanol ile yıkayıp çözelti sıvısının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonrasında 70°C koruyucu atmosferli fırında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 32. a) Gümüş kaplanmış bakır tozlarının etanol ile yıkanması, b) Tozların yıkama sonrası petri kabındaki görüntüsü.



Şekil 33. a) Kurutma fırını, b) kurutma sonrası gümüş kaplı bakır tozları.

2.3.5. Oksidasyon Direnci Ölçülmesi

Oksidasyon direnci ölçüm testleri PerkinElmer TGA 4000 cihazında açık atmosferde yapılmaktadır. Analiz cihazın kendisine ait olan seramik krozelerin darasının alınması ile başlanmaktadır. Tozların oksidasyon direncinin ölçümünde darası alınan krozelere pan çapını tam doldurmayacak şekilde (krozeye tutunmaları engellemek ve çevresel faktörleri en aza indirmek için yaklaşık 10 miligram) toz eklenir ve numune ağırlığı tartılır. Numune ağırlığı tartıldıktan sonra tozlar 10 °C/dk ile 800 °C ye kadar ısıtılır. Bu işlem sırasında cihaz otomatik % ağırlık değişimini grafiğe dönüştürmektedir. Analiz işleminin bitmesi ile grafik verileri direkt olarak elde edilmektedir.

Tablo 4. TGA Deney Parametreleri.

Toz Türü	Minimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Artış Oranı (°C/dk.)
Gümüş Kaplı Bakır	30 °C	800 °C	10 °C/dk
Saf Bakır	30 °C	800 °C	10 °C/dk

2.4. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi ile Kontak Malzemesi Üretimi

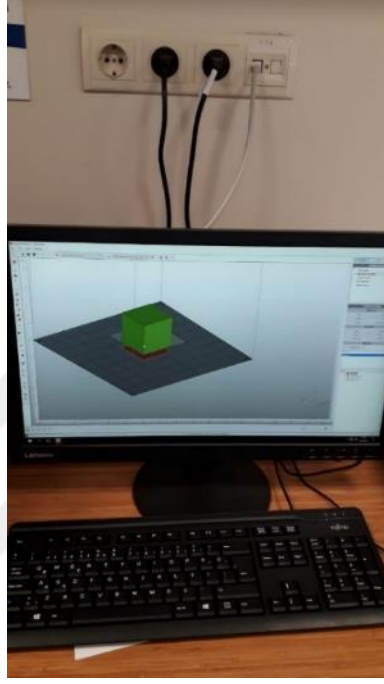
Optimize edilmiş akımsız gümüş kaplama yöntemi ile gümüş kaplanan bakır esaslı kontak malzemesinin üretimleri SLE yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Eklemeli üretim süreci, Şekil 34'te verilen Concept Laser MLab R cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz üzerinde 100 W Neodyum emdirilmiş İttriyum Aluminyum Garnet (Nd:YAG) lazer sistemi bulunmakta olup cihaz, 80x80x90 mm boyutlu bir hacimde üretim yapabilmektedir. Doluluk oranları açısından optimum lazer üretim parametrelerinin belirlenmesi için 10x10x5 mm ölçülerinde içi boş ve dolu prizmatik numuneler farklı üretim parametreleri ile üretilmiştir. Tüm numunelerin üretimi, oksitlenme oluşmaması için koruyucu Argon (Ar) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Üretimde sürekli lazer vuruş modu kullanılmıştır.



Şekil 34. Eklemeli imalat cihazı (Concept Laser MLab R)

Eklemeli imalat cihazları, kullandıkları ürün/model datası olarak başlangıçta STL (Standard Triangle Language) dosyasının ön programlar ile işlenerek üretim için gereken destek yapılarının planlanması ve cihazın üretimde kullanacağı katman bilgilerinin oluşturulmasına ihtiyaç duymaktadır. STL verileri, renk, doku veya diğer ortak CAD modeli

niteliklerinin herhangi biri olmaksızın yalnızca üç boyutlu bir nesnenin yüzey geometrisini oluşturmaktadır. Bu kapsamda SolidWorks programından sağlanan STL dosyaları AutoFab programı ile SLE cihazı için hazırlanmıştır. Oluşturulan STL dosyalarından elde edilen geometride olası yüzey kusurlarının giderilmesi amacı ile bu kusurların tanımlanması ve düzeltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 35. AutoFab yazılımı ile STL dosyasının SLE üretimi için hazırlanması.

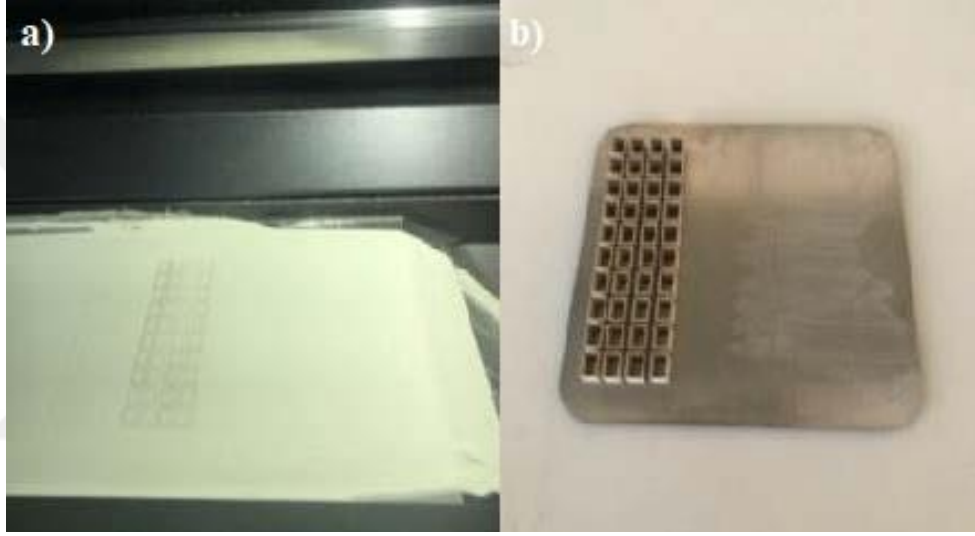
2.4.1. SLE Yöntemi ile Üretimde Kullanılan Enerji Yoğunluğu

SLE prosesinde üretilen parçaların yapısal ve mekanik özelliklerini etkileyen çok sayıda parametre ve strateji bulunmaktadır. Bu parametrelerin en temel olanları lazer gücü “P” (W), katman kalınlığı “t” (mm), lazer tarama hızı “v” (mm/s), iki eriyik havuzu arasındaki yana kayma mesafesinin “h” (mm) değişimi ile kontrol edilen enerji yoğunluğu “E” (J/mm³)’dur. Tüm bu değişkenler eriyik oluşturulması için gereken enerji yoğunluğuna etki etmekte olup, yapısal ve mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Enerji yoğunluğu ve proses parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (11)$$

2.4.2. Lazer Gücü ve Tarama Hızı Parametrelerinin Değişiminin Neden Olacağı Efektif Lazer Çapının Belirlenmesi

Lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinin değişiminin neden olacağı efektif lazer çapının belirlenmesi amacı ile tek kontur lazer vuruşları sağlanmıştır. Tek kontur numunelerinin üretiminde, çalışma kapsamında kullanılan SLE cihazının yüksek güç kapasitesi olan 100 W güç ve 25 μm sabit katman kalınlığında 400 mm/s tarama hızından başlanarak 100 mm/s artımla 2300 mm/s'ye kadar tarama hızları kullanılmıştır. Şekil 36'da üretim esnasındaki ve üretim sonrası görüntüler verilmektedir.



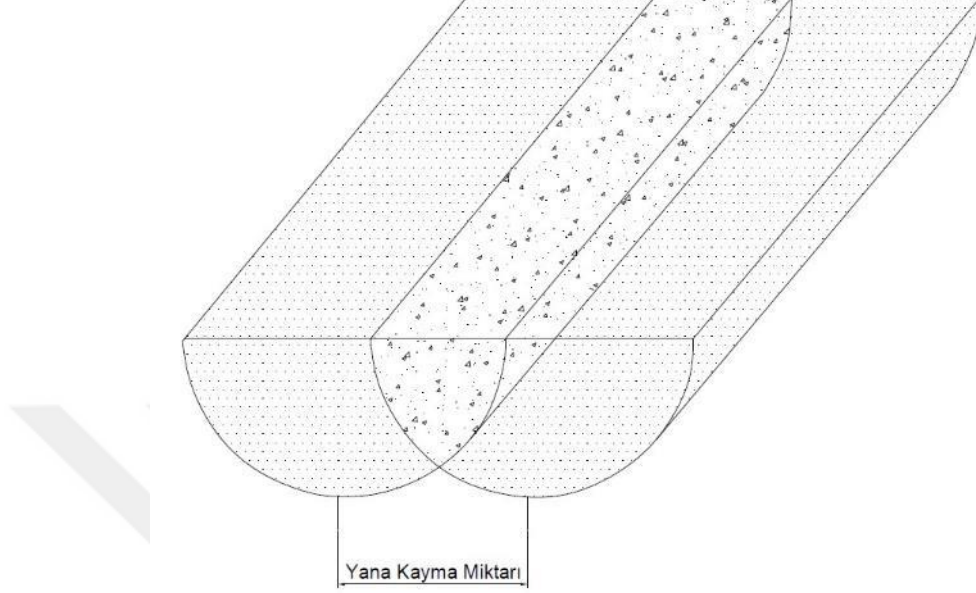
Şekil 36. 100 W lazer gücünde, 25 μm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki numunelerin a) üretim, b) üretim sonrası görüntüleri.

Tek kontur numuneleri üretildikten sonra, çalışma sonuçları optik mikroskopunda ve taramalı elektrom mikroskopunda yapı incelemesi yapılmıştır. Sonuçlar bölümünde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

2.4.3. Yana Kayma Miktarı

Lazer gücü ve tarama hızı etkileşiminin belirlenmesi sonrasında ilgilenilecek kısım ise yana kayma miktarıdır. Yana kayma miktarı ve lazer tarama izlerinin birbiri üzerine bindirme miktarındaki değişimine ait şematik bir gösterim Şekil 37'de verilmiştir. Yana kayma miktarının kontrolü ile iki lazer tarama havuzu arasındaki bindirme miktarının kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 37'deki koyu renkli orta bölge yana kayma sonucu ortaya çıkan bindirme miktarı ve aynı zamanda yeniden ergitilmiş bölge olarak karşımıza

çıkılmaktadır. Yana kayma miktarı ergime havuzunun merkezleri arasındaki fark olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 37. Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim.

Tek kontur numunelerinin üretimi sonrası, topaklanma etkisinin belirginleşmesi sebebiyle maksimum tarama hızı değeri 800 mm/s olarak belirlenmiştir. 400 mm/s tarama hızından başlanarak 100 mm/s'lik artış miktarı ile 800 mm/s tarama hızı değerine kadar farklı yana kayma değerleri denenerek içi dolu prizmatik numuneler üretilmiştir (Şekil 38). Yana kayma miktarı olarak %45-70 (0,45-0,7) aralığında %5'er artım ile 6 farklı değer kullanılmıştır. Yana kayma miktarı, lazer iz genişliği ile % yana kayma değerinin çarpımı sonucu μm birimi cinsinden hesaplanmıştır (Denklem 11'de 400 mm/s için örnek verilmiştir). İçi dolu numunelerin üretiminde kullanılan parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

$$\text{Yana Kayma Miktarı } (\mu\text{m}) = \text{Lazer Genişliği } (\mu\text{m}) * \text{Yana Kayma Değeri } (\%) \quad (12)$$

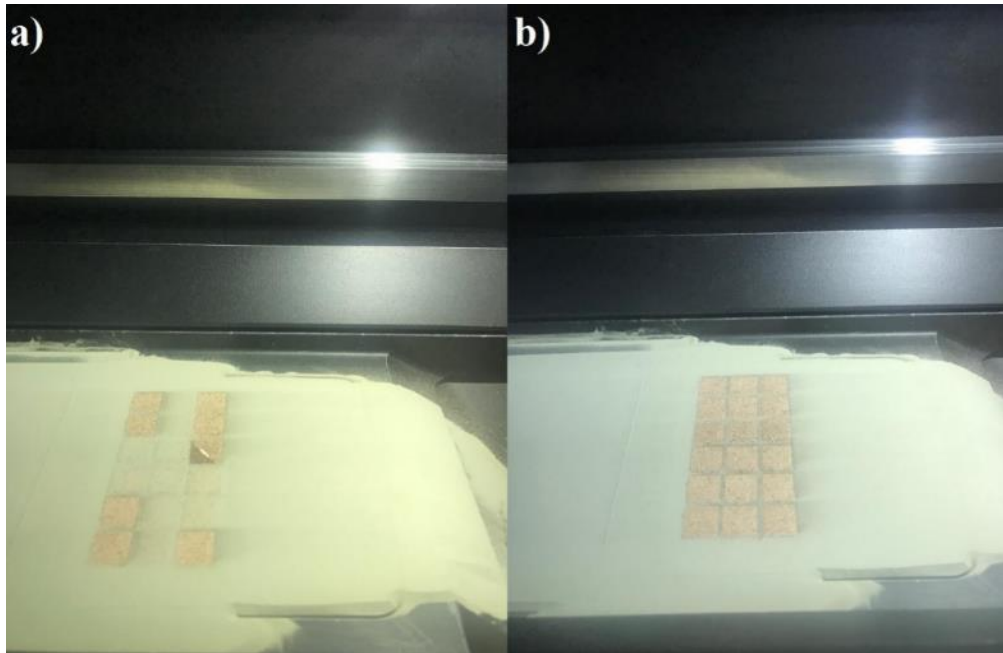
400 mm/s için örnek hesaplama aşağıdaki gibidir;

$$150 \mu\text{m} * 0,45 = 67,5 \mu\text{m} \text{ (yana kayma miktarı)}$$

Tablo 5. Dolu numunelerin üretilmesinde kullanılan lazer parametreleri.

Güç (W)	Katman Kalınlığı (μm)	Yana Kayma (%)	Tarama Hızı (mm/s)	İz Genişliği (μm)
100	25	45	400	150
			500	120
			600	110
			700	100
			800	95

Şekil 38’de, dolu numunelerin üretimi esnasında çekilmiş fotoğrafları, Şekil 39’da ise üretim sonrası şekilleri görölmektedir.



Şekil 38. a) Dolu numunelerin ilk katmanının üretimi b) İkinci katmanın üretimi.



Şekil 39. Üretimi tamamlanmış dolu numuneler.

2.4.4. Düşük Tarama Hızlarının ve Ön-Maruziyet Stratejisinin Yoğunluğa Etkisi

Daha düşük tarama hızlarının doluluk oranları üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla, 250 ve 300 mm/s tarama hızlarıyla da üretimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edilebilmesi için 50 W gücünde bir ön-maruziyet (pre-exposure) stratejisi kullanılmıştır. SLE ile üretimde daha kararlı bir eriyik havuzu elde etmek için bir ön maruziyet stratejisi geliştirilmiştir. Bu stratejide ilk olarak daha düşük bir lazer gücü ile bir tür sinterleme işlemi uygulanmış ve böylece kısmen yoğun olan toz katmanından daha yüksek termal iletkenliğe sahip katı bir malzeme üretilebilmektedir. Sonuç olarak, eriyik havuzu daha kararlı hale gelir ve erimeyen partikül miktarı azalır. Dolayısıyla ön maruziyet stratejisinin kullanılması, makinenin güç sınırlarının ve pratikte eşit olmayan partikül boyutu dağılımı sorunlarının üstesinden gelmek için uygun bir yöntemdir.

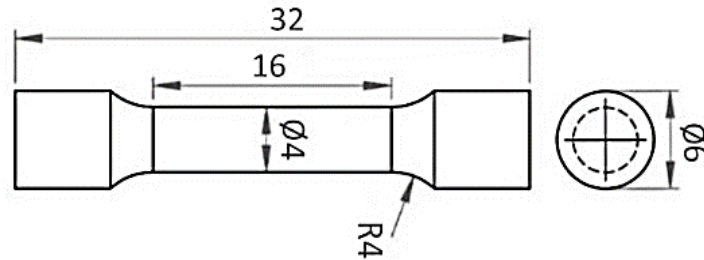
Ayrıca SLM sürecinde karşılaşılan sorunlardan biri de topaklanma (balling effect) oluşumudur. Bu etki büyük ölçüde eriyik havuzunun katılma oranına bağlıdır. Katılma hızı, topaklanma oluşum hızından daha yüksek olursa, topaklanma etkisi önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Hem tarama hızını hem de lazer gücünü artırarak topaklanma oluşumu azaltılabilir. Ancak bu durum SLE cihazının limitlerine bağlı olduğundan (cihazımızın maksimum lazer gücü 100 W), yukarıda gerekçeleri açıklanan ön maruziyet stratejisi kullanılmıştır (Varol T. Ve diğerleri 2020). SLE proses parametreleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. SLE proses parametreleri [54].

Lazer Gücü (W)	Ön Maruziyet Gücü (W)	Katman Kalınlığı (μm)	Yana Kayma (%)	Tarama Hızı (mm/s)	İz Genişliği (μm)
100	50	25	40	250	195
			45	300	180
			50	400	150

2.4.5. SLE Yöntemi ile Çekme Test Numunelerinin Üretimi ve Üretim Yönünün Dayanıma Etkisi

SLE yöntemi ile çekme test numunelerinin üretimi için Tablo 5'te verilen lazer proses parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca SLE yöntemi kullanılarak üretilen çekme numunelerine ait görsel Şekil 40'ta verilmiş olup, her bir parametre için 2 adet çekme numunesi üretilmiştir. Çekme test numunelerine ait ölçüler ASTM E8/E8M (Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) standardına göre belirlenmiş olup (Şekil 40), testler ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 40. Çekme numunesi boyutları.



Şekil 41. SLE yöntemi ile üretilmiş çekme numuneleri.

SLE yöntemi kullanılarak gümüş kaplı bakır toz malzemeden Tablo 6'da verilen lazer proses parametreleri ile üretilen numunelerin çekme testleri, INSTRON 5982 marka statik test cihazında gerçekleştirilmiştir.

İlk üretim sonuçlarına göre tarama hızı olarak 250 mm/s değerinin daha iyi sonuçlar vermesi neticesinde 2. seri üretimler gerçekleştirilmiş ve iki farklı yana kayma değeri (%30 ve 40) daha üretime dâhil edilerek çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca inşa oryantasyonunun etkisini incelemek amacıyla ve karşılaştırma yapabilmek için 250-40 ve 250-45 numunelerinin 0° ile (yatay olarak) üretilmiş formu da üretime eklenmiştir. SLE ile üretilmiş çekme numuneleri görüntüleri Şekil 42'de verilmiştir. Her numuneden ikişer adet üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen çekme numuneleri, çekme deneyine tabi tutulmadan önce herhangi bir talaşlı imalat sürecinden geçirilmemiştir. Çekme testleri için referans olarak kullanılan standartta (ASTM E8) bu durum ele alınmamıştır.



Şekil 42. SLE ile üretilmiş 2. Parti çekme numuneleri.

Ayrıca bu tez çalışmasında SLE üretilmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmak adına ek çalışmalarda yapılmıştır. Bunlar SLE sonrası sinterleme, sıcak presleme ve haddeleme yöntemleridir.

Tablo 7. Sinterleme Parametreleri.

Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)
825	120

Tablo 8. Sıcak Pres Parametreleri.

Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)
500	600

Tablo 9. Sıcak Haddeleme Parametreleri.

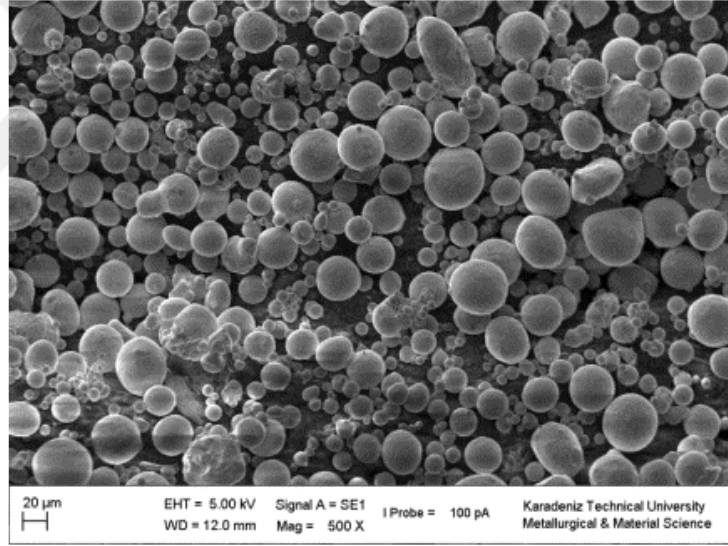
Sıcaklık (°C)	Paso Sayısı
825	5

3. BULGULAR

Akımsız kaplama yöntemi ile gümüş kaplanmış bakır tozları kullanılarak, SLE yöntemi ile elektrik kontak malzemesi üretilmesi ve kullanılabilirliğinin incelenmesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmaya ait bulgular, kullanılan tozun karakterizasyonu, mikro yapı, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelere göre mekanik özelliklerin incelenmesi alt bölümleri şeklinde sıralanmıştır.

3.1. Parçacık Morfoloji İncelemeleri

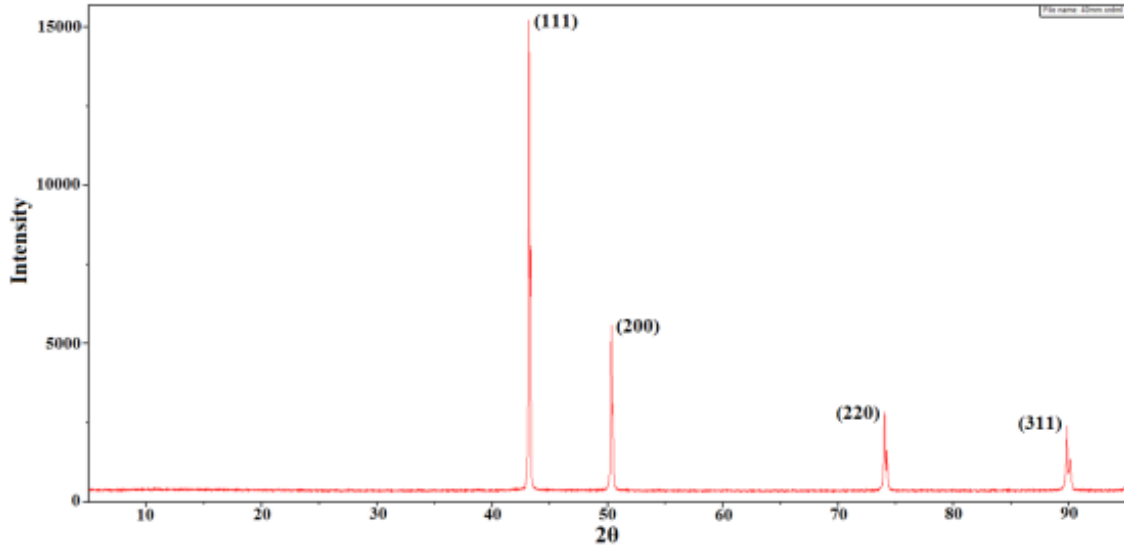
Tez kapsamında kullanılan Bakır tozlarının 500X büyütmede çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 43'te verilmiştir. Morfoloji resimlerinden de anlaşıldığı üzere kullanılmak üzere seçilen Bakır tozları küresel morfolojiye sahiptir ve yapılacak deneysel çalışmalara için uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 43. Kullanılan Bakır tozlarının morfolojik görüntüsü.

3.2. Kristal Yapı İncelemeleri

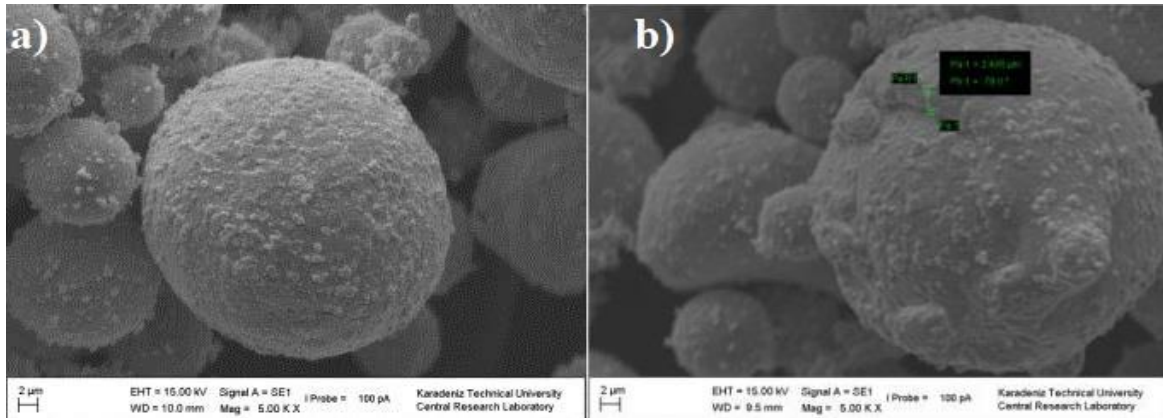
Bakır tozuna ait XRD incelemeleri sonucunda elde edilen kırınım desenleri Şekil 44'te görülmektedir. Kırınım desenlerinden de görüldüğü gibi bakır dışındaki herhangi bir metali temsil eden kırınım deseni ve aynı zamanda herhangi bir oksit kırınım deseni bulunmamaktadır.



Şekil 44. Bakır tozlarına ait X-Işını kırınım desenleri.

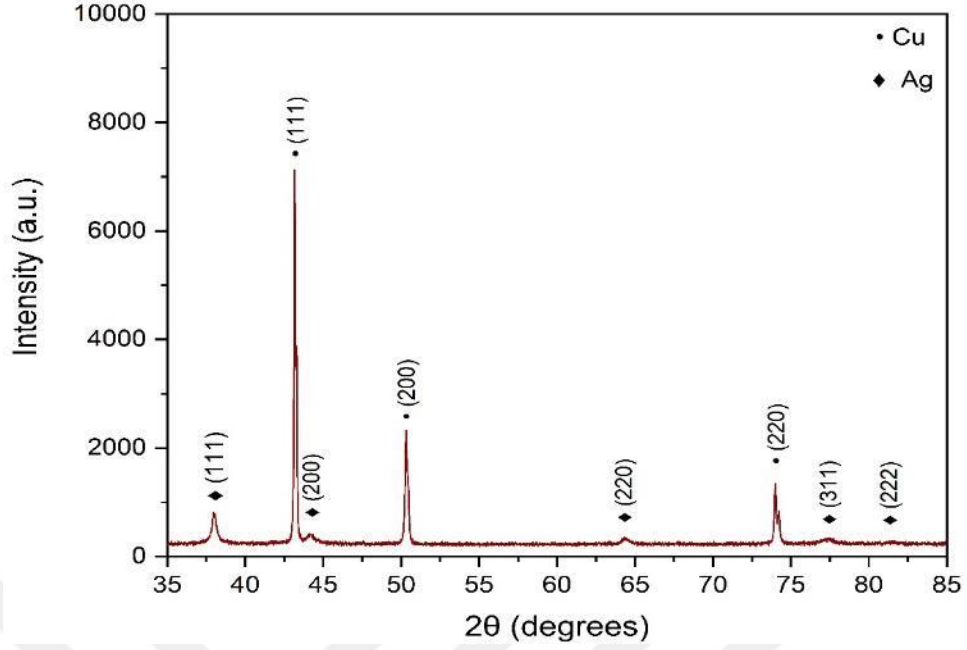
3.3. Akımsız Gümüş Kaplama Sonrası Toz Morfolojisi ve Kristal Yapı İncelemeleri

Deney 1 ile ilgili morfoloji resimlerinde de görüldüğü gibi küresel bakır parçacıklarının üzerinde oluşan gümüş kaplama tabaka halinde veya kabuk biçiminde olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlığı miktarı 2 ile 5 µm arasında değişmektedir.



Şekil 45. Kaplama sonucunda elde edilen metalik tozlara ait morfoloji; (a) genel morfoloji, (b) kaplama kalınlığı

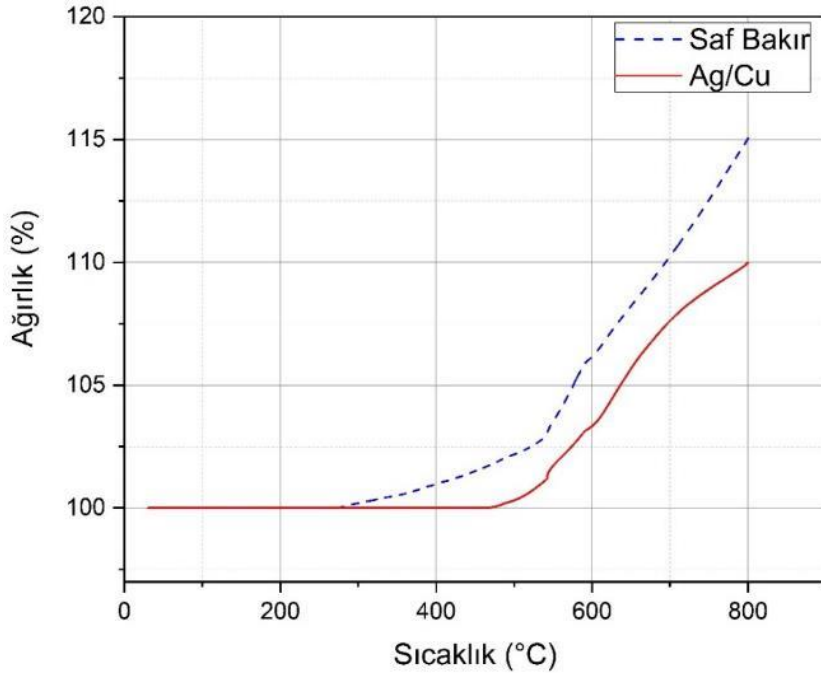
Şekil 46'de Deney 1'e ait X-ışını kırınım desenleri görülmektedir. Bu incelemelerde de gümüş varlığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 46. Kaplama sonucunda üretilen Gümüş kaplı Bakır tozlarına ait X-ışını kırınım desenleri.

3.4. Gümüş Kaplı Bakır ve Saf Bakır Tozlarının Oksidasyon Direncinin Ölçülmesi

PerkinElmer TGA 4000 Termogravimetrik analiz (TGA) cihazı testi gerçekleştirilen tozlardaki % ağırlık değişimi Şekil 47’de verilmiştir.

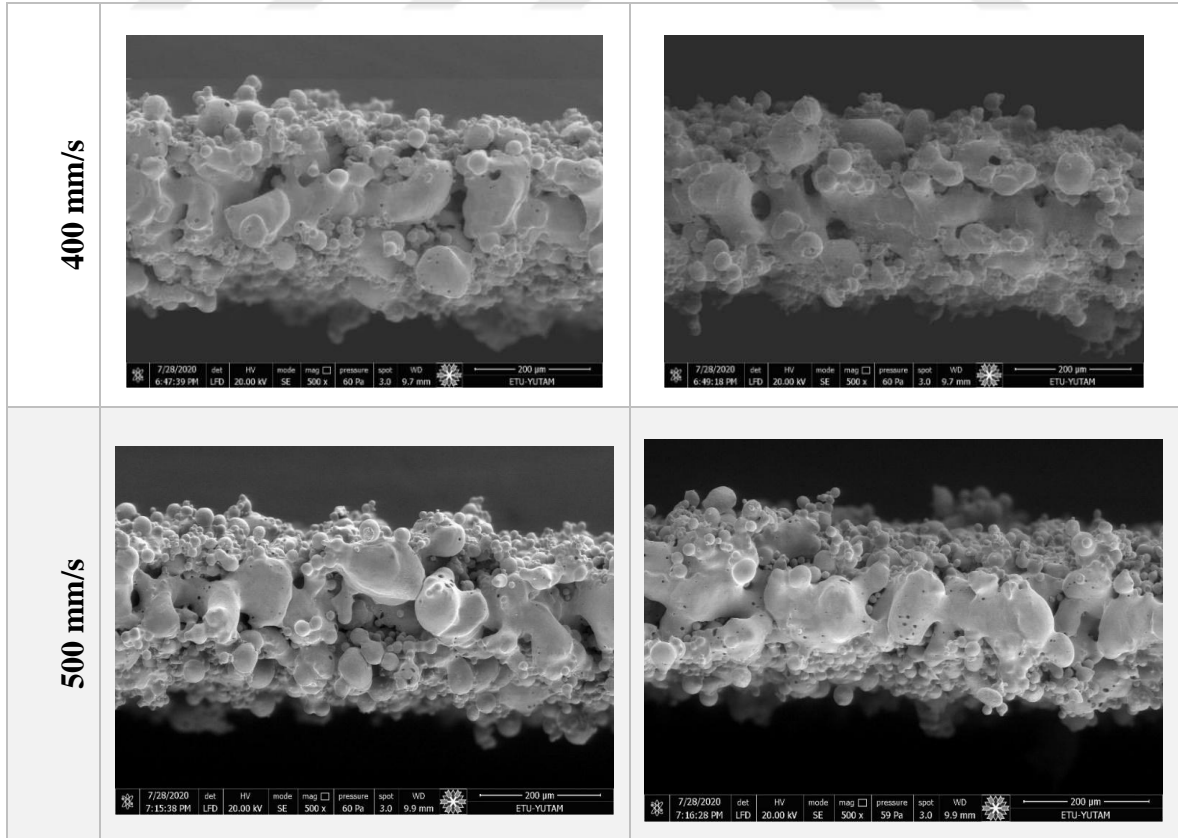


Şekil 47. Gümüş kaplı tozların ve Saf Bakır tozlarının % ağırlık değişimleri.

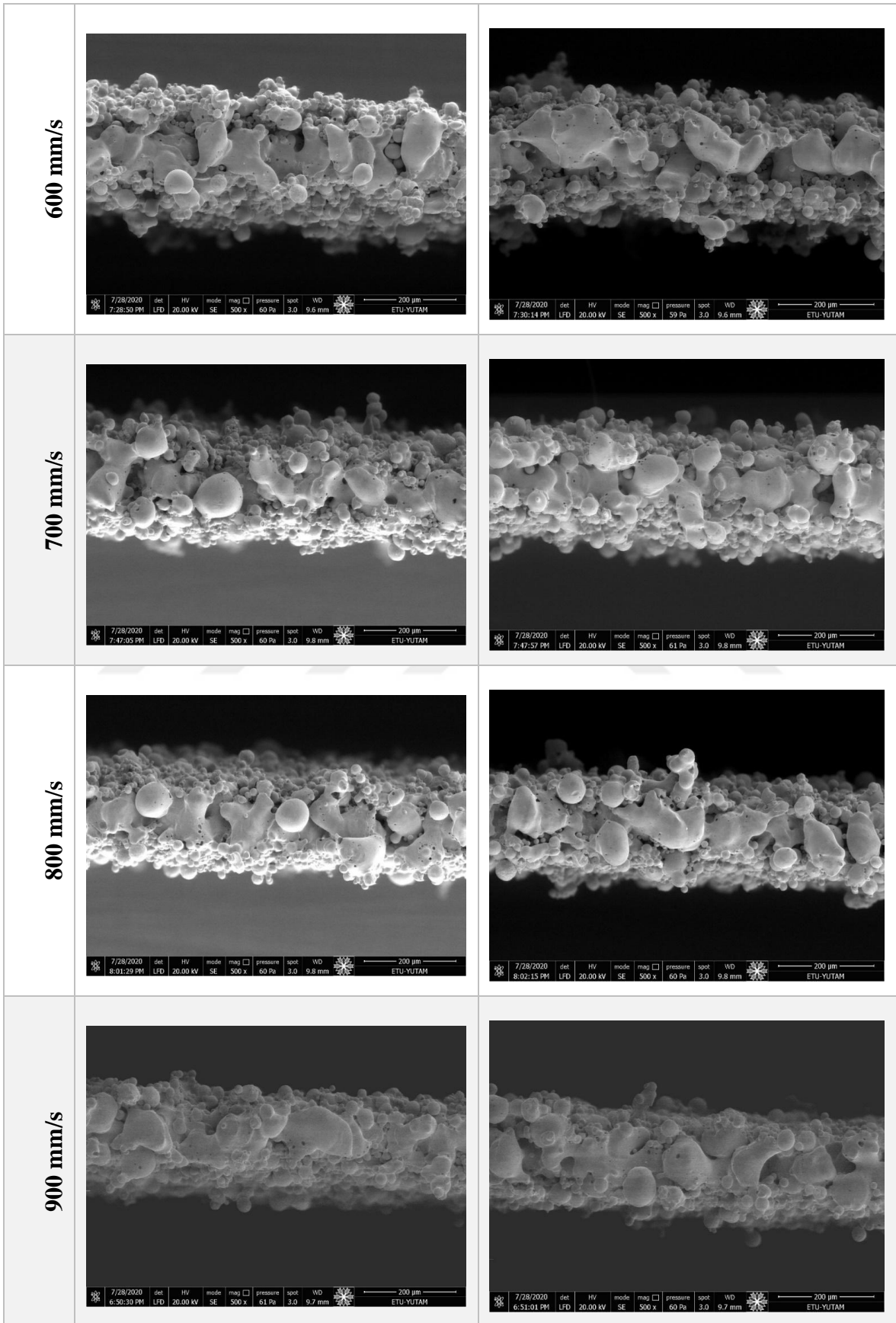
3.5. Tek Kontur Lazer Vuruşları Bulguları

SLE yöntemi ile yapılan çalışmalarda tek kontur lazer vuruşları sonrası elde edilen lazer iz genişliklerine ait SEM görüntüleri Tablo 10'de (Varol T. ve diğerleri 2020) ve üretilen tek kontur numunelerine ait optik mikroskop kesit görüntüleri Tablo 11'de sunulmuştur. Tablo 8'de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde tarama hızındaki artışa bağlı olarak iz genişliklerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca 800 mm/s tarama hızından sonra numune yüzeylerinde topaklanma etkisinin (balling effect) belirginleştiği görülmektedir. SLE yönteminde, uygun olmayan üretim parametreleri sebebiyle meydana gelen aşırı ısınma ve oksitlenme sonucu oluşan metal oksidi, katı metalden daha düşük yüzey serbest enerjisine sahiptir. Bu durum yüzey temas açısının artmasına, oluşan oksidin metal yüzeyini ıslatamaması sonucu topaklanma etkisi olarak bilinen yüzey kusuruna ve yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır. Tabakalar arasında oluşan bu yüzey kusuru, katmanlar arasında kalarak içyapı kusurlarının oluşumu ile üretilen parçanın özellikle mekanik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Tablo 11'da verilen kesit görüntüleri incelendiğinde SEM görüntüleri ile uyumlu olduğu ve 800 mm/s tarama hızından sonra, toz partiküllerinin birbirine tam olarak bağlanmadığı ve numunelerdeki bütünlüğün açık bir şekilde azaldığı görülmektedir.

Tablo 10. 100 W lazer gücünde, 25 µm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki iz genişliğinin SEM görüntüleri [54].



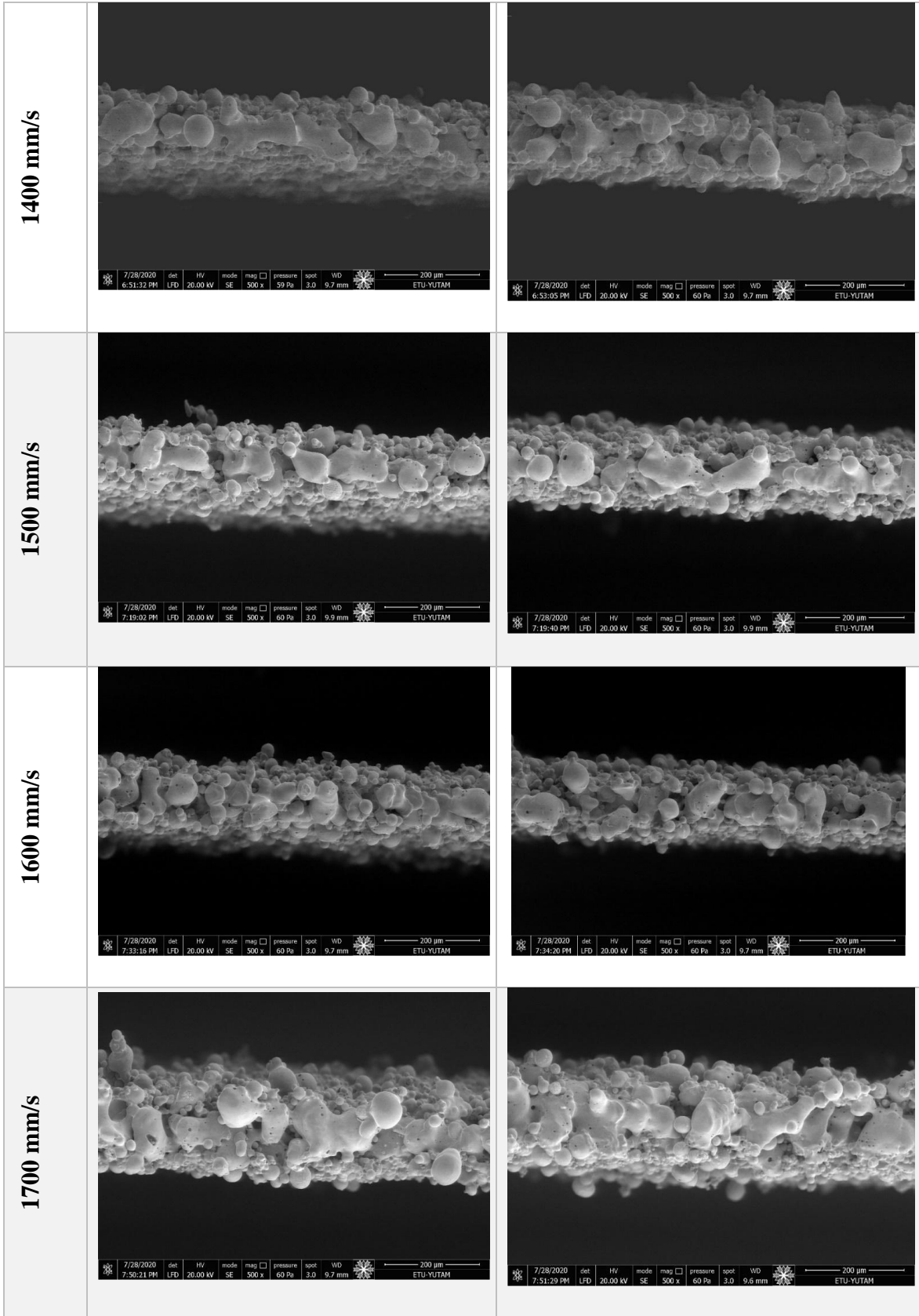
Tablo 10'un devamı.



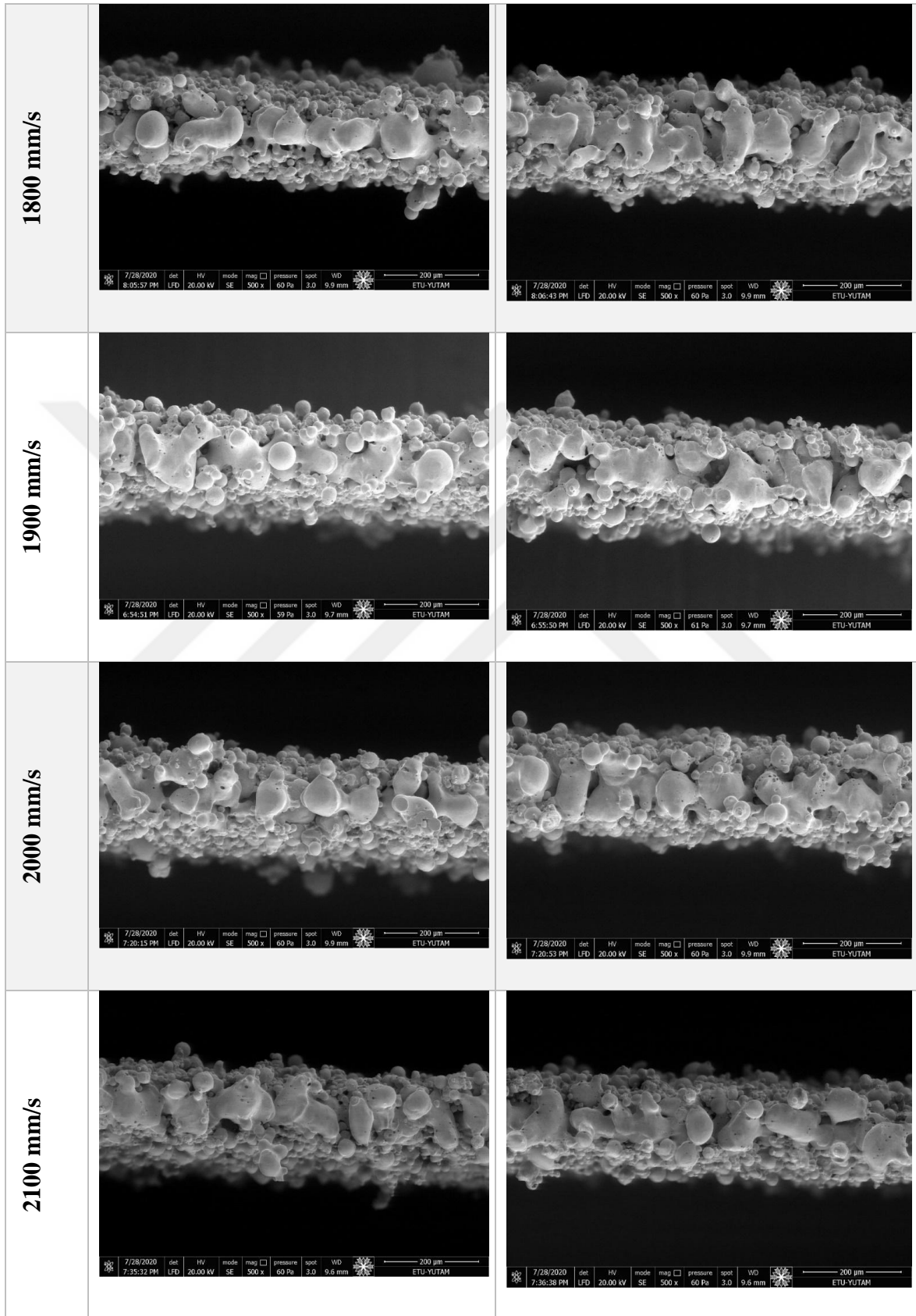
Tablo 10'un devamı.

<p>1000 mm/s</p>		
<p>1100 mm/s</p>		
<p>1200 mm/s</p>		
<p>1300 mm/s</p>		

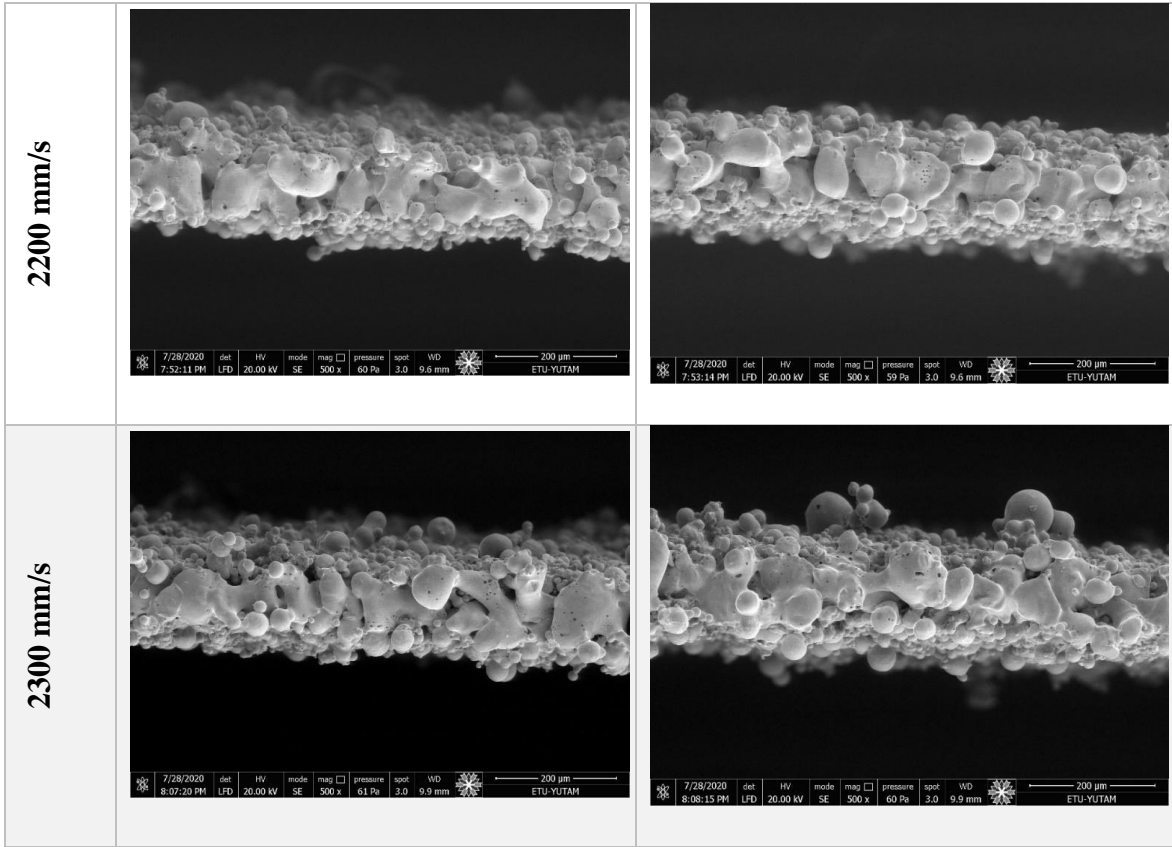
Tablo 10'un devamı.










Tablo 10'un devamı.











Tablo 10'un devamı.



Tablo 11. 100 W lazer gücünde, 25 µm katman kalınlığında ve farklı ilerleme hızlarındaki iz genişliğinin optik mikroskop kesit görüntüleri.

400 mm/s	
500 mm/s	
600 mm/s	
700 mm/s	
800 mm/s	
900 mm/s	
1000 mm/s	

Tablo 11'in devamı.

1100 mm/s	
1200 mm/s	
1300 mm/s	
1400 mm/s	
1500 mm/s	
1600 mm/s	
1700 mm/s	
1800 mm/s	

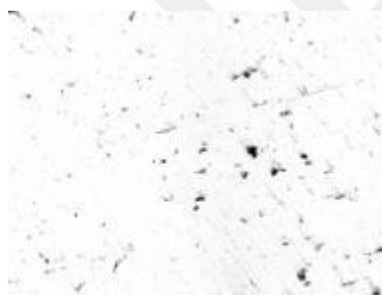
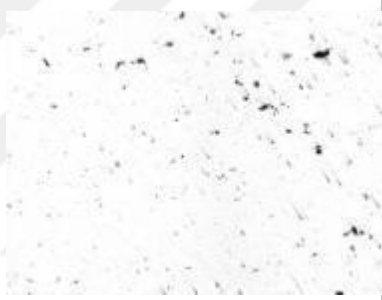
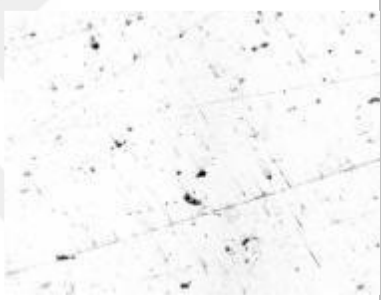
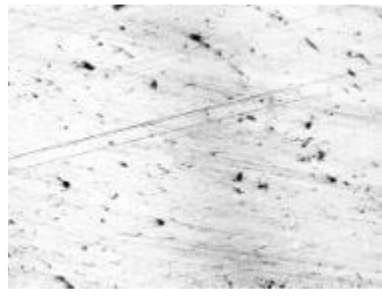
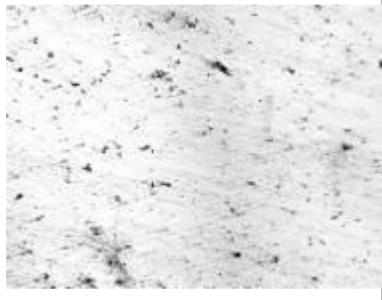

Tablo 11'in devamı.

1900 mm/s			
2000 mm/s			
2100 mm/s			
2200 mm/s			
2300 mm/s			

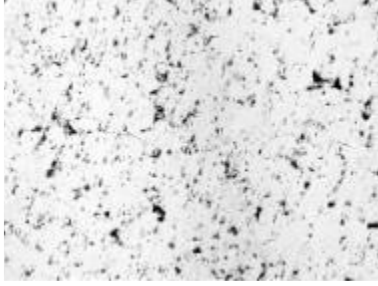
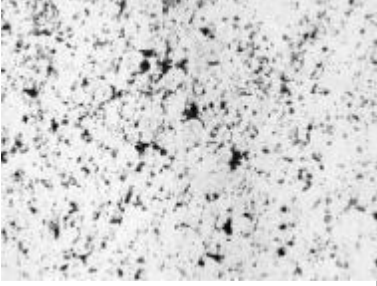
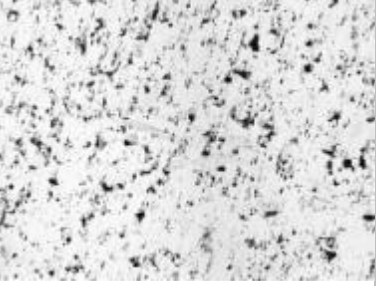
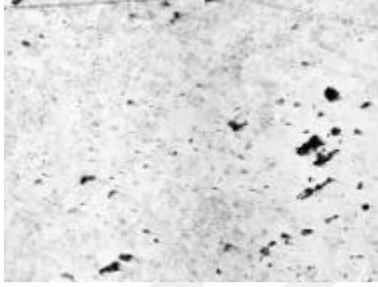
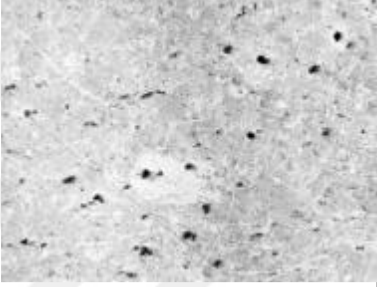
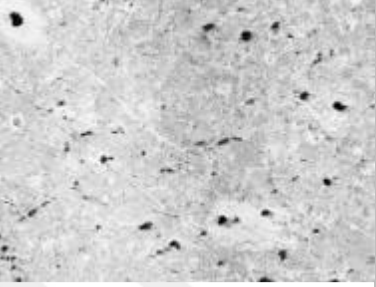
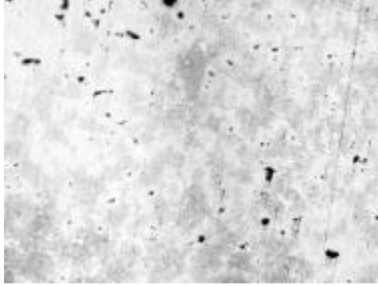
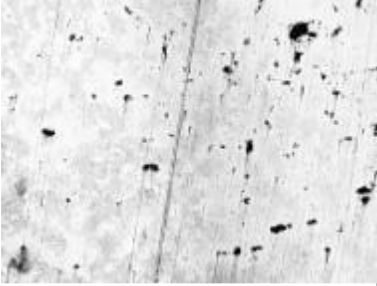
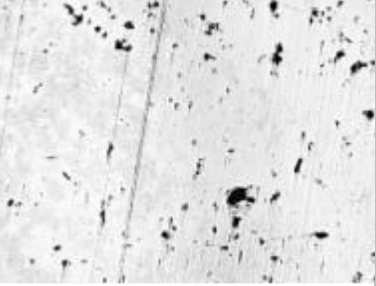
3.6. Yana Kayma Miktarı ve Yüzde Doluluk Oranları

Farklı üretim parametreleri ile üretilen içi dolu numunelere ait doluluk oranlarının incelenmesi amacı ile 220, 400, 800 ve 1200 numaralı su zımparaları sırası kullanılarak kaba parlatma ve sonrasında 0,6 ve 0,3 mikron elmas süspansiyonlar ile ince parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Üretim sonrası doluluk oranları, her bir yana kayma değerinde elde edilen iki farklı numunenin en az 5 farklı kesitinde ve farklı düzlemlerden alınan optik mikroskop görüntülerinin ZEN yazılımı ile işlenmesi ile sağlanmıştır.

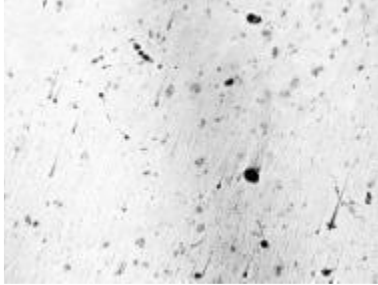
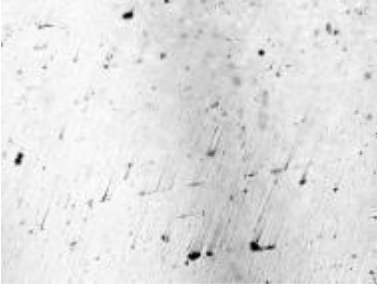

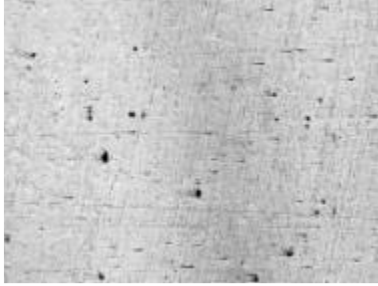


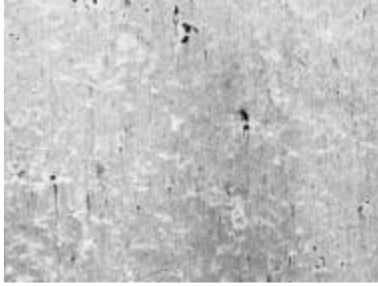

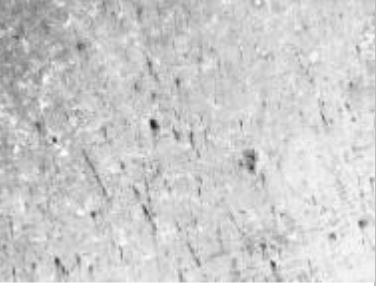
Tablo 12. 100W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında ve farklı yana kayma değerlerinde üretilmiş numunelerin yüzey optik görüntüleri [54].

400 mm/s 67,5 μm yana kayma	400 mm/s 67,5 μm yana kayma	400 mm/s 67,5 μm yana kayma
		
400 mm/s 75 μm yana kayma	400 mm/s 75 μm yana kayma	400 mm/s 75 μm yana kayma
		
400 mm/s 82,5 μm yana kayma	400 mm/s 82,5 μm yana kayma	400 mm/s 8,5 μm yana kayma

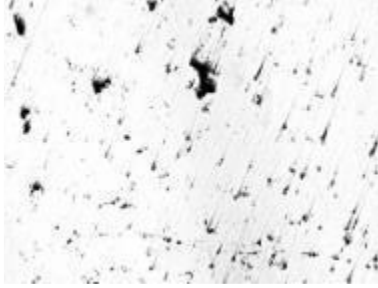
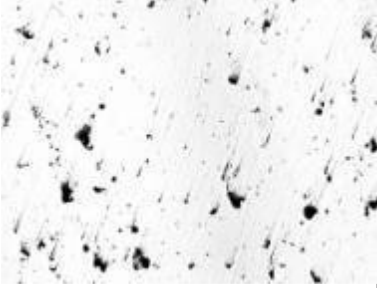
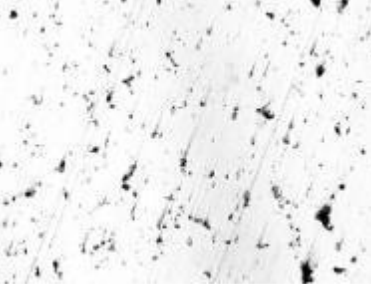
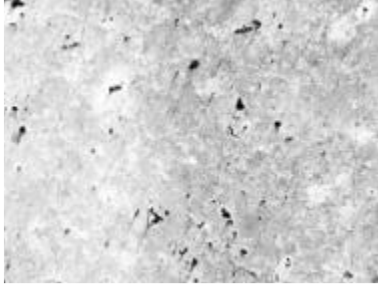
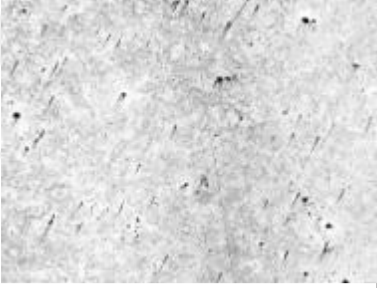
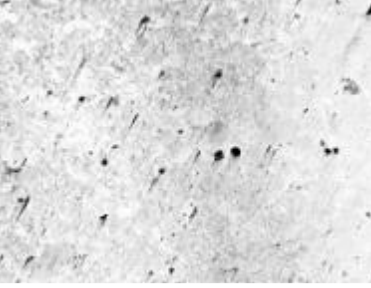
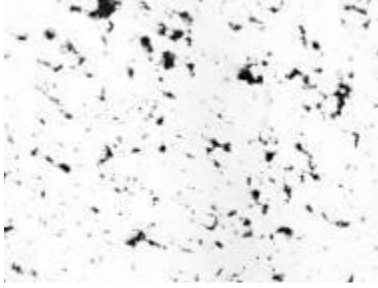
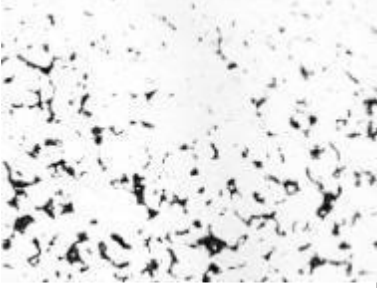
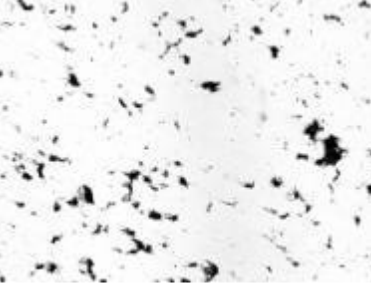
Tablo12'nin devamı.

		
400 mm/s 90 µm yana kayma	400 mm/s 90 µm yana kayma	400 mm/s 90 µm yana kayma
		
400 mm/s 97,5 µm yana kayma	400 mm/s 97,5 µm yana kayma	400 mm/s 97,5 µm yana kayma
		

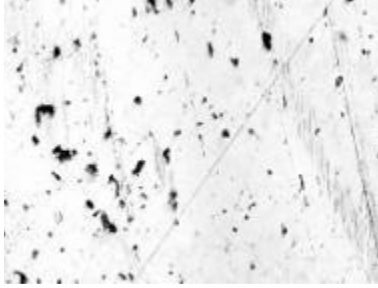
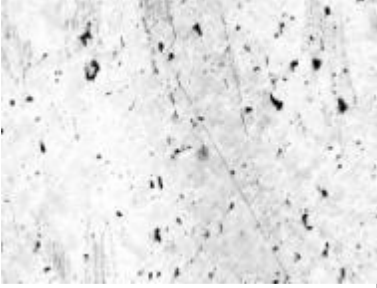
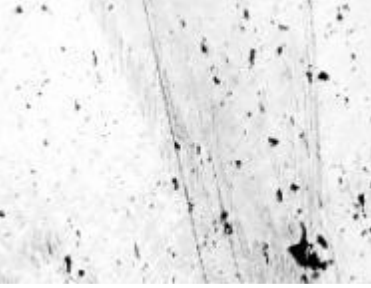
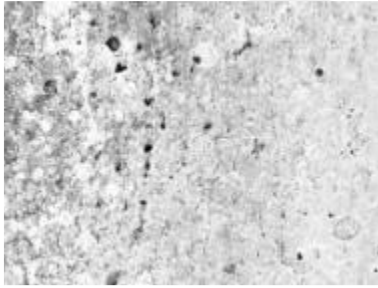
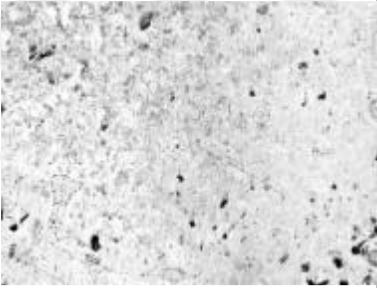
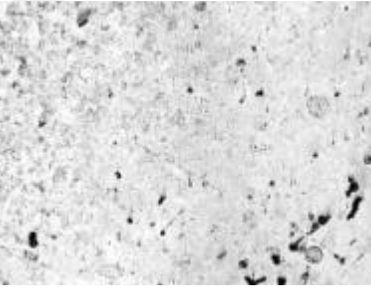
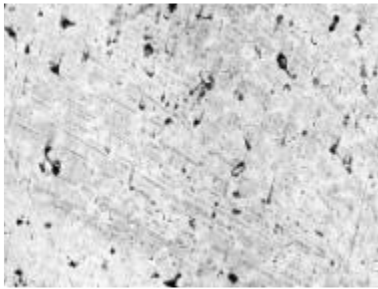
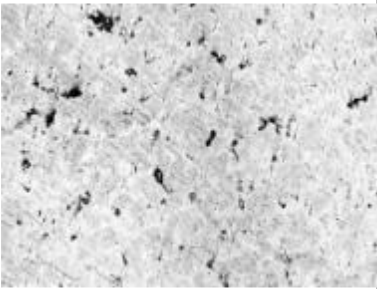
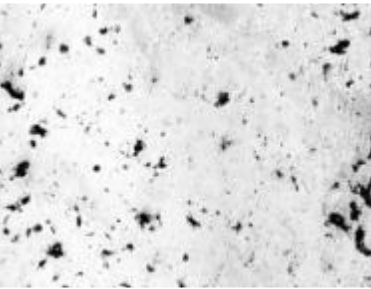
Tablo 12'nin devamı.

400 mm/s 105 µm yana kayma	400 mm/s 105 µm yana kayma	400 mm/s 105 µm yana kayma
		
500 mm/s 54 µm yana kayma	500 mm/s 54 µm yana kayma	500 mm/s 54 µm yana kayma
		
500 mm/s 60 µm yana kayma	500 mm/s 60 µm yana kayma	500 mm/s 60 µm yana kayma
		

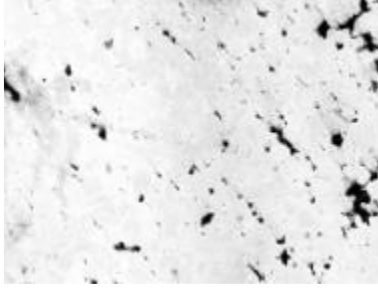
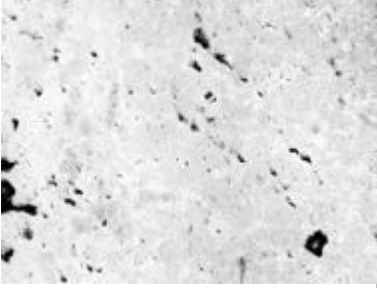
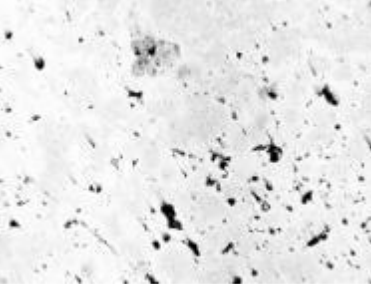
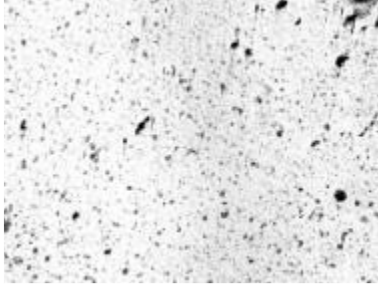
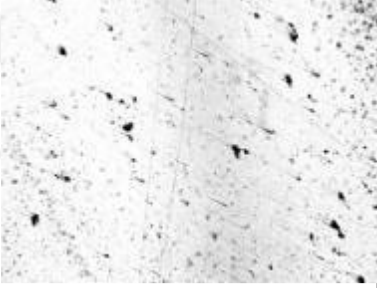
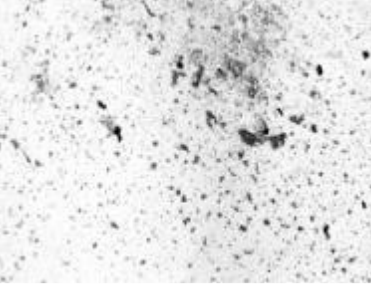
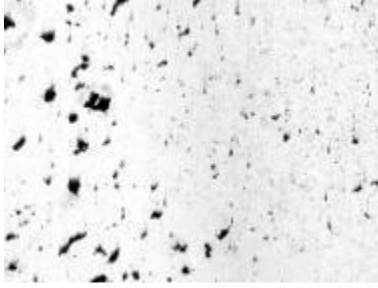

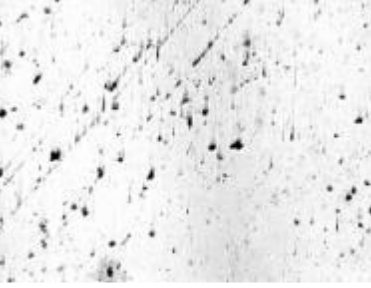
Tablo 12'nin devamı.

500 mm/s 66 μm yana kayma	500 mm/s 66 μm yana kayma	500 mm/s 66 μm yana kayma
		
500 mm/s 72 μm yana kayma	500 mm/s 72 μm yana kayma	500 mm/s 72 μm yana kayma
		
500 mm/s 78 μm yana kayma	500 mm/s 78 μm yana kayma	500 mm/s 78 μm yana kayma
		

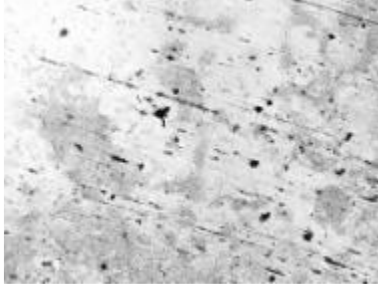
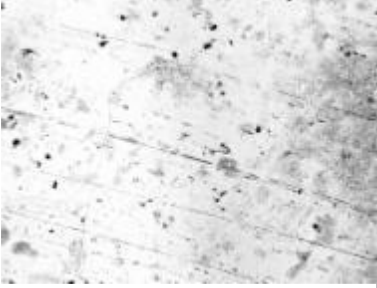
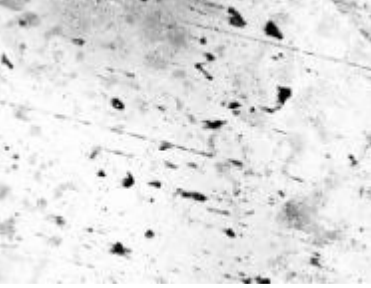
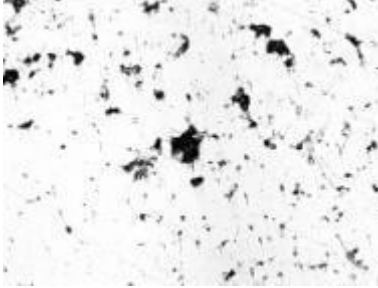
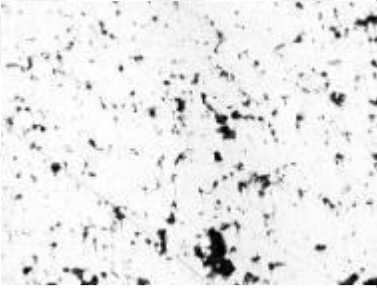
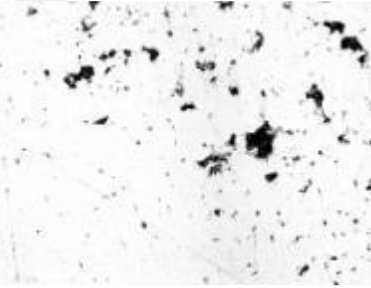
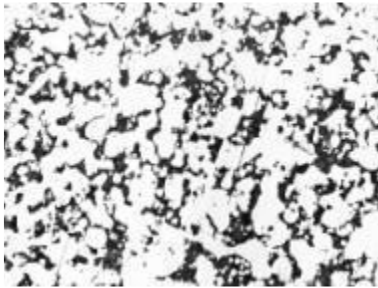
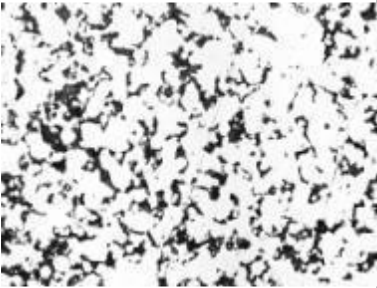
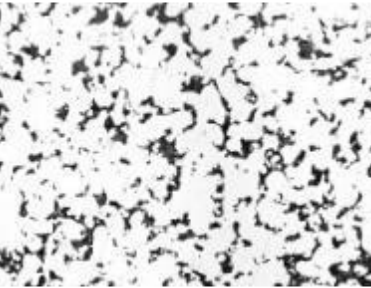
Tablo 12'nin devamı.

500 mm/s 84 μm yana kayma	500 mm/s 84 μm yana kayma	500 mm/s 84 μm yana kayma
		
600 mm/s 49,5 μm yana kayma	600 mm/s 49,5 μm yana kayma	600 mm/s 49,5 μm yana kayma
		
600 mm/s 55 μm yana kayma	600 mm/s 55 μm yana kayma	600 mm/s 55 μm yana kayma
		

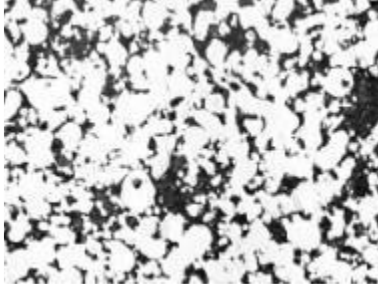
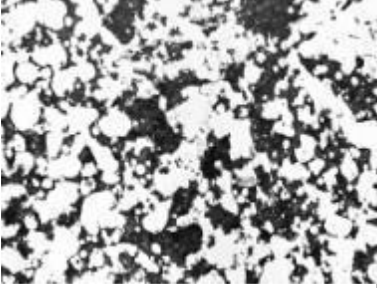

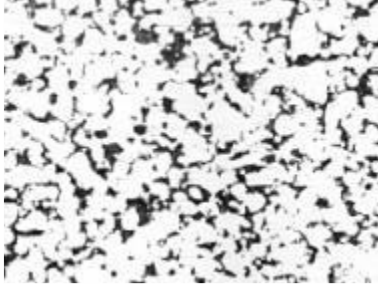
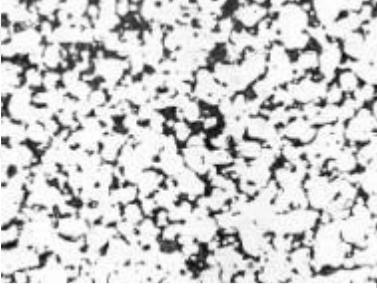
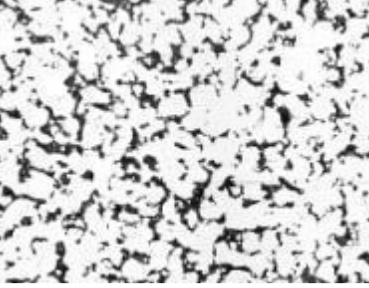
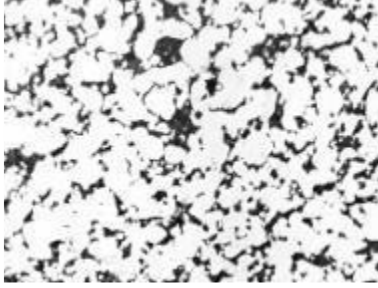
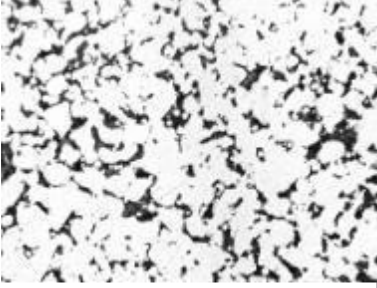
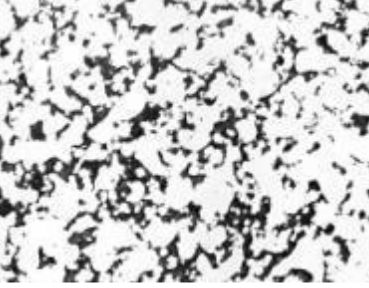
Tablo 12'nin devamı.

600 mm/s 60,5 μm yana kayma	600 mm/s 60,5 μm yana kayma	600mm/s 60,5μm yana kayma
		
600 mm/s 66 μm yana kayma	600 mm/s 66 μm yana kayma	600 mm/s 66 μm yana kayma
		
600 mm/s 71,5 μm yana kayma	600 mm/s 71,5 μm yana kayma	600 mm/s 71,5 μm yana kayma
		

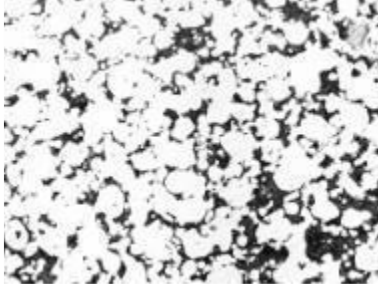
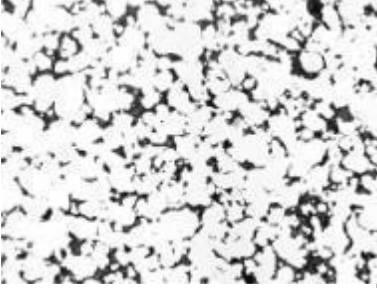
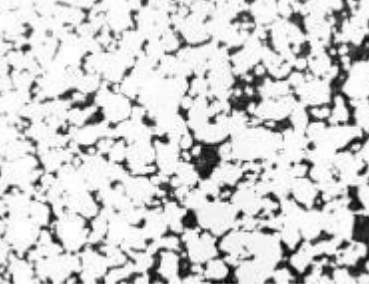
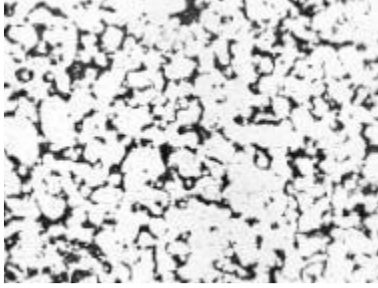
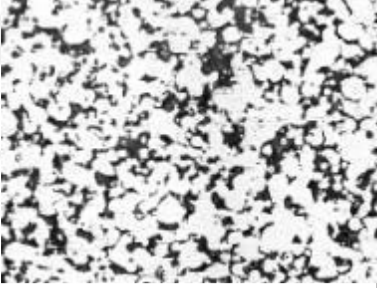
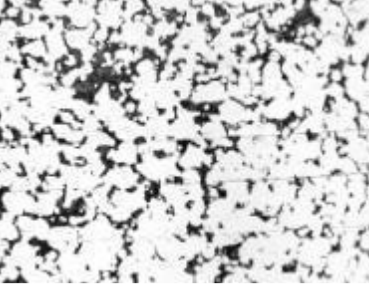
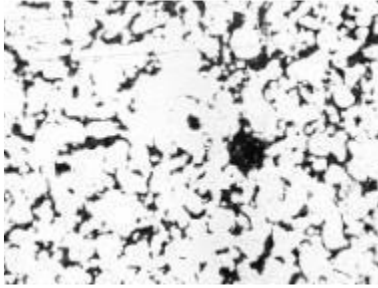
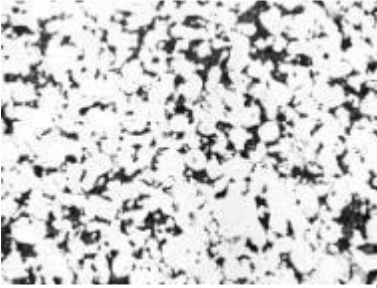
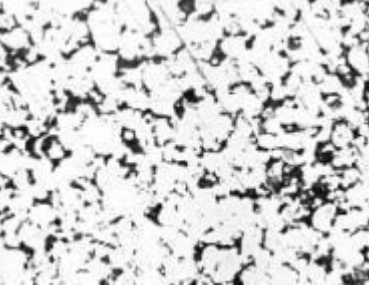
Tablo 12'nin devamı.

600 mm/s 77 μm yana kayma	600 mm/s 77 μm yana kayma	600 mm/s 77 μm yana kayma
		
700 mm/s 45 μm yana kayma	700 mm/s 45 μm yana kayma	700 mm/s 45 μm yana kayma
		
700 mm/s 50 μm yana kayma	700 mm/s 50 μm yana kayma	700 mm/s 50 μm yana kayma
		

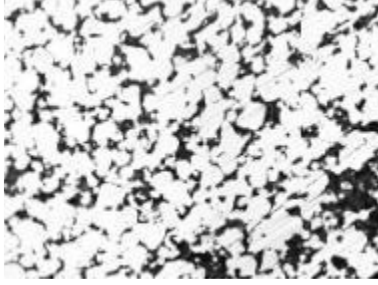
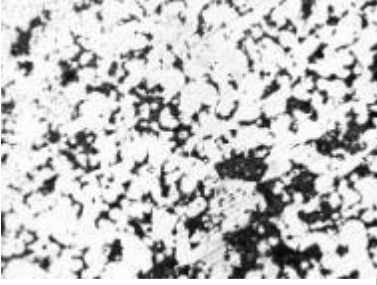
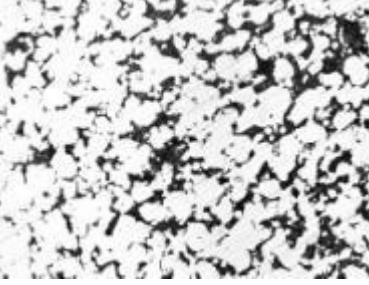


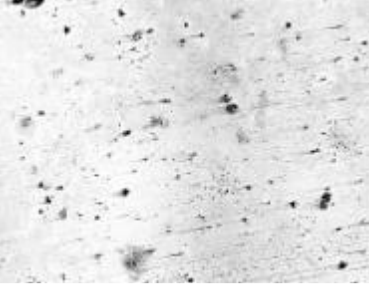
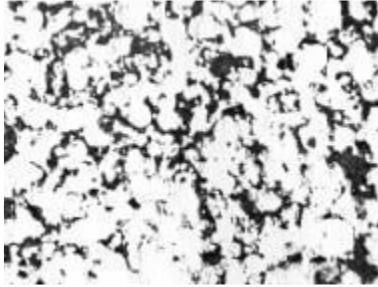
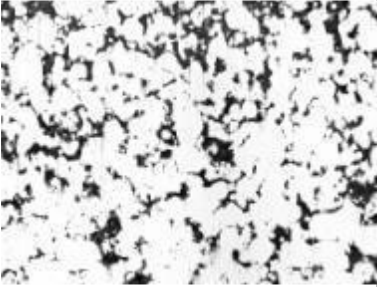
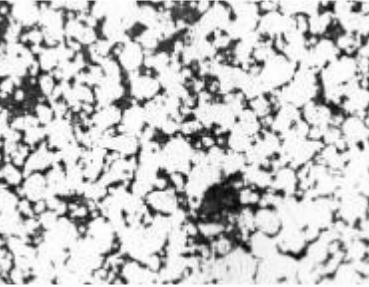
Tablo 12'nin devamı.

700 mm/s 55 μm yana kayma	700 mm/s 55 μm yana kayma	700 mm/s 55 μm yana kayma
		
700 mm/s 60 μm yana kayma	700 mm/s 60 μm yana kayma	700 mm/s 60 μm yana kayma
		
700 mm/s 65 μm yana kayma	700 mm/s 65 μm yana kayma	700 mm/s 65 μm yana kayma
		



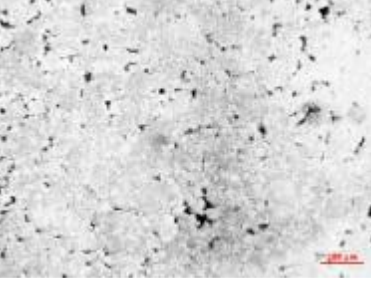
Tablo 12'nin devamı.

700 mm/s 75 µm yana kayma	700 mm/s 75 µm yana kayma	700 mm/s 75 µm yana kayma
		
800 mm/s 42,75 µm yana kayma	800 mm/s 42,75 µm yana kayma	800 mm/s 42,75 µm yana kayma
		
800 mm/s 47,5 µm yana kayma	800 mm/s 47,5 µm yana kayma	800 mm/s 47,5 µm yana kayma
		

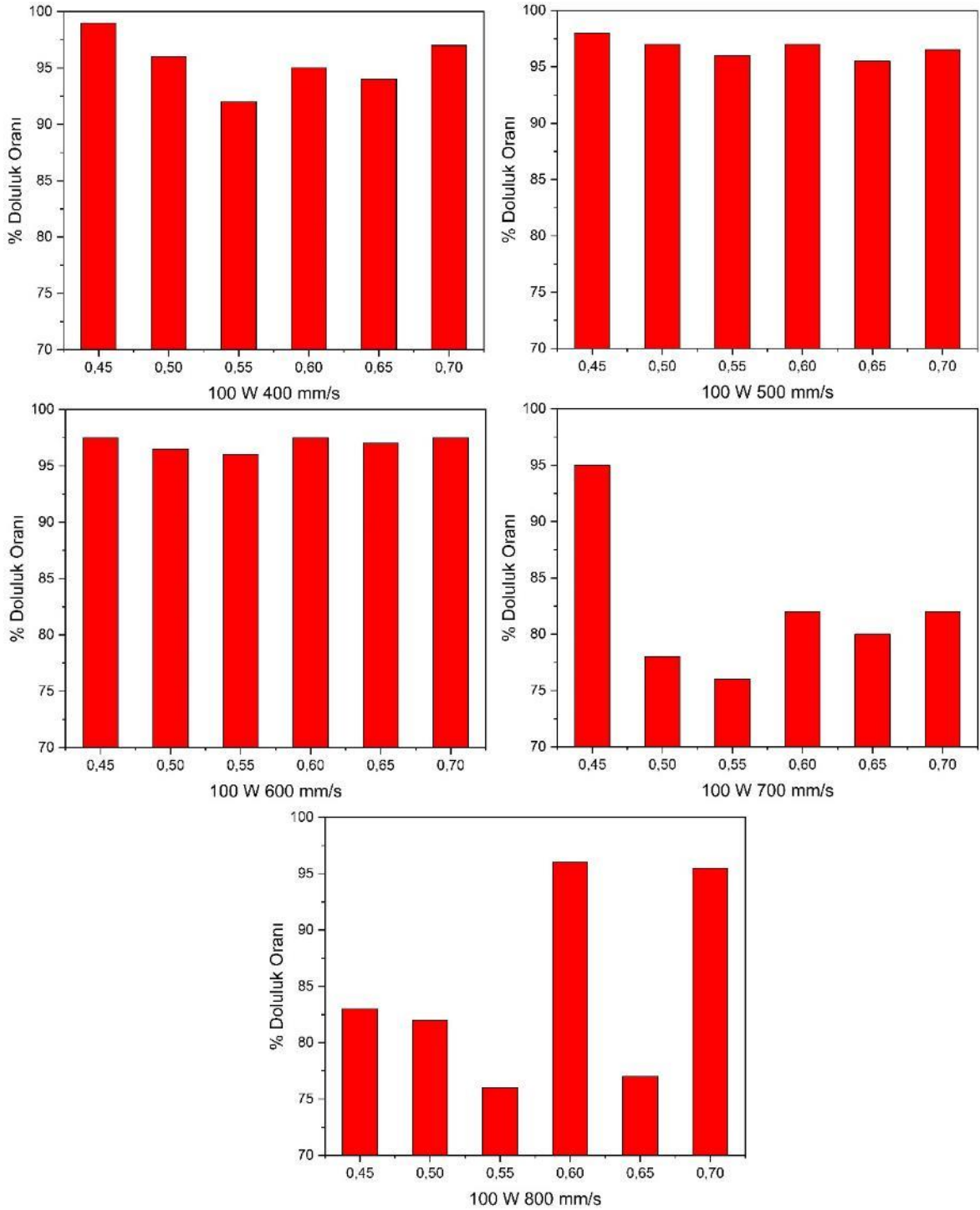
Tablo 12'nin devamı.

800 mm/s 52,25 μm yana kayma	800 mm/s 52,25 μm yana kayma	800 mm/s 52,25 μm yana kayma
		
800 mm/s 57 μm yana kayma	800 mm/s 57 μm yana kayma	800 mm/s 57 μm yana kayma
		
800 mm/s 61,75 μm yana kayma	800 mm/s 61,75 μm yana kayma	800 mm/s 61,75 μm yana kayma
		

Tablo 12'nin devamı.

800 mm/s 66,5 µm yana kayma	800 mm/s 66,5 µm yana kayma	800 mm/s 66,5 µm yana kayma
		

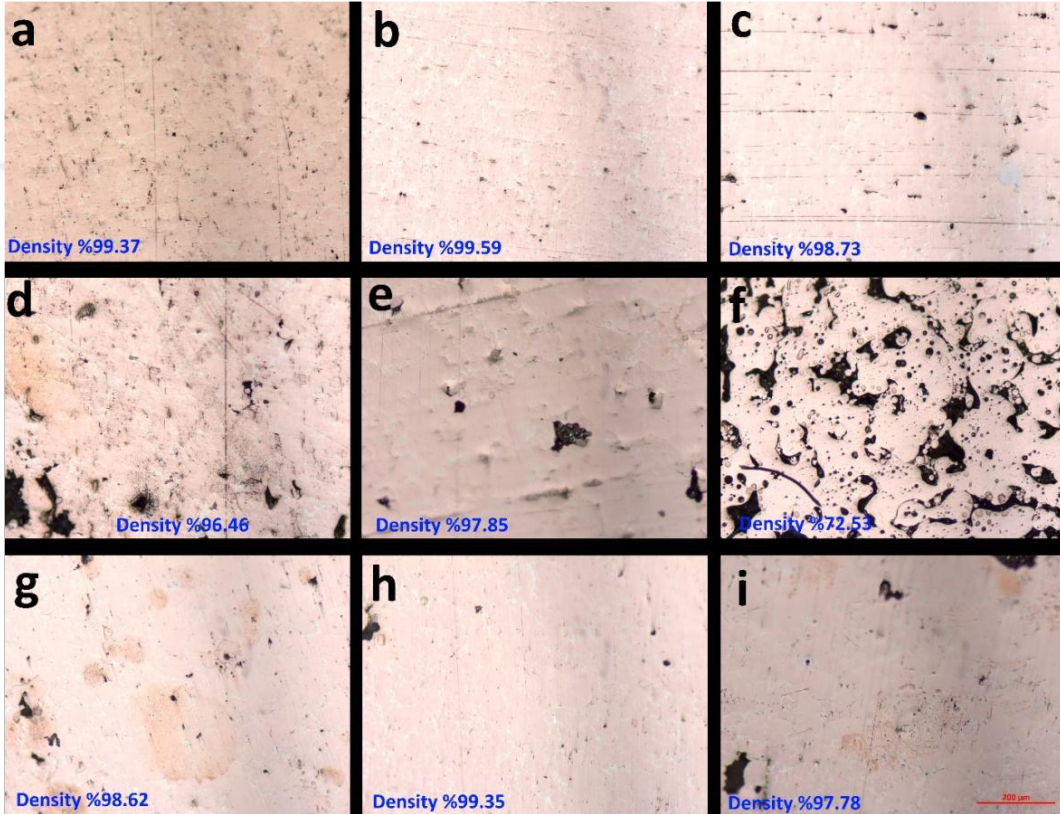
Tablo 12’de verilen optik mikroskop görüntülerinden görüntü analizi (image analysis) ile elde edilen % doluluk oranları grafiği Şekil 45’te sunulmuştur.



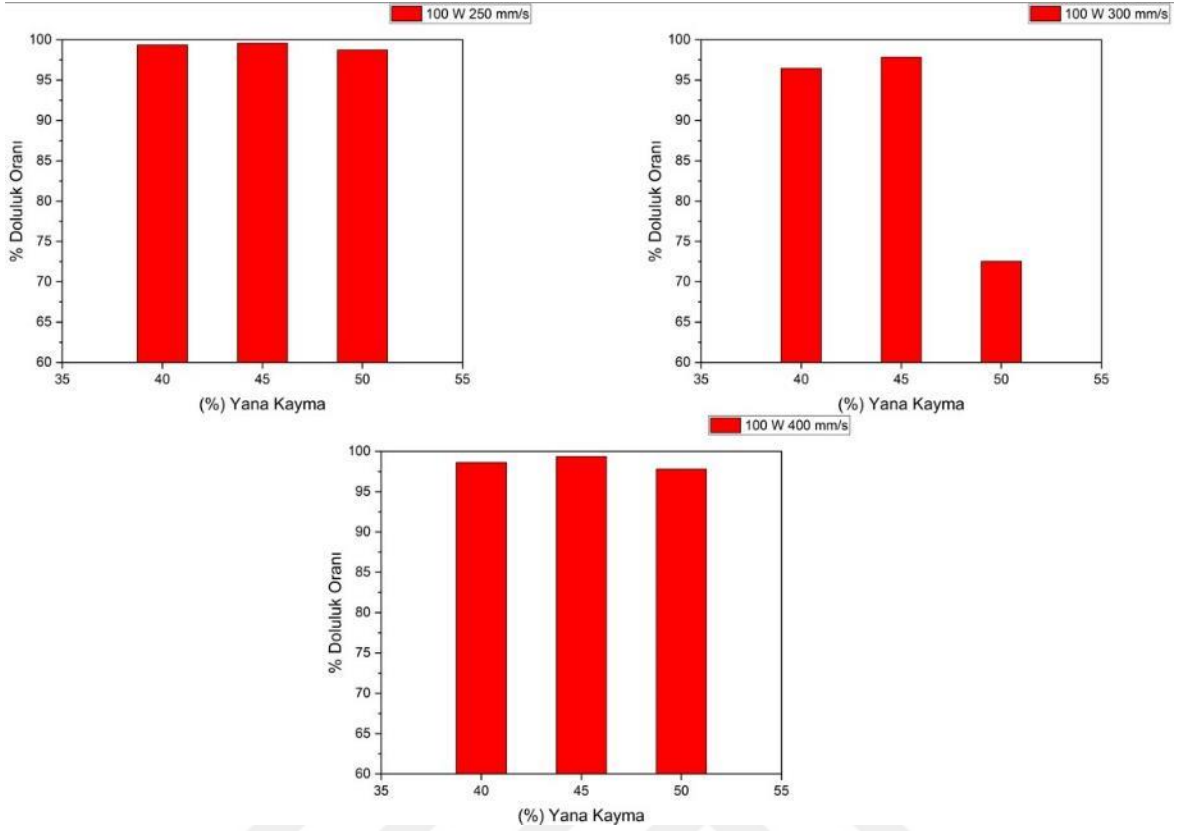
Şekil 48. Sırasıyla 100W lazer gücünde farklı ilerleme hızları ve yana kayma değerlerinde üretilmiş numunelerin doluluk oranları [54].

3.7. Düşük Tarama Hızlarının ve Ön-Maruziyet stratejisinin Yoğunluğa Etkisi

Üretim sonrası parlatılan numune yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri ve SLE üretim parametrelerine göre % doluluk oranı değişim grafiği sırasıyla Şekil 49 ve 50'de verilmiştir. Görüntü analizi (image analysis) ile elde edilen yoğunluk değerleri yüzey görüntüleri üzerinde sunulmuştur. Numune isimleri “tarama hızı-yana kayma” değerleri şeklinde kodlanmıştır (Varol T. ve diğerleri 2020).



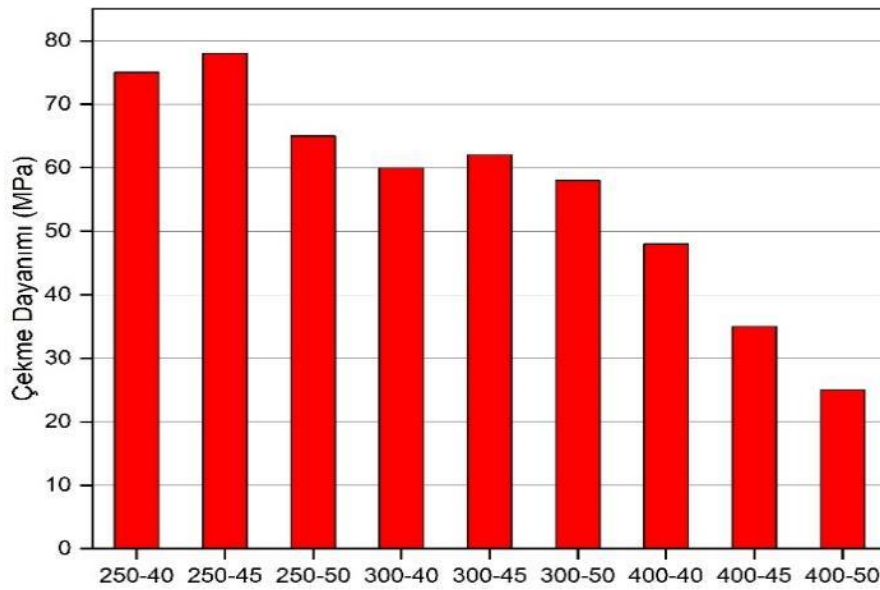
Şekil 49. 100 W lazer gücü, 50 W ön maruziyet gücü, farklı tarama hızlarında ve yana kayma değerlerinde üretilen numunelerin yüzey optik mikroskop görüntüleri, (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-50 (d) 300-40 (e) 300-45 (f) 300-50 (g) 400-40 (h) 400-45 (i) 400-50 [54].



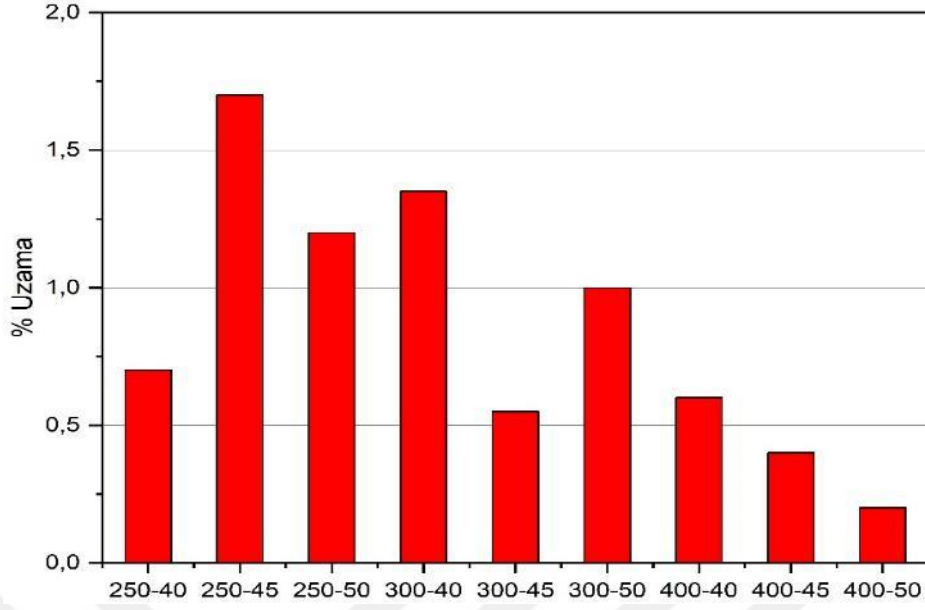
Şekil 50. Yana kayma ve tarama hızına bağlı olarak % doluluk oranı değişim grafiği [54].

3.8. Çekme Testi Bulguları ve Optimize Edilmiş Çekme Testi Bulguları

Çekme test sonuçlarına göre çekme gerilmesi (MPa) değerleri ve % uzama değerlerindeki değişim sırasıyla Şekil 51 ve 52’de sunulmuştur.

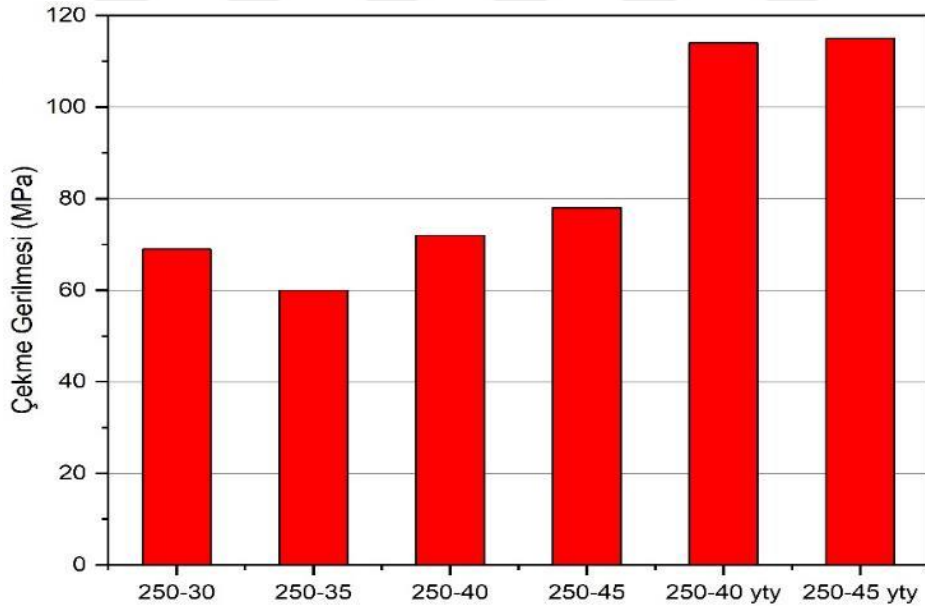


Şekil 51. SLE üretim parametrelerine göre belirlenen çekme gerilmesi değerleri.

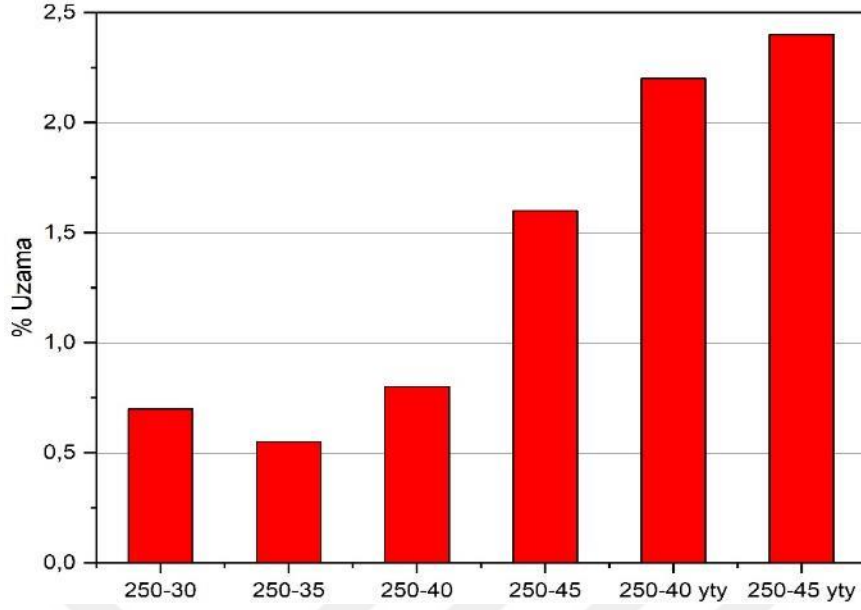


Şekil 52. SLE üretim parametrelerine göre belirlenen % uzama değerleri.

SLM ile üretilmiş yatay yönlü çekme numunelerinin çekme dayanımları ve % uzamaları Şekil 53 ve 54'te sırasıyla verilmiştir.



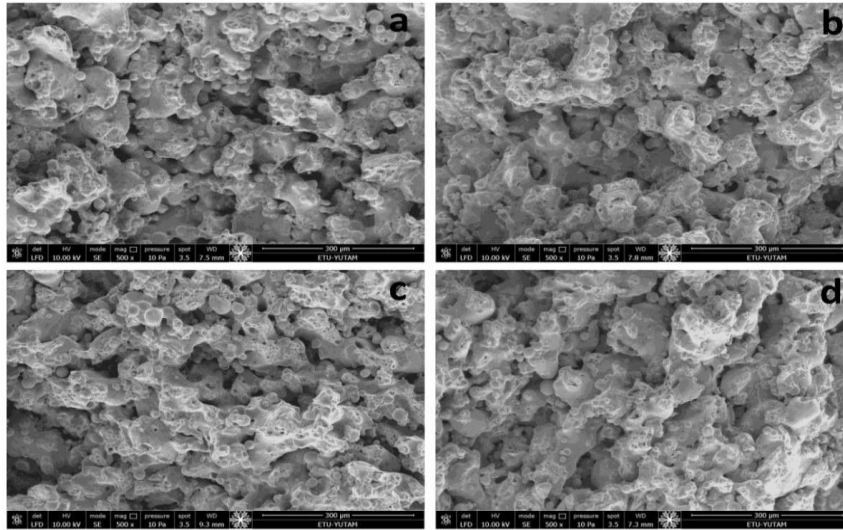
Şekil 53. Optimize edilmiş SLE üretim parametrelerine göre belirlenen gerilme (MPa) değerleri.



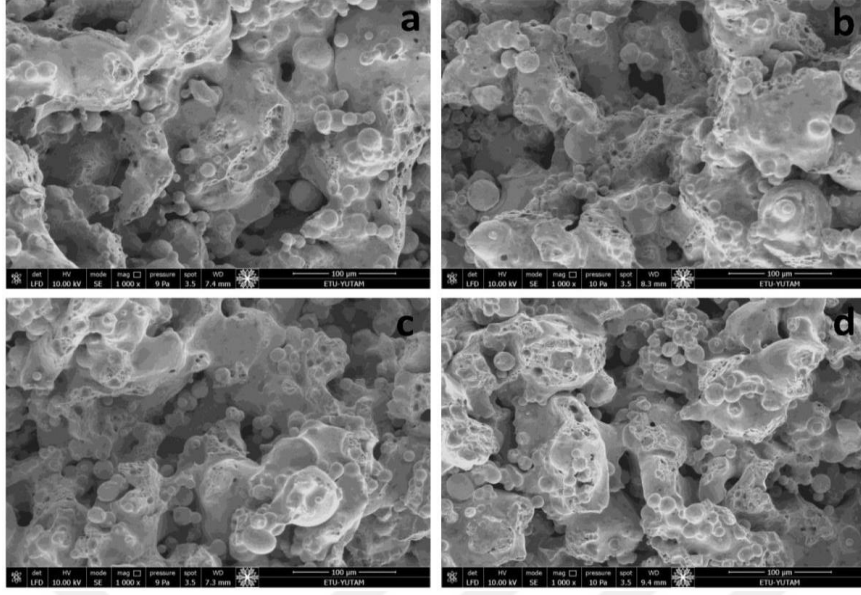
Şekil 54. Optimize edilmiş SLE üretim parametrelerine göre belirlenen % uzama değerleri.

3.9. Fraktrografik İncelemeler

Optimize edilmiş SLE üretim parametrelerine göre üretilen ve çekme testleri gerçekleştirilen numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri farklı büyütme oranları ile Şekil 55 ve 56'da sunulmuştur. SLE ile üretimde yansıtıcılığı oldukça yüksek olan Gümüş kaplı Bakır toz malzemeden üretilen numunelerin kırılma yüzeylerindeki boşluklar belirgin şekilde görülmektedir.

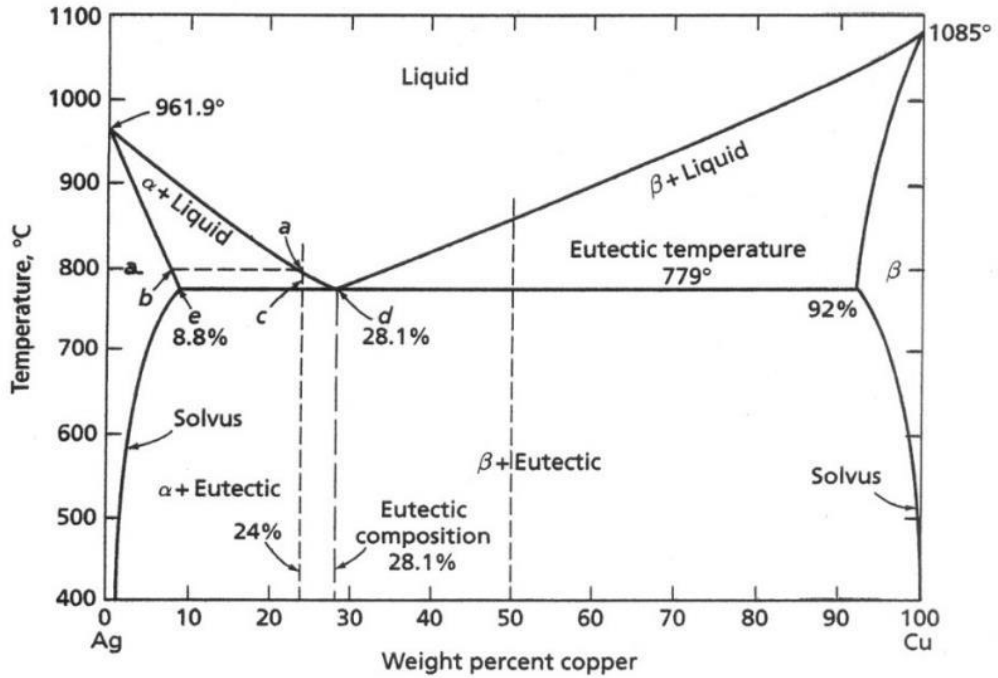


Şekil 55. Çekme numunelerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri (500X büyütme), (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-40yty (d) 250-45yty.



Şekil 56. Çekme numunelerinin kırılma SEM görüntüleri (1000X büyütme), (a) 250-40 (b) 250-45 (c) 250-40ty (d) 250-45ty.

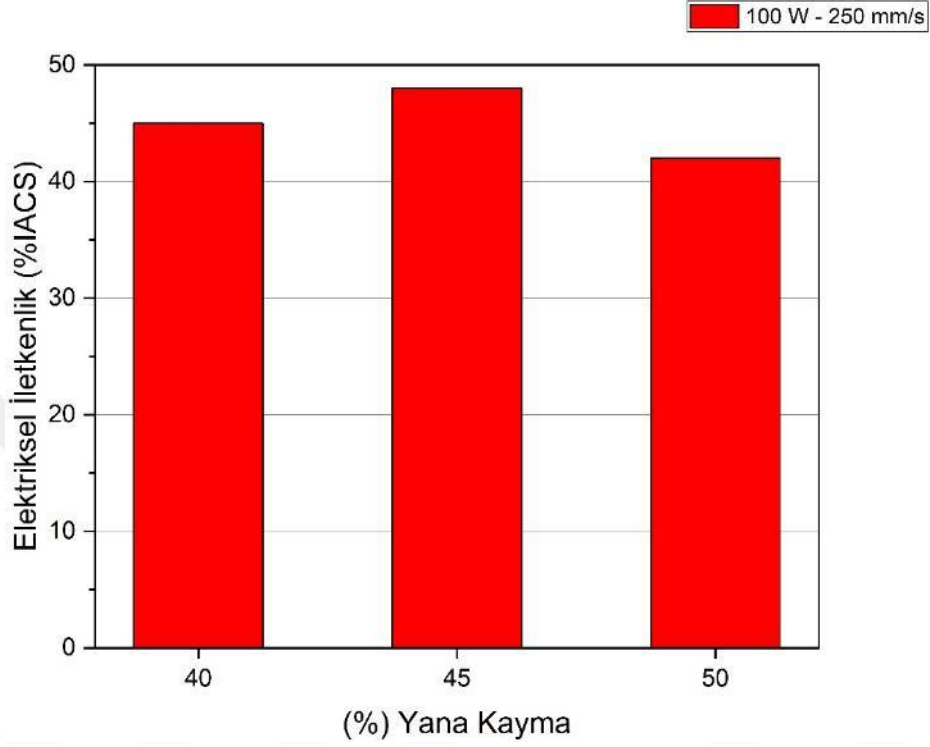
Ayrıca yapılan çalışma kapsamında Gümüş bir tabaka olarak Bakır yapının etrafında bulunsa da SLE ürünlerinde ötektik alaşımlar da gözlemlenmiştir. Şekil 57’de Bakır – Gümüş faz diyagramı verilmiştir.



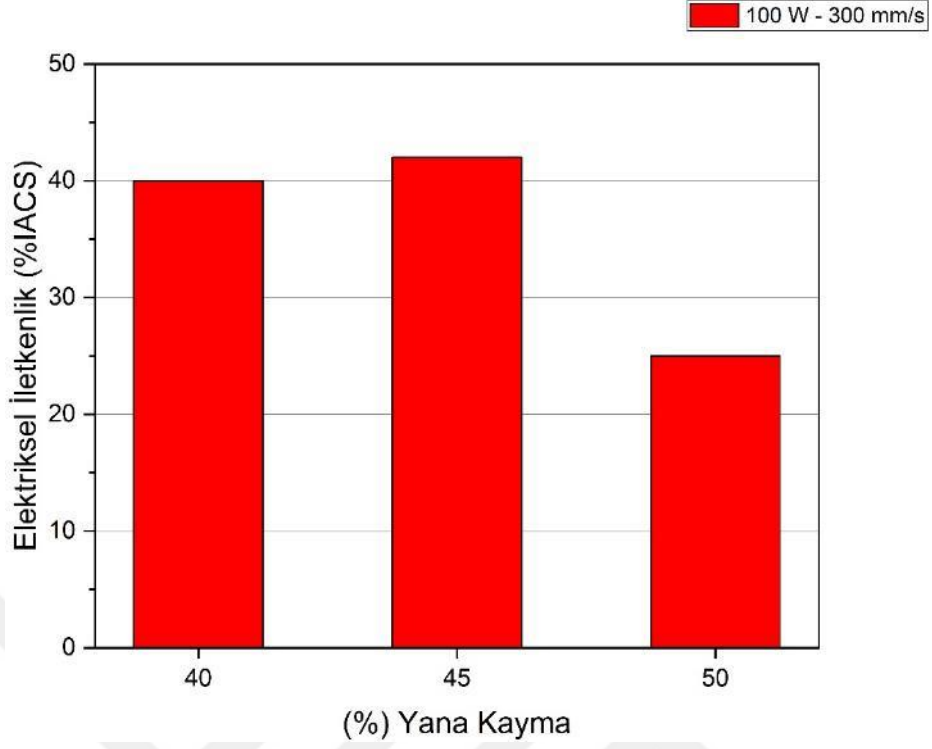
Şekil 57. Bakır – Gümüş faz diyagramı. Ötektik bileşim ağırlıkça %28,1 Cu ağırlıkça %71,9 Ag'dir ve Gümüş'ün Bakır'daki katı çözünürlük limiti ağırlıkça %8 Ag'dir [55].

3.10. SLE ile Üretilmiş Numunelerin Elektriksel İletkenlikleri

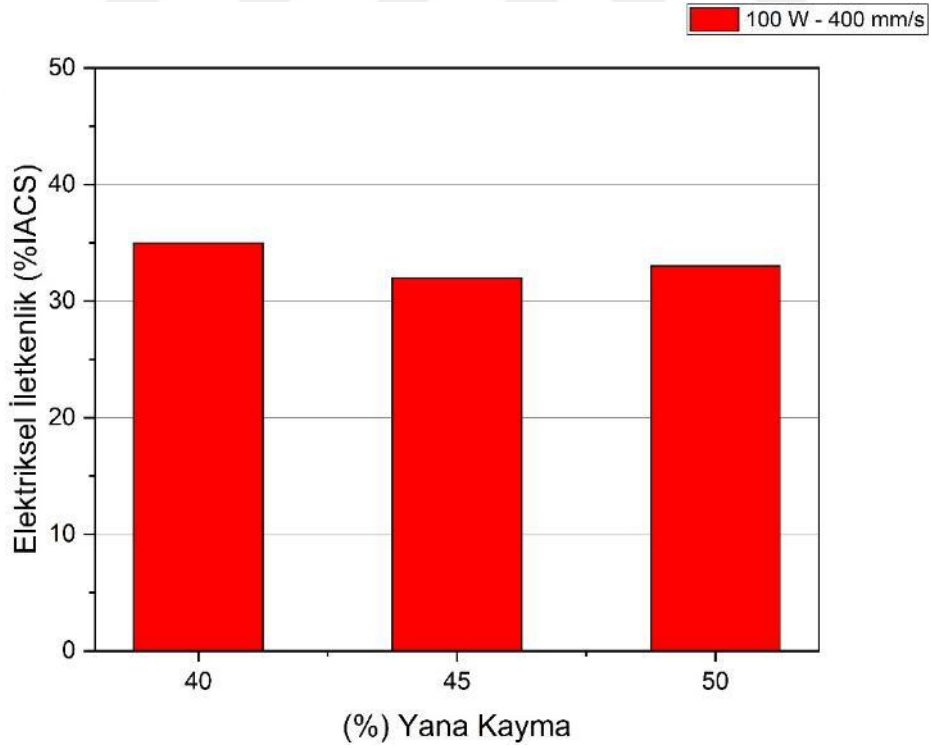
Şekil 58, 59 ve 60'ta sırasıyla SLE ile üretilmiş kontak malzemelerin elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir.



Şekil 58. 100 W-250 mm/s Elektriksel iletkenlik sonuçları.



Şekil 59. 100W-300mm/s Elektriksel iletkenlik sonuçları.



Şekil 60. 100W-400mm/s Elektriksel iletkenliği sonuçları.

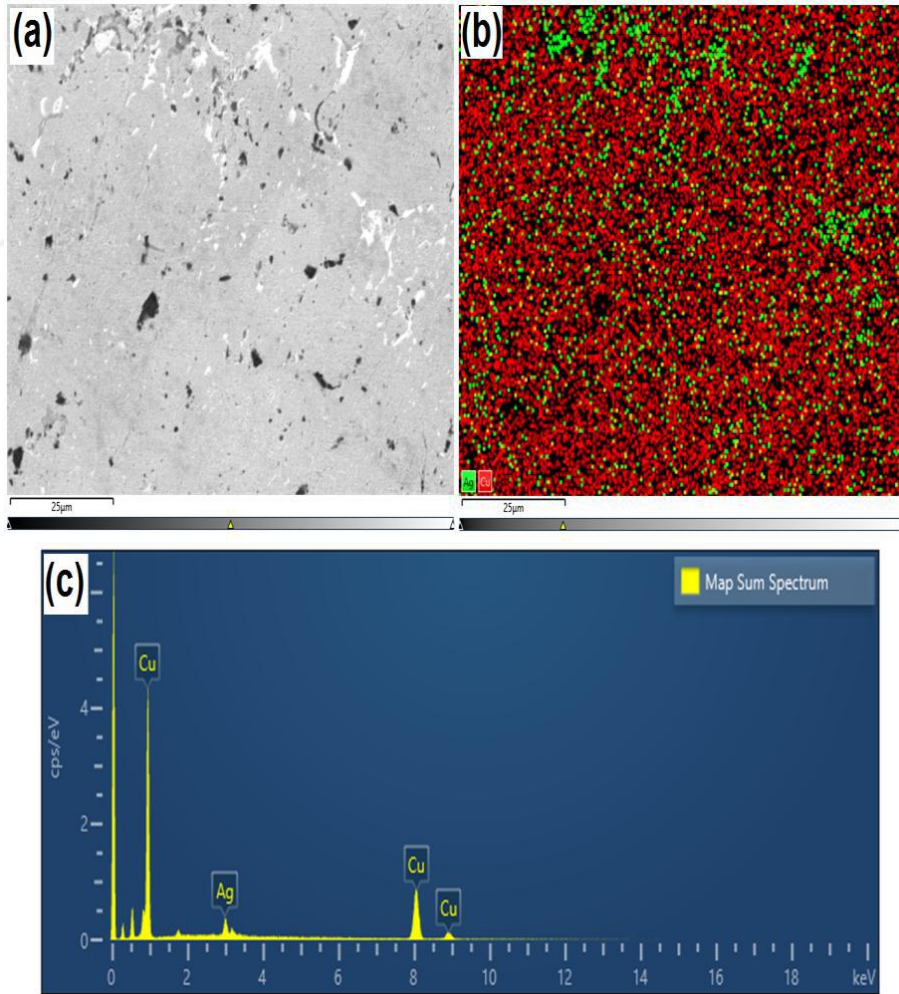
3.11. SLE Ürünlerinin Üretim Sonrası Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Geliştirme Çalışmaları

I. Sinterleme Bulguları

SLE numunelerinin sinterleme sonrası elde edilen sonuçları Tablo 13’de, numuneye ait SEM ve elementsel analiz görüntüleri Şekil 61’de verilmiştir.

Tablo 13. SLE numuneleri sinterleme sonrası deney sonuçları.

Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)	İletkenlik (% IACS)	Termal İletkenlik (W/mK)	Oksidasyon Direnci (% Ağırlık)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Brinell)
825	120	78	220	0.43	149	8,11	38



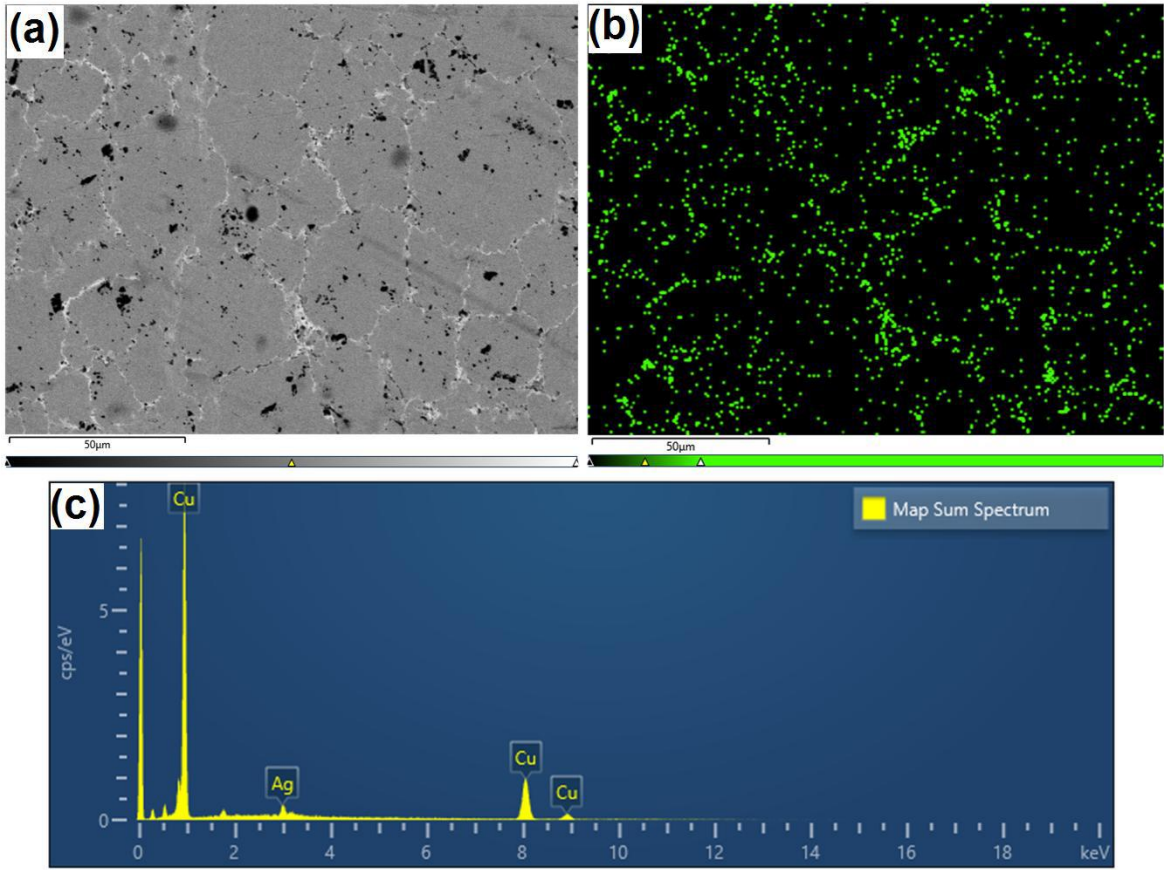
Şekil 61. Sinterleme sonrası SLE analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.

II. Sıcak Pres Bulguları

SLE numunelerinin sıcak pres sonrası elde edilen sonuçları Tablo 14'te, numuneye ait SEM ve elementsel analiz görüntüleri Şekil 62'de verilmiştir.

Tablo 14. SLE numunelerinin sıcak pres parametreleri ve deney sonuçları.

Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	İletkenlik (% IACS)	Termal İletkenlik (W/mK)	Oksidasyon Direnci (% Ağırlık)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Brinell)
500	600	88	250	0,34	185	8,5	70



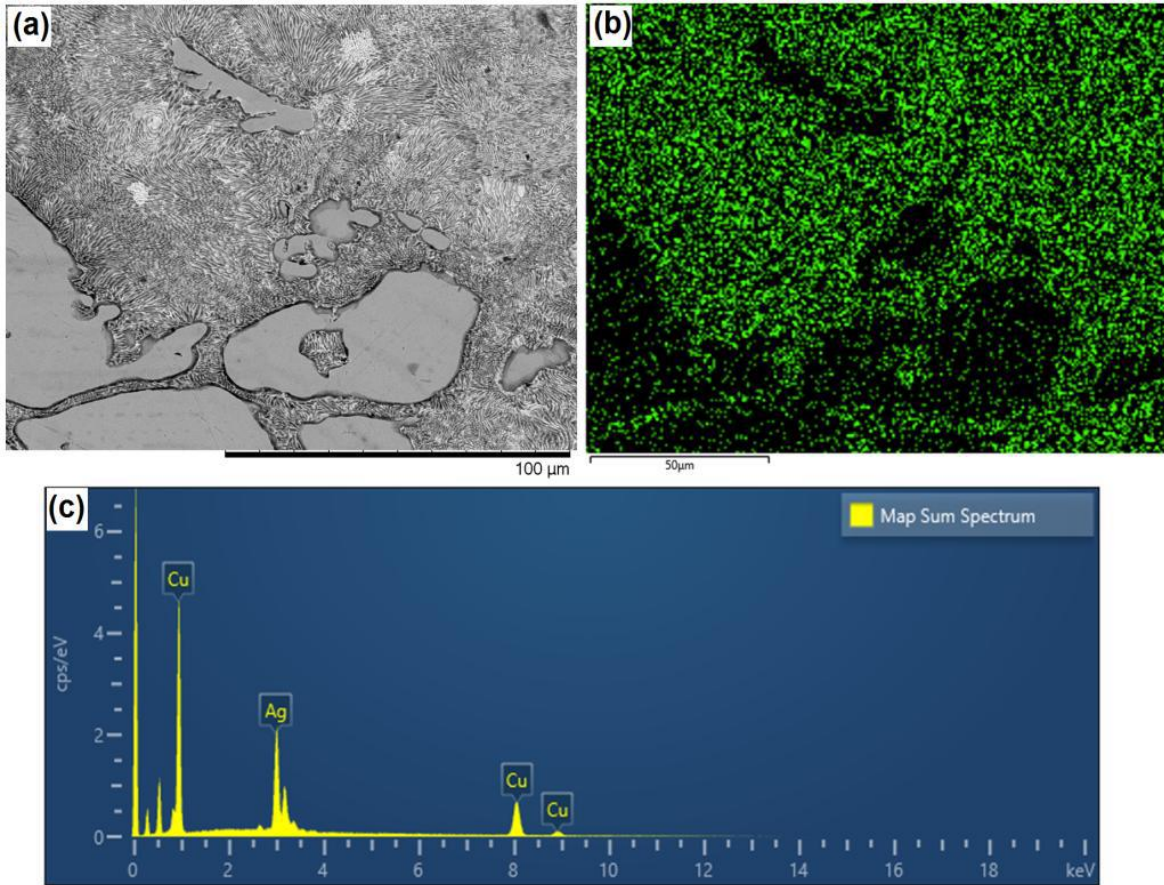
Şekil 62. Sıcak pres sonrası SLE numunesi analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.

III. Sıcak Haddeleme Bulguları

SLE numunelerinin sıcak haddeleme sonrası elde edilen sonuçları Tablo 15’de, numuneye ait SEM ve elementel analiz görüntüleri Şekil 63’de verilmiştir.

Tablo 15. SLE numunelerinin sıcak haddeleme parametreleri ve deney sonuçları.

Sıcaklık (°C)	Paso Sayısı	İletkenlik (% IACS)	Termal İletkenlik (W/mK)	Oksidasyon Direnci (% Ağ.)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Brinell)
825	5	77	225	0,41	141	8,44	80

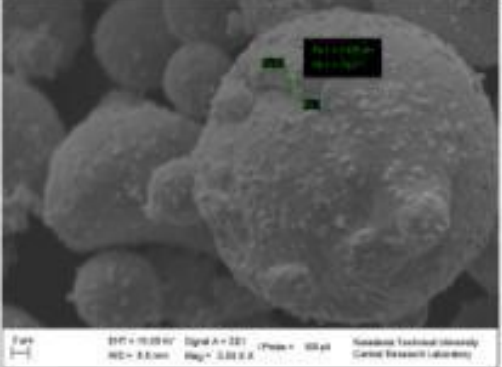
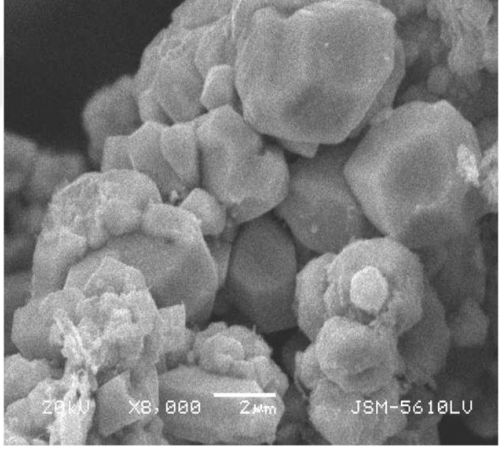
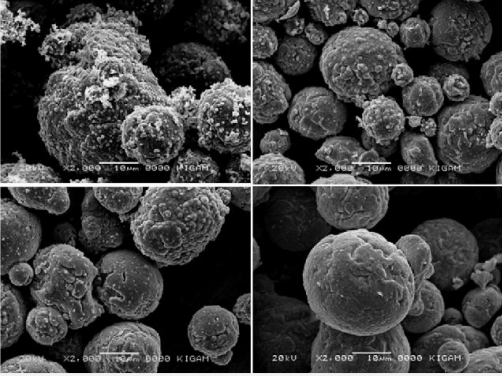


Şekil 63. Sıcak Haddeleme sonrası SLE numunesi analizleri, a) SEM görüntüsü, b) Element Analizi, c) Spektral Analiz.

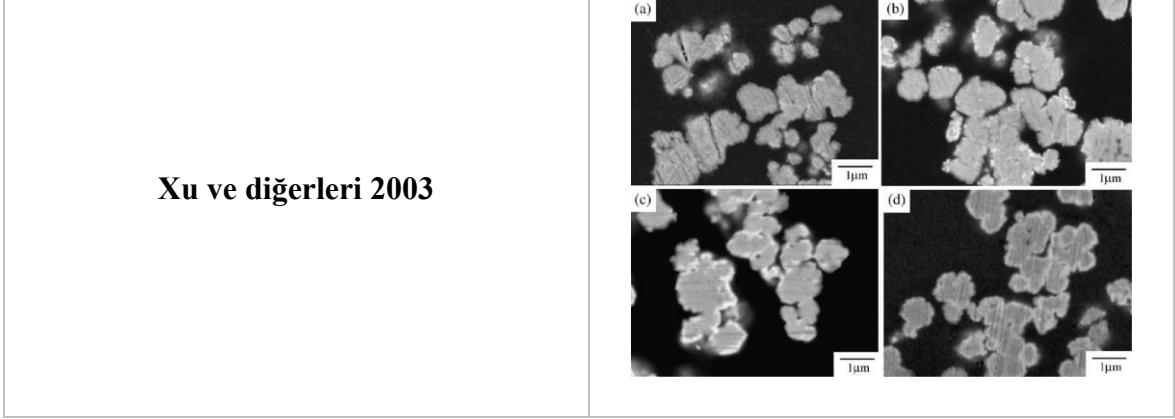
4. TARTIŞMA

Tablo 16’da Deneysel-1 sonucunda üretilen Gümüş kaplı Bakır parçacıklarına ait morfoloji resmi ile diğer araştırmacılar tarafından üretilen gümüş kaplı bakır parçacıklarına ait morfoloji resimleri karşılatılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 16. Gümüş kaplı bakır parçacıklara ait karşılatırmalı morfoloji görüntüleri [56-58].

<p>Deneysel-1</p>	
<p>Chao ve Zhang 2012</p>	
<p>Hai ve diğerleri 2006</p>	

Tablo 16'nın devamı.



Tablo 16'ya göre proje kapsamında Deney-1'de elde edilen morfoloji resmi ile diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara ait morfoloji resimleri ile karşılaştırıldığında kaplama tabakası sentezi bakımından mevcut literatür çalışmalarına göre oldukça iyi sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır [56-58]. Tablo 16'da verilen deney sonuçlarına göre akımsız Gümüş kaplama işlemlerinde Gümüş kaynağı olarak kullanılan $AgNO_3$ oranının reaksiyon hızını doğrudan etkilediği açıkça görülmüştür. Bu durumun kaplama işlemlerinde çekirdek olarak kullanılan Bakır tozlarının morfolojisine ve yüzey özelliklerine bağlı olarak kaplama kalınlığına ve kaplama tabakasının homojenliğine (çekirdek yüzeyi boyunca homojen dağılımı) direkt etki ettiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda homojen Gümüş kaplamanın Seçici Lazer Ergitme (SLE) işleminin verimini arttırabileceği anlaşılmıştır. Bu bağlamda, tez kapsamında Deney-1'de elde edilen kaplama kalınlığının SLE üretimi için uygun olduğu, SLE işlemi sonucunda üretilecek iletken malzemelerde elektriksel iletkenliğinin en temel malzeme özelliklerinden biri olması, tez kapsamında Deney-1'de elde edilen akımsız Gümüş kaplanmış Bakır tozlarının kullanılmasının özgün sonuçlar ortaya çıkaracağı anlaşılmıştır.

Literatür çalışmaların bir bölümünde SLE ile üretilen numuneler hiçbir işleme tabi tutulmadan, üretildiği şekli ile çekme testine tabi tutulmuştur [59,60]. Bazı çalışmalarda ise SLE yöntemi ile dikdörtgen prizma formunda büyük bir stok parça üretildikten sonra, EDM (Electrical Discharge Machining) metoduyla çekme numunelerinin nihai şeklini alması sağlanmıştır [61,62]. Çalışmalar kapsamında, üretilen çekme numuneleri ilave bir talaşlı imalat operasyonuna tabi tutulmadan, doğrudan çekme testi uygulanması tercih edilmiştir. Farklı lazer üretim parametrelerinin, numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini

tam olarak tespit edebilmek için böyle bir tercih yapılmıştır. Ayrıca literatürde eklemeli imalat ile ilgili genel bir yaklaşım olarak, optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi ile ikincil işlemlerin olabildiğince azaltılması yönünde bir eğilim bulunmaktadır. Özellikle SLE yöntemi gibi katmanlı üretim yöntemlerinde genel konsept olarak, üretimin neredeyse son geometriyi vermesi ile atık miktarının azaltılması ve talaşlı imalatı zor alaşımların üretim zorluklarının üstesinden gelinmesi hedeflenmektedir. Ayrıca literatürde diğer yöntem olarak tercih edilen, büyük bir stok parçadan geleneksel yöntemlerle numune elde edilmesindeki problemlerden birisi de SLE prosesi aşamasında parçanın hedeflenen ölçülerden büyük olarak üretilmesi durumunda, üretilen yapıya olan ısı birikiminin değişmesi ve buna bağlı olarak yapıya aktarılan enerjinin mikro yapı üzerindeki etkilerinin de sürece dahil olması söz konusudur. Bu durum neticesinde mekanik özellikler doğru bir şekilde belirlenemeyecektir.

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, akımsız kaplama işlemi ile bakır parçacıkları gümüş kaplanmış ve daha sonra bu parçacıklar SLE yöntemiyle iletken malzemelere dönüştürülmüştür. Lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı gibi SLE parametrelerinin çekirdek-kabuk parçacıklarından üretilen kompaktların mikro yapısı, yoğunluğu ve elektriksel iletkenliği gibi önemli özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma, bakır-gümüş esaslı malzemelerin SLE yöntemi ile üretiminde kullanılan parametrelerin, kompaktların özelliklerini doğrudan etkilediği gerçeğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

i. Bu çalışma kapsamına kullanılan akımsız kaplama parametreleri ile 2-5 mikrometre kaplama tabakası kalınlığına sahip gümüş kaplı bakır partiküllerin üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

ii. Saf Bakır tozlar oksidasyon direnci deneyi sonrasında yaklaşık %15 bağıl kütle artışı gösterirken, Gümüş kaplı Bakır tozlar yaklaşık %10 bağıl kütle artışı sergilemişlerdir. Bu sonuç oksidasyon direnci Bakır ile kıyaslandığında daha yüksek olan Gümüş'ün düşük kaplama kalınlıklarında dahi kompozit yapının oksidasyon direncini arttırdığını ortaya koymaktadır.

iii. 800 mm/s tarama hızından sonra numune yüzeylerinde topaklanma etkisinin (balling effect) belirginleştiği görülmektedir. SLE yönteminde, uygun olmayan üretim parametreleri sebebiyle meydana gelen aşırı ısınma ve oksitlenme sonucu oluşan metal oksidi, katı metalden daha düşük yüzey serbest enerjisine sahip olmaktadır. Bu durum yüzey temas açısının artmasına, oluşan oksidin metal yüzeyini ıslatamaması sonucu topaklanma etkisi olarak bilinen yüzey kusuruna ve yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır. Tabakalar arasında oluşan bu yüzey kusuru, katmanlar arasında kalarak içyapı kusurlarının oluşumu ile üretilen parçanın özellikle mekanik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. 800 mm/s tarama hızından sonra, toz partiküllerinin birbirine tam olarak bağlanamadığı ve numunelerdeki bütünlüğün bozulduğu gözlemlenmiştir.

iv. 700 ve 800 mm/s tarama hızlarında gerçekleştirilen üretimlerde doluluk oranları oldukça düşüktür. Tüm numuneler arasında en yüksek doluluk oranının 100 W güç, 400 mm/s tarama hızı ve %45'lik yana kayma değerlerinin kullanıldığı numunede yaklaşık %99 olarak belirlenmiştir.

v. 250 mm/s tarama hızı ile üretilen numunelerin iletkenlik değerleri yüksektir. Ön maruziyet stratejisi uygulanmış numuneler arasında en yüksek elektriksel iletkenlik ve (%) doluluk oranı %45 yana kayma değeri ile üretilen numune için %48 IACS ve %99,59 olarak elde edilmiştir. Elektriksel iletkenlik sonuçları yoğunluk değerleri (image density) ile uyumlu olarak bulunmuştur. Beklendiği gibi en yüksek yoğunluk değerine sahip üretim parametreleri için en yüksek elektriksel iletkenlik değerleri elde edilmiştir.

vi. En yüksek çekme gerilmesi değerleri birbirine oldukça yakın olmakla birlikte 250 mm/s tarama hızı ve %40-45 yana kayma değerlerinde 75-78 MPa elde edilmiştir. % uzama miktarı dikkate alındığında ise 250 mm/s tarama hızı ve %45 yana kayma miktarında %1,7 olarak ölçülmüş ve en yüksek uzama değerinin elde edildiği görülmektedir. En iyi uzama miktarının elde edildiği yana kayma değeri altındaki değerlerde uzama değerinin oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum aşırı enerji girdisi ile yapıda oluşan gaz boşluklarından kaynaklanmaktadır.

vii. İnşa oryantasyonunun, üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üretim tablasına yatay olarak konumlandırılmış numunelerde (250-40yty ve 250-45yty) çekme dayanımları 114-115 MPa olarak elde edilmiş ve üretim tablasına dik olarak üretilmiş numunelerden belirgin şekilde yüksek olarak elde edilmiştir. Benzer sonuçlar % uzama değerleri için de tespit edilmiş olup, en yüksek % uzama değerleri 250 mm/s tarama hızı, %40-45 yana kayma değerlerinde 2,15-2,25 olarak yatay olarak üretilen numunelerde tespit edilmiştir. Yatay olarak üretilen numunelerde toplam katman sayısının, dik olarak üretilen numunelere kıyasla oldukça düşük olması sebebiyle yapıdaki toplam ısı girdisi önemli oranda azalmış ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmiştir.

viii. 250-45yty numunesindeki boşluk miktarının diğer numunelere oranla daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sonucu olarak 250 mm/s tarama hızı ve %45 yana kayma değeri ile üretim tablasına yatay olarak konumlandırılmış numunede daha yüksek gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. Kırılma yüzeylerinde görülen boşlukların bir sonucu olarak numuneler gevrek karakterde kırılma hasarına uğramışlardır. Daha yüksek büyütme oranları ile verilen kırılma görüntülerinde sünek kırılmanın bir belirtisi olan oyukların (dimples) düşük miktarda oluştuğu dikkat çekmektedir. Yaklaşık olarak %2,25 uzama değeri ile en yüksek uzama değerine sahip olan 250-45yty numunesinde dimples miktarının diğer numunelere oranla görece yüksek olduğu görülmektedir.

ix. Yapılan çalışmalarda SLE ile üretilen kontak numunelerinin elektriksel iletkenlikleri %48 IACS olarak ölçülmüştür. Elektrik kontak malzemeleri için gerekli olan elektriksel

iletkenlik aralığı dikkate alındığında %48 IACS değeri kullanılabilir seviyededir. SLE yöntemi ile üretilen elektrik kontak malzemelerinin termal iletkenlik değerleri incelendiğinde saf bakır için bu değer 81 W/mK, gümüş kaplı bakır içinse 137 W/mK olduğu belirlenmiştir. Sinterleme sonrası elektriksel iletkenlik değeri %78 IACS, çekme dayanımı 149 MPa, yoğunluk 8,11 g/cm³, termal iletkenlik 220 W/mK, oksidasyon direncinde ise % ağırlık kazanımı 0,43 olarak elde edilmiştir. Sıcak presleme sonrası elektriksel iletkenlik %88 IACS, çekme dayanımı 185 MPa, yoğunluk 8,5 g/cm³, termal iletkenlik 250 W/mK, oksidasyon direnci (%ağırlık) 0,34 olarak elde edilmiştir. Sıcak haddeleme sonrası elektriksel iletkenlik %77 IACS, çekme dayanımı 141 MPa, yoğunluk 8,44 g/cm³, termal iletkenlik 225 W/mK, oksidasyon direnci (% ağırlık) 0,41 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlarla birlikte başta elektriksel iletkenliği geliştirmek takibinde diğer fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmek için yapılan sinterleme, sıcak presleme ve sıcak haddeleme işlemlerinin SLE ürünleri için uygun olduğu ve bu işlemlerle beraber fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilebildiği sonucuna varılmıştır.

6. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında akımsız gümüş kaplanmış bakır tozlarından, SLE yöntemi ile elektrik kontak malzemesi üretimi üzerine kapsamlı bir araştırma yapılmış ve aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- i. Farklı boyutlardaki bakır tozları akımsız kaplama ile gümüş ve parçacık boyutunun SLE yöntemi ile elektrik kontak malzemesi özelliklerine etkileri araştırılabilir.
- ii. Tekrarlı akımsız kaplama uygulanarak kaplama kalınlığı artırılabilir ve kaplama kalınlığının SLE yöntemi ile elektrik kontak malzemesi özelliklerine etkileri araştırılabilir.
- iii. Farklı morfolojide tozlar sentezlenerek matris tozu morfolojisinin SLE yöntemi ile elektrik kontak malzemesi özelliklerine etkileri araştırılabilir.

7. KAYNAKÇA

1. <https://www.britannica.com/science/copper> Britannica, T. Editors of Encyclopaedia 1 Kasım 2021
2. Varol T, Güler O, Akçay SB, ve Aksa HC. The effect of silver coated copper particle content on the properties of novel Cu-Ag alloys prepared by hot pressing method. Powder Technology 384: (2021) 236–246.
3. Duan J, Yuan S, Zhu C, Chen Z, Zhang G, Duan H, Li L ve Zhu Z. One-step synthesis of ZnO/N-doped carbon/Cu composites for high-performance lithium ion batteries anodes. Synthetic Metals 226: (2017) 39–45.
4. Güler O, Varol T, Alver Ü ve Canakci A. Effect of Al₂O₃ content and milling time on the properties of silver coated Cu matrix composites fabricated by electroless plating and hot pressing. Materials Today Communications 24: (2020) 101153.
5. <https://material-properties.org/copper-mechanical-properties-strength-hardness-crystal-structure/> Copper – Strength – Hardness – Elasticity – Crystal Structure, 1 Kasım 2021
6. Davis D. J.R. ASM Specialty Handbook, Copper and Copper Alloys. ASM Handbook s 133. Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.
7. Li M ve Zinkle SJ. Physical and mechanical properties of copper and copper alloys. Comprehensive Nuclear Materials (C. 4), Elsevier, (2012) ss667–690.
8. D. J.R. Davis. ASM Specialty Handbook, Copper and Copper Alloys. ASM Handbook s 133. Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. (2001).
9. Jain P. The Effects of Copper Addition on the compression behavior of Al-Ca Alloy. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering 9: (2013) 29–41.
10. <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/copper/application.shtml> Copper: uses, 1 Kasım 2021
11. Anonim. Electrical Contact Materials. Sel of Mater for Serv Environ (Source Book Series) Boston, MA: Springer US, ss 424–429.
12. Zhai C, Hanaor D, Proust G ve Gan Y. Stress-Dependent Electrical Contact Resistance at Fractal Rough Surfaces. Journal of Engineering Mechanics 143 (2017)
13. https://www.globalspec.com/learnmore/materials_chemicals_adhesives/electrical_optical_specialty_materials/electrical_contact_electrode_materials/electrical_contacts_contact_materials. G. Engineering360, “Electrical Contacts Information.” 1 Kasım 2021

14. Daves W, Krauss A, Häublein V, Bauer AJ ve Frey L. Structural and Reliability Analysis of Ohmic Contacts to SiC with a Stable Protective Coating for Harsh Environment Applications. ECS Journal of Solid State Science and Technology 1: (2012) P23–P29.
15. Zhai C, Hanaor D, Proust G, Brassart L ve Gan Y. Interfacial electro-mechanical behaviour at rough surfaces. Extreme Mechanics Letters 9: (2016) 422–429.
16. Ott R. Thermal and electrical resistance of metal contacts Portland, OR. (1967).
17. Arblaster J. W, Arc erosion of electrical contacts. Platinum Metals Rev 1: (1957) 57.
18. Pons F. Electrical Contact Material Arc Erosion: Experiments and Modeling towards the design of an AgCdO substitute. Georgia Institute of Technology Georgia Institute of Technology, (2010).
19. Slade PG. Opening electrical contacts: The transition from the molten metal bridge to the electric arc. IEICE Transactions on Electronics E93-C: (2010) 1380–1386.
20. Shea JJ. “High Current AC Break Arc Contact Erosion”. Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts IEEE, (2008) ss xxii–xlvi.
21. Stevens AJ. “Powder-Metallurgy Solutions to Electrical-Contact Problems”. Powder Metallurgy 17: (1974) 331–346.
22. Varol T. Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu Karadeniz Teknik Üniversitesi, (2016).
23. Kohlrausch F. Ueber den stationären Temperaturzustand eines elektrisch geheizten Leiters. Annalen der Physik 306: (1900) 132–158.
24. Utsumi T. Theoretical and Experimental Investigations of the Dynamic Molten Bridge. IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging 5: (1969) 62–68.
25. Ren W, Wang H, Chang C, Xue S ve Chen Y. Experimental Investigation and Understanding of the Intermittent Molten Bridge Phenomena and Mechanism of Contacts with Superlow Opening Speed. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 6: (2016) 418–423.
26. Mallory G. O. ve Hajdu J. B. Electroless Plating: Fundamentals And Applications. Orlando, Fla : American Electroplaters and Surface Finishers Society, (1990).
27. Shipley CR. Historical Highlights of Electroless Plating. NASF Surface Technology White Papers 82: (2018) 13–24.
28. Sharma A, Cheon C-S, Jung JP. Recent Progress in Electroless Plating of Copper. Journal of the Microelectronics and Packaging Society 23: (2016) 1–6.

29. Schlesinger M, Paunovic M. *Modern Electroplating: Fifth Edition*. (M. Schlesinger & M. Paunovic, editörler) Modern Electroplating: Fifth Edition Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. (2011).
30. <https://www.britannica.com/science/silver-nitrate> Silver nitrate | chemical compound | Britannica (y.y.). 2 Kasım 2021.
31. Patnaik P. Handbook of inorganic chemicals (C. 40), United States: McGraw-Hill Education-Europe. (2003).
32. Kassaian J-M. Tartaric Acid. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. (2000).
33. Agarwala RC, Agarwala V (y.y.). Electroless alloy/composite coatings: A review. *S adhan a* 28: 475–493.
34. Hai HT, Ahn JG, Kim DJ, Lee JR, Chung HS ve Kim CO. “Developing Process For Coating Copper Particles With Silver by Electroless Plating Method”. Surface and Coatings Technology 201: (2006) 3788–3792.
35. Ashley S. Rapid Prototyping Systems. Mechanical Engineering-CIME April: (1991) 34–43.
36. Cooper K. Rapid Prototyping Technology CRC Press. (2001).
37. Noorani R. Rapid Prototyping, Principles and Applications. Assembly Automation 30. (2010).
38. Udriou, Razvan. Powder Bed Additive Manufacturing Systems and Its Applications. Academic Journal of Manufacturing Engineering 10. (2012). 122-129.
39. Levy, G.N., Schindel, R., ve Kruth, J.P. Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing Technologies, state of the art and Future Perspective: Annals of the CIRP 52/2, (2003) 589- 609
40. A. Kochan, “Rapid growth for rapid prototyping,” Assembly Automation, vol. 17, no. 3, (1997) pp. 215–217.
41. Alcisto J., Enriquez A., Garcia H., Hinkson S., Steelman T., Silverman E., Valdovino P., Gigerenzer H., Foyos J., Ogren J., Dorey J., Karg K., McDonald T., ve Es-Said O.S., Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V, JMEP, 20(2), (2011) p 203–212.
42. Frazier W.E., Metal Additive Manufacturing: A Review, ASTM International 2018
43. ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015). ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012),

44. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/> Gibson (2010). Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. 2 Kasım 2021.
45. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/additive-manufacturing-processes/> Additive Manufacturing & 3D Printing Processes | GE Additive. 2 Kasım 2021.
46. EOS. Material data sheet. EOS CobaltChrome MP1 for EOSINT M 270, EOS GmbH - Electro Optical Systems, (2010) pp.1-6.
47. Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE ve Sing SL. DMLS - Direct Metal Laser Sintering. Applied Physics Reviews (C. 2) (2015).
48. Aboulkhair NT, Simonelli M, Parry L, Ashcroft I, Tuck C ve Hague R. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. Progress in Materials Science 106: (2019) 100578.
49. Tan C, Zhou K, Ma W, Attard B, Zhang P ve Kuang T. Selective laser melting of high-performance pure tungsten: parameter design, densification behavior and mechanical properties. Science and Technology of Advanced Materials 19: (2018) 370–380.
50. Panwisawas C, Tang YT ve Reed RC. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. Nature Communications 11: (2020) 2327.
51. Szemkus S, Kempf B, Jahn S, Wiehl G, Heringhaus F ve Rettenmayr M. Laser additive manufacturing of contact materials. Journal of Materials Processing Technology 252: (2018) 612–617.
52. Chang SY, Lin JH, Lin SJ ve Kattamis TZ. Processing copper and silver matrix composites by electroless plating and hot pressing. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science 30: (1999) 1119–1136.
53. Zhang Y, Song B, Zhao X ve Shi Y. Microstructure and properties of Ag/SnO₂ functional material manufactured by selective laser melting. Nano Materials Science 1: (2019) 208–214.
54. Varol T, Hacısalihoğlu İ, Kaya G, Güler O, Yıldız F, Aksa HC ve Akçay SB. The Effect of Selective Laser Melting Process on the Microstructure, Density, and Electrical Conductivity of Silver-Coated Copper Cores. Journal of Materials Engineering and Performance 30: (2021) 5216–5226.
55. Margolin H. Constitution of Binary Alloys. Journal of the American Chemical Society (C. 81) (1959).
56. Cao XG ve Zhang HY. Preparation of silver-coated copper powder and its oxidation resistance research. Powder Technology 226: (2012) 53–56.

57. Hai HT, Ahn JG, Kim DJ, Lee JR, Chung HS ve Kim CO. Developing process for coating copper particles with silver by electroless plating method. Surface and Coatings Technology 201: (2006) 3788–3792.
58. Xu X, Luo X, Zhuang H, Li W ve Zhang B. Electroless silver coating on fine copper powder and its effects on oxidation resistance. Materials Letters 57: (2003) 3987–3991.
59. Shakirov I, Zhukov A, Kuznetsov P, Bobyr V, Fedina T ve Korznikov O. Investigation of Physical and Mechanical Properties of Samples Grown by Selective Laser Melting of Iron Powder. Materials Today: Proceedings 11: (2019) 95–100.
60. Hacisalihoğlu İ, Yildiz F, Çelik A. Experimental and Numerical Investigation of Mechanical Properties of Different Lattice Structures Manufactured from Medical Titanium Alloy by Using Laser Beam-Powder Bed Fusion. Journal of Materials Engineering and Performance 30: (2021) 5466–5476.
61. Lin C, Li J, Liang S, Zhang Y, Gou J, Liu J ve Li Y. Improving the precision of micro-EDM for blind holes in titanium alloy by fixed reference axial compensation. Reviews on Advanced Materials Science 60: (2021) 771–783.
62. Wang Q, Zhang L, Xu X, Yu X, Zheng Y, Wangping W. Design and mechanical failure analysis of Ti6Al4V alloy thin-walled parts by selective laser melting(SLM) manufacture. Journal of Physics: Conference Series 1827: (2021) 012114.

ÖZGEÇMİŞ

2011 yılında Ali Osman Sönmez Teknik lisesi Bilgisayarlı Makine İmalatı Bölümü'nden mezun oldu. 2012 yılında Uludağ Üniversitesi Asım Kocabıyık Meslek Yüksek Okulu Makine Teknolojisi programını tamamladı. Dikey Geçiş Sınavı ile 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğini kazanarak 2019 yılında lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2019 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2019-2021 yılları arasında sunulmuş olan 6 adet bildirisi ile 2 adet uluslararası ve 1 adet ulusal makalesi bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

