

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALİK BRONZ MALZEMELERİN
EKLEMELİ İMALATI VE
KARAKTERİZASYONU

Ahmet Çağrı KILINÇ

Ağustos, 2022
İZMİR

METALİK BRONZ MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALATI VE KARAKTERİZASYONU

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ahmet Çağrı KILINÇ

Ağustos, 2022

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AHMET ÇAĞRI KILINÇ, tarafından PROF. DR. ALİ AYDIN GÖKTAŞ yönetiminde hazırlanan “METALİK BRONZ MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALATI VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali Aydın GÖKTAŞ

Yönetici

Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Esra DOKUMACI ALKAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Osman ÇULHA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Kutlay SEVER

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca her zaman desteğiyle yanımda olan ve değerli yorumlarıyla çalışmayı şekillendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali Aydın GÖKTAŞ'a ve tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ ve Doç. Dr. Esra DOKUMACI ALKAN'a yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Tüm süreçte yardımcı olan Serhan KÖKTAŞ, Özgür Yasin KESKİN ve Metehan ATAGÜR'e teşekkür ederim. Analizler konusunda desteklerini esirgemeyen Doç. Erkan GÜLER ve Dalyan ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Son olarak bütün süreçte beni yalnız bırakmayan ve desteklerini hiç esirgemeyen aileme ve eşim Fidan BİLİR KILINÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 218M809 numaralı proje ile finansal olarak desteklenmiştir.

Ahmet Çağrı KILINÇ

METALİK BRONZ MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALATI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZ

Eklemeli imalat artık hayatımızın içine girmiş ve ulaşılabilir bir teknoloji haline gelmiştir. Polimer parçaların üretimiyle başlayan eklemeli imalat, yüksek enerjili lazer kaynaklarının kullanımı sayesinde metal parça üretimine olanak sağlamıştır. Günümüzde eklemeli yöntem ile metal parça üretiminde kullanılan en yaygın yöntem seçici lazer sinterlemedir. Fakat bu yöntemin en büyük dezavantajı, oldukça pahalı olan yüksek enerjili lazer kaynaklarıdır. Bu nedenle metalik malzemelerin eklemeli imalatı ile ilgili olarak uygun maliyetli üretim teknikleri üzerindeki çalışmalara her geçen gün yenisi eklenmektedir.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasında CuSn10 bronz alaşımının eklemeli üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla geleneksel metal enjeksiyon kalıplama ve eklemeli imalat teknolojilerini birleştiren bir yöntem kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılmak üzere FDM tekniği ile parça üretimi yapan ve polimerik filament kullanan standart bir masaüstü 3 boyutlu yazıcı temin edilmiştir. 3 boyutlu yazıcının ekstrüder kafası, metal tozu içeren polimerik granül karışımı yazdırabilmek amacıyla granül ekstrüder ile değiştirilmiştir. Granül ekstrüder, bu tezin çalışmaları kapsamında tasarlanmış ve üretilmiştir.

Bronz metal tozu ve polimerik bileşenler eriyik olarak karıştırılmış, soğuma sonrasında kırma ve eleme işlemleriyle belirli boyut aralığına sahip granül besleme stoğu elde edilmiştir. Besleme stoğu 3 boyutlu yazıcı kullanılarak şekillendirilmiştir. Yazdırılmış parçaların bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulması ile metalik numune eldesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında metal tozu partikül boyutunun sinterlenmiş metalik numunelerin fiziksel, mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Sonuç olarak; partikül boyutunun küçültülmesine bağlı olarak porozitenin azaldığı, aşınma ve mekanik özelliklerin geliştiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, bronz, eriyik yığıma modelleme, sinterleme, mekanik özellikler.



ADDITIVE MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF METALLIC BRONZE MATERIALS

ABSTRACT

Additive manufacturing has now entered our lives and has become an accessible technology. Additive manufacturing, which started with the production of polymer parts, enabled the production of metal parts thanks to the use of high-energy laser sources. Nowadays the most common method used in the production of metal parts by the additive method is selective laser sintering. However, the biggest disadvantage of this method is the high energy laser sources, which are quite expensive. Therefore, studies on cost-effective production techniques related to the additive manufacturing of metallic materials are being added each passing day.

For this context, in this thesis study, additive manufacturing of CuSn10 bronze alloy was investigated. For this purpose, a method combining traditional metal injection molding and additive manufacturing technologies was used. A standard desktop 3D printer, which produces parts by FDM technique and uses polymeric filaments, was provided to be used within the scope of the study. The extruder head of the 3D printer was replaced by a granule extruder in order to print a polymeric granule mixture containing metal powder. Granule extruder was designed and produced within the scope of this thesis studies.

Bronze metal powder and polymeric components were melt mixed, and by crushing and sieving processes after cooling, granule feedstock with a certain size range was obtained. The feedstock was shaped using a 3D printer. Metallic samples were obtained by subjecting the printed parts to debinding and sintering processes.

Within the scope of the study, the effect of metal powder particle size on the physical, mechanical and wear properties of sintered metallic samples was investigated.

As a result; depending on particle size reduction, decreased porosity, improved wear and mechanical properties were observed.

Keywords: Additive manufacturing, bronze, fused deposition modelling, sintering, mechanical properties.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xvi

BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
-------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - TEORİK ALTYAPI	4
---	----------

2.1 Eklemeli İmalat	4
2.2 Eklemeli İmalat Avantajları	5
2.3 Eklemeli İmalat Pazar Büyüklüğü.....	7
2.4 Metal Eklemeli İmalat	9
2.5 Metal Eklemeli İmalat Kullanım Alanları	10
2.5.1 Otomotiv	11
2.5.2 Uzay ve Havacılık.....	14
2.5.3 Medikal ve Dental.....	16
2.5.4 Elektronik ve Haberleşme	18
2.5.5 Diğer Alanlar	20
2.6 Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	23
2.6.1 Toz Yataklı Birleştirme.....	25
2.6.2 Doğrudan Enerji Biriktirme	26
2.6.3 Fotopolimerizasyon.....	27
2.6.4 Bağlayıcı Püskürtme	29
2.6.5 Malzeme Püskürtme.....	30
2.6.6 Sac/Levha Laminasyon	31
2.6.7 Malzeme Ekstrüzyon	32
2.6.8 Diğer yöntemler	34

BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 38

3.1 Malzemeler	38
3.2 Besleme Stoğunun Hazırlanması.....	38
3.3 Granül Ekstrüder İmalatı	39
3.4 Ekstrüzyon Kalibrasyonu	41
3.5 Yazdırma İşlemleri	41
3.6 Bağlayıcı Giderme İşlemleri	42
3.7 Sinterleme İşlemleri	42
3.8 Partikül Boyutu Etkisi	44
3.9 Döküm İşlemleri.....	44
3.10 Karakterizasyon.....	45
3.10.1 Partikül Boyut Ölçümleri.....	45
3.10.2 Viskozite Ölçümleri	45
3.10.3 Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analizler (TGA/DTA) ..	46
3.10.4 X-ışınları Kırınımı (XRD)	46
3.10.5 Morfolojik İncelemeler	47
3.10.6 Mikroyapı İncelemeleri ve Porozite Ölçümleri	47
3.10.7 Yoğunluk Ölçümleri	48
3.10.8 Mekanik Özellikler	48
3.10.9 Aşınma Davranışı.....	49

BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA..... 50

4.1 Granül Ekstrüder İmalatı	50
4.2 Toz Karakterizasyonu.....	51
4.3 Besleme Stoğu Karakterizasyonu.....	53
4.4 Ekstrüzyon Kalibrasyonu	56
4.5 Yazdırma Optimizasyonu	57
4.6 Bağlayıcı Giderme İşlemleri	63
4.7 Sinterleme İşlemleri	66

4.8 Toz Boyutu Etkisi.....	76
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
5.1 Genel Sonuçlar	87
5.2 Öneriler.....	88
KAYNAKLAR.....	89



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 a) Eİ pazarı içerisinde ülkelerin sahip oldukları pay oranları, b) Yıllara göre Eİ pazar büyüklüğü	8
Şekil 2.2 Eİ teknolojilerinin tarihsel gelişimi	10
Şekil 2.3 Eİ teknolojilerinin kullanım alanlarına göre dağılımı.....	11
Şekil 2.4 Ses desenine özel üretilmiş bijon ve bijon anahtarı	12
Şekil 2.5 Metal Eİ teknolojisi ile üretilmiş a) Fren pedalları, b) aks mafsalı, c) açılır tavan bileşeni ve d) fren kaliperi.....	13
Şekil 2.6 Eİ ile üretilmiş a) yakıt nozulü, b) Turboprop motoru, c) jet kanat braket ve d) motor kapak menteşesi	14
Şekil 2.7 Hasta çene röntgeni, Eİ implant ve yerleştirilmesi	17
Şekil 2.8 Mikro cerrahi alet.....	17
Şekil 2.9 Metal stentler	17
Şekil 2.10 RF anten	17
Şekil 2.11 Esnek sensörler	20
Şekil 2.12 Eİ takılar.....	20
Şekil 2.13 Eİ ile üretilmiş a) köprü ve b) yapı bağlantı elemanı.....	21
Şekil 2.14 Eİ pervane kanatları	22
Şekil 2.15 Eİ ile üretilmiş çeşitli bobin, soğutma elemanı ve anahtar parçalar	22
Şekil 2.16 Metal Eİ yöntemlerinin endüstrideki kullanım oranları	23
Şekil 2.17 Metal Eİ üretim yöntemleri.....	24

Şekil 2.18 PBF yöntemi	25
Şekil 2.19 a) Toz ve b) tel beslemeli DED yöntemleri	25
Şekil 2.20 a) Aşağıdan- yukarı ve b) yukarıdan- aşağı fotopolimerizasyon yöntemleri	25
Şekil 2.21 BJ yöntemi	25
Şekil 2.22 Püskürtme kafası ve şematik kesiti	25
Şekil 2.23 Sıvı metal yazdırma yöntemi ile üretilmiş parça görüntüleri.....	31
Şekil 2.24 MEK yöntemi işlem aşamaları	32
Şekil 2.25 ME yöntemi şematik gösterimleri.....	33
Şekil 2.26 SIS yöntemi a) yazdırma işlemi ve b) parçanın çıkarılması	35
Şekil 2.27 a) Seramik tozu ve b) metal tozu depozitleme.....	35
Şekil 3.1 a) Granül ekstrüder parçaları, b) ekstrüder çizimi ve c) ekstrüder montajı	40
Şekil 3.2 3B üretim işlem adımları	43
Şekil 3.3 Dökmüm işlem adımları	44
Şekil 3.4 Partikül boyut dağılım analizi cihazı	45
Şekil 3.5 Kapiler reometre	45
Şekil 3.6 TG/DTA cihazı	46
Şekil 3.7 XRD cihazı.....	46
Şekil 3.8 a) Püskürtümlü kaplama cihazı, b) SEM	47
Şekil 3.9 a) Çekme cihazı, b) çekme numunesi ölçüleri	48
Şekil 3.10 Aşınma test cihazı	49

Şekil 3.11 Profilometre	49
Şekil 4.1 Ekstrüzyon vidası ve bölümleri	51
Şekil 4.2 a) P107, b) P63 ve c) P38 tozlarının SEM görüntüleri	52
Şekil 4.3 a) CuSn10 tozların TG/DTA grafiği, b) Cu-Sn faz diyagramı	53
Şekil 4.4 a) Düşük toz katkısı, b) optimum toz katkısı, c) kritik toz katkısı ve d) yüksek toz katkısı.....	54
Şekil 4.5 a) TGA ve b) DTA eğrileri	55
Şekil 4.6 a) 2, b) 4 ve c) 6 rpm hızlarında depozitlenmiş hat görüntüleri.....	57
Şekil 4.7 a) Soğutma fanı kapalı, b) soğutma fanı açık durumda yazdırılmış numuneler	58
Şekil 4.8 a) 170 °C, b) 190 °C ve c) 210 °C sıcaklıklarda yazdırılmış numuneler....	59
Şekil 4.9 a) %65, b) %60 ve c) %55 dolgu oranlarında yazdırılmış numuneler.....	59
Şekil 4.10 a) 20 mm/s, b) 40 mm/s ve c) 60 mm/s hızlarında yazdırılmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri.....	60
Şekil 4.11 a) 0,2 mm, b) 0,4 mm ve c) 0,6 mm katman kalınlıklarında yazdırılmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri	62
Şekil 4.12 Zamana bağlı wax kaybı değişimi	63
Şekil 4.13 Bağlayıcı giderme işlemi a) başlangıç ve b) çözünme durumu şematik gösterimleri	64
Şekil 4.14 Yazdırılmış numunelerin a) yüzey ve b)kesit, bağlayıcı giderilmiş numunelerin a) yüzey ve b) kesit SEM görüntüleri	65
Şekil 4.15 Yazdırılmış silindirik ve kare prizma numuneler	66

Şekil 4.16 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1 saat (a, b ve c), 5 saat (d, e ve f) ve 10 saat (g, h ve ı) süre ile sinterlenmiş numunelerin kesit görüntüleri ...	67
Şekil 4.17 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1, 5 ve 10 saat sinterlenen numunelerin porozite miktarları	68
Şekil 4.18 900 °C'de sinterlenen numunenin yüzey ve kesit görüntüsü	69
Şekil 4.19 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterleme sonucunda elde edilen dağlanmış mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.20 Toz ve 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin XRD grafikleri.....	71
Şekil 4.21 CuSn10 TG/DTA grafiği ve 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş silindirik numunelerin şekilleri	72
Şekil 4.22 a) Yazdırılmış, b) 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numuneler	73
Şekil 4.23 a) 850 °C, b) 875 °C ve c) 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri	73
Şekil 4.24 a) 850 °C, b) 875 °C ve c) 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin hasar yüzeyi görüntüleri	74
Şekil 4.25 Yazdırılmış ve sinterlenmiş çeşitli karmaşık şekilli parçalar	76
Şekil 4.26 Farklı toz boyutları ile hazırlanmış besleme stoklarının artan kayma hızına bağlı olarak elde edilen viskozite değerleri	77
Şekil 4.27 P107, P63 ve P38 numuneleri için zaman bağlı olarak meydana gelen wax kayıpları	78
Şekil 4.28 P38 ve P63 kodlu tozları içeren besleme stokları kullanılarak yazdırılmış numunelerin yazdırma sonrası ve bağlayıcı giderme işlemi sonrası yüzey ve kesit SEM görüntüleri	78

Şekil 4.29 P38, P63 ve döküm numunelerinin XRD grafikleri.....	79
Şekil 4.30 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin dağlanmış mikroyapı görüntüleri	80
Şekil 4.31 P107, P63 ve P38 numunelerinin porozite değerleri	80
Şekil 4.32 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin çekme testi sonuçları.....	81
Şekil 4.33 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin hasar yüzey görüntüleri.....	82
Şekil 4.34 a) P107, b) P63, c) P38 ve d) döküm numunelerin aşınma testleri sonrası yüzey profil görüntüleri	83
Şekil 4.35 Aşınma testi sonrası bilye yüzey görüntüsü ve EDX analizleri.....	84
Şekil 4.36 a) P107, b) P63, c) P38 ve d) döküm numunelerin aşınma testi sonrası yüzey SEM görüntüleri.....	85
Şekil 4.37 Poroz yapılı yüzeyde aşındırıcı bilyenin hareketi sırasında deformasyona bağlı malzeme kaybı oluşumunun şematik gösterimi.....	86

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 ME Eİ çalışma örnekleri	34
Tablo 4.1 Toz boyut dağılımları ve yoğunlukları	52
Tablo 4.2 a) CuSn10 tozların TG/DTA grafiği, b) Cu-Sn faz diyagramı	53
Tablo 4.3 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin mukavemet değerleri	74
Tablo 4.4 P107, P63, P38 ve döküm numunelerin mekanik özellikleri.....	82
Tablo 4.5 Numunelerin sertlik değerleri	83

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Hızlı prototipleme, 3 boyutlu yazdırma, eklemeli işlemler, eklemeli teknikler, eklemeli katmanlı üretim, katmanlı üretim ve kalıpsız üretim gibi birçok farklı isimle de bilinen eklemeli imalat (Eİ); bilgisayar ile tasarlanmış 3 boyutlu (3B) bir tasarım verisinin kullanılmasıyla, malzemenin katmanlı şekilde birleştirilmesiyle parça üretimi olarak tanımlanmaktadır (Lee vd., 2016; ASTM, 2012; Wong vd., 2012). İlk başta polimerik malzemelerin şekillendirilmesi için geliştirilen eklemeli imalat, gelişen teknolojiye bağlı olarak polimerik malzemelerin yanında metalik, seramik ve kompozit malzemelerin üretimine de olanak sağlamıştır (Wohlers ve Gornet, 2016). Eklemeli imalat teknolojileri sayesinde döküm, dövme, talaşlı işleme gibi geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan veya oldukça zor olan karmaşık şekilli parçalar, hızlı, daha düşük maliyetli, montaj veya kaynak gibi çeşitli birleştirme yöntemlerine ihtiyaç duymadan tek parça halinde üretim olanağı bulmuştur. Özellikle metalik malzemelerin çeşitli eklemeli imalat yöntemleriyle üretilebilmesi medikal sektöründen havacılık ve uzay uygulamalarına kadar birçok alanda gelişmenin önünü açmıştır (Blakey-Milner vd., 2021; Revilla-León ve Özcan, 2017).

Metalik malzemelerin Eİ ile ilgili olarak günümüzde en sık kullanılan yöntemler lazer enerji kaynaklı seçici lazer sinterleme (selective laser sintering- SLS) ve seçici lazer ergitmedir (selective laser melting- SLM) (Papazoglou vd., 2021). Karmaşık şekilli parçaların hızlı şekilde düşük malzeme israfı ile üretilmesi, yüksek yoğunlukların, düşük tane boyutlarının elde edilmesine bağlı olarak yüksek mekanik özellikler sergilenmesi gibi birçok avantajı yanında bu yöntemlerin en büyük dezavantajı yüksek enerji kaynaklı lazer kullanılması nedeniyle yüksek yatırım maliyetine ve düşük ulaşılabilirliğe sahip olmalarıdır (Buj-Corral vd., 2020; Zhu vd., 2018). Özellikle maliyet problemi, metalik malzemelerin Eİ ile üretimi için daha düşük maliyetli yöntemlerin geliştirilmesine neden olmuştur.

Metalik malzemelerin düşük maliyetli Eİ için geliştirilen yöntemlerden biri metal enjeksiyon kalıplama yönteminden yola çıkılarak geliştirilen eriyik yığılma modelleme

(fused deposition modelling- FDM) yöntemidir. Bu yöntem çeşitli polimerik bileşenlerle karıştırılmış metal tozu içeren besleme stoğunun ekstrüzyon temelli şekillendirmesini kapsamaktadır. 3B olarak yazdırılmış parça sonrasında çeşitli ısı işlemlere maruz kalarak bünyede bulunan polimerik içerik sıcaklık etkisiyle uzaklaşır ve metal tozları birbirine sinterlenerek metalik parçanın eklemeli imalatı sağlanmış olur (Coffigniez vd., 2021; Vishwanath vd., 2021).

Metalik malzemeler arasında en çok kullanılan demir-dışı malzemelerden olan bakır (Cu) ve alaşımları yüksek elektriksel, ısı iletkenlikleri ve yüksek korozyon direnci özellikleri nedeniyle yataklar, dişliler, ısı değıştirgeçleri, pompa bileşenleri, elektriksel devre bileşenleri ve soğutma blokları gibi elektronikten yapısal uygulamalara kadar birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Barik vd., 2005; Canakci vd., 2014). Cu alaşımları arasında bakır-kalay (Cu-Sn) alaşımı olan bronzlar mekanik ve aşınma özellikleri nedeniyle öne çıkmaktadır (Afshari vd., 2017). Alaşım içeriğindeki Sn miktarı arttıkça malzemenin aşınma davranışı iyileşmektedir ve %10 Sn içeriğine sahip bronzlar özellikle aşınma açısından en çok kullanılan alaşımlardandır. Bu alaşımların üretimi genellikle geleneksel üretim yöntemlerinden olan döküm ve toz metalurjisi ile yapılmaktadır. Kalıpsız üretim, tasarım esnekliği ve karmaşık şekilli parça üretimine olanak sağlaması gibi çeşitli avantajları bulunan Eİ yöntemleri açısından bakıldığında ise bronz alaşımları ile ilgili çalışmaların SLM üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Deng vd., 2018.; Mao vd., 2017; Scudino vd., 2015; Zeng vd., 2020). Fakat yüksek ısı iletkenlik ve reflektans değerleri, Cu alaşımlarından olan bronz malzemelerin üretiminde soruna neden olabilmektedir (Emminghaus vd., 2019).

Bu tez çalışmasında, özellikle SLM yöntemi ile üretiminde sorun yaşanabilecek Cu alaşımlarından olan, ağırlıkça %10 Sn içeriğine sahip bronz alaşımının, göreceli yenilikçi ve düşük maliyetli bir metal eklemeli imalat yöntemi olan FDM yöntemi ile üretimi incelenmiştir. Bölüm 2’de metalik malzemelerin üretiminde kullanılan Eİ sınıflandırılmış ve açıklanmıştır. Bölüm 3’te tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler, metalik bronz malzemenin eklemeli imalatında kullanılan yöntem ve teçhizat belirtilmiştir. Bu bölümde ayrıca fiziksel, morfolojik, ısı ve mekanik

karakterizasyon yöntemleri belirtilmiştir. Bölüm 4'te, Bölüm 3'te gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçların incelemesi, yorumlanması ve mevcut literatür çalışmaları ile birlikte değerlendirilerek tartışması yapılmıştır. Sonuçlar ve ileriye yönelik değerlendirmeler ise son bölüm olan Bölüm 5'te verilmiştir.



BÖLÜM İKİ

TEORİK ALTYAPI

2.1 Eklemeli İmalat

Eklemeli üretim, hızlı prototipleme, 3 boyutlu yazdırma, eklemeli işlemler, eklemeli teknikler, eklemeli katmanlı üretim, katmanlı üretim ve kalıpsız üretim gibi birçok farklı isimle de bilinen Eİ; bilgisayar ile tasarlanmış 3 boyutlu bir obje verisinin kullanılmasıyla, malzemenin katmanlı şekilde birleştirilmesiyle parça üretimi olarak tanımlanmaktadır (Lee vd., 2016; Wong vd., 2012).

Eİ teknolojisi ilk olarak 1986 yılında 3D Systems şirketinin kurucusu Chuck Hull tarafından patentlenmiştir. Bu sayede ultraviyole (UV) ışık ve bu ışık ile kürlenebilir polimer kullanarak, kürlenen ince polimer katmanlarının üst üste eklenmesiyle Eİ yapan ilk cihaz hayatımıza girmiştir (Hull, 1986; Toyserkani vd., 2021; Wohlers ve Gornet, 2016).

Genellikle üst üste eklenen katmanlar ile üretim yapılmasını içeren Eİ, malzemeye veya yönteme bağlı olarak, bilgisayar destekli tasarımdan nihai ürün eldesine kadar çeşitli işlem basamaklarını içermektedir. Eİ yönteminin ilk basamağı üretimi yapılmak istenen parçanın 3B modelinin oluşturulmasıdır. Burada tasarım, gerçek parçanın 3B yapısını temsil eder. Çeşitli tarama veya tersine mühendislik ekipmanları da model oluşturmak için kullanılabilir. İkinci basamak oluşturulan 3B modelin, Eİ yapılabilmesi için katmanlara ayrılmasıdır. Bu aşamada model dilimleme programı adı verilen çeşitli yazılımlar ile uygun formatta katmanlara ayrılır. Ayrıca Eİ yöntemine uygun olarak hız, enerji, sıcaklık, katman kalınlığı, parça oryantasyonu gibi çeşitli parametreler de bu basamakta belirlenir ve uygun veri kodu çıktısı olarak kaydedilir. Sonraki basamak hazırlanan veri kodu çıktısının 3B yazıcıya aktarılmasıdır. Bazı cihazlarda dilimleme ve üretim parametreleri doğrudan yazıcı arayüzünde yapılabilmekte ve sonuç olarak basamak sırası değişebilmektedir. 3B yazdırma işlemi basamağı cihaz tarafından gerçekleştirilen, hazırlanan veri kodu çıktısına uygun olarak katmanların oluşturulduğu ve birbirine eklendiği, 3B yazdırma işleminin gerçekleştiği

aşamadır. Son aşama yazdırma işleminin tamamlanmasından sonra parçanın çıkarılması, alınmasıdır. Bu aşamada gerekli güvenlik prosedürleri takibinde parçanın çıkarılması gerçekleştirilir. Üretim yöntemine bağlı olarak bazı durumlarda parçanın alınmasından sonra kütleme, temizleme, sinterleme gibi çeşitli ek işlem uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir (Mostafaei vd., 2021; Srinivasulu Reddy ve Dufera, 2016; Surange ve Gharat, 2016).

2.2 Eklemeli İmalat Avantajları

Eİ teknolojisi ile kalıpsız üretim yapılması, tasarım esnekliği, karmaşık şekilli parça üretimine olanak sağlaması gibi birçok avantaj bulunmaktadır. Lipson (2013) Eİ avantajlarını “3B Yazdırmanın 10 İlkesi” başlığı altında aşağıdaki şekilde özetlemiştir:

- Serbest üretim esnekliği: Geleneksel üretim yöntemlerinde parça şekli karmaşıklığı arttıkça, üretim için gerekli maliyet de artmaktadır. Diğer taraftan, bir 3B yazıcıda parça şekil karmaşıklığının maliyet üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. 3B yazıcıda karmaşık şekilli bir parça yazdırmak, basit bir blok yazdırmak için gerekenden daha fazla zaman, beceri veya maliyet gerektirmemektedir.
- Serbest üretim çeşitliliği: Bir 3B yazıcı ile birçok şekil yazdırılabilir. Bir sanatçı gibi, 3B yazıcı da her seferinde farklı şekillere sahip parçalar üretebilir. Geleneksel üretim cihazlarında şekil açısından daha kısıtlı bir yelpazede üretim yapılabilmesi nedeniyle bu cihazlar üretim çeşitliliği açısından çok yönlü bir yapıya sahip değildir. Geleneksel üretim teknikleri farklı üretimler için kullanıcı eğitimi ve makine/teçhizat değişikliği gibi nedenlerden doğan maliyetler içerirken, bir 3B yazıcı için ihtiyaç duyulan yeni bir malzeme harmanı ve dijital şablondur.
- Montaj gerekmemesi: 3B yazıcı ile birbirine geçmiş, birbiri ile bağlantılı parçalar rahat bir şekilde üretilmektedir. Çeşitli parçalara sahip bir ürün için üretim genellikle parçaların ayrı ayrı üretilmesi ve sonrasında bu parçaların

montajını içermektedir. Bu durumda ürünün içerdiği parça sayısı arttıkça montaj süresi ve üretim maliyeti artmaktadır. Diğer yandan geleneksel üretim yöntemiyle farklı parçalar halinde üretilen ve montaj gerektiren bir ürün, 3B yazıcı ile tek parça halinde üretilebilmektedir. Örnek olarak 3B yazıcı ile bir kapı, montaja gerek kalmadan menteşeleri ile birlikte yazdırılabilmektedir.

- Hemen teslim: Bir 3B yazıcıda ihtiyaç durumunda anında yazdırma işlemine başlanabilmektedir. Anında üretim sayesinde ürünlerin önceden üretilecek stok yapılmasına olan ihtiyaç da azaltılabilmektedir. Bu sayede talebe veya müşteriye özel imalat hizmetleri daha olası ve yaygın hale gelebilecektir.
- Sınırsız tasarım alanı: Geleneksel üretim ile elde edilebilecek parça şekli, sahip olduğumuz takımlar ile sınırlıdır. Örnek olarak torna ile işlenebilecek parça, sadece dairesel kesitli olabilecektir ya da bir kalıplama cihazından çıkacak parça, kalıp geometrisi ile kısıtlıdır. 3B yazıcı teknolojisi ise sınırları kaldırarak yeni tasarım alanları açmaktadır.
- Üretimde beceri ihtiyacı: Geleneksel üretimde ürün özellikleri, üretimi yapan teknik eleman veya ustanın becerileri ölçüsünde iyileşmektedir. Gelişen teknolojiyle ortaya çıkan bilgisayar destekli iş tezgahları sayesinde operatör becerisine olan bağımlılık azalmış olsa da yine de ürün kalitesi, operatörün kalibrasyon ve rehberlik becerisine bağlıdır. Fakat 3B yazıcıda üretim için gerekli veriler, tasarım kodu çıktısından alındığından üretim minimum operatör becerisine ihtiyaç duymaktadır.
- Kompakt, portatif üretim: Bir 3B yazıcının üretim kapasitesi, geleneksel üretim cihazlarından daha fazladır. Örnek olarak bir enjeksiyon kalıplama cihazı, kendi boyutuna kıyasla oldukça küçük boyutlarda parçalar üretebilmektedir. 3B yazıcıda üretilebilecek parça boyutu ise yazdırma yatağı büyüklüğüyle orantılıdır. Hatta yazdırma parçalarının serbest hareketi sağlanabilirse; örnek olarak robotik bir kol gibi, bu durumda yazıcı kendi boyutu ile kıyaslandığında oldukça büyük parçaları üretebilecek duruma gelebilmektedir.

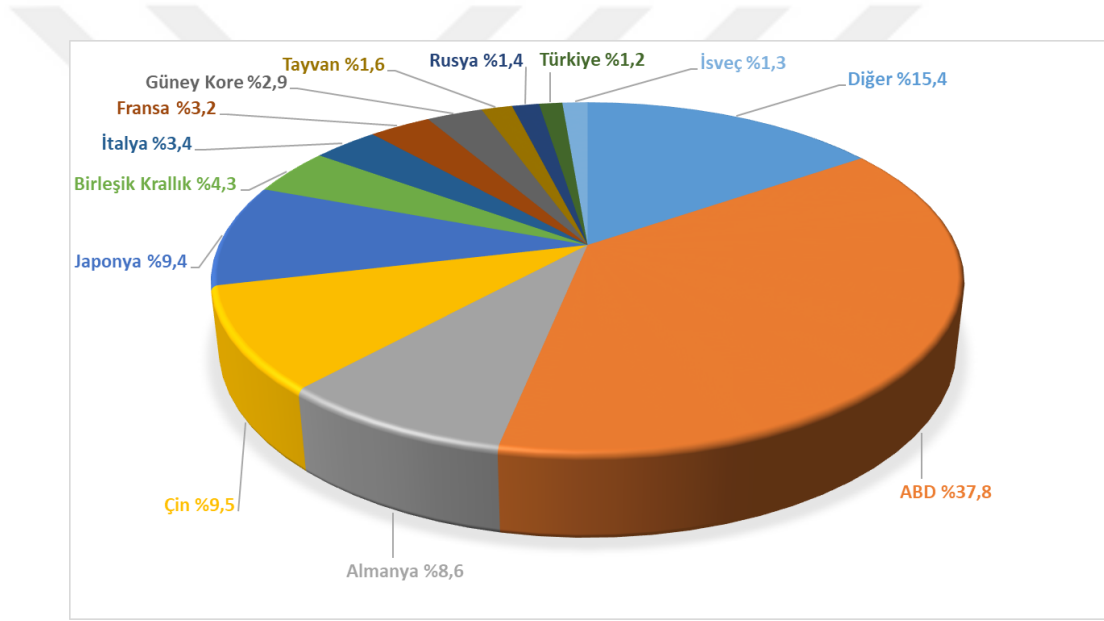
- Daha az atık: Özellikle metalik malzeme üretiminde 3B yazıcı kullanımı ile malzeme sarfiyatı önemli oranda azaltılabilmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri ile üretimde malzemenin önemli miktarda bir kısmı kayba uğramaktadır.
- Sınırsız malzeme tonu: Geleneksel üretim cihazları kesme, oyma veya belirli bir şekil kalıplama gibi belirli amaçlar doğrultusunda kullanılabildiğinden, farklı malzemelerin bir arada kullanılarak tek bir ürün üretimi için geleneksel üretim cihazlarının kullanımı pek mümkün değildir. Fakat multi-malzeme yazdırma işlemleri sayesinde metalik-seramik, esnek-rijit polimerik malzemelerin üretim sırasında aynı anda kullanılmaları olanaklı hale gelmiştir.
- Hassas replikasyon: Çeşitli hassas 3B tarama sistemleri sayesinde mevcut bir ürünün dijital halke getirilmesi, üzerinde değişiklikler yapılması veya ürünün bire bir aynı şekilde tekrar üretimi, 3B yazdırma teknolojisi ile mümkün hale gelmiştir (Lipson ve Kurman, 2013; Mostafaei vd., 2021).

2.3 Eklemeli İmalat Pazar Büyüklüğü

1980'lerin sonlarına doğru hayatımıza giren Eİ teknolojisi yıllar içinde devam eden ar-ge çalışmaları ve ortaya çıkan yenilikçi sistemler sayesinde havacılık ve uzay, inşaat, gıda, elektronik, savunma, tıp ve medikal gibi çeşitli sektörler tarafından ilgi görmüş, buna bağlı olarak hammadde, malzeme, cihaz satışları ve servis hizmetleri gibi bileşenleri içeren sektör büyüme göstermiştir.

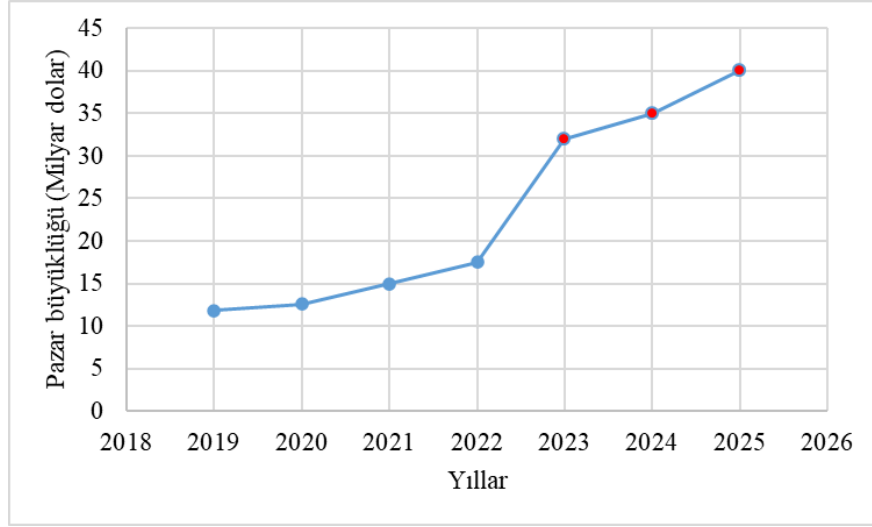
Şekil 2.1 a'da Eİ pazarı içerisinde ülkelerin sahip oldukları pay oranları görülmektedir. 2016 yılı verilerine göre ülkemizin Pazar içindeki payı %1,2 olarak belirtilmiştir. Şekil 2.1 b'de ise yıllara göre Eİ pazar büyüklüğü görülmektedir. Dünya genelinde malzeme, ekipman satışları ve servis hizmetlerini kapsayan Eİ Pazar büyüklüğü 2010 yılında 1,3 milyar dolar, 2015 yılında 5 milyar dolar büyüklüğe sahipken 2018 yılında büyük bir atılımla bu sayı 9,3 milyar dolar seviyelerine yükselmiştir (Wang vd., 2021).

Pandemi nedeni ile 2020 yılında büyüme rakamlarının öngörülen seviyelere yükselemeyeceği düşünülürken 2020 yılında sektör 12,8 milyar dolarlık bir büyüklüğe ulaşmıştır. Pazar büyüklüğünün 2023 yılında 30 milyar dolar seviyesinde olacağı, 2025 yılında ise sektör büyüklüğünün 40 milyar doların üzerine çıkacağı öngörülmektedir (Jafferson ve Chatterjee, 2021; Jing vd., 2021; Shrinivas Mahale vd., 2022; Toyserkani vd., 2021). Eİ sektöründe ar-ge çalışmalarının devam etmesi, sürekli yeni sistemlerin ortaya konması ve her geçen gün farklı endüstrilerin Eİ teknolojisini benimsemesi ile, sektörün önümüzdeki yıllarda da giderek büyüyeceğinin göstergesidir.



a)

Şekil 2.1 a) Eİ pazarı içerisinde ülkelerin sahip oldukları pay oranları, b) Yıllara göre Eİ pazar büyüklüğü (Wang vd., 2021)

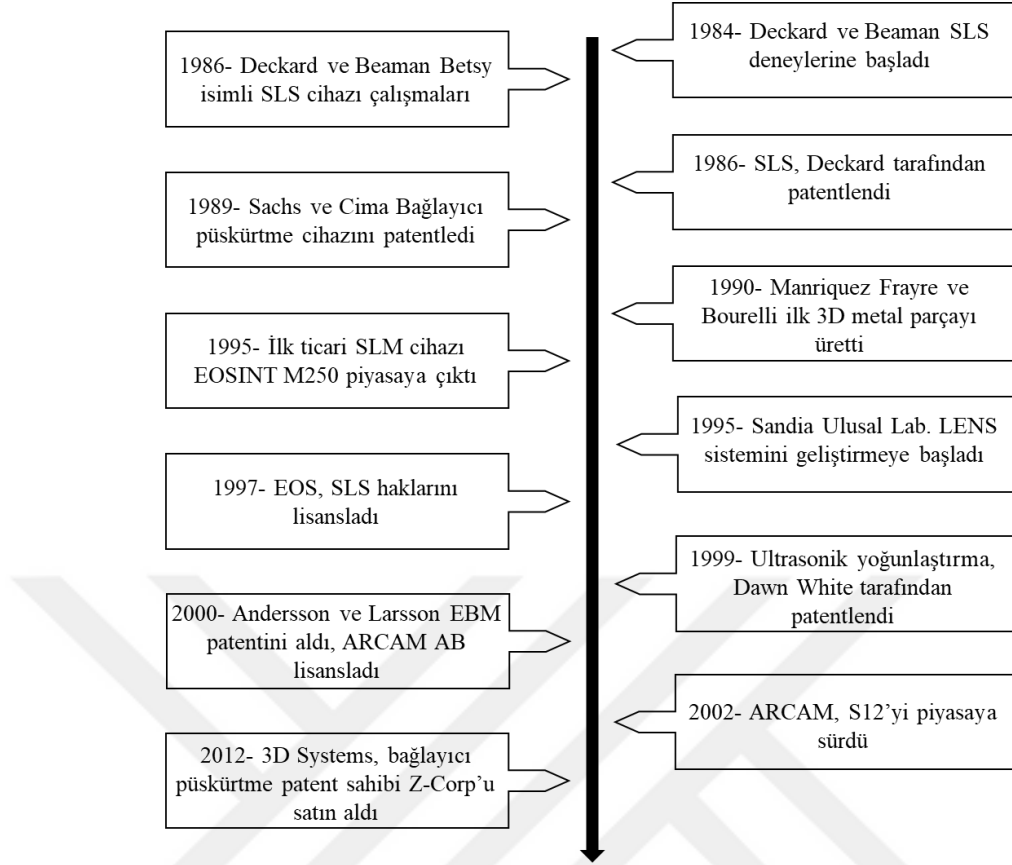


b)

Şekil 2.1 Devamı

2.4 Metal Eklemeli İmalat

Metal Eİ ile ilgili ilk çalışmalar 1984 yılında Deckard ve Beaman tarafından polimer tozunun bir lazer kaynağı ile eritilerek birleştirilmesi sonucu 3B parçalara dönüştürülmesiyle başlamıştır. Araştırma genel olarak toz yataklı malzeme sisteminde lazer kaynaklarıyla parça üretimini tanımlamıştır. Çalışmaların devamı ile yöntem 1986 yılında Deckard tarafından SLS işlemini ifade eden “Seçici sinterleme ile parça üretimi için yöntem ve aparat” adıyla patentlenmiştir (Deckard, 2022). SLS yöntemi ile metalik parça üretimine ilişkin ilk çalışmalardan birisi 1990 yılında Manriquez-Frayre ve Bourell tarafından Cu, Sn ve lehim karışımları ile yapılmıştır (Manriquez-Frayre ve Bourell, 1990). SLS patentinin ardından 1989 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü’nden bir grup araştırmacı “3 Boyutlu Yazdırma Teknikleri” isimli patentleriyle bağlayıcı püskürtmeli Eİ yöntemini açıklamıştır (Sachs vd. 1993). Başka bir Eİ yöntemi, bir toz yatağının seçici olarak eritilmesinin aksine, besleme stoğunun doğrudan erimiş bir havuza bırakılmasına dayanmaktadır. Doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition- DED) olarak bilinen bu yöntemde besleme stoğu olarak tel de kullanılabilmektedir ve geçmişi kaynak teknolojilerine kadar takip eder. 2000 yılında İsveç’te yapılan araştırma ile elektron ışını ergitme (electron beam melting- EBM) adı verilen başka bir yöntem ortaya çıkmıştır (Sames vd., 2016). Eİ yöntemlerinin tarihsel gelişimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Eİ teknolojilerinin tarihsel gelişimi (Yalçın vd., 2017)

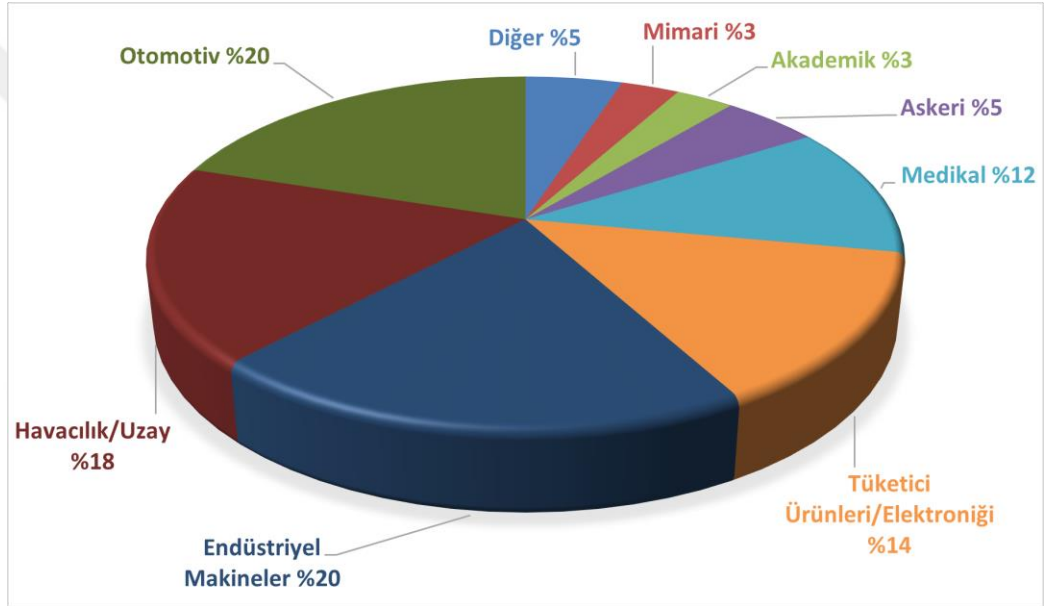
2.5 Metal Eklemeli İmalat Kullanım Alanları

Clayton Christensen'in öne sürdüğü “yıkıcı teknoloji” kavramı, tüketicilerin, endüstrilerin veya işletmelerin çalışma şeklini değiştiren, zamanla var olan yerleşik bir teknolojinin yerini alabilecek, mevcut teknolojilerin yenilikçi bir kombinasyonu veya tamamen yenilikçi bir teknoloji olarak ortaya çıkan teknolojik bir dönüşüm olarak tanımlanmaktadır (Danneels, 2004; Kostoff vd., 2004).

Eİ da bu açıdan potansiyel yıkıcı bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Hızlı prototip üretimi, kişiselleştirilmiş ve düşük hacimli parça üretimi açısından güvenilir tekniklere dönüşen, dijital ve merkeziyetsiz üretim açısından çözüm sunan Eİ teknolojileri ile zamanla küresel üretim modellerinin değişeceği, yerleşik uluslararası üretim modellerinin yeniden değerlendirileceği ve küresel üretim stratejisine yönelik yaklaşımların gözden geçirileceği, küresel üretimin giderek daha yerel hale geleceği

ve sonuç olarak kitlesel bir kişiselleştirme çağının başlayacağı öngörülmektedir (Hannibal ve Knight, 2018).

Üretim kabiliyetinin geliştirilmesi, daha kısa teslim süreleri, malzeme sarfiyatının azalması, geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan veya zor olan yenilikçi karmaşık geometrilerin kolay şekilde üretimi gibi faktörler, her geçen gün daha fazla endüstriyel sektörün metal Eİ teknolojilerine yönelmesine neden olmaktadır (Vafadar vd., 2021). Şekil 2.3'te Eİ teknolojilerinin kullanım alanlarına göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.3 Eİ teknolojilerinin kullanım alanlarına göre dağılımı (Vafadar vd., 2021)

2.5.1 Otomotiv

Otomotiv sektörü, Eİ piyasasının lokomotif endüstrilerinden biridir. Metal Eİ teknolojilerinin sunduğu esnek dizayn, daha hafif ve güçlü ürünler, düşük teslim süresi ve maliyet avantajları nedeniyle birçok otomotiv şirketi metal Eİ teknolojilerini kullanmaktadır. Otomotiv sektöründe Eİ prototip, jig ve takım, yedek parça, kişiselleştirilmiş ürün ve parça üretimi amaçlarıyla kullanılmaktadır.

Otomotiv sektörü için metal Eİ teknolojileri henüz seri üretim araçlarda kullanılacak parçalara uygulanabilir hale gelmemiş olsa da bu amaç doğrultusunda Volkswagen, BMW, Porsche, General Motors ve Toyota gibi birçok otomotiv firması ya Eİ teknolojilerini bünyelerine katmak veya üretimdeki kullanım oranını artırmak için yatırım yapmaya ya da 3B yazılım şirketleri, Eİ cihaz geliştiricileri, malzeme üreticileri veya araştırma merkezleri ile işbirliği içerisine girmektedir (Toyserkani vd., 2021).

Otomotiv sektöründe lüks segment veya yarış araçlarında metal Eİ teknolojilerinin kullanımı ile ilgili çeşitli örnekler bulunmaktadır. Ford firması müşterilerinin seslerini dijital çembersel desenlere dönüştürmüş ve bu desenleri kullanarak metal Eİ yöntemiyle müşteriye özel bijon ve bijon anahtarı üretmiş ve bu sayede hırsızlık önleme çözümü sunmuştur (Ford Media Center, 2022). Şekil 2.4'te ses desenine özel üretilmiş bijon ve bijon anahtarı görülmektedir. DS Automobile tasarımcıları, titanyum kapı kolu çerçeveleri gibi özel otomobil aksesuarlarının üretimi için Eİ teknolojisini kullanmıştır.



Şekil 2.4 Ses desenine özel üretilmiş bijon ve bijon anahtarı (Ford Media Center, 2022)

Fazla esnek alüminyum (Al) fren pedalına sahip bir yarış aracı için, hafiflikten ödün vermeden daha rijit bir pedal üretiminde metal Eİ teknolojisinden yararlanılmıştır. Al yerine, boşluklu tasarım yapısına sahip titanyum alaşımından (Ti6Al4V) fren pedalı üretilmiştir. Şekil 2.5 a'da Al ve Ti alaşım fren pedalları görülmektedir.

Benzer şekilde “Formula Student Germany 2012” yarışma takımı “The Rennteam Uni Stuttgart”, araçta bulunan aks mafsallını metal Eİ yöntemiyle yeniden üreterek ağırlığı %35 azaltmıştır. Aks mafsalı Şekil 2.5 b'de'de görülmektedir (EOS, 2022).

Alman otomotiv şirketi BMW, i8 Roadster model aracı için açılır tavan uygulamasında metal Eİ yöntemiyle Al alaşımından üretilmiş parça kullanmıştır. Parça Şekil 2.5 c’de görülmektedir. Bu sayede plastik enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş orijinal parçaya kıyasla %44 daha hafif fakat on kat daha rijit bir parça üretimi gerçekleştirilmiştir (Siebel, 2021).

Fransız otomotiv üreticisi Bugatti orijinal olarak Al alaşımından ürettiği fren kaliperi yerine metal Eİ yöntemi ile üretilmiş 1225 MPa çekme mukavemetine sahip Ti6Al4V alaşım fren kaliperi ile %40 hafiflik sağlamıştır (Wischeropp vd., 2019). Fren kaliperi Şekil 2.5 d’de görülmektedir.



Şekil 2.5 Metal Eİ teknolojisi ile üretilmiş a) Fren pedalları, b) aks mafsalı, c) açılır tavan bileşeni ve d) fren kaliperi (EOS, 2022; BMW, 2022; Wischeropp vd., 2019)

2.5.2 Uzay ve Havacılık

Eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi ilk benimseyen endüstrilerden birisi havacılık ve uzay endüstrisidir. Ayrıca bu endüstri Eİ teknolojilerinin gelişmesi ve yaygınlaşmasında anahtar rol oynamaktadır. Hızlı üretim ve tamir, serbest biçimli ve karmaşık şekilli parçalar üretme ve parçaları birleştirme yeteneği ve genellikle yüksek dirençli süper alaşımlar gibi işlenmesi zor alaşımların kullanılması, ticari uçaklar, askeri uygulamalar ve füze sistemleri gibi sektörler için eklemeli imalat teknolojilerini kullanmayı ideal kılmaktadır (Najmon vd., 2019; Singamneni vd., 2019).

General Electric şirketi LEAP motorlarında kullanmak üzere Eİ teknolojisi ile yakıt nozulü üretmiştir. Bu sayede orijinal yakıt nozulüne oranla %25 hafiflik ve %15'e kadar yakıt verimi sağlamıştır. Şekil 2.6 a'da Eİ ile üretilmiş yakıt nozulü görülmektedir. Benzer şekilde 855 adet parçadan oluşan Turboprop motorunun parça sayısını Eİ sayesinde 12'ye düşürmüştü ve %20 oranında yakıt yanma verimi elde etmişlerdir. Şekil 2.6 b'de Turboprop motoru görülmektedir.

Airbus uçaklarda kullanmak üzere çeşitli parçaları Eİ ile üretmektedir. Yeni nesil A350 XWB jetleri için kanat braketlerini ve A380 için Ti6Al4V alaşım türbin kapak menteşelerini Eİ ile üretmektedir (Vafadar vd., 2021). Jet kanat braketi ve motor kapak menteşesi Şekil 2.6 c ve d'de görülmektedir.



Şekil 2.6 Eİ ile üretilmiş a) yakıt nozulü, b) Turboprop motoru, c) jet kanat braketi ve d) motor kapak menteşesi (Vafadar vd., 2021)



c)



d)

Şekil 2.6 Devamı

İngiltere’de bulunan, havacılık-uzay, savunma, medikal, otomotiv ve inşaat sektörlerine hizmet veren, müşterilerine tasarım, üretim ve mühendislik çözümleri sunan Sylatech firması Eİ teknolojisinden yararlanarak zaman ve maliyet kazancı sağlamıştır. Geleneksel süreçte yatırım maliyeti olmadan tasarımlarının fonksiyonelliğini tam olarak değerlendirme olanağı bulamayan firma, hassas dökümü yapılacak parçanın prototipinin 3B yazıcılar ile yazdırılması ile bu sorunun önüne geçmiştir. Müşteriye gönderilecek prototip metal ürünün üretilme süresi; modelin hazırlanması, hassas döküm ve ikincil işlemlerin yapılması da dahil olmak üzere 3-4 haftalık süreyi kapsadığı belirtilmiştir. Bu sürecin müşteriye 2580-5160 dolar arasında değişen bir maliyet oluşturduğu ve tasarımda yapılacak herhangi bir değişikliğin 645-1160 dolar ek maliyet yüklediği belirtilmiştir. Tasarımların polimerden 3B yazıcılar ile yazdırılarak hazırlanması ve hassas dökümlerin yapılması sonucunda prototip üretim maliyeti azaltılmış ve teslim süresi 5 güne düşürülmüştür (Staak, 2022).

2015 yılında havacılık şirketi Airbus ve Fransız Safran grubunun ortak girişimi olan ArianeGroup, eski adıyla Airbus Safran Launcher, iletişim uydularının yörüngeye fırlatılması için kullanılan roketlerin itiş modüllerinin üretiminde metal Eİ teknolojisinden yararlanmıştır. Geleneksel yöntemde 248 ayrı parçanın döküm, talaşlı işlem ve kaynak gibi çeşitli işlemlerle üretilip birleştirilmesi ile oluşturulan itiş modülünün yakıt enjeksiyon kafası, Eİ ile tek parça halinde, 3 ay yerine 35-65 saat gibi bir sürede yarı maliyetle üretilmiştir (Arianegroup, 2022).

2.5.3 Medikal ve Dental

Dünya nüfusunun yaklaşık %10'luk bir kısmı 65 yaş ve üzerindedir. Bu sayının 2050 yılında iki katına çıkması beklenmektedir (Ashammakhi vd., 2019). Geçmişimizin yaşayan mirası olan bu insanlar yaşları nedeniyle doku kaybı ve kırılğan kemikler gibi çeşitli sağlık problemleri yaşamaktadır. Bu problemlerin çözümü genel olarak dokunun fiksasyonu, yeniden oluşturulması veya değiştirilmesini içerir. Sert dokuların mekanik özellik gereksinimi, hastanın hızlı mobilizasyonunun sağlanması ve ortaya çıkabilecek çeşitli komplikasyonların önüne geçmek amacıyla implant üretiminde genellikle metalik malzemeler kullanılmaktadır (Niinomi, 2002; Niinomi vd., 2012). Halihazırda klinik olarak kullanılan metalik implantların %70-80'i paslanmaz çelikler, kobalt-krom (Co-Cr) alaşımları, titanyum (Ti) alaşımları, nitinol, tantal (Ta), niyobyumdan (Nb) yapılmaktadır (Black, 1994; Niinomi, 2008; O'Brien vd., 2008; Shih vd., 2004). Bunun dışında magnezyum (Mg), demir (Fe), çinko (Zn) ve kalsiyum (Ca) gibi biyobozunur metallerin kullanımı ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır (Gu ve Zheng, 2010; Guan vd., 2018).

Günümüzde Eİ teknolojileri yalnızca ortopedik ve diş implantları, yapay karaciğerler ve yapay kardiyovasküler sistemler gibi insan dokularının onarımı için değil, aynı zamanda mikro-akışkan cihazlar ve tıbbi elektronik alanlarında da yaygın olarak uygulanmaktadır (Bose vd., 2018; Gross vd., 2014; Y. He vd., 2016; Jin vd., 2013; Waheed vd., 2016).

Metalik implantlar ve kemik arasındaki mekanik özellik uyumsuzluğu kemiklerde güç azalmasını, ana matris kaybını işaret eden osteopeni veya osteolize sebebiyet verebilmektedir. Kontrollü poroziteye sahip metalik implantların üretilmesi ile mekanik uyumsuzluk sorunun önüne geçilebilmektedir. Fakat döküm ve toz metalürjisi gibi geleneksel üretim yöntemleri karmaşık dış geometriye ve kontrollü iç porozite yapısına sahip metallerin üretimi için oldukça yetersizdir. Eİ teknolojileri burada devreye girmekte ve esnek tasarım, karmaşık şekil ve kontrollü yapı üretimi sağlaması nedeniyle, doğal kemik ve implant arasındaki mekanik özellik uyumuna olanak sağlamaktadır. Ayrıca kişiye özgü, hastanın ihtiyacına cevap verebilecek

implantların geliştirilmesi de Eİ teknolojileri ile oldukça ulaşılabilir ve kolay hale gelmiştir (Ni vd., 2019).

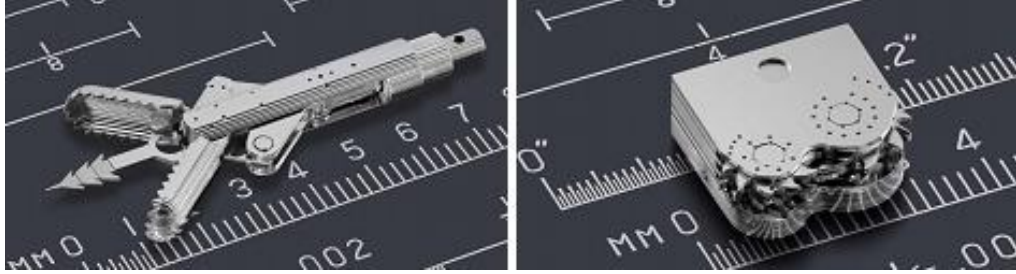
Kanser teşhisi nedeniyle 53 yaşında erkek bir hastaya radyoterapi uygulanmıştır. Tedavi sonucunda hastanın çenesine rekonstrüksiyon plakası yerleştirilmiştir. Tedavi sürecinden bir yıl sonra, hastanın çene kemiğinde, gördüğü tedaviye bağlı olarak osteoradyonekroz meydana gelmiş ve kemikte kırılma saptanmıştır. Hastanın çene bölgesinin radyografi görüntüsü Şekil 2.7’de görülmektedir. Vakanın tedavisi amacıyla kemiklerin birleştirilmesi için Eİ ile Ti implant üretilmiştir. İmplant sadece kemiğin birleştirilmesi ve sabitlenmesi amacıyla değil, ileriki süreçte dental implantların da monte edilebileceği şekilde çok fonksiyonlu olarak tasarlanmıştır. Eİ teknolojisi sayesinde çok fonksiyonlu ve kişiselleştirilmiş metalik implant üretimi gerçekleştirilerek, operasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır (Park vd., 2020).



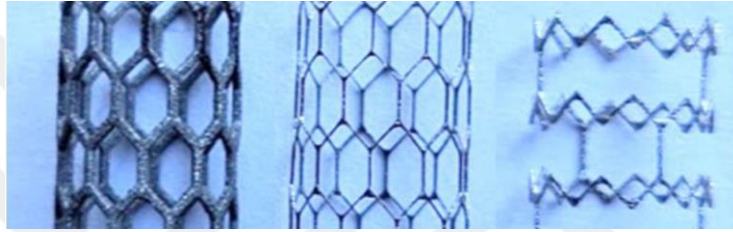
Şekil 2.7 Hasta çene röntgeni, Eİ implant ve yerleştirilmesi (Park vd., 2020)

Kişiselleştirilmiş implant uygulamaları dışında metal Eİ teknolojileri mikro cerrahi aletlerinin yapımında da kullanılabilmektedir. Ek işlem gerektirmeden üretilmiş yüksek çözünürlüklü aletler ile çeşitli cerrahi operasyonların daha kolay ve acısız geçeceği öngörülmektedir. Şekil 2.8’de mikro metal Eİ teknolojisi ile biyopsi uygulamaları için üretilmiş ürün görülmektedir (Vaezi vd., 2020). Ayrıca metalik

kardiyovasküler stentler de metal Eİ teknolojileri ile üretilebilmektedir. Şekil 2.9’da metal stentler görülmektedir .



Şekil 2.8 Mikro cerrahi alet (Vaezi et al., 2020)



Şekil 2.9 Metal stentler (McGee vd., 2021)

2.5.4 Elektronik ve Haberleşme

Geçtiğimiz yıllarda metal Eİ teknolojileri rezistör, devre kartları, elektromanyetik veya ses dalgalarının taşındığı ve yönlendirildiği dalga kılavuzları gibi yenilikçi elektronik ve haberleşme bileşenlerinin tasarım ve üretimi açısından, hem araştırmacılar hem de endüstri tarafından büyük ilgi çekmiştir (Espera vd., 2019; Gjokaj vd., 2019; Lewis ve Ahn, 2015). Bu elektronik ve haberleşme bileşenleri metal, yarı iletken ve polimerik malzemeden üretilmektedir. Bu malzemeler arasında metalik/inorganik malzemeler yüksek iletkenlik ve dayanıklılık sunması açısından endüstride sıklıkla kullanılmaktadır (Vafadar vd., 2021).

İletişim cihazları her geçen gün daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duyduğundan, gelişmiş antenlerin üretimi iletişim endüstrisi için büyüyen ve gelişen bir alandır. Bu gereksinimi karşılamak için daha yüksek dalga frekanslarının kullanılması gerekmektedir; ancak, bu yüksek frekansların kontrol edilmesi daha zordur. Bu karmaşık frekansları yayınlamak için karmaşık şekilli antenlerin kullanılması

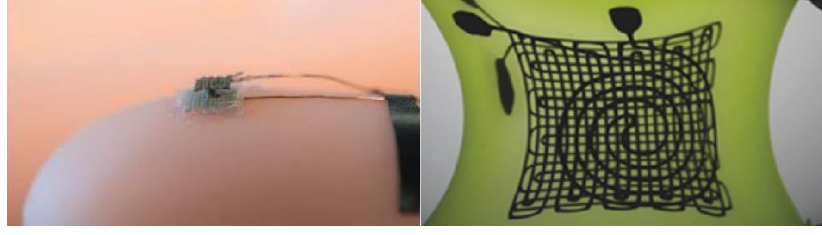
gerekmektedir. Eİ teknolojisi çeşitli alaşımlar ve dielektrik malzemeler ile karmaşık şekilli antenlerin yapımına olanak sağlaması açısından, iletişim endüstrisine oldukça büyük olanaklar sunmaktadır. Eİ teknolojileri ile gelişmiş radyo frekans (RF) antenler üretilmekte ve bu antenlerin tasarım, tedarik ve sürdürülebilir olmasında bir devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Eİ teknolojileri anten tasarımı ile rahat uyum sağlayacak ve tamamen entegre olabilecek kapasiteye sahiptir. Böylece sadece antenlerin kişiselleştirilmesi değil, sahada verim artışı da sağlanabilecektir.

Şekil 2.10’da Optisys şirketinin geliştirdiği metal Eİ teknolojisi ile üretilmiş RF anten görülmektedir. Metal Eİ ürünü olan bu anten uzay ve savunma uygulamalarında kullanılmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmiş eşdeğer bir anten ile kıyaslandığında %95 hafiflik, %20 üretim maliyet azalması ve teslim süresinin 11 aydan 2 aya indirilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır (Vafadar vd., 2021).



Şekil 2.10 RF anten (Vafadar vd., 2021)

Çoklu malzeme yazdırma teknolojisi ile özellikle sensör alanında Eİ kullanımına ilişkin çalışmalar hız kazanmıştır. Esnek sensör uygulamaları ve robotik alanında Eİ yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.11’de esnek sensör uygulamaları görülmektedir. Bunların dışında Eİ teknolojinin kullanılması ile birçok alana uygulanabilecek mikro-elektronik bileşenler üretilmektedir. Bu sayede mikro-robotik alanında da gelişmelerin önü açılmaktadır (Li ve Pumera, 2021).



Şekil 2.11 Esnek sensörler (Espera vd., 2019; Guo vd., 2017)

2.5.5 Diğer Alanlar

Eİ teknolojileri özellikle bireysel ve kişiselleştirilmiş üretimin önünü açmasından dolayı oldukça büyük önem taşımaktadır. Polimerik malzemelerden seramik malzemelere, metalik malzemelerden kompozitlere ve hibrit yapılara kadar oldukça geniş bir yelpazede ürün kullanımına olanak sağlaması nedeniyle Eİ teknolojilerinin kullanım alanları sınırsızdır. Bu başlık altında ise çeşitli örneklerle metal Eİ teknolojilerinin sanatsal yaklaşımlar, takım ve kalıp üretimi gibi diğer alanlarda kullanım örnekleri verilmiştir.

Eİ yazılım, malzeme ve sistemlerine olan erişilebilirlik arttıkça bunun duygusal ve sanatsal yansımaları da genişleyecektir. Müzik, resim film gibi 2 boyutlu (2B) sanatsal ürünlerin yaşattığı duygusal deneyimin 3B sanal gerçeklik (VR) uygulamaları ile de tecrübe edileceği düşünülmektedir. 3B VR tecrübesinde bir anın yakalanması ve bunun fiziksel dünyaya aktarımının Eİ teknolojileri ile başarılabacağı öngörülmektedir (Milewski, 2017).

Amerikalı görsel sanatçı Bathsheba Grossman bronz ve paslanmaz çelikten eserler üretmek için bilgisayar destekli tasarım, matematik ve metal Eİ teknolojisini kullanmaktadır. Şekil 2.12’de sanatçının çeşitli eserleri görülmektedir (Bathsheba Sculpture, 2022).



Şekil 2.8 Eİ takılar (Bathsheba Sculpture, 2022)

MX3D firması Amsterdam’da bir kanal üzerine metal Eİ teknolojisi ile yazdırılmış ve sensör ağı ile donatılmış 12 m uzunluğunda yaya köprüsü tasarlamıştır. Çeşitli firma ve araştırma enstitüleri ile işbirliği içerisinde gerçekleştirilen bu proje Eİ mühendisliğinin bir örneğidir. Proje kapsamında metal Eİ teknolojinin yapı uygulamasının gerçekleştirilmesi yanında sensör ağı sayesinde gerinim, gerilim ve titreşim ölçümleri gibi yapısal ölçümler toplanacak ve hava kalitesi ve sıcaklık gibi çevresel faktörler ölçülerek köprünün zaman içerisindeki durumu, zamana bağlı olarak köprünün yapı bütünlüğünün nasıl değiştiği, köprüden kaç kişinin geçtiği ve hangi hızda geçtiği gibi veriler edinilebilecektir. Başka bir yapısal uygulama olarak aynı firma bünyesinde metal Eİ teknolojisi ile bağlantı elemanı üretilmiştir. Metal Eİ teknolojisi sayesinde projeye ve ihtiyaca göre değişkenlik gösterebilen yapı elemanı ihtiyacının rahatlıkla karşılanabileceğinin göstergesi olan bu proje ile metal Eİ teknolojinin mimari uygulaması yapılmıştır. Şekil 2.13’te metal Eİ teknolojisi ile üretilmiş yaya köprüsü ve yapı bağlantı elemanı gösterilmiştir (MX3D, 2022).



Şekil 2.9 Eİ ile üretilmiş a) köprü ve b) yapı bağlantı elemanı (MX3D, 2022)

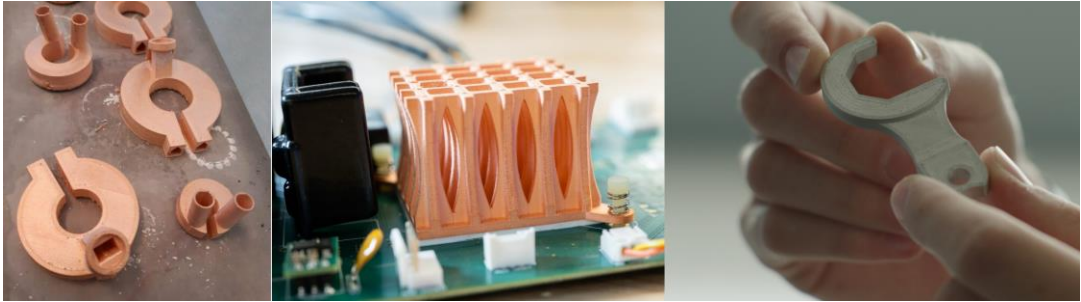
Eİ teknolojilerinin uygulanabileceği alanlardan bir diğeri denizcilik endüstrisidir. Gemiler genellikle onarım tesislerinden, tersanelerden ve yedek parça ulaşımdan uzakta çalışan gemilerde, Eİ teknolojilerinin yedek parçaların doğrudan gemilerde üretilmesine olanak sağlayabileceği belirtilmiştir (Kostidi ve Nikitakos, 2018). Kaynak gerektirmeyen tasarımlar ve üretimler sunan metal Eİ teknolojileri ile denizcilik sektörünün ihtiyacı olan yetişmiş ve yetenekli kaynakçılara olan ihtiyacın da azalacağı öngörülmektedir. Bu teknolojiler ile içi boş pervaneler gibi hafif ve düşük maliyetli parçaların üretilmesi olanaklı hale gelmektedir (Maritime, 2022). Şekil 2.14’te metal Eİ yöntemi ile üretilmiş pervane kanadı görülmektedir.



Şekil 2.10 Eİ pervane kanatları (Maritime, 2022)

Takım, kalıp veya kişiselleştirilmiş parça üretimi metal Eİ teknolojilerinin diğer bir uygulama alanıdır. Tasarım esnekliği, düşük tedarik süreleri, ihtiyaca göre üretim olanakları metal Eİ teknolojilerini kendi kalıp, takım, veya kişiselleştirilmiş parça üretimlerini düşük maliyetle yapmak isteyen şirketler için vazgeçilmez hale getirmektedir.

Bu örnekler dışında özel boyuta sahip anahtar ve takımlar, geleneksel yöntemlerle üretilmeyecek iç kanallara sahip soğutma parçaları, hassas ve küçük çaplı indüksiyon bobinlerinin üretimi de metal Eİ teknolojisi ile oldukça kolaylaşmıştır. Şekil 2.15'te metal Eİ teknolojisi ile üretilmiş çeşitli parçalar görülmektedir.

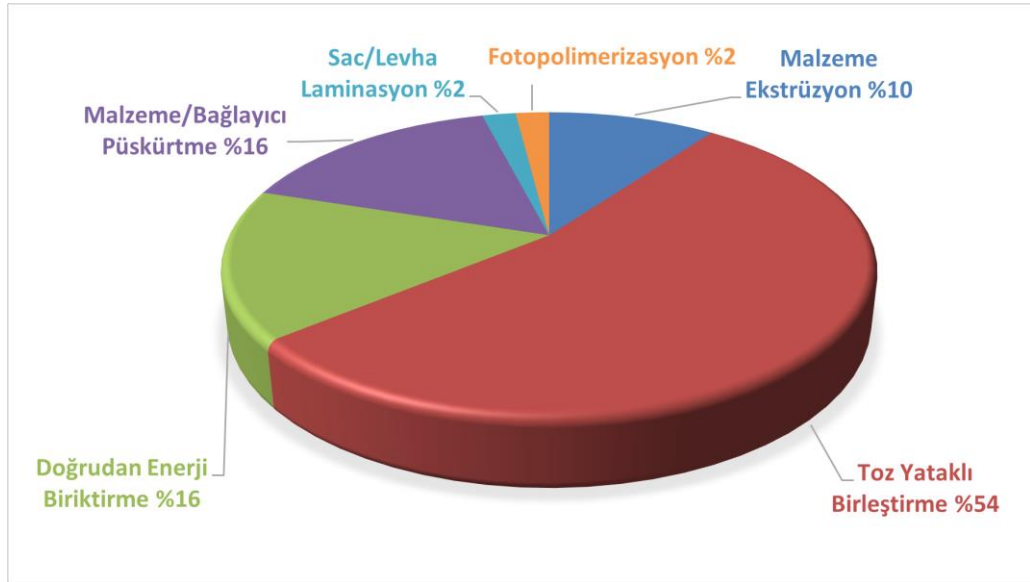


Şekil 2.11 Eİ ile üretilmiş çeşitli bobin, soğutma elemanı ve anahtar parçalar (Markforged, 2022)

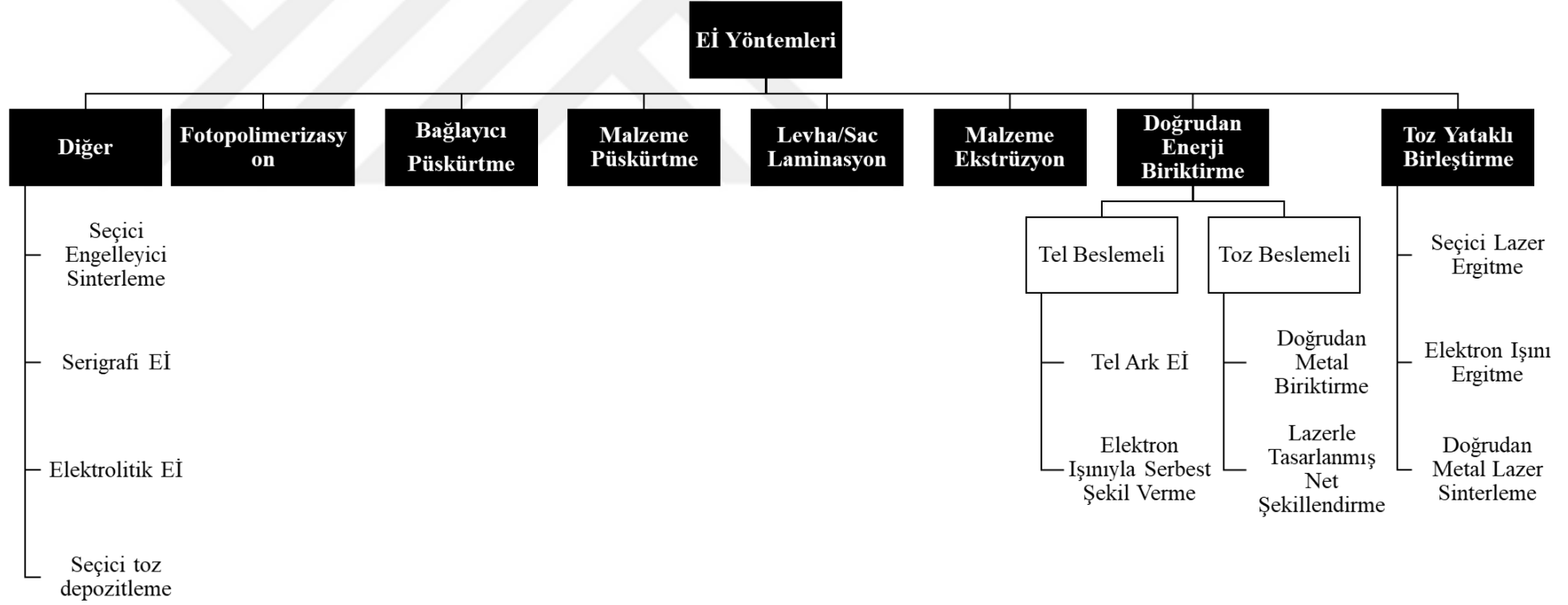
Çeşitli özellikleri yanında özellikle kişiselleştirilmiş ürün üretimi nedeniyle mücevherat ve kuyumculuk, saat ve takı, spor ürünleri, kişisel eşya veya ev eşyası sektörleri de metal Eİ teknolojisinin hedefi olan alanlardır.

2.6 Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eİ teknolojileri Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) Uluslararası Komitesi F42 tarafından fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme (material jetting- MJ), bağlayıcı püskürtme (binder jetting- BJ), malzeme ekstrüzyon (material extrusion- ME), toz yataklı birleştirme (powder bed fusion- PBF), sac/levha laminasyon (sheet lamination- SL), ve doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition- DED) yöntemleri olmak üzere yedi temel kategoriye ayrılmıştır (ASTM, 2022). Bahsi geçen Eİ yöntemlerinin tümü ile metalik malzeme üretimi yapılabilmektedir (Ahn, 2021; Caminero vd., 2021; Gong vd., 2018; Incus, 2022; Nandwana vd., 2017; Sasahara vd., 2005; Scheithauer, Pötschke, vd., 2017). Şekil 2.16’da endüstride kullanılan metal Eİ yöntemlerinin oranları görülmektedir (Vafadar vd., 2021). Şekilde görüldüğü üzere endüstride yaygın olarak kullanılan metal Eİ yöntemleri sırasıyla toz yataklı birleştirme, doğrudan enerji biriktirme, malzeme ekstrüzyonu, malzeme/bağlayıcı püskürtme yöntemleridir. Belirtilen yöntemlerde besleme stoğu olarak tel, filaman, levha, toz ve sıvı malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 2.17’de metal Eİ sınıflandırması verilmiştir.



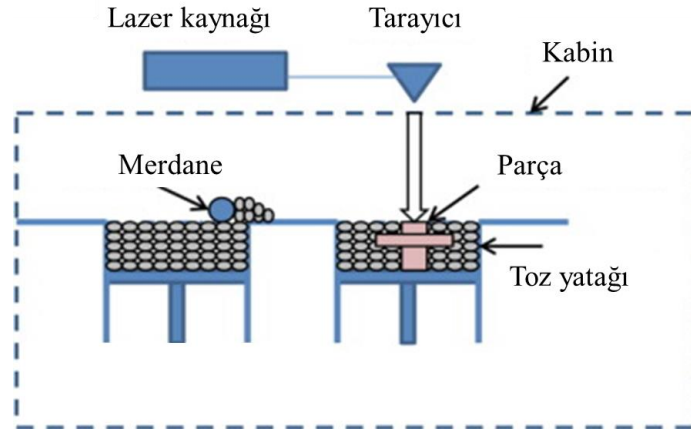
Şekil 2.12 Metal Eİ yöntemlerinin endüstrideki kullanım oranları (Vafadar vd., 2021)



Şekil 2.13 Metal Eİ üretim yöntemleri

2.6.1 Toz Yataklı Birleştirme

Metal Eİ teknolojileri içerisinde en yaygın kullanıma sahip olan yöntem toz yataklı birleştirmedir (powder bed fusion- PBF). Doğrudan metal lazer sinterleme (direct laser metal sintering- DMLS), seçici lazer ergitme (selective laser melting- SLM), elektron ışın ergitme (electron beam melting- EBM) ve doğrudan metal lazer ergitme (direct metal laser melting- DMLM) yöntemleri, yaygın olarak kullanılan PBF yöntemleri arasındadır. Tüm yöntemlerde temel olarak metal tozlarının bulunduğu bir besleme haznesi, hazneden alınan besleme tozunun ince bir katman halinde yazdırma işleminin yapılacağı yatak bölgesine iletilmesini sağlayan silindirik bir merdane ve metal tozlarının birbirine ergitme veya sinterleme ile birleşmesini sağlayan lazer veya elektron ışın kaynağı bulunmaktadır (Dev Singh vd., 2021; Vafadar vd., 2021). İlk olarak tozlar ince bir katman halinde yatağa serildikten sonra enerji kaynağı ile seçici olarak bölgeler birleştirilir ve ilk katman yazdırılmış olur. Ergitme veya sinterleme işleminden sonra hızla katılaşan birleşmiş tozlar ilk katmanı oluşturur. Sonrasında yatak pistonu bir katman kalınlığı kadar aşağı inerek, yeni toz katmanını önceki katman üzerine serilir ve ergitme veya sinterleme işlemi tekrarlanır. Bu şekilde katmanlar üst üste serilip enerji kaynağı ile seçici olarak birleştirilerek parça üretimi sağlanır. Yatakta bulunan ve ısıl işleme maruz kalmamış olan tozlar yazdırma işlemi sırasında parçaya destek görevi görür. İşlem sonunda ısıl işleme uğramamış tozlar parçadan ayrılarak tekrar kullanım için toplanır (Kok vd., 2018). PBF yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.14 PBF yöntemi (Wu vd., 2018)

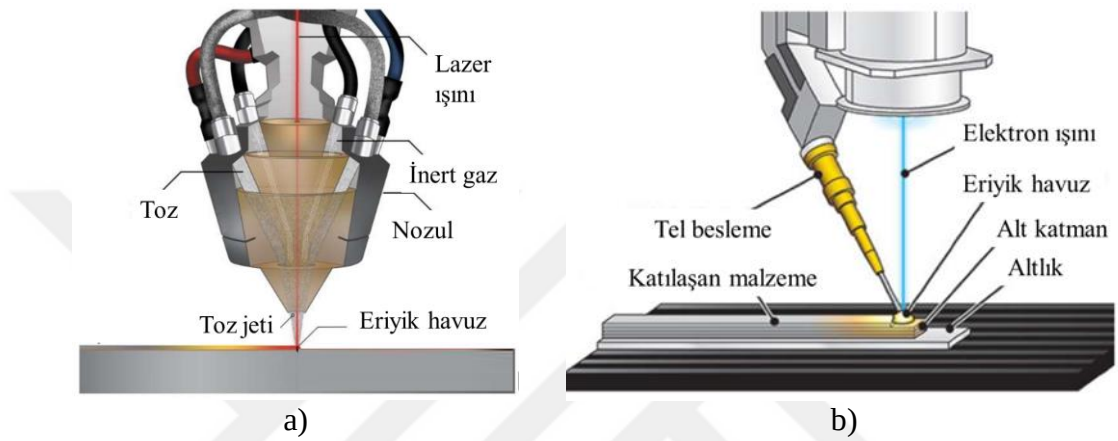
Nd-YAG, iterbiyum fiber ve karbondioksit lazer kaynakları bu teknolojiler için kullanılabilir. Her bir lazer kaynağı farklı dalga boyuna sahip lazer ışını üretmekte ve dalga boyu azaldıkça lazer enerjisi artmaktadır. DMLM ve SLM yönteminde tozların tamamen ergimesi amacıyla yüksek enerjili lazer kaynakları kullanılmaktadır (Delgado vd., 2011; Ekren vd., 2018). DMLS yönteminde metal partikülleri kısmen ergitilirken (sıvı faz sinterleme), SLM ve DMLM yöntemlerinde ise tamamen eritme sonucu bir metal havuzu oluşturulur (Kaleli vd., 2022). EBM yönteminde ise metal tozlarını birleştirmek için elektron kaynağı kullanılır. Bu yöntemin lazer yöntemlerine göre en büyük avantajı yüksek tarama hızıdır. Lazer yöntemlerinde tarama hızı 1200 mm/s, EBM’de ise 10^4 mm/s’ye kadar çıkabilmektedir. EBM yönteminde elektron hareketinin sağlanması için vakum ortamı oluşturulmak zorundadır fakat lazer yöntemlerde oksitlenmeyi önleyecek inert gazlar ile kontrollü atmosfer oluşturmak yeterlidir (Wu vd., 2018).

Lazer kaynaklı yöntemlerin en büyük avantajı %99 üzerinde yoğunluk elde edilmesi olmasına rağmen en büyük dezavantajı ise sinterleme/ergime sonrasında hızlı soğuma nedeniyle parçada bazı durumlarda malzemenin akma mukavemetinin %75’ine ulaşan artık gerilme miktarıdır. Bu nedenle işlem sonrası parçalara artık gerilmeleri gidermek amacıyla ikincil ısıtma işlemleri uygulanması yaygın bir uygulamadır (Rangaswamy vd., 2005; Vaezi vd., 2020). EBM yönteminde ise işlem 700 °C’ye kadar ulaşan yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden, lazer kaynaklı yöntemlere kıyasla artık gerilme sorununun önleendiği görülmektedir (Chastand vd., 2018).

2.6.2 Doğrudan Enerji Biriktirme

Doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition- DED) teknolojisinde parça üretimi, malzemenin biriktirilirken eritilmesi ile sağlanmaktadır. DED sistemleri genellikle inert gaz ortamında aktarılan malzemenin ergitilmesi için belirli bir alana odaklanmış enerji kaynaklarını içermektedir. Besleme malzemesi metal tozu veya tel şeklinde olabilmektedir. Enerji kaynağı olarak ise lazer, elektron ışını, plazma veya ark kullanılabilir. Toz yataklı birleştirme tekniklerinden farklı olarak DED

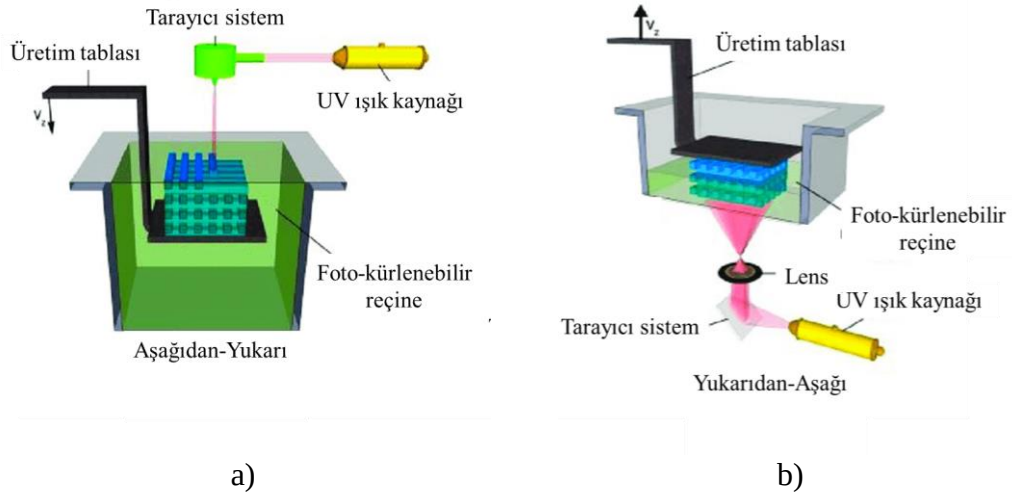
süreçleri, bir toz yatağına önceden serilmiş bir malzemeyi eritmek yerine, malzemeyi biriktirirken eritmek için kullanılır (Dass ve Moridi, 2019). DED teknikleri birçok yönden lazer kaplama ve plazma kaynak makineleriyle aynı şekilde kullanılabilir. Burada amaç onarım, birleştirme veya kaplama uygulamaları yerine 3B üretim yapmaktır. Toz ve tel beslemeli DED yöntemleri şematik olarak Şekil 2.19'da görülmektedir.



Şekil 2.19 a) Toz ve b) tel beslemeli DED yöntemleri (Selema vd., 2022)

2.6.3 Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon yönteminde çeşitli dalga boylarında ışınlar ile foto-kürlenene reçineler kullanılmaktadır. Reçine foto-kürlenebilir reçinenin bir hazneye doldurulması ile başlamaktadır. Işın kaynağının kontrolü veya maskeleme ile reçine katman katman kürlenerek parça üretimi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Şekil 2.20'de yukarıdan-aşağı veya aşağıdan-yukarı üretim sistemleri görülmektedir (Yalçın vd., 2017).



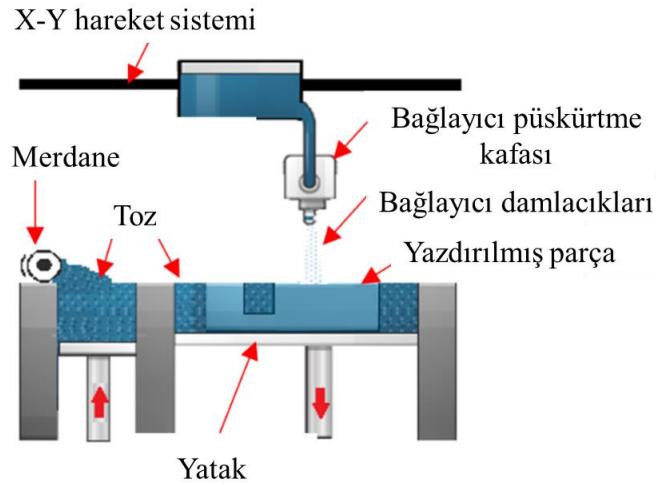
Şekil 2.20 a) Aşağıdan- yukarı ve b) yukarıdan- aşağı fotopolimerizasyon yöntemleri (Yao vd., 2017)

Aşağıdan-yukarı üretim sisteminde kürlleme işlemini sağlayan ışın reçine yüzeyine yukarıdan nüfuz ederek katılaşmayı sağlamaktadır. Platform, reçine yüzeyinden katman kalınlığı ölçüsünde aşağı hareket etmesi ve ışının bu kalınlıktaki reçineyi kürlmesi ile ilk katman katılaştırılmış olmaktadır. Bu işlemin tekrarı ile parça aşağıdan-yukarıya katmanların üst üste eklenmesi ile üretilmektedir. Yukarıdan-aşağı üretim yönteminde ise ışın reçine haznesine alt yüzeyden nüfuz etmektedir. Bu nedenle bu yöntemde reçine haznesinin tabanı ışının geçmesine olanak sağlayacak saydam malzemelerden üretilmektedir (Santoliquido vd., 2019; Yalçın vd., 2017; Yao vd., 2017).

Fotopolimerizasyon yöntemi ile metalik malzemelerin üretimi foto-kürlenebilir reçine ile metal tozlarının karıştırılması ile başlamaktadır. Karışım sonrasında yazdırılarak parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Parçanın ısıl işlemlere tabi tutulması ile bağlayıcı görevi gören kürlenmiş reçinenin bünyeden uzaklaştırılması ve sonrasında sinterlenmesi ile metalik parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile %95 yoğunluk değerine sahip metalik parçalar üretilebilmektedir (Roumanie vd., 2021).

2.6.4 Bağlayıcı Püskürtme

Bağlayıcı püskürtme (binder jetting- BJ) yöntemi PBF yöntemleri ile donanım açısından oldukça benzerlik göstermektedir. BJ yönteminde de toz haznesi ve tozun ince bir katman halinde serildiği yatak bulunmaktadır. Buradaki fark tozların birleştirilmesi için kullanılan sistemdir. PBF teknolojisinde lazer kaynakları veya elektron ışını tozların birleştirilmesi amacıyla kullanılırken, BJ yönteminde tozlar püskürtme kafasından damlacıklar halinde püskürtülen polimerik bağlayıcılar ile birleştirilir (Yalçın vd., 2017). İşlem sonunda parça metal tozları ve bunları bir arada tutan polimerik matrsten oluşmaktadır. Bu nedenle metalik parça eldesi için yazdırılmış parçanın bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Şekil 2.21’de BJ sistemi şematik olarak görülmektedir.

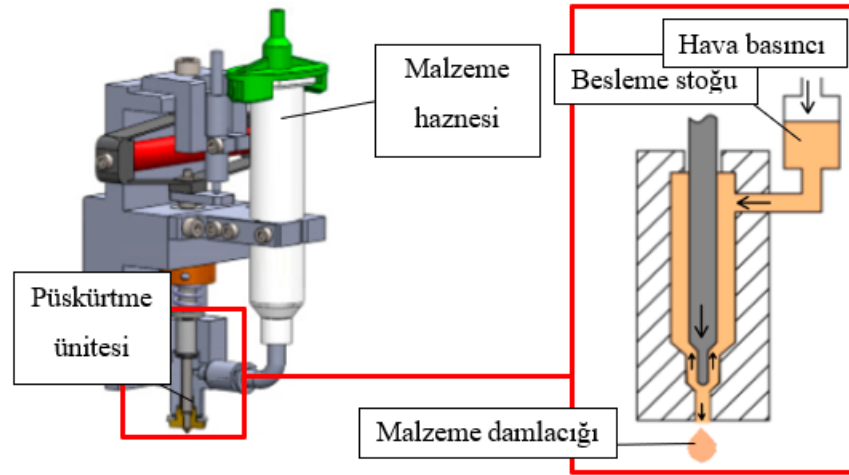


Şekil 2.21 BJ yöntemi (Vafadar vd., 2021)

%99 üzerinde yoğunluk elde edilebilen PBF yöntemi ile kıyaslandığında, BJ yönteminde %95-97 gibi daha düşük yoğunluk değerleri elde edilmesi, yöntemin en büyük dezavantajıdır (Vaezi vd., 2020). Diğer yandan bu yöntemde yazdırma sırasında parçayı destekleyecek destek yapılarına ihtiyaç duyulmamaktadır (Vafadar vd., 2021).

2.6.5 Malzeme Püskürtme

Malzeme püskürtme (material jetting-MJ) teknolojisi temel olarak sıvı damlacıkların seçici biriktirilmesine dayanır. Nano partikül mürekkep püskürtme, sıvı metal yazdırma ve aerosol püskürtme yöntemleri bu teknoloji içerisinde yer almaktadır. Nano partikül mürekkep püskürtme yöntemi temel olarak koloidal metal tozu partiküllerini içeren besleme stoğunun mikro-dozajlama sistemlerinde kullanılan püskürtme valfine iletimini ve bireysel damlacıklar halinde istenilen noktada zemine püskürtülerek biriktirilmesini içerir. Damlacıklar bağlayıcı görevi gören çeşitli bileşenler içerisinde koloidal süspansiyon oluşturan metal tozlarından oluşur. Damlacıkların zemine biriktirilmesi ile oluşan katman süspansiyon içerisindeki bağlayıcı türüne göre soğuma, ultraviyole (UV) ışık gibi çeşitli işlemlerle küreleme veya uçucu bileşenlerin sıcaklık ile buharlaştırılarak uzaklaştırılması gibi çeşitli kimyasal değişimler neticesinde katılaştırılır (Hon vd., 2008; Vaezi vd., 2020). Şekil 2.22’de püskürtme kafası ve şematik kesiti görülmektedir.

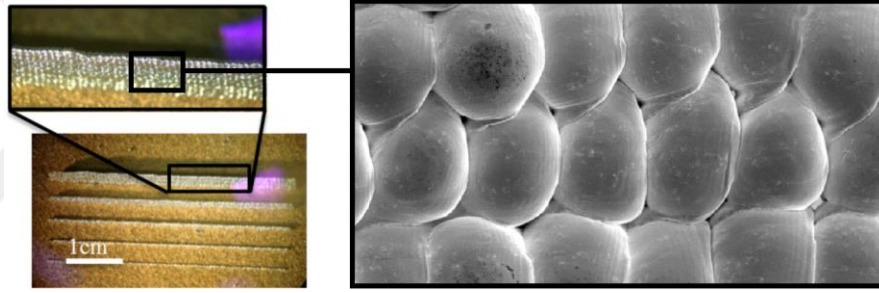


Şekil 2.22 Püskürtme kafası ve şematik kesiti (S. Lu vd., 2019)

Yöntem bağlayıcıların metal tozlarını bir arada tutması temeline dayandığından, yazdırma işlemi sonrasında bağlayıcıların giderilmesi ve sinterleme işlemleri gerekmektedir. Bu yöntem ayrıca birden çok püskürtme kafasının yazdırma işleminde kullanılması ile çoklu malzeme üretimine de olanak sağlamaktadır. Bu sayede metal-

seramik, yoğun- poroz yapılı malzemeler üretilebilmektedir (Scheithauer, Pötschke, vd., 2017; Scheithauer, Weingarten, vd., 2017; Weingarten vd., 2019).

Sıvı metal yazdırma yönteminde ise metalik malzeme ergitilerek, ergimiş metal damlacıklarının doğrudan tabanda biriktirilmesi ile yazdırma işlemi yapılır. Metalik besleme malzemesinin ergitilmesi ile üretim yapıldığından yazdırma sistemi yüksek sıcaklığa dayanıklı bileşenlerden oluşmalıdır ve genel olarak bu yöntemle Al alaşımları gibi düşük ergime noktalı metallerin yazdırılması yapılmaktadır. Ayrıca eriyik metal damlacıklarının katılaşması ile üretim yapıldığından, üretim sonrasında sinterleme gibi ikincil işlemlere gerek duyulmamaktadır (Tropmann vd., 2011; Vega vd., 2013). Şekil 2.23'te sıvı metal yazdırma yöntemi ile lehim telinden üretilmiş parça görüntüleri verilmiştir (Lass vd., 2013).



Şekil 2.15 Sıvı metal yazdırma yöntemi ile üretilmiş parça görüntüleri (Lass vd., 2013)

Malzeme püskürtme teknolojisi ile düşük poroziteye sahip ve teorik yoğunluğun %99'u oranında yoğun parçalar üretilebilmektedir (Spiller ve Fleischer, 2018; Yamaguchi vd., 2000).

2.6.6 Sac/Levha Laminasyon

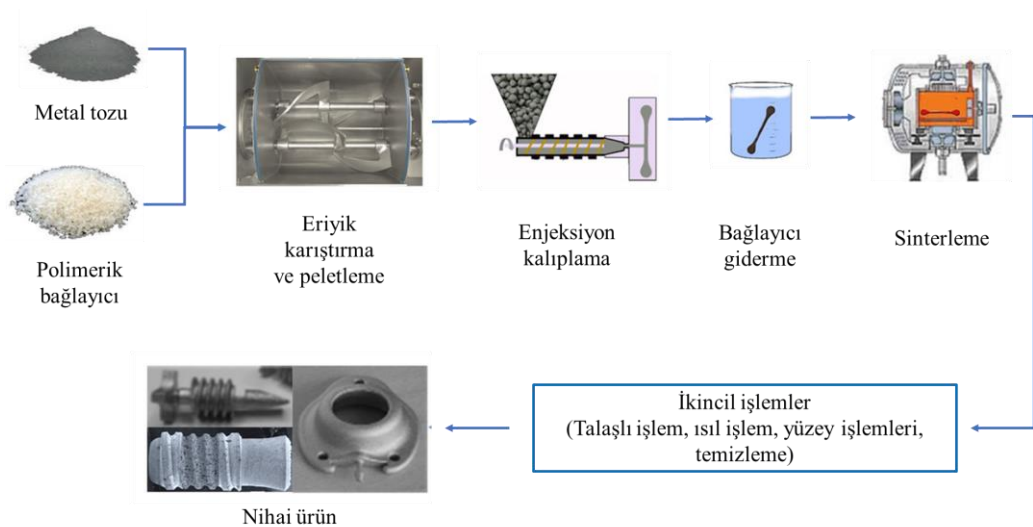
Sac/levha laminasyon (SL) yönteminde metalik levhalar bir tabla üzerine serilmektedir. Her bir levha serme işleminde, levhaların birbirine bağlanması amacıyla lazer, ultrasonik kaynaklama gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Belirli sayıda levha serim işleminden sonra katman talaşlı işlemler ile bilgisayar kontrollü olarak işlenmektedir. İşlenmiş katman üzerine levha serme ve talaşlı işlemlerin tekrarlanması ile metalik malzemelerin eklemeli imalatı yapılmaktadır. Yöntemde farklı

malzemeden üretilmiş levhaların kullanılması ile karmaşık geometriye sahip hibrit yapıların üretimi de yapılmaktadır (Gibson vd., 2010). Birbiri üzerine eklenen levhaların belirli bir kalınlığa ulaşmasından sonra talaşlı işlem yapılarak parçalar üretilebileceği gibi ilk başta levhadan istenilen desen ve geometriye sahip parçaların kesilmesi ve sonrasında bu levha parçalarının birbiri üzerine eklenmesi ve birleştirilmesi ile de üretim yapılabilir (Cedeño-Viveros vd., 2021).

2.6.7 Malzeme Ekstrüzyon

Malzeme ekstrüzyon (ME) yöntemi malzemenin seçici olarak depozitlenmesini içermektedir ve FDM olarak bilinmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı PBF yöntemlerinde kullanılan yüksek maliyetli lazer kaynakları, elektron ışın kaynakları veya vakum sistemi içermemesidir. Bu nedenle ME yöntemi metalik malzemelerin Eİ için kullanılabilecek düşük maliyetli yöntemler arasında bulunmaktadır (Fang vd., 2017).

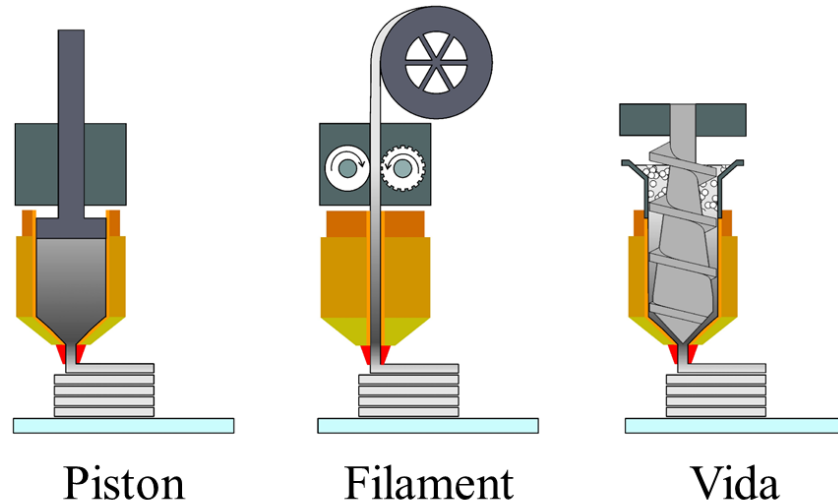
Yöntem esas olarak polimerik filamanların Eİ için geliştirilmiş olsa da geleneksel metal enjeksiyon kalıplama (MEK) yöntemi ile birleştirilmesi ile metalik malzemelerin Eİ için olanak sağlamıştır. MEK yöntemi işlem aşamaları Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.16 MEK yöntemi işlem aşamaları (Dehghan-Manshadi vd., 2020)

MEK yöntemi metalik tozların polimerik bağlayıcılarla eriyik olarak karıştırılması ile başlamaktadır. Karıştırma işlemi polimerik bileşenlerin erime sıcaklıklarının üzerinde, bozunma sıcaklıklarının altında olacak şekilde ayarlanmaktadır. İşlem sonrasında elde edilen karışım besleme stoğu olarak adlandırılmaktadır. Karıştırma işlemi sonrasında besleme stoğu kırma, öğütme vb. işlemler ile granül haline getirilmektedir. Granüller bir enjeksiyon makinesinde metalik kalıba iletilerek istenilen geometriye sahip parça elde edilmektedir. Şekillendirme işleminden sonra parça bünyesinde bulunan bağlayıcı polimer sisteminin uzaklaştırılması ve sonrasında parçanın sinterlenmesi ile metal parça üretimi gerçekleştirilmektedir (Huang vd., 2003).

Metal tozu/polimerik bağlayıcı karışımı besleme stoğu malzemesinin bir kalıba basılması yerine doğrudan bir tabla üzerine kontrollü ve katmanlı olarak depozitlenmesi ile ME temelli Eİ teknolojisi ortaya çıkmıştır. Burada ekstrüzyon işlemi piston, filament veya helezon bir vida yardımı ile gerçekleştirilebilmektedir (Gonzalez-Gutierrez vd., 2018). ME sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 2.25'te verilmiştir. Literatürde mevcut ME Eİ çalışmaları ile ilgili metal tozu, partikül boyutu, dolgu oranı ve bağlayıcı sistemi bilgileri içeren çeşitli çalışma örnekleri Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.17 ME yöntemi şematik gösterimleri (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018)

Tablo 2.1 ME Eİ çalışma örnekleri

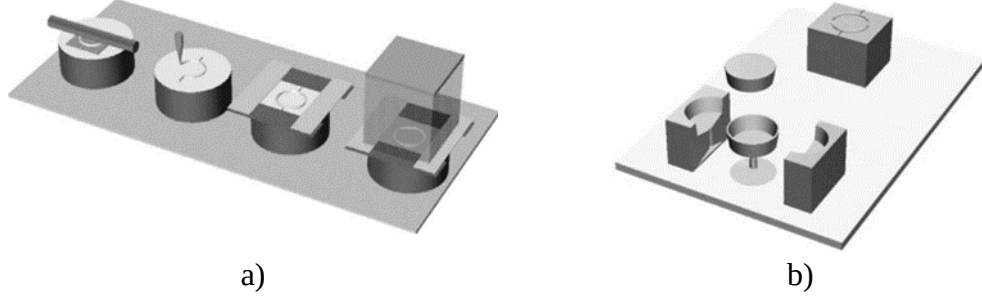
Metal	Partikül Boyutu (μm)	Dolgu Oranı (%)	Bağlayıcı Sistemi	Kaynak
Bakır	12-81	65	PW, LDPE, SA	(Ren vd., 2017)
Aisi630	-	79	PEG	(Annoni vd., 2016)
Bronz	10-40	87	PLA	(Z. Lu vd., 2020)
Ti6Al4v	45	66	Mitselüloz, SA	(J. P. Li vd., 2006)
SS 316L	-	60	PW, HDPE, asetikasit-vinil asetat copolimer, SA	(J. Li vd., 2010)
SS 316L	10	60	POM, PW	(Kurose vd., 2020)
SS 17-4PH	4,2-28,2	55	TPE, Poliolefin	(Godec vd., 2020)
Bakır	0,5	90 (%ağr.)	PW	(Yan vd., 2017)
Bakır	1	90 (%ağr.)	PW	(Yan vd., 2018)
Bakır	2-20	93,5 (% ağr.)	PW, PEG	(G. Singh vd., 2021)
Bakır	25, 106	50- 65 (% ağr.)	Polivinil karboksi polimer, PVA	(Hong vd., 2015)

2.6.8 Diğer yöntemler

Metal Eİ yöntemlerine her geçen gün yenisi eklenmektedir. Bu bölümde akademik, deneysel veya ticarileşme yolunda olan çeşitli metal Eİ yöntemleri ile ilgili çeşitli örnekler verilmiştir.

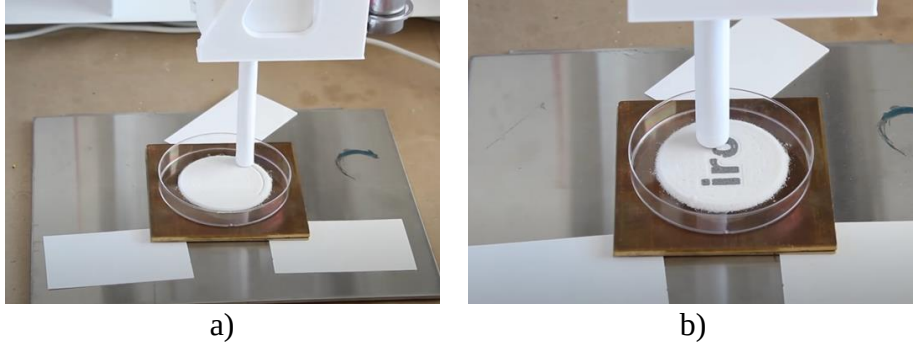
Seçici engelleyici sinterleme (selective inhibition sintering- SIS) yöntemi diğer Eİ yöntemlerinde olduğu gibi malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesini içermektedir. Yöntemde üretilecek parçanın tüm kesiti polimerik bir bağlayıcı ile kaplanmak yerine, bağlayıcıdan ziyade önleyici olarak adlandırılan ve sinterlemeyi geciktiren veya önleyen çözelti ile, şeklin dışına bir kabuk oluşturacak şekilde uygulanır. Önleyici olarak inorganik tuz veya sükroz çözeltileri, çeşitli asit çözeltileri, veya seramik çamurları bu amaçla kullanılabilir. Yazdırma işleminden sonra parça sinterlenir ve kabuk içerisinde işlem uygulanmamış metal partikülleri birbiri ile

sinterlenirken, önleyici uygulanan kabuk sinterlenmez (Khoshnevis vd., 2003, Khoshnevis vd., 2012). Bu sayede parça ayrılarak yüzey temizleme işlemi uygulanır. Şekil 2.26’da SIS yöntemi adımları görülmektedir.



Şekil 2.18 SIS yöntemi a) yazdırma işlemi ve b) parçanın çıkarılması (Khoshnevis vd., 2003)

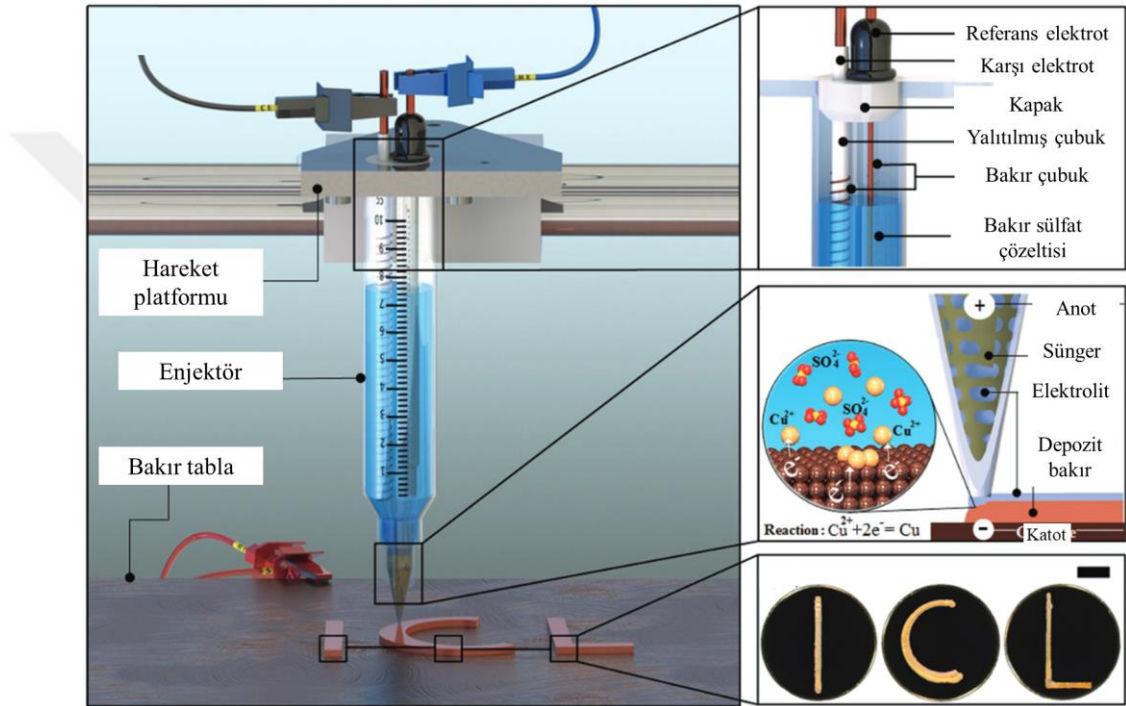
Seçici toz serme yönteminde ise (Iro3D) seramik bir kroze içerisine katmanlar halinde metal tozu ve çevresine seramik tozu serilmektedir. Bu yöntemde bağlayıcı kullanılmamaktadır. Seramik tozu, metal tozlarını destekleyici olarak işlev görmektedir. Tozlar bir kafa yardımı ile istenilen şekilde serildikten sonra fırında sinterlenerek metalik malzeme üretimi sağlanmaktadır (Iro3D, 2022). Şekil 2.27’de seçici toz serme işlem görüntüleri görülmektedir.



Şekil 2.19 a) Seramik tozu ve b) metal tozu depozitleme (Iro3d, 2022)

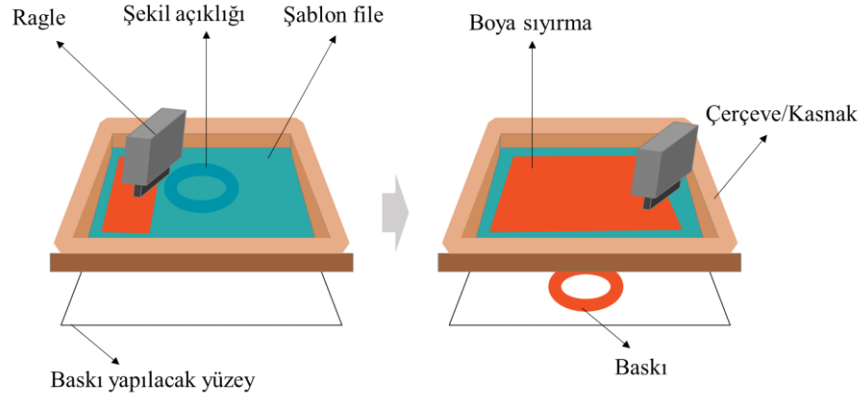
Elektrokimyasal metal Eİ yöntemi, geleneksel elektrolitik kaplama işleminin Eİ yöntemi ile birleştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde ekstrüder yerine içerisinde elektrolitik kaplama çözeltisi bulunan bir enjektör yerleştirilmiştir. Enjektörün piston kısmı çıkarılmış ve çözeltinin hızlıca akışını engellemek amacıyla enjektör ağzına sünger yerleştirilmiştir. Tabla negatif yüklenmiş (katot) ve enjektör

içerisindeki çözeltiye daldırılmış elektrot pozitif yüklenmiştir (anot). Enjektör ağzının tabla yüzeyine yaklaştırılması ve elektrolitik çözeltinin tabla ile temas etmesinden itibaren tablada (katotta) metal iyonlarının indirgenme reaksiyonları sonucunda metalik malzeme depozitlenmeye başlamaktadır. İşlem indirgeme reaksiyonları ile depozitlenen metalin belirli bir kalınlığa ulaşması ile bir üst katmanda aynı işlemin tekrarlanması ile metalik malzemenin üretimi sağlanmaktadır (Chen vd., 2017). Şekil 2.28’de bakır malzemenin elektrokimyasal üretimi görülmektedir.



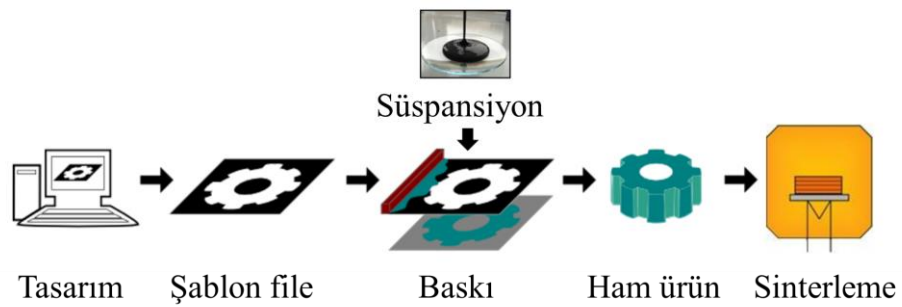
Şekil 2.28 Elektrokimyasal metal Eİ yöntemi (Chen vd., 2017)

Serigrafi metal Eİ yöntemi, ipek baskı olarak da bilinen serigrafi yönteminin üst üste tekrarlanması ile yapılmaktadır. Geleneksel serigrafi yöntemi genellikle tekstil yüzeylerine boya baskılama amacı ile kullanılan bir yöntemdir. Baskı yapılacak yüzey düz bir zemin üzerine yerleştirilerek üzerine istenilen şekil açıklığına sahip olacak şekilde maskelenmiş file konulur. Filenin üzerine bir miktar boya yerleştirilerek ragle adı verilen sıyrıcı aparat yardımı ile boya file yüzeyine uygulanır. Boya, filenin maskelenmemiş bölgelerindeki açıklıklardan geçerek yüzeye ulaşır ve baskı işlemi gerçekleştirilmiş olur (Yoon vd., 2022). Serigrafi yöntemi Şekil 2.29’da görülmektedir.



Şekil 2.29 Serigrafi yöntemi (Yoon vd., 2022)

Serigrafi metal Eİ yönteminde ise boya yerine metal tozu içeren polimerik bir pasta kullanılır. İşlem geleneksel yöntemde olduğu şekliyle uygulanır. Katman yüzeye uygulandıktan sonra ayrı bir bölgeye alınarak ısıtılarak katılaşır ve ilk katman uygulanmış olur. İşlemin sürekli olarak tekrarlanması ile katmanlar üst üste oluşturulur. İşlem sırasında tek bir file kullanılması durumunda malzemenin kesiti sabit kalacağından karmaşık şekilli parçaların üretimi için üretim sırasında farklı kesitler şeklinde maskelenmiş çok sayıda file kullanılması gerekmektedir (Jurisch vd., 2015). Serigrafi metal Eİ yöntemi Şekil 2.30’da görülmektedir.



Şekil 2.30 Serigrafi metal Eİ yöntemi (Jurisch vd., 2015)

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

Bu çalışmada gaz atomize, ağırlıkça %10 Sn içeriğine sahip Cu-Sn alaşım tozu kullanılmıştır. Metal tozları Molchem Kimyasal Teknolojileri firmasından temin edilmiştir. Besleme stoğu içeriğinde yer alan polimerler; Polipropilen (PP) ve polietilen wax (PE-W) İMS Makine firmasından temin edilmiştir. PP iskelet yapı polimeri olarak, PE-W ise ana bağlayıcı olarak çalışma kapsamında kullanılmıştır. N-hekzan çözeltisi ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$) Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Stearik asit (SA) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) Tekkim firmasından temin edilmiştir.

Granül ekstrüder imalatında kullanılan adım motoru, metal distans, kaplin, çeşitli cıvata ve somun gibi bileşenler çeşitli yerel firmalardan temin edilmiştir. Metal sac aparatlar ve çelik kovan bileşenleri yerel firmalarda kesim ve talaşlı işlemler ile üretilmiştir.

3.2 Besleme Stoğunun Hazırlanması

Besleme stoğu 190 °C sıcaklıkta eriyik karıştırma yöntemiyle hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi mekanik karıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Eriyik karıştırma işlemi için silindirik çelik bir kap temin edilmiş, bu kabın yan yüzeyleri rezistans ile çevrelenmiştir. Sıcaklık; oransal, integral, türev kontrolüyle sıcaklığın sabit tutulmasını sağlayarak daha istikrarlı bir proses imkanı sunan sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak sağlanmıştır. Sıcaklık ölçümü için J tipi (demir-konstantan) ısı çifti kullanılmıştır.

Polimerik bileşenler; PP ve PE-W, CuSn10 metal tozu ve SA kap içerisine konularak sıcaklık 190 °C'ye getirilmiş ve mekanik karıştırıcı yardımıyla 30 dk. süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma sonrasında hazırlanan eriyik, yağlı kağıt üzerine dökülerek oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına soğuyan polimer-

metal tozu karışımı sonrasında kırma, öğütme işlemlerinden geçirilerek granül haline getirilmiştir. Granül boyutlarının belirli bir aralığa getirilmesi amacıyla 1,7 mm ve 1 mm arasına eleme işlemi yapılmış ve yazdırma için besleme stoğu elde edilmiştir.

Besleme stoğu içeriğindeki CuSn10 metal tozu dolgu oranı ise toz özelliklerinden yola çıkılarak belirlenmiştir. Besleme stoğu içeriğine katkılanabilecek metal tozu miktarı, toz karakteristiğine bağlıdır. Bir tozun yığın yoğunluğu, belirli bir süre tozun belirli ölçülerdeki kaplarda vibrasyona uğramasından sonra tozun kütlesinin, tozun kapladığı hacme oranıdır ve Eşitlik 3.1'e göre hesaplanabilmektedir (S. S. Singh vd., 2018).

$$Yığın\ yoğunluğu\ (g/ml) = \frac{M}{V_f} \quad (3.1)$$

Burada M ölçüm yapılan gram cinsinden ağırlığını, V_f ise yığılmış tozun mililitre cinsinden hacmini ifade etmektedir. Yığılmış haldeki toz, herhangi bir dış etki (yük, sıkıştırma) olmadan partiküllerin birbiri üzerinden hareketi ile sahip olacağı sıkı paket halini tanımlamaktadır. Sıkı paket durumunda toz partikülleri arasında bulunan boşluk miktarı, besleme stoğu göz önüne alındığında bağlayıcı karışımı ile doldurulabilecek kısımdır ve bu değer tozun yığın yoğunluğunun bulk yoğunluğuna bölünmesi ile hesaplanmaktadır ve kritik katkı oranı olarak adlandırılmaktadır. Kritik katkı oranı hesabı Eşitlik 3.2'de verilmiştir (D. Li et al., 2019).

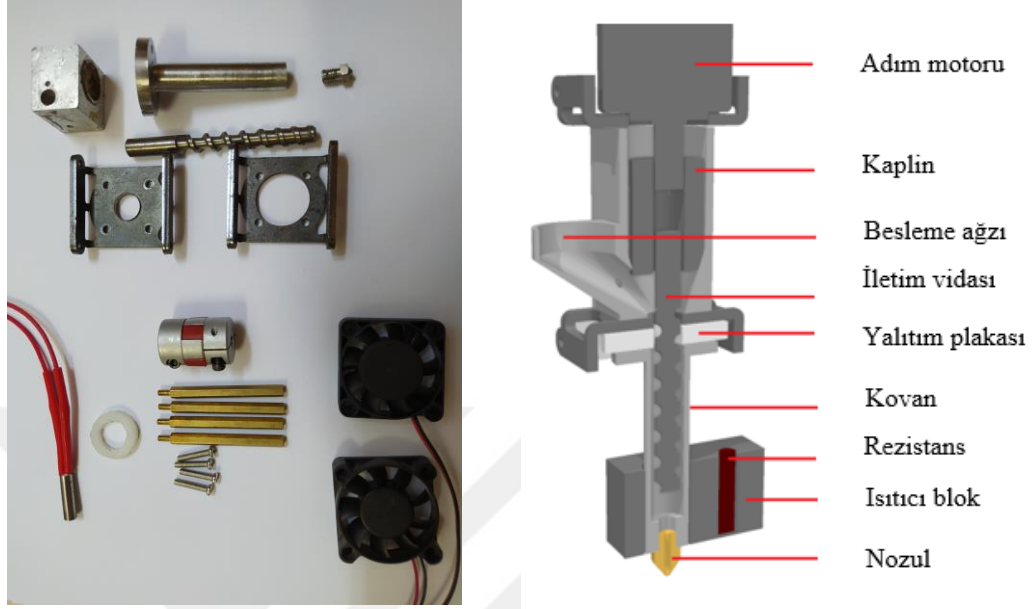
$$\varphi_c = \rho_t / \rho \quad (3.2)$$

Burada ρ_t tozunun yığma yoğunluğu, ρ ise tozun bulk yoğunluğunu ifade etmektedir.

3.3 Granül Ekstrüder İmalatı

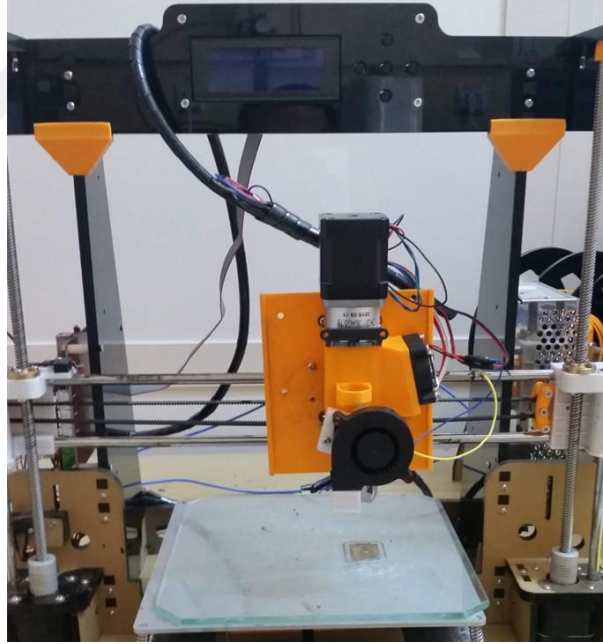
Besleme stoğunun 3B yazdırılabilmesi amacıyla yazıcının filaman ekstrüder kısmı, çalışma kapsamında üretilen granül ekstrüder ile değiştirilmiştir. Granül ekstrüder

parçaları, ekstrüderin şematik gösterimi ve 3B yazıcıya montajı sırası ile Şekil 3.1 a, b ve c’de gösterilmiştir.



a)

b)



c)

Şekil 3.1 a) Granül ekstrüder parçaları, b) ekstrüder çizimi ve c) ekstrüder montajı (Kişisel arşiv, 2022)

3.4 Ekstrüzyon Kalibrasyonu

FDM yönteminde bireysel hatların seçici ve ardışık depozitlenmesi ile parça oluşumu sağlanmaktadır. Kararlı ve homojen ekstrüzyon bu yöntemde son ürün özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. 3B yazıcı normal olarak polimerik filamanların FDM uygulaması için geliştirildiğinden ekstrüzyon kafasının değiştirilmesi ile mevcut sistem granül ekstrüzyonu ile uyumsuzluk gösterecektir. Granül besleme sisteminde iletim vidasının döndürülmesi ile malzeme iletimi yapılmaktadır ve yazdırma hızı ile vida hızı kalibre edilerek birbiri ile uyumlu hale getirilmelidir. Bu amaçla bireysel depozitlenmiş hatların sürekliliği göz önünde bulundurularak vida hızı ve yazdırma hızı birbiri ile uyumlu olacak şekilde ayarlanmıştır.

3.5 Yazdırma İşlemleri

Yazdırma işlemleri Anet/A8 marka/model 3B yazıcıda yapılmıştır. Yazıcı 220*220*220 mm (x*y*z) yazdırma kapasitesine sahip, yazdırma hassasiyeti 0,1 mm olan kartezyen tipi bir 3B yazıcıdır.

Yazdırma işlemlerinde kullanılacak G-code uzantılı dosyalar, açık erişimli Cura dilimleme programı kullanılarak üretilmiştir. Nozul sıcaklığı 210 °C, 1 dış katman, 45° açılı doğrusal doldurma ve %100 doluluk oranı parametreleri tüm yazdırma işlemleri için sabit tutulmuştur. Yazdırma işlemlerinde 0,6 mm ağız açıklığına sahip nozul kullanılmıştır. Ekstrüzyon sırasında nozul aşınmasını en aza indirmek ve nozul çapı değişimini engellemek amacı ile, yazdırma işlemlerinde çelik nozul kullanılmıştır.

Fan kullanımının yazdırma işlemi üzerindeki etkisinin incelenmiştir. Ayrıca katman kalınlığı ve yazdırma hızının yazdırılmış ürün özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla sırası ile 0,2-0,6 mm katman kalınlıkları ve 20-60 mm/s yazdırma hızlarında çalışmalar yapılmıştır.

3.6 Bağlayıcı Giderme İşlemleri

Besleme stoğu içeriğindeki polimerik bileşenlerin giderilmesi iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada ana bağlayıcı olan PE-W giderme işlemi yapılmıştır. PE-W giderme işlemi, yazdırılmış numunelerin hekzan çözeltisi içerisine konulması ve 60 °C’de bekletilmesi ile yapılmıştır. Bekleme süresi 24 saate kadar incelenmiştir. Hekzan/numune oranı 10 mL/dk olarak ayarlanmıştır. Çözelti içerisindeki bağlayıcı giderme işlemi süresince belirli aralıklarla numuneler çözeltiden çıkarılmış, 12 saat süreyle havada kurutulmuş ve ağırlık ölçümleri alınmıştır. Bağlayıcı giderme oranı (W_d) Eşitlik 3.3 göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

$$W_d(\%) = \frac{(W_i - W)}{W_i} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada W_i yazdırılmış numune içeriğindeki PE-W miktarını, W ise bağlayıcı giderme işlemi sonrası numunenin kuru ağırlığını ifade etmektedir. Bu ölçümler sonucunda PE-W kaybının zamana bağlı değişimi grafik haline getirilmiştir.

Bağlayıcı giderme işleminin ikinci aşaması olan PP giderme işlemi ise sinterleme işlemi sırasında gerçekleştirilmiştir.

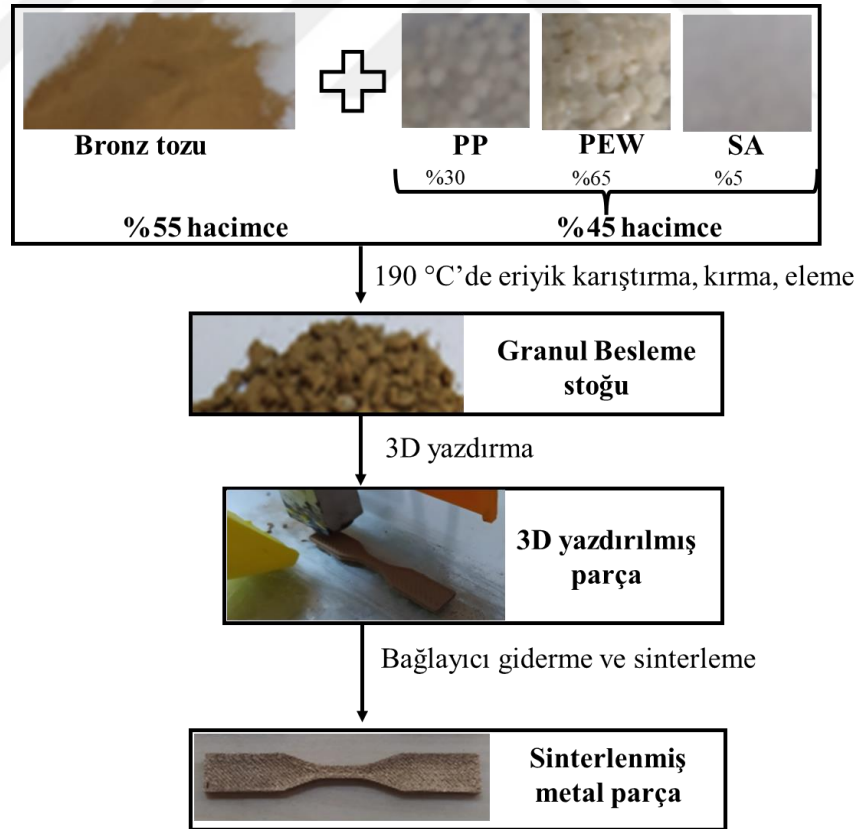
3.7 Sinterleme İşlemleri

Sinterleme işlemleri Protherm/PFL-160 marka model kutu fırında atmosfer şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı giderme işleminden sonra numuneler alumina kap içerisine yerleştirilmiş ve ısıtma sırasında numunelerin oksitlenmesini önlemek amacı ile üzerleri grafit tozu ile kaplanmıştır. Oda sıcaklığında fırına yerleştirilen numuneler 1 °C/dk ısıtma hızı ile 550 °C’ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat beklenilmiştir. Burada amaç bağlayıcı giderme işleminden sonra bünyede bulunan PP içeriğinin uzaklaştırılmasıdır. Sonrasında 3 °C/dk ısıtma hızı ile sinterleme sıcaklığına çıkılmıştır. Sinterleme sıcaklığı ve süresinin son ürün özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacı ile 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1, 5 ve 10 saat değişken sürelerde sinterleme yapılmıştır.

Sinterleme işlemleri sonrasında numunenin azdırılmış şeklini hangi ölçüde koruduğunun değerlendirilmesi amacı ile şekil stabilitesi ölçümleri yapılmıştır. 8*8 (d*h) ölçülerinde yazdırılmış numuneler sinterlendikten sonra Eşitlik 3.4'e göre distorsiyon parametresi (δ) değerleri hesaplanmıştır.

$$\delta = \left[100 \times \left(\frac{h_0 \times \bar{r}}{\bar{h} \times r_0} \times 10^{\left(\frac{\sigma_r + \sigma_h}{r_0 + h_0} \right)} - 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

Burada r_0 ve h_0 sırası ile yazdırılmış numunenin yarıçap ve yükseklik değerleridir. $\bar{r}$ ve $\bar{h}$ sırası ile distorsiyona uğramış numunenin ortalama yarıçap ve yükseklik değerleridir. σ_r ve σ_h ise sırası ile sinterlenmiş numunenin ölçülen yarıçap ve yükseklik değerlerinin standart sapmasını ifade etmektedir (Sengupta et al., 2020; Upadhyaya & German, 1998). Genel 3B üretim işlem adımları Şekil 3.2'de görülmektedir.



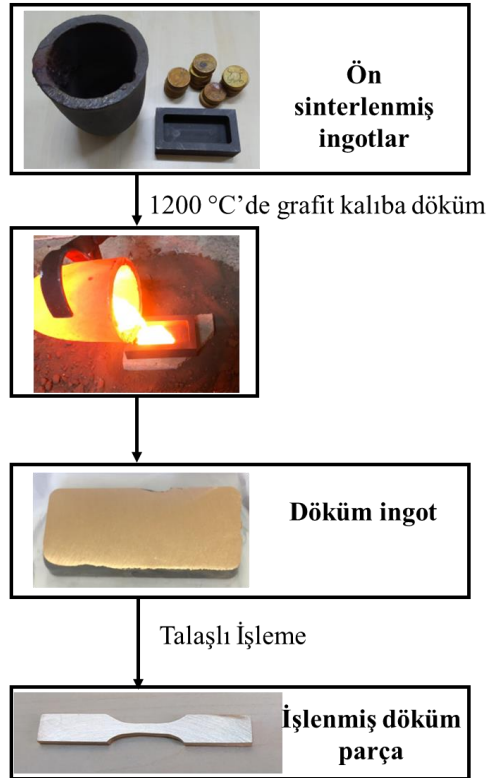
Şekil 3.2 3B üretim işlem adımları

3.8 Partikül Boyutu Etkisi

Besleme stoğu içeriğinde bulunan CuSn10 metal toz boyutunun son ürün özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacı ile üç farklı toz boyutu kullanılmıştır.

3.9 Döküm İşlemleri

3B üretim yönteminin geleneksel üretim yöntemleri ile kıyaslanması amacıyla çalışma kapsamında döküm işlemleri de yapılmıştır. Döküm işlem adımları Şekil 3.3'te görülmektedir. Döküm işlemlerinde, 3B üretiminde kullanılan CuSn10 tozları kullanılmıştır. Malzemenin toz halinde olması döküm işleminde oksitlenme ihtimalini artıracığından tozlardan öncelikle ön sinterlenmiş silindirik metal ingotlar üretilmiştir. Sonrasında bu ingotlar grafit potaya konularak Protherm/PFL-160 fırında 1200 °C'de yarım saat beklenerek ergime sağlanmıştır. 500 °C'ye ön ısıtılmış grafit ingot kalıbına döküm yapılarak döküm ingot elde edilmiştir. Döküm ingotun talaşlı işlenmesi ile test numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 3.3 Döküm işlem adımları

3.10 Karakterizasyon

3.10.1 Partikül Boyut Ölçümleri

Partikül boyut ve dağılımı ölçümleri Horiba/LA-950 partikül boyut dağılım analizi cihazı ile yapılmıştır. Şekil 3.4'te partikül boyut dağılım analizi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.4 Partikül boyut dağılım analizi cihazı (Kişisel arşiv, 2022)

3.10.2 Viskozite Ölçümleri

Besleme stoğu numunelerinin viskozite ölçümleri Dynisco/LCR-7001 marka/model kapiler reometre ile 170 °C'de piston hızı 1 mm/s- 75 mm/s aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te kapiler reometre görülmektedir.



Şekil 3.5 Kapiler reometre (Kişisel arşiv, 2022)

3.10.3 Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analizler (TGA/DTA)

Yazdırma sıcaklığının ve sinterleme ısıl işlem profilinin belirlenmesi amacı ile TG/DTA analizi kullanılmıştır. CuSn10 tozların ve besleme stoğunun ısıl davranışları Shimadzu/DTG-60H marka/model TG/DTA cihazı kullanılarak incelenmiştir. Analizler 10 °C/dk ısıtma hızında ve malzemelerin oksitlenmesinin önlenmesi amacı ile azot gazı atmosferinde yapılmıştır. Şekil 3.6' TG/DTA cihazı görülmektedir.



Şekil 3.6 TG/DTA cihazı (Kişisel arşiv, 2022)

3.10.4 X-ışınları Kırınımı (XRD)

Metalik tozların ve sinterleme sonrası numnelerin faz yapıları Rigaku/D-Max-2200PC marka/model X-ışınları Kırınımı ile incelenmiştir. Ölçümler 3°-90° 2θ aralığında, Cu-K α ($\lambda=1,5406$ Å) ışınması, 4°/dakika tarama hızı ve 1,44 kW güç kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.7'de XRD cihazı görülmektedir.



Şekil 3.7 XRD cihazı (Kişisel arşiv, 2022)

3.10.5 Morfolojik İncelemeler

CuSn10 metal tozlarının, yazdırılmış, bağlayıcı giderilmiş ve sinterlenmiş numunelerin yüzey ve kesit morfolojileri, çekme deneyi sonrası numunelerin hasar yüzeyleri ve aşınma deneyleri sonrası aşınma bölgeleri Jeol/JSM-6060 marka/model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Aşınma deneyleri sonrası aşınma türünün belirlenmesi amacıyla SEM cihazına bağlı IXRF System-500 Enerji Saçılım Spektrometre (EDS) dedektörü ile aşınma bölgelerinin elemental analizleri yapılmıştır. Sinterlenmemiş numunelerde inceleme öncesinde numune yüzeyleri püskürtümlü kaplama cihazı (sputter coater) kullanılarak Au-Pd ile kaplanmıştır. Şekil 3.8’de sırasıyla a) püskürtümlü kaplama cihazı, b) SEM gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.8 a) Püskürtümlü kaplama cihazı, b) SEM (Kişisel arşiv, 2022)

3.10.6 Mikroyapı İncelemeleri ve Porozite Ölçümleri

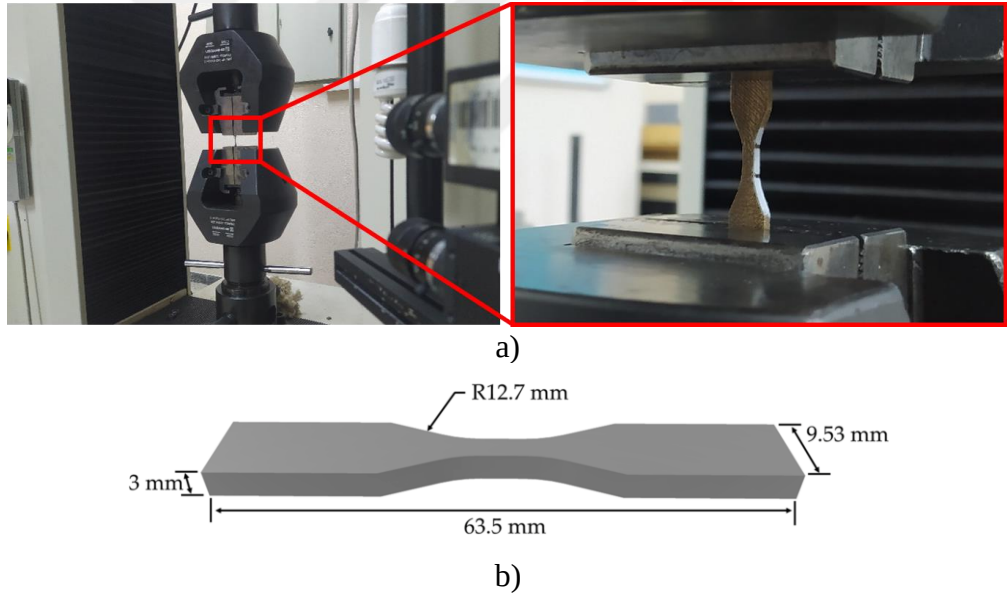
Mikroyapı incelemesi öncesi numuneler 80 gritten başlayarak 1200 grite kadar zımparalanmış ve sonrasında 3 mikron elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Numuneler 2 g $FeCl_3$, 5 ml HCl, 30 ml saf su ve 60 ml etanol kullanılarak hazırlanmış çözelti ile dağlanmış. Dağlanmış numunelerin optik incelemeleri metal mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Porozite miktarları mikroyapı görüntülerinin görüntü analiz programı kullanılarak ölçülmüştür.

3.10.7 Yoğunluk Ölçümleri

CuSn10 tozların piknometre yoğunluğu Micromeritics/Accupyc II-1340 helyum gaz piknometresi kullanılarak belirlenmiştir. Tozların yığın yoğunlukları ise ASTM B962-17 standardına uygun olarak ölçülmüştür.

3.10.8 Mekanik Özellikler

Sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleri çekme testi ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Çekme testi 250 kN kapasiteli Shimadzu/AG-IS marka/model universal test cihazı ile 1mm/dk çekme hızında yapılmıştır. Uzama miktarı temassız ekstansometre ile (DVE-101/201) ölçülmüştür. Çekme cihazı ve çekme numunesi ölçüleri Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9 a) Çekme cihazı, b) çekme numunesi ölçüleri (Kişisel arşiv, 2022)

Sertlik ölçümleri ise sinterlenmiş ve parlatılmış numune yüzeylerine uygulanmıştır. Ölçümler Shimadzu/HMV-2T Vickers sertlik cihazında, 2,94 N yük ve 10 s uygulama süresi ile yapılmıştır. Ölçüm sonuçları 5 ölçümün ortalaması olarak verilmiştir.

3.10.9 Aşınma Davranışı

Numunelerin tribolojik davranışları ileri-geri pin-on-plate aşınma testi ile incelenmiştir. Aşınma testleri 6mm çaplı 100Cr6 çelik bilya karşı malzeme kullanılarak CMS Instrumens/Standart tribometer marka/model test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Testler oda koşullarında 5N normal yük altında, 10mm aşınma mesafesinde ve 0.01 m/s kayma hızında yapılmıştır. 100 m aşınma mesafesinde deneyler sonlandırılmıştır. Aşınma testi sonrasında numunede ve bilyada oluşan aşınma izleri SEM kullanılarak incelenmiş ve aşınma tipi belirlenmiştir. Şekil 3.10’da aşınma test cihazı görülmektedir.



Şekil 3.10 Aşınma test cihazı (Kişisel arşiv, 2022)

Aşınma izlerinin yüzey profili Ambios Technology/XP-2 marka/model profilometre kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3.11’de profilometre görülmektedir.



Şekil 3.11 Profilometre (Kişisel arşiv, 2022)

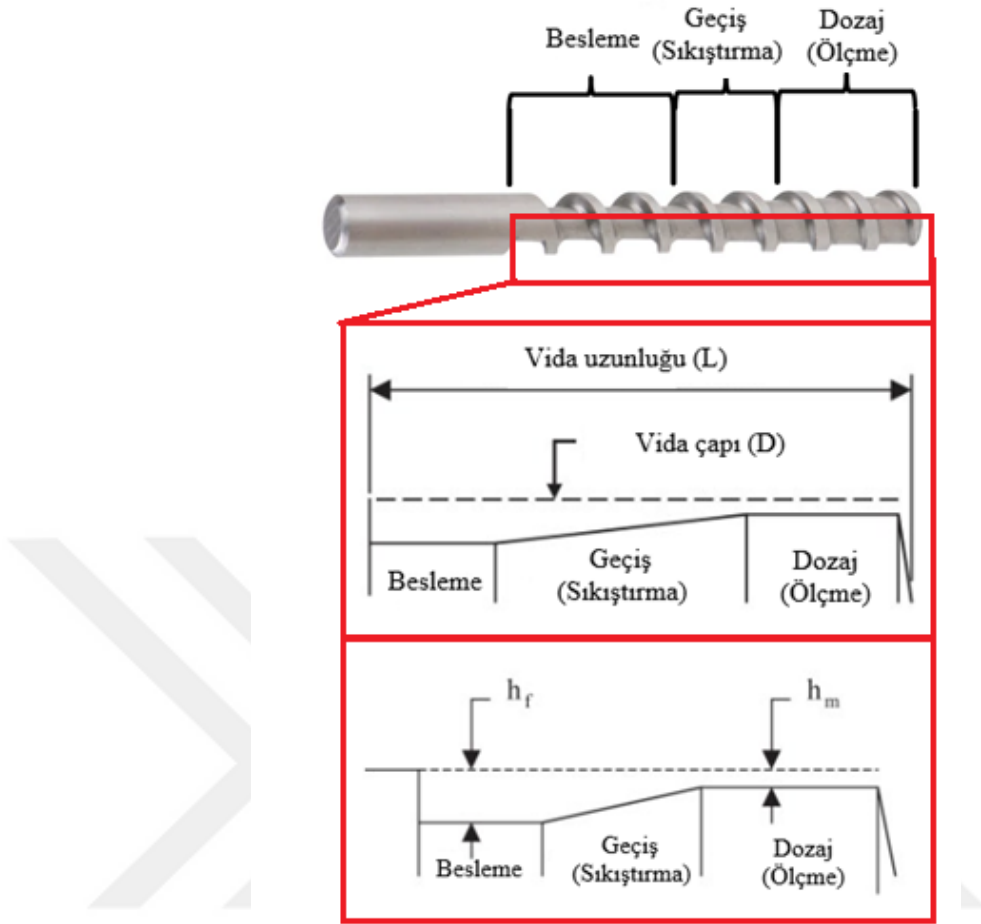
BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 Granül Ekstrüder İmalatı

Granül ekstrüderin en önemli bileşeni malzemenin ekstrüzyon ağzına iletilmesini sağlayan iletim vidasıdır. İletim vidası Şekil 4.1’de görülmektedir. Çalışmada kullanılan iletim vidası üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler malzemenin vidaya ilk temas ettiği kısımdan itibaren sırası ile besleme, geçiş (sıkıştırma) ve dozaj (ölçme) bölümleridir. Besleme bölümü malzemenin vida ile ilk temas ettiği, dış derinliğinin en fazla olduğu bölümdür. Dış derinliği bölüm boyunca sabittir. Bu bölümün amacı sisteme yüklenen malzemenin iletilmesidir. Malzeme iletimi vidanın iç yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Geçiş (sıkıştırma) bölümünde ise dış derinliği kademeli olarak azalmaktadır. Bu bölümde besleme bölümünden gelen malzeme sıkıştırılmaktadır. Malzemenin erimeye başlaması ile granüller arasında bulunan boşluklardan kaynaklı havanın besleme bölümüne geri iletimi yine bu bölümde gerçekleşmektedir. Dozaj (ölçme) bölümü dış derinliğinin sabit ve minimum olduğu vidanın son bölümüdür. Bu bölümden sonra malzeme ekstrüzyonu gerçekleşmektedir (Fukushima vd., 2010; Q. He vd., 2021).

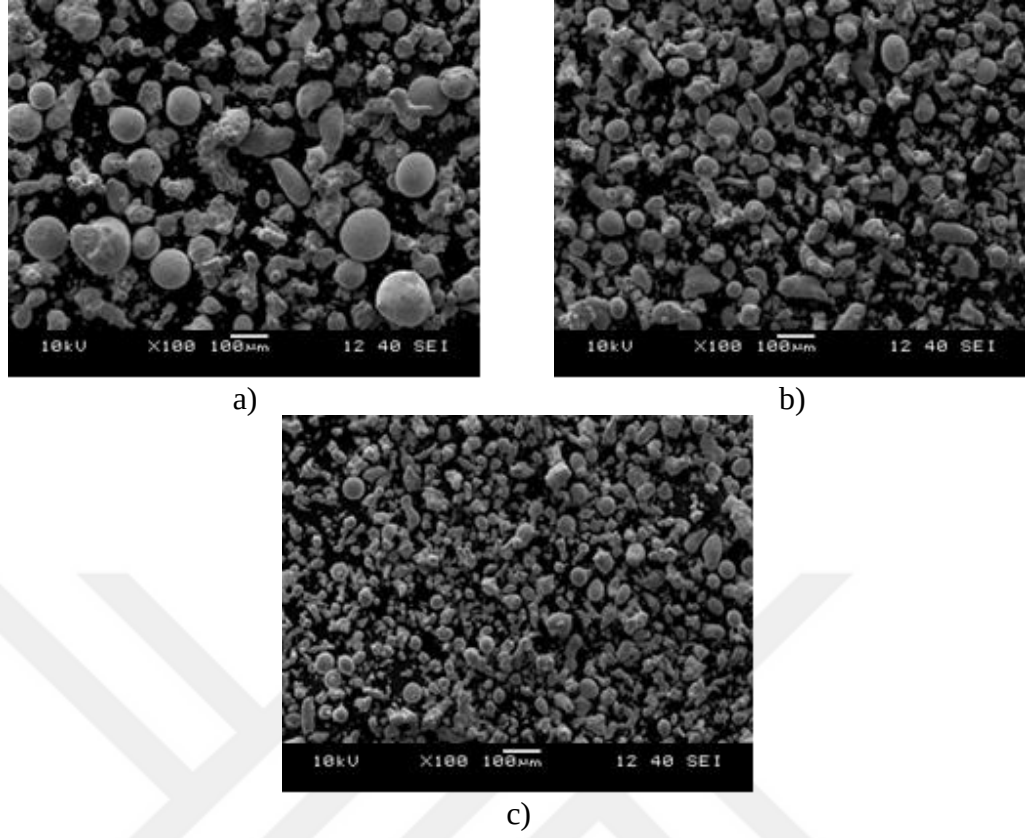
İletim vidasında en önemli iki etken vidanın L/D oranı ve sıkıştırma oranıdır. Bu iki etkenin önemi malzemenin tam olarak ergimesi ve homojen şekilde ekstrüzyonudur. L vida uzunluğu, D ise vida dış çapıdır. Çalışmada kullanılan vida boyu 80 mm ve vida dış çapı 8mm ve L/D oranı ise 10:1’dir. Sıkıştırma oranı besleme bölümündeki dış derinliğinin (h_f), ölçme (dozaj) bölümündeki dış derinliğine (h_m) oranı ile (h_f/h_m) belirlenmektedir. Çalışmada kullanılan vidanın besleme bölümü dış derinliği 1,75 mm ve dozaj (ölçme) bölümünde dış derinliği ise 0,85 mm olduğundan sıkıştırma oranı 2 olarak hesaplanmaktadır. Sıkıştırma oranının 2:1-3:1 arasında olması önerilmektedir ve çalışmadaki değer önerilen aralıktadır (Q. He vd., 2021). Şekil 4.1’de ekstrüzyon vidası ve bölümleri görülmektedir.



Şekil 4.1 Ekstrüzyon vidası ve bölümleri (Q. He vd., 2021)

4.2 Toz Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında temin edilen CuSn10 metal tozlarının SEM görüntüleri Şekil 4.2 a, b ve c’de görülmektedir ve tozlar sırası ile P107, P63 ve P38 olarak kodlanmıştır. Tozlar gaz atomize olarak temin edilmesine rağmen yapının küresel ve karmaşık şekilli tozların karışımından oluştuğu görülmektedir. Tozların partikül boyut dağılımları, yığın ve piknometre yoğunluk değerleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

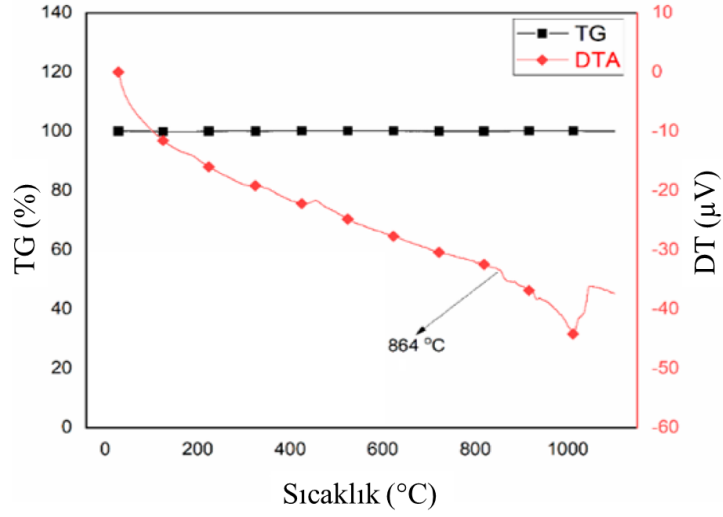


Şekil 4.2 a) P107, b) P63 ve c) P38 tozlarının SEM görüntüleri

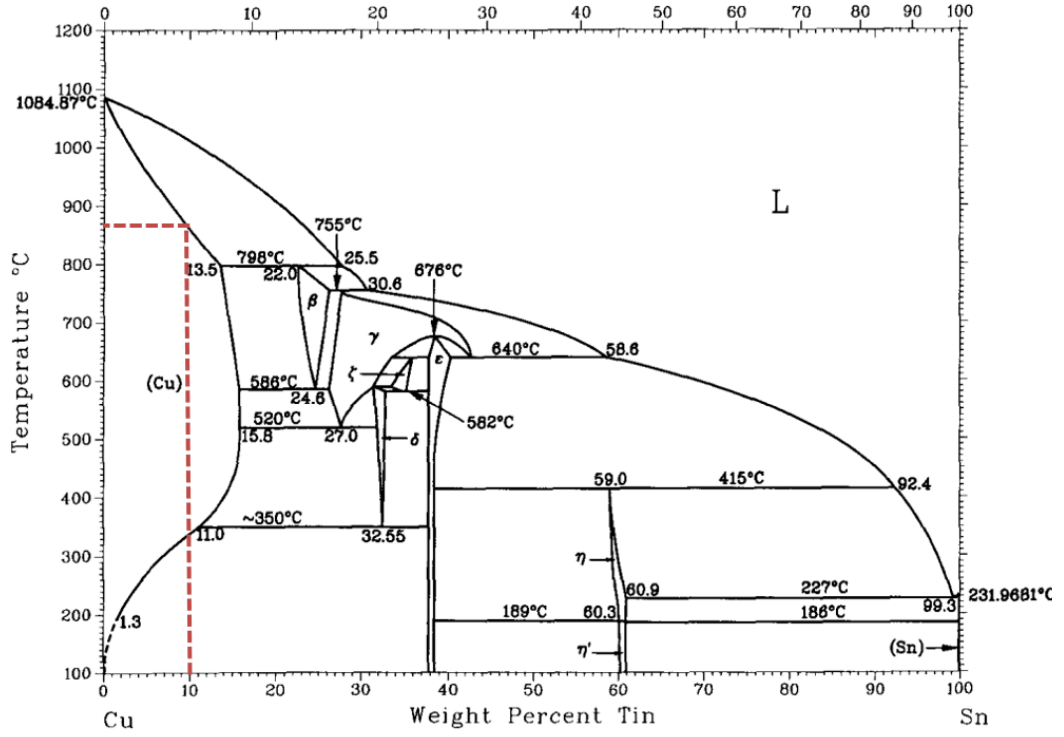
Tablo 4.1 Toz boyut dağılımları ve yoğunlukları

Toz Kodu	D90 (µm)	D50 (µm)	D10 (µm)	Piknometre Yoğunluğu (g/cm ³)	Yığın Yoğunluğu (g/cm ³)
107	107	57	18	8,7	4,8
63	63	35	13	8,7	4,3
38	38	25	16	8,7	4,2

CuSn10 tozların TG/DTA grafiği Şekil 4.3 a’da görülmektedir. TGA eğrisi incelendiğinde, analiz azot ortamında yapıldığından malzeme oksidasyona uğramamış ve beklendiği gibi metalik malzemenin ağırlığında bir değişim görülmemiştir. DTA eğrisi incelendiğinde ise 864 °C’de başlayan geniş bir endotermik pik oluşumu görülmektedir. Bu pik sıvı faz oluşumunun başladığı sıcaklıktır. Şekil 4.3 b’de Cu-Sn alaşımının faz diyagramının ilgili bölümü görülmektedir. Diyagramın ağırlıkça %10 Sn içeren kompozisyonu incelendiğinde, sıvı fazın oluşmaya başladığı sıcaklık değerinin DTA sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Saunders ve Miodownik, 1990).



a)



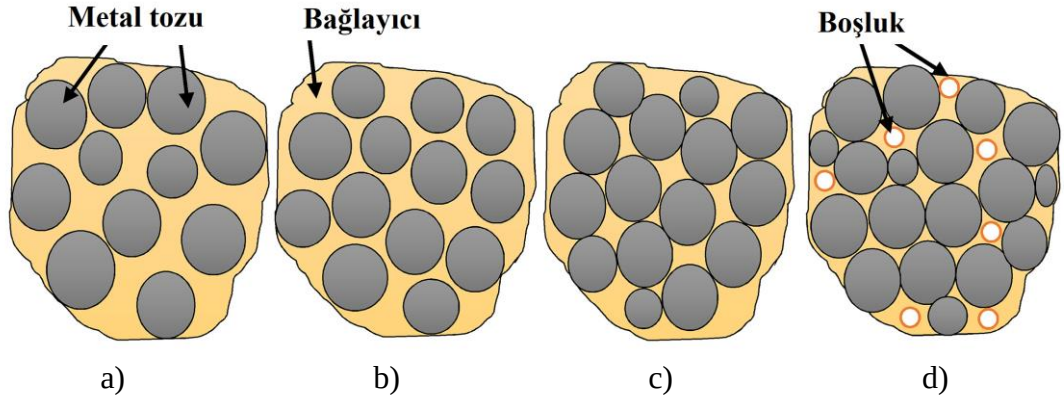
b)

Şekil 4.3 a) CuSn10 tozların TG/DTA grafiği, b) Cu-Sn faz diyagramı (Saunders ve Miodownik, 1990)

4.3 Besleme Stoğu Karakterizasyonu

Besleme stoğu CuSn10 metal tozu, bağlayıcılar olarak PP ve PE-W ve dispersant olarak SA içermektedir. Bağlayıcı sistemi görüldüğü üzere ağırlıkça %60 PE-W, %35 PP ve %5 SA kullanılarak oluşturulmuştur.

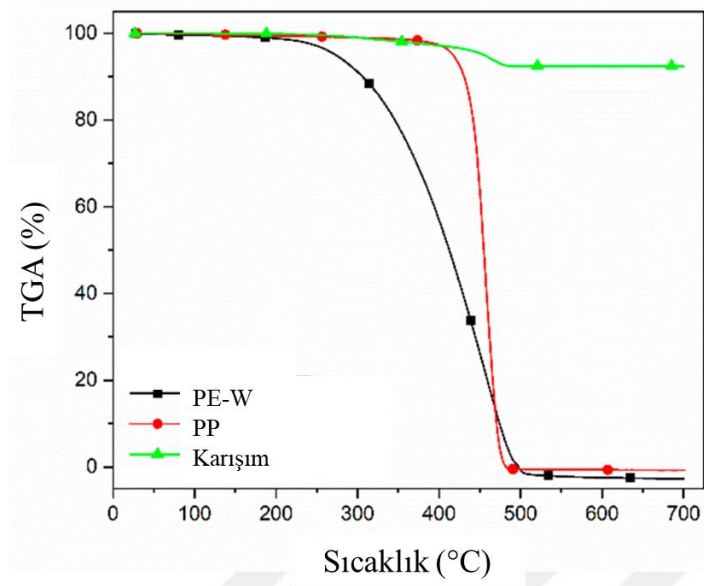
Şekil 4.4'te katkı oranı durumları görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere besleme stoğunda metal tozu katkı oranı azaldıkça, bağlayıcının hacimsel içeriği artış gösterecektir. Düşük toz katkısı durumunda, ekstrüzyon işleminde bağlayıcı ve tozun ayrılması ve heterojen yapı oluşumuna sebep olabilmektedir. Buna bağlı olarak bağlayıcı giderme işlemi sırasında parçanın şekilsel deformasyonu ve sinterleme sonunda yüksek oranlarda büzülme sorunları ile karşılaşılabilir (Y. Li vd., 2007). Kritik toz katkısı durumunda partiküller sıkı şekilde paketlenmiştir. Partikülleri sararak etrafında bir tabaka oluşturmak ve partiküller arasındaki boşlukları doldurmak için gerekli bağlayıcı miktarı minimumdur. Toz katkısının kritik orandan daha yüksek değerlerde yapılması, besleme stoğu içerisinde boşlukların oluşmasına neden olarak heterojen ekstrüzyona sebep olacaktır (Thavanayagam ve Swan, 2019). Optimum katkı oranı ise ekstrüzyonu kolaylaştırmak ve maksimum toz katkısının sağlanması amacı ile kritik orana yakın fakat bu orandan daha düşük katkı oranını ifade etmektedir (Atre vd., 1998; Thavanayagam ve Swan, 2019).



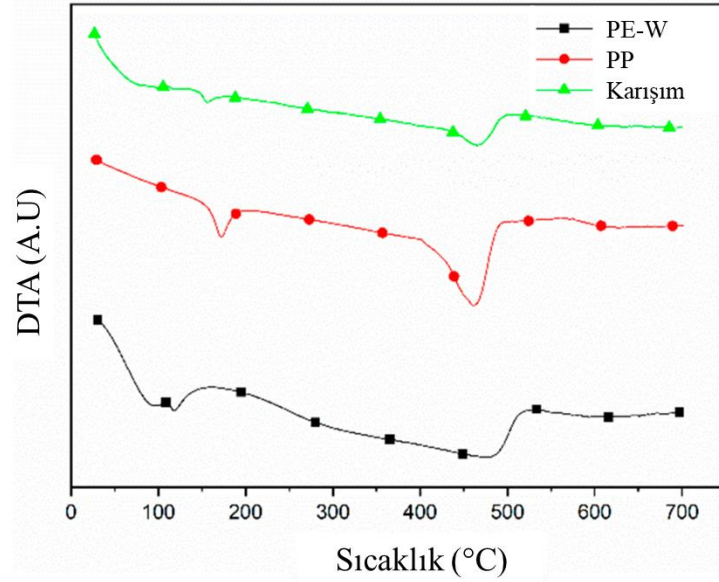
Şekil 4.4 a) Düşük toz katkısı, b) optimum toz katkısı, c) kritik toz katkısı ve d) yüksek toz katkısı (Thavanayagam & Swan, 2019)

Yığılma yoğunluğu ve bulk yoğunluk değerleri göz önüne alındığında (bkz. Tablo 4.1) tez çalışmasında besleme stoğu içeriğine P107 tozu optimum katkı oranı %55 olarak belirlenmiştir.

Besleme stoğunun ve polimerik bileşenlerin (PE-W ve PP) TGA ve DTA eğrileri sırası ile Şekil 4.5 a ve b'de görülmektedir. PE-W TGA eğrisi incelendiğinde ağırlık kaybının 220 °C-500 °C arasında geniş bir aralıkta meydana geldiği görülmektedir.



a)



b)

Şekil 4.5 a) TGA ve b) DTA eğrileri

PP için ise ağırlık kaybının 450 °C-500 °C aralığında daha dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Besleme stoğunun ağırlık kaybının ise bu iki polimerik bileşenin kombinasyonu şeklinde gerçekleştiği söylenebilir. DTA eğrileri incelendiğinde PE-W için ilk endotermik pikin 118 °C’de, PP için ise 172 °C’de olduğu görülmektedir. Bu sıcaklıklarda kayda değer bir ağırlık kaybı gözlenmezken endotermik bir reaksiyon gözlenmesi bu sıcaklıkların PE-W ve PP’nin erime noktası olduğunu belirtmektedir. PE-W için 220 °C’de başlayıp 500 °C’de tamamlanan ve PP

için 450 °C’de başlayıp 500 °C’de tamamlanan endotermik pikler ise polimerik bileşenlerin bozunduğu sıcaklıkları belirtmektedir.

Besleme stoğunun TG/DTA eğrileri incelendiğinde ise ısı davranışın PE-W ve PP eğrilerinin birleşimi şeklinde olduğu görülmektedir. TGA eğrisi incelendiğinde besleme stoğunda %8’lik bir ağırlık kaybı meydana geldiği görülmektedir. DTA eğrisi incelendiğinde ise 120 °C ve 156 °C’de polimerik bileşenlerin erimesini işaret eden endotermik pikler görülmektedir. 465 °C’de görülen endotermik pik ise polimerik bileşenlerin bozunmasını ifade etmektedir.

4.4 Ekstrüzyon Kalibrasyonu

Filaman üretimi için tasarlanmış yazıcılarda belirli çaptaki filaman, adım motoruna bağlı hareket eden dişli çark vasıtası ile ekstrüzyon ağzına yönlendirilir. Bu cihazlarda yazdırma hızına bağlı olarak nozulden ekstrüde olarak depozitlenen malzemenin genişliği ile yazdırma hızı arasında bir kalibrasyon yapılmıştır. Bu kalibrasyonun granül ekstrüzyon sistemi için de yapılması gerekmektedir. Ekstrüzyon miktarının yazdırma hızından yüksek olması durumunda gereğinden fazla malzemenin birikmesi sonucu depozitlenen çizgi genişliği yüksek olacak, tam tersi durumda ise çizgi genişliği gereğinden düşük olacaktır. Ekstrüzyon miktarı ve yazdırma hızı arasındaki ilişkinin, belirli bir yazdırma hızında nozul çapı genişliğinde ekstrüzyon sağlamasıdır. Granül ekstrüder sisteminde ekstrüzyon, iletim vidasının kendi eksenine etrafında dönmesi ile sağlanmaktadır. Bu nedenle granül ekstrüzyon sisteminde ekstrüde olan malzeme miktarı iletim vidasının dönme hızına bağlı olarak değişecektir. Tez çalışması kapsamında iletim vidasına kaplin ile bağlı olan ve tahrik oluşturan motor hızının değiştirilmesi ile ekstrüzyon miktarı kalibre edilmiştir. Bu amaçla ekstrüder motorunun hızının ayarlanmasına olanak sağlayan “adım/mm” yazılım ayarı deneme yanılma yaklaşımı ile düzenlenerek, 20 mm/s yazdırma hızında nozul genişliğinde malzeme ekstrüzyonu sağlayan iletim vidası hızı belirlenmiştir. İletim vidası dönme hızının 4 d/d olduğu durumda sürekli ekstrüzyon meydana geldiği ve depozitlenmiş hat genişliğinin sabit olduğu görülmüştür. Şekil 4.6’da 2, 4 ve 6 rpm vida hızında depozitlenmiş hat durumları görülmektedir.



a)



b)

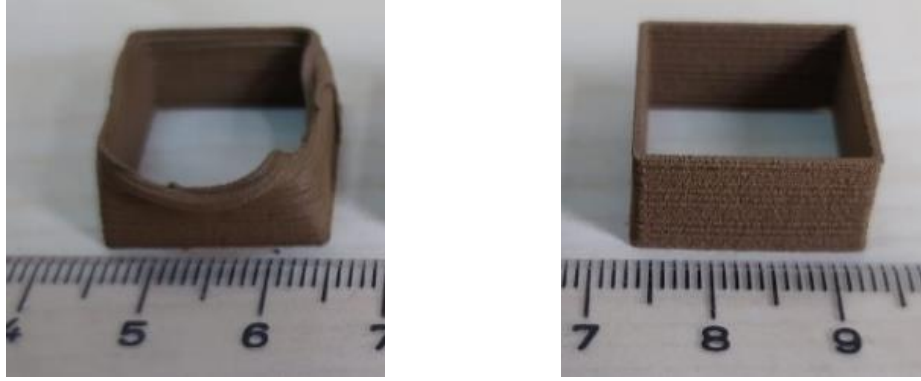


c)

Şekil 4.6 a) 2, b) 4 ve c) 6 rpm hızlarında depozitlenmiş hat görüntüleri

4.5 Yazdırma Optimizasyonu

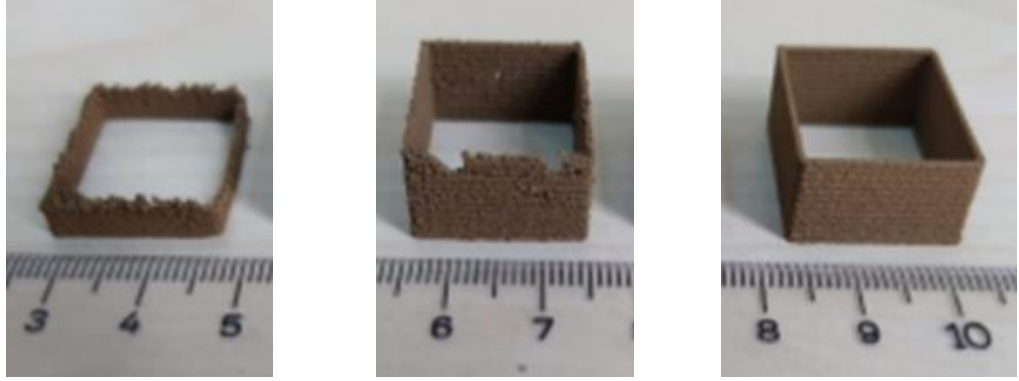
Yazdırma işlemlerinde depozitlenen malzemenin hızlı soğuması amacıyla soğutma fanları kullanılmaktadır. Besleme stoğunun yazdırılması sırasında fan kullanımının yazdırma işlemi üzerindeki etkisinin incelenmesi amacı ile soğutma fanı açık ve kapalı konumlarda yazdırma işlemleri yapılmıştır. Bu amaçla 20*20*10 (x*y*z) boyutlarında tek duvarlı numuneler yazdırılmıştır. Soğutma fanı kullanımının yazdırma üzerindeki etkisi Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7 a) Soğutma fanı kapalı, b) soğutma fanı açık durumda yazdırılmış numuneler

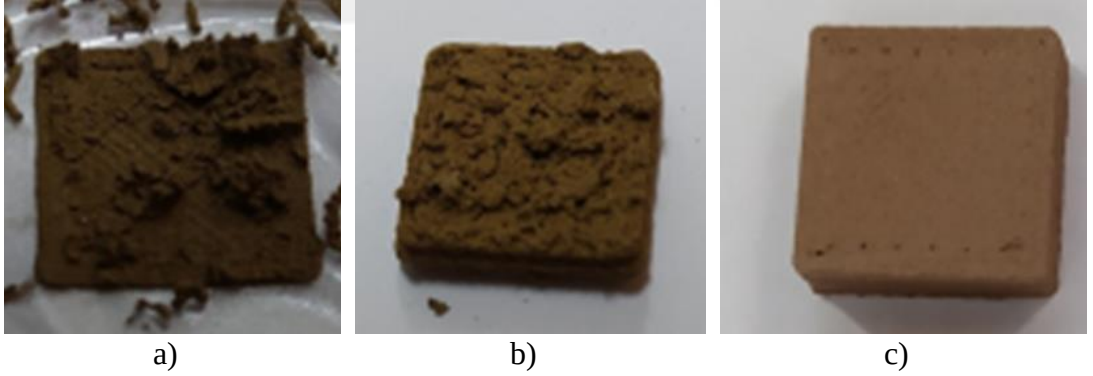
Şekil 4.7 a’da da görüldüğü üzere fan kapalı konumda yazdırma işlemi yapıldığında numunenin taban kısmı kare formunu korurken numune yüksekliği arttıkça malzeme şekli bozulmuş ve deformasyona bağlı çökmeler gözlenmiştir. Eriyik durumda ve ince bir çizgi halinde depozitlenen malzeme, dış soğutma etkeni olmadığı durumda hızlı şekilde katılaşmamaktadır. Henüz tam olarak katılaşmamış malzeme üzerine diğer katmanlar eklendikçe, malzeme bu ağırlığı taşıyamamış ve yerçekimi etkisi ile şekil deforme olmuştur (C. Y. Lee ve Liu, 2019). Fan kullanıldığı durumda ise depozitlenen malzemenin hızlı bir şekilde soğuyarak katılaşması sonucunda şekil bütünlüğünü korumuştur.

Yazdırma sıcaklığı belirlenmesinde ise besleme stoğunun TG/DTA eğrilerinden yararlanılmıştır. Yazdırma işleminin sorunsuz gerçekleşebilmesi için akışkanlığı sağlayan polimerik bileşenlerin yazdırma sıcaklığında eriyik halde olması gerekmektedir. Diğer yandan yazdırma süresince polimerik bileşenlerin bozunması anlamına gelen ağırlık değişiminin de olmaması gerekmektedir. Bu nedenle yazdırma sıcaklık aralığı olarak 170 °C-210 °C belirlenmiştir. Şekil 4.8 a, b ve c’de sırası ile 170 °C, 190 °C ve 210 °C sıcaklıklarda yazdırma işlemi sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 210 °C altındaki sıcaklıklarda yazdırma işleminin tamamlanamadığı açıkça görülmektedir. Bu durum sistemin malzeme taşıma kapasitesi ve besleme stoğu viskozitesi ile açıklanabilir. Azalan viskozite besleme stoğunun ekstrüzyonunu zorlaştırmakta ve sürekli, düzenli ekstrüzyonu engellemektedir (Nooraizedfiza vd., 2013).



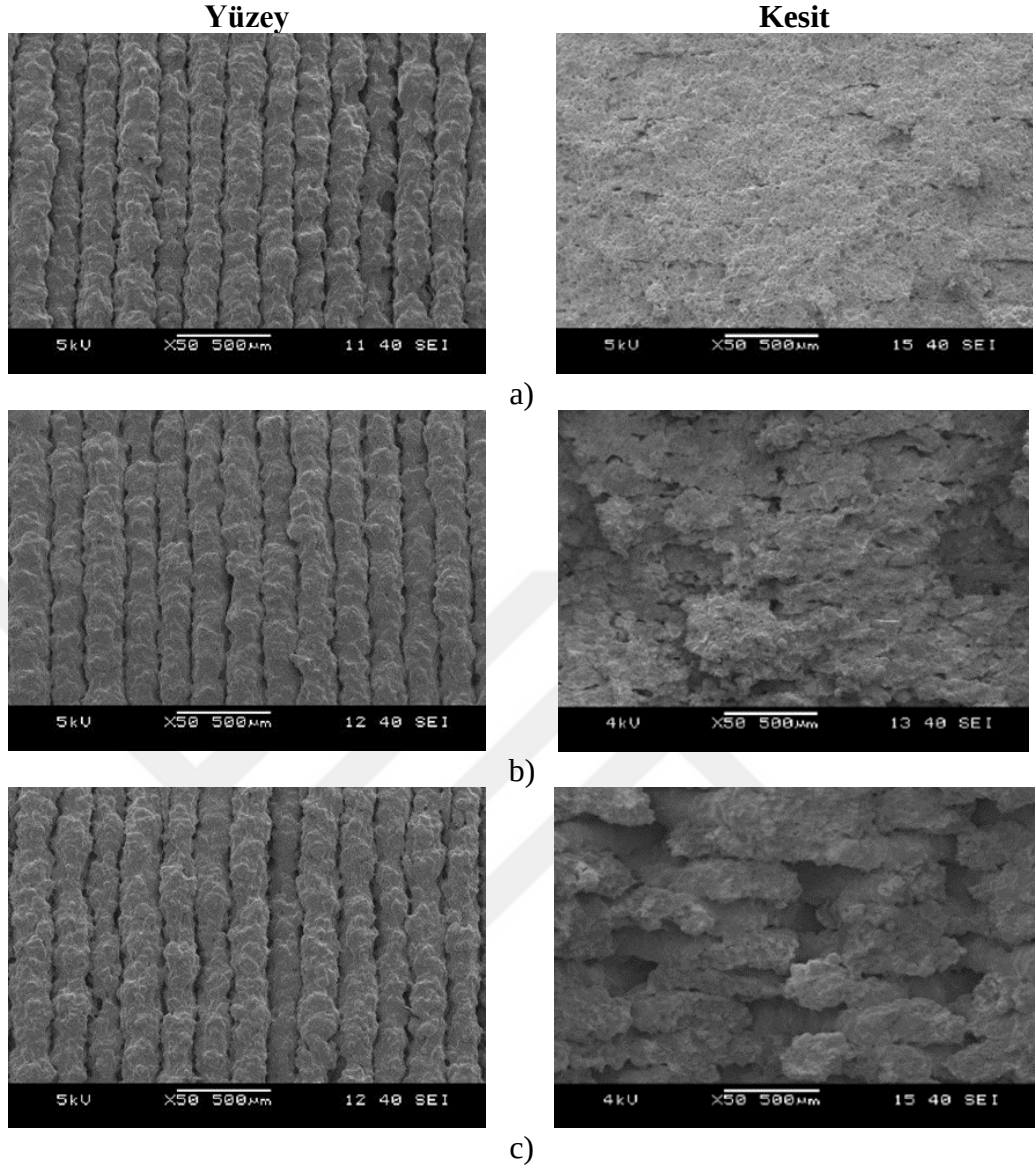
Şekil 4.8 a) 170 °C, b) 190 °C ve c) 210 °C sıcaklıklarda yazdırılmış numuneler

Çalışmanın devamında yazdırma işlemleri sırasında soğutma fanı aktif hale getirilmiş ve yazdırma 210 °C’de gerçekleştirilmiştir. Kritik katkı oranının üzerindeki değerlerde hazırlanmış beleme stokları ile yapılan yazdırma denemeleri Şekil 4.9 a, b ve c’de sırası ile %65, %60 ve %55 katkı oranları için görülmektedir. Katkı oranının kritik değerin üzerinde olması durumunda sürekli ve düzenli ekstrüzyon sağlanamamış ve yazdırma işlemleri tamamlanamamıştır.



Şekil 4.9 a) %65, b) %60 ve c) %55 dolgu oranlarında yazdırılmış numuneler

Yazdırma hızı ve katman kalınlığının ürün özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması için 0,2 mm katman kalınlığında 20 mm/s-60 mm/s aralığında yazdırma denemeleri yapılmıştır. Yazdırma hızının etkisinin araştırılması amacı ile 10*10*5 mm (x*y*z) boyutlu numuneler yazdırılmıştır. Şekil 4.10 a, b ve c’de sırası ile 20 mm/s, 40 mm/s ve 60 mm/s yazdırma hızlarında üretilen numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri görülmektedir.



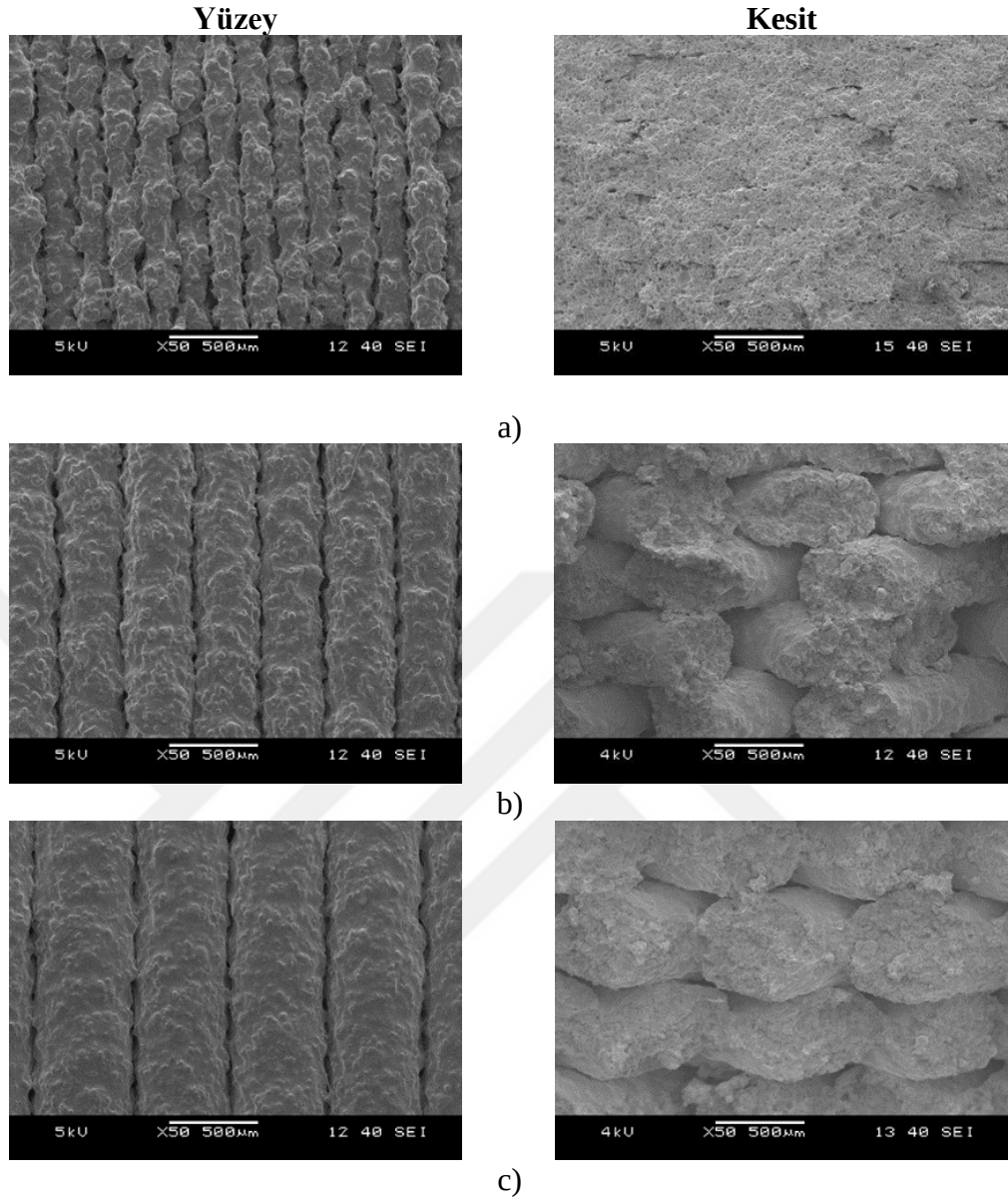
Şekil 4.10 a) 20 mm/s, b) 40 mm/s ve c) 60 mm/s hızlarında yazdırılmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde yazdırma hızının numunelerin yüzey morfolojisinde belirgin bir değişikliğe sebep olmadığı görülmektedir. Tüm yazdırma hızlarında sürekli ve düzenli ekstrüzyon meydana gelmiştir. Katmanlar arasında boşluk oluşumu görülmemekte ve katman kalınlıklarında değişim gözle çarpmamaktadır. Yüzeyler pürüzlü yapıdadır. Diğer yandan kesit görüntüleri incelendiğinde ise 20 mm/s yazdırma hızında katmanlar ayırt edilememekte, depozitlenmiş hatlar arasında boşluk oluşumu görülmemektedir. Artan yazdırma hızına bağlı olarak depozitlenmiş bireysel hatların temas noktalarında yazdırma boşlukları oluşmaya başlamış ve hatlar belirgin

hale gelmiştir. Numunelerin görünür yoğunlukları 20 mm/s, 40 mm/s ve 60 mm/s yazdırma hızları için sırası ile $5.59 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$, $5.34 \pm 0.22 \text{ g/cm}^3$ ve $4.90 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Yazdırma hızının 20 mm/s'den 60 mm/s'ye çıkarılması ile numunelerin görünür yoğunlukları %12,3 oranında azalma göstermiştir. Bu sonuçlar SEM görüntüleri ile de uyum içerisindedir. Yang vd. (2020) benzer sonuçlar elde etmiştir. Yaptıkları çalışmada artan yazdırma hızına bağlı olarak yazdırılmış numunenin yoğunluğunun azaldığını gözlemlemiş ve bunun nedeninin artan yazdırma hızlarında depozitlenmiş hat genişliğinde meydana gelen azalma olduğunu belirtmiştir (T. C. Yang ve Yeh, 2020). Çalışmaların devamında yazdırma sırasında boşluk oluşumu sorununu en aza indirgeyen 20 mm/s yazdırma hızı ile numuneler üretilmiştir.

Katman kalınlığının yazdırılmış numunelerin özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amacı ile 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm katman kalınlıklarında 10*10*5 mm (x*y*z) boyutlu numuneler yazdırılmıştır. Şekil 4.11'de farklı katman kalınlıklarında yazdırılmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri görülmektedir.

Artan katman kalınlığı ile birlikte hem yüzey hem de kesit görüntülerinde belirgin değişimler gözlenmiştir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde katman kalınlığının artırılması ile depozitlenmiş bireysel hat kalınlığının arttığı açıkça görülmektedir. Artan katman kalınlığına bağlı olarak depozitlenmiş hat yüzeyleri daha düzgün bir yüzey profili sergilemiştir. Tüm yazdırma hızlarında katmanlar birbiri üzerine düzgün bir şekilde depozitlenmiş ve katmanlar arası boşluk oluşumu görülmemiştir. Kesit görüntüleri incelendiğinde ise 0,2 mm katman kalınlığında depozitlenmiş hatların birbiri ile iyi bir şekilde kaynaştığı görülmektedir ve depozitlenmiş hatlar ayırt edilememektedir. Katman kalınlığının artırılması ile hatlar net şekilde görülebilir hale gelmiştir. Kuznetsov vd. (2018) artan katman kalınlığına bağlı olarak kesit morfolojisinin değiştiğini belirtmiştir. Düşük katman kalınlıklarında depozitlenmiş hat kesiti bastırılmış bir elips veya dikdörtgeni andırırken, katman kalınlığının artmasına bağlı olarak hat kesitinin giderek daha çok daireye yaklaştığını ve buna bağlı olarak ardışık depozitlenmiş hatların temas noktalarındaki temas alanının giderek azalarak teğetsel hale geldiğini belirtmiştir (Kuznetsov vd., 2018).

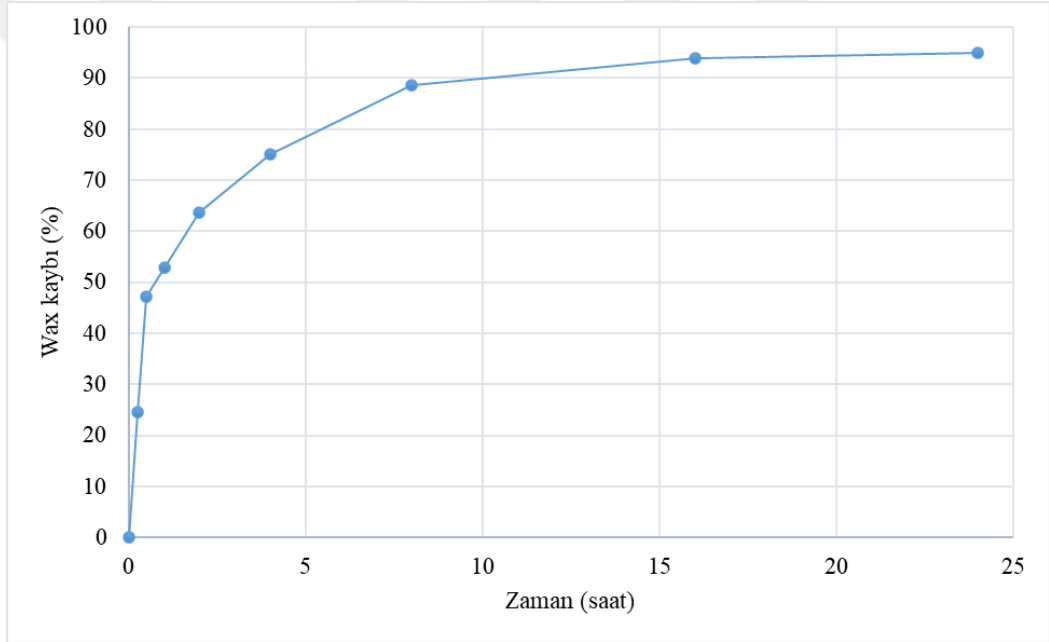


Şekil 4.11 a) 0,2 mm, b) 0,4 mm ve c) 0,6 mm katman kalınlıklarında yazdırılmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri

Yazdırma optimizasyonu çalışmaları sonucunda en yoğun yazdırılmış malzeme üretimine olanak sağlayan 20 mm/s yazdırma hızı ve 0,2 mm katman kalınlığı değerleri yazdırma parametreleri olarak belirlenmiş ve tez çalışmasının sonrasındaki aşamalarında numuneler bu parametreler ile yazdırılmıştır.

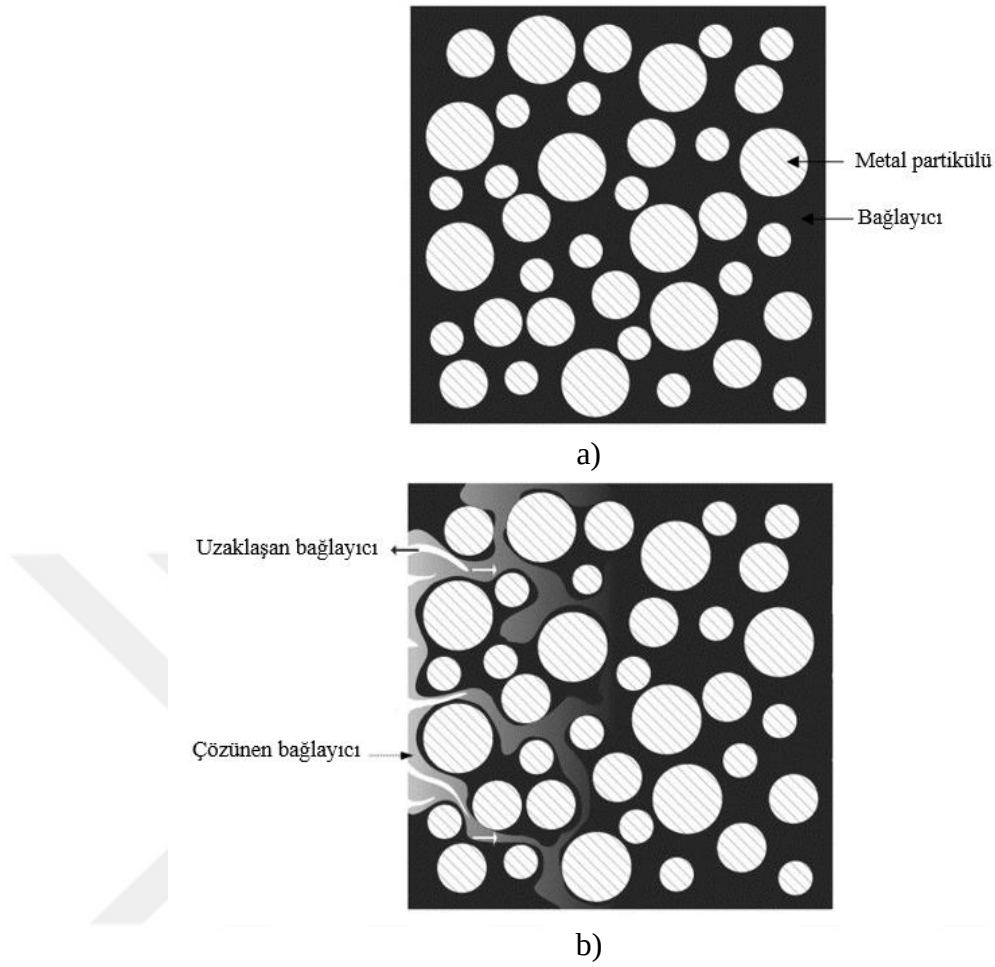
4.6 Bağlayıcı Giderme İşlemleri

Bağlayıcı giderme işlemleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki PE-W polimerik bileşeni çözen hekzan çözeltisinin kullanıldığı çözelti bağlayıcı giderme işlemidir. İkincisi ise bünyede bulunan PP polimerik bileşenin ısı etkileriyle bozunarak bünyeden uzaklaştırıldığı termal bağlayıcı giderme işlemidir. Bağlayıcı giderme işlemleri yazdırılmış numunelerin hekzan çözeltisi içerisine yerleştirilmesi ve 60 °C’de bekletilmesi ile yapılmıştır. İşlemde bağlayıcı bileşiminin PE-W içeriği giderilmiştir. Giderilen bağlayıcı oranının zamana bağlı değişimi Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12 Zamana bağlı wax kaybı değişimi

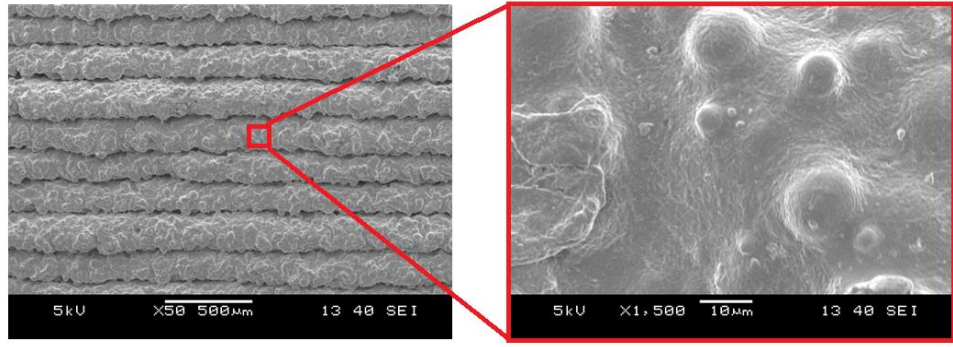
Şekilde görüldüğü üzere işlemin giderme işleminin başlarında PE-W hızlı bir şekilde bünyeden uzaklaşmıştır. İlk 1 saat sonunda PE-W miktarının yaklaşık olarak %25’i hekzan içerisinde çözünmüştür. 8 saat sonunda bu oran %88 olurken 24 saat süre sonunda bağlayıcının %95’i çözünerek bünyeden uzaklaşmıştır. Bağlayıcı giderme işleminin şematik gösterimi Şekil 4.13’te yapılmıştır (W. W. Yang vd., 2003).



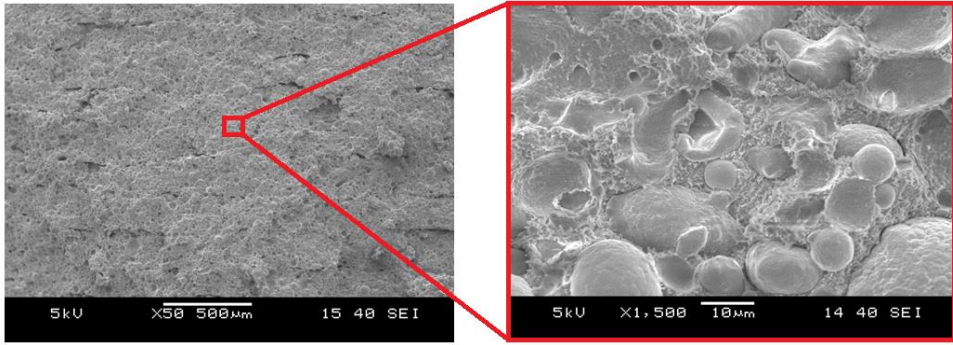
Şekil 4.13 Bağlayıcı giderme işlemi a) başlangıç ve b) çözünme durumu şematik gösterimleri (W. W. Yang vd., 2003)

Numune çözeltiye daldırıldığında tüm dış yüzeyi çözelti ile temas halindedir ve çözelti ile temasta olan bölgelerde çözünme işlemi gerçekleşmektedir ve çözünme hızı yüksektir. Yüzeydeki malzeme çözündükçe kılcal boşluklar bırakmakta ve bu boşluklar sayesinde çözelti malzeme içerisine ilerleyerek malzeme içindeki wax bileşeni çözmeye başlamaktadır. İşlemin devamı için öncelikle çözünen bileşenin kapiler etkilerle malzeme dışına alınması ve sonrasında iç bölgelerdeki polimerik bileşenin çözünmesi gerçekleştiğinden çözünme hızı işlem süresi arttıkça azalmaktadır (Basir vd., 2020; Dandang vd., 2017; Hamidi vd., 2017; W. W. Yang vd., 2003). Şekil 4.14'te yazdırılmış ve bağlayıcı giderme işlemi uygulanmış P107 numunelerin kesit ve yüzey görüntüleri görülmektedir.

Yazdırılmış

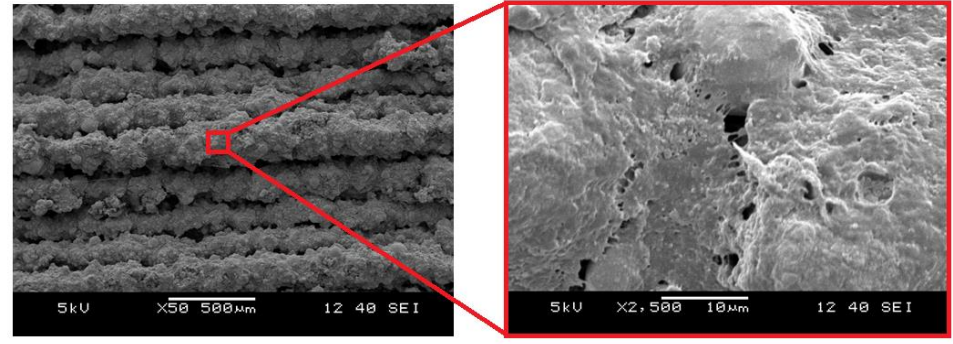


a)

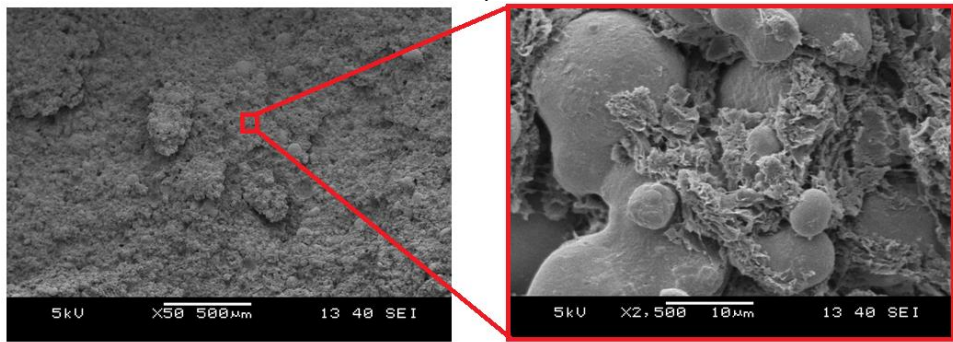


b)

Bağlayıcı giderilmiş



c)



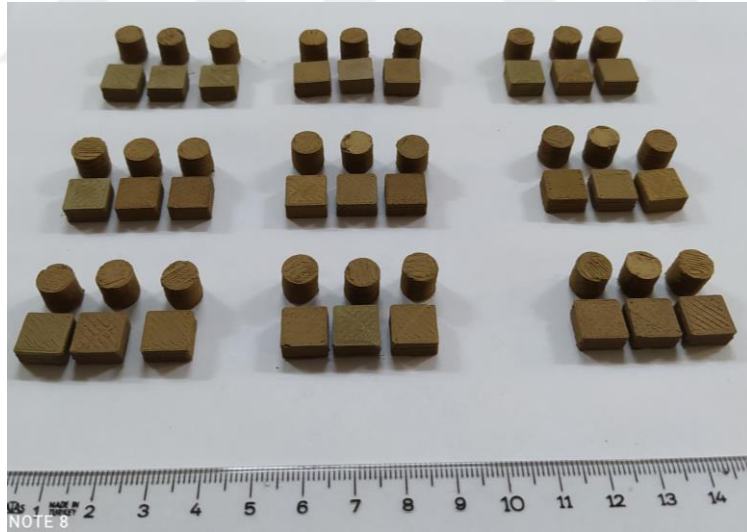
d)

Şekil 4.14 Yazdırılmış numunelerin a) yüzey ve b) kesit, bağlayıcı giderilmiş numunelerin a) yüzey ve b) kesit SEM görüntüleri

Yazdırma sonrası yüzey ve kesit görüntüleri incelendiğinde metal tozlarının yapı içinde homojen dağıldığı ve tozların bağlayıcı ile kaplandığı görülmektedir. Yapıda boşluk oluşumu gözlenmemektedir. Bağlayıcı giderme işlemi sonrası yüzey ve kesit görüntüleri incelendiğinde ise bağlayıcı morfolojisinin değiştiği, PE-W'ın bünyeden uzaklaşmasına bağlı olarak poroz bir yapı oluştuğu görülmektedir. Ayrıca bağlayıcı giderme işlemi sonrası yapıda çatlak veya hasar görülmemektedir. Bu nedenle bağlayıcı giderme işleminin sorunsuz olarak gerçekleştiği görülmektedir.

4.7 Sinterleme İşlemleri

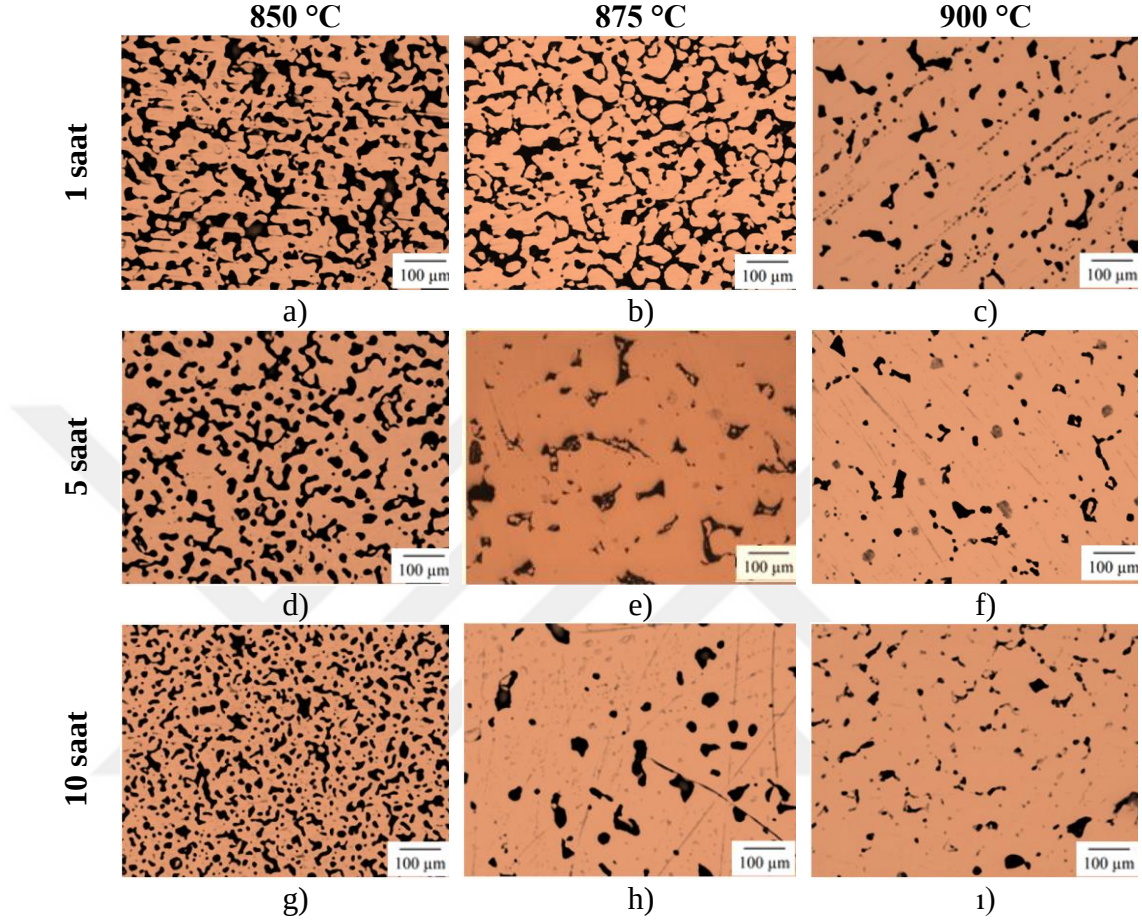
Sinterleme sıcaklık ve süresinin sinterlenmiş numunenin özellikleri üzerindeki etkisi, numunelerin 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1 saat, 5 saat ve 10 saat sürelerde işlem görmesi ile incelenmiştir. Şekil 4.15'te sinterleme parametrelerinin incelenmesi için yazdırılmış 10*10*5 (x*y*z) kare prizma numuneler ve 8*8 (d*h) silindirik numuneler görülmektedir.



Şekil 4.15 Yazdırılmış silindirik ve kare prizma numuneler

Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenen numunelerin kesit görüntüleri Şekil 4.16'da görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde sıcaklıktan bağımsız olarak sinterleme süresinin artmasıyla numunelerde bulunan porozite miktarında azalma görülmektedir. Artan sinterleme süresine bağlı olarak difüzyona izin verilen süre artmış ve metal tozları birbirine ile daha fazla bütünleşmiş ve boyun oluşuma bağlı olarak porozite

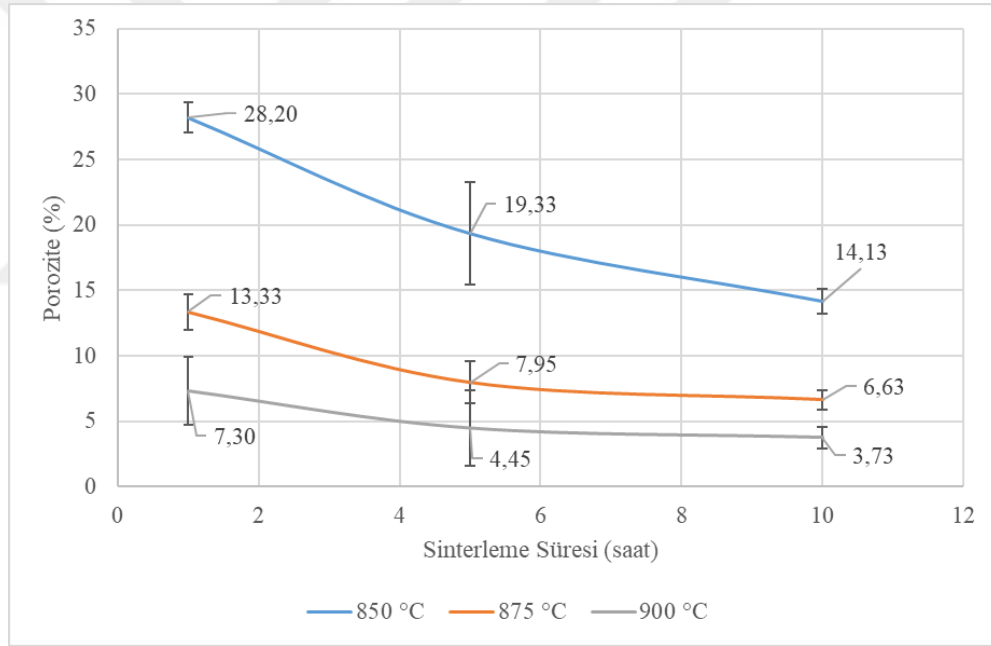
miktarı azalmıştır. Benzer sonuçlar literatürdeki çalışmalarda da belirtilmiştir. Artan sinterleme süresi ile porozite miktarı azalmaktadır (Huber vd., 2021).



Şekil 4.16 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1 saat (a, b ve c), 5 saat (d, e ve f) ve 10 saat (g, h ve i) süre ile sinterlenmiş numunelerin kesit görüntüleri

Şekil 4.17’de 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1 saat, 5 saat ve 10 saat sinterleme sonucunda kesit görüntülerinin incelenmesi sonucunda elde edilen porozite değerleri grafik halinde verilmiştir. Sabit süreler için artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak numunelerde bulunan porozite miktarları incelendiğinde porozite miktarlarının azaldığı görülmektedir. Kesit görüntüleri incelendiğinde 850 °C’de 1 saat sinterleme süresi sonunda halen yapıda önemli miktarda porozite bulunmaktadır ve yetersiz sinterleme durumu olarak nitelendirilebilir. Sinterleme süresinin 10 saate çıkarılmasıyla yapıda mevcut boşluk miktarı azalma göstermiştir. Diğer yandan 875 °C sıcaklıkta sinterleme işlemi göz önüne alındığında 1 saat sinterleme süresi sonunda dahi porozitede önemli miktarda azalma görülmektedir. 850 °C’de 1 saat sinterleme

sonucunda genel olarak birbiri ile bağlantılı por yapısı açıkça görülmektedir. 850 °C’de 10 saat sinterleme işlemi sonrasında porozite miktarı %28,2’den %14,1’e düşmüştür. Sinterleme sıcaklığının 875 °C’ye çıkarılması ile 1 saat sinterleme işlemi sonrasında porozite miktarı %13,3 olarak ölçülmüştür. 900 °C’de 1 saat sinterleme işlemi sonrasında ise por yapısının birbirinden bağımsız ve genel olarak yuvarlak şekilli olduğu görülmüştür. 900 °C’de 10 saat sinterleme sonucunda ise porozite miktarı en düşük değer olan %3,7 olarak ölçülmüştür. Sinterleme aşamasında iki önemli parametre sıcaklık ve süredir. Sonuçlar göz önüne alındığında sinterleme sıcaklığının, süreden daha etkin bir parametre olduğu göze çarpmaktadır. Örnek olarak 875 °C’de 1 saat süreyle sinterleme sonucunda elde edilen porozite değerine, 850 °C’de sinterleme ile ulaşmak için 10 saat işlem yapılması gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.17 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 1, 5 ve 10 saat sinterlenen numunelerin porozite miktarları

Sinterleme süresi göz önüne alındığında 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 5 saat ve 10 saat sinterleme işlemleri sonucunda porozite değerlerinin 850 °C için %5,6 azalma gösterdiği, 875 °C için %1,3 azalma gösterdiği ve 900 °C için ise %0,8 azalma gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle sinterleme süresi olarak 5 saat sürenin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Diğer yandan 900 °C’de 1 saat sinterleme sonunda 875

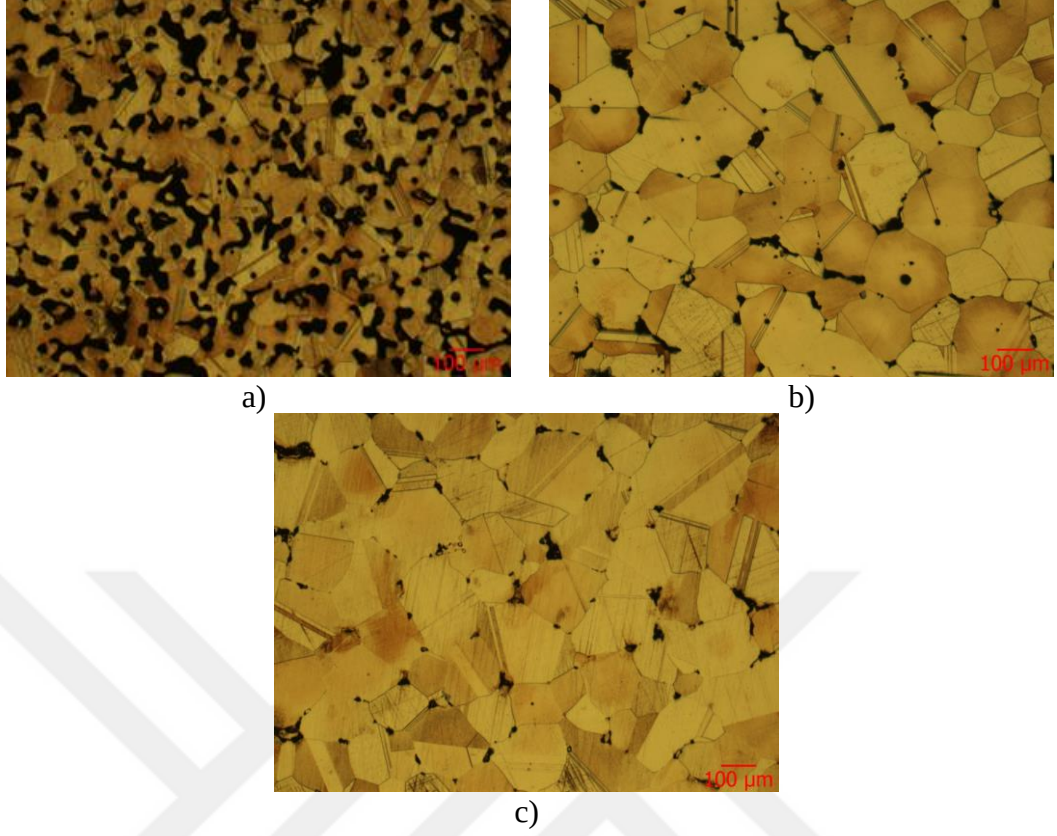
°C’de 5 saat sinterleme ile elde edilebilecek porozite değeri elde edilmesine rağmen sinterlenmiş numunenin bazı bölgelerinde şişme ve kabarcık oluşumu şeklinde kusurlar görülmüştür. Söz konusu kusur Şekil 4.18’de görülmektedir. Heng vd. (2013) bu durumun nedeninin toz ve polimerik bağlayıcı dağılımındaki homojensizlik veya bağlayıcı giderme işlemi sonrasında yapı içinde hapsolmuş gazlar olabileceğini belirtmiştir (Heng vd., 2013). Bu nedenle çalışmada sinterleme sıcaklığı ve süresi olarak 875 °C ve 5 saat seçilmiştir.



Şekil 4.18 900 °C’de sinterlenen numunenin yüzey ve kesit görüntüsü

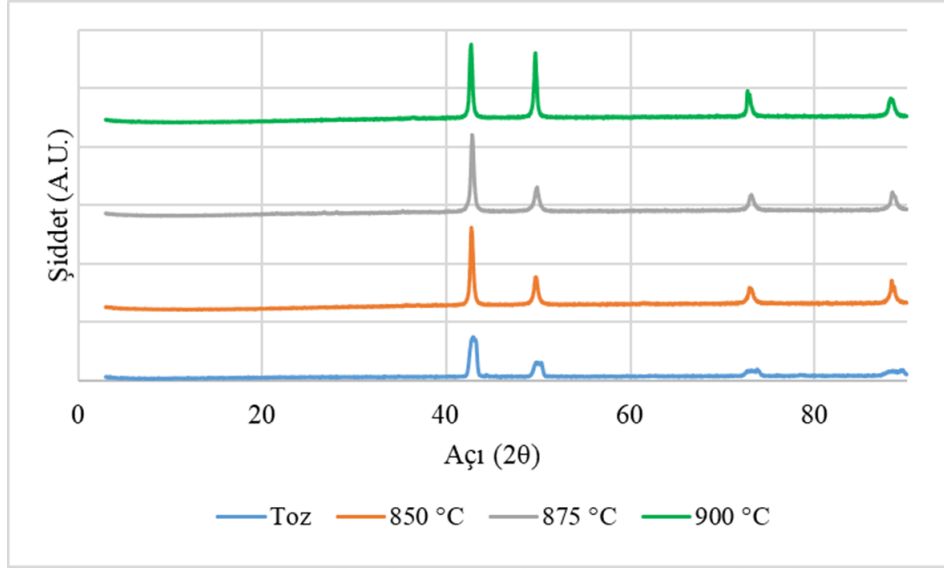
850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 5 saat sinterleme işlemi sonucunda elde edilen dağlanmış mikroyapı görüntüleri Şekil 4.19’da görülmektedir. Yapının genel olarak eş eksenli ve tek fazlı tane yapısında olduğu görülmektedir. Porlar tane sınırlarında kümelenmiş artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak izole bir hale gelmiştir. Benzer şekilde artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte por şekli ovalleşmiş ve tane boyutu büyüme göstermiştir. Yapıda çökelti fazları görülmemekte ve ısıtılma işlemiyle birlikte tane yapısında ikizler göze çarpmaktadır.

Porozite miktarları üzerinden hesaplanan yoğunluk miktarları 850 °C, 875 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 5 saat sinterleme işlemi sonrasında sırası ile 7,018 g/cm³, 8,008 g/cm³ ve 8,31 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterleme sonucunda elde edilen dağlanmış mikroyapı görüntüleri

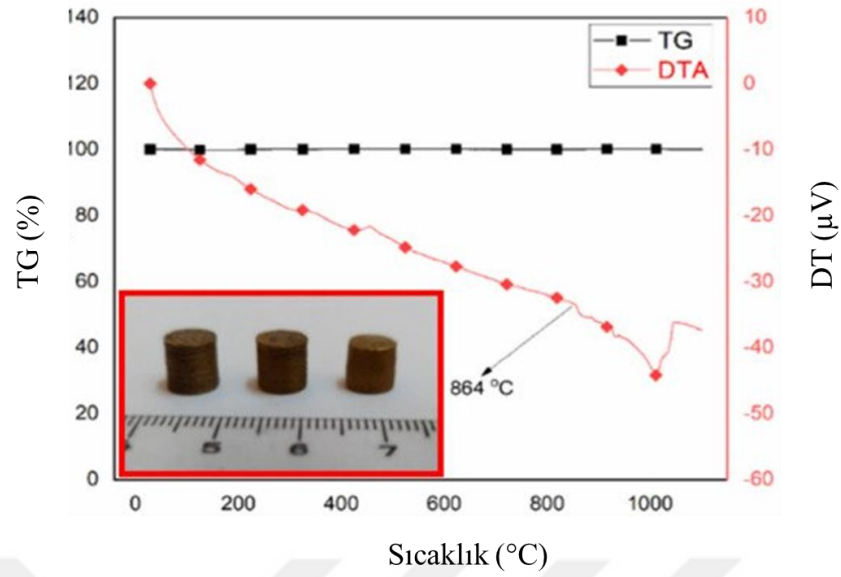
Bronz tozun (alındığı gibi) ve sinterlenmiş numunelerin XRD grafikleri Şekil 4.20'de gösterilmektedir. Sinterleme sıcaklıklarından bağımsız olarak, tüm numunelerin α -Cu katı çözelti fazından oluştuğu belirlenmiştir (JCPDS no. 44-1477). Ayrıca XRD grafikleri sinterlemenin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini kanıtlar niteliktedir. Yapıda oksit oluşumu veya herhangi bir kontaminasyon gözlenmemiştir.



Şekil 4.20 Toz ve 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin XRD grafikleri

Sinterleme sıcaklığından sonra ürünün şeklini koruması, eklemeli üretim süreci için oldukça önemli bir gerekliliktir (Rane ve Strano, 2019). Şekil 4.21, sırasıyla 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saatlik sinterlemeden sonra numunelerin görüntülerini ve bronz tozun TG/DTA grafiğini göstermektedir. 850 °C'de sinterlemenin bir sonucu olarak, numunede belirgin bir şekil bozulması gözlenmemiştir. Hesaplanan şekil bozulma parametre değeri $4,37 \pm 0,48$ 'dir. Sinterleme sıcaklığı 875 °C'ye yükseltildiğinde, sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu meydana gelmiş ve şekil distorsiyonu parametresi değeri 5.03 ± 0.34 'e yükselmiştir. DTA grafiğinde 864 °C ile 1046 °C arasında yer alan geniş endotermik pik, katı-sıvı geçişine karşılık gelmektedir.

Sinterleme sıcaklığı 900 °C olduğunda, sinterleme sırasında yapıdaki sıvı faz miktarı artmış ve en yüksek şekil distorsiyonu parametresi değeri $8,57 \pm 0,83$ olarak hesaplanmıştır. Bu sorun Mousapour vd. (2017) bronz numuneler, katılaşma sıcaklığından nispeten daha yüksek sıcaklıklarda sinterlendiğinde, yapıdaki sıvı miktarının arttığını, katı-sıvı yapısının sinterleme sırasında şekil bütünlüğünü korumak için yetersiz olduğunu, yerçekimi etkisi ile numunenin z ekseninde sıkışma, buna bağlı olarak tabanda x ve y ekseninde genişleme eğiliminde olduğunu belirtmiştir (Mousapour vd., 2017).



Şekil 4.21 CuSn10 TG/DTA grafiği ve 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş silindirik numunelerin şekilleri

Şekil 4.22 a ve b'de yazdırılmış ve sinterlenmiş çekme test numuneleri görülmektedir. 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat süre ile sinterlenmiş numunelerin gerilme şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.23'te gösterilmiş ve mekanik özellikler Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

Sinterleme sıcaklığının 850 °C'den 900 °C'ye çıkarılması ile çekme mukavemeti $77,3 \pm 3,8$ 'den $212 \pm 17,7$ 'ye artmıştır. Ayrıca artan sinterleme sıcaklığı ile uzama değerlerinde de bir artış gözlemlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak porozite miktarı azalmış, partiküller arası bağlanma artmış ve buna bağlı olarak gerilmenin etkidiği alan artış göstermiş ve mekanik özellikler gelişmiştir. Bu nedenle, geliştirilmiş bağ oluşumu, Wahi vd. partiküller arasında artan bağlanmaya bağlı olarak mukavemetin geliştiğini belirtmiştir (Wahi vd., 2016).

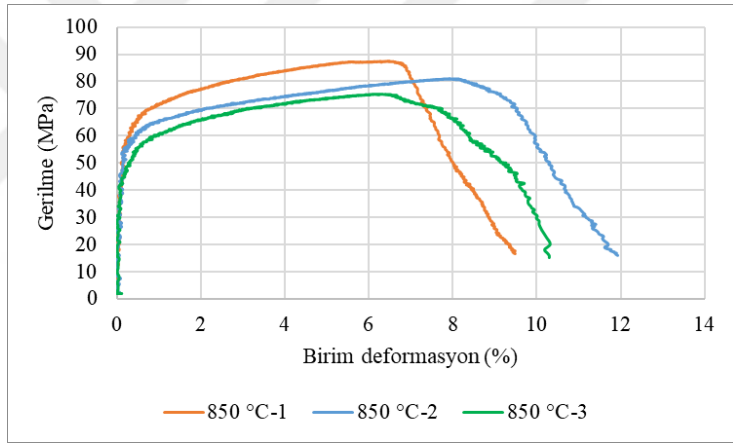


a)

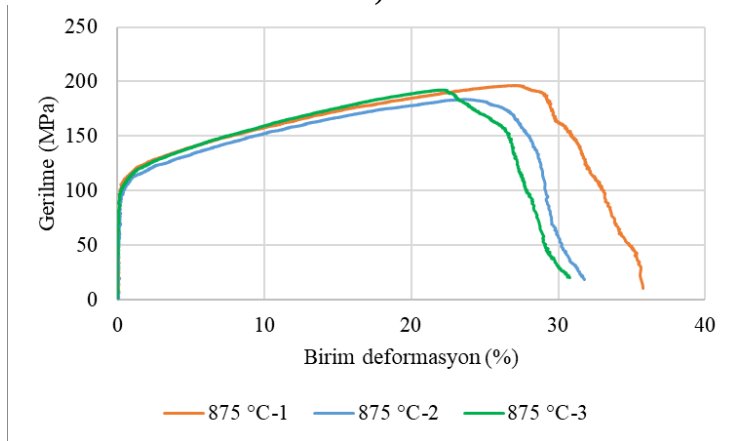


b)

Şekil 4.22 a) Yazdırılmış, b) 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numuneler

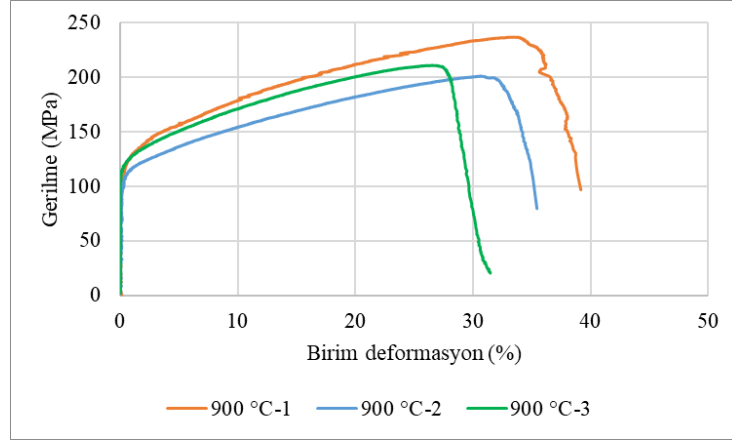


a)



b)

Şekil 4.23 a) 850 °C, b) 875 °C ve c) 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin gerilme- şekil değiştirme eğrileri



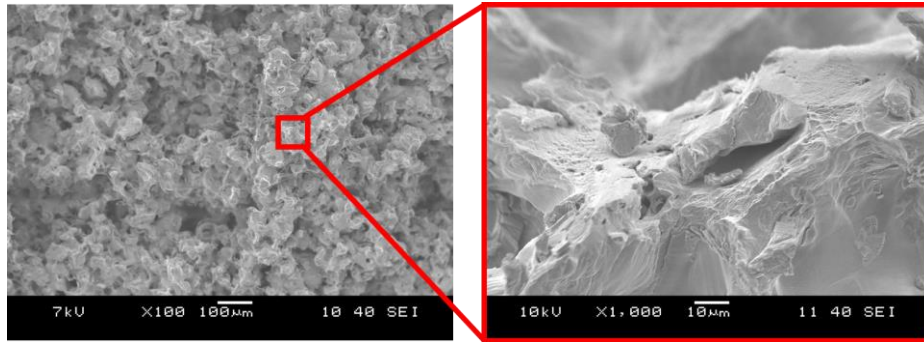
c)

Şekil 4.23 Devamı

Tablo 4.2 850 °C, 875 °C ve 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin mukavemet değerleri

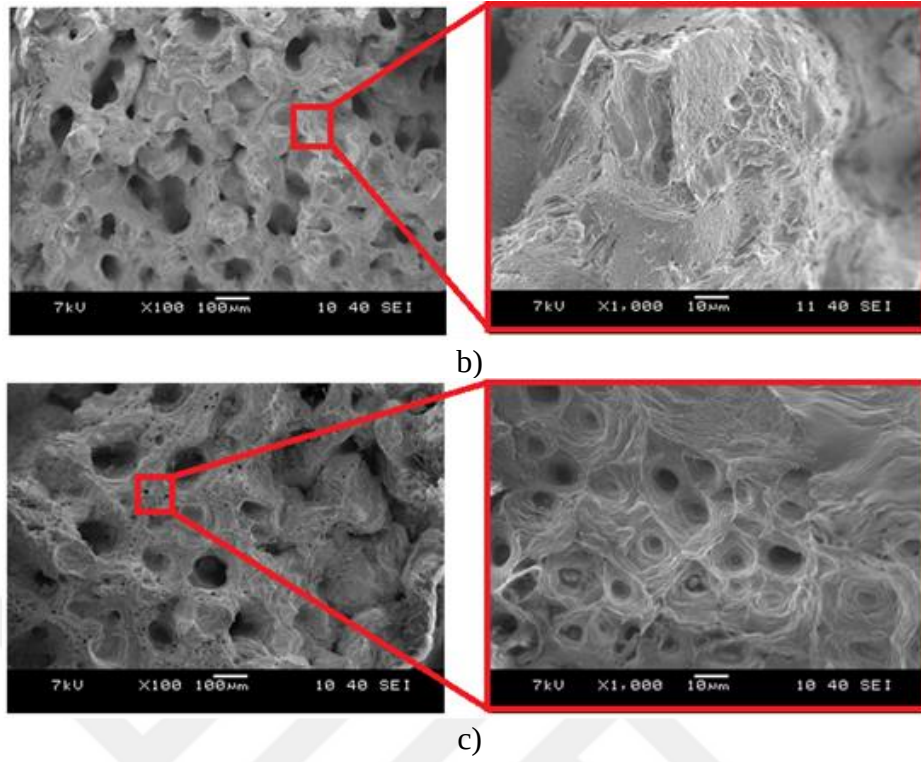
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopmada % Uzama
850	77,3±3,8	11,4±1,5
875	191±5,3	33,7±1,6
900	212±17,7	35,6±4,3

Şekil 4.24'te çekme numunelerinin deney sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. Artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak tanelerin büyüdüğü görülmektedir ve sonuçlar mikroyapı görüntüleri ile uyum içersindedir. Yüzey genel olarak por yapısı içermektedir ve hasarın taneler arası kırılma şeklinde olduğu görülmektedir. Artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte por yapısına ek olarak sünek kırılmayı nitelendiren çukurcuk (dimple) oluşumu da ortaya çıkmıştır.



a)

Şekil 4.24 a) 850 °C, b) 875 °C ve c) 900 °C'de 5 saat sinterlenmiş numunelerin hasar yüzeyi görüntüleri



Şekil 4.24 Devamı

Yapılan analizlere bağlı olarak sinterlenmiş mukavemet, porozite miktarı ve şekil stabilitesi de göz önüne alındığında çalışma kapsamında uygulanacak optimum sinterleme sıcaklık ve süresi olarak 875 °C ve 5 saat belirlenmiştir. Şekil 4.25'te üç boyutlu yazdırılmış ve 875 °C'de 5 saat sinterlenmiş karmaşık şekilli parçalar görülmektedir. Parçalar incelendiğinde z ekseninde katmanların birbiri üzerine depozitlenmesi açıkça seçilebilmektedir. Benzer şekilde üst yüzeylerde ise yazdırma işlemine bağlı olarak depozitlenmiş hat kesişimleri görülebilmektedir. Bunlar dışında sinterlenmiş parçalarda herhangi bir çatlama veya hasar oluşumu ve şekil deformasyonu gözlemlenmemektedir.

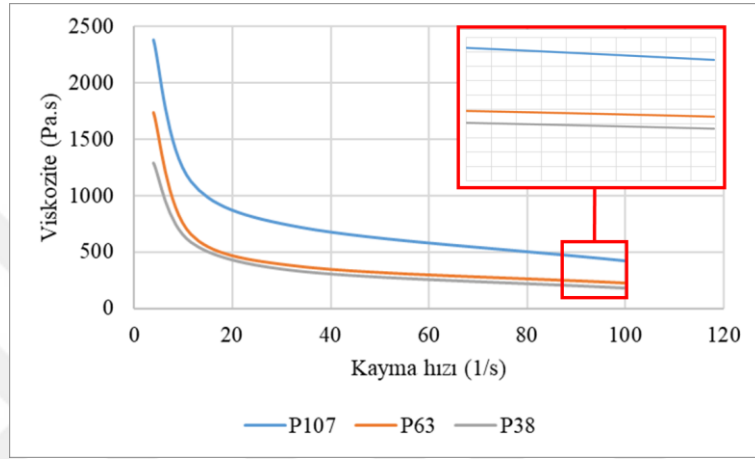


Şekil 4.25 Yazdırılmış ve sinterlenmiş çeşitli karmaşık şekilli parçalar

4.8 Toz Boyutu Etkisi

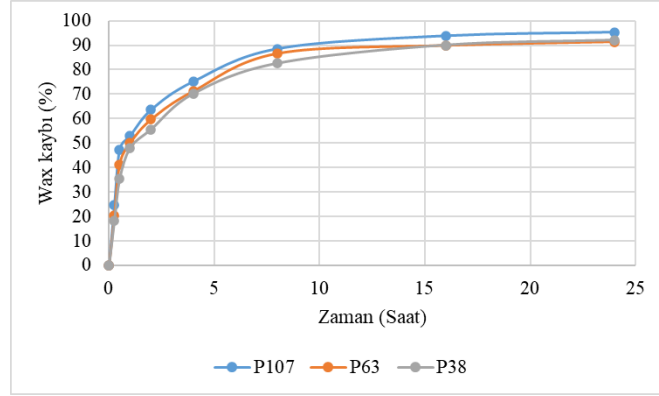
Şekil 4.26’da farklı toz boyutları ile hazırlanmış besleme stoklarının artan kayma hızına bağlı olarak elde edilen viskozite değerleri görülmektedir. Partikül boyutundan bağımsız olarak tüm besleme stokları için kayma incelmesi gözlemlenmiştir. Analiz başlangıcında (düşük kayma hızlarında) viskozitenin yüksek olduğu ve artan kayma hızına bağlı olarak viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu davranış kayma hızının artmasına bağlı olarak besleme stoğu içeriğindeki partiküllerin kayma yönünde yönlenmesi ve buna bağlı olarak viskozitenin azalması ile açıklanmaktadır (Ammosova vd., 2021). Partikül boyutunun viskoziteye etkisi incelendiğinde ise azalan partikül boyutuna bağlı olarak viskozite değerlerinde de azalma meydana geldiği gözlenmektedir. Partiküller eriyik polimer karışımı içerisinde zincirlerin hareketine engel oluşturarak viskoziteyi artırır. Küresel şekilli partikül söz konusu olduğunda azalan partikül boyutuna bağlı olarak artan yüzey alanı, partikül

etkileşiminin ve partiküller arası sürtünmenin artmasına bağlı olarak viskozitenin artmasına, akışkanlığın azalmasına neden olur (Sweeney vd., 2017). Hausnerova vd. (2017) azalan partikül boyutuna bağlı olarak artan viskozite eğiliminin düzensiz şekilli partiküllerden oluşan besleme stokları için geçerli olmadığını, eğilimin ters şekilde azalan partikül boyutu ile viskozitenin azalması ile sonuçlandığını belirtmiştir (Hausnerova vd., 2017).



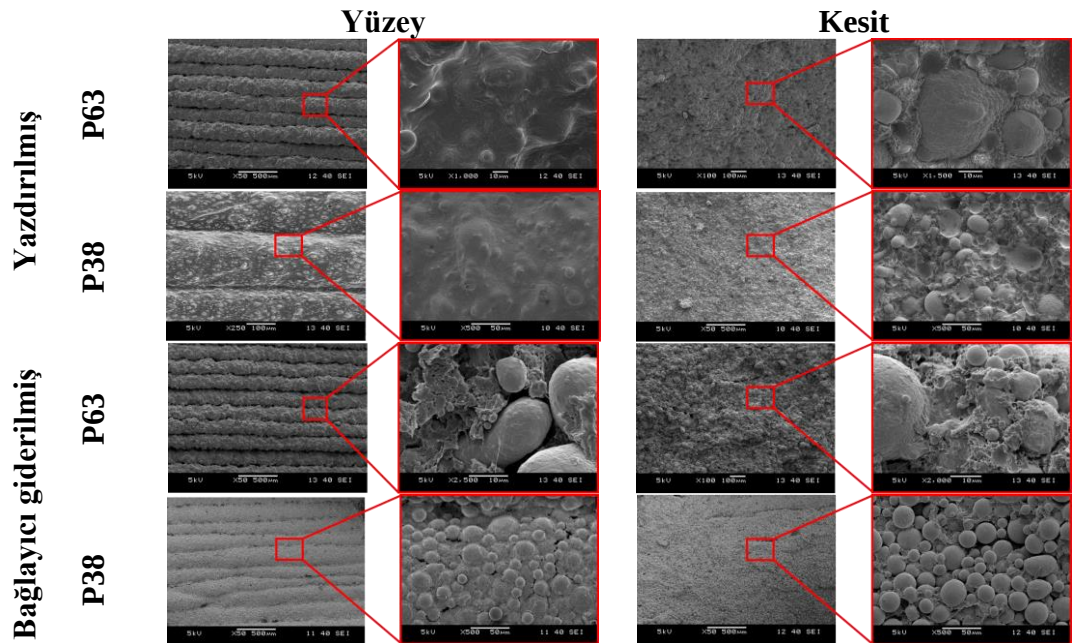
Şekil 4.26 Farklı toz boyutları ile hazırlanmış besleme stoklarının artan kayma hızına bağlı olarak elde edilen viskozite değerleri

Farklı partikül boyutları için zamana bağlı olarak yapıdan uzaklaştırılan bağlayıcı miktarı Şekil 4.27’de görülmektedir. P107, P63 ve P38 kodlu tozlar ile hazırlanan besleme stokları için 24 saat sonunda meydana gelen wax kaybı sırası ile %95, %92 ve %91 olarak ölçülmüştür. Tüm partikül boyutları için zamana bağlı wax kaybı davranışı benzer olmakla birlikte azalan partikül boyutuna bağlı olarak wax kaybı hızının azaldığı görülmektedir. Chen vd. (2015) büyük boyutlu partiküllerin kullanımında partiküller arası boşluk büyüklüğünün daha fazla olduğunu, bu nedenle çözünen bağlayıcı mobilitesinin arttığını ve bağlayıcı giderme işleminin daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğini belirtmiştir (Chen vd., 2015).



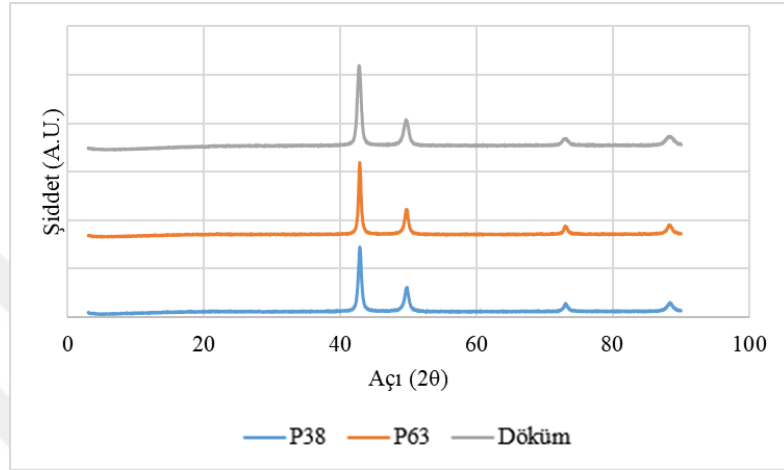
Şekil 4.27 P107, P63 ve P38 numuneleri için zaman bağı olarak meydana gelen wax kayıpları

P38 ve P63 kodlu tozları içeren besleme stokları kullanılarak yazdırılmış numunelerin yazdırma sonrası ve bağlayıcı giderme işlemi sonrası yüzey ve kesit SEM görüntüleri Şekil 4.28’de görülmektedir. Görüntülerde de görüldüğü üzere partiküllerin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Yazdırma ve bağlayıcı giderme işlemi sonrasında yapıda boşluk veya çatlak gibi kusurlar bulunmamaktadır. Bağlayıcı giderme işleminden sonra yapıdan uzaklaşan wax nedeniyle pürüzlü bir görünüm oluşmuştur. Ayrıca yüzey görüntülerinde görüldüğü üzere partikül boyutunun azalması ile bireysel olarak depozitlenmiş hat yüzeyi daha düzgün ve pürüzsüz bir hal almıştır.



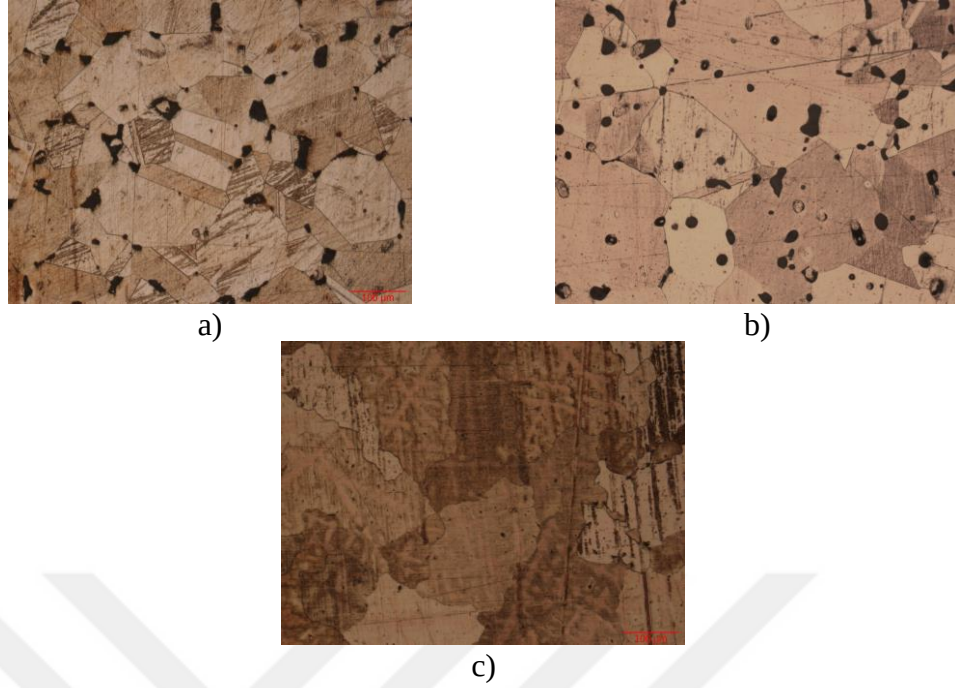
Şekil 4.28 P38 ve P63 kodlu tozları içeren besleme stokları kullanılarak yazdırılmış numunelerin yazdırma sonrası ve bağlayıcı giderme işlemi sonrası yüzey ve kesit SEM görüntüleri

Şekil 4.29’da P38, P63 ve döküm numunelerinin XRD grafikleri görülmektedir. Üretim yöntemi veya partikül boyutundan bağımsız olarak tüm numunelerin α -Cu katı çözelti fazından oluştuğu belirlenmiştir (JCPDS no. 44-1477). Azalan partikül boyutuna bağlı olarak artan yüzey alanına rağmen sinterleme işlemi sonrasında yapıda oksit oluşumuna rastlanmamıştır.

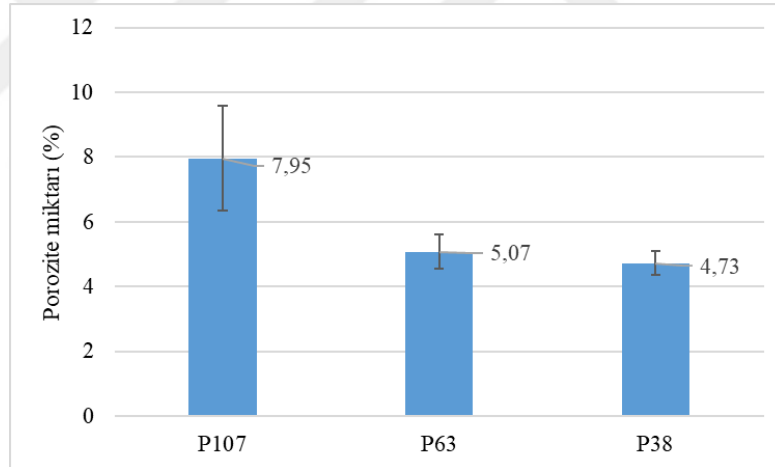


Şekil 4.29 P38, P63 ve döküm numunelerinin XRD grafikleri

Şekil 4.30’da P38, P63 ve döküm numunelerin dağlanmış mikroyapı görüntüleri ve Şekil 4.31’de P107, P63 ve P38 numunelerinin porozite değerleri görülmektedir. P38 ve P63 numuneleri için yapının tane sınırlarında kümelenmiş oval şekilli porlar ve tane içinde yer alan ikizlerden oluştuğu görülmektedir. Partikül boyutunun azalması ile porozite miktarı %5,07’den %4,73’e düşmüştür. P38 numunesinin mikroyapısı incelendiğinde ise tane sınırları yanında tane içlerinde de küresel şekilli porların bulunduğu görülmektedir. Mostafaei vd. (2019) azalan partikül boyutu ile yüzey alanının ve enerjisinin arttığını ve buna bağlı olarak sinterlemenin daha hızlı gerçekleşerek porozitenin azaldığını belirtmiştir (Mostafaei vd., 2019). Döküm numunenin ise dendritik yapıda olduğu görülmektedir. Sobota vd. (2019) döküm CuSn10 alaşımlarında dendritlerin α katı çözeltisinden, dendritler arasındaki bölgenin ise $\alpha+\epsilon$ ötektoid karışımından oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca bu yapıda tane sınırlarının farklı doğrultularda katılan dendritler nedeni ile oluştuğunu belirtmiştir (Sobota vd., 2019). Fakat α -Cu ve $\alpha+\epsilon$ ötektoid karışım faz yapısına sahip döküm numunenin XRD sonuçları diğer numuneler ile kıyaslandığında belirgin bir farklılık bulunmamaktadır.



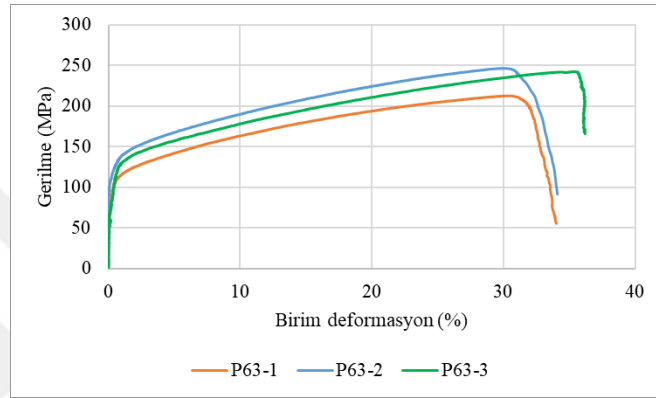
Şekil 4.30 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin dağılmış mikroyapı görüntüleri



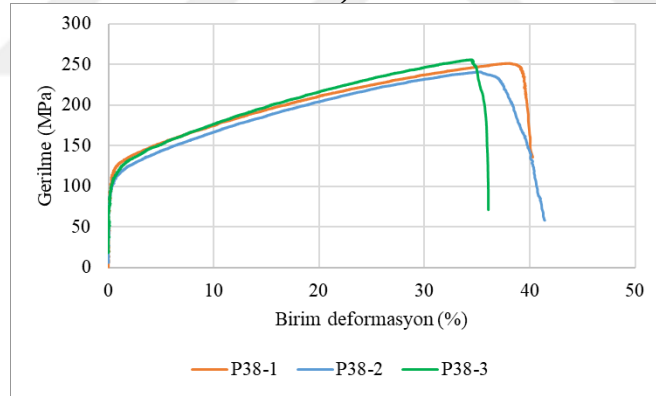
Şekil 4.31 P107, P63 ve P38 numunelerinin porozite değerleri

P63, P38 ve döküm numunelerin çekme testi sonuçları sırası ile Şekil 4.32 a, b ve c’de görülmektedir. Ortalama çekme mukavemeti, uzama ve standart sapma değerleri ise Tablo 4.4’te verilmiştir. P64 numunesi için çekme mukavemeti değeri $233,75 \pm 18,48$ MPa iken tane tane boyutunun azalmasına bağlı olarak bu P38 numunesi için bu değer $249,24 \pm 7,67$ MPa seviyesine yükselmiştir. Azalan partikül boyutu ve buna bağlı olarak azalan porozite miktarı nedeni ile mukavemet artışı sağlanmıştır. Kopmada % uzama değerinde ise partikül boyutunun azalması ile $34,77 \pm 1,24$ ’ten

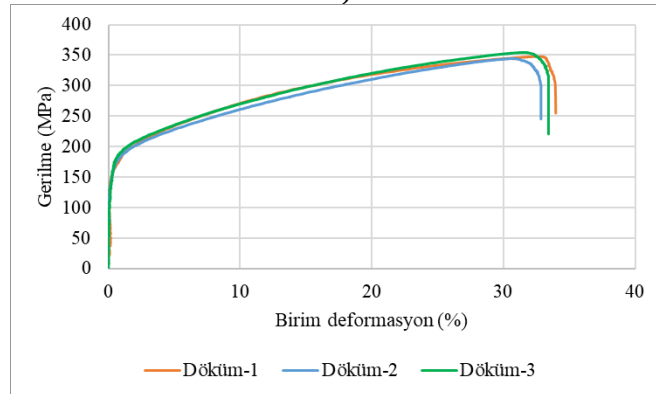
%39,25±2,82'ye artış kaydedilmiştir. Döküm numunenin çekme mukavemeti ise çalışma kapsamında elde edilen en yüksek değer olan 349,04±5,10 MPa olarak ölçülmüştür. Bunun başlıca nedeni döküm numunede porozite bulunmaması olarak açıklanabilir. Döküm numunenin uzama değeri ise %33,42±0,55 olarak ölçülmüştür. 3B üretilmiş numunelerde yapıda bulunan porların çekme testi sırasında deformasyon yönünde uzaması nedeniyle numunenin daha rahat bir şekilde deformasyonu bunun nedeni olarak açıklanabilir.



a)



b)



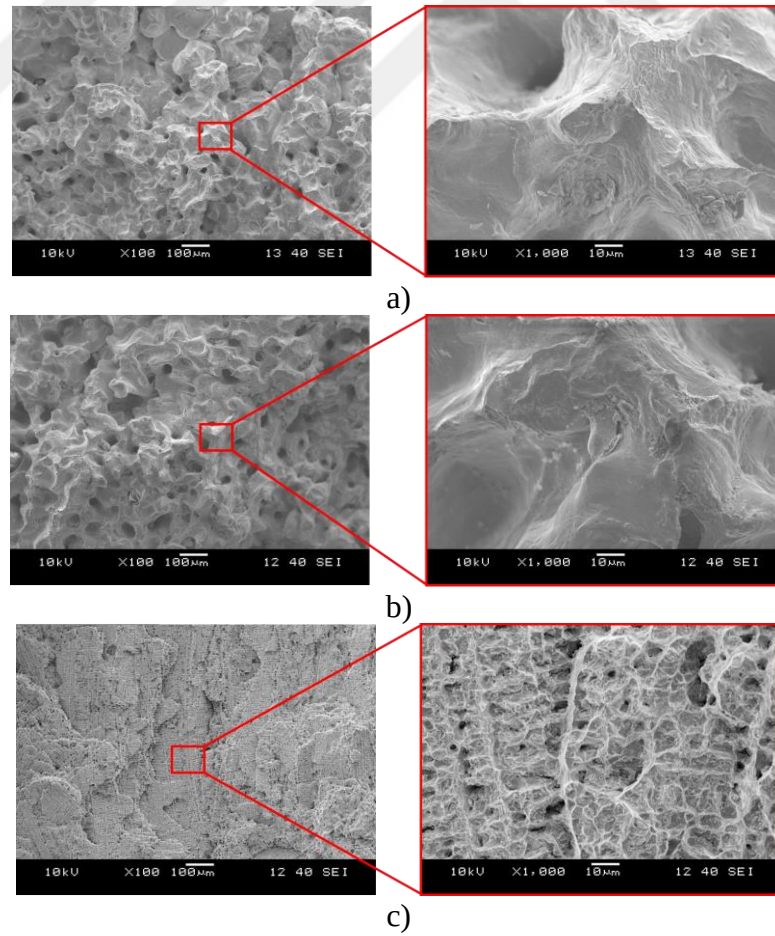
c)

Şekil 4.32 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin çekme testi sonuçları

Çekme testi sonrasında numunelerin hasar yüzey görüntüleri Şekil 4.33'de verilmiştir. P107 numunesi ile kıyaslandığında porozite miktarı ve boyutlarında önemli ölçüde azalma göze çarpmaktadır. Ayrıca her iki numune için de hasar tipinin taneler arası kırılma olarak gerçekleştiği görülmektedir. Artan mukavemet ve kopmada %uzama değerlerine rağmen dimple yapısına rastlanmamıştır. Döküm numunenin görüntüsü incelendiğinde ise dendrit dokusu açık şekilde görülebilmektedir.

Tablo 4.3 P107, P63, P38 ve döküm numunelerin mekanik özellikleri

Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopmada % Uzama
P107	191±5,3	33,7±1,6
P63	233,75±18,48	34,77±1,24
P37	249,24±7,67	39,25±2,82
Döküm	349,04±5,10	33,42±0,55

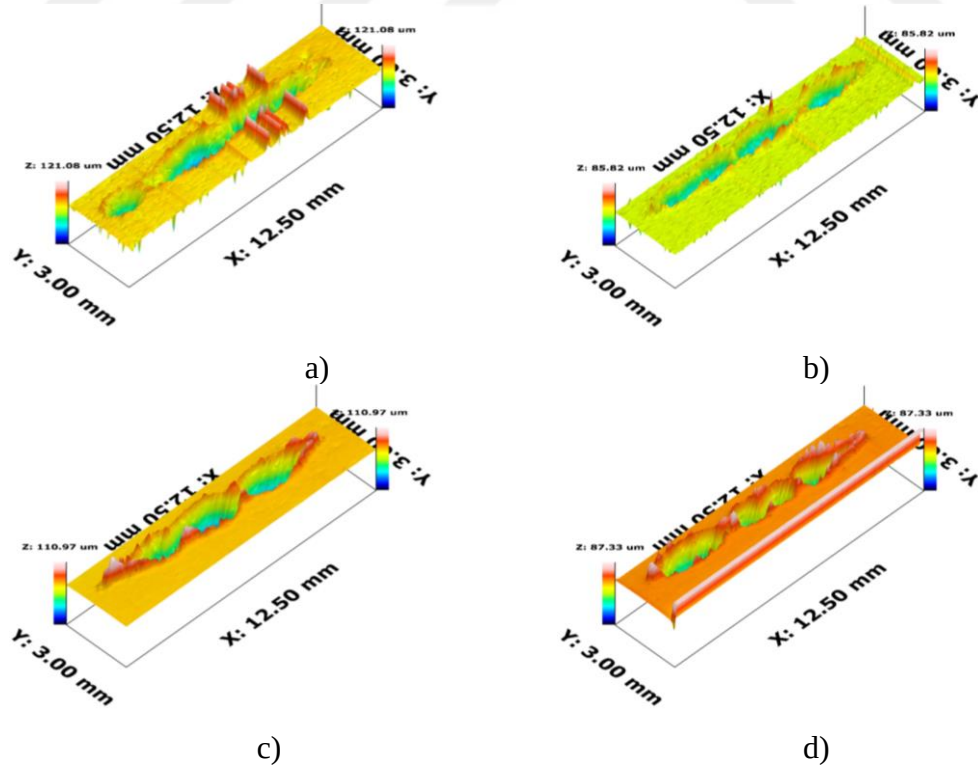


Şekil 4.33 a) P63, b) P38 ve c) döküm numunelerin hasar yüzey görüntüleri

Numunelerin sertlik değerleri Tablo 4.5'te görülmektedir. P107, P63, P38 ve döküm numuneleri için sertlik değerleri sırası ile $79\pm5,02$, $86\pm1,06$, $97\pm6,22$ ve $112\pm2,65$ HV0,3 olarak  l  lm   t r. Partikül boyutunun azalması ile azalan porozite miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum malzeme içerisinde bulunan porların batı ucun malzemeye batması sırasında çökmesi ile açıklanmaktadır (Cherry vd., 2014). Numunelerin aşınma testleri sonrası yüzey profil görüntüleri ise  ekil 4.34'te görülmektedir. P107, P63, P38 ve döküm numuneler için aşınma hacim miktarları sırası ile $294,75 \text{ mm}^2\cdot\mu\text{m}$, $164,03 \text{ mm}^2\cdot\mu\text{m}$, $161,24 \text{ mm}^2\cdot\mu\text{m}$ ve $139,49 \text{ mm}^2\cdot\mu\text{m}$ olarak  l  lm   t r. Sonuçlarda da açıkça görüldüğü üzere en az aşınma kaybı döküm numunede elde edilmiştir. Artan partikül boyutu ile artan porozite miktarına bağlı olarak aşınma hacimlerinde de artış meydana gelmiştir.

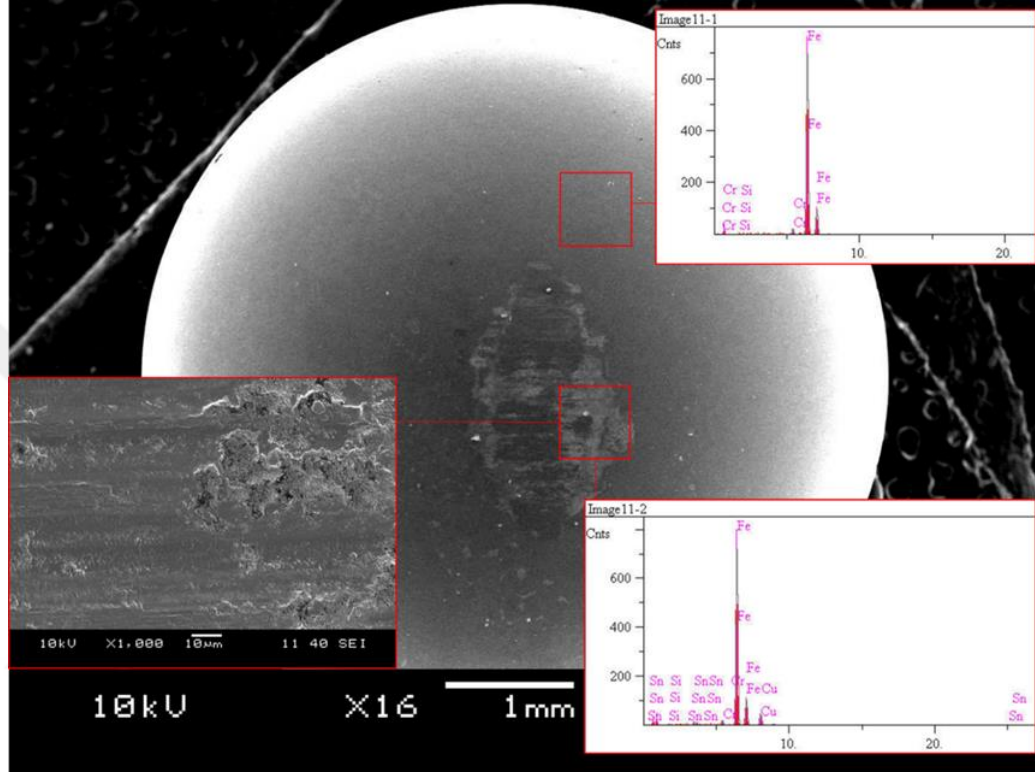
Tablo 4.4 Numunelerin sertlik değerleri

Numune	P107	P63	P38	Döküm
Sertlik HV0,3	$79\pm7,02$	$86\pm7,06$	$97\pm6,22$	$112\pm2,65$



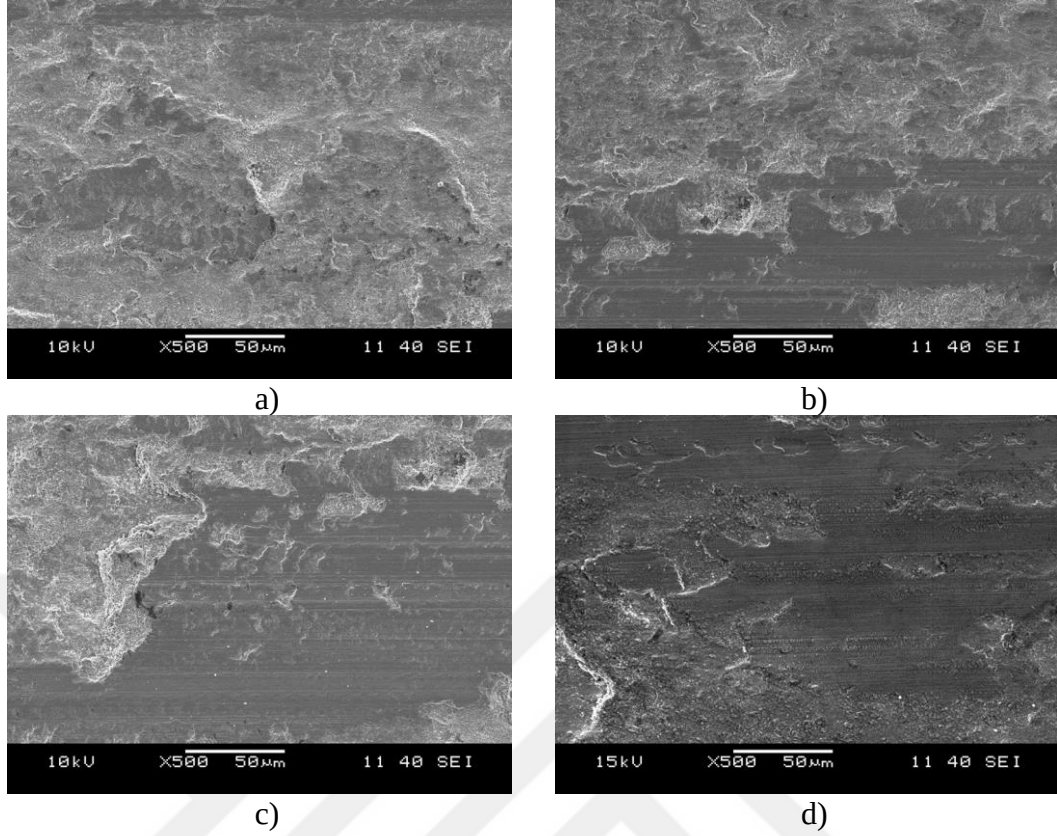
Şekil 4.34 a) P107, b) P63, c) P38 ve d) döküm numunelerin aşınma testleri sonrası yüzey profil görüntüleri

Şekil 4.35'te aşındırıcı bilye yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analizleri görülmektedir. EDX sonuçları incelendiğinde bilye yüzeyindeki malzemenin Cu ve Sn içerdiği görülmektedir. Adezif aşınmanın belirtisi olan bu durum altlık yüzeyinden bilye yüzeyine malzeme transferi gerçekleştiğinin göstergesidir.



Şekil 4.35 Aşınma testi sonrası bilye yüzey görüntüsü ve EDX analizleri

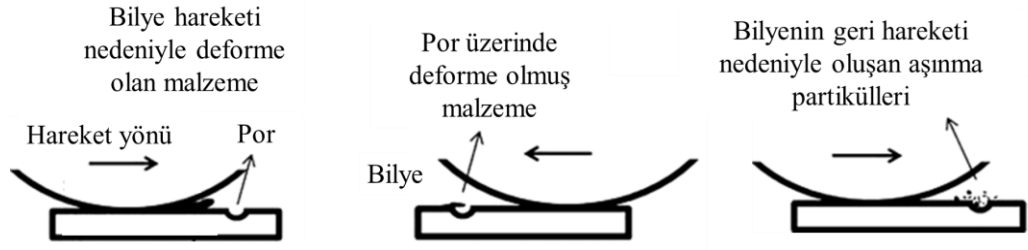
Şekil 4.36'da ise numunelere ait aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde koyu renkli düzgün görünen yüzeylerde birbirine paralel ve aşınma yönüne yönelmiş oluklar görülmektedir.



Şekil 4.36 a) P107, b) P63, c) P38 ve d) döküm numunelerin aşınma testi sonrası yüzey SEM görüntüleri

Abrasiv aşınma nedeniyle yoğun plastik deformasyona bağlı olarak meydana gelen bu malzeme kaybı oluklanma olarak adlandırılmaktadır (Sinha vd., 2015). Şekil 4.37’de poroz yapılı yüzeyde aşındırıcı bilyenin hareketi sırasında deformasyona bağlı malzeme kaybı oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. İslam ve Farhat (2011) bilyenin hareketine bağlı olarak ince metalik bir tabakanın por yüzeyi üzerine deforme olduğunu, bilyenin geri hareketinde ise bu ince metalik tabakanın kırılarak malzeme kaybına sebep olduğunu belirtmiştir (Islam ve Farhat, 2011).

Görüntülerdeki açık renkli bölgelerin ise delaminasyon sonucu oluşan pürüzlü bölgeler olduğu görülmektedir. Wang vd. (2003) porların gerilme yığılmaları nedeni ile aşınma sırasında çatlak oluşumunu tetiklediğini belirtmiştir (J. Wang vd., 2003). Hamid vd. (2008) artan porozite miktarına bağlı olarak gerçek temas yüzey alanının azaldığını, buna bağlı olarak temas basıncının ve yüzey altı çatlak oluşumunun arttığını belirtmiştir (Hamid vd., 2008).



Şekil 4.37 Poroz yapılı yüzeyde aşındırıcı bilyenin hareketi sırasında deformasyona bağlı malzeme kaybı oluşumunun şematik gösterimi (İslam ve Farhat, 2011)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Çalışma kapsamında CuSn10 gaz atomize metal tozu, PE-W, PP ve SA bağlayıcı sistemi karışımı kullanılarak masaüstü bir FDM 3B yazıcıda ile başarılı bir şekilde metalik malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

20 mm/s yazdırma hızında iletim vidası hızının 4 d/d olduğu durumda depozitlenen hat yapısının sürekli ve homojen olduğu görülmüştür. Düşük vida hızlarında yetersiz malzeme ekstrüzyonu nedeniyle, yüksek vida hızlarında ise fazla malzeme ekstrüzyonu nedeniyle depozitlenmiş hat yapısının homojen ve düzenli olmadığı belirlenmiştir.

Yazdırma işlemi sırasında soğutma fanı kullanımının yazdırılmış parçanın şekil bütünlüğü açısından büyük önem taşıdığı görülmüştür. Soğutma fanı kullanılmadığı durumda soğumanın sağlanamaması, malzemenin katılaşmasına izin verilmeden yeni katmanların depozitlenmesine bağlı olarak yapının ağırlığı taşıyamayarak çöktüğü gözlenmiştir.

Artan yazdırma hızı ve katman kalınlığına bağlı olarak depozitlenmiş hat kesit profilinin değiştiği, hatların belirgin hale geldiği ve buna bağlı olarak hat temas noktalarında boşluk oluşumu meydana geldiği belirlenmiştir. 20 mm/s yazdırma hızı ve 0,2 mm katman kalınlığı parametrelerinin yazdırılmış parçada boşluk oluşumunu engellediği görülmüştür.

Sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasına bağlı olarak porozite miktarında azalma, mekanik özelliklerde artış sağlanmıştır. Sinterleme sıcaklığının katı-sıvı aralığında seçilmesi ile şekil bütünlüğünde bozulma meydana gelmiş, sinterlenmiş parçanın şeklini koruyamadığı gözlenmiştir. 875 °C sinterleme sıcaklığı ve 5 saat sinterleme

süresinin, sinterlenmiş parçanın porozite ve mukavemeti açısından optimum sonuçları sağladığı belirlenmiştir.

875 °C’de 5 saat sinterleme sonucunda P107, P63 ve P38 tozları için yoğunluk değerleri sırası ile 8,008 g/cm³, 8,258 g/cm³ ve 8,288 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Sinterleme işlemi sırasında meydana gelen lineer küçülme oranları ise P107, P63 ve P38 tozları için sırası ile %16, %10 ve %8 olarak belirlenmiştir.

Azalan partikül boyutu ile sinterlemenin geliştiği görülmüş ve buna bağlı olarak porozite miktarında azalma, mekanik özelliklerde ve aşınma direncinde artış kaydedilmiştir. Aşınma davranışının partikül boyutu veya üretim yönteminden bağımsız olarak tüm numunelerde adesiv ve delaminasyon karakterli olduğu belirlenmiştir.

5.2 Öneriler

Çalışma kapsamında besleme stoğu hazırlama işlemi mekanik karıştırıcı yardımı ile yapılmıştır. Üretim aşamasının başlangıcı olan besleme stoğunun homojen yapıda olması, son ürün olan sinterlenmiş parçanın özelliklerini de etkilemektedir. Bu nedenle polimerik bileşenler ve metal tozunu karıştırma işleminin, kesme kuvveti uygulayan çift vidalı ekstrüder gibi bir cihazda gerçekleştirilmesi, tüm üretim yöntemini ve malzeme özelliklerini geliştirebilir.

Tez çalışması kapsamında oksijen temasını önlemek amacı ile grafit kullanımının başarılı olduğu görülmüştür. Yapıda mevcut oksit bileşenlerin indirgemesi açısından sinterleme işleminin H₂ gibi indirgeyici bir gaz atmosferinde ya da vakum ortamında yapılması, sinterleme performansını geliştirerek porozite oluşumunu azaltabilir. Azalan porozite miktarına bağlı olarak parçaların mekanik özelliklerinde artış gözlenmesi muhtemeldir.

KAYNAKLAR

- Afshari, E., Ghambari, M. ve Abdolmalek, H. (2017). Production of CuSn10 bronze powder from machining chips using jet milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1–4), 663–672. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0126-3>
- Ahn, D.-G. (2021). Directed energy deposition (ded) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- Ammosova, L., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C. ve Mönkkönen, K. vd. (2021). Effect of metal particle size and powder volume fraction on the filling performance of powder injection moulded parts with a microtextured surface. *Precision Engineering*, 72, 604–612. <https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2021.06.014>
- Annoni, M., Giberti, H. ve Strano, M. (2016). Feasibility study of an extrusion-based direct metal additive manufacturing technique. *Procedia Manufacturing*, 5, 916–927. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2016.08.079>
- Arianegroup (25 Mayıs 2022). *Future ariane propulsion module: simplified by additive manufacturing*. https://www.eos.info/01_parts-and-applications/case_studies_applications_parts/_case_studies_pdf/en_cases/cs_m_aerospace_arianegroup_en.pdf
- Ashammakhi, N., Ahadian, S., Darabi, M. A., el Tahchi, M., Lee, J. vd. (2019). Minimally invasive and regenerative therapeutics. *Advanced Materials*, 31(1), 1804041. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201804041>
- ASTM (22 Mayıs 2022). *Standard terminology for additive manufacturing technologies*. <https://www.astm.org/f2792-12.html>
- Atre, S. V., Weaver, T. J. ve German, R. M. (1998). Injection molding of metals and ceramics. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/982417>

- Barik, R. C., Wharton, J. A., Wood, R. J. K., Tan, K. S. ve Stokes, K. R. (2005). Erosion and erosion–corrosion performance of cast and thermally sprayed nickel–aluminium bronze. *Wear*, 259(1–6), 230–242. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2005.02.033>
- Basir, A., Sulong, A. B., Jamadon, N. H. ve Muhamad, N. (2020). Bi-material micro-part of stainless steel and zirconia by two-component micro-powder injection molding: rheological properties and solvent debinding behavior. *Metals*, 10(5), 595. <https://doi.org/10.3390/MET10050595>
- Bathsheba Sculpture (22 Haziran 2022). *Bathsheba sculpture llc*. <https://bathsheba.com/>
- Black, J. (1994). Biologic performance of tantalum. *Clinical Materials*, 16(3), 167–173. [https://doi.org/10.1016/0267-6605\(94\)90113-9](https://doi.org/10.1016/0267-6605(94)90113-9)
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J. vd. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Materials & Design*, 209, 110008. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.110008>
- BMW (22 Mayıs 2022). *3D printed fixture for the soft-top BMW i8 Roadster*. <https://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P90329577/3d-printed-fixture-for-the-soft-top-bmw-i8-roadster-11/2018>
- Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H. ve Bandyopadhyay, A. (2018). Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in Materials Science*, 93, 45–111. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.08.003>
- Buj-Corral, I., Tejo-Otero, A. ve Fenollosa-Artés, F. (2020). Development of am technologies for metals in the sector of medical implants. *Metals*, 10(5), 686. <https://doi.org/10.3390/MET10050686>
- Caminero, M. Á., Romero, A., Chacón, J. M., Núñez, P. J., García-Plaza, E. vd. (2021). Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties. *Rapid Prototyping*

Journal, 27(3), 583–591. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2020-0120/FULL/XML>

Canakci, A., Cuvalci, H., Varol, T., Erfedmir, F., Ozkaya, S. D. vd. (2014). Microstructure and abrasive wear behavior of CuSn10–graphite composites produced by powder metallurgy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 53(6), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9614-2>

Cedeño-Viveros, L. D., Vázquez-Lepe, E., Rodríguez, C. A., ve García-López, E. (2021). Influence of process parameters for sheet lamination based on laser micro-spot welding of austenitic stainless steel sheets for bone tissue applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(1–2), 247–262. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-07113-3/FIGURES/14>

Chastand, V., Quaegebeur, P., Maia, W., ve Charkaluk, E. (2018). Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM). *Materials Characterization*, 143, 76–81. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2018.03.028>

Chen, G., Wen, G., Edmonds, N. ve Cao, P. (2015). Water debinding behaviour of water soluble Ti-MIM feedstock. *Powder Metallurgy*, 58(3), 220–227. <https://doi.org/10.1179/1743290115Y.0000000003>

Chen, X., Liu, X., Childs, P., Brandon, N. ve Wu, B. (2017). A Low Cost Desktop Electrochemical Metal 3D Printer. *Advanced Materials Technologies*, 4(10), 1700148. <https://doi.org/10.1002/admt.201700148>

Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R. vd. (2014). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2014 76:5, 76(5), 869–879. <https://doi.org/10.1007/S00170-014-6297-2>

Coffigniez, M., Gremillard, L., Perez, M., Simon, S., Rigollet, C. vd. (2021). Modeling of interstitials diffusion during debinding/sintering of 3D printed metallic

- filaments: Application to titanium alloy and its embrittlement. *Acta Materialia*, 219, 117224. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2021.117224>
- Dandang, N. A. N., Harun, W. S. W., Khalil, N. Z., Ahmad, A. H., Romlay, F. R. M. vd. (2017). Paraffin wax removal from metal injection moulded cochrmo alloy compact by solvent debinding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012020>
- Danneels, E. (2004). Disruptive technology reconsidered: a critique and research agenda. *Journal of Product Innovation Management*, 21(4), 246–258. <https://doi.org/10.1111/J.0737-6782.2004.00076.X>
- Dass, A. ve Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: from additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 418. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9070418>
- Deckard, C. R. (22 Mayıs 2022) *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. <https://patents.google.com/patent/US4863538A/en>
- Dehghan-Manshadi, A., Yu, P., Dargusch, M., StJohn, D. ve Qian, M. (2020). Metal injection moulding of surgical tools, biomaterials and medical devices: A review. *Powder Technology*, 364, 189–204. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2020.01.073>
- Delgado, J., Ciurana, J., ve Rodríguez, C. A. (2011). Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5), 601–610. <https://doi.org/10.1007/S00170-011-3643-5>
- Deng, C., Kang, J., Feng, T., Feng, Y., Wang, X. vd. (2018). Study on the selective laser melting of CuSn10 powder. *Materials*, 11(4), 614. <https://doi.org/10.3390/ma11040614>

- Dev Singh, D., Mahender, T. ve Raji Reddy, A. (2021). Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 350–355. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.415>
- Ekren, O., Ozkomur, A. ve Ucar, Y. (2018). Effect of layered manufacturing techniques, alloy powders, and layer thickness on metal-ceramic bond strength. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 119(3), 481–487. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2017.04.007>
- Emminghaus, N., Hoff, C., Hermsdorf, J. ve Kaierle, S. (11 Mayıs 2022). *Additive manufacturing of CuSn10 Powder via selective laser melting*. https://www.wlt.de/lim/Proceedings2019/data/PDF/Contribution_187_final.pdf
- EOS, (22 Mayıs 2022). *Additive manufacturing in motor sports*. https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/mobility-logistics/automotive-industry-3d-printing/motor-sports#video_61391
- Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Chen, Q. ve Advincula, R. C. (2019). 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 245–267. <https://doi.org/10.1007/S40964-019-00077-7>
- Fang, X., Du, J., Wei, Z., He, P., Bai, H. vd. (2017). An investigation on effects of process parameters in fused-coating based metal additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 383–389. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2017.01.008>
- Ford media center (22 Temmuz 2022). *Ford develops 3d-printed locking wheel nuts to thwart thieves*. <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/gb/en/news/2020/01/30/ford-develops-3d-printed-locking-wheel-nuts-to-thwart-thieves.html>
- Fukushima, M., Wu, B., Ibe, H., Wakai, K., Sugiyama, E. vd. (2010). Study on dechlorination technology for municipal waste plastics containing polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 12(2), 108–122. <https://doi.org/10.1007/S10163-010-0279-8>

- Gibson, I., Rosen, D. W. ve Stucker, B. (2010). Sheet lamination processes. *Additive Manufacturing Technologies*, 223–252. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_8
- Gjokaj, V., Papapolymerou, J., Albrecht, J. D. ve Chahal, P. (2019). Design and fabrication of additively manufactured hybrid rigid-flex rf components. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(4), 779–785. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2019.2900210>
- Godec, D., Cano, S., Holzer, C. ve Gonzalez-Gutierrez, J. (2020). Optimization of the 3d printing parameters for tensile properties of specimens produced by fused filament fabrication of 17-4PH stainless steel. *Materials*, 13(3), 774. <https://doi.org/10.3390/MA13030774>
- Gong, H., Snelling, D., Kardel, K. ve Carrano, A. (2018). Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes. *JOM*, 71(3), 880–885. <https://doi.org/10.1007/S11837-018-3207-3>
- Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C. ve Sapkota, J. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives. *Materials*, 11(5), 840. <https://doi.org/10.3390/MA11050840>
- Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C. ve Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Analytical Chemistry*, 86(7), 3240–3253. https://doi.org/10.1021/AC403397R/ASSET/IMAGES/LARGE/AC-2013-03397R_0009.JPEG
- Gu, X. N. ve Zheng, Y. F. (2010). A review on magnesium alloys as biodegradable materials. *Frontiers of Materials Science in China*, 4(2), 111–115. <https://doi.org/10.1007/S11706-010-0024-1>

- Guan, Z., Hwang, I., Pan, S. ve Li, X. (2018). Scalable manufacturing of AgCu40(wt %)-WC nanocomposite microwires. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 6(3). <https://doi.org/10.1115/1.4040558/368766>
- Guo, S. Z., Qiu, K., Meng, F., Park, S. H. ve McAlpine, M. C. (2017). 3D printed stretchable tactile sensors. *Advanced Materials*, 29(27), 1701218. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201701218>
- Hamid, A. A., Ghosh, P. K., Jain, S. C. ve Ray, S. (2008). The influence of porosity and particles content on dry sliding wear of cast in situ Al(Ti)–Al₂O₃(TiO₂) composite. *Wear*, 265(1–2), 14–26. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2007.08.018>
- Hamidi, M. F. F. A., Harun, W. S. W., Khalil, N. Z., Ghani, S. A. C. ve Azir, M. Z. (2017). Study of solvent debinding parameters for metal injection moulded 316L stainless steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012035>
- Hannibal, M. ve Knight, G. (2018). Additive manufacturing and the global factory: disruptive technologies and the location of international business. *International Business Review*, 27(6), 1116–1127. <https://doi.org/10.1016/J.IBUSREV.2018.04.003>
- Hausnerova, B., Mukund, B. N. ve Sanetnik, D. (2017). Rheological properties of gas and water atomized 17-4PH stainless steel MIM feedstocks: Effect of powder shape and size. *Powder Technology*, 312, 152–158. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2017.02.023>
- He, Q., Jiang, J., Yang, X., Zhang, L., Zhou, Z. vd. (2021). Additive manufacturing of dense zirconia ceramics by fused deposition modeling via screw extrusion. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(1), 1033–1040. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2020.09.018>

- He, Y., Wu, Y., Fu, J. Z., Gao, Q. ve Qiu, J. J. (2016). Developments of 3D printing microfluidics and applications in chemistry and biology: a review. *Electroanalysis*, 28(8), 1658–1678. <https://doi.org/10.1002/ELAN.201600043>
- Heng, S. Y., Muhamad, N., Sulong, A. B., Fayyaz, A. ve M. Amin, S. (2013). Effect of sintering temperature on the mechanical and physical properties of WC–10%Co through micro-powder injection molding (μ PIM). *Ceramics International*, 39(4), 4457–4464. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2012.11.039>
- Hon, K. K. B., Li, L. ve Hutchings, I. M. (2008). Direct writing technology—advances and developments. *CIRP Annals*, 57(2), 601–620. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.09.006>
- Hong, S., Sanchez, C., Du, H. ve Kim, N. (2015). Fabrication of 3D printed metal structures by use of high-viscosity cu paste and a screw extruder. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), 836–841. <https://doi.org/10.1007/S11664-014-3601-8>
- Huang, B., Liang, S. ve Qu, X. (2003). The rheology of metal injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 137(1–3), 132–137. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01100-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01100-7)
- Huber, D., Vogel, L. ve Fischer, A. (2021). The effects of sintering temperature and hold time on densification, mechanical properties and microstructural characteristics of binder jet 3D printed 17-4 PH stainless steel. *Additive Manufacturing*, 46, 102114. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102114>
- Hull, C. W. ve Arcadia, C. (11 Mayıs 2022). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereo thography*. <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>
- Incus (11 Mayıs 2022). *Unique lithography-based metal manufacturing*. <https://www.incus3d.com/technology>
- Iro3D (11 Mayıs 2022). *Metal 3d printer*. <https://iro3d.com/>

- Markforged (25 Mayıs 2022). *Industrial 3d printing*.
<https://markforged.com/resources/application-spotlights>
- Islam, M. A. ve Farhat, Z. N. (2011). Effect of porosity on dry sliding wear of Al–Si alloys. *Tribology International*, 44(4), 498–504.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2010.12.007>
- Jafferson, J. M. ve Chatterjee, D. (2021). A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1349–1365.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.485>
- Jin, C., Zhang, J., Li, X., Yang, X., Li, J. vd. (2013). Injectable 3-D fabrication of medical electronics at the target biological tissues. *Scientific Reports*, 3(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/srep03442>
- Jing, L., Tan, B., Jiang, S. ve Ma, J. (2021). Additive manufacturing industrial adaptability analysis using fuzzy Bayesian Network. *Computers & Industrial Engineering*, 155, 107216. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2021.107216>
- Jurisch, M., Studnitzky, T., Andersen, O. ve Kieback, B. (2015). 3D screen printing for the fabrication of small intricate Ti-6Al-4V parts. *Powder Metallurgy*, 58(5), 339–343. <https://doi.org/10.1179/0032589915Z.0000000000255>
- Kaleli, N., Ekren, O., Uçar, Y. ve Ural, Ç. (2022). Evaluation of the flexural strength of metal frameworks fabricated by sintering-based computer-aided manufacturing methods. *The Journal of Prosthetic Dentistry*.
<https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2022.04.003>
- Khoshnevis, B., Asiabanpour, B., Mojdeh, M. ve Palmer, K. (2003). SIS - A new SFF method based on powder sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 9(1), 30–36.
<https://doi.org/10.1108/13552540310455638/FULL/PDF>
- Khoshnevis, B., Yoozbashizadeh, M. ve Chen, Y. (2012). Metallic part fabrication using selective inhibition sintering (SIS). *Rapid Prototyping Journal*, 18(2), 144–153. <https://doi.org/10.1108/135525412112121222/FULL/PDF>

- Kok, Y., Tan, X. P., Wang, P., Nai, M. L. S., Loh, N. H. vd. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design*, 139, 565–586. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.11.021>
- Kostidi, E. ve Nikitakos, N. (2018). Is it time for the maritime industry to embrace 3d printed spare parts? *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12(3), 557–564. <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.16>
- Kostoff, R. N., Boylan, R. ve Simons, G. R. (2004). Disruptive technology roadmaps. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1–2), 141–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00048-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00048-9)
- Kurose, T., Abe, Y., Santos, M. V. A., Kanaya, Y., Ishigami, A. vd. (2020). Influence of the layer directions on the properties of 316l stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals. *Materials*, 13(11), 2493. <https://doi.org/10.3390/MA13112493>
- Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., Urzhumtsev, O. D., Schilling, R. ve Tavitov, A. G. (2018). Strength of pla components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3d printer as a function of geometrical parameters of the process. *Polymers*, 10(3), 313. <https://doi.org/10.3390/POLYM10030313>
- Lass, N., Riegger, L., Zengerle, R. ve Koltay, P. (2013). Enhanced liquid metal micro droplet generation by pneumatic actuation based on the starjet method. *Micromachines*, 4(1), 49–66. <https://doi.org/10.3390/MI4010049>
- Lee, C. Y. ve Liu, C. Y. (2019). The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 25, 196–203. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.11.012>
- Lee, J. Y., Tan, W. S., An, J., Chua, C. K., Tang, C. Y. vd. (2016). The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology. *Journal of*

Membrane Science, 499, 480–490.
<https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2015.11.008>

Lewis, J. A. ve Ahn, B. Y. (2015). Three-dimensional printed electronics. *Nature*, 518(7537), 42–43. <https://doi.org/10.1038/518042a>

Li, D., Pan, D., Zhang, C., Wu, W., Lu, R. vd. (2019). Powder injection moulding of Inconel 713C alloy. *Powder Metallurgy*, 62(4), 240–246. <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1637171>

Li, J. P., de Wijn, J. R., van Blitterswijk, C. A. ve de Groot, K. (2006). Porous Ti6Al4V scaffold directly fabricating by rapid prototyping: Preparation and in vitro experiment. *Biomaterials*, 27(8), 1223–1235. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2005.08.033>

Li, J. ve Pumera, M. (2021). 3D printing of functional microrobots. *Chemical Society Reviews*, 50(4), 2794–2838. <https://doi.org/10.1039/D0CS01062F>

Li, J., Xie, Z., Zhang, X., Zeng, Q. ve Liu, H. (2010). Study of metal powder extrusion and accumulating rapid prototyping. *Key Engineering Materials*, 443, 81–86. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.443.81>

Li, Y., Li, L. ve Khalil, K. A. (2007). Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2–3), 432–439. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2006.10.039>

Lipson, H. ve Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=MpLXWHp-srIC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Lipson+H,+Kurman+M.+Fabricated:+the+new+world+of+3D+printing.+Indianapolis,+Indiana:+John+Wiley+and+Sons,+Inc.%3B+2013.&ots=Z4eTBVG4-D&sig=9n7NaYuFf63We-hcq9Mm5GYrKvw>

Lu, S., Chen, X., Zheng, H., Zhao, Y. ve Long, Y. (2019). Simulation and experiment on droplet volume for the needle-type piezoelectric jetting dispenser. *Micromachines*, 10(9), 623. <https://doi.org/10.3390/MI10090623>

- Lu, Z., Ayeni, O. I., Yang, X., Park, H. Y., Jung, Y. G. vd. (2020). Microstructure and phase analysis of 3D-printed components using bronze metal filament. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(3), 1650–1656. <https://doi.org/10.1007/S11665-020-04697-X/FIGURES/8>
- Manriquez-Frayre, I. A. ve Bourell, D. L. (1990). *Selective laser sintering of binary metallic powder*. International Solid Freeform Fabrication Symposium. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1990/1990-09-Frayre.pdf>
- Mao, Z., Zhang, D., Wei, P., Zhang, K. (2017). Manufacturing feasibility and forming properties of Cu-4Sn in selective laser melting. *Materials*, 10(4), 333. <https://doi.org/10.3390/ma10040333>
- MARITIME (25 Mayıs 2022). *Maritime*. <https://mx3d.com/industries/maritime/>
- McGee, O. M., Geraghty, S., Hughes, C., Jamshidi, P., Kenny, D. P. vd. (2021). An investigation into patient-specific 3D printed titanium stents and the use of etching to overcome selective laser melting design constraints. *BioRxiv*, 2021.03.07.434132. <https://doi.org/10.1101/2021.03.07.434132>
- Milewski, J. O. (2017). Additive manufacturing metal, the art of the possible. *Springer Series in Materials Science*, 258, 7–33. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4_2
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L. vd. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2020.100707>
- Mostafaei, A., Rodriguez De Vecchis, P., Nettleship, I. ve Chmielus, M. (2019). Effect of powder size distribution on densification and microstructural evolution of binder-jet 3D-printed alloy 625. *Materials & Design*, 162, 375–383. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.11.051>
- Mousapour, M., Azadbeh, M. ve Danninger, H. (2017). Effect of compacting pressure on shape retention during supersolidus liquid phase sintering of Cu base alloys.

Powder Metallurgy, 60(5), 393–403.
<https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1357781>

MX3D (25 Haziran 2022). *Architecture & Construction*.
<https://mx3d.com/industries/architecture-construction/>

Najmon, J. C., Raeisi, S. ve Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>

Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H. vd. (2017). Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 207–218. <https://doi.org/10.1016/J.COSSMS.2016.12.002>

Ni, J., Ling, H., Zhang, S., Wang, Z., Peng, Z. vd. (2019). Three-dimensional printing of metals for biomedical applications. *Materials Today Bio*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/J.MTBIO.2019.100024>

Niinomi, M. (2002). Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(3), 477–486. <https://doi.org/10.1007/S11661-002-0109-2>

Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(1), 30–42. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2007.07.001>

Niinomi, M., Nakai, M. ve Hieda, J. (2012). Development of new metallic alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 8(11), 3888–3903. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2012.06.037>

Nooraizedfiza, Z., Husseinsyah, S., Salmah, H. ve Omar, M. A. (2013). The effect of shear rate and temperature on rheology properties of magnesium metal injection molding. Feedstock. *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.)*, 7(7). <https://www.researchgate.net/publication/281264926>

- O'Brien, B., Stinson, J. ve Carroll, W. (2008). Development of a new niobium-based alloy for vascular stent applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(4), 303–312. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2007.11.003>
- Papazoglou, E. L., Karkalos, N. E., Karmiris-Obratański, P. ve Markopoulos, A. P. (2021). On the modeling and simulation of slm and sls for metal and polymer powders: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2), 941–973. <https://doi.org/10.1007/S11831-021-09601-X>
- Park, J. H., Odkhuu, M., Cho, S., Li, J., Park, B. Y. vd. (2020). 3D-printed titanium implant with pre-mounted dental implants for mandible reconstruction: a case report. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, 42(1), 1–4. <https://doi.org/10.1186/S40902-020-00272-5/FIGURES/4>
- Rane, K. ve Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing*, 7(2), 155–173. <https://doi.org/10.1007/S40436-019-00253-6>
- Rangaswamy, P., Griffith, M. L., Prime, M. B., Holden, T. M., Rogge, R. B. vd. (2005). Residual stresses in LENS® components using neutron diffraction and contour method. *Materials Science and Engineering A*, 399, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.02.019>
- Ren, L., Zhou, X., Song, Z., Zhao, C., Liu, Q. vd. (2017). Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW–LDPE–SA binder system. *Materials*, 10(3), 305. <https://doi.org/10.3390/MA10030305>
- Revilla-León, M. ve Özcan, M. (2017). Additive manufacturing technologies used for 3D metal printing in dentistry. *Current Oral Health Reports*, 4(3), 201–208. <https://doi.org/10.1007/S40496-017-0152-0>
- Roumanie, M., Flassayer, C., Resch, A., Cortella, L. ve Laucournet, R. (2021). Influence of debinding and sintering conditions on the composition and thermal

conductivity of copper parts printed from highly loaded photocurable formulations. *SN Applied Sciences*, 3. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04049-3>

Sachs, E. M. (22 Mayıs 2022). *Three-dimensional printing techniques* - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US5204055A/en>

Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R. ve Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 61(5), 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>

Santoliquido, O., Colombo, P. ve Ortona, A. (2019). Additive manufacturing of ceramic components by digital light processing: a comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(6), 2140–2148. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2019.01.044>

Sasahara, H., Tsutsumi, M. ve Chino, M. (2005). Development of a layered manufacturing system using sheet metal-polymer lamination for mechanical parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(3), 268–273. <https://doi.org/10.1007/S00170-004-2163-Y>

Saunders, N. ve Miodownik, A. P. (1990). The Cu-Sn (Copper-Tin) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 11(3), 278–287. <https://doi.org/10.1007/BF03029299>

Scheithauer, U., Pötschke, J., Weingarten, S., Schwarzer, E., Vornberger, A. vd. (2017). Droplet-based additive manufacturing of hard metal components by thermoplastic 3D printing (T3DP). *Scholar.Archive.Org*, 8(1), 155–160. <https://doi.org/10.4416/JCST2016-00104>

Scheithauer, U., Weingarten, S., Johne, R., Schwarzer, E., Abel, J. vd. (2017). Ceramic-based 4D components: additive manufacturing (AM) of ceramic-based functionally graded materials (FGM) by thermoplastic 3d printing (T3DP). *Materials*, 10(12), 1368. <https://doi.org/10.3390/MA10121368>

- Scudino, S., Unterdörfer, C., Prashanth, K., Attar, H. ve Ellendt, N. (2015). Additive manufacturing of Cu–10Sn bronze. *Materials Letters*, 156, 202-204. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.076>
- Selema, A., Ibrahim, M. N. ve Sergeant, P. (2022). Metal additive manufacturing for electrical machines: technology review and latest advancements. *Energies*, 15(3), 1076. <https://doi.org/10.3390/EN15031076>
- Sengupta, P., Panigrahi, A., Indoria, B., Meher, P., Acharya, T. S. vd. (2020). Substitution of Ni with NiB prevents shape distortion of liquid phase sintered 90W–6Ni–2Fe–2Co heavy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 840, 155785. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.155785>
- Shih, C. C., Shih, C. M., Su, Y. Y., Su, L. H. J., Chang, M. S. vd. (2004). Effect of surface oxide properties on corrosion resistance of 316L stainless steel for biomedical applications. *Corrosion Science*, 46(2), 427–441. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00148-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00148-3)
- Shrinivas Mahale, R., Shamanth, V., Hemanth, K., Nithin, S. K., Sharath, P. C. vd. (2022). Processes and applications of metal additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 54, 228–233. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.08.298>
- Siebel, T. (2021). Additive manufacturing on the threshold of mass production. *ATZelectronics Worldwide*, 16(11), 34–39. <https://doi.org/10.1007/S38314-021-0704-X>
- Singamneni, S., LV, Y., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W. ve Jordison, D. (2019). Additive manufacturing for the aircraft industry: a review. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 08(01). <https://doi.org/10.35248/2168-9792.19.8.215>
- Singh, G., Missiaen, J. M., Bouvard, D. ve Chaix, J. M. (2021). Copper additive manufacturing using MIM feedstock: adjustment of printing, debinding, and sintering parameters for processing dense and defectless parts. *International*

Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115(1–2), 449–462.
<https://doi.org/10.1007/S00170-021-07188-Y/FIGURES/11>

Singh, S. S., Ghodki, B. M. ve Goswami, T. K. (2018). Effect of grinding methods on powder quality of king chilli. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1686–1694. <https://doi.org/10.1007/S11694-018-9784-6/FIGURES/3>

Sinha, A., Islam, Md. A. ve Farhat, Z. (2015). Reciprocating wear behavior of al alloys: effect of porosity and normal load. *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*, 2015(2). <https://doi.org/10.15344/2455-2372/2015/117>

Sobota, J., Rodak, K. ve Nowak, M. (2019). Microstructure and properties of tin bronzes produced by the SPD method. *Archives of Metallurgy and Materials*, 64(1), 95–102. <https://doi.org/10.24425/AMM.2019.126223>

Spiller, Q. ve Fleischer, J. (2018). Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process. *CIRP Annals*, 67(1), 225–228. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2018.04.104>

Srinivasulu Reddy, K. ve Dufera, S. (2016). Additive manufacturing technologies. *International Journal of Management Information Technology and Engineering*, 4(7), 89–112. www.bestjournals.in

Staak, S. (22 Mayıs 2022). *Prototyping investment casting sample parts to reduce costs*. Ultimaker. <https://ultimaker.com/learn/casting-metal-parts-for-prototyping-from-3d-prints>

Surange, V. G. ve Gharat, P. V. (2016). 3d printing process using fused deposition modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 03(03), 1403–1406.

Sweeney, M., Campbell, L. L., Hanson, J., Pantoya, M. L. ve Christopher, G. F. (2017). Characterizing the feasibility of processing wet granular materials to

- improve rheology for 3D printing. *Journal of Materials Science*, 52(22), 13040–13053. <https://doi.org/10.1007/S10853-017-1404-Z/FIGURES/7>
- Thavanayagam, G. ve Swan, J. E. (2019). Optimizing hydride-dehydride Ti-6Al-4V feedstock composition for titanium powder injection moulding. *Powder Technology*, 355, 688–699. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.07.091>
- Toyserkani, E., Sarker, D., Ibhaddode, O. O., Liravi, F., Russo, P. vd. (2021). Additive manufacturing process classification, applications, trends, opportunities, and challenges. *Metal Additive Manufacturing*, 1–30. <https://doi.org/10.1002/9781119210801.CH1>
- Tropmann, A., Lass, N., Paust, N., Metz, T., Ziegler, C. vd. (2011). Pneumatic dispensing of nano- to picoliter droplets of liquid metal with the StarJet method for rapid prototyping of metal microstructures. *Microfluidics and Nanofluidics*, 12(1), 75–84. <https://doi.org/10.1007/S10404-011-0850-1>
- Upadhyaya, A. ve German, R. M. (1998). Shape distortion in liquid-phase-sintered tungsten heavy alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(10), 2631–2638. <https://doi.org/10.1007/S11661-998-0235-6>
- Vaezi, M., Drescher, P. ve Seitz, H. (2020). Beamless metal additive manufacturing. *Materials*, 13(4), 922. <https://doi.org/10.3390/MA13040922>
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A. ve Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/APP11031213>
- Vega, E. J., Cabezas, M. G., Muñoz-Sánchez, B. N., Montanero, J. M. ve Gañán-Calvo, A. M. (2013). A novel technique to produce metallic microdrops for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5), 1395–1402. <https://doi.org/10.1007/S00170-013-5357-3>
- Vishwanath, A. S., Rane, K., Schaper, J., Strano, M. ve Casati, R. (2021). Rapid production of AZ91 Mg alloy by extrusion based additive manufacturing process.

Powder Metallurgy, 64(5), 370–377.
<https://doi.org/10.1080/00325899.2021.1911457>

Waheed, S., Cabot, J. M., Macdonald, N. P., Lewis, T., Guijt, R. M. vd. (2016). 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers. *Lab on a Chip*, 16(11), 1993–2013. <https://doi.org/10.1039/C6LC00284F>

Wahi, A., Muhamad, N., Sulong, A. B. ve Ahmad, R. N. (2016). Effect of sintering temperature on density, hardness and strength of MIM Co30Cr6Mo biomedical alloy. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 63(7), 434–437. <https://doi.org/10.2497/JJSPM.63.434>

Wang, J., He, Y. ve Danninger, H. (2003). Influence of porosity on the sliding wear behavior of sintered Fe-1.5Mo-0.7C steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(3), 339–344. <https://doi.org/10.1361/105994903770343204>

Wang, Y., Ahmed, A., Azam, A., Bing, D., Shan, Z. vd. (2021). Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 709–733. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.07.023>

Weingarten, S., Scheithauer, U., Johne, R., Abel, J., Schwarzer, E. vd. (2019). Multi-material ceramic-based components – additive manufacturing of black-and-white zirconia components by thermoplastic 3D-Printing (CerAM - T3DP). *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, 2019(143), e57538. <https://doi.org/10.3791/57538>

Wischeropp, T. M., Hoch, H., Beckmann, F. ve Emmelmann, C. (2019). *Opportunities for braking technology due to additive manufacturing through the example of a bugatti brake caliper*. 181–193. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58024-0_12

Wohlers, T. ve Gornet, T. (2016). *History of additive manufacturing*. <https://wohlersassociates.com/resource/wohlers-report-2016-published-additive-manufacturing->

industry/#:~:text=According%20to%20Wohlers%20Report%202016,industry%20is%20an%20impressive%206.2%25.

Wong, K. ve Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network*, <https://doi.org/10.5402/2012/208760>

Wu, X., Su, Y., Shi, J., Tino, R., Leary, M. vd. (2018). Additive manufacturing for steels: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/285/1/012028>

Yalçın, B., Ergene, B. ve Tarihi, G. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.

Yamaguchi, K., Sakai, K., Yamanaka, T. ve Hirayama, T. (2000). Generation of three-dimensional micro structure using metal jet. *Precision Engineering*, 24(1), 2–8. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(99\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(99)00015-X)

Yan, X., Hao, L., Xiong, W. ve Tang, D. (2017). Research on influencing factors and its optimization of metal powder injection molding without mold via an innovative 3D printing method. *RSC Advances*, 7(87), 55232–55239. <https://doi.org/10.1039/C7RA11271H>

Yan, X., Wang, C., Xiong, W., Hou, T., Hao, L. vd. (2018). Thermal debinding mass transfer mechanism and dynamics of copper green parts fabricated by an innovative 3D printing method. *RSC Advances*, 8(19), 10355–10360. <https://doi.org/10.1039/C7RA13149F>

Yang, T. C. ve Yeh, C. H. (2020). Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using fused deposition modeling (FDM): the effects of printing speed. *Polymers*, 12(6), 1334. <https://doi.org/10.3390/POLYM12061334>

Yang, W. W., Yang, K. Y., Wang, M. C. ve Hon, M. H. (2003). Solvent debinding mechanism for alumina injection molded compacts with water-soluble binders.

Ceramics International, 29(7), 745–756. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00226-2](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00226-2)

Yao, H., Wang, J. ve Mi, S. (2017). Photo processing for biomedical hydrogels design and functionality: a review. *Polymers*, 10(1), 11. <https://doi.org/10.3390/POLYM10010011>

Yoon, B., Lee, H. ve Jeong, J. (2022). Improved U-Net++ with patch split for micro-defect inspection in silk screen printing. *Applied Sciences*, 12(9), 4679. <https://doi.org/10.3390/APP12094679>

Zeng, C., Zhang, B., Ettefagh, A., Wen, H., Yao, H. vd. (2020). Mechanical, thermal, and corrosion properties of Cu-10Sn alloy prepared by laser-powder-bed-fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101411. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101411>

Zhu, Y., Zou, J. ve Yang, H. yong. (2018). Wear performance of metal parts fabricated by selective laser melting: a literature review. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 19(2), 95–110. <https://doi.org/10.1631/JZUS.A1700328>