

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL
EDİLEN PARÇALARIN BRONZ EMDİRİLEREK İÇYAPI
ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Özden KOR

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2019**



© 2019 [Özden KOR]

TEZ ONAYI

Özden KOR tarafından hazırlanan “ Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat ile İmal Edilen Parçaların Bronz Emdirilerek İyapı Özelliğinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi Doç. Dr. Fatih TAYLAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Jüri Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Kamil DELİKANLI
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Özden KOR

Ök

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. EKLEMELİ İMALAT	9
3.1. Eklemeli İmalat Teknolojileri	13
3.2. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Sınıflandırması	16
3.2.1. VAT fotopolimerizasyon (VAT Photopolymerisation)	19
3.2.2. Malzeme püskürtme (Material Jetting)	21
3.2.3. Malzeme ekstrüzyon-çıkarma (Material Extrusion)	23
3.2.4. Toz yatağı füzyon (Powder Bed Fusion)	25
3.2.5. Sac laminasyon (Sheet Lamination).....	28
3.2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed Energy Deposition).....	30
3.2.7. Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting)	32
4. MATERYAL ve METOT	35
4.1. Materyal	35
4.1.1. Paslanmaz çelik tozu (316L).....	35
4.1.2. Bronz tozu	35
4.1.3. Bağlayıcılar	36
4.1.4. Isıl işlem fırınları	37
4.1.5. Refrakter tuğla.....	38
4.1.6. Yoğunluk ölçümü (Arşimet prensibi)	38
4.1.7. Helyum piknometresi	39
4.1.8. Numune hazırlanma sürecinde kullanılan cihazlar	40
4.1.9. Mikro sertlik testi cihazı	41
4.1.10. Basma testi cihazı.....	42
4.1.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	42
4.1.12. Optik mikroskop	43
4.2. Metot	43
4.2.1. Numune imalatı.....	44

4.2.2. Numunelere uygulanan ısı işlemler.....	44
4.2.3. Mekanik, metalurjik ve fiziksel deneyler.....	45
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	47
5.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	50
5.2. Mikro Sertlik Sonuçları.....	53
5.3. Basma Testi Sonuçları.....	54
5.4. SEM Sonuçları	56
5.5. Optik Mikroskop Sonuçları.....	60
5.6. Numunelerin Resimleri	64
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	78

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLEN PARÇALARIN BRONZ EMDİRİLEREK İÇYAPI ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ

Özden KOR

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

Bu tez çalışması, eklemeli imalat yöntemlerinden bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat ile 316L toz malzemeli iki farklı bağlayıcıya sahip deney numunelerinin tasarımını, imalatını ve mikro içyapı incelemesini kapsamaktadır.

Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat yöntemiyle farklı katman kalınları dikkate alınarak iki farklı bağlayıcının değişen bağlayıcı yüzdeleri ile metal tozlarının serimesiyle silindirik numuneler imal edilmiştir. Numunelerin içerisindeki metal tozların dağılmaması için bağlayıcılarının sertleşmesi amacıyla ısıtılma işlemi (kürleme) yapılmıştır. Çalışmada, atmosfer kontrollü fırında azot gazı ve vakum kullanarak sırasıyla, bağlayıcının uçurulması, bronz tozunun ergitilmesi ve ergiyen bronz malzemenin emdirilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Atmosfer kontrollü fırında numunelerin üzerine refrakter toz serilerek bronz infiltrasyon işlemi uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan iki farklı bağlayıcı şu şekildedir. İlk bağlayıcı işlemi, Stereolithography (SLA) reçine ve İzopropil Alkol (IPA) metal tozlar üzerine püskürtülmesi ve Ultraviyole (UV) ışıkla kürlenmesidir. İkinci bağlayıcı işleminde ise , Para Toluen Sülfonik Asit (PTSA) metal tozlarıyla karıştırılmış ve üzerine Furfuril Alkol (FA) püskürtülmesiyle metal tozlarının bağlanması sağlanmıştır. Numunelerin ısıtılma işlemi öncesi ve sonrası özkütle ölçümleri yapılmıştır. Mekanik özellikleri belirlenmesi için mikro sertlik ölçümü ve basma testi uygulanmıştır. Elektron mikroskop (SEM) ve optik mikroskop ile numunelerin mikro içyapısı incelenmiştir. Yapılan test sonuçları literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, bağlayıcı püskürtme, bronz infiltrasyon, içyapı

2019, 78 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN INTERNAL STRUCTURE PROPERTY INVESTIGATION OF BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS BY BRONZE INFILTRATION

Özden KOR

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

This thesis covers the design, manufacture and microstructure of two different binders with 316L powder material and binder jetting metal additive manufacturing that one of the additive manufacturing methods.

Cylindrical specimens were produced by varying binder percentages of two different binders and spreading of metal powders by taking into account the different layer thicknesses by the binder additive manufacturing method. Heat treatment was performed to harden the binders in order to prevent the metal powders from dispersing in the samples. In this study, the process of blowing the binder, melting the bronze powder and impregnating the molten bronze material were performed by using nitrogen gas in the atmosphere controlled oven. Refractory powder was placed on the samples and bronze infiltration process was performed in atmosphere controlled oven. The two different binders used in the study are as follows. In the first binder process, Stereolithography (SLA) resin and Iso Propyl Alcohol (IPA) are sprayed onto metal powders and cured by Ultraviolet (UV) light. In the second binder process, Para Toluene Sulfonic Acid (PTSA) was mixed with metal powders and the metal powders were bonded by spraying on Furfuryl Alcohol (FA). Before and after heat treatment of the samples, the density measurements were made. Micro hardness measurement and compression test were applied to determine the mechanical properties. Electron microscope (SEM) and optical microscope were used to examine the microstructure of the samples. The test results were compared with the results in the literature.

Keywords: Additive manufacturing, binder jetting, bronze infiltration, microstructure

2019, 78 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin başlangıcından bugüne kadar beni yönlendiren ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Cengiz KAYACAN'a bu çalışmadaki değerli katkıları için teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca araştırma ve deneysel çalışmaların yapılması sırasında bana destek olan Ar. Gör. Mert GÜRGEN ve Yusuf Sacid BARDAKÇI, SDÜ Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan eklemeli imalat ofisindeki çalışmaları ile Osman SALTİK, Ar. Gör. Mehmet Alper DEMİRAY ve Ar. Gör. Fehmi MUTLU arkadaşlarıma, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince ufkumu geliştirmeme yardımcı olan Dr. Koray ÖZSOY'a teşekkür ederim.

YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yürüttüğüm çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Süleyman DEMİRAĞ, Mevlüt İlhan KAYACAN, Hasan ISPARTALI ve Bahri ŐEKERCİ başta olmak üzere tüm personele teşekkür ederim.

2018-6721 No'lu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen aileme ve eşim Olcay KOR'a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Özden KOR
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. a,b,c şekilleri su atomize, d,e,f, şekilleri gaz atomize SEM görüntüleri.....	7
Şekil 3.1. Eklemeli imalat şematığı.....	9
Şekil 3.2. Eklemeli imalat uygulamaları.....	12
Şekil 3.3. Yuvasına monte edilmiş küresel mafsal.....	15
Şekil 3.4. VAT Fotopolimerizasyonu şematığı.....	20
Şekil 3.5. Malzeme püskürtme şematığı	22
Şekil 3.6. Malzeme ekstrüzyon şematığı	24
Şekil 3.7. Toz yatağı füzyon şematığı.....	26
Şekil 3.8. Sac laminasyon şematığı	29
Şekil 3.9. Yönlendirilmiş enerji biriktirme şematığı.....	31
Şekil 3.10. Bağlayıcı püskürtme şematığı	33
Şekil 3.11. Bağlama mekanizmaları.....	34
Şekil 4.1. Bronz tozu görüntüsü.....	36
Şekil 4.2. Isıl işlem fırın görüntüsü.....	37
Şekil 4.3. Atmosfer kontrollü fırın görüntüsü.....	38
Şekil 4.4. Refrakter tuğla.....	38
Şekil 4.5. Yoğunluk ölçüm sistemi	39
Şekil 4.6. Helyum piknometresi cihazın görüntüsü.....	40
Şekil 4.7. Hassas kesme cihazın görüntüsü.....	40
Şekil 4.8. Sıcak bakalite alma cihazın görüntüsü.....	41
Şekil 4.9. Numune zımparalama / parlatma cihazın görüntüsü.....	41
Şekil 4.10. Mikro sertlik ölçüm cihazının görüntüsü.....	42
Şekil 4.11. Basma testi cihazın görüntüsü.....	42
Şekil 4.12. SEM cihazın görüntüsü.....	43
Şekil 4.13. Optik mikroskop cihazın görüntüsü.....	43
Şekil 4.14. Numunelerin ısıl işlem fırın süreleri grafiği	45
Şekil 5.1. Numune isimlerin kodlama görüntüsü.....	47
Şekil 5.2. Numune resmi.....	49
Şekil 5.3. SLA reçineli numunelerin mikro sertlik değerleri.....	53
Şekil 5.4. FA reçineli numunelerin mikro sertlik değerleri	54
Şekil 5.5. SLA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri.....	55
Şekil 5.6. FA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri.....	55
Şekil 5.7. 251 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi	57
Şekil 5.8. 521 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi.....	58
Şekil 5.9. 541 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi	59
Şekil 5.10. 541 numunesinin 5x optik görüntüsü.....	61
Şekil 5.11. 541 numunesinin 20x optik görüntüsü	61
Şekil 5.12. 541 numunesinin 50x optik görüntüsü	62
Şekil 5.13. 541 numunesinin 100x optik görüntüsü	62
Şekil 5.14. Bakalite alınmış numunelerin görüntüsü.....	64
Şekil 5.15. SLA reçine I. serinin resimleri.....	65
Şekil 5.16. SLA reçine II. serinin resimleri.....	66
Şekil 5.17. FA numuneleri I. serinin resimleri.....	67
Şekil 5.18. FA numuneleri II. serinin resimleri.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Genel eklemeli imalat alışimleri ve uygulamaları	8
Çizelge 3.1. Eklemeli imalatın avantaj ve dezavantajları.....	11
Çizelge 3.2. 316L toz malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 3.3. Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan temel malzemeler.....	16
Çizelge 3.4. Eİ yöntem, teknoloji ve malzemeler.....	18
Çizelge 4.1. 316L paslanmaz çelik tozun kimyasal yapısı.....	35
Çizelge 5.1. SLA reçine boy ve çap analizi	48
Çizelge 5.2. FA reçine boy ve çap analizi	49
Çizelge 5.3. SLA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları.....	51
Çizelge 5.4. FA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları.....	52
Çizelge 5.5. SLA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi.....	63
Çizelge 5.6. FA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASTM	American Society for Testing and Materials
BP	Bağlayıcı Püskürtme
BPEİ	Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numeric Control
DED	Directed Energy Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop On Demand
EDS	Energy Dispersive Spectrometry
EN	European Norm
FA	Furfuryl Alcohol
FDM	Fused Deposition Modeling
IPA	Iso Propyl Alcohol
ISO	International Standart Organization
LOM	Lamine Object Manufacturing
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Poly Carbonate
PLA	Poly Lactide
PTSA	Para Toluen Sulfonic Acid
SEM	Scanning Electron Microscope
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultra Violet
3B	3 Boyutlu

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler Dünya’da üç büyük Sanayi Devrimi yaşatmıştır. Buhar makinesinin icadı ile 1. Sanayi devrimi, elektriğin icadı ile 2. Sanayi devrimi, bilgisayarın icadı ile de 3. Sanayi devrimi ortaya çıkmıştır. Ülkemiz bu ilk üç devrimi yeterince yakalayamamıştır. Günümüzde Endüstri 4.0 sloganıyla otonom robotlar, bulut bilişim, nesnelerin interneti ve eklemeli imalat gibi birçok bileşenden oluşan 4. Sanayi devrimi gerçekleşme süreci yaşanmaktadır. 4. sanayi devriminin en önemli sanayi bileşeninden birinin Eklemeli İmalat (Eİ) olduğu ifade edilmektedir. Dünya üzerinde güçlü bir ülke olmamız için bu devrimi yakından takip etmemiz gerekmektedir.

Geleneksel yöntemlerinin dışında kalan imalat türleri alışılmamış imalat yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Bunların arasında önemli başlıklardan biri Eİ olarak tanımlanmıştır. Geleneksel yöntemler, kesici aletlerle veya başka şekilde katı cisimden talaş ve malzeme kaldırma esasına dayanırken; Eİ, imal edilecek malzemenin katmanlar halinde birleştirilmesi esasına dayanır. Her bir katmanının düşey izdüşümünün sınırları içinde çeşitli yöntemlerle (yapıştırılarak, ergitilerek vb.) birleştirilmesini temel almaktadır.

Eİ ile çok geniş bir malzeme yelpazesi içinde imalat yapılabilmektedir. İlk başta plastik tabanlı malzemeler olmak üzere metaller ve alaşımları (paslanmaz çelik, kobalt krom, titanyum vb.) seramikler gibi birçok hammadde kullanılmaktadır. Son zamanlarda ise istenilen özelliklerine göre hammaddelerin çeşitli oranlarda kombine edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır (Calignano vd., 2013).

İmalatın esası, istenen geometrik ve mekanik özelliklere sahip olarak parçanın imal edilmesidir. Malzemeye gelen dış kuvvetlere içyapının gösterdiği direnç bu malzemenin dayanımını gösterir. Bu içyapının doluluk oranı da malzemede yapılan israfın bir göstergesi olarak görülebilmektedir. Aynı özelliklere sahip bir parçayı daha hafif ve daha gözenekli olarak daha az atıkla imal edebilmek Eİ ile mümkündür.

Eİ ile imal edilen malzeme türleri içinde metal ve alaşımları önemli bir yer tutmaktadır. Metal malzemelerin imalatında lazer ve elektron ışını gibi birleştirici sistemler kullanılan Eİ teknolojileri, metal tozları yansıma özelliği gösterdiği için dezavantaja sahiptir. Ayrıca lazer ve elektron ışını gibi sıcaklık değişimleri çok yüksek olan sistemlerde kalıntı ısıl gerilme sorunuyla karşılaşmaktadır. Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat (BPEİ), malzemenin birleştirilmesi için bağlayıcı reçine kullanması sebebiyle yansıma ve artık gerilme gibi problemlerle karşılaşılmamaktadır.

Eİ ile metal malzemelerin imalat yöntemlerinden, maliyet olarak en uygun yönteminin BPEİ olduğu düşünülebilir. Yöntem, toz malzemenin birleştirilmesi için lazer ya da elektron gibi yüksek maliyetli cihazlara ihtiyaç duymadan imalat yapılması esasına dayanır. Ayrıca çevresel şartları kontrol altında tutmak için sızdırmazlık özelliğine sahip bir kabine ihtiyaç duyulmamaktadır. BPEİ, birim zamanda imal edilen parçanın hacmi olarak en yüksek değere sahiptir.

BPEİ’de önemli etkenlerden birisi toz malzeme ile bağlayıcının uygun özelliklere sahip olmasıdır. Seçilen toz malzeme ile bağlayıcı arasında herhangi bir tepkime veya etkileşim olmaması önemli bir kriterdir. Bağlayıcı ile ilgili diğer kriterler;

- Reçine piroliz olmalı ve kül bırakmamalı,
- Reçine buharlaştığında metaller bağ yapmaya başlamalı,
- Reçinenin ıslatabilirliği iyi olmalı,

şeklinde sıralanabilir.

BPEİ ile imal edilen parçalarda karşılaşılan temel sorunlardan birisi bağlayıcının kapladığı alan ve tozun geometrik yapısı itibarı ile parçanın gözenekli olarak imal edilmesidir. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla imal edilen parçaya sıcak izostatik presleme yada infiltrasyon işlemleri yapılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, infiltrasyon işlemi sadece sinterlenme işlemi uygulanmış parçaya göre daha yüksek dayanım özellikleri sağlamaktadır (Inaekyan vd., 2016). Ayrıca infiltrasyon yapılan parçalarda ergiyen bronz malzemenin ana malzemenin boşluklarına sızması sebebiyle infiltrasyonsuz sinterleme işlemine göre gözeneklilik oranı çok daha düşük değerlere ulaşmaktadır (Cordero ve Elliot, 2016). İnfiltrasyon konusunda dikkat edilecek husus, infiltre olacak malzemenin ergime derecesinin ana malzemenin daha düşük olmasıdır.

İkinci olarak da infiltrasyon malzemesinin daha iyi sızma yapması için difüzyon özelliğinin iyi olmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez kapsamında, Eİ teknolojilerinden BPEİ yöntemiyle iki farklı bağlayıcı, farklı yüzdelerde ve farklı katman kalınlıklarında imal edilen numunelere bronz emdirilmesi işlemine ait parametrelerin etkisi araştırılmıştır. 316L metal tozuyla iyi bağ kurması beklenen iki farklı bağlayıcı seçilmiştir. Bunlar, PTSA ile FA ve SLA reçine ile IPA bağlayıcılarıdır. Çalışmada, infiltre olabilecek malzemeler içinde ergiyen bronz tozunun difüzyon özelliğinin iyi olması nedeniyle numunelere bronz infiltrasyon işlemi tercih edilmiştir (Doyle vd. 2015). Numunelerin ısıtılma işlem öncesi ve sonrası yoğunluk ölçümleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için mikro sertlik ölçümü ve basma testi yapılmıştır. Son olarak iç yapı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Scanning Electron Microscope (SEM) ve optik görüntülerine bakılmış, Energy Dispersive Spectrometry (EDS) ile element analizi yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Mumtaz vd. (2011)'e göre BPEİ yönteminde, toz yatağında ergitme yapan diğer Eİ türlerinin aksine sinterleme işlemi imalat sonrası yapıldığı için; ısıl osilasyondan kaynaklanan artık gerilme gibi sorunlar yaşanmamaktadır.

Bai ve Williams (2015)'a göre BPEİ, diğer Eİ yöntemleri gibi destek yapıya ihtiyaç duymamaktadır. Bu sayede imalat sonrası parçanın temizleme işlemleri kolay olmakta ve geometrik açıdan karmaşık ürünler imal edilebilmektedir. BPEİ, lazer gibi tek noktadan çıkan güç kaynağı ve koruyucu gaz ortamı gerektirmediğinden; imalat alanı açısından sınırlanmamaktadır. Ek olarak BPEİ, malzemeyi işlemek için bir enerji ışını kullanmadığından, Toz Yatağı Füzyon işlemleri için zorlayıcı olan optik olarak yansıtıcı ve termal olarak iletken metaller için çok uygundur. Örneğin, ExOne 3D cihazlarda BP ile yüksek saflıkta bakır imal etmenin uygulanabilirliği yazarların önceki çalışmalarında gösterilmiştir.

Chou vd. (2013) yaptıkları çalışma sonucunda BPEİ kullanarak metal parçaların imalatındaki en büyük sorunun, sinterleme işleminden sonra tam yoğun bir ürün elde edememek olduğunu bulmuştur. Metal tozlarının küresel geometrik şekilleri ve metal tozlarının arasının bağlayıcı ile doldurulması sebebiyle BPEİ ile imal edilen sinterlenme sonucunda metallerde gözeneklilik (% 36) bulunmuştur.

Verlee vd. (2011), çeşitli karışım oranlarında sinterlenmiş paslanmaz çelik ile çift modlu karışımların sinterleme koşulu altında yoğunluğunu araştırmıştır. Birçok toz metalurjisi modelinde tahmin edildiği gibi, büyük toz taneleri ince toz taneleriyle karıştırılması, deney sonucunda numunenin sinterlenmiş yoğunluğuna katkı sağlamamıştır.

Sames vd. (2016) infiltrasyon işlemi için ana malzeme ve ana malzemedan daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip infiltrasyon malzemesinin beraber yerleştirildiğinde meydana geldiğini söylemişler. Bu işlem daha yoğun bir parça oluşturmak için ergiyen malzemenin kılcal hareketi ile infiltrasyonu sağlar. Paslanmaz çelik malzeme, bronz infiltrasyonu ile % 95'lik bir nihai yoğunluk sağlayabilir. Parçayı tavlama ve

sünekliği arttırmak için fırın soğutması kullanılır. İnfiltrasyon, Bağlayıcı Püskürtmeli teknolojiye özgü değildir, ancak ticari üretim için yaygın bir yöntemdir.

Kumar ve Kruth (2007) yaptıkları çalışmada, infiltrasyonun, toz malzemenin sertliğini, yoğunluğunu, eğilme dayanımını arttırdığını ve gözenekliliğini yaklaşık %8'e düşürdüğü sonucunu elde etmişler. Yüzey pürüzlülüğü 7,4 μm 'dan 6,8 μm 'a düşmekte olup, bu infiltrasyon malzemesinin sinterlenmiş numunelerin gözeneklerini doldurduğunu belirlemişler. Gözeneklerin doldurulması ile parçanın mekanik özellikleri arttırılmıştır.

Cordero ve Elliot (2016), infiltre yapılmış malzemenin sinterlenen malzemeden dört kat daha yüksek mukavemete sahip olduğunu bulmuştur. İnfiltre edilmiş malzemelerin kırılma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda infiltrasyonun, parçalar arası boyunlardaki gerilmeyi ortadan kaldırarak enine yırtılma kuvvetini etkilediğini göstermiştir. Ayrıca kırılma yüzeyi büyük bölünme yüzeyleri içermiştir. Bu bölgeler ökemiş toz malzeme yatakları olarak belirlenmiştir. Bu birikintilerin gevrek davranış gösterdiği için kaçınılması gerekmektedir. Birikmiş malzeme oluşumu daha kısa bir sızma süresi ile ortadan kalkmaktadır.

Verlee vd. (2012) sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, partikül boyutu ve partikül şeklinin, parçanın gözeneklilik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında araştırma yapmıştır. İlk olarak, sinterleme sıcaklığı ve partikül boyutu elde edilen yoğunluğunu etkilediğini bulmuşlar. Genel olarak sinterleme sıcaklığı arttıkça, sinterleme yoğunluğu artmış ve gözeneklilik azalmıştır. 316L tozları için maksimum sinterleme sıcaklığı 1430 $^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. Bu sıcaklığın üzerinde ökeme meydana gelmiştir. İkincisi, partiküller küçüldükçe, daha yüksek yüzey enerjisi ve daha yüksek yoğunlaşma elde edilebilmektedir. Tozlar ne kadar ince olursa, partiküller arasındaki gözenekler o kadar küçülür ve sinterleme sırasında daha erken yoğunlaşma olacaktır. Bu nedenle, parçacıklar ne kadar küçük olursa, daha düşük sinterleme sıcaklığında daha iyi yoğunluk elde edilir. Son olarak, parçacık şeklinin parçanın son gözenekliliğini ve yoğunluğunu etkilediği bulunmuştur. Küresel tozlar, küresel olmayan tozlardan daha yüksek nihai yoğunluğa sahiptir.

Vaezi ve Chua (2011), katman kalınlığının azaltılmasıyla, bağlayıcı katmanın tabanına hızlı bir şekilde nüfuz ettiğini bulmuşlar. Basılan önceki katman, bağlayıcının daha fazla yayılmasını önlemiştir. Yanal doğrultuda ise bağlayıcı bu sınırlama olmadan yayılmaktadır. Aynı bağlayıcı doyma koşulları altında, numunelerin gerilme mukavemeti katman kalınlığının azalmasına bağlı olarak her zaman azalmamaktadır. İdeal katman kalınlığından daha düşük katman kalınlığı değerlerinde, parçanın mukavemetinin artmadığı görülmüştür. Genel koşullar altında, bağlayıcı dikey yayılma mesafesi, yanal mesafeden daha az olacaktır. Bu gibi durumlarda, tabaka kalınlığının belirli bir sınırın altında seçilmesi durumunda, bağlayıcı tamamen dikey olarak nüfuz eder ve toz doyurulurken, yanal yönde bağlayıcı tamamen nüfuz etmez. Dolayısıyla, bağlayıcı maddenin yanal olarak yayılmaması numune bütünlüğünü ve gerilme mukavemetini azaltır. Tabaka kalınlığı ve bağlayıcı doygunluğu koşulları araştırılırken, bağlayıcı doyma parametresinin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin tabaka kalınlığının etkisinden daha fazla olduğu söylenebilir demişler.

Frykholm vd. (2016), 316L paslanmaz çelik tozlarının sinterlenmesi için en uygun şart olarak kısmi Argon gazı basıncıyla vakum uygulanarak ergime sıcaklığına (1350 °C-1400 °C arası) yakın bir sıcaklıkta olmasının uygun olacağını bulmuştur. Yüksek sıcaklıkta sinterleme, yüzeydeki Cr kaybını azaltacağından çeliğin mekanik sonuçlarına ve korozyon direncine olumlu etki edeceğini söylemiştir.

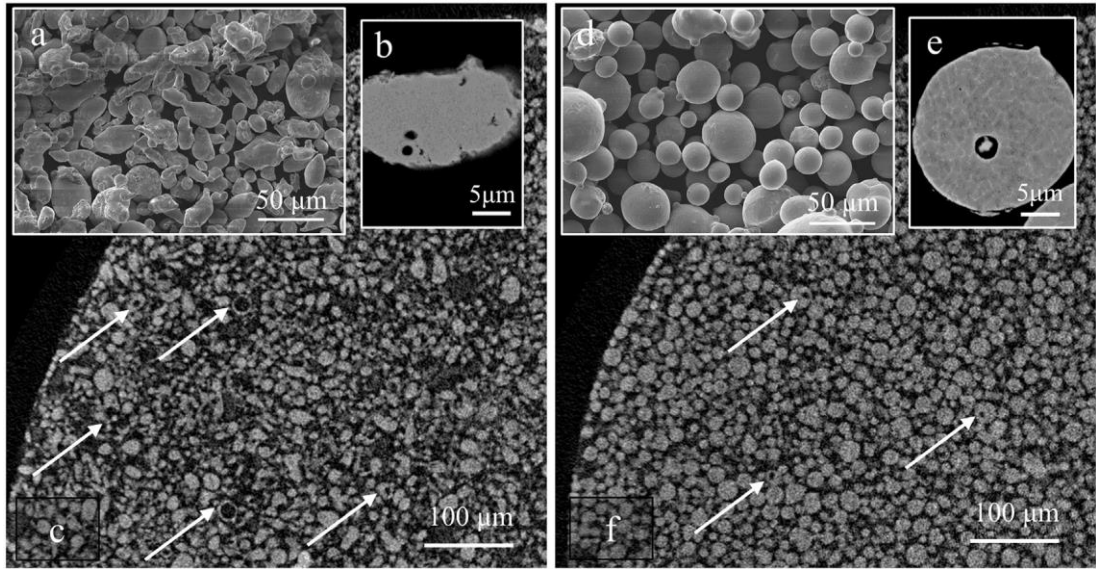
Sun vd. (2009)'e göre 420 SS paslanmaz çelik toz malzemesine sinterleme aşamasında Silikon Nitrür (Si_3N_4) eklenmesi yoğunluk, boyutsal doğruluk ve daha iyi mekanik özellikler sağlayacaktır. Çalışmada parçalar, 1300 °C'de sinterleme sonrası % 98 yoğunluk ve yaklaşık 200 Gpa mekanik özelliklere sahip olmuştur.

Bailey vd. (2016), bakır nano parçacıkları bağlayıcı içinde süspansederek ve karışımı 430 SS tozuna ekleyerek, Bağlayıcı Püskürtme (BP) işlemiyle nano parçacık, bağlayıcı ve toz sistemi karşılaştırılması hedeflenmiştir. Nano bakır, sadece nano parçacıkların parçanın içindeki yerini ayırt etmeye yardımcı olacağı için seçilmiştir. Nano partikül ana çözeltilsinin miktarı, ana çözeltilinin paketleme faktörüne ve metal toz partikülleri arasındaki boşluğun hedeflenen fraksiyonuna dayanarak belirlenmiştir. Nano parçacıklar, sinterleme yardımcısı olarak nano bakır seçilmesi nedeniyle paslanmaz

çelik sinterlenmesinde bir artışa yol açan daha büyük paslanmaz çelik parçacıkları arasında daha belirgin hale gelir demişler.

Cordero vd. (2017), partikül boyun kısımları arasındaki gerilme konsantrasyonunu ortadan kaldırarak daha yüksek kopma mukavemeti sergileyen, ergimiş bronzun infiltrasyonu ile yoğun bir demir alaşımı imal etmiştir. Standart bir yeşil ürünün imal edilmesi için en uygun sızma sıvısının doyması yüksek derecede önemlidir. Sıvı sızıntının doyma seviyesini aşması durumunda, fazla sızıntının uzaklaştırılmasıyla boyutsal doğruluk ortadan kalkacaktır. Öte yandan, sızıntının olmaması parçacıklar arasında zayıf bağlanmalara neden olabilir. Bu nedenle, BP basılı parçaların tasarımı için, sızma doyma seviyesinin kesin tahmini çok önemlidir.

Mostafaei vd. (2017) çalışmasında, gaz atomize ve su atomize metal toz malzemeli numuneleri BPEİ yöntemiyle imal etmiştir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi imal edilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, gaz atomize toz malzemenin daha uygun olduğunu tespit etmiştir.



Şekil 2.1. a,b,c şekilleri su atomize, d,e,f, şekilleri gaz atomize SEM görüntüleri
(Mostafaei vd., 2017)

Lee vd. (2017), genel eklemeli imalat malzeme alaşımları ve uygulama alanları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Paslanmaz çelik, yüksek çekme dayanımı, ısı ve korozyona

dayanıklık, sertleşebilirlik, aşınma ve yıpranmaya karşı yüksek dirençlilik, korozyon direnci ve yüksek süneklik özelliklerine sahiptir. Otomotivde aksam uygulamalarında, endüstride takım yapımında, denizcilik, tıbbi teknoloji ve mekanik mühendislik gibi bir çok geniş bir uygulama alanında paslanmaz çelik kullanılmaktadır.

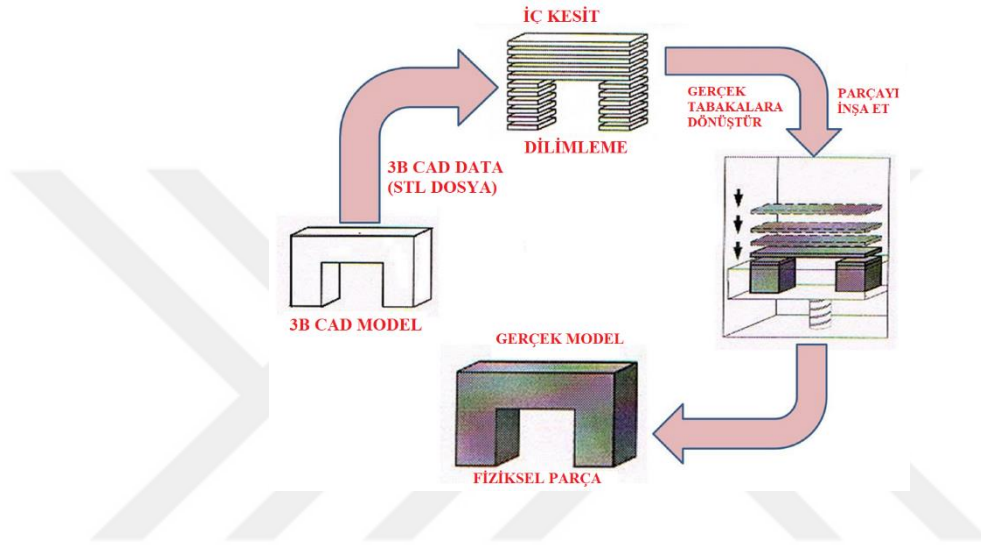
Çizelge 2.1. Genel eklemeli imalat alaşımları ve uygulamaları

Alaşım Uygulamalar	Alüminyum	Bağlama çelik	Paslanmaz çelik	Titanyum	Kobalt krom	Nikel süper alaşımlar	Değerli metaller
Havacılık-Uzay	X		X	X	X	X	
Tıp			X	X	X		X
Enerji			X				
Otomotiv	X		X	X			
Denizcilik			X	X		X	
Talaşlı imalat ve kaynak	X		X	X		X	
Korozyon direnci			X	X	X	X	
Yüksek sıcaklık			X	X		X	
Takım ve kalıp imalatı		X	X				
Tüketici ürünleri	X		X				X

Bu literatürlere göre, araştırma BPEİ ile imal edilmiş parçaların infiltrasyon sürecine odaklanmaktadır. BPEİ prosesinde kullanılan materyallerin elde edilmiş sonuçları incelenmiş olup paslanmaz çelik 316L toz ile bronz tozunun infiltrasyonu için en uygun parametre seçiminde yardımcı olması beklenmektedir. BP işleminde sinterleme ve infiltrasyon parametreleri optimizasyonu bildirilmemiştir.

3. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat karmaşık geometrilerin hızlı imalatını kolaylaştırmasıyla teknolojik gelişmelerin geldiği önemli noktalardan biridir. İnsanların ihtiyaçlarını karşılamak adına geleneksel yöntemlerin çaresiz ya da yavaş kaldığı durumlarda çözüm bulmamıza yardımcı olan bir teknolojidir. Şekil 3.1’de görülen aşamaları içeren sistem, tasarımdan imalata giden yolu göstermektedir.



Şekil 3.1. Eklemeli imalat şematığı (igi-global.com)

Eklemeli imalat ile birlikte alışılmış olarak kullanılan aşağıdaki terimler, teknolojik gelişmelerle aynı hızda gelişmektedir (Romero vd, 2019).

- (i) “Masaüstü üretimi”, belki de ilk isim, masaüstü bilgisayar, masaüstü tasarımı gibi zamanın isimlerine göre (1980’lerde).
- (ii) “Hızlı Prototipleme”. Bu, katmanlara katman yöntemi yoluyla 3B nesnelerin oluşturulmasını tanımlamak için kullanılan ilk terimdir. Şu anda var olan teknolojiler, “prototiplerden” biraz daha fazla olduğu düşünülebilecek nesnelerin üretimini mümkün kılmaktadır.
- (iii) “Hızlı takım”. Katkı maddesi imalat sisteminin sadece prototipler imal etmize olanak sağlamasının yanı sıra kalıplar, matrisler ve takımlar da yapmamızı sağladığında, bu ad hızlı prototiplemeden ayırmak için kullanılmaya başlandı.

- (iv) “3B Baskı”. Bu en yaygın kullanılan terimdir. “Düşük maliyetli 3B yazdırma” terimi, yerli veya yarı profesyonel kullanıcıların karşılayabileceği yazıcılar kullanıldığı zaman sık sık kullanılır.
- (v) “Serbest Biçimli İmalat”. Parçaya özel alet kullanmaya gerek kalmadan parçaların üretilebileceği üretim teknolojileri topluluğudur. Parçanın bilgisayarlı bir modeli tasarlanmıştır. Hesaplamalı olarak dilimlenir ve katman bilgisi, katmanı gerçek bir materyalde çoğaltan bir imalatçıya gönderilir.
- (vi) “İlave Üretim”. Bu, uygulanan en son terimdir ve teknolojiyi genel olarak tanımlamak için kullanılır. Endüstriyel bileşen imalat uygulamaları ve yüksek performanslı profesyonel ve endüstriyel ekipmanlar söz konusu olduğunda yaygın olarak kullanılır.

Eİ tanımlarının hemen hepsinde göreceğiniz ortak ifade ‘layer by layer’ yani ‘katman katman’ ya da ‘tabak tabaka’ olarak çevrilebilir. Bu da eklemeli imalatın temel prensibini tanımlamaktadır.

Genel olarak Eİ, tasarımı CAD (Computer Aided Design) yazılımı ile 3 boyutlu olarak yapılan parçanın 2 boyutlu olarak katmanlar halinde malzeme eklenerek inşa edilmesidir (Chen vd., 2011). Parçanın ardışık enine kesit katmanlarını oluşturmak üzere işlem, başlangıçta dijital bir CAD dosyası olarak modellenen veya taranan ve daha sonra hazırlama yazılımıyla binlerce katmana (çözünürlüğe bağlı olarak) dilimlenmiş 3 boyutlu bir katı modelle başlar, her katman için bilgileri içeren “dilimler halinde kesildiği” bir Stereolithography (STL) dosyasına çevrilir. STL dosyası üçgen yüzeylerin listesini tanımlar. Üçgen yüzeyler, mühendislerin oluşturmak istediği parçanın yüzeyleri olarak bilinir. Aynı zamanda, her üçgenin dış yüzeyiyle ilgili birim normal vektördür. STL dosyasındaki yüzeyler "tesellasyon-mozaik döşeme" olarak adlandırılmıştır. Oluşturulan üçgenler, yaklaşık olarak herhangi bir CAD katı modelinde oluşturulan nesne yüzeyidir. Hazırlanan bu dosya, oluşturulan modeli imal etmek için herhangi bir ilave üretim sistemini aktarır. İmalat işleminin süresi birkaç saat veya bazen geceler boyu sürebilmektedir. Bu süreç parçalara bağlıdır, ancak Eİ sistemlerinin bir mühendis tarafından sürekli olarak gözlemlenmesi gerekmemektedir. Bu nedenle, operatörler makineleri kendi başına çalıştırabilir (Chua vd., 1998). Her katmanın kalınlığı ve çözünürlük, kullanılan donanıma bağlıdır (Wong ve Hernandez,

2012). Her katman basılmış bir yapı oluşturmak üzere ana malzeme üzerinde bağlayıcı malzeme veya enerji biriktirme yoluyla oluşturulur. Yukarıda da bahsedildiği gibi, bilgisayar programı, destekleri oluşturan STL dosyaları ile çalışmakta ve istenen şekli imal etmek için model kesitlerine dayanmaktadır. Modelin imalatı sırasında, sıvıların veya tozların katılaştırılması ve katı katmanın tabaka tabaka halinde kaynaşması sırası takip edilir. Son olarak parça tamamlandıktan ve kürlendikten sonra zımparalama, desteklerin sökülmesi ve boyanması gerekebilir.




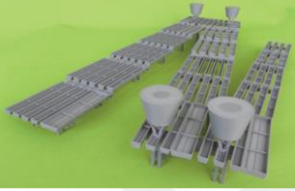


Eklemeli imalatın avantajları ve dezavantajlarını Çizelge 3.1 ile aşağıda verilmiştir:

Çizelge 3.1. Eklemeli imalatın avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Daha özgür tasarım	Termal kalıntı gerilme
Geometrik sınırlama yok	Kısıtlı imalat hacmi
Daha az işçilik	Son işlem gerekliliği
Kişiyeye özel tasarım	Pahalı makine fiyatları
Minimum atık malzeme	Yüksek malzeme fiyatları
Çevresel faydalar	Yatırım maliyeti çok yüksek

Birçok alanda popülerlik kazanmış olan Eİ, Şekil 3.2’de verildiği gibi genel olarak mühendislik başta olmak üzere otomotiv, kuyumculuk, mimari modelleme, tekstil, tıp, biyolojik sistemler, havacılık ve gıda gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Aslında havacılık, tıp endüstrileri bu teknolojiyi erken benimsemiş ve metal Eİ parçalarının kullanıcıları olmuştur. Bu endüstriler için Ti-6Al-4V tercih edilen malzeme olmuştur. Hafif bir yapısal malzeme olması ve biyo-uyumlu bir malzeme olarak kullanılması tercih sebebidir. Havacılık ve uzay parçaları için iniş takımları gibi değişik parça imalatları yapılmıştır. Biyomedikal kısımlar için vaka çalışmaları, çeneler, kalçalar ve diğer kısımlar için Eİ kemik implant tedavileri yapılmıştır. Gözenekli yapılarının uygulanması biyomedikal parçalar için ilgi çekicidir. Ayrıca lityum iyon piller gibi diğer kullanımlar için de uygulamalara sahiptir. Hafif Ti-6Al-4V robotlarda kullanılmıştır. Eİ kullanımı ek serbestlik derecelerine izin verebilir ve hidrolik ve elektrik hatlarının dahili olarak döşenmesine izin verebilir. Bununla birlikte, sınırlı imalat hacimleri, yavaş biriktirme oranları ve yüksek makine maliyetleri teknolojinin

mevcut kullanımını sınırlamaktadır. Bu kısıtlamalarla, Eİ teknolojileri düşük hacimli imalat, malzeme kullanımının azaltılması ve gereklilik hallerinde kullanımlarla sınırlıdır. Süreç iyileştirmeleri ve kalite kontrolleri gelecekte Eİ ile ilgili maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir (Sames vd., 2016).

		
Mühendislik	Kuyumculuk	Gıda
		
Mimari	Otomotiv	Tıp

Şekil 3.2. Eklemeli imalat uygulamaları (Romero vd., 2019)

Eİ ekonomisini analiz etmek için geleneksel yöntemlerle ve çıkarımlı imalatla karşılaştırılması gerekir. Geleneksel yöntemlere ait birçok kıyaslama olduğu için burada Eİ ile ilgili ekonomik analizler yapılacaktır.

Uygulama alanı sadece maliyetle değil, aynı zamanda Eİ makinelerin yetenekleriyle de sınırlandırılmıştır. Küçük imalat hacimleri ile metre çaplı büyüklüğe sahip parçaların, mevcut teknoloji ile imalatının mümkün olmadığı anlamına gelir. Yavaş biriktirme oranları, bazı işlemlerde son derece uzun yapım sürelerinde donanım kısıtları bulunduğundan, sınırlayıcı bir özelliktir. Ayrıca Metal Eİ için girdi maliyetleri (donanım, hammadde, bakım vb.) oldukça yüksektir ve mevcut metal Eİ pazarını endüstriyel kullanıcılar için önemli ölçüde sınırlar. Makine maliyetleri yaygın olarak bildirilmemektedir ve model türüne göre değişmektedir (Sames vd., 2016).

Parçadan istenilen fiziksel özellikler kadar mekanik özellikleri de iyi bilinmesi gerekmektedir. Eklemeli imalat alanında toz malzeme ve kullanım alanı istenilen fiziksel ve mekanik özelliklere göre en uygun malzeme tercih edilmesi oldukça

önemlidir. İmal edilecek parçanın özelliklerine uygun seçim yapılmaması mühendisliğin en temel çıkmazıdır. Özellikle sağlık alanında geniş bir kullanım alanına sahip olması açısından Eİ malzeme seçiminde gerekli hassasiyet ve özen gösterilmesi zorunludur. 316L tozunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de ortalama değer olarak verilmiştir. Tam değerler parçanın imalat açısı gibi durumlara göre değişmektedir.

Çizelge 3.2. 316L toz malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri (SLM Solutions)

Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Mikro sertlik (HV)	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal iletkenlik W/(m.K) (20 °C deki)
600	180	200	7,95	15

3.1. Eklemeli İmalat Teknolojileri

Eklemeli İmalat Teknolojilerine yönelik son zamanlardaki ilgi ve kayda değer miktardaki yatırımlar sürpriz değildir. Çünkü katmana dayalı eklemeli imalat yöntemi, çok çeşitli malzemeleri kullanarak karmaşık şekiller oluşturabilen bir sistemdir. Programlanabilir kontrolörlerin, lazerlerin, mürekkep püskürtmeli baskının ve bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design-CAD) yazılımının azalan maliyeti, tasarım sürecini kolaylaştırarak, bireylerin bu teknolojileri kullanmalarına, denetlemelerine ve geliştirmelerine olanak sağlamıştır. Bu tür sistemler için ana pazar, ürün tasarımının ilk aşamalarında düşük-orta kaliteli prototipleme kullanan tüketiciler ve endüstriler olmuştur (Gaoa vd., 2015).

Eİ teknolojilerinin bazı benzersiz özellikleri; tasarım esnekliği, geometri karmaşıklığının maliyeti, boyutsal doğruluk, montaj için gereklilik, imalatta zaman ve maliyet verimliliği olarak belirtilmiştir (Gaoa vd., 2015).




Bu kavramlardan tasarım esnekliği, neredeyse her türlü karmaşık geometrik şeklin oluşturulmasını sağlayan tabaka şeklinde fabrikasyon yaklaşımıdır. Eİ, karmaşık geometri parçaları imal edilirken kesicinin daha derin ve görünmez bölgelere ulaşmadaki zorluğu nedeniyle tasarım özgürlüğünü kısıtlayan geleneksel çıkarma işlemlerinin aksine bir yöntemdir (Karunakaran vd., 2012).

Biçimlendirici teknikler (örneğin presleme, döküm, talaşlı imalat) dahil olmak üzere diğer geleneksel imalat işlemleri, gerekli aletleri ve kalıpları üretmek için kullanılan çıkarma teknikleriyle ek tasarım kısıtlamaları getirmektedir. Temel olarak, Eİ teknolojileri sadece belirli noktalarda kısıtlama getirmektedir. Böylece bir tasarımcıya, tasarlanan işlevselliği elde etmesi için tam olarak ihtiyaç duyulan yere seçici bir şekilde malzeme yerleştirme olanağı sağlamaktadır. Bu özellik, malzeme kullanımını ve kütleyi azaltmak için topolojik olarak optimize edilmiş (veya hücresel yapıya sahip) yapıların gerçekleştirilmesini sağlar (Gaoa vd., 2015).

Güncel Eİ teknolojileri, karmaşık geometrik şekillerin gerçekleştirilmesinde tasarımcıya gereken özgürlüğü sağlar. Bu fazladan karmaşıklık hiçbir ek ücrete tabi değildir. Çünkü ilave takımlama, yeniden birleştirme, daha fazla operatör uzmanlığı ve hatta imalat süresi gerektirmez. Enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel imalat işlemlerinde karmaşıklık elde edilebilirken (özellikle büyük miktarda bulunan kâr), geometrik karmaşıklık ile kalıp maliyeti arasında doğrudan bir ilişki vardır (Gaoa vd., 2015).

Boyutsal doğruluk (imalat toleransı), bitmiş modelin boyutlarının orijinal dijital modele kıyasla farkını belirler. Geleneksel üretim sisteminde, kalite güvencesi için genel ve özel boyut toleransları ve International Standart Organization (ISO) ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) standartlarına dayalı işleme payları gerekir. Eİ makinelerinin çoğu, birkaç milimetreden daha fazla tolerans özelliklerine sahip parçalar oluşturmak için kullanılır. Doğruluk ve çözünürlük arasındaki ayrım prototip yapımı için Eİ 'nin gelişmesinde önemli değildir. Bununla birlikte, Eİ teknolojilerinde Todd Grimm'in önerdiği geçici tolerans testi gibi endüstriyel boyutsal doğruluk standartlarının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Gaoa vd., 2015; Grimm, 2010).

Eİ süreçleri, geleneksel olarak imal edilince birden fazla parçanın montajını gerektirecek geometrik şekillerin imalatını mümkün kılar. Entegre mekanizmalara sahip Şekil 3.3'de görülen "tek parçalı montaj" ürünleri imal etmek için Eİ kullanmak mümkündür. Parçalar imal edilir ve işlem sonrası çıkarılması gerekenler (bazı geometrik yanlışlıklara neden olabilir) ve destek malzemesi (bağlı olmayan/sinterlenmiş toz) çıkarılır (Jimenez vd., 2013).

		
3B model	Prototip model	İmal edilmiş model

Şekil 3.3. Yuvasına monte edilmiş küresel mafsalsal (Jimenez vd., 2013)

İmalatı zaman ve maliyet verimliliği açısından incelersek, enjeksiyon kalıplama gibi bazı geleneksel işlemler, yüksek başlangıç maliyetine bakılmaksızın seri üretim için uzun zamanlıdır ve düşük maliyetlidir (Bak, 2003). Eİ prosesleri, imalat bileşenleri için enjeksiyon kalıplama işleminden önemli ölçüde daha yavaş olmasına rağmen, imalat için gerekli başlangıç aleti olmadığından düşük parça miktarları için daha uygundur (Hopkinson vd., 2006).

Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan temel malzemeleri aşağıdaki Çizelge 3.3 ile verebiliriz (Loughborough University).

Çizelge 3.3. Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan temel malzemeler

Polimerler	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) PLA (polylactide), (yumuşak PLA içeren) PC (polycarbonate) Polyamid (Naylon) Naylon 12, Cam katkılı naylon Epoksi resin Balmumu Fotopolimer resinler
Metal ve alaşımları	Bağlama çelik 1.2709 Titanyum alaşımları Ti6Al4V 15-5ph paslanmaz çelik Kobalt krom alaşımları, Co28Cr6Mo Alüminyum alsi 10mg Altın ve Gümüş
Seramikler	Silika / Cam Porselen Silika Karbit

3.2. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Sınıflandırması

Ortak ISO/ASTM terminoloji standardına göre Eİ, “çıkarıcı ve biçimlendirici imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman üzerinde katman eklenen 3B model verilerinden parçalar yapmak için malzemelerin birleştirme işlemi” olarak tanımlanmaktadır.

Mevcut Eİ teknolojileri dağılım-birikim prensibine dayanmaktadır. Eİ hammadde baskı işlemleri; orijinal haliyle katı, sıvı veya toz olan bir materyalin, elektronik işlemler kullanılarak önceden belirlenmiş bir alan içinde ardışık tabakaların imal edilmesi yoluyla katılaştırılmasını içeren işlemlerdir. Hızlı prototipler elde etmek için kullanılan farklı imalat teknolojilerinin uygulanmasına odaklanılırsa, mevcut teknolojiler katkı maddesi (stereolitografi, lazer sinterleme, kaynaşık biriktirme modellemesi vb.) ve katkı maddesi olmayan (artımlı şekillendirme, yüksek hızlı

işleme, basınç enjeksiyon kalıplama, kayıp balmumu, laminasyon ve şekillendirme, vb.) olarak sınıflandırılabilir (Romero, 2019).

Yukarıda açıklanan teknolojilerden bazıları, amacı imal edilecek tasarım parçasını yerinde tutmak olan destek malzemesi adıyla bilinen bir malzemenin kullanılmasını gerektirir. Biriktirme işlemi tamamlandıktan sonra oluşan destek malzemesi, imalat sonrası (işlem sonrası) gerçekleşen bir sonuçtur. Destek malzemesini çıkarmak için kullanılan teknik, destek malzemesine ve dolayısıyla kullanılan Eİ maddesi imalat teknolojisine bağlı olacaktır. Bazı Eİ teknolojilerinde, sertleşmemiş malzeme tarafından gerçekleştirilen destek işlevi olarak destek malzemesi yoktur (Brit vd., 2016).

Materyal ilavesiyle elde edilen prototiplerin mekanik özellikleri, katmanlar arasındaki ergime sonucunun kalitesi ve malzemenin özellikleri ile belirlenir. Farklı Eİ hammaddesi imalat yöntemlerinde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini analiz etmek için aşağıdaki parametreler (DIN EN ISO 178/179/180/527/2039) oluşturulmalıdır: Elastik modül, kopma gerilmesi, uzama, eğilme modülü, darbe dayanım, basınç dayanımı ve ergime noktası (Romero, 2019).

Eİ yöntem ve alt teknolojilerine göre kullanılan malzemeleri sınıflandırılması Çizelge 3.4 ile aşağıda verilmiş olup burada metal malzeme bazında incelenecek 4 farklı yöntem olduğu görülmektedir. Bu teknolojilerin sistematığı ve özellikleri ayrıca verilmiştir.

Çizelge 3.4. Eİ yöntem, teknoloji ve malzemeler

Yöntem	Teknoloji	Kullanılan Malzemeler
BJ (Bağlayıcı Püskürtme)	- 3D Inkjet	Polimerler Seramikler Kompozitler Metaller Hibrit
DED (Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme)	- Laser Deposition (LD) - Laser Engineered Net Shaping (LENS) - Electron Beam - Plasma Arc Melting	Metal Hibrit
ME (Malzeme Ekstrüzyon)	- Fused Deposition Modelling (FDM) - Fused Filament Fabrication (FFF) - Fused Layer Modelling (FLM)	Polimer Kompozit
MJ (Malzeme Püskürtme)	- 3D Inkjet Technology - Direct Ink writing	Polimer Seramik Kompozit Hibrit Biyolojik
PBF (Toz Yatağı Füzyon)	- Electron Beam Melting (EBM) - Direct Metal Laser Sintering (DMLS) - Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM)	Metal Polimer Seramik Kompozit Hibrit
SL (Sac Laminasyon)	- Laminated Object Manufacturing (LOM) - Ultrasound Consolidation /Ultrasound Additive Manufacturing (UC/UAM)	Metal Polimer Seramik Hibrit
VP (VAT Fotopolimerizasyon)	- Stereo Lithography (SLA) - Digital Light Processing (DLP)	Polimer Seramik

Farklı makine sınıflarını tartışmak için, ASTM F42 Eklemeli İmalat Komitesi, proses terminolojisi konusunda bir standart yayınlamıştır (Sames vd., 2016). Komite 7 farklı standart kategorisini şu şekilde oluşturmuştur:

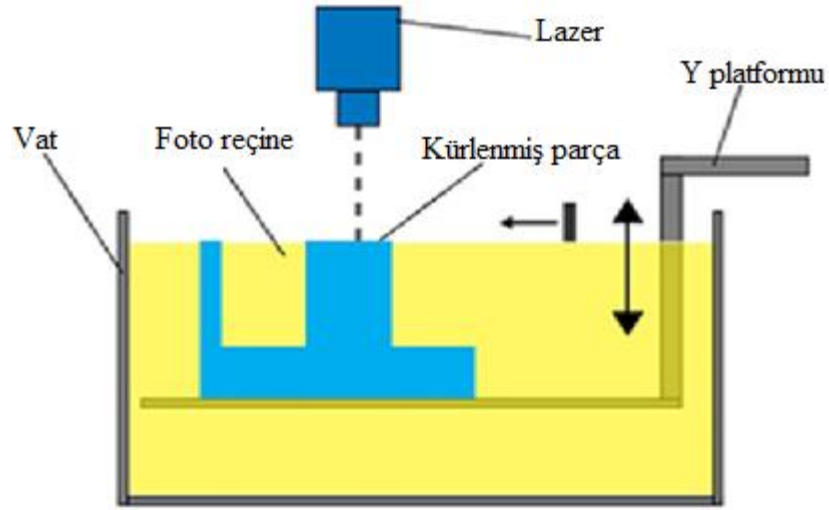
1. VAT Fotopolimerizasyonu (VAT Photopolymerisation)
2. Malzeme Püskürtme (Material Jetting)
3. Malzeme Ekstürizyon-(Çıkarma) (Material Extrusion)
4. Toz Yatağı Füzyon (Powder Bed Fusion)
5. Saç – (Levha) Laminasyon (Sheet Lamination)
6. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition)
7. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

şimdi bu teknolojiler kısaca açıklanacaktır.

3.2.1. VAT fotopolimerizasyon (VAT Photopolymerisation)

Vat polimerizasyon, modelin katman katman inşa edildiği sıvı fotopolimer reçine kabı kullanır. Reçineyi sertleştirmek için şekil 3.4’de görülen lazer ışını ya da ultraviyole (UV) ışığı kullanılırken, tabla her yeni katman kürlendikten sonra aşağı doğru hareket ettirilir.

Parça oluşturmak için sıvı kullandığından imalat aşamasında malzemeden yapısal bir destek yoktur. Toz bazlı yöntemlerin aksine foto reçineden destek verilir. Bu durumda destek yapılarının sıklıkla eklenmesi gerekecektir. Reçineler, ışığın motor kontrollü aynalar kullanılarak reçinenin yüzeyine yönlendirilmesiyle bir foto polimerizasyon işleminin (Gibson vd., 2010) veya UV ışığı kullanılarak kürlenir (Grenda, 2009). Reçine ışıkla temas ettiğinde sertleşir.



Şekil 3.4. VAT Fotopolimerizasyonu şematığı (Loughborough University)

İşlem basamakları:

- Yapı platformu, reçine tankının tepesinden, tabaka kalınlığı ile aşağı doğru alçaltılır.
- Bir UV ışığı reçine katmanını katman bazında katılaştırır. Platform aşağı doğru hareket etmeye devam eder ve öncekinin üstüne ilave katmanlar imal edilir.
- Bazı makineler, bir sonraki katı oluşturmak ve pürüzsüz bir reçine bazı sağlamak için katmanlar arasında hareket eden bir bıçak kullanırlar.
- Tamamlandıktan sonra, kazandaki reçine tahliye edilir ve parça çıkartılır.

SLA işlemi yüksek bir doğruluk seviyesine ve iyi bir parça kalitesine sahiptir (Chua vd., 2010). Ancak parçanın yapısal kullanım için yeterince güçlü olması için çoğu zaman destek yapıları ve sonrasında sertleştirme gerektirir.

Tek bir lazer ve optik kullanarak (Gibson vd., 2010), bıçaklar veya tekrar kapama bıçakları bir sonraki katmanın yapımı için reçinede herhangi bir kusur olmadığından emin olmak için önceki katmanların üzerinden geçer. Foto polimerizasyon işlemi ve destek malzemesi, yüksek kalitede bir model elde etmek için reçineyle doldurulması gereken hava boşlukları gibi kusurlara neden olmuş olabilir. İşlem için tipik tabaka kalınlığı 0,025 – 0,5 mm'dir (Chua vd., 2010).

Son İşlem (Post prosesing): Parçalar reçineden sökülmeli ve fazla reçine tamamen boşaltılmalıdır. Destekler bir bıçak veya keskin bir alet kullanılarak çıkarılabilir.

Reçineyi kirletmemeye özen gösterilmeli ve uygun güvenlik önlemleri alınmalıdır. Reçinenin ve desteklerin çıkarılması için alkol ile temizlemenin ardından su ile durulanmalıdır. İşlem, parçalardan malzemeyi tamamen çıkarmak için ek fırçalama gerektirebileceği için uzun olabilir. Son olarak, parçalar doğal olarak veya hava kompresörü ile kurutulabilir. UV ışığı, yüksek kalitede parça elde etmek için son bir kütleme işlemi için de kullanılır (Loughborough University).

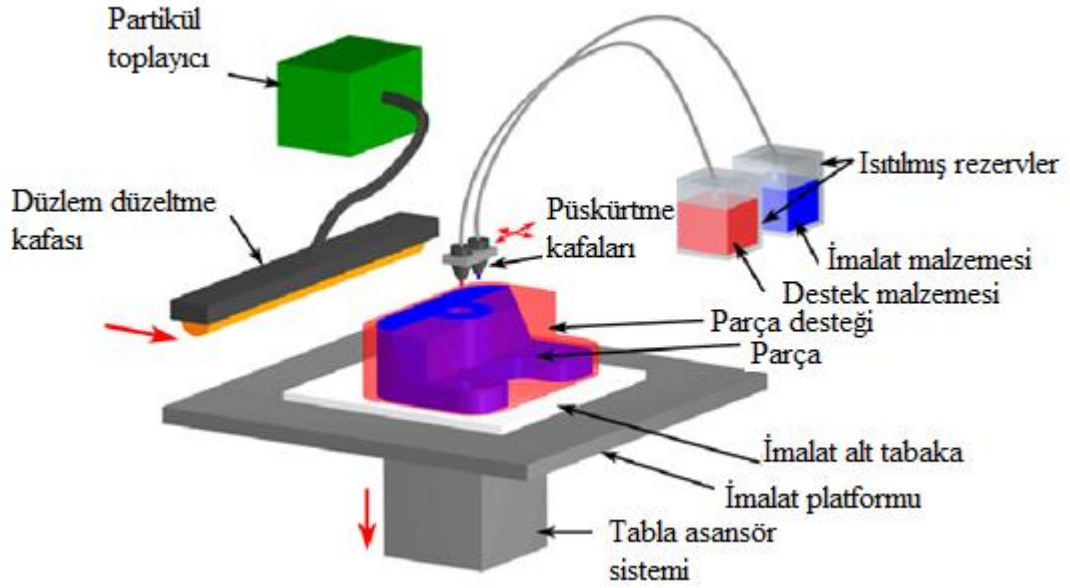
Bu yöntemin dezavantajları aşırı kuruma, taranmış çizgi şekli ve gerekli malzeme ve malzemeler için yüksek maliyetler nedeniyle oluşan işlem hatalarıdır (Wong ve Hernandez, 2012). Fotopolimerizasyona olan bağımlılığı nedeniyle, bu teknoloji doğal olarak fotopolimerlerle sınırlıdır. Reçine içinde nano parçacıkları süspansiyon ederek, bazı araştırmacılar seramik bileşenlerini (örneğin alümina, zirkonya) bu teknikle işleyebilmişlerdir (Bian vd., 2012).

3.2.2. Malzeme püskürtme (Material Jetting)

Malzeme püskürtme, iki boyutlu bir mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer bir yöntemle nesnelere oluşturur. Malzeme, İsteğe Bağlı Düşme (Drop On Demand-DOD) yaklaşımı kullanılarak bir yapı platformuna püskürtülür.

Malzeme katıldığı yapı yüzeyine veya platformuna püskürtülür ve Şekil 3.5’de görüleceği üzere model kat kat inşa edilir. Malzeme, yapı platformu üzerinde yatay olarak hareket eden bir ağızlıktan biriktirilir. Makineler karmaşıklığa ve malzemelerin biriktirilmesini kontrol etme yöntemlerine göre değişir. Malzeme tabakaları daha sonra ultraviyole (UV) ışığı kullanılarak sertleştirilir veya sertleştirilir.

Malzemenin damlalar halinde biriktirilmesi gerektiğinden kullanılacak malzeme sayısı sınırlıdır. Polimerler ve mumlar, viskoz yapıları ve damla oluşturma yeteneklerinden dolayı uygun ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir.



Şekil 3.5. Malzeme püskürtme şematığı (Custompart)

İşlem basamakları:

- Baskı kafası yapı platformunun üzerinde yer alıyor.
- Materyal damlacıkları, baskı kafasından gerektiğinde termal ya da piezo elektrik yöntem kullanılarak yüzeye bırakılır.
- Malzeme damlacıkları katılaşıyor ve ilk katmanı oluşturur.
- Diğer katmanlar öncekinin üstünde olduğu gibi oluşturulur.
- Katmanlar soğumaya ve sertleşmeye bırakılır veya UV ışığı ile kürlenir. İşlem sonrası destek malzemesinin çıkarılmasını içerir.

Malzeme Püskürtme, iki boyutlu bir mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer bir yöntemle nesnel oluşturur. Bir işlemde birden fazla malzeme kullanılabilir ve yapım aşamasında malzeme değiştirilebilir. Malzeme, salınımlı bir nozul (ağız) kullanılarak oluşturulan damlacıklar halinde yapı platformu yüzeyine püskürtülür. Daha sonra damlacıklar yüklenir ve yüklü saptırma plakaları kullanılarak yüzeye yerleştirilir. Bu, yüksek seviyede damlacık kontrolü ve konumlandırma sağlayan sürekli bir sistemdir. Kullanılmayan damlacıklar baskı sistemine geri dönüştürülür.

İsteğe Bağlı Düşme, malzemeyi istenen yüzeye dağıtmak için kullanılır. Damlacıklar oluşturulur ve yazdırılan nesneyi oluşturmak için yapı yüzeyine yerleştirilir ve tüm

nesne yapılarına kadar yeni katmanlara ilave damlacıklar eklenir. Damlacıkları kullanmanın doğası, kullanılacak malzemelerin sayısını sınırlar. Polimerler ve balmumları sıklıkla kullanılır ve viskoz yapıları ve damla oluşma kabiliyetleri nedeniyle uygundur. Viskozite, işlemdeki ana belirleyicidir; rezervuarı hızlı bir şekilde tekrar doldurma ihtiyacı vardır ve bu da baskı hızını etkiler. Sürekli bir malzeme akışından farklı olarak, damlacıklar yalnızca gerektiğinde dağıtılır, nozüldeki termal veya piezoelektrik aktüatörlerden bir basınç değişikliği ile serbest bırakılır. Termal aktüatörler damlacıkları çok hızlı bir şekilde biriktirir ve damlacık oluşturmak için ince bir film rezistörü kullanır. Piezoelektrik yöntem, daha geniş bir malzeme yelpazesinin kullanılmasına izin verdiği için genellikle daha iyi kabul edilir. Tipik bir DOD baskı kafasının tasarımları bir makineden diğerine değişir. Ancak Ottnad'a göre, tipik olarak yüksek sıcaklık tutkalı ile birlikte tutulan bir hazne, sızdırmazlık halkası, Piezo elemanları ve nozullu silikon plaka içerir (Ottnad vd. 2012).

İşlem sonrası: Bir sodyum hidroksit çözeltisi veya su jeti kullanarak destek malzemesi çıkarılabilir. Proses teknolojisinin yüksek doğruluğu nedeniyle, özellikleri geliştirmek için gereken son işlem seviyesi sınırlıdır ve bir bölümün işlevsel ve estetik nitelikleri, baskı aşamasında büyük ölçüde belirlenir. Stratasys polyjet teknolojisi, malzemeyi UV ışığı kullanarak sertleştirir ve bu nedenle kütleme işlemi gerekmez (Loughborough University).

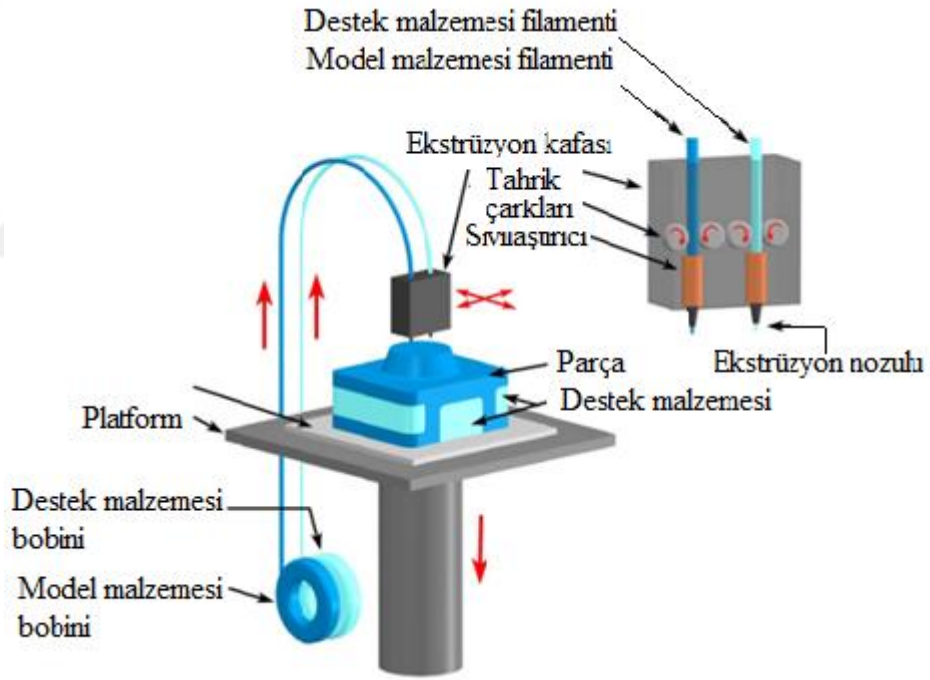
Jet damlacıkların faz değişimi ısıtma veya foto kütleme yoluyla gerçekleşir. Araştırmacılar, ek işlevsellik ile son parçalar oluşturmak için seramik, metaller ve yarı iletkenlerin nano ink süspansiyonlarının doğrudan inkjetleştirilmesine çalışmışlardır. Bununla birlikte, mürekkep püskürtmeyle işlem akışkanlarının viskozite sınırlamaları nedeniyle, süspansiyonlar nispeten düşük bir katı parçacık konsantrasyonuna sahiptir (Gaoa vd., 2015).

3.2.3. Malzeme ekstrüzyon-çıkarma (Material Extrusion)

Sigorta biriktirme modellemesi (Fused Deposition Modeling-FDM) yaygın bir malzeme ekstrüzyon işlemidir ve Stratasys şirketi tarafından tescillidir. Malzeme, ısıtıldığı ve daha sonra tabaka halinde tabaka halinde biriktirildiği bir ağızlıktan çekilir. Meme yatay olarak hareket edebilir ve her yeni katman biriktirildikten sonra bir

platform dikey olarak yukarı ve aşağı hareket eder. Birçok ucuz, yerli ve hobi 3B yazıcıda kullanılan yaygın bir tekniktir.

Süreç, nihai model kalitesini etkileyen birçok faktöre sahiptir, ancak bu faktörler başarıyla kontrol edildiğinde büyük potansiyel ve canlılığa sahiptir. FDM yüksek çalışma sıcaklıkları gerektirir ve bitmiş baskılar tipik olarak yüksek gözeneklilik sergiler (Agarwala, 1996). Ayrıca tabaka tabaka oluşturduğundan diğer tüm 3B baskı işlemlerine benzer olmasına rağmen, malzemenin bir nozuldan sabit basınç altında ve sürekli bir akışta eklenmesi gerçeğine göre değişir. Doğru sonuçların elde edilmesi için basınç sabit bir hızda tutulmalıdır (Gibson vd., 2010). Malzeme tabakaları sıcaklık kontrolü veya kimyasal madde kullanımı ile bağlanabilir. Malzeme makineye, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi makara biçiminde eklenir.



Şekil 3.6. Malzeme ekstrüzyon şematifi (Celik, 2013)

İşlem basamakları:

- Birinci katman, birinci nesne diliminin kesit alanı üzerine gerektiğinde malzeme biriktiren nozul olarak yapılmıştır.
- Aşağıdaki katmanlar önceki katmanların üstüne eklenir.

- Malzeme erimiş halde olduğu için tabakalar biriktirme sırasında bir araya getirilir.

Malzeme ekstrüzyon işleminin avantajları, son yapısal üretim modeline yakın, iyi yapısal özelliklere sahip modeller üretebilen, hali hazırda temin edilebilen ABS plastik kullanımını içerir. Düşük hacimli durumlarda, enjeksiyon kalıplama kullanmaktan daha ekonomik bir yöntem olabilir. Bununla birlikte, süreç yüksek kalitede bir sonuç elde etmek için kontrol edilmesi için birçok faktör gerektirir. Malzemeyi bırakan nozül her zaman yarıçapa sahip olacaktır, çünkü mükemmel bir kare nozül yapmak mümkün olmadığı için basılan nesnenin nihai kalitesini etkileyecektir (Chua vd., 2010). Doğruluk ve hız düşüktür. Nihai modelin kalitesi malzeme nozulu kalınlığıyla sınırlıdır (Krar vd., 2003).

Yüksek toleransın elde edilmesi gereken bileşenler için işlem kullanılırken, yerçekimi ve yüzey gerilimi dikkate alınmalıdır (Gibson vd., 2010). Tipik katman kalınlığı 0,178 mm ile 0,356 mm arasında değişmektedir (Chua vd., 2010).

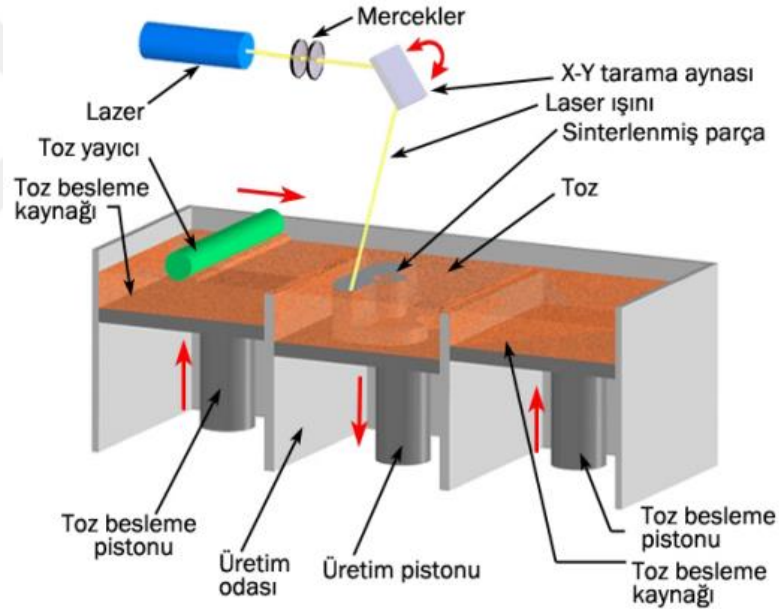
Modellerin görsel görünümünü iyileştirmek için bir sonraki işleme yöntemi, malzeme aktarımını iyileştirmektir. Yöntemler Ahn tarafından keşfedilmiştir, artan sıcaklık ve reçine kullanımını içerir. Parçaların kuvvetini artırmak için sıklıkla kullanılan cyano akrilat reçinesi kullanılarak yapılan deneyler, 30 saniye sonra geçirgenlikte ve % 5 kumlamada % 5'lik bir artışla sonuçlanmıştır (Ahn vd., 2004). Isı ile ilişkili işlem sonrası işlemlerin çoğunda olduğu gibi, büzülme olasılığı yüksektir ve yüksek tolerans gerektiğinde dikkate alınmalıdır (Loughborough University).

3.2.4. Toz yatağı füzyon (Powder Bed Fusion)

Toz Yatağı Füzyon işlemi şu yaygın kullanılan baskı tekniklerini içerir:

- Doğrudan metal lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS)
- Elektron ışını ergitme (Elektron Beam Melting-EBM)
- Seçici ısı sinterleme (Selective Heat Sintering-SHS)
- Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting-SLM)
- Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS).

Toz yatağı füzyon (Powder Bed Fusion-PBF) yöntemleri, Şekil 3.7’de görüleceği üzere malzeme tozunu birlikte eritmek ve birleştirmek için bir lazer veya elektron ışını kullanır. Elektron ışını eritme (Electron Beam Melting-EBM), vakum gerektirir ancak fonksiyonel parçaların oluşturulmasında metaller ve alaşımlarla birlikte kullanılabilir. Tüm PBF prosesleri, toz malzemenin katmanlara serilmesini içerir. Bunu merdane veya serici dahil olmak üzere farklı mekanizmalar vardır. Yatağın altındaki bir hazne veya hazne taze malzeme temini sağlar. DMLS, SLS ile yöntem olarak aynıdır, ancak metal kullanımı ve plastik kullanımı yoktur. İşlem, tozun tabaka tabaka sinterlenmesidir. SHS, toz malzemeyi bir araya getirmek için ısıtılmış bir termal baskı kafası kullandığı için diğer işlemlerden farklıdır. Daha önce olduğu gibi, tabakaların birleşmesi arasında bir merdane ile toz malzeme eklenir. Platform katman kalınlığı kadar düşürülür.



Şekil 3.7. Toz yatağı füzyon şematığı (Celik, 2013)

İşlem basamakları şu şekildedir:

- İmalat tablasına belirli bir kalınlıkta malzeme serilir.
- Lazer modelin ilk katmanını veya ilk kesitini birleştirir.
- Serici kullanılarak önceki katmanın üzerine yeni bir toz tabakası yayılır.
- Diğer katmanlar veya kesitler birleştirilir ve eklenir.
- Proses tüm model tamamlanana kadar tekrar eder. Gevşek, kaynaşmamış toz destek malzemesi görevi görür ve işlem sonrası çıkarılır.

Seçici Lazer Sinterleme (SLS) makineleri üç bileşenden oluşur (Gibson vd., 2010). Malzemeyi kaynatmak için bir enerji kaynağı, bu enerji kaynağını kontrol etmek için bir yöntem ve önceki malzemeye yeni malzeme katmanları eklemek için bir mekanizma. SLS işlemi destek yapısına gerek duymaz çünkü toz malzeme yapım süreci boyunca yeterli model desteği sağlar. Yapı platformu, sıcaklığı genellikle malzemenin erime noktasının birkaç derece altında olduğu ve lazerin katmanları birleştirmek için birbirine bağlılığını azaltan sıcaklık kontrollü bir oda içindedir. Oda, oksidasyon ve modelin son kalitesini en üst düzeye çıkarmak için genellikle azot gibi bir inert gazla doldurulur. Modeller, yüksek tolerans ve füzyon kalitesini sağlamak için soğuma süresi gerektirir. Bazı makineler sıcaklık katmanını katman bazında izler ve kaliteyi arttırmak için lazerin gücünü ayarlar.

SLM, SLS ile karşılaştırıldığında daha hızlıdır, ancak inert gaz kullanılmasını gerektirir, enerji maliyetleri yüksektir ve tipik olarak % 10 ile % 20 arasında düşük enerji verimliliği vardır. İşlem, önceki katmanların üzerine yeni toz katmanları yaymak için bir merdane veya serici kullanır. Merdane tozun daha eşit dağılımını sağlamak için çoğu zaman titreşir (Gibson vd., 2010). Tablanın altında ya da bir tarafındaki bir hazne, yeni toz teminini sağlar.

SHS, tozu bir araya getirmek için ısıtılmış bir termal baskı kafası kullanır. Daha önce olduğu gibi katmanlar, füzyon katmanları arasında bir merdane ile ilave edilir. İşlem, konsept prototiplerin ve daha az yapısal bileşenlerin oluşturulmasında kullanılır. Lazer olmayan bir termal baskı kafasının kullanılması, gereken ısı ve güç seviyelerini önemli ölçüde azaltarak işleme yarar sağlar. Termoplastik tozlar kullanılır ve bu tozlar daha önce olduğu gibi destek malzemesi olarak işlev görür. 'Mavi yazıcı', 200 mm x 160 mm x 140 mm imalat hacmine, 2-3 mm/saat baskı hızına ve 0,1 mm katman kalınlığına sahip SHS teknolojisini kullanan bir masaüstü 3B yazıcıdır (Mavi Yazıcı SHS, 2019).

DMLS, SLS ile aynı prosesi kullanır, ancak metal tozların kullanılması ile ayrılır. İşlem yine tabaka tabaka tozu sinterlenmesi prensibine dayanır. Geniş bir mühendislik metalleri çeşidi mevcuttur.

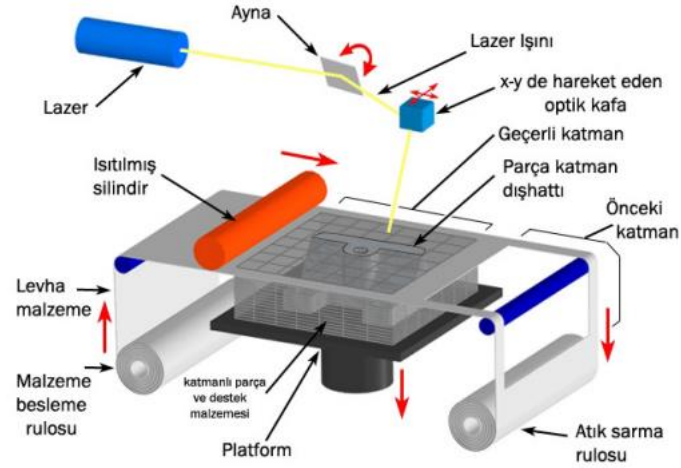
EBM'de katmanlar, metal tozlarını ergitmek için bir elektron ışını kullanarak kaynaşır. Makine üreticisi Arcam, ışını ve 1×10^{-5} mbar'lık bir vakum basıncını kontrol etmek

için elektromanyetik bobinler kullanır (Arcam EBM, 2019). EBM füzyon sırasında eşit sıcaklık dağılımına bağlı olarak çok iyi dayanım özelliklerine sahip modeller sunar (Chua vd., 2010). Sürecin sağladığı yüksek kalite ve sonlandırma, uçaklarda ve tıbbi uygulamalarda kullanılan yüksek standart parçaların imalatına uygun olmasını sağlar. Bu süreç, kalça kök protezi dahil geleneksel implant oluşturma yöntemlerine göre bir dizi avantaj sunar. CNC işlemeye kıyasla, EBM'yi titanyum ve 0,1 mm katman kalınlığıyla kullanarak daha hızlı ve daha iyi sonuçlar elde edebilir ve maliyeti % 35'e kadar azaltabilir.

İşlem sonrası gereksinimler arasında fazla tozun giderilmesi ve daha fazla temizlik ve CNC çalışması bulunur. Son işlemin bir avantajı ve ortak amacı yoğunluğun ve dolayısıyla parçanın yapısal dayanımının artırılmasıdır. Sıvı faz sinterlemesi, homojenizasyon ve materyal boyunca daha sürekli bir mikro yapı elde etmek için metal tozu veya toz kombinasyonunu eritmek için bir yöntemdir, ancak işlem sırasında büzülme hesaba katılmalıdır. Sıcak izostatik presleme yoğunluğu artırmak için başka bir yöntemdir; malzemenin yüksek basınç ve sıcaklığını uygulamak için bir vakumlu sızdırmaz hazne kullanılır. Bu işlem gücü artırmak için etkili bir teknik olmasına rağmen daha uzun ve daha pahalı bir imalat sürecidir (Loughborough University).

3.2.5. Sac laminasyon (Sheet Lamination)

Sac laminasyon işlemleri arasında Ultrasonik Katkı İmalatı (Ultrasonic Additive Manufacturing-UAM) ve Lamine Nesne İmalatı (Lamine Object Manufacturing-LOM) bulunmaktadır. UAM işlemi, ultrasonik kaynak kullanılarak birbirine bağlanmış metal levha veya şeritler kullanır. İşlem, sıklıkla kaynak işlemi sırasında, ek CNC işleme ve bağlanmamış metalin çıkarılmasını gerektirir. LOM, tabaka yaklaşımıyla benzer bir tabaka kullanmaktadır ancak kaynak yerine malzeme ve yapışkan olarak kağıt kullanmaktadır. LOM işlemi, baskı işlemi sırasında kolayca sökülmesini sağlamak için çapraz tarama yöntemi kullanır. Lamine nesnelere genellikle estetik ve görsel modeller için kullanılır ve yapısal kullanım için uygun değildir. UAM metal kullanır ve alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve titanyum içerir. İşlem düşük sıcaklıktadır ve iç geometrilerin oluşturulmasını sağlar. Proses farklı malzemeleri bağlayabilir ve metal eritilmediğinden nispeten az enerji gerektirir. Şekil 3.8'de sistemin temel bileşenleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Sac laminasyon şematığı (Celik, 2013)

İşlem basamakları:

- Malzeme, kesme yatağı üzerinde yerine yerleştirilir.
- Malzeme, bir önceki tabaka üzerinde, yapıştırıcı kullanılarak yerine yapıştırılır.
- Gereken şekil daha sonra katmandan, lazer veya bıçakla kesilir.
- Bir sonraki katman eklenir.
- İkinci ve üçüncü adımlar ters çevrilebilir ve alternatif olarak, malzeme yerleştirilmeden ve yapıştırılmadan önce kesilebilir.

LOM, çeşitli kağıt malzemelerinden, yani katkı maddesi kağıt olan ilk imalat tekniklerinden biridir. Yararları, kolayca bulunabilen ve ucuz olan A4 kağıdının yanı sıra diğerlerine kıyasla nispeten basit ve ucuz bir kurulumdur.

UAM işlemi, ultrasonik kaynak kullanarak birbirine bağlanmış metal tabakalarını kullanır. İşlem, bağlanmamış metalin ilave CNC işlemlerini gerektirir. LOM'dan farklı olarak metal elle kolayca çıkarılamaz ve istenmeyen malzemeler işlenerek çıkarılmalıdır. Bununla birlikte 0,150 mm kalınlığında ve 25 mm genişliğinde malzeme tasarrufu sağlayan metalik bant, daha sonra daha az malzemenin kesilmesine neden olur. Frezeleme, her katman eklendikten sonra veya işlemin tamamından sonra gerçekleşebilir. Kullanılan metaller alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve titanyumdur. İşlem düşük sıcaklıktadır ve iç geometrilerin oluşturulmasını sağlar. Bir önemli avantaj, işlemin farklı malzemeleri bağlayabilmesi ve metalin eritilmemesi nedeniyle nispeten düşük bir enerji gerektirmesidir; bunun yerine ultrasonik frekans

ve basınç kombinasyonu kullanılır (Friel, 2015). Çıktılar imal edilebilir ve elektronik ve kabloların gömülmesinin ana avantajı olabilir (Karunakaran vd., 2012). Malzemeler metallerin plastik deformasyonu ile bağlanır ve desteklenir. Plastik deformasyon, yüzey arasında daha fazla temasa izin verir ve mevcut bağları yedekler (Janaki Ram vd., 2007).

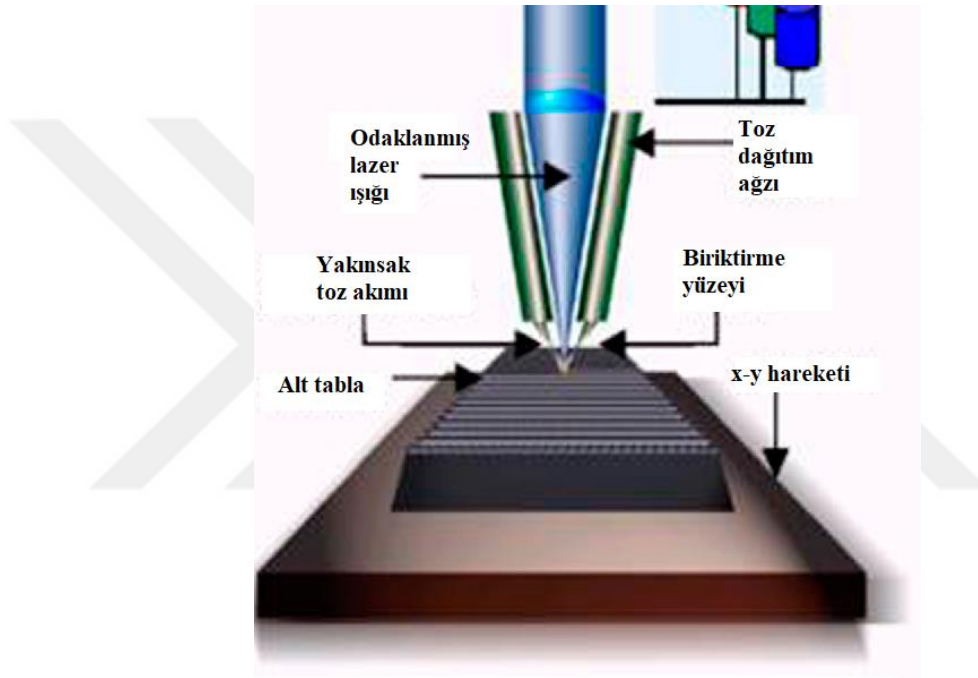
İşlem sonrası parçanın çevresindeki tabaka malzemesinden çıkarılmasını gerektirir. LOM ile bu işlemi kolaylaştırmak için çapraz tarama kullanılır, ancak kağıt kullanıldığı için, işlem herhangi bir özel araç gerektirmez ve zamandan tasarruf sağlar. Parçaların yapısal kalitesi sınırlı olmakla birlikte, yapıştırıcı, boya ve zımpara eklemek, daha fazla işlemenin yanı sıra görünümü de iyileştirebilir (Loughborough University).

3.2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed Energy Deposition)

Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition-DED) bir dizi terminolojiyi kapsar: Lazerle tasarlanmış net şekillendirme (LENS), yönlendirilmiş ışık üretimi, doğrudan metal birikimi, 3D lazer kaplama. Şekil 3.9'da görüleceği üzere sistemin ana bileşenleri verilmiştir. Mevcut bileşenlere ek, malzeme onarmak veya eklemek için yaygın olarak kullanılan daha karmaşık bir baskı işlemidir (Gibson vd., 2010).

Lazerler ve elektron ışınları, yaygın olarak kullanılan yönlendirilmiş enerji kaynağıdır. DED, malzemenin % 99.9'una kadar teorik yoğunluğunu sağlayabilir. Yerel erime ve hızlı soğutma nedeniyle ortaya çıkan mikro yapı iyi rafine tanelerden oluşur ve bu işlem tarafından oluşturulan kısımlar genellikle döküm ile imal edilenden % 30 daha yüksek mukavemet sergiler. Bu işlem, parçaların tamirinde benzersiz şekilde uygulanabilir çünkü bir parçanın hasarlı kısmı seçici olarak tekrar depolanabilir. Bu işlemlerin bir başka avantajı, mevcut yüzeylere kaplama ekleme kabiliyetidir. Bu özellik herhangi bir mühendislik ürününün tribolojik performansını geliştirmek için kullanılabilir. Çeşitli element tozları karıştırarak yeni malzemelerin yerinde sentezlenmesi bu işlemlere özgüdür (Gaoa vd., 2015).

Tipik bir DED makinesi, erimiş materyali katılaşmış olduğu belirtilen yüzeye bırakan çok eksenli bir kol üzerine monte edilmiş bir ağızlıktan oluşur. İşlem prensip olarak malzeme ekstrüzyonuna benzer, ancak ağız çok yönlü hareket edebilir ve belirli bir eksene sabitlenmez. 4 ve 5 eksenli makineler nedeniyle herhangi bir açıdan biriktirilebilen malzeme lazer veya elektron ışını ile biriktirildikten sonra eritilir. İşlem polimerler, seramikler ile kullanılabilir, ancak genellikle toz veya tel şeklinde metallerle birlikte kullanılır. Tipik uygulamalar arasında yapısal parçaların onarımı ve bakımı sayılabilir.



Şekil 3.9. Yönlendirilmiş enerji biriktirme şematifi (Sames, 2016)

İşlem basamakları:

- Nozullu 4 veya 5 eksenli kol sabit bir parçanın etrafında hareket eder.
- Malzeme, nozuldan parçanın mevcut yüzeylerine biriktirilir.
- Malzeme tel veya toz biçiminde sağlanır.
- Lazer, elektron ışını ya da plazma arkı kullanılarak malzeme ergitilir.
- Daha fazla malzeme, tabaka tabaka halinde eklenir ve katılır, mevcut parça üzerinde yeni malzeme eklenir veya onarır (Loughborough University).

DED işlemi tel veya toz formunda malzeme kullanır. Tel, önceden oluşturulmuş bir şeklin doğası gereği daha az hassastır, ancak sadece gerekli malzeme kullanıldığı için

toz ile karşılaştırıldığında daha verimlidir. Malzeme ergitme yöntemi, atmosferin düşük oksijen seviyelerine sahip olduğu kontrollü bir oda içinde, lazer, elektron ışını veya plazma arkı arasında değişir. 4 veya 5 eksenli makinelerde, besleme kafasının hareketi, sabit, dikey biriktirmeyle karşılaştırıldığında malzemenin akış hızını değiştirmez (Gibson vd., 2010).

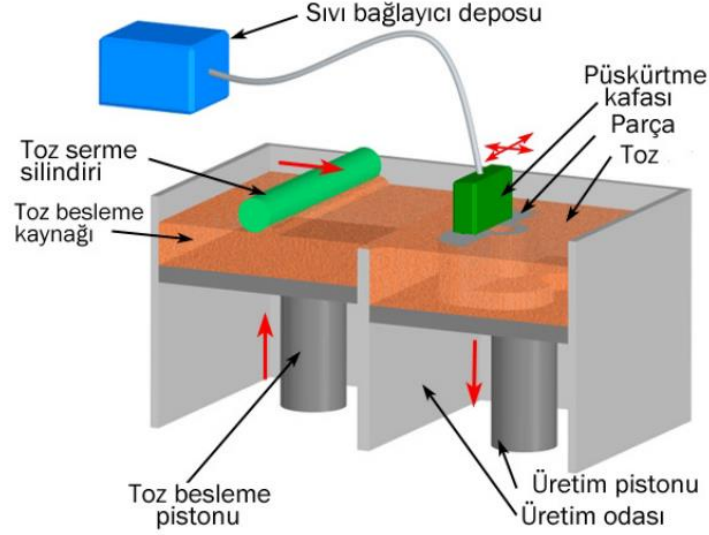
Çoğu durumda, hareket eden ve nesne sabit bir konumda kalan koldur, bu tersine çevrilebilir ve bunun yerine bir platform hareket ettirilebilir ve kol sabit bir konumda kalabilir. Seçim tam uygulamaya ve yazdırılan parçaya bağlı olacaktır. Malzeme soğuma süreleri çok hızlıdır, örnek olarak 1000-5000 derece/saniye arasındadır. Soğuma süresi, biriken malzemenin nihai tane yapısını etkileyecektir, bununla birlikte, malzemelerin üst üste binmesi de dikkate alınmalıdır. Yapı tabaka kalınlıkları 0,25 mm ile 0,5 mm arasındadır (Gibson vd., 2010).

3.2.7. Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting)

Bağlayıcı püskürtme (BP) yönteminde iki ana malzeme kullanılır; toz bazlı bir malzeme ve bir bağlayıcı. Bağlayıcı, toz malzeme ve tabakalar arasında yapışkan görevi görür. Bağlayıcı genellikle sıvı halde ve imalat malzemesi toz halindedir. BP’de çeşitli solventler, kolloidler ve polimerler dahil olmak üzere farklı tiplerde bağlayıcılar kullanılmıştır (Utela vd., 2010). Püskürtme kafası, makinenin x ve y eksenleri boyunca yatay olarak hareket eder. Her katmandan sonra imalat platformu aşağı indirilir. Sistemin şematiği Şekil 3.10 ile aşağıda verilmiştir.

Bağlama yönteminden dolayı, malzeme özellikleri her zaman yapısal parçalar için uygun değildir ve baskı hızına rağmen ilave son işlemler genel işleme önemli bir zaman kazandırabilir.

Diğer toz bazlı üretim yöntemlerinde olduğu gibi, basılan nesne toz yatağı içinde kendiliğinden desteklenir ve tamamlandıktan sonra bağlanmamış tozdan çıkarılır. Parçayı çevreleyen yataktaki bağlanmayan gevşek toz basınçlı hava ile imalattan sonra çıkarılabilir. Daha sonra elde edilen parça bağlayıcıyı uçurmak ve toz partiküllerini bir araya getirmek için nihai yoğunluğu ve mukavemeti elde etmek üzere bir fırına yerleştirilir (Bai, 2017).



Şekil 3.10. Bağlayıcı püskürtme şematığı (Celik, 2013)

İşlem basamakları:

- Toz malzeme serici kullanarak imalat tablosuna serilir.
- Baskı kafası, bağlayıcı yapıştırıcıyı gerektiğinde tozun üzerine biriktirir.
- Yapı platformu, modelin katman kalınlığına göre azaltılmıştır.
- Bir başka toz tabakası önceki tabakaya yayılır. Nesne, tozun sıvıya bağlandığı yerde oluşturulur.
- Bağlanmamış toz nesneyi çevreleyen konumda kalır.
- İşlem, tüm nesne yapılıncaya kadar tekrar edilir.

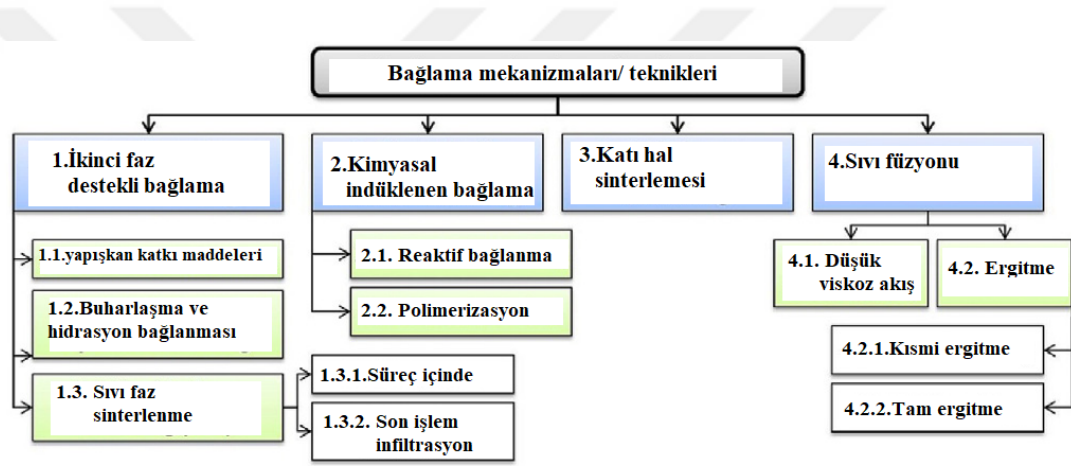
Bağlayıcı püskürtme işlemi renkli baskıya izin verir ve metal, polimer ve seramik malzemeler kullanır. İşlem genellikle diğerlerinden daha hızlıdır ve malzemeyi püskürten baskı kafası deliklerinin sayısını artırarak daha da hızlandırılabilir. İki farklı malzeme, çok sayıda bağlayıcı-toz kombinasyonuna ve parçanın çeşitli mekanik özelliklerine, iki malzemenin oranı ve özelliklerinin değiştirilmesiyle elde edilmesine izin verir. Bu nedenle, işlem, iç malzeme yapısının belirli bir kalitede olması gerektiğinde çok uygundur (Loughborough University).

Genellikle granül ve toz formundaki yapı malzemesi katmanları, bağlayıcı kullanılarak bir arada tutulur. Baskı kafası, bağlayıcı malzemeyi mikro miktarlarda biriktirir ve toz malzeme ile parçanın imal edilmesinde kullanılır. Isıtılmış bir yapı bölümü,

malzemelerin viskozitesini artırarak baskı işlemini hızlandırmaya yardımcı olabilir (Chua vd., 2010).

İmalatın başarısı yalnızca ilave katmanların etkili bir şekilde bağlanmasıyla mümkündür. Bağlama tekniği, işlem hızını ve parça özelliklerini belirler. Bağlama, Şekil 3.11’de şematik olarak gösterildiği gibi dört kategoride sınıflandırılabilir (Bourell, 2017):

- i) İkincil faz destekli bağlama,
- ii) Kimyasal olarak indüklenen bağlama,
- iii) Katı hal sinterlemesi,
- iv) Sıvı füzyonunu



Şekil 3.11. Bağlama mekanizmaları (Bourell, 2017)

İşlem Sonrası: Genel işlem süresi, bağlayıcının ayarlanmasını gerektirdiğinden ve parçadan yüksek kaliteli bir sonuç elde etmek ve tamamen katılaşmasını sağlamak için makinede soğumasına izin verilir. Bu sebeple süreç uzatılır. Parçayı daha sağlam hale getirmek, daha iyi mekanik ve yapısal özellikler kazandırmak için son işleme sıklıkla ihtiyaç duyulur (Gibson vd., 2010).

İmal edilen parçalar bağlanmış tozdan oluşur ve bu nedenle işlem sonrası, parçanın yeterli mukavemete sahip olması için infiltrasyon gerektirir. Bu yöntem ilk önce MIT’de çalışılmıştır ve Z Corporation ve ExOne tarafından ticarileştirilmiştir. Püskürtmeli bağlayıcı ile başarılı bir şekilde yayılabilen ve ıslanabilen herhangi bir toz malzeme bu teknoloji ile işlenebilir (Gaoa vd., 2015).

4. MATERYAL ve METOT

Bu bölümün materyal kısmında kullanılan malzemeler ve cihazlar, metot kısmında ise izlenen yöntemler anlatılmıştır.

4.1. Materyal

Materyal bölümünde, numunelerin imalatı için kullanılan 316L paslanmaz çelik tozu, bronz tozu, bağlayıcılar ve deneylerde kullanılan cihazlar ile ilgili bilgi verilmiştir.

4.1.1. Paslanmaz çelik tozu (316L)

BPEİ yöntemi ile imalatı gerçekleştirilen numuneler için 316L paslanmaz çelik tozları kullanılmıştır. Gaz atomize olarak imal edilen 316L metal tozların çapı 20 mikron ile 53 mikron aralığındadır. 316L paslanmaz çelik metal tozun kimyasal bileşenleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 316L paslanmaz çelik tozun kimyasal yapısı (SLM Solutions, 2019)

Element	Minimum	Maksimum
Fe	Denge	Denge
Cr	16,00	18,00
Ni	10,00	14,00
Mo	2,00	3,00
Mn	2,00	2,00
Si		1,00
P		0,045
S		0,030
C		0,030
N		0,010

4.1.2. Bronz tozu

İnfiltrasyon amaçlı kullanılan, Şekil 4.1’de görüntüsü verilen bronz toz malzemenin boyutu ortalama 44 mikron olup, % 90 Cu - % 10 Sn şeklinde bir kimyasal yapıya sahiptir (Nanokar, 2019).



Şekil 4.1. Bronz toz görüntüsü (Nanokar, 2019)

4.1.3. Bağlayıcılar

Çalışmada numunelerin imalatı kapsamında 2 farklı bağlayıcı kompozisyonu kullanılmıştır. Birincisi, Para Toluen Sülfonik Asit (PTSA) ile Furfuril Alkol (FA) bağlayıcısı olup, diğeri Stereolithography (SLA) ile İzo Propil Alkol (IPA) bağlayıcısıdır.

PTSA, (p-Toluene sulfonic asit, Para-toluene sulfonic asit, PTSA veya pTsOH) formülü $CH_3C_6H_4SO_3H$ olan organik bir bileşiktir. Su, alkol ve organik solventler çözünebilen beyaz katı bir maddedir. PTSA şeffaf veya beyaz görüntüye sahip olup iğne kristal ya da kristalize toz şeklindedir. PTSA kimyasal madde su, etanol, ether, benzen gibi çözünenlerle tepkimeye girmektedir (Tnjchem, 2019).

FA, bir hidroksimetil grubu ile süstitüe edilmiş bir furan içeren organik bir bileşiktir. Renksiz bir sıvıdır, ancak yaşlandırılmış örnekleri sarı renkte görünmektedir. Su ile karışır, ancak suda kararsızdır. Yaygın organik çözücüler ile çözünmektedir (Pubchem, 2019). FA'nın kimyasal özellikleri; $C_5H_6O_2$ formüle, 170 °C kaynama noktasına, 1,13 g/cm³ yoğunluğa sahiptir.

SLA reçine malzemeleri yumuşak veya sert olabilir, cam ve seramik gibi ikincil malzemelerle yoğun şekilde doldurulmaktadır. SLA reçine, eklemeli imalat teknolojisi ile imal edilen parçalar yeterli ham mukavemete sahip özellikte olup karmaşık geometriye sahip parçaların imalatı sorunsuz bir biçimde gerçekleşmektedir. (Formlabs, 2019).

IPA, genel formülü C_3H_8O olmasına rağmen C_3H_7OH veya $CH_3CHOHCH_3$ bazen i-PrOH şeklinde de temsil edilmektedir. IPA, SLA reçinenin seyreltilmesi amacıyla kullanılmıştır. IPA'nın kimyasal özellikleri; kaynama noktası $82,5\text{ }^{\circ}C$, yoğunluğu 786 kg/m^3 'dür (Properkimya, 2019).

4.1.4. Isıl işlem fırınları

Numunelerin imal edildikten sonra sertleşmesi amacıyla Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) bünyesindeki tasarım ve imalat teknolojileri biriminde bulunan Protherm yüksek sıcaklık laboratuvar fırınında ısıl işlem yapılmıştır. Şekil 4.2'de gösterilen PLF serisi fırının özellikleri: Hacmi 6-60 litre, devamlı çalışma sıcaklığı $1050\text{ }^{\circ}C - 1250\text{ }^{\circ}C$, maksimum sıcaklığı $1100\text{ }^{\circ}C - 1300\text{ }^{\circ}C$ olarak verilmiştir (Alserteknik, 2019).



Şekil 4.2. Isıl işlem fırını

Numunelerin bronz infiltrasyon işlemleri Şekil 4.3'de gösterildiği gibi Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (HUBTUAM) yer alan MSE Furnace / ATM_1700_8 modelli atmosfer kontrollü fırın ile ısıl işlem yapılmıştır. Bu fırın ile argon, azot, vakum, hidrojen ve benzeri atmosfer koşullarında ısıl işlem yapılmaktadır. Ayrıca atmosfer kontrollü fırında daha kararlı ve dengeli olan silindirik atmosfer kabinleri kullanılmıştır. Vakum değerleri 0 Bar'a dayanıklıdır. Opsiyonlu olarak sunulan yüksek basınç çemberleri ile 10 Bar'a kadar ısıl işlem yapılmaktadır.



Şekil 4.3. Atmosfer kontrollü fırın görüntüsü

4.1.5. Refrakter tuğla

Numunelerin fırın içinde muhafazası ve fırınlama sürecinde destek malzeme olması amacıyla yüksek sıcaklıklara dayanma özelliğine sahip tuğla kullanılmıştır. Numuneler Şekil 4.4’de görülen tuğla üzerine dizilmiştir ve numunelerin üzerini 1-2 cm kapatacak şekilde refrakter kum malzeme serilmiştir. % 30-35 arasında alümina içeriği olan tuğla, düşük ısı iletkenliği ve düşük ısıl kapasitesi gibi özellikleri sebebiyle tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. Refrakter tuğla

4.1.6. Yoğunluk ölçümü (Arşimet prensibi)

Akışkanların taşma prensibine dayalı olarak boşluklu malzemelerin yoğunluğunu bulmayı amaçlayan sistem ve formül Şekil 4.5 ile verilmiştir. Öncelikle normal ağırlığı ölçülen numune daha sonra düzenekteki beherin için konularak sudaki ağırlığı

ölçülmüştür. Oda sıcaklığına bağlı saf suyun yoğunluğu da göz önünde bulundurularak formül yardımıyla numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.



$$\text{Yoğunluk} = \frac{\text{Normal ağırlık} \times \text{Saf suyun yoğunluğu}}{\text{Normal ağırlık} - \text{Sudaki ağırlık}}$$

Şekil 4.5. Yoğunluk ölçüm sistemi

4.1.7. Helyum piknometresi

Helyum piknometresi, Arşimed'in akışkan taşması prensibini ve Boyle Kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulmayı amaçlamaktadır. Yapılan ölçümlerin en yüksek derece doğrulukta olması için akışkan, bütün gözeneklere girebilen tesirsiz bir gaz olmasıdır. Bu nedenle, yapılan ölçümler için atomik boyutları 0,25 µm çapındaki girinti ve gözeneklere uygun Helyum gazı tercih edilmektedir. Helyum gazının ideal gaz olarak davranışları da seçilme sebebi olarak sayılabilir. Azot gazı gibi başka gazlar kullanıldığında da belirgin bir fark olmamaktadır. Geçirgen özelliğe sahip yapılar için (düşük yoğunluklu polimerler ve bitkisel malzemeler gibi) helyum gazı yerine azot veya SF6 gazı kullanılması uygun olmaktadır (Odtü, 2019).

İnfiltrasyon sonrası numunelerin yoğunlukları Şekil 4.6'da gösterildiği gibi Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi (DEYMAM) laboratuvarında bulunan helyum piknometre cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Helyum piknometresi cihazın görüntüsü

4.1.8. Numune hazırlanma sürecinde kullanılan cihazlar

Numunelerin sertlik ölçümleri Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) bünyesindeki test ve analiz teknolojileri biriminde yapılmıştır. Deney öncesinde Şekil 4.7’de gösterildiği gibi ATM GMBH Brillant 220 model numaralı hassas kesme cihazı ile numuneler boy kesit alınacak şekilde simetrik olarak ortadan kesilmiştir.



Şekil 4.7. Hassas kesme cihazın görüntüsü

Kesilen numuneler Şekil 4.8’de gösterildiği gibi ATM GMBH Opal 410 model numaralı sıcak bakelite alma cihazı ile incelenecek yüzeyi açık kalacak şekilde kaplanmıştır.



Şekil 4.8. Sıcak bakalite alma cihazının görüntüsü

Sıcak bakalite alınan numuneler Şekil 4.9’da gösterildiği gibi ATM GMBH Saphir 520 model numaralı numune zımparalama/parlatma cihazı ile incelemeye uygun hale getirilmiştir.



Şekil 4.9. Numune zımparalama / parlatma cihazının görüntüsü

4.1.9. Mikro sertlik testi cihazı

Zımparalanarak ve parlatılarak yüzeyi düzeltilen numunelerin sertlik ölçümü Şekil 4.10’da görülen TTS Matsuzawa HWMMT-X3 model numaralı cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.10. Mikro sertlik ölçüm cihazı

4.1.10. Basma testi cihazı

Numunelerin basma testi Şekil 4.11’de gösterilen SDÜ-YETEM’de yer alan Shimadzu Masaüstü Çekme-Basma Elektromek Deney Cihazı-Shimadzu AGS-X 10 kN’a kadar ölçüm yapabilen cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 4.11. Basma testi cihazın görüntüsü

4.1.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

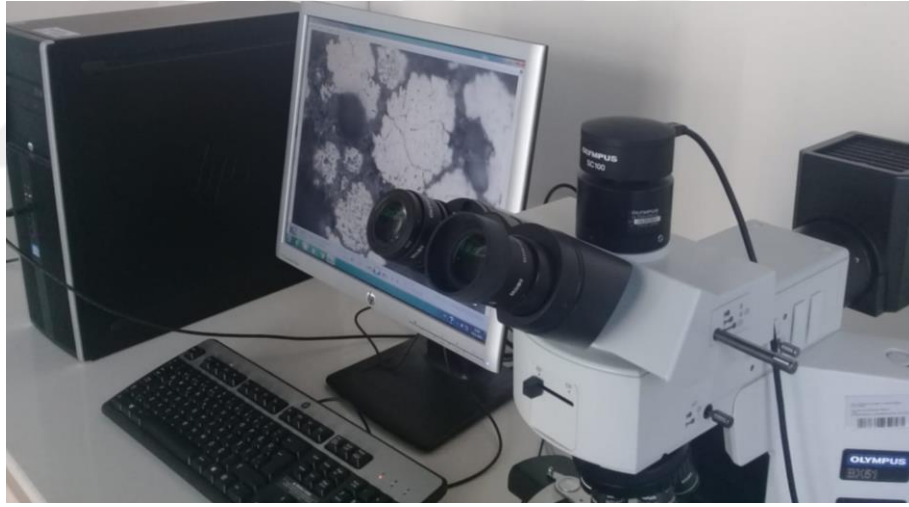
Numunelerin yüzey yapısı Şekil 4.12’de gösterildiği gibi SDÜ-YETEM’de yer alan FEI QUANTA FEG 250 model numaralı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve EDS ile element analizi yapılmıştır.



Şekil 4.12. SEM cihazın görüntüsü

4.1.12. Optik mikroskop

Numunelerin yüzey yapısı Şekil 4.13’de gösterildiği gibi SDÜ-YETEM yer alan Olympus BX51TRF-6 marka optik mikroskop ile incelenmiştir.



Şekil 4.13. Optik mikroskop cihazın görüntüsü

4.2. Metot

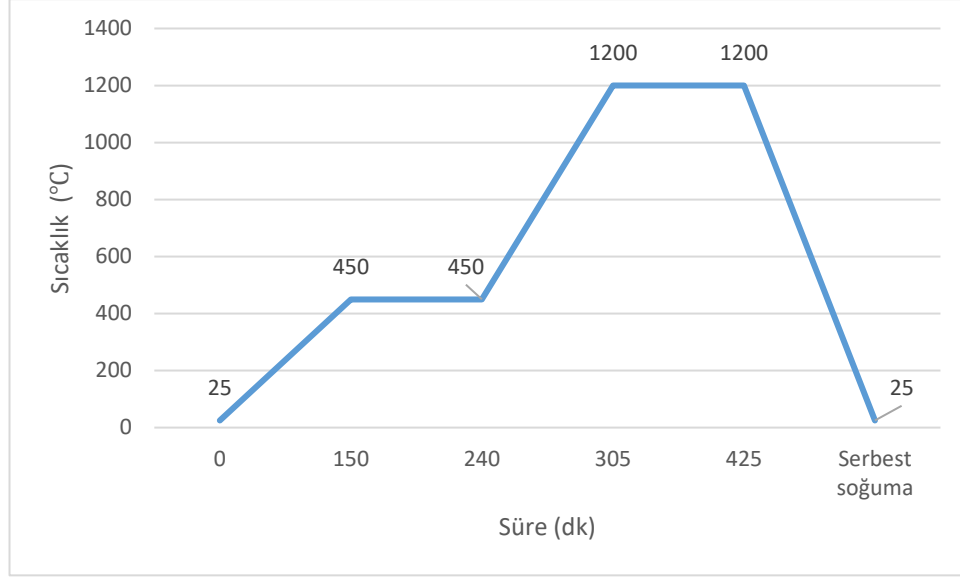
Bu bölümde numune imalat parametreleri ile ısıl işlem uygulanmış numunelerin mekanik, metalurjik ve fiziksel deneylerden bahsedilmiştir.

4.2.1. Numune imalatı

Numunelerin imalatı için kullanılan parametreler; SLA üç, FA dört değişik bağlayıcı yüzdeleri ve dört farklı katman kalınlığındadır. Bağlayıcıların ilki SLA-IPA karışımıdır. Bu karışım % 30 SLA-% 70 IPA, % 40 SLA-% 60 IPA, % 50 SLA-% 50 IPA olarak kullanılmıştır. Bu oranlarda karıştırılan bağlayıcı metal tozları üzerine püskürtülmüştür. Bağlayıcıların ikincisi olarak PTSA-FA reçine kullanılmıştır. Bu kimyasallardan PTSA, 316L metal tozun ağırlığına göre % 2, % 3, % 4, % 5 oranlarında karıştırılmıştır. Bu karışım katmanlar şeklinde serildiğinde, her katmana FA reçine püskürtülmüştür. Ayrıca yukarıda bahsedilen her parametre için 200, 300, 400, 500 mikron katman kalınlığında numuneler imal edilmiştir. Her parametrede 2 adet numune imal edilmiştir.

4.2.2. Numunelere uygulanan ısıl işlemler

İmal edilen numunelerin yeterli mukavemette bağlanabilmesi için ısıl işlem fırınına konulmuştur. Kütleme işlemi yaklaşık 3 saat süre ile 175 °C sıcaklıkta bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Kürlenmiş numuneler sonraki aşamada atmosfer kontrollü fırında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Numuneler fırına koyulurken refrakter fırın tuğlası içinde Şekil 4.4’de görüldüğü üzere dizilmiştir ve üzeri refrakter kum ile kapatılmıştır. Fırın Şekil 4.14’deki süre ve sıcaklık değerlerinde ısıtılarak 450 °C’de 90 dakika bekletilerek piroliz işlemine ve 1200 °C’de 120 dakika bekletilerek sinterlenmiş ve infiltrasyon işlemine tabi tutulmuştur. 1200 °C’de infiltrasyon işlemi bittikten sonra fırın içinde serbest soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 4.14. Numunelerin ısıtılma işlemi fırın süreleri grafiği

4.2.3. Mekanik, metalurjik ve fiziksel deneyler

Çalışmada, ısıtılma işlemi görmüş numuneler üzerinde mekanik, metalurjik ve fiziksel deneyler yapılmıştır. Bunlar sırasıyla, helyum piknometresi, mikro sertlik, basma testi, SEM ve optik mikroskop incelemeleridir.

Atmosfer kontrollü fırından alınan numunelerin, helyum piknometresi cihazı ile yoğunlukları ölçülmüştür. Ölçüm işlemi, dış ortam etkilerinden korunması amacıyla etrafı kapatılmış hassas terazide numunenin ağırlık ölçümü yapılarak başlar. Tartılan numune, helyum gazının doldurulacağı kapalı sisteme bırakılır. Cihazın istenilen sayıda ölçüm yapması sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunenin ortalama yoğunluk değeri elde edilir.

Numunelerin sertlik ölçümünü yapmak amacıyla öncelikle hassas kesme cihazı ile numunelerin boy kesiti alınacak şekilde simetrik olarak ortadan kesilmiştir. Hassas kesme cihazı, malzemenin özelliklerini değiştirmeden numuneyi inceleme boyutuna getirme amacıyla kullanılmıştır. Kesilen numuneler sıcak bakalite alma cihazı ile incelenecek yüzeyi açık kalacak şekilde kaplanmıştır. Bakalite alma işlemi numunelerin elle daha iyi tutulması ve inceleme açısından kolaylık sağlaması amacıyla yapılmıştır. Sıcak bakalite alınan numuneler zımparalama/parlatma cihazı ile incelemeye uygun hale getirilmiştir. Yüzeyden daha net görüntü almak amacıyla

yüzeydeki çizikleri ve pürüzleri en aza indirmek için zımparalama işlemi yapılmıştır. Daha sonra, elmas solüsyon ile parlatma işlemi yapılmıştır. Malzemenin metalografik yapısı incelenmesi için yüzey pürüzlülüğü en aza indirmiştir ve daha temiz görüntüler elde edilmiştir.

Sertlik ölçümü malzemenin karakterize özelliklerini belirlemede kullanılan en basit yöntem olduğu için tercih edilmiştir. Sertlik ölçümü için Vickers yöntemi kullanılmıştır. İşlem, numunenin yüzeyine tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra mikroskopik cihaz yardımıyla meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Malzemenin mekanik dayanımını belirlemek amacıyla numunelere basma testi uygulanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlendiği basma deneyi, işlem olarak çekme deneyinin tam tersidir. Basma deneyi de çekme deneyi cihazlarında yapılmıştır. Deneyde silindirik şeklindeki numuneler iki paralel tabla arasına yerleştirilmiş ve uygulanan kuvvetle oluşan şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Basma diyagramı genel olarak çekme diyagramına benzer şekildedir.

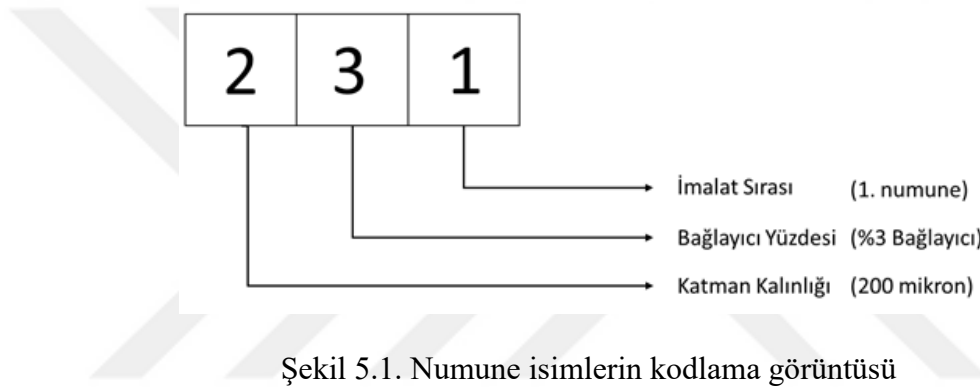
SEM cihazı ile malzemenin içyapısı ve faz özellikleri gözlemlenmiş, EDS ile numunenin elemental analizi yapılmıştır. Optik mikroskop ile görülemeyen faz yapısı, tane sınırları gibi özelliklerin belirlenmesi için SEM ile numuneler incelenmiştir. Ayrıca infiltrasyon başarısının belirlenmesi ve bağlayıcının piroliz olmasını incelemek için EDS ile element analizi yapılmıştır.

Malzemenin iç yapısındaki çatlakları ve boşluk yapısını belirlemek amacıyla optik mikroskop kullanılmıştır. İçyapı görüntüsü alınan numunelerdeki boşluk oranının tespit edilmesi için görüntüler ImageJ programı ile analiz edilmiştir. Program, alınan görüntülerin siyah beyaz olarak ayarlanması ve beyaz yada siyah alanın yüzdesinin belirlenmesi şeklinde çalışmaktadır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde mekanik, fiziksel ve metalurjik deneyler sonucunda elde edilen değerler verilmiştir. Elde edilen değerler sırasıyla yoğunluk ölçüm sonuçları, mikro sertlik sonuçları, basma testi sonuçları ve SEM görüntü sonuçlarıdır.

Numune isimleri Şekil 5.1'deki gibi kodlanmıştır. Soldan sağa olmak üzere birinci rakam katman kalınlığı, ikinci rakam bağlayıcı yüzdesi, üçüncü rakam kaçınıcı imalat olduğunu göstermektedir. Ayrıca numune kodlamaları kalın punto, numunelere ait değerler normal punto olarak verilmiştir.



SLA reçineli numunelerin ısıtılma işlem öncesi ve sonrası boy ve çap ölçüm sonuçları Çizelge 5.1 ile verilmiştir. SLA reçineli numunelerde ısıtılma işlem öncesi ve sonrası sonuçlar incelendiği zaman, boy ve çap olarak imalat boyutlarına en uygun numune 300 mikron katman kalınlığı, % 50 bağlayıcı yüzdeli numune (352); boyutları en uygun olmayan ise 200 mikron katman kalınlığı, % 50 bağlayıcı yüzdeli numune (251) olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre numunelerin infiltrasyon sonrası boy ve çap değerlerinde bir artış görülmekte olup ortalama olarak % 5-10 aralığında bir değer artışı hesaplanmıştır. Bu da literatürde şişme olarak tabir edilen bir durumdur. Cordero ve Elliot'a göre yer çekimine bağlı olarak sadece radyal yönde şişme olduğu söylenmiştir (Cordero ve Elliot, 2016). Ancak bu deneyde hem radyal hem de aksenal yönde bir şişme görülmüştür. Piroliz olma sürecinde bağlayıcının tam olarak uçurulamaması iki boyutlu değişimin en temel sebebi olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.1. SLA reçine boy ve çap analizi

Bağlayıcı yüzdesi (%)	Katman kalınlığı (mikron)	Boy (mm) Fırın öncesi	Boy (mm) Fırın sonrası	Numune kodları	Bağlayıcı yüzdesi (%)	Katman kalınlığı (mikron)	Çap (mm) Fırın öncesi	Çap (mm) Fırın sonrası	Numune kodları
SLA-I 3	200	10,2	11,1	231	SLA-I 3	200	9,9	11,5	231
	300	10	8,5	331		300	10	10,5	331
	400	11,5	12	431		400	9,9	10,8	431
	500	12,9	12,4	531		500	9,8	10,7	531
SLA-I 4	200	12,7	16,1	241	SLA-I 4	200	9,8	11	241
	300	10,7	10,7	341		300	9,8	10,3	341
	400	10,5	10,9	441		400	9,8	10,7	441
	500	11,2	12,2	541		500	9,8	10,7	541
SLA-I 5	200	13,1	14,4	251	SLA-I 5	200	9,9	11,2	251
	300	12,7	14,7	351		300	9,9	10,5	351
	400	9,5	10,5	451		400	9,9	10,7	451
	500	11,8	12,8	551		500	9,8	10,6	551
SLA-II 3	200	11,7	12,4	232	SLA-II 3	200	10	10,3	232
	300	10,7	11,1	332		300	9,9	10,2	332
	400	11,7	12,5	432		400	9,8	10,3	432
	500	10,7	10,1	532		500	9,8	10,4	532
SLA-II 4	200	12,8	13,8	242	SLA-II 4	200	9,8	10,1	242
	300	12,8	13,4	342		300	10	10,3	342
	400	11	10,7	442		400	9,8	10,3	442
	500	10,9	11,9	542		500	9,8	10,3	542
SLA-II 5	200	12,8	13	252	SLA-II 5	200	9,8	10,2	252
	300	9,5	10,1	352		300	9,9	10,1	352
	400	11,1	11,6	452		400	9,8	10,4	452
	500	11,1	12,2	552		500	9,8	10,3	552

SLA reçine ile imal edilen numunelerde genel olarak boy değerlerinde artış tespit edilirken bazı numunelerin boy değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu numunelerdeki kısıalma, refrakter kumunun temizlenmesi sırasında hasar görmesi sonucu oluşmuştur. Numunelerin hepsinin çap değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Boy ve çap değerlerindeki artış benzer olarak FA reçineli numunelerde de görülmüştür.

FA reçineli numunelerin ısı işlem öncesi ve sonrası boy çap değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. FA reçineli numunelerde boy ve çap olarak imalat boyutları en uygun numune 200 mikron katman kalınlığı ve % 4 bağlayıcı yüzdeli numune (242), imalat boyutlarına en az uygun olanı ise 500 mikron katman kalınlığı ve % 2 bağlayıcı yüzdeli numune (521) olmuştur. FA reçineli numunelerde de SLA reçineli numunelere benzer olarak hem boy hem de çap boyutlarında artış görülmüştür.

Çizelge 5.2. FA reçine boy ve çap analizi

Bağlayıcı yüzdesi (%)	Katman kalınlığı (mikron)	Boy (mm) Fırın öncesi	Boy (mm) Fırın sonrası	Numune kodları	Bağlayıcı yüzdesi (%)	Katman kalınlığı (mikron)	Çap (mm) Fırın öncesi	Çap (mm) Fırın sonrası	Numune kodları
FA-I 2	200	9,9	11	221	FA-I 2	200	9,8	10,6	221
	300	10,1	11	321		300	9,9	10,6	321
	400	10,2	12	421		400	9,8	11	421
	500	11,8	13,4	521		500	9,8	10,9	521
FA-I 3	200	9,8	11,2	231	FA-I 3	200	9,9	10,3	231
	300	9,3	10,3	331		300	9,8	10,3	331
	400	9,6	11,9	431		400	9,9	10,6	431
	500	10,7	11,5	531		500	9,8	10,5	531
FA-I 4	200	9,4	11,1	241	FA-I 4	200	9,9	10,2	241
	300	10,2	11,2	341		300	9,8	10,3	341
	400	10,6	11,8	441		400	9,8	10,3	441
	500	8,7	11,7	541		500	9,8	10	541
FA-I 5	200	10	14,1	251	FA-I 5	200	9,9	10,4	251
	300	10	12,1	351		300	10	10,8	351
	400	10,7	9,6	451		400	9,9	10,5	451
	500	9,7	12,3	551		500	9,9	10,8	551
FA-II 2	200	10,8	10,9	222	FA-II 2	200	9,8	ÇAP ÖLÇÜLEMEMİŞTİR.	222
	300	11	11,4	322		300	9,9		322
	400	9,5	10	422		400	9,9		422
	500	11,1	11,4	522		500	9,9		522
FA-II 3	200	9,2	9,8	232	FA-II 3	200	9,8		232
	300	9,6	10,2	332		300	9,9		332
	400	9,4	10,5	432		400	9,9		432
	500	9,4	9,9	532		500	10		532
FA-II 4	200	9,3	10,6	242	FA-II 4	200	9,8		242
	300	9,4	10,3	342		300	9,9		342
	400	9,1	9,8	442		400	9,9		442
	500	9,6	10,4	542		500	9,9		542
FA-II 5	200	10	10,8	252	FA-II 5	200	9,8	252	
	300	10,2	10,2	352		300	9,8	352	
	400	9,4	10,3	452		400	9,9	452	
	500	9,4	10	552		500	9,9	552	

Isıl işlem sonrası FA reçine ile imal edilen numunelerin orta kısmında bronz kalıntısı olduğu için çap değerleri okunamamıştır. Bu numunelerin resimleri Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Numune resmi

5.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Numunelerin BPEİ yöntemiyle imal edildikten sonra ısıtma işlem öncesi ve sonrası yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. İki aşamada yoğunluk sonuçları elde edilmiştir. Birincisi numunelerin imalatından sonra kürlenerek yeterli ham mukavemete ulaşması sonucunda Arşimet prensibiyle ölçümünden elde edilen sonuçlardır. İkinci olarak numunelere ısıtma işlem yapıldıktan sonra helyum piknometresi yöntemi ile ölçülen sonuçlardır.

Kürlenmiş parçanın yoğunluğunu ölçmek için parçanın gözenekli olması nedeniyle (ASTM Standardı 962) Arşimed prensibi daldırma yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, gözenekli numunelerin bilinen bir sıvıya batırılması şeklinde uygulanır (Bai vd., 2017). Elde edilen SLA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları Çizelge 5.3 ve FA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları Çizelge 5.4 ile verilmiştir. Numunelerin ham yoğunluk değerleri 4 ile 5 g/cm³ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin infiltrasyon sonrası içyapısındaki gözeneklerin bronz ile doldurulması nedeniyle yoğunluk değeri 316L paslanmaz çelik tozunun yoğunluk değeri olan 7,95 g/cm³ değerine yaklaşmıştır. Ölçülen en yüksek yoğunluk değeri 532 kodlu numunede 7,21 g/cm³ olarak elde edilmiş olup yoğunluk yüzdesi olarak % 90'a karşılık gelmektedir. Cordero ve Elliot yapmış oldukları çalışmada yoğunluk yüzdesi olarak sinterlenmiş numunelerde % 95, infiltrasyon uygulanmış numunelerde ise % 98 başarı sağlamışlardır (Cordero ve Elliot, 2016).

Çizelge 5.3. SLA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları

Numune kodu	Arşimet ölçümü	Helyum ölçümü
231	4,955	5,849
241	4,915	5,935
251	5,088	6,066
331	4,858	6,052
341	4,963	6,189
351	4,933	6,127
431	5,317	5,654
441	4,999	5,712
451	4,997	5,759
531	4,846	5,945
541	4,970	5,860
551	4,974	5,760
232	4,892	6,224
242	4,919	6,294
252	5,090	6,338
332	5,062	6,208
342	4,876	6,352
352	5,012	6,205
432	5,066	6,262
442	4,941	6,301
452	5,072	6,399
532	4,974	7,214
542	4,974	6,278
552	5,083	6,217

Çizelge 5.4. FA reçineli numunelerin yoğunluk sonuçları

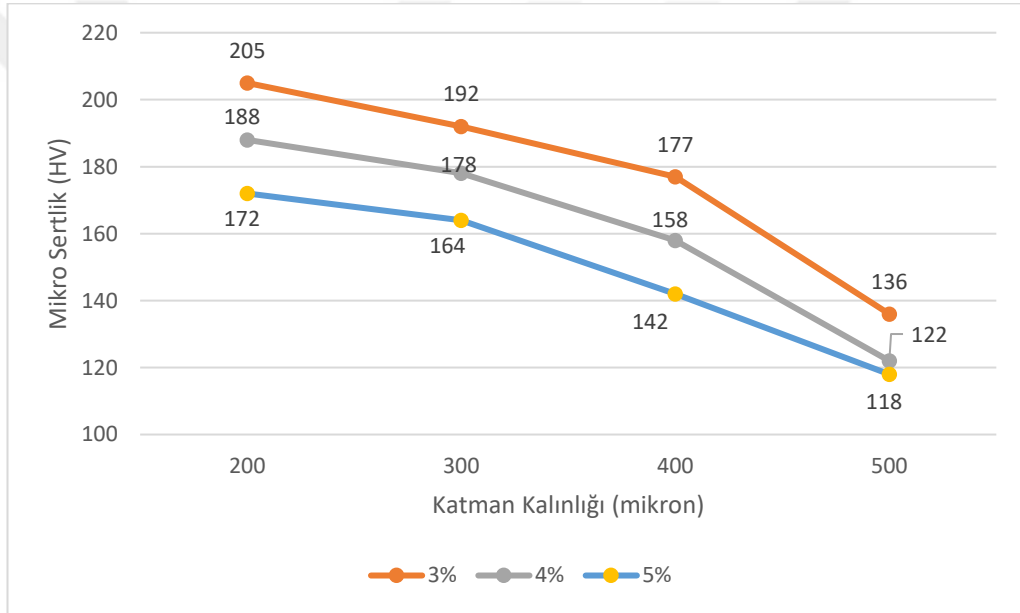
Numune kodu	Arşimet ölçümü	Helyum ölçümü
221	4,925	ÖLÇÜM YAPILAMAMIŞTIR
321	3,860	
421	4,614	
521	4,197	
231	4,425	
331	4,168	
431	4,561	
531	4,411	
241	4,773	
341	4,596	
441	4,423	
541	4,267	
251	4,349	
351	4,562	
451	4,181	
551	4,137	
222	4,300	
322	4,511	
422	4,588	
522	4,428	
232	4,452	
332	4,575	
432	4,608	
532	4,450	
242	4,778	
342	4,247	
442	4,488	
542	4,540	
252	4,504	
352	4,040	
452	4,500	
552	4,573	

Isıl işlem sonrası FA ile imal edilen numunelerin orta kısmında bronz kalıntısı olduğu için helyum piknometresi ile yoğunluk değerleri ölçülmemiştir. Bu numunelerin resimleri Şekil 5.2 ile yukarıda verilmiştir.

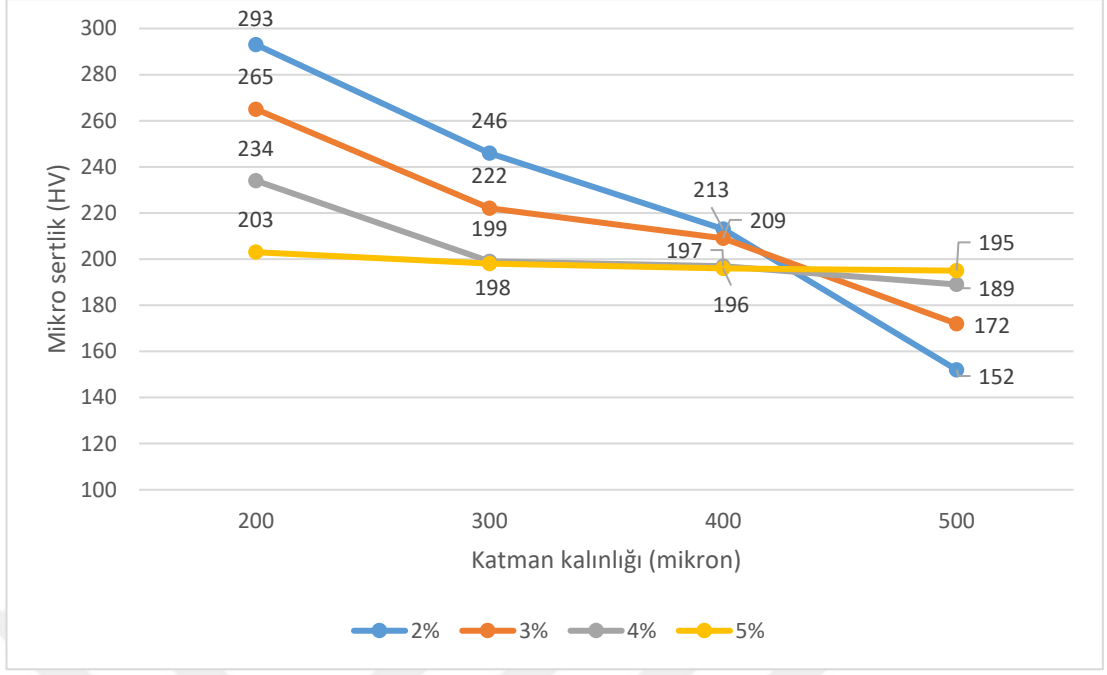
İmalat sonrası ham yoğunluk değerleri yüzde olarak % 50-65 aralığında değişmekte iken ısıl işlem sonrası bu değer % 70-90 aralığında olduğu görülmüştür. Yoğunluk değerleri literatürdeki değerlere benzer sonuçlar vermiştir (Chou vd., 2013).

5.2. Mikro Sertlik Sonuçları

Isıl işlem görmüş SLA ve FA reçineli numuneler zımparalama, parlatma ve bakalite alma işlemleri sonrasında mikro sertlik deneyine hazır hale gelmiştir. Numune üzerinde birbirinden farklı olacak şekilde 3 noktadan sertlik değeri alınmıştır. Daha sonra elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak ısıl işlem görmüş SLA ve FA reçineli numunelerin mikro sertlik değeri elde edilmiştir. Elde edilen SLA reçineli numunelerin mikro sertlik değerler Şekil 5.3 ve FA reçineli numunelerin mikro sertlik değerler Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. SLA reçineli numunelerin mikro sertlik değerleri (HV)

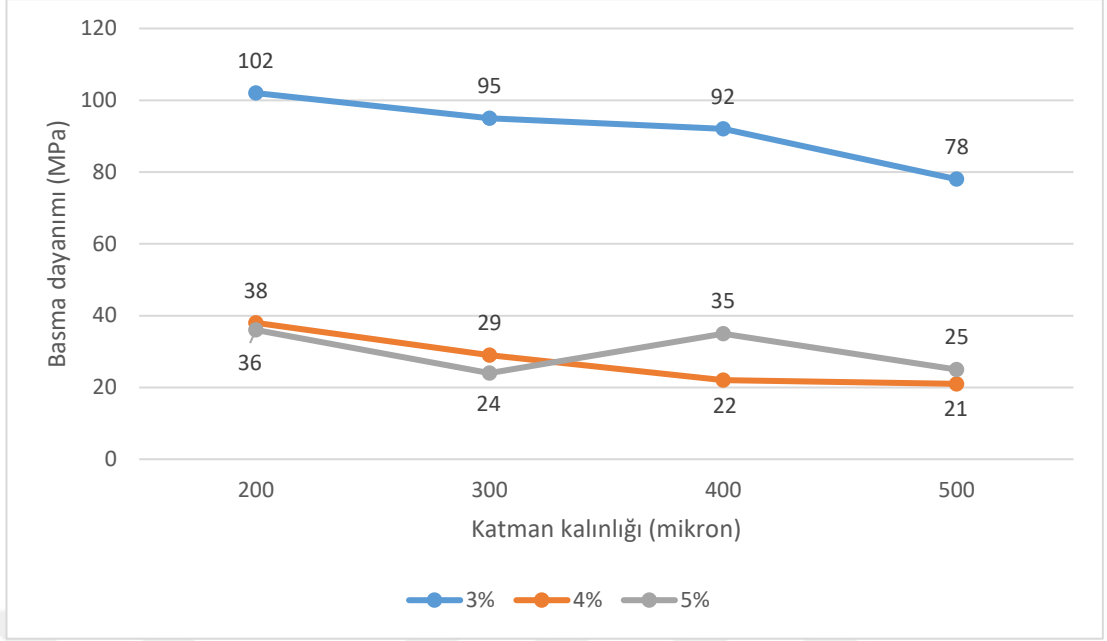


Şekil 5.4. FA reçineli numunelerin mikro sertlik değerleri (HV)

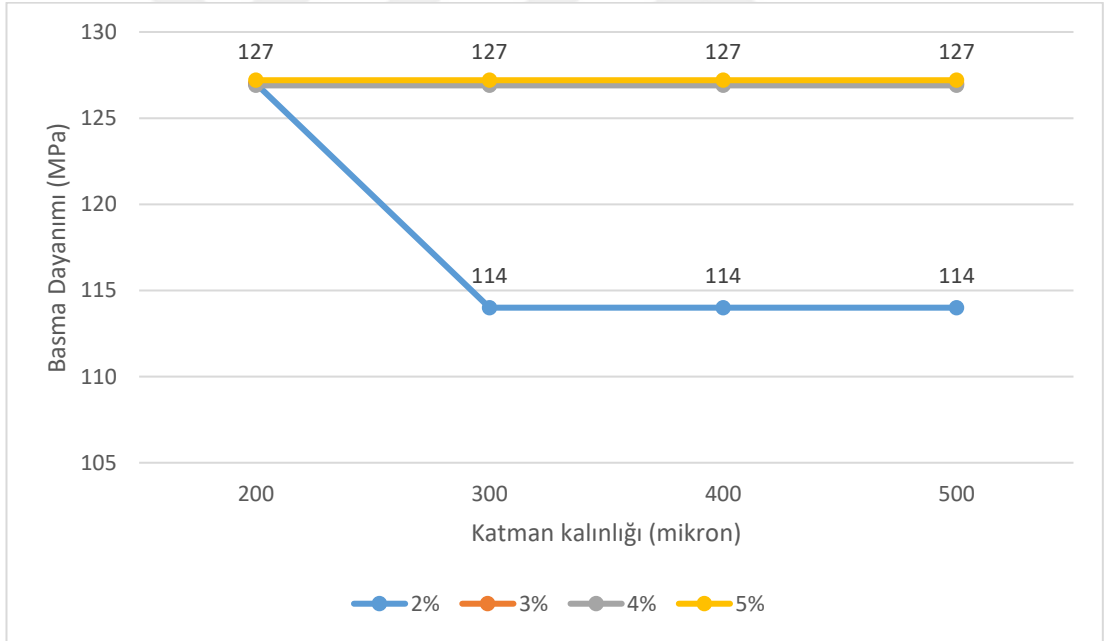
BPEİ yöntemiyle imal edilen numunelerin imal parametresi olan katman kalınlığı arttıkça mikro sertlik değeri azalmıştır. SLA reçineli numunelerin bağlayıcı yüzdesi arttıkça mikro sertlik değeri azalmıştır. FA reçineli numunelerde ise bağlayıcı yüzdesi katman kalınlığı arttıkça belirgin olarak azalmıştır. Ancak % 5 bağlayıcı yüzdesi ile imal edilen numunenin mikro sertlik değerinde katman kalınlığı arttıkça çok küçük miktarda azalma olduğu belirlenmiştir. Katman kalınlığı ile mikro sertlik değerleri arasında ters orantılı olacak şekilde katman kalınlığı arttıkça mikro sertlik değerleri azaldığı görülmüştür. Diğer katman kalınlıklarında belirgin azalma mevcut iken 500 mikron katman kalınlığındaki doğrusala yakın bir azalmaya sahip bu değerler hakkında herhangi bir yorum yapılamamıştır. Bağlayıcı yüzdesi düştükçe sertlikteki düşüş eğimi artmaktadır.

5.3. Basma Testi Sonuçları

Isıl işlem görmüş numuneler başka hiçbir işlem görmeden basma testi cihazında teste tabi tutulmuştur. Test cihazdan elde edilen sonuçlar, SLA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri Şekil 5.5 ve FA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri Şekil 5.6 ile verilmiştir.



Şekil 5.5. SLA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri



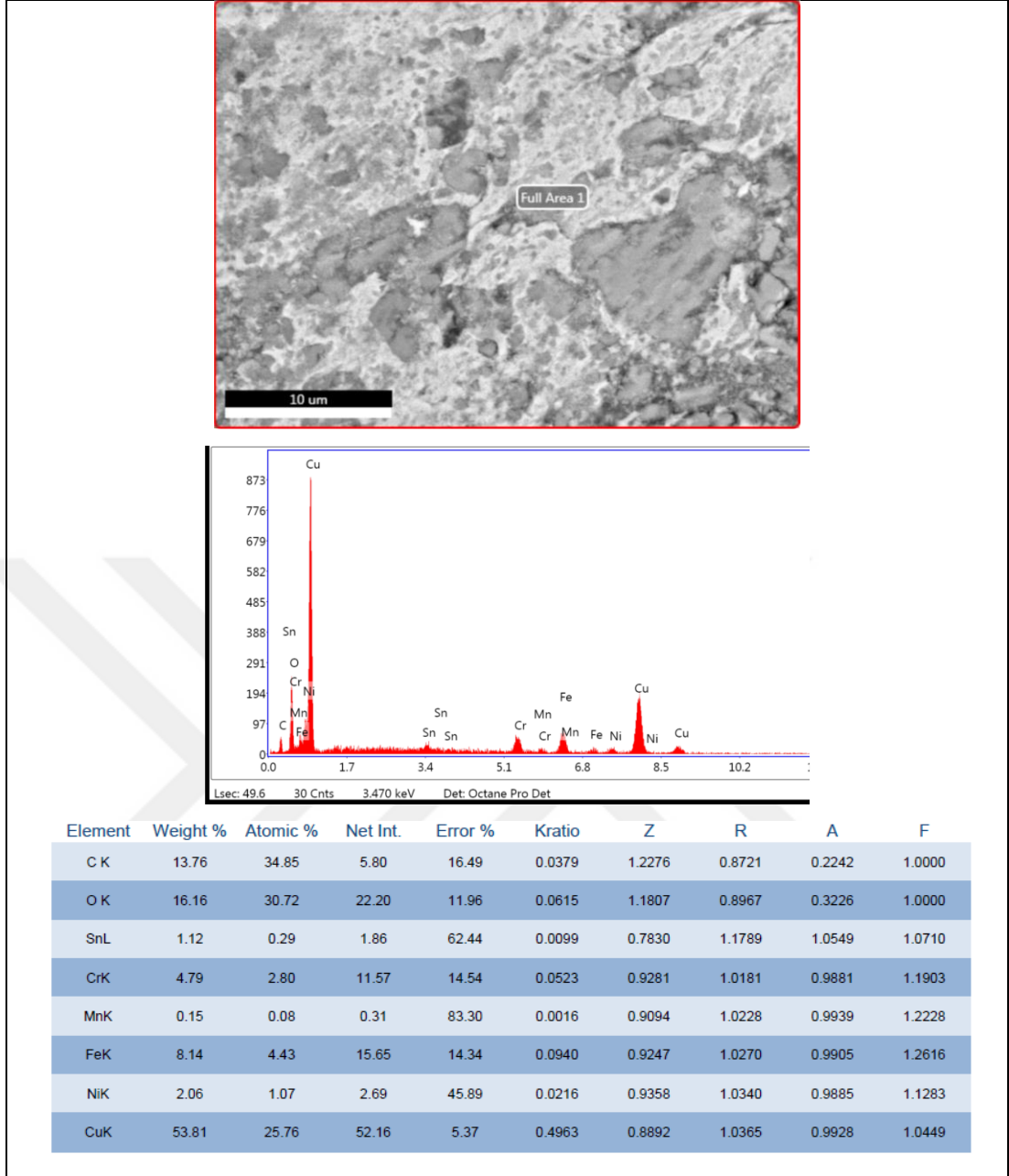
Şekil 5.6. FA reçineli numunelerin basma dayanım değerleri

SLA reçineli ısı işlem görmüş numunelerin basma dayanım değerleri incelendiği zaman katman kalınlığına bağlı olarak basma dayanımı azalmıştır. Ayrıca bağlayıcı yüzdesine göre de basma dayanımı azalmıştır.

Numunelere basma testi 10 kN'luk cihazlarda yapılmış olup FA reçineli numuneler basma dayanım değerleri cihazın maksimum değerinde çıkmıştır. Yalnızca % 2 bağlayıcı yüzdesinin basma dayanım değerleri diğerlerinden düşük çıkmıştır ve bu değer 114 MPa olarak bulunmuştur. FA reçine ile imal edilen numunelerin, infiltrasyon süreci sonucunda imalat parametrelerinden bağımsız olarak en az bu dayanımı göstereceği değerlendirilmektedir.

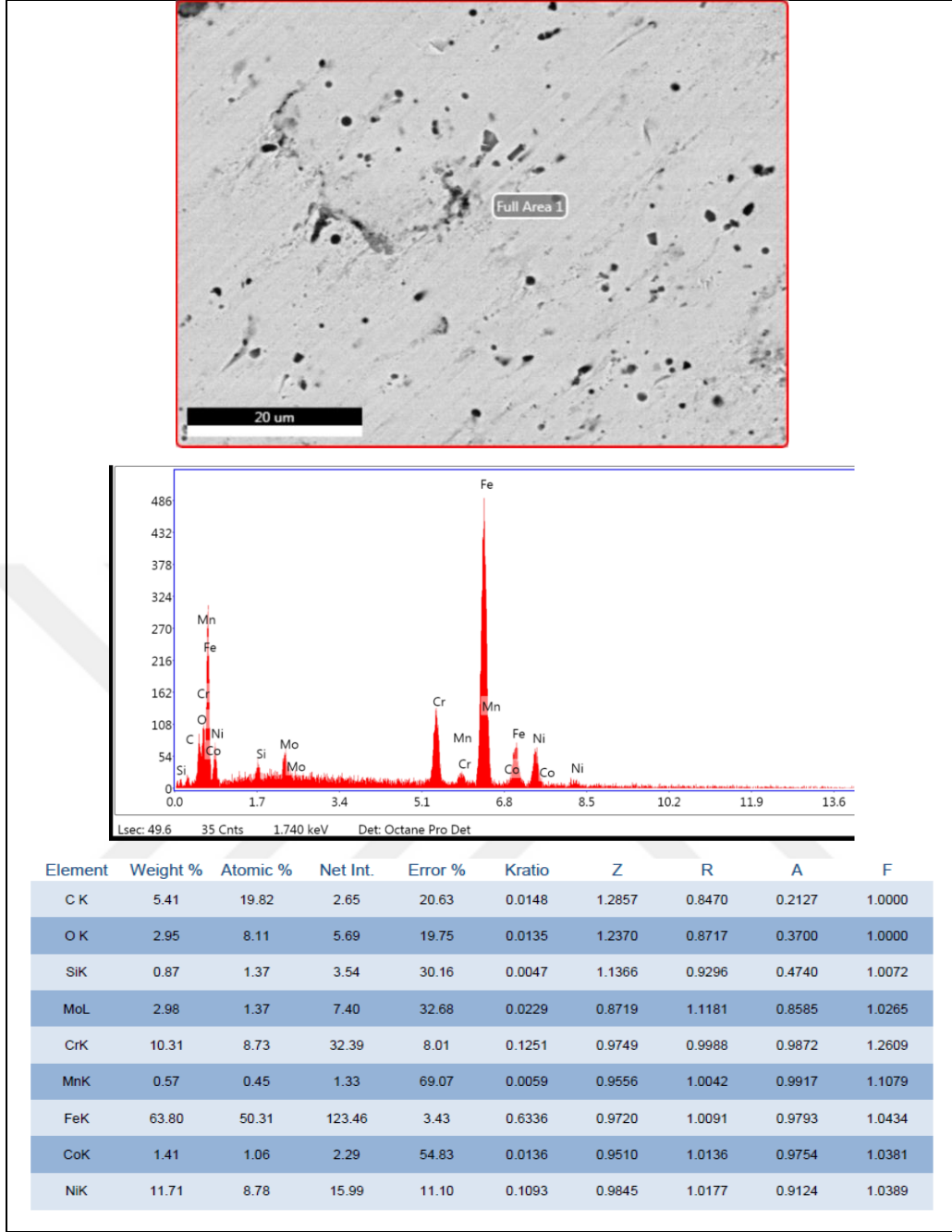
5.4. SEM Sonuçları

Hassas kesme cihazı ile kesilip bakalite alınan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile verilmiştir. Bakalite alınan numuneler öncelikle zımparalama işlemi uygulanmış olup daha kaliteli yüzey görüntüsü alınması için son olarak elmas solüsyon ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Burada SEM görüntüleri yorumlanması açısından EDS ile elementlerin analizi ile birlikte verilmiştir.



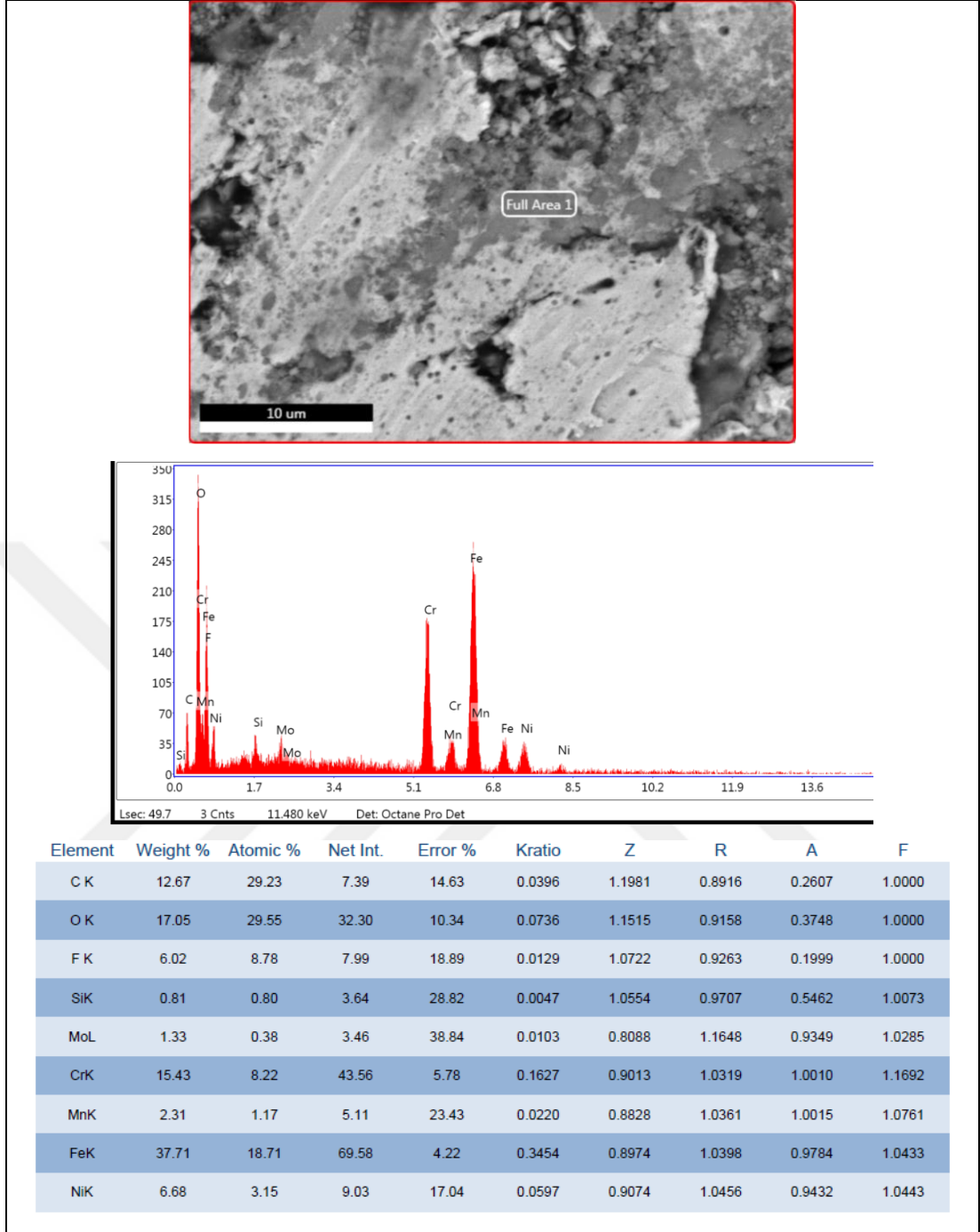
Şekil 5.7. 251 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi

200 mikron katman kalınlığı ve % 5 bağlayıcı yüzdesi (251) olan FA reçineli numune incelenmiştir. EDS analizi ve altındaki element bilgi tablosunda ağırlık olarak C, O ve Cu elementleri bulunan malzemenin alan görüntüsü koyu gri ve açık gri şeklindedir. Boşluk ya da gözenekli yapı belirgin olarak siyah renktedir. Boşluk görüntünün sebebi numune üzerinde piroliz olamayan bağlayıcının yanması sonucu malzemenin oluşturduğu sinterlenmemiş yapı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca Cu değerinin yüksek olması bu bölgede infiltrasyon işleminin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8. 521 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi

500 mikron katman kalınlığı ve % 2 bağlayıcı yüzdesi (521) olan FA reçineli numunede ağırlıkça Fe atomu fazla olup beyaza yakın bir görüntü vermektedir. Aradaki siyah noktalar boşluk olarak değerlendirilmekte olup koyu gri bölgeler ise element analizindeki değerinin düşük olması sebebiyle C ve O atomu olmasına bağlanmaktadır. Bu numunede Cu olmaması bu bölgede infiltrasyon gerçekleşmediği anlamına gelmektedir.



Şekil 5.9. 541 numunesinin SEM görüntüsü EDS analizi

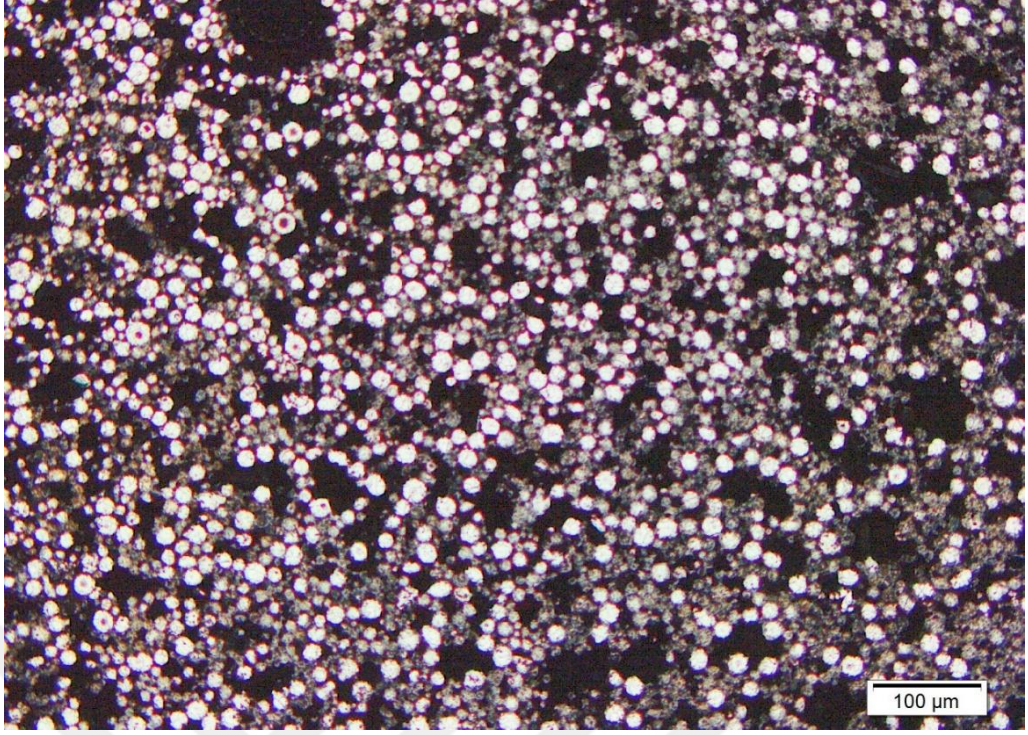
500 mikron katman kalınlığı ve % 40 bağlayıcı yüzdesi (541) olan SLA reçineli numune incelenmiştir. Fe ve Cr ağırlık yapıda ve C, O değerleri biraz yüksek olması sebebiyle görüntünün gri beyaz olduğu görülmektedir. Bu kısımdaki en temel problem ise siyah kısımların fazla oluşu ki boşluk yapının bu numunede fazla olduğunu göstermektedir.

251 ve 541 numunelerinde C atomunun yüksek çıkma sebebi olarak literatürde, bağlayıcının uçurulamaması gösterilmektedir (Do vd., 2018).

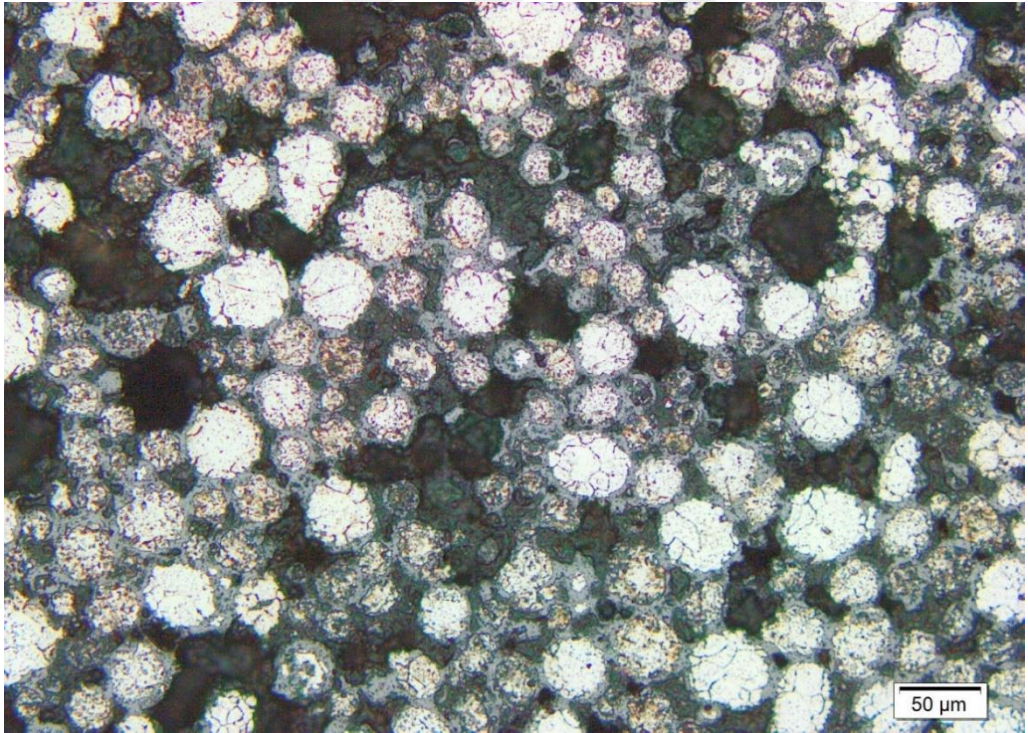
Diğer numuneler genel olarak bu üç numuneye benzer özellikler göstermekte olup örnek olması açısından bu numunelerin incelemesi yapılmıştır.

5.5. Optik Mikroskop Sonuçları

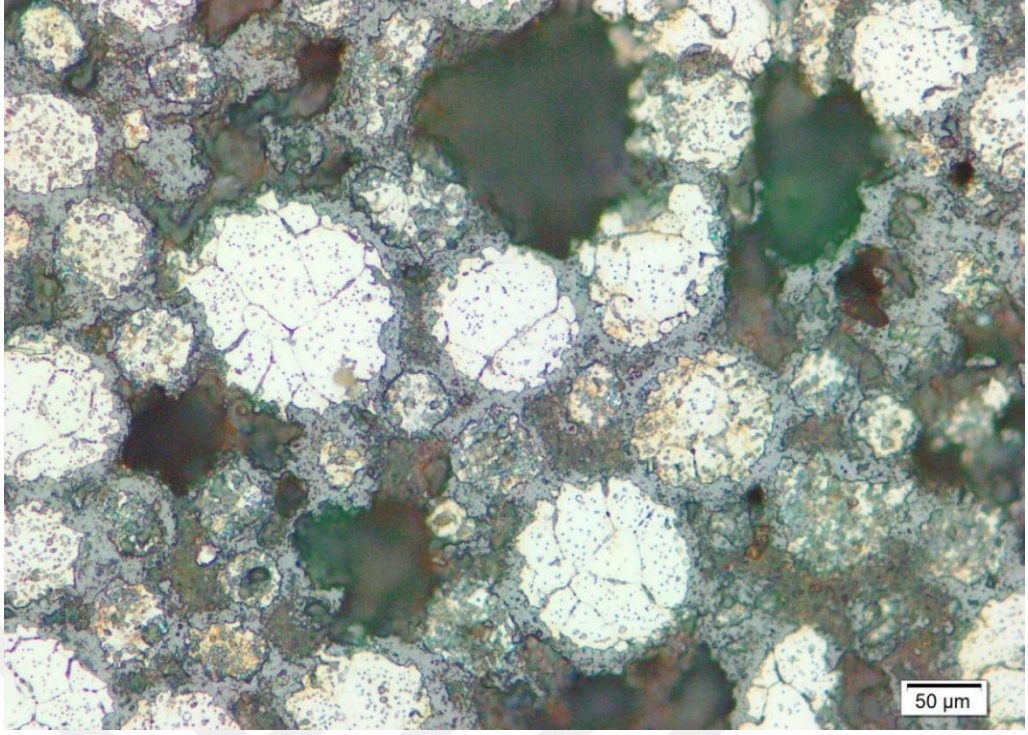
Aynı numuneden (500 mikron katman kalınlığı ve % 40 bağlayıcı yüzdesi (541)) alınan 5x optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.10, 20x optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.11, 50x optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.12 ve 100x optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.13 ile verilmiştir. Bu görüntülerde numunelerin yapısındaki elementlerin ayrımlarını ve boşluk yapısını gözlemleyebilmekteyiz. Bu görüntülerden Image J programı ile elde edilen SLA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi Çizelge 5.5, FA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi Çizelge 5.6 ile verilmiştir. Burada FA ile imal edilen numunelerin gözeneklilik yüzdesini daha düşük olması infiltrasyonun daha başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak bağlayıcının tam olarak uçurulamaması sebebiyle oluşan çatlaklar gözeneklilik yüzdesinin daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Cordero ve Elliot, yapmış oldukları çalışmada sinterlenmiş numunelerde % 33, infiltre numunelerde % 2 gözeneklilik yüzdesi elde etmişlerdir (Cordero ve Elliot,2016).



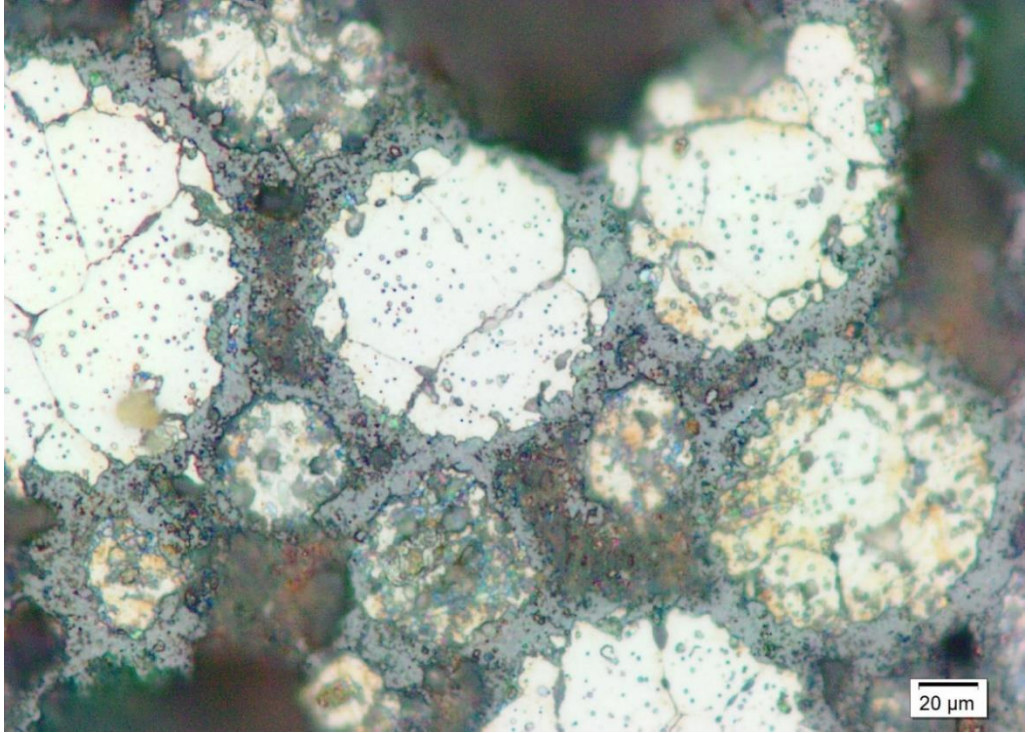
Şekil 5.10. 541 numunesinin 5x optik görüntüsü



Şekil 5.11. 541 numunesinin 20x optik görüntüsü



Şekil 5.12. 541 numunesinin 50x optik görüntüsü



Şekil 5.13. 541 numunesinin 100x optik görüntüsü

Çizelge 5.5. SLA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi

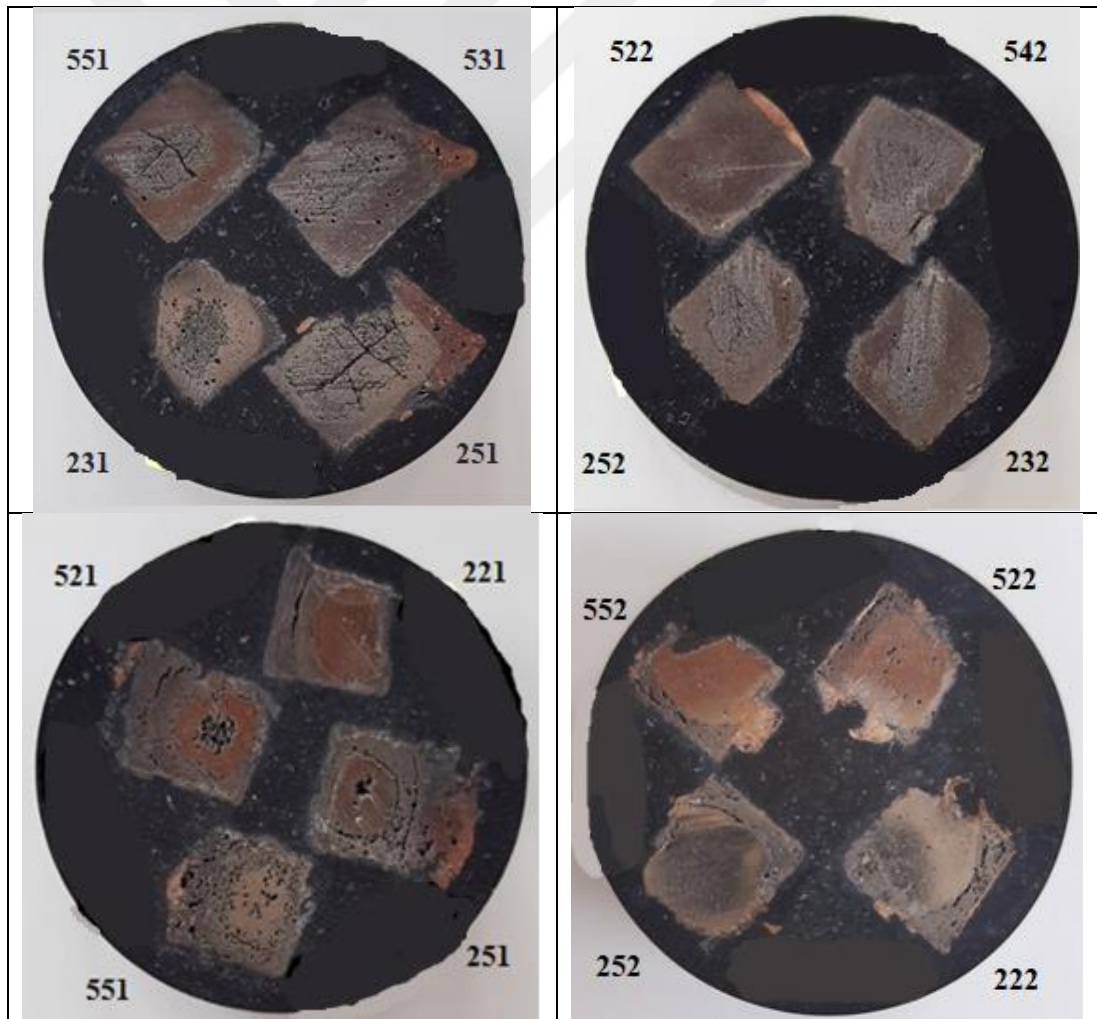
Katman kalınlığı (mikron)	Bağlayıcı yüzdesi (%)	Gözeneklilik yüzdesi (%)	Numune kodu
200	3	32	321
	4	28	421
	5	27	521
300	3	31	331
	4	32	431
	5	28	531
400	3	35	341
	4	39	441
	5	38	541
500	3	35	351
	4	40	451
	5	39	551

Çizelge 5.6. FA reçineli numunelerin gözeneklilik yüzdesi

Katman kalınlığı (mikron)	Bağlayıcı yüzdesi (%)	Gözeneklilik yüzdesi (%)	Numune kodu
200	2	7	221
	3	41	321
	4	26	421
	5	41	521
300	2	31	231
	3	25	331
	4	26	431
	5	29	531
400	2	28	241
	3	39	341
	4	32	441
	5	45	541
500	2	32	251
	3	38	351
	4	40	451
	5	36	551

5.6. Numunelerin Resimleri

Bakalite alınmış numunelerin resimleri Şekil 5.14 ile verilmiştir. Burada üstteki numuneler SLA reçine ile imal edilmiş, alttaki numuneler ise FA reçine ile edilmiş numunelerdir. Birinci imalattaki numunelerde makro çatlaklar ve gözeneklilik gözle görülür şekildedir. İkinci imalattaki numunelerde ise daha kaliteli bir imalat sonucu görülmektedir. SLA reçineli numunelerin merkezlerinde piroliz olma sorunu olmuş çeperlerde kaliteli bir yapı elde edilmiştir. FA reçineli numunelerde merkezde kaliteli bir yapı oluşmuşken çeperlerde piroliz olma sorunuyla karşılaşılmıştır. SLA ve FA reçine imalatları karşılaştırıldığı zaman FA reçine ile imal edilen numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Numunelerin resimleri Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 ile verilmiştir.



Şekil 5.14. Bakalite alınmış numunelerin görüntüsü



Şekil 5.15. SLA reçineli numuneler I. serinin resimleri



Şekil 5.16. SLA reçineli numuneler II. serinin resimleri



Şekil 5.17. FA reçineli numuneler I. serinin resimleri



Şekil 5.18. FA reçineli numuneler II. seri resimleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat, Eİ teknolojileri içinde yeni olup gelişmeye açık imalat yöntemidir. İmalat hızı ve maliyet olarak diğer yöntemlerden daha tercih edilir olacağı öngörülmektedir. Bu yöntemin gelişmesi ise imalat parametrelerinde en uygun değerlerin elde edilmesiyle olacaktır.

Literatür taramaları incelendiği zaman görülüyor ki bir numunenin dayanımı üzerinde yoğunluk, bağlayıcı yüzdesi, bağlayıcı doyma parametresi, katman kalınlığı gibi birçok parametreler etkili olmaktadır (Miyanji vd., 2019). Bu tez çalışması ile infiltrasyon işlemi sonucunda bağlayıcı yüzdesi ve katman kalınlığı parametrelerinin numune imalatına etkileri incelendi.

Numunelerin iç kesitleri incelendiği zaman SLA reçinenin tam olarak piroliz olmaması ve merkezi bölgelerde atık olarak kalması sebebiyle imal edilmiş bazı numunelerin merkezinde sinterlenmemiş metal toz malzeme kaldığı ve buna bağlı olarak makro çatlaklar olduğu görülmektedir. Dış çeperde ise sinterlenme kalitesi nispeten daha iyi görülmektedir. FA reçine ile imal edilmiş numunelerde ise merkezi sinterlenme daha başarılı iken dış çeperlerde daha zayıf bir sinterlenme kalitesi vardır. Bu da sinterleme ve infiltrasyon süresinin bu bağlayıcı için biraz daha uzun tutulması ve daha yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanması gerektiğini göstermektedir.

Numunelerin yoğunluk değerlerinin tam yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi açısından; imalat sırasında tozun daha fazla sıkıştırılması, bağlayıcı oranının azaltılması ve ısıl işlem süresinin artırılması ve sıcaklık değerinin yükseltilmesi gibi işlemler olumlu sonuç verecektir.

SLA reçine ve FA için mikro sertlik deneyi sonuçları katman kalınlığı parametresine göre incelendiği zaman katman kalınlığı arttıkça sertlik değerleri düşmekte olup literatürle uyumlu sonuç vermektedir. Bağlayıcı yüzdesi arttıkça da sertlik değerleri düşmektedir. Ancak FA, 500 mikron katman kalınlığında bu durum değişiklik

göstermektedir. Aynı katman kalınlığında diğerkatmanlarda sertlik değerleri belirgin olarak düşerken bu katmanda sertlik değerleri çok az bir oranda düşmüştür.

Basma dayanımı değerleri açısından incelendiği zaman SLA reçineli numunelerin sertlik değerleri literatür ile benzer şekilde paralel sonuçlar vermiştir. Yani hem katman kalınlığı hem de bağlayıcı yüzdesi parametrelerinde, katman kalınlığı ve bağlayıcı yüzdesi arttıkça test değerleri düşmüştür. Bağlayıcı yüzdesine bağlı değerlerde %30'dan sonra aşırı bir azalma görülmüş olup daha başarılı sonuçlar elde etmek için SLA reçinesinin daha düşük bağlayıcı oranlarında deneylerin tekrar edilmesi gerekmektedir. FA reçineli numuneler için test cihazından kaynaklı olarak değerler tam olarak karşılaştırmaya müsait değildir. Eldeki verilerden çıkan sonuç; FA reçine ile imal edilen numunelerin daha yüksek basma dayanımı göstermiş olup 1200°C'den daha yüksek sıcaklık değerlerinde infiltrasyon işlemiyle daha başarılı sonuçlar elde edileceğini göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıkta infiltrasyon deneylerinin yapılması önerilmektedir.

Her iki bağlayıcı için SEM ve EDS sonuçları incelendiğinde infiltrasyon işlemi başarılı sonuç verdiği görülmektedir. İnfiltrasyon malzemesi olarak seçilen bronz tozu; Cu ve Sn elementlerinden meydana gelmektedir. Numunelerin iç bölgelerinde Cu ve Sn elementlerinin görülmesi infiltrasyon sürecinin başarılı olduğunu göstermektedir. SEM görüntülerinde, numunelerin iç kesiminde gözenek ve mikro çatlakların var olduğu görülmektedir. EDS değerleri incelendiğinde infiltrasyon gerçekleşmemiş noktalardan alınan element analizi değerlerinden elde edilen sonuçlar toz malzeme için verilen yüzde elementel değerler ile benzerlik göstermektedir. Bazı numunelerde yüksek çıkan C ve O değerleri ise bir miktar oksidasyon olduğunu göstermektedir.

SLA ve FA reçineli numunelerin sonuçları genel anlamda karşılaştırıldığı FA reçineli numunelerin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. FA reçineli numuneler daha yüksek sıcaklık daha uzun süreli ısıl işlem süreci sonucunda daha yüksek bir infiltrasyon başarısı ile daha iyi bir iç yapı görüntüsü ve daha yüksek dayanım sonuçları elde edilecektir.

Yapılan testler bazında incelendiği zaman istisna değerleri sayılmazsa hem mikro sertlik hem de basma testi sonuçlarının birbirine paralel sonuçlar vermiş olduğu görülmektedir. Bunun için bağlayıcı yüzdesinin farklı değerleri ve daha yüksek sıcaklık değerlerinde ayrıca bir çalışmalar yapmak gerekmektedir. Bağlayıcı yüzdesi azaltılarak bu deneylerin sonucu tekrar incelenmesi ve başarılı parametrelerin belirlenmesi önerilmektedir.

SLA reçineli numunelerde FA reçineli numunelere benzer olarak boyut değişimi sebebiyle piroliz olma süresi yetersiz geldiği sonucuna varılmıştır. Numunelerin orta kısmında Şekil 5.2’de görülen bronz kalıntıları oluşması nedeniyle de infiltrasyon süresinin yetersiz geldiği şeklinde değerlendirilmiştir.

Literatürde karşılaşılan tek boyutta gerçekleşen artış, bu çalışmada eksenel ve radyal yönde olmak üzere iki boyutta gerçekleşmiştir (Cordero ve Elliot, 2016). Hem SLA reçineli numunelerde hem de FA reçineli numunelerde bağlayıcıların tamamen piroliz olmaması sebebiyle bu artış meydana gelmiştir. Bu sebeple fırınlama şartları ve süreleri tekrardan gözden geçirilmesi gerekmektedir. Isıl işlem süreleri artırılarak bağlayıcıların tamamen piroliz olması sağlanmalıdır. İnfiltrasyon sürecinde ergiyen bronz malzemenin numune etrafına birikmesi sorununun, sıcaklık değerinin 1200 °C’den yüksek sıcaklıklara çıkarılması ve süresinin uzatılması ile çözülmesi beklenmektedir.

Numunelerin tam yoğunluğa sahip olacak şekilde imal edilmesi için numune imalatı sırasında toz malzemenin iyi sıkıştırılması, bağlayıcı oranının azaltılması ve ısıl işlemi süresinin ve sıcaklık değerinin artırılması ile tam yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde edilebilecektir.

En iyi sonuçlar % 30 SLA-% 70 IPA bağlayıcı yüzdesinde elde edilmiştir. Diğer bağlayıcı yüzdeslerinde daha düşük dayanım değerleri elde edilmesi seçilen bağlayıcı yüzdesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Daha iyi sonuçlar elde edilmesi için daha düşük bağlayıcı yüzdesleri ile deneyin tekrar edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Agarwala, M.K., Jamalabad, V.R., Langrana, N.A., Safari, A., Whalen, P.J., Danforth, S.C., 1996, Structural quality of parts processed by fused deposition. Rapid Prototyp J 1996, 2(4):4–19.
- Ahn, S.H., Lee, C.S., Jeong, W., 2004, Development of translucent FDM parts by post-processing. Rapid Prototyp J 10(4):218-224.
- Alserteknik, 2019. Erişim tarihi : 08.10.2019. <https://www.alserteknik.com/kamara-f%C4%B1nlar>
- Arcam-EBM, 2019, Erişim tarihi :10.06.2019. <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
- Bai, Y., Wagner, G., Williams, C. B., 2017, Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals, Journal of Manufacturing Science and Engineering 139(8)
- Bai, Y., Williams, C.B., 2015, An exploration of binder jetting of copper, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 No. 2, pp. 177–185.
- Bailey, A., Merriman, A., Elliott, A., Basti, M., 2016, Preliminary testing of nanoparticle effectiveness in binder jetting applications, 27th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. 2016, pp. 1069–1077.
- Bak, D., 2003, Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter, Assem Autom, 23(4):340–5.
- Bian, W., Li, D., Lian, Q., Li, X., Zhang, W., Wang, K., 2012, Fabrication of a bioinspired beta-tricalcium phosphate/collagen scaffold based on ceramic stereolithography and gel casting for osteochondral tissue engineering. Rapid Prototyp J, 18(1):68–80.
- Bourell, A., Kruth, J.P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A.M., Clare, A., 2017, Materials for additive manufacturing, CIRP Annals - Manufacturing Technology 66, 659–681

- Brit, J.A.O., Escudero, M.D.E., Somonte, M.D., 2016, Additive manufacturing opportunities to optimize product design: oportunidades de la fabricaci'ón aditiva para optimizar el dise~no de productos, Dyna Ingenieria e Industria, vol. 91, no. 3, pp. 263–271.
- Calignano, F., Mandfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L., Fino, P., 2013, Influence of Process Parameters On Surface Roughness Of Aluminum Parts Produced By DMLS. *Int. J Adv Manufacturing Technoloji.* 67, 2743-2751.
- Celik, İ, Karakoc, F., Cakır, M.C., Duysak, A., 2013, Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31
- Chen, Y., Zhou, C., Lao, J., 2011, A layerless additive manufacturing process based on cnc accumulation. *Rapid Prototyp J*;17(3):218–27.
- Chou, D.T., Wells, D., Hong, D., Lee, B., Kuhn, H., Kumta, P.N., 2013, Novel processing of iron-manganese alloy-based biomaterials by inkjet 3-D printing, *Acta Biomaterialia, Acta Materialia Inc.*, Vol. 9 No. 10, pp. 8593–8603.
- Chua, C.K., Chou, S.M., Wong, T.S., 1998, A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies, *Int J Adv Manuf Tech*, 14(2): Pp 146-152.
- Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010, *Rapid prototyping principles and applications*, World scientific publishing co.Pte.Ltd., 3 edition.
- Cordero, Z., Elliott, A., 2016, Collaboration for the advancement of indirect 3d printing technology, *Advanced Manufacturing Office Energy and Transportation Science Division*
- Cordero, Z., Siddel, D.H., Peter, W.H., Elliott, A.M., 2017, Strengthening of ferrous binder jet 3D printed components through bronze infiltration, *Addit. Manuf.* 15, 87–92.
- Custompart.net, 2019, Erişim tarihi:22.06.2019.
<https://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

- Do, T., Bauder, T.J., Suen, H., Rego, K., Yeom, J., Kwon, P., 2018, Additively manufactured full-density stainless steel 316l with binder jet printing, MSEC2018 June 18-22, 2018, College Station, TX, USA.
- Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W., Schull, K., 2015, Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420 + bronze parts, *Procedia Manufacturing* Volume 1, 2015, Pages 251–262
- Elliott, A., Al Salihi, S., Merriman, A., Basti, M., 2016, Infiltration of nanoparticles into porous binder jet printed parts, *Am.J.Eng.Appl.Sci.*9.
- Formlabs, 2019, Erişim tarihi: 22.06.19. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- Friel, R.J., 2015, Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidating of materials, Woodhead publishing, p:313-335.
- Frykholm, R., Takeda, Y., Andersson, B.G., Carlstrom, R., 2016, Solid state sintered 3-D printing component by using inkjet (binder) method, *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metal.* 63, 421-426.
- Gao, W., Zhanga, Y., Ramanujana, D., Ramanian, K., Chenc, Y., Williams, C.B., Wange, C.C.L., Shin, Y.C., Zhanga, S., Zavattieri, P.D., 2015, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* 69, 65–89.
- Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010, *Additive Manufacturing Technologies*. Springer. pp 238-257
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2010, Photopolymerization Processes. In: *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, Boston, MA, pp 78-119
- Grenda, E., 2009, *Printing the future the 3d printing and rapid prototyping source book*, 3. Baskı.
- Grimm, T.A., 2010, *3D printer benchmark:North american edition*, T.A. Grimm&Associates,Inc., June 2010.

Hopkinson, N., Hague, R., Dickens, P., 2006, Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age. John Wiley & Sons.

Igi-global.com, 2019, Erişim tarihi :22.06.2019. <https://www.igi-global.com/chapter/additive-manufacturing-process-and-their-applications-for-green-technology/216704>

Inaekyan, K., Paserin, V., Poujol, I., Brailovski, V., 2016, Binder-jetting additive manufacturing with water atomized iron powders, Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials in Boston, USA.

Insstek, 2019, Erişim tarihi: 10.06.2019. <http://www.insstek.com/>

Janaki Ram, G.D., Johnson, D.H., Stacker, B.E., 2007, Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Virtual and Rapid Manufacturing Advanced Research Virtual and Rapid Prototyping pp. 603-610.

Jimenez, M., Porras, J., Dominguez, I.A., Romero, L., Espinosa, M.M., 2013, La fabricaci'ón aditiva. La evidencia de una necesidad, Interempresas IndustriaMetalmeccanica, vol. 235, no. 1047, pp. 74–82.

Karunakaran, K., Bernard, A., Suryakumar, S., Dembinski, L., Taillandier, G., 2012, Rapid manufacturing of metallic objects. Rapid Prototyp J ;18(4):264–280.

Krar, S., Gill, A., 2003, Exploring advanced manufacturing technologies, Industrial press, 1. Edition, New York, unit 7-2-1.

Kumar, S., Kruth, J.P., 2007, Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts, Materials and Design 28, 400–407.

Lee, J.Y., An, J., Chua, C.K., 2017, Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, Applied Materials Today 7, 120–133.

Loughborough University, 2019, Erişim tarihi: 20.06.2019. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/>

Mavi Yazıcı SHS, 2019, Erişim tarihi: 20.06.2019.

<https://3dprintingindustry.com/news/new-m3-blueprinter-features-shs-printing-technology-50412/>

Miyanaji, H., Momenzadeh, N., Yang, L., 2019, Effect of powder characteristics on parts fabricated via binder jetting process, Rapid Prototyping Journal, Vol. 25 Issue: 2, pp.332-342

Mumtaz, K., Vora, P., Hopkinson, N., 2011, A Method To Eliminate Anchors/Supports From Directly Laser Melted Metal Powder Bed Processes, Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 55–64.

Mostafaei, A., Toman, J., Stevens, E.L., Hughes, E.T., Krimer, Y.L., Chmielus, M., 2017, Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas- and water-atomized alloy 625 powders, Acta Materialia 124, 280-289.

Nanokar, 2019. Erişim Tarihi:23.06.2019. <https://www.nanokar.com/incele/Bronz-Tozu-263.html>

Odtü, 2019. Erişim Tarihi:23.06.2019. <https://merlab.metu.edu.tr/tr/helyum-piknometresi>

Ottvad, T., Kagerer, M., Irlinger, F., Lueth, T.C., 2012. Modification and further development of a drop on demand printhead for wax enabling future 3D printing and rapid prototyping, in: 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Presented at the 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 117–122.

Properkimya, 2019. Erişim Tarihi:23.06.2019.

<http://www.properkimya.com/makaleler/detaylar/izopropil-alkol-nedir-nerede-kullanilir-teknik-ozellikleri.html>

Pubchem, 2019. Erişim Tarihi:23.06.2019.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Furfuryl-alcohol>

Romero, L., Jiménez, M., Dominguez, I.A., Espinosa, M.M., Dominguez, M., 2019, Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. Hindawi Complexity Volume 2019, Article ID 9656938, 30 pages.

Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R. , Babu, S. S., 2016, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, International Materials Reviews, 61:5, 315-360.

SLM Solutions Material data sheet SS 316L, 2019. Erişim Tarihi: 30.05.2019. https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_FE-Alloy_316L_0219.pdf

Sun, L., Kim, Y.H., Kwon, P., 2009, Densification and properties of 420 stainless steel produced by three-dimensional printing with addition of Si₃N₄ powder, J. Manuf. Sci. Eng. 131.

Tnjchem, 2019, Erişim Tarihi:23.06.2019. http://tr.tnjchem.com/p-toluene-sulfonic-acid_sp_6

Utela, B.R., Storti, D., Anderson, R.L., Ganter, M., 2010, Development process for custom three dimensional printing (3dp) material systems, Journal of Manufacturing Science and Engineering, February 2010, Vol. 132 / 011008-1

Vaezi, M., Chua, C.K., 2011, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, Int J Adv Manuf Technol 53, 275–284.

Verlee, B., Dormal, T., Lecomte-Beckers, J., 2011, Properties of Sintered Parts Shaped by 3D-Printing from Bimodal 316L Stainless Steel Powder Mixtures, Euro PM 2011, pp. 357–362.

Verlee, B., Dormal, T., Lecomte-Beckers, J., 2012, Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing, Powder Metallurgy, vol. 55, pp. 260-267.

Wong, K.V., Hernandez, A., 2012, A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mechanical Engineering Volume 2012, Article ID 208760, 10 pages.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özden KOR

Doğum Yeri ve Yılı : Mut/MERSİN 1980

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ozdenkor80@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Mersin Anadolu Meslek Lisesi, 1998

Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü, 2016

Yayımları