

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNDER JETTING TİPİ 3 BOYUTLU YAZICILARDA YAPIŞTIRICI  
TİPİNİN ÜRÜNÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emrecan MAKARAÇ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIMI VE İMALATI**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Osman İYİBİLGİN**

**Ağustos 2021**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNDER JETTING TİPİ 3 BOYUTLU YAZICILARDA YAPIŞTIRICI  
TİPİNİN ÜRÜNÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrecan MAKARAÇ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIMI VE İMALATI

Bu tez 04/08/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Emrecañ MAKARAÇ

04.08.2021

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Osman İYİBİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Fen edebiyat fakültesi kimya bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Mahmut ÖZACAR'a ve Biyoenams araştırma grubuna, numune üretimi konusundaki yardımlarından dolayı Arş. Grv. Engin GEPEK'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmamı maddi olarak destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-044) teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLOLAR LİSTESİ .....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY .....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Binder Jetting Teknolojisi ile Eklemeli imalat.....	4
2.1.1. Binder jetting teknolojisinin diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre avantajları .....	4
2.1.2. Binder jetting yönteminin dezavantajları .....	6
2.2. Binder Jetting Teknolojisi İle İmalat Süreci.....	6
2.2.1. Baskı süreci .....	6
2.2.2. Sertleştirme (kurutma) ve toz arındırma süreci .....	8
2.2.3. Mekanik özelliklerin iyileştirilme süreci.....	9
2.2.4. Yüzey kalitesinin iyileştirilme süreci .....	11
2.3. BJ Teknolojisi ile Üretimde Kullanılan Malzeme Grupları .....	11
2.3.1. Seramikler.....	11
2.3.2. Metaller.....	12

2.3.3. Biyomalzemeler .....	14
2.3.4. Polimerler .....	14
2.3.5. Kompozitler .....	15
2.4. Binder Jetting Teknolojisinde Üretime Etki Eden Faktörler .....	18
2.4.1. Toz metalurjisi .....	19
2.4.1.1. Toz şekli .....	19
2.4.1.2. Toz boyutu .....	19
2.4.1.3. Toz paketleme yoğunluğu .....	20
2.4.1.4. Toz akış yeteneği .....	20
2.4.1.5. Tozun ıslanabilirlik kabiliyeti .....	21
2.4.2. Bağlayıcı .....	21
2.4.2.1. Püskürtülen bağlayıcı miktarı .....	22
2.4.2.2. Bağlayıcının püskürtülebilme kabiliyeti .....	22
2.4.2.3. Baskı kafası türleri ve damla oluşumu .....	24
2.4.2.4. Damlacık aralığı / satır aralığı .....	28
2.4.2.5. Hibrit bağlayıcı kullanımı .....	29
2.4.2.6. Bağlayıcı ve toz yatağı arasındaki etkileşim .....	31
2.4.3. Baskı parametreleri .....	34
2.4.3.1. Katman kalınlığı .....	34
2.4.3.2. Toz yayma ve baskı hızı .....	36
2.4.3.3. Bağlayıcı doygunluğu .....	40
2.4.3.4. Kuruma süresi ve ısıtıcı güç oranı .....	45
2.4.3.5. Baskı yönü .....	48
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	51
3.1. Giriş .....	51
3.2. Modelleme .....	51
3.2.1. CAD modelinin oluşturulması .....	52
3.2.2. STL dosyasının oluşturulması .....	52
3.3. BJ Yöntemi için Malzeme Hazırlama .....	52
3.3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler .....	53

3.3.2. Eleme .....	53
3.3.3. Karıştırma .....	54
3.3.4. Toz boyutu analizi.....	55
3.3.5. Toz malzemenin akışkanlığının teorik olarak hesaplanması .....	56
3.4. Bağlayıcı Türleri .....	57
3.4.1. Toz halinde ilave edilen bağlayıcılar .....	58
3.4.1.1. PVA .....	58
3.4.1.2. Akrilik .....	58
3.4.2. Sıvı bağlayıcılar .....	58
3.4.2.1. ZB10.....	59
3.4.2.2. HP 45 mürekkep.....	59
3.5. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi .....	59
3.5.1. Katman kalınlığı .....	59
3.5.2. Bağlayıcı miktarı (doğunluğu).....	60
3.5.3. Bağlayıcı sıcaklığının ayarlanması.....	60
3.5.4. Toz serme hızı.....	60
3.5.5. Numune oryantasyonu (numunenin yerleşimi) .....	61
3.6. Numune Üretimi.....	61
3.7. Numunenin Temizlenmesi.....	62
3.8. Ön Sinterleme.....	63
3.9. Analiz ve Testler .....	63
3.9.1. Yoğunluk analizi .....	63
3.9.2. Porozite analizi .....	64
3.9.3. Optik Görüntü Analizi .....	64
3.9.4. Basma testi.....	65

#### BÖLÜM 4.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	66
4.1. Genel Sonuçlar .....	66
4.2. Yüzey Kalitesi ve Geometrik Doğruluk Değerlendirmesi .....	67
4.3. Yoğunluk .....	68
4.4. Porozite .....	68

4.5. Optik Görüntü Analizi.....	69
4.6. Basma Testi sonuçları.....	70
4.7. Değerlendirme.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ .....	87



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AM	: Eklemeli İmalat
BJ	: Binder jetting
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DOD	: Drop on Demand
GRIN	: Gradnyan İndeks
HA	: Hidroksiapatit
HIP	: Sıcak İzolastik Presleme
HSS	: Yüksek hızlı sinterleme
LLC	: Lokal Kompozisyon Kontrolü
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
Oh	: Ohnesorge
PBF	: Powder Bed Fusion
PCL	: Polikaprolakton
PEO	: Polietilen oksit
PGA	: Poliglikolik asit
PLS	: Poliaktik asit
PMM	: Polimetil matematik akrilate
PR	: Paketleme oranı
PVA	: Polivinil alkol
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SJ	: Solvent Jetting
STL	: Stereolitografi
V	: Akış hızı (m/s)
$V_o$	: Serbest olarak bulunan tozun görünür hacmi
$V_f$	: Bir süre titreştirilen tozun görünen hacmi
X	: Bağlayıcı damlacıkları arasındaki mesafe ( $\mu\text{m}$ )

XRD	: X-Işını Difraksiyonu
Y	: Bağlayıcı damlacıkları arasındaki mesafe ( $\mu\text{m}$ )
Z	: Katman kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
3DP	: 3D Printer
$\rho$	: Sıvının yoğunluğu ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )
$\eta$	: Dinamik viskozitesi 2 olan sıvı ( $\text{Ns} / \text{m}$ )
$\gamma$	: Yüzey gerilimi ( $\text{N} / \text{m}$ )
$\rho_s$	: Hidroksiapatit karışımlarının hesaplanan teorik yoğunluğu

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. BJ yöntemiyle numune üretim süreci. ....	7
Şekil 2.2. BJ yöntemiyle parça üretim sürecinin ve ikincil işlemlerin şematik gösterimi. ....	10
Şekil 2.3. BJ yöntemiyle üretilen alümina katkılı silika gradyan indeksi (GRIN) merceği.....	16
Şekil 2.4. Çeşitli uygulamalar için BJ yöntemiyle üretilen farklı malzeme örnekleri (Sama et al., 2020). ....	16
Şekil 2.5. BJ yöntemine malzeme ekstrüzyonu entegre edilerek yapılan üretim ....	18
Şekil 2.6. Homojen olarak (solda) ve heterojen olarak (sağda) dağılmış toz yatakları içerisindeki bağlayıcı penetrasyonunun şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.7. Toz boyutunun görünür yoğunluğa ve akış kabiliyetine olan etkisinin grafik ile gösterimi.....	21
Şekil 2.8. Bağlayıcının püskürtülme kabiliyetini anlatan şematik gösterim.....	24
Şekil 2.9. Damlacık oluşumunun şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.10. Nozulun geçici olarak tıkanmasıyla oluşan baskı bozukluklarının gösterimi.....	28
Şekil 2.11. Bağlayıcının püskürtülmesi ve toz yatağı bağlayıcı etkileşiminin şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.12. Hibrit bağlayıcı kullanımının toz taneleri üzerindeki etkisinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 2.13. Bağlayıcı ile toz tanecikleri arasındaki etkileşimin şematik gösterimi.	32
Şekil 2.14. Katman kalınlığının ve parçacık boyutunun toz yatağı yoğunluğuna olan etkisinin şematik gösterimi.....	36
Şekil 2.15. Toz yayma sürecinin şematik gösterimi. ....	38
Şekil 2.16. Baskı hızının parça bütünlüğü üzerindeki etkisinin şematik olarak gösterimi.....	40

Şekil 2.17. Bağlayıcı doygunluğunun numuneler üzerindeki etkisinin şematik gösterimi .....	41
Şekil 2.18. Tek, yan yana ve üst üste binen üç damlacık boyutunun doygunluk alanı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması. ....	42
Şekil 2.19. Farklı katman kalınlıklarında bağlayıcının, yayılma ve kanama kusurlarının şematik gösterimi. ....	43
Şekil 2.20. Doygunluk seviyesi ve katman kalınlığının etkilerinin karşılaştırıldığı BJ yöntemiyle üretilmiş TiNiHf tozunun optik görüntüleri .....	43
Şekil 2.21. Toz parçalarının geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik dayanımı üzerinde katman kalınlığı ve bağlayıcı doygunluk seviyesinin etkisinin şematik gösterimi. ....	45
Şekil 2.22. BJ yöntemiyle üretilmiş parçaların kurutma prosesi sonrasında şematik görünümü .....	47
Şekil 2.23. Yapı haznesi ve üretim yönlerine göre parçaların şematik gösterimi...	49
Şekil 3.1. Creo ortamında üretilecek numunenin tasarlanması.....	52
Şekil 3.2. Toz eleme işlemlerinin yapıldığı makina.....	54
Şekil 3.3. Ağırlıkça karışım oranlarının hazırlanmasında kullanılan hassas tartı ve hazırlanan karışımların karıştırılması için kullanılan makina.....	55
Şekil 3.4. Hidroksiapatit, PVA ve akrilik toz boyutu dağılımı. ....	55
Şekil 3.5. Elde edilen karışımların toz boyut analizi için kullanılan Microtrac s3500.....	56
Şekil 3.6. Numune üretiminde kullanılan 3D Printer ve Binder Jetting yöntemiyle üretimi tamamlanmış test nummuneleri. ....	62
Şekil 3.7. Binder Jetting yöntemiyle üretilen numunelerin fazlalık tozlarından arındırılmadan önceki hali ve arındırıldıktan sonraki hali. ....	62
Şekil 3.8. Binder Jetting yöntemiyle üretilen numunelerin ön sinterleme işleminin yapıldığı fırın ve numuneler. ....	63
Şekil 3.9. Optik Mikroskop (NICON Eclipse).....	64
Şekil 3.10. Basma test cihazı (ZwickRoell Z50).....	65
Şekil 4.1. BJ Yöntemiyle üretilen numune görselleri. ....	67

Şekil 4.2. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin optik görüntüleri. a) HA ve PVA karışımlarının ZB 10 bağlayıcı ile üretilen numunelerin optik görüntüleri. b) HA ve PVA karışımlarının HP45 bağlayıcı ile üretilen numunelerin optik görüntüleri. ....	69
Şekil 4.3. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin basma testi sonuçları. ....	70

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Hausner oranı ve akışkanlık ölçütü.....	57
Tablo 4.1. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin bağıl geometrik doğruluk değerleri.....	68
Tablo 4.2. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin kütle hacim ve bağıl yoğunluk değerleri.....	68

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, binder jetting, solvent jetting, 3d yazıcı

Binder jetting teknolojisi bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu teknolojiye bir toz yatağı üzerine seçici olarak püskürtülen sıvı bağlayıcı ile tozların bağlanması sağlanır. Bu işlem katman katman nihai parça üretilene kadar tekrarlanır. Bu yöntem ile parça üretmek için, çeşitli seramikler, metaller, polimerler dahil olmak üzere pek çok toz halinde bulunan hammadde kullanılabilir. Aynı zamanda üretim aşamasında herhangi bir ısı girdisi olmadığına artık gerilmelerin oluşmaması, renkli ve hızlı üretime imkan tanınması gibi özellikleri sebebiyle son yıllarda öne çıkan yöntemlerdendir.

Bu çalışmada Binder jetting yöntemiyle üretiminde başarılı sonuçlar alınamayan HA (Hidroksiapatit) malzemesinin farklı tipte bağlayıcılar ile (toz ve sıvı) güçlü bir bağlanma sağlanarak başarılı sonuçlar alınması amaçlanmıştır. Hammadde olarak HA (Hidroksiapatit) toz halde kullanılmıştır. Toz bağlayıcı olarak PVA (Polivinil Alkol) ve Akrilik kullanılmıştır. Bu malzemeler toz halde HA tozlarıyla ağırlıkça %20, %30 ve %40 oranlarında karıştırılmıştır. Ayrıca bağlayıcı olarak %98 Su içeren HP45 kartuş ve ZB10 Bağlayıcı olmak üzere 2 farklı malzeme kullanılmıştır. Toplamda 6 farklı toz karışımı 2 farklı sıvı bağlayıcı ile numune üretimleri yapılmıştır. Binder Jetting yöntemiyle üretilen numuneler sinterlenmeden önceki hali için literatürde green part ifadesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada numuneler üretildikten sonra sinterleme işlemi yapılmamıştır. Tüm test ve analizler green part üzerinde uygulanmıştır. Üretilen numunelerin mikro yapıları SEM ve XRD analizleri ile incelenmiştir. Numunelerin bağıl yoğunluk değeri ortalama %90 çıkmıştır ve prozitetler düzensiz ve şekilsiz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Akrilik ile yapılan üretimler beklenen sonuçları verememiş PVA ya göre çok düşük dayanımlarda kalmıştır. Ayrıca kullanılan HP 45 sıvı bağlayıcı ile ZB 10 bağlayıcıları karşılaştırıldığında ZB10 bağlayıcısının daha güçlü bir bağlanma sağladığı ve toz bağlayıcıların çözülmesinde HP45 e göre daha başarılı olduğu görülmüştür. %60HA ile %40 PVA karışımı ile sıvı bağlayıcı olarak kullanılan ZB10 varyasyonu ile üretilen numunelere yapılan basma testi sonuçlarında en rijit ve en yüksek dayanıma sahip olan varyasyon olduğu tespit edilmiştir.

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BINDER TYPE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE PRODUCT IN BINDER JETTING TYPE 3D PRINTER**

## **SUMMARY**

Keywords: Additive manufacturing, binder jetting, solvent jetting, 3d printer

Binder jetting technology is an additive manufacturing method. In this technology, powders are bonded with a liquid binder selectively sprayed on a powder bed. This process is repeated layer by layer until the final part is produced. Many powdered raw materials, including various ceramics, metals, polymers, can be used to produce parts with this method. At the same time, it is one of the methods that has come to the fore in recent years due to its features such as the absence of residual stresses when there is no heat input during the production phase, and the possibility of colorful and fast production.

In this study, it is aimed to obtain successful results by providing a strong bond with different types of binders (powder and liquid) of HA (Hydroxyapatite) material, which cannot be produced with the Binder jetting method. As raw material, HA (Hydroxyapatite) was used in powder form. PVA (Polyvinyl Alcohol) and Acrylic were used as powder binders. These materials were mixed with powdered HA powders at 20%, 30% and 40% by weight. In addition, two different materials, HP45 cartridge containing 98% water and ZB10 Binder, were used as binders. In total, samples were produced with 6 different powder mixtures and 2 different liquid binders. For the samples produced by the Binder Jetting method before sintering, the term green part is used in the literature. In this study, sintering was not performed after the samples were produced. All tests and analyzes were performed on the green part. Microstructures of the produced samples were examined by SEM and XRD analysis. The relative density value of the samples was 90% on average and it was observed that the prosthesis had an irregular and amorphous structure. Productions made with acrylic could not give the expected results, and remained at very low strengths compared to PVA. In addition, when the HP 45 liquid binder and ZB 10 binders were compared, it was observed that the ZB10 binder provided a stronger bond and was more successful in dissolving the powder binders than HP45. In the compression test results made on the samples produced with the ZB10 variation used as a liquid binder with a mixture of 60%HA and 40% PVA, it was determined that it was the variation with the most rigid and highest strength.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojisi, parça imalat sürelerini kısaltma, karmaşık yapıları oluşturma, hacim kontrolü ile ağırlıktan tasarruf sağlama ve geleneksel yöntemler ile üretilmeyecek seviyede karmaşık parçaların üretimine imkan sağlaması sebebiyle son yıllarda en çok araştırılan konular arasında yer almaktadır. Ancak tüm bu avantajlara rağmen, yüksek enerji kullanımı, düşük verim, yüksek maliyet ve önemli operatör yükü gibi çeşitli zorluklar nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmamaktadır (Tofail ve diğerleri, 2018). Binder Jetting yöntemi diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha yüksek verim daha düşük operatör yükü ve daha düşük maliyet gibi avantajları sebebiyle diğer yöntemlere göre öne çıkmaktadır (A. M. Elliott ve Love, y.y.).

Binder Jetting teknolojisinde bir silindir yardımıyla katman katman serilen toz tanecikleri üzerine bir baskı kafası yardımıyla seçici olarak sıvı bağlayıcı püskürtülür. Burada, bulunduğu katmanda yer alan 2D model baskı kafası yardımıyla oluşturulduktan sonra üretilen parçanın katman kalınlığına göre baskı tablası aşağıya iner ve silindir yardımıyla yeni bir toz katmanı serilir. Bu işlem, hedef parça üretilene kadar tekrarlanır. Üretilen parça düşük sıcaklıklı bir fırında sertleştirilir ve gevşek tozlardan temizlenir. Sertleştikten sonra fırından çıkarılan parça literatürde “Green Part” olarak adlandırılmaktadır. Daha sonra yüksek sıcaklıklı bir sinterleme fırınında imalat malzemesine göre uygun sıcaklıkta sinterlenir

Binder jetting teknolojisinde kullanılan bağlayıcının baskı kalitesi, geometrik doğruluk, toz giderme kapasitesi ve sinterleme performansı gibi özellikleri için etkili olduğu görülmüştür (Gilmer ve diğerleri, 2020). Bu çalışmada hammadde olarak toz halde bulunan HA kullanılmıştır. Hidroksiapatit biyouyumlu ve doğal kemik yapısına çok benzeyen bir biyo seramiktir. Bu nedenle kemik yerine yaygın bir şekilde

kullanılmaktadır (Legeros ve Craig, 2009). Ancak su bazlı bağlayıcılar ile düşük reaktivite gösterdiğinden binder jetting eklemeli imalat yöntemiyle hidroksiapatit malzeme üretimi sınırlandırılmıştır. Birçok çalışma HA ile etkili bir bağlanma elde etmek için suda çözünür polimerik veya seramik bazlı yapıştırıcılar kullanmaya çalışmıştır (Chumnanklang, Panyathanmaporn, Sitthiseripratip ve Suwanprateeb, 2007; J. Suwanprateeb, Sanngam, Suvannapruk ve Panyathanmaporn, 2009; Will ve diğerleri, 2008; Z. Zhou ve diğerleri, 2018; Z. Zhou, Buchanan, Mitchell ve Dunne, 2014). Yapılan bir çalışmada su bazlı bir bağlayıcıdaki 3 farklı polimeri araştırmış ve daha sonra bu bağlayıcıların herbirini HA toz yatağın üzerine basmıştır (Z. Zhou ve diğerleri, 2014). En yüksek basınç dayanımı, içerisinde yaklaşık ağırlıkça %1 PVOH bulunan bağlayıcı ile 4 MPA olarak test edilmiştir. Bununla birlikte su uçuculuğunun yüksek olması nedeniyle, yazıcı kafası püskürtme uçları baskı işlemi sırasında polimer içeriği tarafından sürekli olarak tıkanmıştır. Bu problemin çözebilmek için bağlayıcı tozlar kaplama veya harmanlama yoluyla toz yatağına eklenmiştir. Ayrıca Maltodekstrin ön işleme sırasında HA tozu üzerine sprey ile kaplanmıştır (Chumnanklang ve diğerleri, 2007). Bu durum su bazlı bağlayıcı ile reaktiviteyi arttırmıştır. Bununla birlikte HA tozunun partikül boyutunun artması sebebiyle düşük baskı çözünürlüğüne ve doğruluğuna yol açmıştır. Bu nedenle, binder jetting eklemeli imalat işlemi sırasında HA ile su bazlı bir bağlayıcı kullanmak, daha kapsamlı bir formülasyonun optimizasyonunu ve araştırmasını gerektirmiştir. Suda çözünür biyoseramiklerin reaktivitesini iyileştirmek için HA tozu ile harmanlanması da araştırılmıştır. Ancak kabul edilebilir reaktivite elde etmek için yüksek bir ağırlık yüzdesi ile birleştirilmeleri gerekir ki bu, osteokondüktivite, mekanik özellikler ve biyorezorpsiyon üzerinde zararlı bir etkiye neden olmuştur. (Nilsson, Fernández, Sarda, Lidgren ve Planell, 2002; Tay Vikas, Patel ve Bradford, 1999). Bu olumsuzluktan yola çıkarak yüksek miktarda yapışkan toz gerektirmeden mükemmel basılabilirlik elde edebilen, Binder Jet AM üretimi için HA bazlı bir toz formülasyonu geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Ağırlıkça %10 %20 ve %30 oranlarda maltodekstrin ve PVOH tozları HA ile karıştırılarak %98 su içeren bir bağlayıcı ile bağlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda HA ile ağırlıkça %30 oranında karıştırılan PVOH tozu ile üretilen parçalarda %85 ten daha fazla bir geometrik doğruluk ve 5.63 mpa green part dayanımı tespit edilmiştir. Maltodekstrin PVOH ile karşılaştırıldığında düşük

geometrik doğruluk ve daha düşük green part dayanımına sebep olmuştur (Z. Zhou, Lennon, Buchanan, McCarthy ve Dunne, 2020).

Bu çalışmada, HA toz parçacıkları arasında daha büyük bir bağlanma kuvveti ve oluşturulan yapı içinde daha yüksek bir HA içeriği elde etmek için PVA ve Akrilik olmak üzere 2 farklı polimer bağlayıcı önerilmiştir. Ağırlıkça %20 %30 ve %40 oranlarında HA tozu ile karışım yapılarak bir toz formülasyonu elde edilmiştir. Baskı kafası üzerinde bulunan nozellerin tıkanmasının önüne geçmek ve yapılan diğer araştırmalarda daha yüksek reaktivite yardımıyla daha yüksek bağlılık gösterdiği için yatak içi bağlayıcı sistemi kullanılmıştır. Çözücü madde olarak %98 Su içeren HP 45 Kartuş ve ZB10 bağlayıcı olmak üzere 3 farklı malzeme kullanılmıştır. 2 farklı çözücü malzeme her toz formülasyonunun tüm karıştırma oranları için kullanılmıştır. Sonuç olarak, farklı toz bağlayıcılarının, farklı karıştırma oranlarının ve farklı çözücü malzemelerin orijinal CAD tasarımına kıyasla geometrik doğruluğu ve mekanik özellikleri gibi temel baskı özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## **BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Binder Jetting Teknolojisi ile Eklemeli imalat**

Binder Jetting teknolojisi 1993 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) geliştirilmiştir. İlk olarak hammadde olarak açığı tozu ve bağlayıcı olarak ta gliserin/su karışımı kullanılarak geliştirilen yöntem Emanuel Sachs tarafından patentlenmiştir. Z Corporation şirketi bu teknolojinin yetenekleri arasına full renkli baskı seçeneğini ekledi ve bu teknolojiye “3D Printing (3DP)” adını vererek ticarileştirdi. Endüstriler Z Corporation teknolojisini mimari ve makine tasarımı alanında prototip oluşturmada kullanıyordu aynı zamanda metal tozu ile parça imalatı konularında da araştırmalar devam ediyordu. Z-Corp ürettiği parçalardaki yapısal bütünlüğün istenilen seviyede olmamasından dolayı mukavemeti artırma yöntemlerini araştırdı bu sebeple parçaların bir ahşap sertleştiriciye veya diğer düşük viskoziteli reçinelere daldırılmasını ve daha sonra parçalara kılcal kuvvetlerle sızmasını araştırdı. Extrude Hone şirketi, 1996 yılında Binder jetting teknolojisini kullanarak metal parçalar üretmek için MIT'den patentlerin lisansını satın aldı. 2005 yılında, ExOne Company, metal döküm kalıpları için basılmış kumların yanı sıra bronzla infiltre edilmiş paslanmaz çeliğin Binder Jetting ine odaklanarak Extrude Hone'dan ayrıldı.

#### **2.1.1. Binder jetting teknolojisinin diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre avantajları**

- Binder Jetting teknolojisi diğer PBF teknolojilerine göre daha fazla toz ile üretim yapılmasına uygundur. Endüstride toz halindeki metal ve seramik tam yoğunluğa kadar sinterlendiğinden, PBF teknolojilerine göre Binder Jetting teknolojisi ciddi bir potansiyele sahiptir. Aynı zamanda tüm eklemeli imalat

teknolojileri arasında en geniş malzeme yelpazesine sahip teknolojidir (B. Utela, Storti, Anderson ve Ganter, 2008).

- Diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre Binder jetting teknolojisinin çalışma ortamının oda sıcaklığında ve atmosfer ortamında olması en büyük avantajlarından biridir. Bu sayede oksidasyon, artık gerilme, elemental ayrışma ve faz değişiklikleri ile ilgili sorunlar ile karşılaşmamaktadır. Aynı zamanda baskı esnasında kullanılmayan toz taneciklerinin geri dönüştürülür olması toz maliyeti açısından önemli bir avantajdır. Diğer eklemeli imalat teknolojilerine kıyasla baskı boyutu en büyük teknolojilerden biridir. Ayrıca, bazı eklemeli imalat teknolojilerindeki gibi pahalı sızdırmaz odacıkların kullanılmamasına rağmen Binder Jetting makinelerinin yapı hacmi, mürekkep püskürtmenin sağladığı yüksek çözünürlüğü korumaktadır.
- Füzyon bazlı eklemeli imalat teknolojilerinde destek malzemesi parça ile birlikte üretilmektedir. Bu sebeple parçanın yapı tablası üzerinde toz katmanları ile destekendiği Binder Jetting teknolojisinde göre daha fazla zaman ve malzemeye ihtiyaç duymaktadır.
- Füzyon bazlı eklemeli imalat teknolojileriyle üretilen parçalarda katmanlar bir ısı girdisi yardımıyla eritilerek birbirine yapıştırıldığından artık gerilmelere yol açmaktadır. Binder jetting teknolojisinde ise bağlayıcıyı sertleştirmek için üretim aşamasında sınırlı seviyede ısı kullanılır ancak buradaki ısıtma çok düşük seviyelerdedir. Binder jetting teknolojisi ile parça imalatı esnasında ciddi seviyelerde ısı girdisi uygulanmadığından termal gerilmeler ve bozulmalar görülmez (Mostafaei, Stevens, Ference, Schmidt ve Chmielus, 2017).
- Tarama hızı parametrelerindeki sınırlandırmalar sebebiyle üretim oranları düşüktür. Buna karşılık BJ yöntemi ile üretim oranları yüksektir. Aynı zamanda diğer eklemeli imalat yöntemlerine hacimce büyük parçaları çok daha düşük maliyetlere üretebilirler.
- Binder jetting yöntemiyle diğer eklemeli imalat yöntemlerinin aksine sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresine bağlı olarak yapısal boşlukların oluşumu kontrol edilebilir. Dolayısıyla parça yoğunluğu istenen düzeyde ayarlanabilir.

### 2.1.2. Binder jetting yönteminin dezavantajları

- Binder Jetting teknolojisi üretim sonrasında ihtiyaç duyduğu ikincil işlemler (ssinterleme, kurutma vb.) sebebiyle daha uzun üretim süreçlerini içermektedir,
- BJ yöntemi ile üretilen PBF (Powder Bed Fusion) yöntemi ile üretilen parçalara göre daha düşük bağıl yoğunlupa sahiptir. Sinterleme ile yoğunluk artırılabilir ancak bu seferde geometrik bozulmalar olmaktadır.
- BJ yöntemi ile PBF yöntemi yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırıldığında Bj yöntemi ile üretilen parçalar daha düşük çözünürlük ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğü görünmektedir.
- BJ yöntemi ihtiyaç duyduğu ikincil işlemler ile ilgili henüz yeterli seviyede çalışma yapılmamıştır. Bu sebeple üretim sonrası ikincil işlem stratejileri geliştirilmeye devam etmektedir.

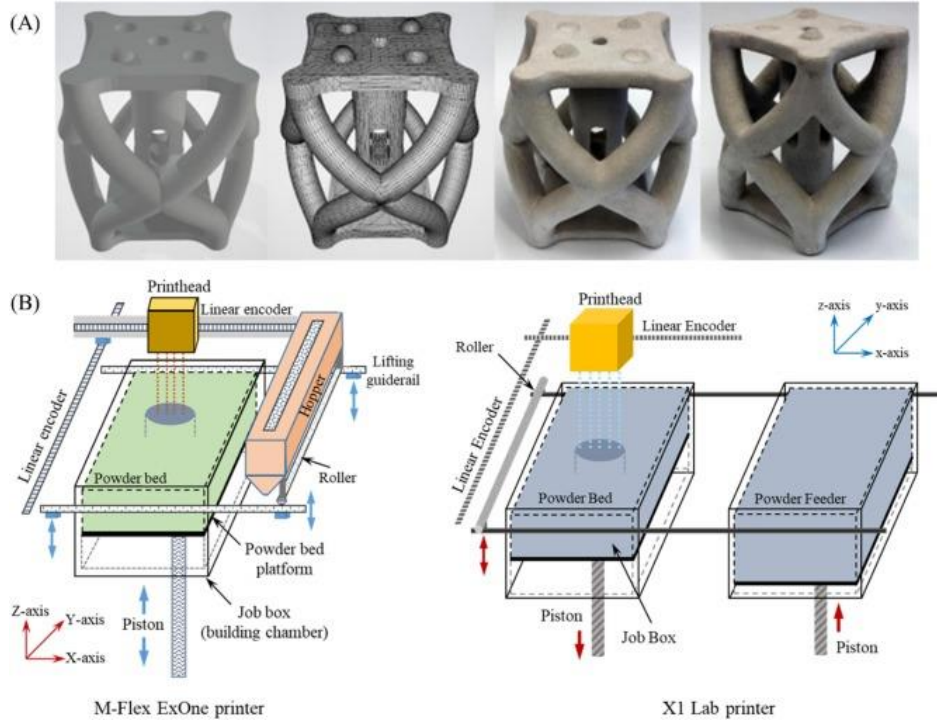
## 2.2. Binder Jetting Teknolojisi İle İmalat Süreci

Bu başlık altında Binder Jetting Teknolojisi üretim aşamaları 3 farklı süreç altında incelenmiştir. Bunlar; baskı, sertleştirme ve toz giderme, Sinterleme ve süzme adımlarıdır.

### 2.2.1. Baskı süreci

BJ teknolojisi ile green part adı verilen ikincil işleme maruz kalmayan parçaların üretim adımları aşağıdaki gibidir.

- İlk olarak CAD programları ile tasarlanmış üretilecek parçaya ait 3D modele ihtiyaç vardır. Bu CAD model STL formatında kaydedilerek bir dilimle programı ile katmanlar halinde dilimlenir.



Şekil 2.1. BJ yöntemiyle numune üretim süreci.

Yukarıdaki şekilde sırasıyla gösterilmek istenenler; (A) CAD model, STL dosyası ve BJ yöntemiyle üretilmiş parçalar. (B) İki farklı toz besleme tekniğine sahip BJ 3D yazıcı, (solda) tozlar bir huni yardımıyla toz yatağı üzerine yayılır ve bir rulo yardımıyla toz sıkıştırma sağlanır (örn. Innovent veya M-Flex ExOne yazıcı), (sağda), ayrı bir toz besleme platformunda bulunan toz bir rulo yardımıyla kaydırılarak baskı yapılan toz yatağına biriktirilir (örn. X1-Lab yazıcı).

- Baskı için toz yatağı üzerine ince tabaka toz yayılır ve ters dönen bir silindir yardımıyla yeni toz tabakası sıkıştırılır. Silindirin uyguladığı basınç tozun sıkıştırma oranını belirler.
- Sıvı bir bağlayıcı baskı kafasında bulunan nozullar yardımıyla parçanın oluşturulacağı toz tabakasına püskürtülür (Nandwana ve diğerleri, 2017). Bağlayıcı doygunluğu toz yatağının tahmini yoğunluğuna göre hesaplanır. Kullanıcı tarafından bir giriş parametresi olarak kullanılır.
- Bağlayıcının toz ile nüfuziyeti tamamlandıktan sonra elektrikli bir ısıtıcı son katmanı sertleştirmek / kurutmak için toz yatağı üzerinden geçer. Bu işlem için bağlayıcı ile toz parçacıkları arasındaki nüfuziyetin tamamlanmış olması

gerekmektedir. Bu sebeple sertleştirme/kurutma süresi bağlayıcı ile tozun nüfuziyet süresine bağlıdır. Bu durum göz önünde bulundurulmadan bu işlem yapılırsa, toz yatağında çatlamalara, baskı sırasında tozun merdaneye yapışmasına ve topaklanmasına sebep olur.

- Bağlayıcının püskürtülmesi ve sonrasında kurutulması ile ilgili süreç tamamlandıktan sonra baskı alanında bulunan toz tabakası kendisini destekleyen bir piston yardımıyla 50 ile 200 um arasında değişen bir katman yüksekliğine indirilir. Toz besleme ünitesinde aynı katman yüksekliğinde yukarıya çıkarak bir silindir yardımıyla baskı alanı üzerine tozların yayılımı sağlanır ve bir miktar sıkıştırılır. Farklı çeşitlerde toz kaynağı bulunmaktadır. Bunlara göre tozun yayılma süreci farklılık gösterilebilir. Genel olarak kullanılan 2 farklı yöntem bulunmaktadır. 1.si yerçekimi yardımıyla huni tarzı bir silo içerisinden toz beslemesi gerçekleştirilir (Paranthaman ve diğerleri, 2016). 2. yöntem ise genelde toz akış yeteneği iyi olmayan tozların yazımında kullanılır. Bu yöntemde ayrıca toz besleme ünitesi kullanılır ve bir silindir yardımıyla toz baskı tablası üzerine yayılır ve sıkıştırılır (Mostafaei, Behnamian, ve diğerleri, 2016). İki tip bağlayıcı jet 3D yazıcıların şemaları Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.

### **2.2.2. Sertleştirme (kurutma) ve toz arındırma süreci**

Üretilen parçadaki fazlalık olan suyun buharlaştırılmasıyla sertleştirilen parçaya green part adı verilmektedir. Bu işlem ise literatürde kurutma veya sertleştirme olarak geçmektedir. Kurutma işlemi, baskı süreci tamamlanan parçanın içerisinde bulunduğu toz yatağının, yazıcıdan ayrılarak ısıtma işlemine tabi tutulmasıyla gerçekleşir. Burada uygulanan süre ve sıcaklık değerleri pek çok parametreye göre değişmektedir. Bu sebeple standart bir kurutma süresi ve kurutma sıcaklığı değeri yoktur. Ancak kurutma sıcaklığı ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunda sıcaklık ortalama 180- 200 ° C olarak belirlenmiştir. Bu yöntem düşük operatör ihtiyacı gerektirirse fazladan bir işlem olarak görüldüğü için gelecekte bu adımın ortadan kaldırılması için çalışmalar devam etmektedir (Watters ve Bernhardt, 2017).

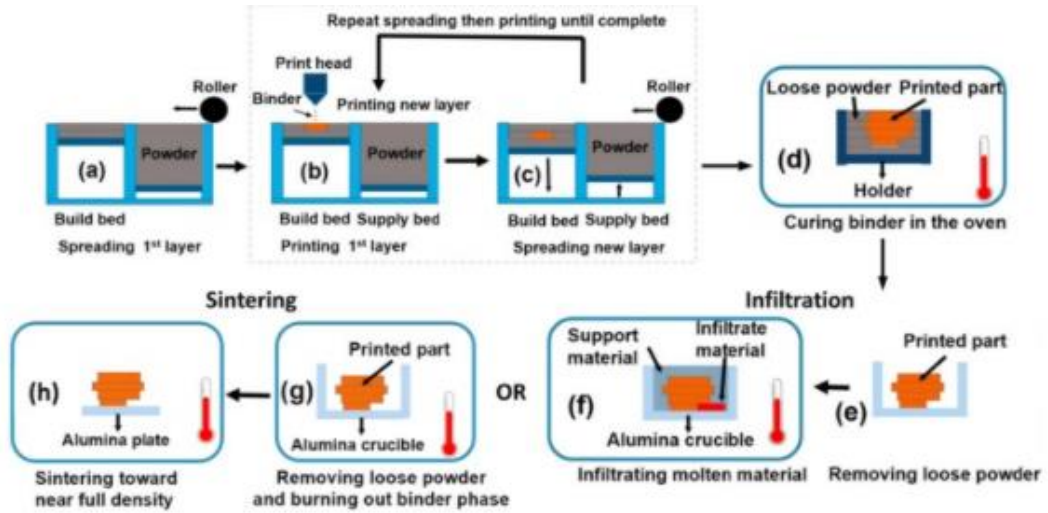


Parça kurutma işlemi tamamlandıktan sonra ortaya çıkan green part kolayca toz yatağından çıkarılarak üzerinde bulunan fazlalık tozlardan arındırılabilir. Bu aşamada toz yatağı içerisindeki gevşek tozlar bir vakum yardımıyla çekilir. Parça üzerindeki boşta bulunan tozlar ise küçük bir fırça yardımıyla el ile, daha detaylı parçalarda vakumlanarak veya hava püskürtülerek temizlenir. Parça üzerinde bulunan ince kesitli yapıların kırılmaması için büyük hassasiyet gösterilmelidir. Bu aşamada parçalar henüz istenilen mekanik özelliklere sahip değildir. Parçanın istenilen yoğunluğa ulaşması ve mekanik özelliklerinin iyileşmesi için sinterlenmesi gereklidir.

### **2.2.3. Mekanik özelliklerin iyileştirilme süreci**

Sinterleme öncesi parçaların bağıl yoğunlukları ortalama %50-60 arasındadır. Bir mikroskop ile incelendiğinde toz parçacıklarının bağlayıcı ile temas noktalarından basitçe bağlandığı görülmektedir. İstenilen yoğunluğun elde edilebilmesi için sinterleme işlemi veya süzme işlemi yapılmalıdır. Sinterleme veya sızma yöntemiyle parçanın bağıl yoğunluğunu arttırmadan önce bağlayıcı tamamen uçurmak için yaklaşık olarak 600-700 ° C'de bir yanma adımı gereklidir.

Aşağıdaki görselde gösterilmek istenen sırasıyla; (a) İlk tabakanın hazırlanır, (b, c) bağlayıcı toz tabakası üzerine püskürtülür ve ardından yeni bir toz tabakası yayılır bu işlem parça üretilene kadar tekrarlanır. (d) üretilen parça sertleşme fırınında sertleştirilir. (e) tozdan arındırma işlemi yapılır (f) üretilen parçadaki boşluklara sıvı infiltre edilir. (g,h) tozdan arındırma işlemi yapılarak sintreleme işlemi yapılır.



Şekil 2.2. BJ yöntemiyle parça üretim sürecinin ve ikincil işlemlerin şematik gösterimi.

Son işlem döngüsünün belirlenmesinde dikkate alınması gereken faktörler bulunmaktadır. Bunlar; toz boyutu, Sinterleme atmosferi, malzeme bileşimi, sıcaklık ve bekletme süresidir (Zhigang Zak Fang, 2010). Malzemelerin sinterleme özellikleri kendilerine ait olduğundan sinterleme sürecini kontrol etmek için çeşitli toz boyutlarına sahip karışık toz ve kaplanmış parçacıklar kullanılabilir (Kingery ve Narasimhan, 1959; M. Randall, Suri ve Park, 2009).

Seramikler, metaller ve polimerler için sinterleme yöntemleri farklıdır (Miyanaji, Zhang, Lassell, Zandinejad ve Yang, 2016; Yap ve diğerleri, 2017). Seramikler metal tozlarına göre daha yüksek sinterleme sıcaklıklarına ve daha düşük yoğunlaşma oranlarına sahiptir. Bu sebeple seramiklerin metallerle süzülerek yoğunlaştırılması daha yaygın kullanılan bir yöntemdir. Polimer malzemeler ise düşük erime sıcaklıklarına sahip olduğundan yoğunlaştırma işlemi katmanların baskı aşamasında polimerizasyon ile sağlanmaktadır.

Bu aşamada basılmış olan parça sağlamlaştırılırken dikkat edilmesi gerekirken tasarım faktörleri bulunmaktadır. Parçanın mekanik özellikleri iyileştirilirken aynı zamanda parça boyutu belirli tolerans değerleri arasında olmalıdır. İnfiltrasyon yöntemiyle yoğunlaştırılan parçalarda geometrik doğruluk iyi seviyelerdedir. Tek alaşımli bir parçanın tam yoğunluğa kadar sinterlenmesi sonucu geometrik doğruluk kötü seviyelerdedir.

#### 2.2.4. Yüzey kalitesinin iyileştirilme süreci

Binder Jetting yöntemiyle üretilen ve ikincil işlemlerden geçirilen parçaların yüzey pürüzlülükleri istenilen düzeyde hassas olmamaktadır. Bu sebeple yüzey kalitesini arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan teknikler kumlama ve tambur cilalamadır. Bununla birlikte kaplama, işleme, ekstrüzyon honlama, yüzey infiltrasyonu ve elle cilalama gibi yöntemlerde kullanılmaktadır (Mostafaei ve diğerleri, 2020).

Tüm toz yataklı 3D printer yöntemlerinde kullanılan toz boyutu ve katman kalınlığı parçanın yüzey kalitesini doğrudan etkiler. Toz boyutu ve katman kalınlığı arttıkça yüzey kalitesi azalmaktadır. Ancak toz boyutu azaldıkça tozun akışkanlık yeteneği azaldığından baskı anında tozun yapı tablasına yayılmasını zorlaştırmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça işlem süresi azalmaktadır ve bu durum maliyetleri düşürmektedir.

### 2.3. BJ Teknolojisi ile Üretimde Kullanılan Malzeme Grupları

#### 2.3.1. Seramikler

Seramik malzemeler, işleme kabiliyetlerinin düşük olması sebebiyle genellikle toz halde işlenirler. Seramik malzemelerin geleneksel üretimi şu şekilde özetlenebilir; öncelikle seramik malzeme bağlayıcı bir sıvı ile karıştırılır ve elde edilen malzemeye istenilen şekil verilerek yüksek ateşte bir süre pişirilir. Presleme ile seramiğin işlenmesini ilk olarak deneyen çalışmalardan birinde, alumina MgO karışımı ateş ile pişirilme işleminden sonra %99,2 yoğunluğa ulaşmıştır (RL Coble, 1958). Binder Jetting yöntemiyle toz malzemelerin işlenebilirliğinden dolayı bu yöntemin seramik malzemelerle uygulanması ile ilgili önemli çalışmalar bulunmaktadır. Metal oksit tozlarının indirgenmesi ile metal ve metal/seramik kompozitlerinin üretimi ile ilgili de çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin yapılan bir çalışmada %60 yoğunluğa sahip Maraging çeliği üretmek için demir oksit, kobalt oksit, molibden oksit ve nikel oksit içeren metal oksit toz sistemi kullanılmıştır (Williams, Christopher B., Rosen ve David W., 2007).

Metal/Seramik kompozitler ısıtma işlemi sırasında tek bir bileşenin kısmen indirgenmesi yoluyla üretilmiştir. Örneğin yapılan bir çalışmada araştırmacılar WC-kobalt oksit – IPA bulamacı ve bağlayıcı olarak polietilenimin kullanarak karmaşık yapıda olan metal kesme uçlarının üretiminde mikron ve mikron altı tozları işlemek için Binder Jetting yöntemi kullanmıştır (Kernan, Sachs, Oliveria ve Cima, 2003). Sinterleme sırasında Kobalt oksit Kobalta indirgenmiştir. Sinterlemeden sonra parça sıcak izostatik presleme (HIP) işlemine tabi tutulmuştur. Ortaya çıkan sonuçta geleneksel yöntemlerle üretilen 14,5 g/cc ile karşılaştırılabilir olan 14.2 g/cc yoğunluğa ulaşılmıştır (Kernan ve diğerleri, 2003).

Alümina hem kuru hem de ıslak halde işlenebilmektedir. Yapılan son araştırmalarda Kuru halde bulunan alümina malzemesinin toz boyutunun kusursuz katmanlar oluşturmak için yeterli büyüklükte olması durumunda uygun baskı parametreleri ile %96 yoğunluğa ve %10 büzölmelere ulaşabileceğini göstermiştir (Gonzalez, Mireles, Lin ve Wicker, 2016). Bulamaçla çökeltilen alümina için de aynı sinterlenmiş yoğunluklar elde edilmiştir, ancak numuneler, kuru işlenmiş parçalara kıyasla 3 ekseninde de önemli büzölmelere uğramıştır (Zocca, Günster, Zocca, Lima ve Günster, 2017).

### **2.3.2. Metaller**

Endüstriye uygulamalarda Binder Jetting yöntemi ile en çok metal malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan metal malzemeler paslanmaz çelikler gibi geleneksel toz metalurjisi alaşımlarıdır. Genellikle bronz emdirilmiş paslanmaz çelikler kullanılmaktadır ancak çoğu endüstriyel uygulamada yüksek yoğunluklu standart alaşımlar gereklidir. Bu gereklilik çeşitli malzemeler ile karşılanmıştır ancak sinterleme sonrası geometrik doğruluk, hala devam eden problemlerden biridir. Çelik tozlarının gaz atmosferi içerisinde yapılan sinterleme işlemi sonrası artık gazın tutulması sebebiyle elde edilen en yüksek yoğunluk %92-%95 tir (Simmons, Mohr, Tran, Macedo ve Litovitz, 1979). Malzemelerin yoğunluklarını arttırmak için sıcak izostatik presleme (HIP) sıkça kullanılan bir tekniktir (Kumar, Bai, Eklund ve Williams, 2017).

Alaşım bileşimlerinde küçük değişiklikler ile alaşım özelliklerinde ciddi iyileştirmeler elde edilebilir. Bu yöntem toz metalürjisi endüstrisinde sıkça kullanılmaktadır. Yakın zamanda yapılan çalışmalarda 420 kalite paslanmaz çelik malzemesine %0,5 bor eklenerek vakumlu sinterleme sonrası %99,6 yoğunluk değeri elde edilmiştir. Bu da alaşım oranlarında yapılacak küçük değişikliklerin tam yoğunluğa ulaşmak için güzel sonuçlara sebep olduğunu ortaya koymaktadır (Do, Kwon ve Shin, 2017). 316 Kalite paslanmaz çelik malzemesine sinterleme yardımcıları eklenerek vakumlu ortamda yapılan sinterleme sonucunda %99,5 üzerinde bir yoğunluk elde edilmiştir (Do ve diğerleri, 2018). Başka bir çalışmada nano boyutlu partiküllerin 410 kalite paslanmaz çeliğin kalitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. 316 L kalite paslanmaz çelik tozları arasına nano boyutta paslanmaz çelik tozlarının infiltre edilmesiyle BJ yöntemiyle üretilen parçalarda sinterleme sonrası daha fazla yoğunlaşmaya sebep olduğu görülmüştür (A. Elliott, AlSalihi, Merriman ve Basti, 2016). Aynı zamanda eklenen nano partiküller iskeletide stabilize edebilir. Böylece Sünme saplamalarında %95 ve büzülmeyi de %60 azaltmak için demir nanopartiküller kullanılmıştır (Crane, Wilkes, Sachs ve Allen, 2006). Binder jetting yöntemi ile inconel, Kobalt-Krom (Co-Cr alaşımı) ve Bakır gibi farklı malzemelerde kullanılmaktadır (Bai ve Williams, 2015; Mostafaei ve diğerleri, 2020; SA'UDE, IBRAHİM, ISMAIL ve IBRAHİM, 2011).

Elektronik uygulamalarda kullanılacak bakırın yüksek saflıkta olması gereklidir. Binder jetting yönteminde bakırın kullanılmasıyla ilgili yapılan bir çalışmada gaz ve toz boyutunun azaltılmasının parçanın nihai yoğunluğuna olan etkisi araştırılmıştır. Hidroje gazı ile sinterlendikten sonra teorik yoğunluğun %85 ve %97 saflık oranlarına ulaşabileceğine varılmıştır. Parça yoğunluğunu arttırmak için geliştirilen pek çok strateji tozun yayılabilirliğini azaltmaktadır (Bai ve Williams, 2015).

Incomel ve kobalt-krom alaşımlarının geleneksel yöntemler ile işlenmesi çok zordur, ancak Binder jetting yöntemiyle bu malzemelerin işlenmesi çok daha kolaydır. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda inconel malzemesinin binder jettin yöntemi ile üretilmesinin sonucunda %99,9 oranında mükemmel seviyede bir yoğunluk oranı elde edilmiştir (Nandwana ve diğerleri, 2017). Ancak geleneksel yöntemlerle üretimi sonucunda elde edilen en yüksek yoğunluk %97 ile sonuçlanmıştır (Özgün, Gulsoy,

Yılmaz ve Findik, 2013). Binder Jetting yöntemi ile üretilen Kobalt-Krom alaşımlı parçalar HIP işlemine tabi tutulduktan sonra döküm parçalara kıyasla neredeyse iki kat daha fazla aşınma direnci ortaya koymaktadır(Stoyanov, Andre, Prichard, Yao ve Gey, 2016).

### **2.3.3. Biyomalzemeler**

Binder Jetting yönteminin tıbbi uygulamalarda gelişmesi için yeni toz bağlayıcı sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. En sık kullanılan biyomalzemeler kalsiyum fosfatlar, kalsiyum slika ve hidroksiapatitlerdir(Shanjani, De Croos, Pilliar, Kandel ve Toyserkani, 2010; Sheydaei ve diğerleri, 2017; C. Wu ve diğerleri, 2012; Z. Zhou ve diğerleri, 2014). Biyoyumluluk esas olduğu için üretim esnasında kullanılan bağlayıcıların biyoyumlu olması gerekmektedir. Biyoyumlu malzeme imalatında genellikle, saf su, kloroform, asit bazlı bağlayıcılar ve bazı su-polimer çözeltileri gibi bağlayıcılar kullanılmaktadır (Z. Zhou ve diğerleri, 2014). Yapılan son araştırmalarda da görülüyor ki biyoyumlu malzeme imalatında genellikle toz bağlayıcılar kullanılmaktadır. Toz bağlayıcı sisteminin daha iyi green part mukavemetine ve nihai ürünlerin daha iyi mekanik özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir (X. Zhang ve diğerleri, 2018).

### **2.3.4. Polimerler**

Polimerlerin Binder Jetting yöntemiyle üretilmeleri için sınırlı çalışmalar bulunmaktadır. Bunun en büyük sebeplerinden biri polimerlerin genellikle toz halde üretilmemesidir. Geçmiş çalışmalarda BJ yöntemi ile Poliglikolik asit (PGA), poliaktik asit (PLS) polikaprolakton (PCL) ve polietilen oksit (PEO) gibi polimer malzemeler kullanılmıştır. Bu polimerler uygun bir solvent ile katılaştırılabilir (B. M. Wu ve diğerleri, 1996). Ayrıca yüksek yoğunluklu polietilen malzemesi, maltodekstrin ve polivinil alkolün su içerisinde çözülmesiyle hazırlanan bir bağlayıcı ile basılmıştır. Sonrasında uygulanan ısı işlemi ile malzeme özelliklerinde önemli ölçüde artış görülmüştür (Shanjani ve diğerleri, 2010; Jintamai Suwanprateeb, Kerdsook, Boonsiri ve Pratumpong, 2011). Benzer bir işlem uygulanan Polimetil matematik

akrilate (PMMA) malzemesi ısıyla sertleşen bir reçinenin emdirilmesiyle yarı saydamlık elde edilmiştir (J. Suwanprateeb ve Suwanpreuk, 2009). Voxeljet, üretilen malzemelerdeki gözenekli yapıyı ortadan kaldırmak için mum veya epoksi emilimi sağlayan PMMA malzeme sistemini geliştirmiştir (J. Suwanprateeb ve Suwanpreuk, 2009). Ancak gözenekli yapı biyo malzeme imalatında istenilen bir durum olduğundan Binder Jetting yöntemi bu işlem için mantıklı görülmektedir.

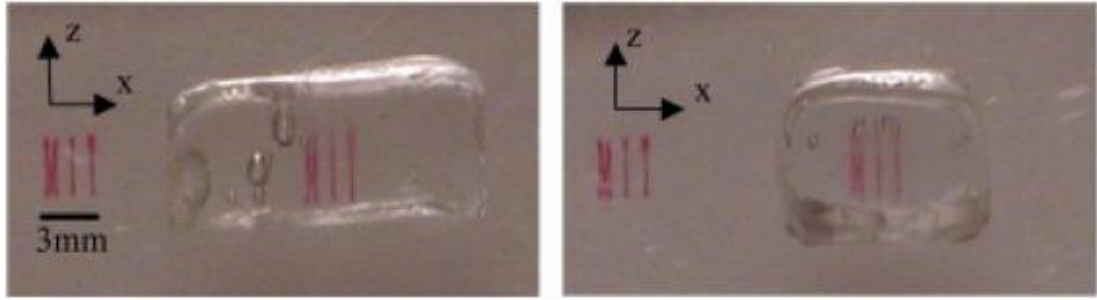
Binder jetting yöntemi yüksek hızlı sinterleme (HSS) ve multijetfusion sürecine çok benzemektedir (Fradl, Panditaratne, Bi, Fu ve Oancea, 2017). Bu yöntemlerde de polimer malzeme toz olarak kullanılmakta ve bağlayıcı püskürtme işlemi uygulanmaktadır. Ancak en büyük fark Binder jetting yöntemiyle üretilen parça ikinci işlemlere ihtiyaç duyar, bu yöntemlerde ise üretilen parça makinadan alınarak direkt olarak kullanılabilir.

### **2.3.5. Kompozitler**

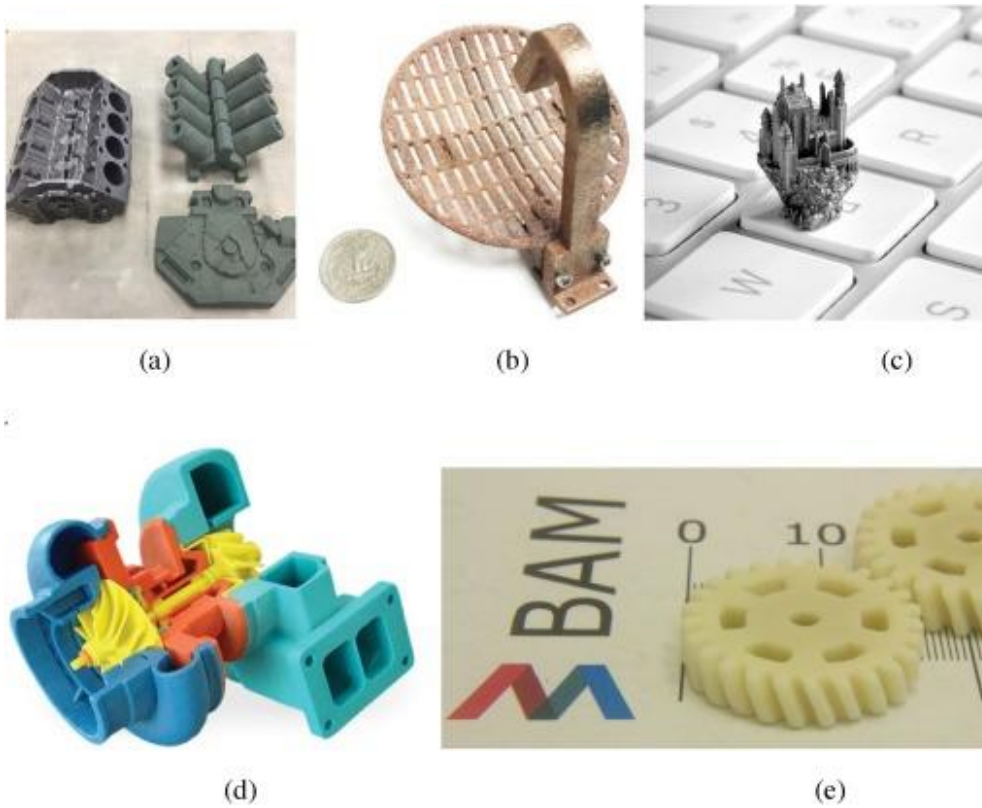
Binder Jetting yöntemi ile kompozit malzemelerin üretilmesi üzerine pek çok araştırma bulunmaktadır. Bunun için geliştirilen ve Lokal kompozisyon kontrolü (LCC) adı verilen bir yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemde göre her biri belirtilen yerlere farklı nozullardan farklı malzemelerin biriktirilmesiyle kompozit parçaların imalatına olanak sağlamaktadır (Cho, Sachs, Patrikalakis ve Troxel, 2003). Bu yöntem sayesinde malzemelerin elektrik iletkenliği, manyetik özellikleri, sertlik gibi özellikleri iyileştirilebilir (Cho ve diğerleri, 2003). LCC yönteminin en çok kullanılan uygulamaları görünüm için renkli baskıdır. Kağıt üzerine yapılan renkli baskıda istenilen renk spektrumunu üretmek için farklı renklerin birleştirilmesi yöntemi Binder jetting yöntemiyle renkli parça basmak için de uygulanmaktadır (Yin ve Huo, 2013).

Bulamaç bazlı binder jetting yöntemiyle üretilen gradyan indeksli (GRIN) lensler LLC'nin en ilginç örneklerindedir (H. R. Wang, Cima, Kernan ve Sachs, 2004). Yapılan bir araştırmada alüminayı ayrıştırmak için ısıtılmış alüminyum nitrat kullanılmıştır. Silika tozu yatağına elde edilen malzeme farklı konsantrasyonlarda bağlayıcı olarak püskürtülmüştür. Üretilen Alümina katkılı silis tabakaları 1650 °C de

30 dakika boyunca optik şeffaflığa gelene kadar sinterlenmiştir. Geometrik olarak düz bir numuneden Kompozisyon gradyanları yardımıyla bir mercek oluşturulmuştur. Bu yöntem sayesinde geleneksel yöntemlere göre 30 saat daha kısa işlem süresi ile birlikte daha hassas malzeme bileşimi üstünlükleri sağlanmaktadır(H. R. Wang ve diğerleri, 2004; Yamane, Yasumori, Iwasaki ve Hayashi, 1990).



Şekil 2.3. BJ yöntemiyle üretilen alümina katkılı silika gradyan indeksi (GRIN) mercek (H. R. Wang et al., 2004).



Şekil 2.4. Çeşitli uygulamalar için BJ yöntemiyle üretilen farklı malzeme örnekleri (Sama et al., 2020).

Yukarıdaki görselde gösterilmek istenen sırasıyla; (a) BJ yöntemiyle üretilen bir kalıp ve bu kalıpla üretilen parçalar (Sama, Badamo ve Manogharan, 2020). (b) 316



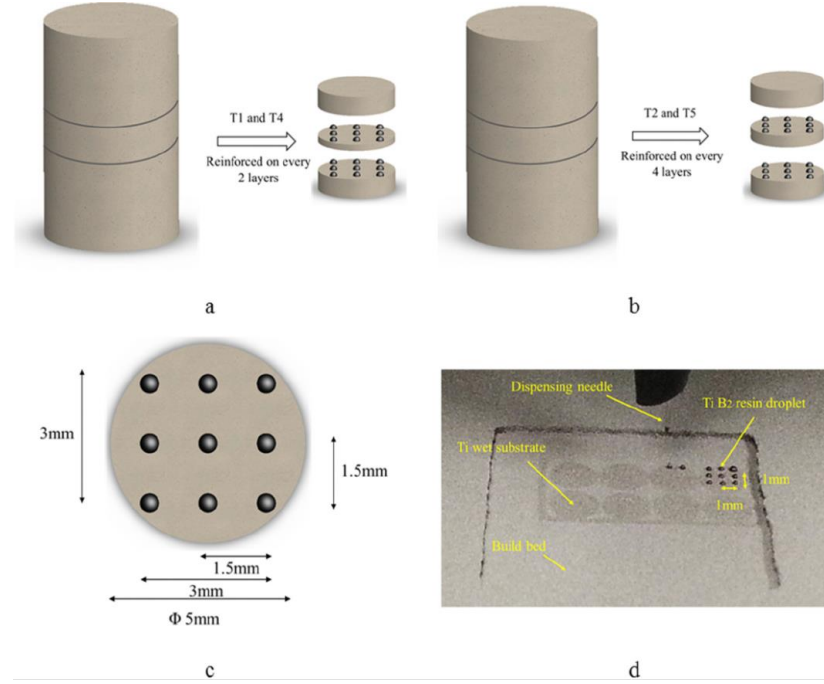
Paslanmaz çelik malzeme ile basılmış ve bakırla infiltre edilmiş bir parabolik anten (Shi, 1999) (c) Hassas parçaların basılabileceğini gösteren tam yoğunlukta basılmış ve sinterlenmiş bir parça (Nied, Taylor ve Delorenzi, 1990). (d) Hareketli parça üretim yeteneğini gösteren nişasta bazlı renkli parçalar (e) Bulamaç BJ yöntemi ile üretilen alümina dişli çarklar.

LCC yöntemi ile farklı bileşimlere sahip birbirine tutturulan iki tabakanın ısıya karşı gösterdikleri farklı reaksiyon ile farklı büküm karakterizasyonu sağlayan bimetalik şeritlerin üretiminde de kullanılmıştır.

Lokal bileşim kontrol yöntemi, aynı zamanda, farklı bileşimlere sahip iki tabakanın birbirine tutturulduğu ve ısıya karşı farklı bir şekilde büküldüğü bimetalik şeritlerin imal edilmesi için de yararlı olmuştur. NiO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışımları ile elde edilen bağlayıcılar Fe 30 Ni tozları üzerine basılmıştır. Daha sonra üretilen malzeme sinterlenerek elde edilen malzeme Ni ve Fe ye indirgenmiştir (Techapiesancharoenkij, 2001). Elde edilen bimetalik malzemelerin işlevselliğini arttırmak için HIP yöntemiyle yoğunlukları %93 yoğunluğa kadar yükseltilmiştir(Techapiesancharoenkij, 2001). Bunların yanında Binder Jetting yöntemiyle üretilebilecek kompozit malzemelere ek olarak, NdFeB bazlı mıknatıslar, katı oksit yakıt hücreleri, özelleştirilmiş gıda üretimi gibi birçok yeni malzeme sistemleri araştırılmıştır (Holland, Foster, MacNaughtan ve Tuck, 2018; Manogharan, Kioko ve Linkous, 2015; Paranthaman ve diğerleri, 2016; Sun ve diğerleri, 2015).

Binder Jetting yöntemiyle kompozit malzeme üretimi için alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birinde Binder jetting yöntemine Material Ekstrusion yöntemi entegre edilerek katmanlar arasında farklı malzemeler biriktirilmesi sağlanmıştır (Sheydaeian ve Toyserkani, 2018a, 2018b). Bu yöntemin kullanıldığı bir çalışmada üretilen parçada gözenekli yapılar oluşturarak mekanik özellikleri ayarlamak için toz yatağına belirli periyotlarda polimer malzemeler eklenmiştir. Bu çalışma sonucunda üretilen malzemedeki sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerin uygulanan yöntem ile iyileştirildiği görülmüştür. Bu yöntem ile ilgili Şekil 2.5.'te anlatılan teknik ile üretim süreci görülmektedir(Sheydaeian ve Toyserkani,

2018a, 2018b). Yukarıda bahsi geçen şekilde gösterilmek istenen sırasıyla; (a,b) Farklı seramik hacim fraksiyonuna sahip TMC kompozit numunelerinin tasarımının şeması, (c) seramik damlacıkları düzeni ve (d) bir kat kompozit üreten katkı maddesi üreten bir numune (d) .



Şekil 2.5. BJ yöntemine malzeme ekstrüzyonu entegre edilerek yapılan üretim (Sheydaeian & Toyserkani, 2018a, 2018b).

#### 2.4. Binder Jetting Teknolojisinde Üretime Etki Eden Faktörler

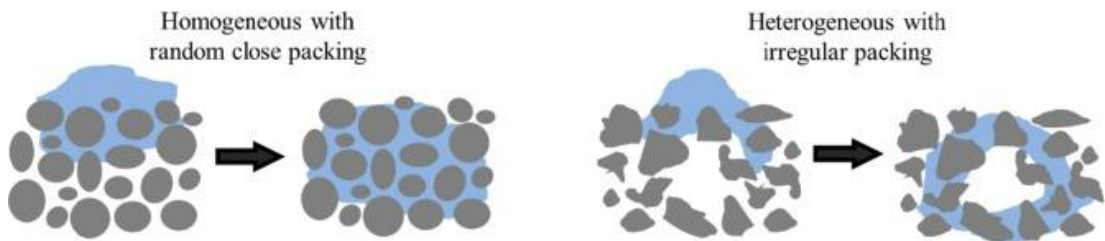
Binder Jetting teknolojisi ile üretilen parçaların özellikleri üzerinde etkili olan pek çok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler genel olarak 4 kategori altında incelenmiştir. Bunlar, Toz parametreleri (ortalama boyut dağılımı, Toz paketleme, akışkanlık ve ıslanabilirlik), Bağlayıcı parametreleri (püskürtülebilirlik, ıslanma davranışı vizkozite ve bağlayıcının uçucuğu) Baskı parametreleri (katman kalınlığı, toz yayma ve baskı hızı, bağlayıcı doygunluğu, kuruma süresi ve ısıtıcı güç oranı, baskı yönü) ve son olarak 3D model tasarım parametreleridir.

### 2.4.1. Toz metalurjisi

BJ üretim yönteminde kullanılan tozların, geometrisi (küresel, prizmatik vb.), boyut dağılımı ve morfolojisi üretilen numunenin ölçü hassasiyetini, yüzey kalitesini ve mekanik dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, bu bölüm içerisinde, BJ üretim yönteminde kullanılan toz malzeme ile ilgili olarak incelenmesi gereken önemli konular tartışılmıştır.

#### 2.4.1.1. Toz şekli

Toz şekli, tozun yayılabilirlik kabiliyeti, toz paketleme yoğunluğu, bağlayıcı penetrasyon süresi ve yoğunluğu gibi nihai parçaya doğrudan etki eden parametreleri etkiler. Baskı esnasında kullanılan toz partiküllerinin şekli küresel olursa tozun yayılabilirlik kabiliyeti ve toz paketleme yoğunluğu artar. Tozlar homojen yapıda dağılacığından toz partikülleri arasındaki boşluklar birbirine yakın olur bu sebeplede bağlayıcı toz tabakasının her yerini eşit miktarda ve eşit süre ile yayılır yayılır. Son olarak küresel toz şekli toz-toz temasını arttıracığından sinterlemeyi kolaylaştırır.



Şekil 2.6. Homojen olarak (solda) ve heterojen olarak (sağda) dağılmış toz yatakları içerisindeki bağlayıcı penetrasyonunun şematik gösterimi (Z. Zhou et al., 2014).

#### 2.4.1.2. Toz boyutu

Toz boyutunun en önemli etkisi tozun akışkanlık kabiliyetindedir. Toz parçacıkları küçüldükçe tozun akışkanlık özeliği azalır. Bununla birlikte toz bağlayıcı etkileşimi artar. Toz boyutunun etkilerinden bir tanesi de katman kalınlığıdır. Katman kalınlığı toz havuzu içerisindeki en büyük toz boyutundan daha büyük olmalıdır. Bu sebeple toz boyutunu küçük olması daha düşük katman kalınlığına ve daha hassas parça

üretimine imkan tanımaktadır. Küçük toz taneleri için bağlayıcı doygunluğu ve sinterlenebilirlik özelliği yüksektir. Toz boyutu arttıkça toz paketleme iyileşir.

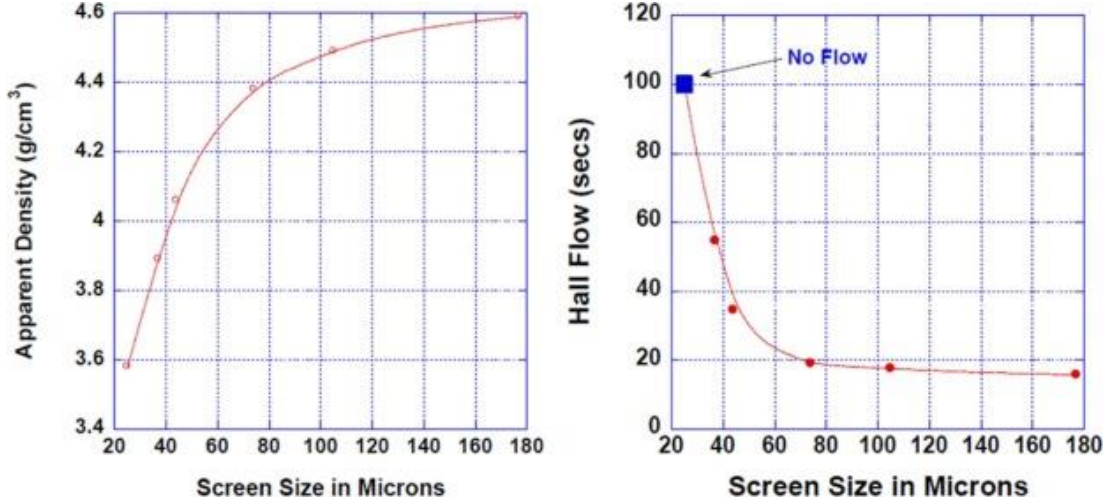
#### **2.4.1.3. Toz paketleme yoğunluğu**

Toz paketleme yoğunluğu, toz tanelerini yerleşimi ve maksimum temas noktalarını ölçmek için kullanılan önemli bir parametredir. Kısaca, silindir aracılığıyla yayılan her toz tabakasının yoğunluğudur. Toz morfolojisi, toz boyutu, partiküller arası kuvvet, toz akışkanlığı ve toz yüzey kimyası paketleme yoğunluğunu etkileyen parametrelerdir(Averardi, Cola, Zeltmann ve Gupta, 2020). Toz paketleme yoğunluğu son parçanın nihai özelliklerini ve geometrik doğruluğunu etkiler. Parça tam yoğunluk için sinterlenecekse çekme miktarını etkiler. Tek boyutlu küresel tozlar için teorik paketleme yoğunluğu, gerçek yoğunluğu yaklaşık %60'ı kadardır.

#### **2.4.1.4. Toz akış yeteneği**

Tozun bir işlem esnasında kendi üzerin hareket etme kabiliyeti kısaca toz akış yeteneği olarak ifade edilebilir. Binder Jetting yönteminde Toz akışı tozların besleme hunilerinden yatağa ve oradan da katmanlar üzerinde yayılırken nasıl hareket ettiğini açıklar. Binder Jetting yönteminde toz akışkanlığı kullanılan tozun düzgün bir şekilde toz yatağı üzerine serilebilmesi için önemli bir faktördür. Tozun akışkanlığı yeterli ise merdane yardımıyla ince ve homojen bir toz tabaksı yaymasını sağlar. Bu sebeple green part üzerinde baskı çözünürlüğü, boyutsal doğruluk ve yoğunluk üzerinde artışa yol açabilir. Toz akışkanlığının kötü olduğu durumda ise toz yatağı üzerine serilen toz katmanlarını pürüzlü olmasına ve homojen olmamasına yol açar.

Toz tanecikleri arasında bulunan van der Waals bağları toz boyutu küçüldükçe artar ve toz akış yeteneğini azaltır. Bu sebeple toz boyutu ve yoğunluğu toz akış kabiliyetini etkileyen kritik faktörlerdendir. Bununla birlikte toz morfolojisi, toz bileşimi, sıcaklık ve çevre koşulları toz akış kabiliyetini etkileyen diğer faktörlerdir.



Şekil 2.7. Toz boyutunun görünür yoğunluğa ve akış kabiliyetine olan etkisinin grafik ile gösterimi (Schade et al., 2014).

#### 2.4.1.5. Tozun ıslanabilirlik kabiliyeti

Binder Jetting yönteminde tozların bağlayıcı ile ıslanabilirliği önemli bir parametredir. Tozun ıslanabilirliği baskı çözünürlüğü green part mukavemeti gibi önemli faktörlere etki etmektedir. Bağlayıcı ile toz arasındaki ıslatma mekanizması çok karışıktır. Küçük toz parçacıklarının ıslanma kabiliyeti çok düşüktür. Islatma miktarının fazla olması ve tozun buna gösterdiği ıslanabilirliğin düşük olması durumunda en küçük parça boyutunu daha da küçültecektir.

#### 2.4.2. Bağlayıcı

Binder jetting teknolojisi ile parça üretimi esnasında toz yatağı üzerine püskürtülerek toz halindeki parçalar arasında boşlukları doldurulmasıyla istenen şekli oluşturduğu için bağlayıcı önemli bir rol oynamaktadır. Burada bağlayıcının en önemli özelliği, basılan green partın yeterli mukavemete sahip olmasını sağlamak ve sinterleme sonrası parça içerisinde minimum kalıntı bırakacak şekilde yanarak malzeme içerisinden atılmasıdır (B. Utela ve diğerleri, 2008). Bağlayıcının, güçlü bağlama özelliği, uygun reoloji, güçlü stabilite, toz yatağına nüfuziyet için yeterli ıslatabilirlik gibi önemli talepleri karşılaması gerekmektedir. Bağlayıcı damlacık boyutu baskı çözünürlüğüne etki eden en önemli parametrelerden biridir (Myers, Paterson, Iizuka ve Klein, 2019).

### 2.4.2.1. Püskürtülen bağlayıcı miktarı

Bağlayıcı ve toz arasındaki ilişki, toz parçacıkları arasındaki bağlanma kuvvetini, parça bütünlüğünü ve yüzey kalitesini belirler. Bağlayıcının baskı kafasından yüksek hızda püskürtülmesi toz yatağını bozarak baskı esnasında hatalara sebebiyet verir. Bağlayıcı miktarının fazla olması bağlayıcıların nüfuziyet özelliklerinden dolayı önceki toz tabakalarını etkileyebilir. Baskı esnasında kılcal etki bağlayıcıların komşu tozlara sızmasına sebep olabilir bu sebeple baskı esnasında optimum seviyede bağlayıcı uygulanması çok önemlidir. Bağlayıcı miktarının optimum seviyeden fazla olması durumunda toz yatağı içerisinde aşırı yayılmalara sebep olur. Bu durum, kötü yüzey kalitesine ve zayıf geometrik doğruluğa sebep olur. Bağlayıcı miktarının optimum seviyenin altında olması durumunda toz katmanları arasında zayıf bağlanmalar neden olur bu da green part üretiminden sonra toz giderme aşamasında veya ikincil işlemler esnasında katmanlara ayrılarak kırılmalara yol açabilir.

### 2.4.2.2. Bağlayıcının püskürtülebilme kabiliyeti

Binder Jetting yönteminde viskozite ve yüzey gerilimi sıvı bağlayıcı davranışı tanımlayan iki ana özelliktir (Dini, Ghaffari, Jafar, Hamidreza ve Marjan, 2020). Viskozite ve yüzey gerilimi aşağıdaki denklemler (Denklem 2.1), (Denklem2.2) kullanılarak gösterilmiştir.

$$Re = \frac{\rho dV}{\eta} \quad (2.1)$$

$$We = \frac{\rho dV^2}{\gamma} \quad (2.2)$$

Burada  $\rho$  sıvının yoğunluğu ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  $V$  hızı ya da hız akış ( $\text{m} / \text{s}$ ), bir  $d$  jeti sıvı veya meme kafası ( $\text{m}$ ) damlacık çapı,  $\eta$  sıvı ( $\text{Ns} / \text{m}$  dinamik viskozitesi olan 2),  $\gamma$  yüzey gerilimidir ( $\text{N} / \text{m}$ ).

Binder Jetting teknolojisi sıvı bağlayıcıyı basınç patlaması ile küçük çapta bir nozuldaki dışarı iterek çalışan yapıya sahiptir. Burada basınç oluşturmanın iki yolu vardır ilk olarak piezoelektrik kristalinin genişletilmesidir ikinci olarak ise sıvının ani kaynatılması ile oluşan termal kabarcık yardımcıdır. Bir sıvının püskürtmeye uygun olup olmadığını belirlemek için viskozitesine ve yüzey gerilimine bakılır. Bir sıvının mürekkep püskürtmeli bir nozuldaki su püskürtme kabiliyeti Ohnesorge sayısı kullanılarak belirlenebilir. Kullanılan denklem, (Denklem 2.3) gösterilmiştir. (Derby ve Reis, 2003).

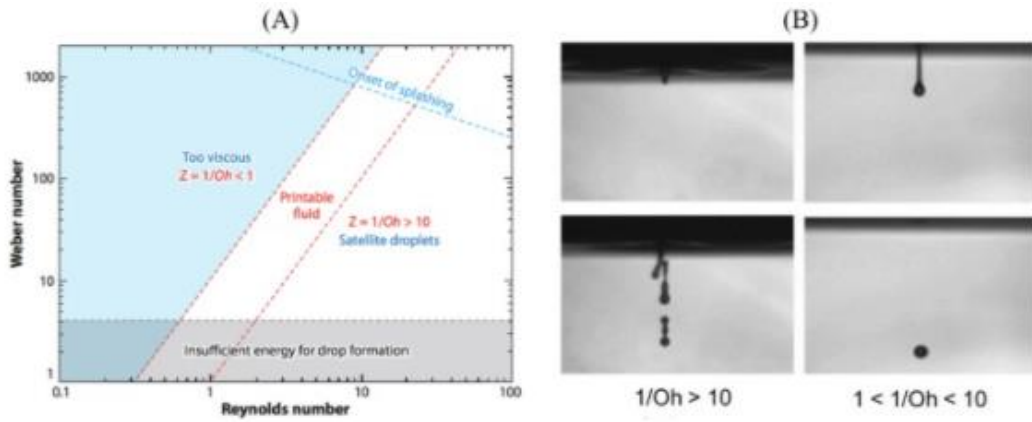
$$1/Oh = \frac{Re}{\sqrt{We}} = \frac{\sqrt{\gamma \rho d}}{\eta} \quad (2.3)$$

Ohnesorge sayısı bağlayıcının ybağlayıcı ile toz partikülü yüzeyi arasındaki yüzey gerilim kuvvetleriyle, viskoz kuvvetleri ilişkilendiren boyutsuz bir sayıdır. Binder Jetting yönteminde kullanılacak sıvı bağlayıcılar için Ohnesorge (Oh) değeri 0.1 ile 1 arasında olmalıdır (Derby, 2010). 1/Oh değeri 1'den küçük olması viskoz kuvvetlerin baskın olduğunu ve püskürtülebilmesi için yüksek basınç gerektirdiğini gösterir. 1/Oh değerinin 10'dan büyük olması durumunda ise viskoz kuvvetlerin çok düşük olduğunu bu sebeple nozul ucunda sürekli istenmeyen damlaların oluşmasına sebep olur. Bu sebeple 0.1 ile 1 arasında olmayan Oh değeri için sıvı bağlayıcı püskürtülemez.

Nozuldaki sıvı ve hava arasındaki yüzey gerilimi damlacık oluşumunu etkileyen bir faktördür. Bu sebeple damlacık oluşumunun sağlanabilmesi için damlanın yeterli fırlatma enerjisine sahip olması gereklidir. Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada Weber sayısının 4 ten fazla olması gerektiği tespit edilmiştir (Duineveld ve diğerleri, 2002).

Bağlayıcının püskürtme esnasındaki toz yatağı üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Baskı esnasında bağlayıcı sıvı farklı nozullardan püskürtülerek toz katmanı üzerinde biriktirilir. Bağlayıcının püskürtülmesi esnasında sıçralamaların meydana gelmesi yüksek yüzey pürüzlülüğüne yol açar. Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada elde edilen bir denklem ile düz ve pürüzsüz bir yüzey elde edebilen 50 adet sıçrama eşiği önerilmiştir (Song ve Nur, 2004).

$$f(R) = We^{1/2} \cdot Re^{1/4} \quad (2.4)$$



Şekil 2.8. Bağlayıcının püskürtülme kabiliyetini anlatan şematik gösterim (Derby & Reis, 2003).

Yukarıda şekilde sırasıyla gösterilmek istenen; (A) Weber ve Reynolds sayılarına göre sıvılar için püskürtülebilir bölge (Derby & Reis, 2003). (B)  $(1 / Oh)$  oranının etkisini gösteren karışımların püskürtülme görüntüleri (Noguera et al., 2005).

Sıçramayı etkileyen faktörleri araştıran bir diğer makalede ise damlacık yoğunluğunun, damlacık hızının ve damlacık hacminin sıçrama davranışı için olan etkisi kanıtlanmıştır. Ayrıca Weber sayısının maksimum 50 olmasının gerektiği anlaşılmıştır aksi takdirde sıçramaların ciddi anlamda artacağı belirtilmiştir. Ohnesorge numarası damlacıkların püskürtücülerin ve sıvıların boyutlarıyla ilgili fiziksel özellikleri yatsızsana hızdan bağımsızdır ve bu nozuldan çıkan bağlayıcının davranışı yoluyla püskürtme sürecini tanımlamak için kullanılır.

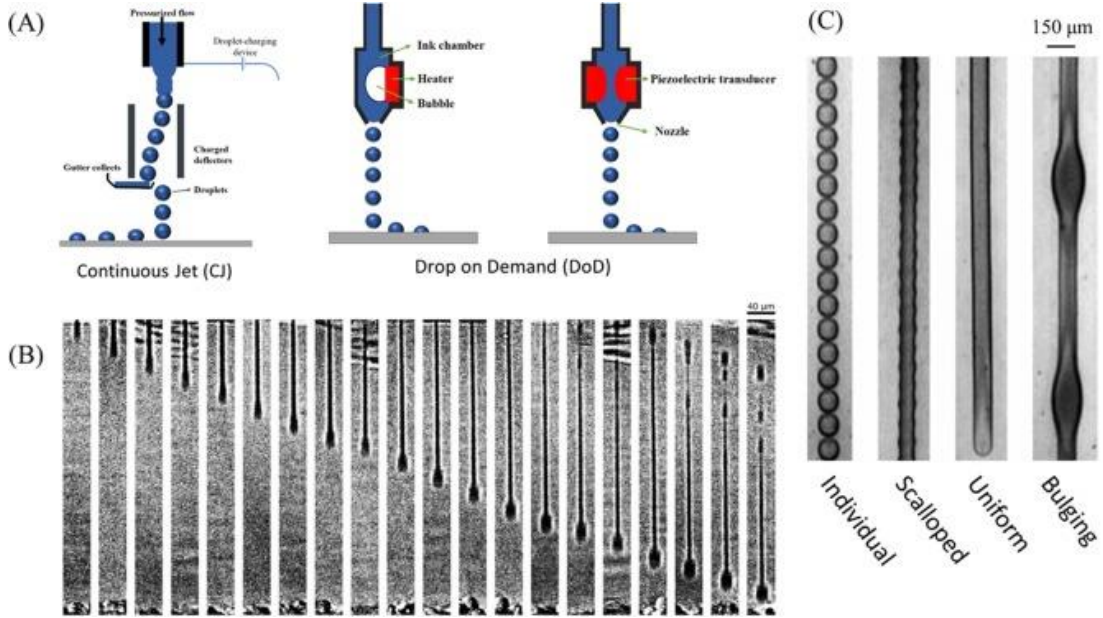
### 2.4.2.3. Baskı kafası türleri ve damla oluşumu

- Baskı Kafası Türleri

Binder Jetting yöntemiyle bağlayıcıların püskürtülmesi için genel olarak Drop-on Demand (DOD) ve Continuous-Jet (CJ) olmak üzere iki tip baskı kafası kullanılmaktadır (Şekil 2.9.). DOD baskı kafası sistemi ihtiyaç halinde damla oluşumu sağlayarak çalışır. DOD baskı kafası sisteminin piezoelektrik ve termal püskürtme



kafaları olmaz üzere iki farklı türü bulunmaktadır. İlk durum için küçük bir bölmenin şekli piezoelektrik olarak değiştirildiği için mürekkep damlaları oluşmaya başlar (Şekil 2.9.) (Pond, 2000). Mürekkebin reolojik özelliği püskürtülebilir mürekkep oluşturmak için ihtiyaç duyulan tek şey olduğundan piezoelektrik kafalar mürekkep gelişimini kolaylaştırabilir. Termal mürekkep püskürtme kafalarında ise sıvı bağlayıcı buharlaşır ve sonrasında oluşan hacim değişikliği baskı kafasından mürekkebin püskürtülmesine sebep olur (Kwon ve Kim, 2007; Pond, 2000). Termal mürekkep püskürtmeli yazıcılar için, baskı sırasında en önemli kriter buharlaşan sıvının hızla çözülmesi ve sıvı bağlayıcının baskı kafasında süreksizliğin olabilmesidir.



Şekil 2.9. Damlacık oluşumunun şematik gösterimi (Mojaba Salehi, Manoj Gupta, Saeed Maleksaeedi, n.d.).

Yukarıdaki şekilde sırasıyla gösterilmek istenen; (A) DOD ve CJ baskı kafalarının çalışma prensiplerini gösteren şematik gösterim (Mojaba Salehi, Manoj Gupta, Saeed Maleksaeedi, n.d.). (B) Yüksek hızlı senkrotron x-ışını görüntüleme tekniği kullanılarak iki ardışık bağlayıcı damlacığının şeklini gösterir (C) Damlacık oluşumunun farklı modları.

Continuos Jet (CJ) baskı kafalarında damlacık oluşumu sürekli olarak sağlanır. DOD baskı kafasına kıyasla daha yüksek baskı oranlarına ulaşabilirler. Ayrıca mürekkebin endüktif olarak yüklenebilir olması gereklidir, yani kısaca yazıcı kafası sıvı bağlayıcı

biriktirmediginde damlalar farklı bir oluğa yönlendirilebilir (Pond, 2000). Continuous Jet (CJ) baskı kafaları DOD baskı kafaları ile karşılaştırıldığında daha yavaş hareket hızı baskı kafasından bağlayıcı sızıntısının olmaması ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi sebebiyle ümit verici bir yöntemdir.

#### - Damla Oluşumu

Damla oluşumu ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır (Martin, Hoath ve Hutchings, 2008; Wagner, Shu, Kilambi, Fred ve Iii, y.y.). Damla oluşumunun incelenmesi için yüksek hızlı kameralar kullanılmıştır (Hutchings, Martin ve Hoath, 2007). Bu sayede damlacık hızı, yanal sapmalar ve kuyruk genişliği dalgalanmaları gibi bilgiler elde edilebilir. Geometrik doğruluğun sağlanabilmesi için oluşturulan damlacık toz yatağı üzerine yeterli miktarda bağlayıcı yaymalı ve püskürtülen bağlayıcı toz yatağı üzerinde istenilen alana doğru bir şekilde yerleştirilmelidir. Bağlayıcı püskürtme işlemiyle toz yatağına çarpan bağlayıcı toz kümeleri oluşumunu sağlar.

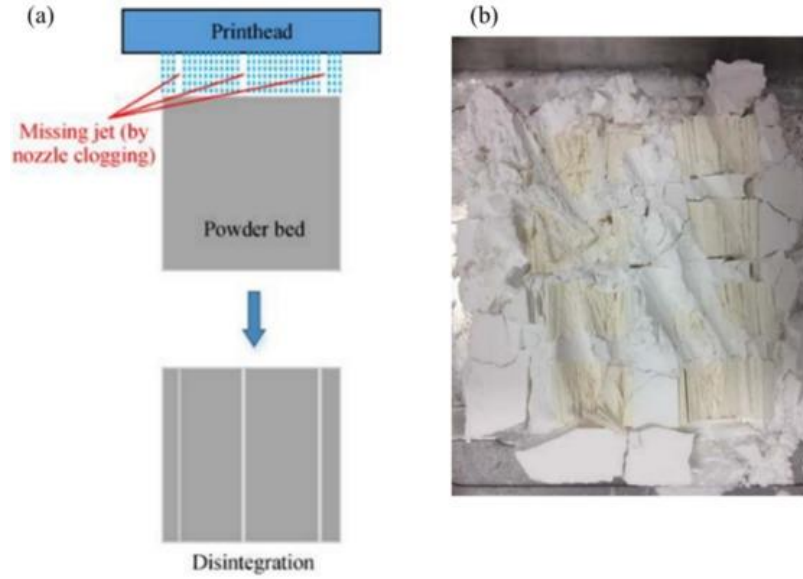
Yapılan başka bir çalışmada, damlacık oluşumunu görüntüleyebilmek için senkrotron x-ışını görüntüleme tekniği kullanılmıştır (B. Utela ve diğerleri, 2008). Ayrıca DOD baskı kafasına sahip Binder Jetting yazıcı ile piezoelektrik kullanılarak damlacık bağlayıcı oluşumu sağlanmıştır. Şekil 2.9.'da gösterildiği üzere art arda oluşan bağlayıcı damlacıkları, püskürtülen bağlayıcı damlacıklarının, uzun, dar bir kuyruğu olan kafa sıkışması nedeniyle küresel kafa şekline sahip olduğunu gösterdi. Damlacık kafasının silindirik olduğu ve baskı kafasından uzaklaştıkça küre şekline dönüştüğü görüldü. Her kuyruğun ucuna yakın birkaç küçük damlacık görüldü ve bunlar ana damlacığa göre önemli ölçüde sapma göstermiştir. Bu durum, binder Jetting yöntemiyle üretilen parçalarda geometrik bozukluklara sebep olabilir.

#### - Bağlayıcıların reaktivitesi

Binder Jetting tipi 3D yazıcılarda bağlayıcının besleme tankından baskı kafasına giderken reaktivitesi en önemli özelliklerden biridir. Öncelikle bazı bağlayıcılar taşıyıcı borularla ve nozul odasıyla reaksiyona girerek aşınmalara yol açabilir. Bu

sebeple ilk olarak kullanılacak bağlayıcının reaktifliği dikkate alınmalıdır. Nozullardan geçen aşırı reaktif sıvı bağlayıcının hızının yüksek olması sebebiyle, nozullarda aşınmalar meydana gelerek, arızalara sebebiyet verebilir. Bağlayıcının nozul açıklığında buharlaşarak bir tıkanmaya sebep vermemesi için atmosferde stabil olmalıdır. Ayrıca bağlayıcının yazdırma veya bakım esnasında nozull uçlarını silmek amacıyla kullanılan herhangi bir temizlik sıvısıyla veya malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Nozul çaplarının çok küçük olması sebebiyle bağlayıcının herhangi bir reaksiyonu nozul uçlarını tıkayabilir (B. Utela ve diğerleri, 2008).

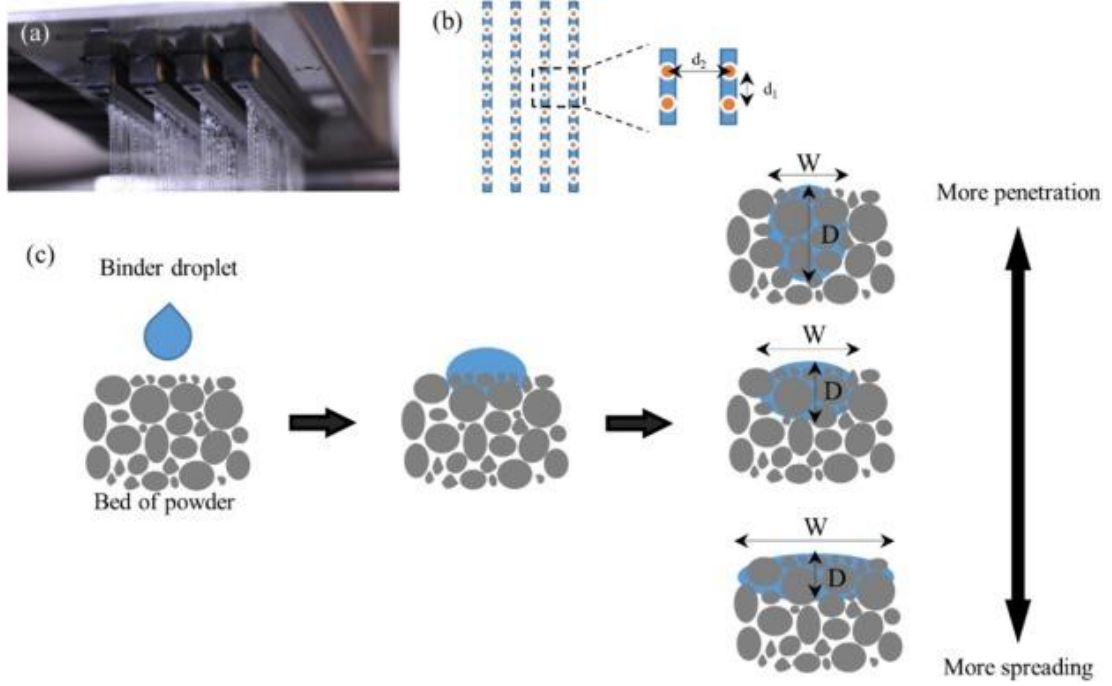
Binder Jetting teknolojisi için yeni bağlayıcıların geliştirilmesindeki en yaygın problem baskı kafalarının tıkanmasıdır. Kullanılan çoğu bağlayıcı, baskı hızı ön planda tutulduğundan termal olarak etkinleştirmeye kullanılır. Bu durum sıvı bağlayıcının buharlaşmasını arttırarak bağlayıcının vizkozite değerini etkiler. Bununla birlikte baskı kafasında bulunan nozul çaplarının çok küçük olmasından dolayı nozul ucunda kesme etkisi daha fazla görünmektedir. Bu durum tıkanmayı daha da arttırmaktadır. Baskı esnasında herhangi bir nozulun geçici olarak tıkanması eksik baskı problemlerine ve hatalı parça üretimine yol açar. Bahsedilen problemin bir örneği Şekil 2.10.'da gösterilmiştir. Bahsi geçen şekilde gösterilmek istenen sırasıyla; (a) Nozul tıkanmasından dolayı meydana gelen baskı kusurları ve (b) green part'ın yapısını korumak için yeterli mukavemete sahip olmadığını ve delaminasyon kusurlarından dolayı green partın dağıldığı gösterilir (Miyanaşi, Orth, Akbar ve Yang, 2018).



Şekil 2.10. Nozulun geçici olarak tıkanmasıyla oluşan baskı bozukluklarının gösterimi (Miyanaşi, Orth, et al., 2018).

#### 2.4.2.4. Damlacık aralığı / satır aralığı

Damlacıkların desen stratejilerini ve iniş pozisyonunu etkileyen özellikler; biriktirme hızı veya baskı kafası hızı, damla damla mesafesi ( $d_1$ ), satır aralığı ( $d_2$ ), bağlayıcının toz yatağındaki yayılma hızı şeklinde sıralanabilir ( $d_1$  ve  $d_2$  Şekil 2.11.'de gösterilmiştir) (Lanzetta ve Sachs, 2003). Sıvı bağlayıcının toz yatağına akışı kapiler basınç veya yerçekimi nedeniyle meydana gelir ve basınç değeri eşitlenene kadar devam eder. Tek damlacığın doymuş alan örneği Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Bahsi geçen şekilde anlatılmak istenen sırasıyla; (a) Bağlayıcı püskürtülmesini gösteren bir baskı kafası, (b) baskı kafasında bulunan nozulların yakından görünümü ve (c) toz yatağında meydana gelen bağlayıcı damlacık penetrasyonu gösterilir. Bu durum penetrasyon derinliği, bağlayıcı yayılımı, partikül boyutu dağılımı, toz morfolojisi, toz parçacıklarının yüzey kimyası, toz paketleme yoğunluğu, bağlayıcı hızı ve kimyası, toz sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Binder jetting teknolojisi ile baskı esnasında oluşturulan katmaların birbirleriyle bağlanması için katman aralığının yeterince düşük olması gereklidir (O.A. Basaran, 2002). Damlacık penetrasyonu, minimum parça çözünürlüğünü ve boyutsal doğruluğu etkilemektedir. Bağlayıcının toz yatağındaki dağılımı, basılan numunelerin mukavemetini ve sinterlenen parçaların mikro yapısını etkilemektedir.



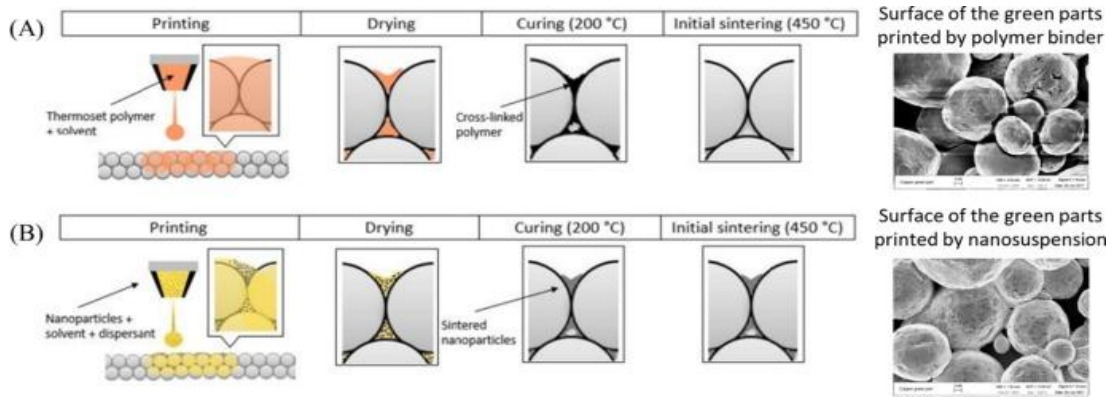
Şekil 2.11. Bağlayıcının püskürtülmesi ve toz yatağı bağlayıcı etkileşiminin şematik gösterimi.

Satır aralığının küçük olması binder jetting işleminde baskı süresini artırır aşırı doygunluk ve yüzey kalitesi açısından da olumsuz davranış sergiler. Satır aralığının fazla olması halinde ise satırlar arasında marjinal dikişlere sebep olur (Colton, Liechty, Mclean ve Crane, y.y.). Yapılan bir çalışmada birbirine daha yakın mesafede biriken damlacıklar kullanılarak daha temiz bir çizgi segmentinin tanımlanabileceği gösterilmiştir (Lanzetta ve Sachs, 2003). Ancak küçük damla aralığı geniş çaplı çizgiler oluşturarak baskının çözünürlüğünü düşürür. Bu sebepler yüksek geometrik doğruluk, yüksek parça çözünürlüğü ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için baskı işleminden sonra ısıtma işlemi ile aşırı bağlayıcının önlenmesi gereklidir (Peter Baker, 1997).

#### 2.4.2.5. Hibrit bağlayıcı kullanımı

Farklı toz karışımları yoğunlaştırmayı ve nihai özellikleri etkileyebilir. Toz morfolojisi, toz boyutu ve dağılımı toz parçacıklarının hareketliliğini etkiler. Bunlara ek olarak bağlayıcı ile toz partikülleri arasında bağlayıcının toz yatağına çarmasıyla paketlenme yoğunluğunu etkileyen güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada binder jetting ile parça üretimi esnasında toz ayrışımını azaltmak amacıyla

hibrit bir bağlayıcı sistemi kullanılmıştır (Maleksaeedi, Meenashisundaram, Lu, Salehi ve Jun, 2018). Baskı esnasında ayrılmaya sebep olan 2 veya 3 farklı toz tipinin kullanılması yerine bağlayıcı içerisine ince parçacıkların eklenmesi incelenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda metal tozlarını birbirine yapıştırmak için bağlayıcı olarak nanopartikül süspansiyonları kullanılmaya çalışılmaktadır. Polimerik bağlayıcılarda nano ölçekli parçacıkların kullanılması green part yoğunluğunun artırılmasında etkili olmaktadır. Yapılan başka bir çalışmada CAO bazlı seramiğin 3 boyutlu baskısı esnasında nanozircnia bağlayıcı süspansiyonunun kullanılması doğrusal büzülmeyi arttırdığı gözlemlenmiştir (Zhao, Ye, Fan ve Wang, 2017). Son yıllarda yapılan başka bir çalışmada ise Binder jetting teknolojisinde nanopartikül kullanımının etkisi incelenmiştir (Bai ve Williams, 2017, 2018a, 2018b). Şekil 2.12.'de görüldüğü üzere (A), bazı binder jetting sistemlerinde solvent bazlı bağlayıcılar kullanılmıştır. Genellikle bağlayıcı her katmana püskürtülür ve ardından solventi aktif ederek parça içerisinden uçurulur. Baskı işlemi tamamlandıktan sonra üretilen parça sertleştirilmek üzere fırına taşınır. Green partın ve sintelenmiş parçanın mekanik özelliklerinin artırılması için bağlayıcılarla birlikte nano partikül süspansiyonları da kullanılmıştır. Nanopartiküller basılmış parçanın green part yoğunluğunun ve mekanik mukavemetinin artırılması imkanına sahiptir. (Şekil 2.12.). Ayrıca nanopartikül süspansiyonunun metal bağlayıcı olarak kullanılması, partikülleri dağıtma zorluğu ve süspansiyondaki malzemelerin kapatılması gerekliliği ve binder jetting baskısı esnasında bağlayıcı çökmesi ve nozüllerin tıkanması nedeniyle mümkün görünmemektedir.



Şekil 2.12. Hibrit bağlayıcı kullanımının toz taneleri üzerindeki etkisinin şematik gösterimi (Bai & Williams, 2017, 2018).

#### 2.4.2.6. Bağlayıcı ve toz yatağı arasındaki etkileşim

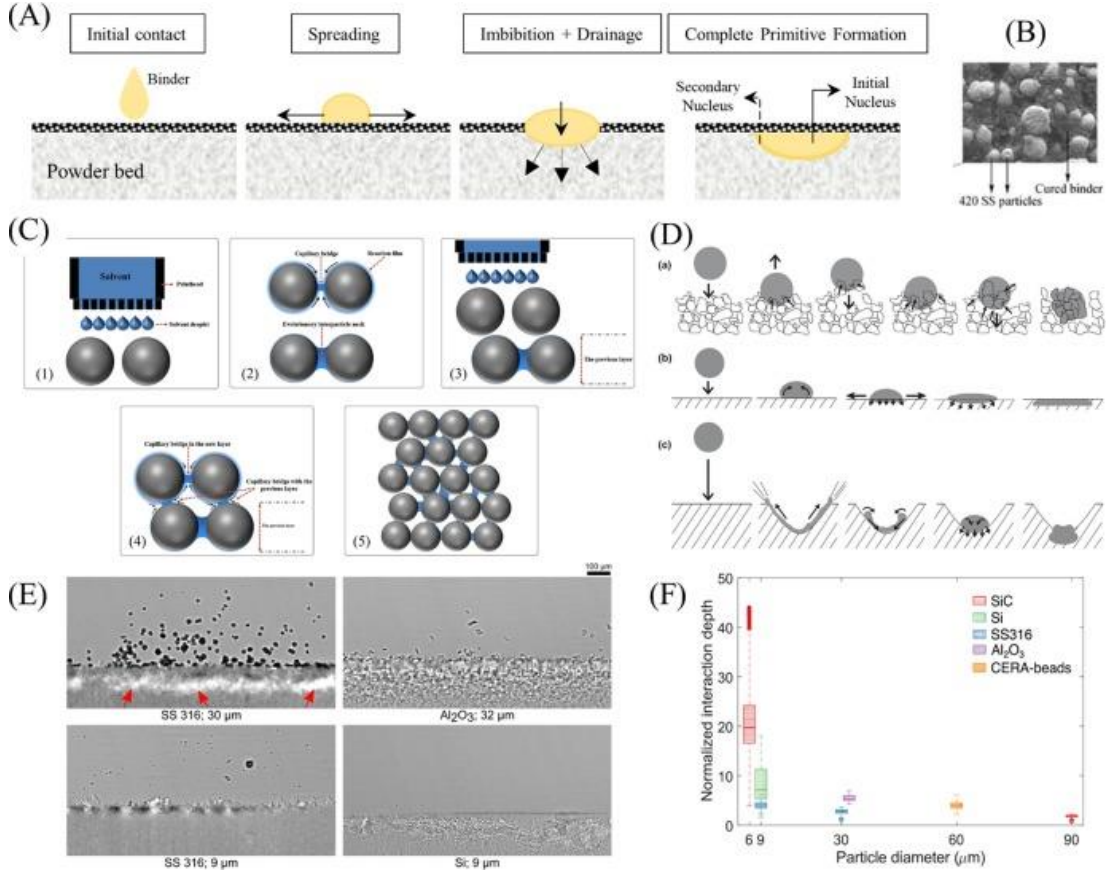
Binder jetting işlemi esnasında bağlayıcı ve toz yatağı arasındaki etkileşim geometrik doğruluğu yaşıllık parça mukavemetini ve nihai yüzey pürüzlülüğünü kontrol eder (Bai, Wall, Pham, Esker ve Williams, 2019). Sıvı bağlayıcının nozüllerden püskürtülmesi sonrasında toz yatağındaki bağlayıcı damlacıklarının çarpma, yayılma ve penetrasyon süresi gibi bir dizi sızma kinetiği oluşur (Aglan, y.y.).

Genellikle sıvı bağlayıcı bir baskı kafası yardımıyla toz tabası üzerine püskürtülür. Bağlayıcı toz yatağıyla temas ettiğinde toz yatağı yüzeyini ıslatır ve bağlayıcı damlacığı bir ilk çarpma hızına sahiptir. Bu aşamada bağlayıcı, toz yatağı üzerine yayılan bağlayıcı damlacıklarının kinetik enerjilerinin de etkisiyle bitişik toz parçacıklarını birbirine bağlayan sıvı köprü ağların oluşumunu sağlar. Bu işlem mikrosaniye mertebelerinde gerçekleşir. Daha sonra, sıvı bağlayıcı toz yatağına iyice nüfuz eder. Toz ve bağlayıcı arasındaki etkileşim davranışı, özellikle sıvı bağlayıcı viskozitesi, sıvı bağlayıcı-toz malzeme temas açısı ve yüzey gerilimi gibi toz yatağı ve bağlayıcının kendine özgü özellikleri ile kontrol edilir (Şekil 2.13.). Sıvı bağlayıcıya etki eden yerçekimi parametresi çok küçük seviyelerde olduğu için damlacık penetrasyonu üzerinde ihmal edilebilir (Miyanaji, Orth, ve diğerleri, 2018). Denge durumuna gelindiğinde yazdırılan alan homojen olarak doyurulmuş olur. Green part kalitesinin sağlanması için bağlayıcının toz katmanı içerisine yeterli penetrasyonunun sağlanması gereklidir. Bunun için de yeterli miktarda bağlayıcı kullanılması önemlidir. Baskı esnasında sıvı bağlayıcı damlacığının sürekliliği Green part mukavemetini ve parçanın bütünlüğünü etkilediği için oldukça önemlidir.

Aşağıdaki şekilde sırasıyla gösterilmek istenen; (A) BJ yönteminde bağlayıcı ile toz yatağı arasındaki etkileşimin şematik gösterimi (Bai et al., 2019). (B) Bağlayıcının toz tanecikleri arasında dağılımı (Miyanaji, Orth, et al., 2018). (C) BJ işlemi sırasında bağlayıcı-toz etkileşiminin detaylı gösterimi (Salehi et al., 2019). (D) Granül oluşum mekanizmasının şematik gösterimi: (a) tünel açma, (b) yayılma ve (c) krater oluşumu (Emady et al., 2011, 2013). (E) Toz partiküllerinin püskürtme davranışı ve toz yatağı



yüzeyinin altında gözeneklerin oluşumu (F) toz boyutuna bağlı olarak normalleştirilmiş etkileşim derinliği (Parab et al., 2019).



Şekil 2.13. Bağlayıcı ile toz tanecikleri arasındaki etkileşimin şematik gösterimi.

Toz partikülleri içerisinde ıslatılmayan toz parçacığı boyunca dahili mikroskobik yüzeyin varlığından dolayı toz yatağı yüzeyi ile bağlayıcı damla arasındaki etkileşiminin ölçülmesi zordur bu nedenle teorik modelin doygunluk seviyesi olduğundan fazla olarak düşünülebilir.

Ayrıca, gerçek bağlayıcı penetrasyon derinliği/alan istenen bağlayıcı doygunluk seviyesinde ve baskı çözünürlüğünde başka olası eşitsizliğe yol açan toz yatağı üzerindeki püskürtülmüş bağlayıcı damlasının çekme alanına uymayabilir (Oostveen, Meesters ve van Ommen, 2015). Şekil 2.13.'de gösterildiği üzere tek damlalar toz yataklarını etkilediğinde üç farklı granül oluşum mekanizması meydana gelebilir. Tünel açma mekanizması ince ve kohezif tozlar için meydana gelir. Bağlayıcı



damlacığı toz yatağına girerken her taraftan gevşek tozları çeker ancak bazı tozların tam olarak nüfuz etmemesinden dolayı çukurluklara sahip küresel granüller oluşturulur. Yayılma ve krater mekanizmaları kaba ve serbest akışlı tozlar için gerçekleşir. Yayılma esnasında toz yatağı yoğunsa ve düşük hızlı bir bağlayıcı toz yatağını etkilerse, toz yüzeyi boyunca yassı diskler olan granüller oluşturularak yayılma işlemi gerçekleşir. Yapılan bir çalışmada toz yatağına yüksek hızlı damlacık düşüşü krater oluşumuna sebep olduğu belirtilmiştir (Emady, Kayrak-Talay ve Litster, 2013; Emady, Kayrak-Talay, Schwerin ve Litster, 2011). Ayrıca yüksek damlacık hızı, bağlayıcı doyumluğunuda etkilemektedir. Başka bir çalışmada damlacık hızının 3m/s den 9m/s ye arttırıldığında bağlayıcı doyumluğunun %73 ten %48'e düştüğünü tespit etmiştir (Colton ve diğerleri, y.y.).

Yapılan son çalışmalarda binder jetting ile 3B baskı esnasında toz ve bağlayıcı arasındaki etkileşimi daha iyi anlamak için yüksek hızlı x-ray görüntüleme sistemi kullanılarak anlık görüntüler alınmıştır (Parab ve diğerleri, 2019). Alınan görüntülerin incelenmesiyle toz parçacıklarının boyutuna, şekline ve malzemesine bağlı olan etkileşim derinliği ve toz yatağı üzerinden tozun fırlaması olmak üzere iki kritik konu ele alınmıştır. Yüksek hızlı bir bağlayıcı damlacığı toz yatağına çarptığında ve toz parçacıklarının üst yüzeyden fırlamasına neden olduğunda etkileşim derinliği meydana gelir. Ayrıca bağlayıcıdan toz parçacıklarına aktarılan momentum, toz yatağında değişikliklere neden olabilir. Şekil 2.13.'de görüldüğü üzere ortaya çıkan toz bağlayıcı etkileşimi, basılı parçalarda alt yüzey gözeneklerinin oluşmasına yol açar bu nedenle, basılı katmanlar arasında sürekli bir boşluk görülebilir. Bu problem, bağlayıcının penetrasyon süresinde artışa sebep olabilir. Ayrıca katmanlar arası boşlukları ortadan kaldırmak için z yönünde daha fazla büzülme meydana gelir. Püskürtülen toz kusur oluşumunu farklı şekillerde etkileyebilir. Püskürtülen tozların boyutu büyükse ve oluşan boşluk sonraki katman tarafından yeniden doldurulamazsa, ortaya çıkan 3 boyutlu parçada büyük gözenekler görülür. Akışkanlığı yüksek tozlar toz yatağı yüzeyine kolaylıkla püskürtülür. Püskürtülen toz, çeşitli pozisyonlarda rastgele yerleşebileceğinden, en son katmanın yüzeyini olumsuz etkileyerek geometrik bozukluğa veya yüzey pürüzlülüğüne yol açabilir. İnce toz partikülleri için ard arda gelen bağlayıcı damlacıkları toz katmanı üzerine püskürtülürken birleşerek büyük

parçacıklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.13.'de görüldüğü üzere toz parçacık boyutu azaldıkça etkileşim derinliğinin artmaktadır. Ayrıca düzensiz şekilli tozlarla küresel tozlar kıyaslandığında etkileşim derinliğinin düzensiz şekilli tozlarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum açılmal parçacıklar arasında daha yüksek mekanik kenetlenme etkisi ile ilişkili olabilir. Bir toz ortamının ıslatılması, damlacık geri tepmesi, damlacık yayılma kalınlığı, damlacık yayılma çapı ve damlacık penetrasyon süresi hakkında ayrıntılı bilgi için bu referanslar incelenebilir (Ashoke Raman, Jaiman, Lee ve Low, 2016; Emady ve diğerleri, 2013, 2011; Forný, Marabi ve Palzer, 2011; Marston ve diğerleri, 2013; Marston, Thoroddsen, Ng ve Tan, 2010; Mundozah, Cartwright, Tridon, Hounslow ve Salman, 2018; Nguyen, Shen ve Hapgood, 2009; Oostveen ve diğerleri, 2015; Schaafsma, Vonk, Segers ve Kossen, 1998; Weber, Briens, Berruti, Chan ve Gray, 2006).

Yapılan başka bir çalışmada, darbeye bağlı yayılma aşamasının sonunda bağlayıcı damlacık ile toz yatağı arasındaki etkileşim incelenmiştir (Miyanaji, Momenzadeh ve Yang, 2019). Küçük partiküllerden oluşan toz yatağının darbeye tahrik edilen yayılma aşamasının sonunda daha büyük yayılma çapına yol açacağı gösterilmiştir. Toz yatağındaki damlacıkların yayılma çapı artan ortalama parçacık boyutu ile azalırken bunun aksine damlacık penetrasyonunun nihai derinliği artar. Toz yatağı ve bağlayıcı arasındaki bu tür etkileşim özellikleri yüzey pürüzlülüğünün ve gözenek morfolojilerinin değişmesiyle ilgili olabilir. Ek olarak ince tozlardan parça üretiminde daha yüksek geometrik doğruluk ve daha pürüzsüz yüzey elde edilmiştir.

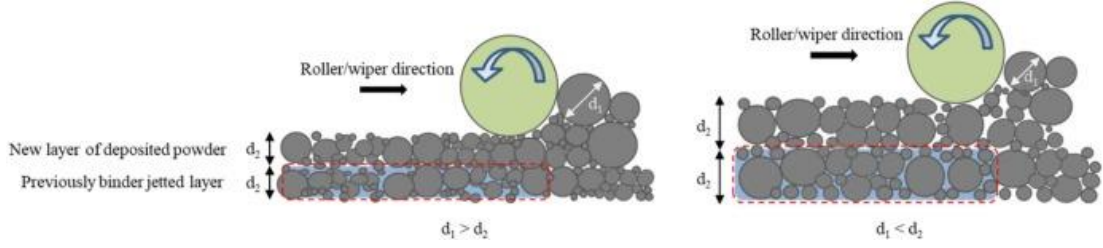
### **2.4.3. Baskı parametreleri**

BJ yöntemi ile üretim sırasında etkili olan ve ürün kalitesini doğrudan etkileyen üretim parametreleri bu kısımda açıklanmıştır.

#### **2.4.3.1. Katman kalınlığı**

Baskı esnasında Z eksenini boyunca oluşturulan toz yatağı yüksekliği katman kalınlığı olarak tanımlanır. Katman kalınlığı 0.0889 mm ile 0.2286 mm arasında olabilir.

Katman kalınlığı azaldıkça baskı süresi uzar ancak bununla birlikte parça daha ince katmanları yazdıracağında yüzey kalitesi artar. Şekil 2.5.'te de görüldüğü düşük katman kalınlığı yüksek nihai çözünürlük olarak tanımlanabilir. Mümkün olan en küçük katman kalınlığında baskı işlemini yapmak mantıklı görünse de işlem süresini uzattığı için optimum kalınlık tercih edilmelidir. Katman kalınlığı genel olarak beklenen çözünürlüğe ve boyutuna göre belirlenir. Referanslarda katman kalınlığı genel olarak toz boyutuna oranla belirtilmiştir. Toz boyutunun üç katı, iki katı ve en büyük toz boyutunda olacak şekilde katman kalınlıkları ile ilgili çeşitli bilgiler bulunmaktadır (Butscher ve diğerleri, 2013; Lu ve Reynolds, 2008; Nandwana ve diğerleri, 2017; Sachs EM, 2003; B. R. Utela, Storti, Anderson ve Ganter, 2010; Z. Zhou, Mitchell, Buchanan ve Dunne, 2013). Buradan da anlaşılacağı üzere katman kalınlığı maksimum toz boyutundan büyük olmalıdır (Simchi, 2004; Sutton, Kriewall, Leu ve Newkirk, 2016). Katman kalınlığının artırılması paketleme yoğunluğunu düşürür. Bu durum Şekil 2.14.'da görüldüğü üzere bağlayıcının uygulanmasından önce tabaka kalınlığının toz yatağı yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu konuyla ilgili yapılan başka bir çalışmada katman kalınlığının paketleme yoğunluğu üzerindeki etkisi ve bunun sonucunda Binder Jetting ile üretilen alumina/cam kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir ve benzer sonuçlar elde edilmiştir (W. Zhang, Melcher, Travitzky, Bordia ve Greil, 2009). Çalışmada ortalama toz boyutu 35 µm ve katman kalınlığı 100 µm olarak kullanılmıştır (Mostafaei, Toman, ve diğerleri, 2017; Shrestha ve Manogharan, 2017). Toz boyutu parça ihtiyacına karşılamak için belirlenen katman kalınlığına göre seçilmesi gereklidir. Toz boyutu, parça özellikleri ve boyut kabiliyeti noktasında önemli bir kriterdir. Ayrıca toz boyutu dağılımı katman kalınlığı oluşumu esnasında tozun akışkanlığını da etkiler. Toz katmanı içerisindeki daha küçük toz parçacıklarının bulunması paketleme yoğunluğuna katkıda bulunur. Bununla birlikte üretilen parçanın yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında etkisi vardır ancak topaklanma eğilimi ince toz partiküllerinin kullanımını kısıtlamaktadır (Cooke ve Slotwinski, y.y.; Hoffmann ve Finkers, 1995; Spierings ve Levy, y.y.).



Şekil 2.14. Katman kalınlığının ve parçacık boyutunun toz yatağı yoğunluğuna olan etkisinin şematik gösterimi.

Sonuç olarak daha yüksek paketleme yoğunluğu yüksek green part yoğunluğuna sebep olacağından bu durumda sinterleme sonra büzülmenin iyileştirilmesi konusunda katkı sağlamaktadır. Örneğin; %40 green part yoğunluğuna sahip bir parça, tam yoğunlaştırma sırasında boşlukları ve gözenekleri kaldırmak için büzülür (A. M. Elliott, Nandwana, Siddel ve Compton, 2016). Aynı toz boyutu dağılımıyla küresel toz şeklindeki gaz otomize toz, düzensiz toz şekline sahip su atomize toz ile karşılaştırıldığında daha yüksek green part yoğunluğuna sahiptir (Mostafaei, Toman, ve diğerleri, 2017). Şekil 2.14.'da görüldüğü üzere katman kalınlığının boyutsal çözünürlük üzerindeki etkileri bulunmaktadır. Burada daha kalın bir katman daha zayıf bir boyutsal çözünürlüğe ve toleransa yol açar. Şekil 2.14.'da Farklı bir katman kalınlığında dilimlenmiş bir küre gösterilmektedir. Oluşturulan katman kalınlıklarının hiçbiri dış yüzeyin tam eğriliğini oluşturmuyor. Ancak, daha küçük katman kalınlığı eğriliğe daha yakın bir uyum sağlar.

#### 2.4.3.2. Toz yayma ve baskı hızı

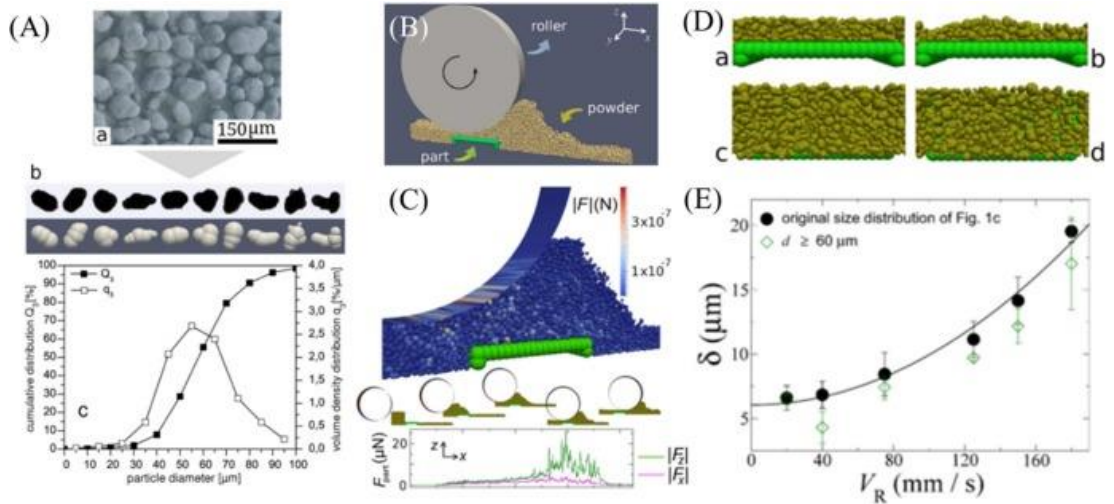
Toz yayma hızı da katman kalınlığı gibi talep edilen parça özelliklerini ve maliyet hedeflerini karşılamak için dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. Toz yayma hızı belirli parametrelerin bir araya gelmesinden oluşur bunlar; yeniden kaplama hızı (mm/s), osilatör hızı (rpm), silindir hızı (rpm) ve silindir dönüş (mm/s) hızıdır (Mendoza Jimenez ve diğerleri, 2019; Mostafaei, Stevens, ve diğerleri, 2016). Yazıcı tipine ve toz serpmeye sistemine göre üreticilerin ihtiyaç duyduğu parametrelerdir. Bu parametrelerin koordinasyonunu sağlamak parçanın üretkenliğini korurken aynı zamanda tutarlı bir parça olmasını sağlar.

Merdane hareket hızı, tozun yatak üzerine yayılması için merdane hızını belirleyen bir giriş parametresidir (0.1 ile 16 mm/sn arasında değişir). Merdane hızının 4mm/sn'den büyük olması durumunda homojen olmayan bir toz yatağına sebep olduğu görülmüştür. Bu şekilde parça üretimi tamamlandıktan sonra katmanların ayrıldığı ve parça bütünlüğünün sağlanamadığı görülmüştür. Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada toz yayma 6mm/sn ile 14 mm/sn hızları arasında gerçekleştirilmiştir (Kumar ve diğerleri, 2017)(Shrestha ve Manogharan, 2017). Çalışma sonucunda 6mm/sn hızda daha yüksek hassasiyette parça üretimi gerçekleşmiştir. 6mm/sn den daha yavaş toz yayma hızlarında hassasiyetin daha da yükselmesi beklenmektedir ancak buradaki dezavantaj imalat süresinin uzamasıdır. Bu sebeple optimum hız belirlenmelidir.

Parça üretiminde optimize edilmiş işlem parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle nihai parça ile ilgili nicel bilgiler tanımlanmalıdır. Bu nicel bilgiler parçanın mekanik mukavemeti, green part yoğunluğu, baskı esnasındaki toz etkileşimi, yüzey kalitesi vb. bilgilerdir. Yapılan bir çalışmada toz silindir etkileşimlerinin araştırıldığı toz malzemelerin parçacık bazlı simülasyonu önerilmiştir (Parteli ve Pöschel, 2016). Ana parametrelerden olan toz morfolojisi küresel olmayan tozların simülasyonu sırasında önemli bir parametre olarak kabul edilmiştir Şekil 2.15., Şekil 2.15.'de gösterildiği üzere Binder Jetting yönteminde merdane saat yönünün tersine dönerek hareket eder. Silindir dönüş hızının artırılması parça kalitesini olumsuz yönde etkileyen toz yatağının pürüzlülüğüne artışa sebep olmuştur (Şekil 2.15.). Toz yayma yönteminin (mekanik titreşim, haddeleme) toz geometrisinin, toz yüzey pürüzlülüğünün ve silindir yüzey pürüzlülüğünün dağıtılan tozun yüzey özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca toz yayma sistemi sıkıştırmayı ve potansiyel partikül ayrışmasını etkileyebilir. Ek olarak daha büyük boyut dağılımına sahip tozların yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı, küçük toz parçacıklarının ise topaklanma eğilimli arttırdığı bunun da daha düşük bir toz yatağı yoğunluğuna sebep olduğu anlaşılmıştır. En önemlisi, merdane baskı alanından geçerken komşu toz parçacıkları arasındaki etkileşim nedeniyle homojen olmayan bir kuvvet ortaya çıkmasına sebep olur (Şekil 2.15.). Bu sebeple proses dinamiklerinin binder jetting ile baskı esnasında Toz paketleme davranışını nasıl etkilediğinin anlaşılması önemlidir.

Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada ortaya atılan sayısal bir yöntem ile, toz karakteriskleri, toz akışkanlığı ve paketleme yoğunluğu gibi parametreler tahmin edilebilmektedir (Parteli ve Pöschel, 2016). Yapılan son çalışmalarda yayılma hızının 3mm/sn den 125 mm/sn'ye yükseltilmesinin yüzey pürüzlülüğünde 4  $\mu\text{m}$ 'den 10 $\mu\text{m}$ 'ye çıkardığı tespit edilmiştir (Myers ve diğerleri, 2019). Bu sebeple toz morfolojisi ve ortalama boyut, baskı işleminin yanı sıra PSD'yi değiştirerek değişebilir. Merdaneye etki eden sürtünme koşullarının, merdane geometrisinin ve gevşek toz özelliklerinin, toz sıkıştırma koşullarını nasıl etkilediği görülmüştür. Bununla birlikte greenpart ve sinterlenmiş parçaların yoğunlu ve mekanik mukavemetini nasıl etkilediği görülmüştür (Shanjani, Toyserkani ve Wei, 2008).

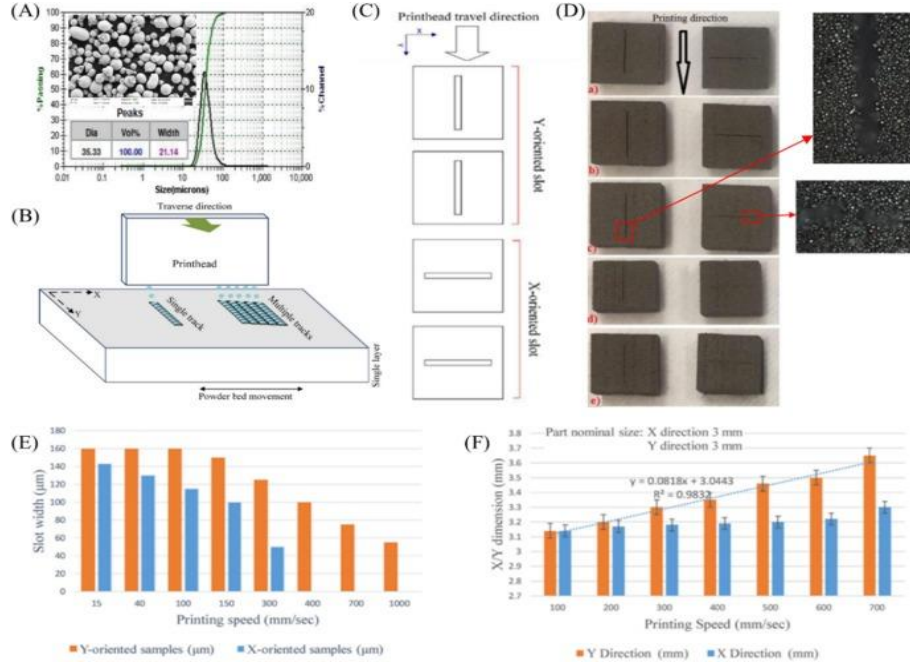
Şekil 2.15.'te gösterilmek istenenler sırasıyla; (A) a: Düzensiz şekilli toz partikülleri, b: toz partiküllerinin ışık mikroskobu mikrografları (birinci sıra) ve çoklu küre yöntemini kullanarak oluşan partikül modelleri (ikinci sıra), c: parça boyutunun hacim yoğunluğuna etkisi (B) Toz yayma sürecinin şematik gösterimi. (C) Yatay ve dikey yönlerde (sırasıyla  $F_x$  ve  $F_z$ ) parça üzerine etki eden toplam kuvvetin büyüklüğünün zamanın bir fonksiyonu olarak geliştiği baskı sırasındaki toz silindiri etkileşiminin şematığı, (D) 20 mm / s (sol) ve 180 mm / s (sağ) çeşitli rulo hızlarında toz tabakasının serilmesi ve (E) yüzey pürüzlülüğünün ' $\delta$ ' kaplama hızına bağlılığını gösteren grafik (Parteli & Pöschel, 2016).



Şekil 2.15. Toz yayma sürecinin şematik gösterimi.

Şekil 2.16.'da görüldüğü üzere baskı hızının parça bütünlüğü üzerindeki etkisi, baskı yönünü ve parça boyutunu değiştirir. Bu çalışma SS 420 tozu ile yapılmıştır. Artan baskı hızının, baskı yönüne bakılmaksızın geometrik doğruluğa olumsuz yönde etki etmektedir. Bu durum artan atalet kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Parteli ve Pöschel, 2016). Toz taneciklerinin ve bağlayıcı taneciklerinin tek boyutta olmamasından dolayı x yönünde ve y yönünde basılan parçaların boyutsal toleransları farklılık göstermektedir (Şekil 2.16.). Baskı hızının artmasıyla birlikte bağlayıcı püskürtme esnasında sıçramalar meydana gelebilir. Sonuç olarak yüksek baskı hızlarıyla hassas parçaların yüksek geometrik doğrulukta üretilmesi mümkün görünmemektedir. (Şekil 2.16.). Baskı hızının Y yönündeki geometrik doğruluk üzerinde x yönündekine göre daha bağımlı olduğu görülmektedir. Bu durum doğruluk tahmininin mümkün olduğu anlamına gelmektedir. Toz ve bağlayıcı özelliklerinin, bağlayıcı-toz etkileşimini önemli ölçüde etkilediği dikkate alınmalıdır. Baskı hızının yüksek olması basılan numunelerin hacminin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum denge yoğunluğunu ve parçanın mekanik mukavemetini etkilemektedir (Miyanaji, Momenzadeh ve Yang, 2018; Miyanaji ve Yang, 2016).

Aşağıdaki şekilde gösterilmek istenen sırasıyla; (A) Toz boyutu dağılımı ve toz morfolojisi. (B, C) Baskı yönünü gösteren şematik. (D) Çeşitli baskı hızlarına sahip basılı parçalar (a) 20 mm/sn (b) 100 mm/sn (c) 300 mm/sn (d) 700 mm/sn (e) 1000 mm/sn. (E) Numune genişliği (F) ve kübik örneklerin boyutsal doğruluğu üzerine baskı hızı ve parça yerleşimi etkisinin grafik ile gösterimi (Miyanaji, Momenzadeh, ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.16. Baskı hızının parça bütünlüğü üzerindeki etkisinin şematik olarak gösterimi (Miyanaji, Momenzadeh, ve diğerleri, 2018).

### 2.4.3.3. Bağlayıcı doygunluğu

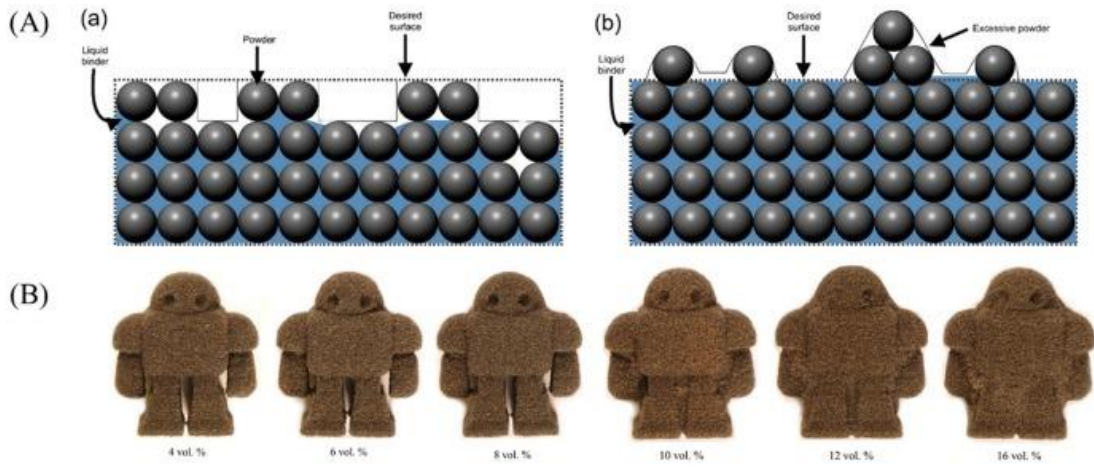
Bağlayıcı doygunluk seviyesi, doğrudan kullanılan baskı kafası tipine (DOD, CJ) bağlıdır. Uygun olmayan bağlayıcı doygunluğu homojen olmayan bir toz yatağına ve ayrıca basılı parçalarda geometrik yanlışlığa sebep olmaktadır (Chen ve Zhao, 2016; Schmutzler, Stiehl ve Zaeh, 2019). Bağlayıcı doygunluğunun da yayılma hızı gibi kullanıcılar tarafından deneysel olarak belirlenmesi gereklidir. Teorik bağlayıcı doygunluğu aşağıdaki denklem (Denklem 2.5) kullanılarak tahmin edilebilir.

$$S = 1000 \times V / (1 - (PR/100)) \times X \times Y \times Z \quad (2.5)$$

Burada V damla başına bağlayıcı hacmi, PR paketleme oranı, X ve Y (µm) bağlayıcı damlacıkları arasındaki mesafe, Z (µm) ise katman kalınlığıdır. Yeterli mekanik mukavemete ve yüzey kalitesine sahip green part elde etmek için doygunluk seviyesinin optimize edilmesi çok önemlidir. Şekil 2.17.'de uygun olmayan bağlayıcı doygunluk seviyesinden kaynaklanan yüzey kusurlarını göstermektedir. Şekil 2.17. ise aşırı bağlayıcının geometrik doğruluk üzerindeki etkisini göstermektedir. Düşük bağlayıcı doygunluğunun, yanma ve sinterleme aşamalarından sonra ortaya



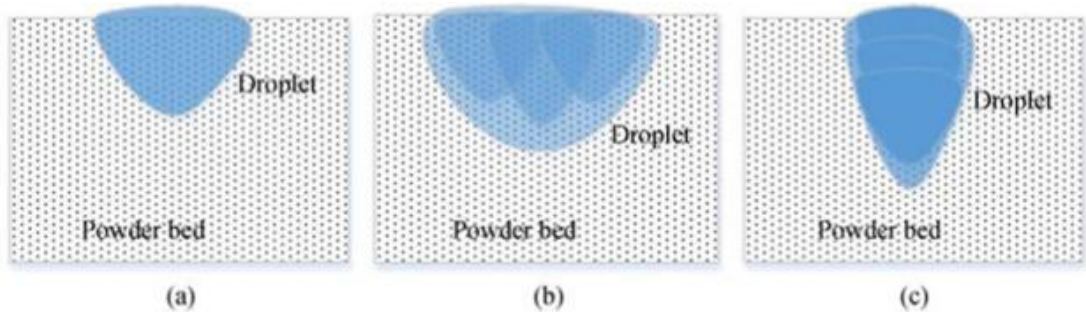
çıkabilecek katman deleminasyonuna, yüksek düzeyde gözeneklere neden olabileceği görülmektedir. Buna karşılık, aşırı doygunluk, ekstra toz parçacıklarının 3D baskılı parçanın yüzeylerine yapışmasına ve bağlanmasına neden olarak daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve geometrik yanlışlıklara neden olabilir. (Şekil 2.17.). Aşırı doygunluktan dolayı karşılaşılan bir başka sorun ise toz yatağının ıslatılmasıdır, bu sebeple partiküllerin silindire yapışmasına, toz yatağı içinde çatlaklara, pürüzlülüğe ve homojen olmayan toz yataklarına neden olabilir. Doymuluk seviyesinin daha yüksek olması gerekiyorsa kuruma süresi arttırılmalıdır. Toz yatağında kullanılan parçacıkları köşeli olması, düşük toz akışkanlığına, tozların topaklaşmasına ve toz yayılması esnasında boşluk kusurlarının oluşmasına sebep olabilir. Bu sorunun ortadan kaldırılması için %100' ün üzerinde doymuluk seviyesine ulaştıracak ekstra bağlayıcı eklenebilir. Ancak doymuluk seviyesi artınca yazdırma süresi de artmaktadır ayrıca yazdırma sonrasını işlemleri de olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, doymuluk seviyesinin optimum seviyede ayarlanması yalnızca üretim süresi için değil aynı zamanda maliyeti en aza indirmek için de büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.17. Bağlayıcı doygunluğunun numuneler üzerindeki etkisinin şematik gösterimi (Chen ve Zhao, 2016; Fayazfar ve diğerleri, 2018).

Optimum bağlayıcı doymuluk seviyesini elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır (Caputo, Solomon, Nguyen ve Berkowitz, 2016; Castilho, Gouveia, Pires, Rodrigues ve Pereira, 2015; Enneti ve Prough, 2019; Miyanaji ve Yang, 2016; Miyanaji, Zhang ve Yang, 2018; Vaezi ve Chua, 2011). Bu çalışmaların birinde, tozun ıslanmasına katkıda bulunmayan dahili mikroskobik yüzey alanlarının optimum doymuluk

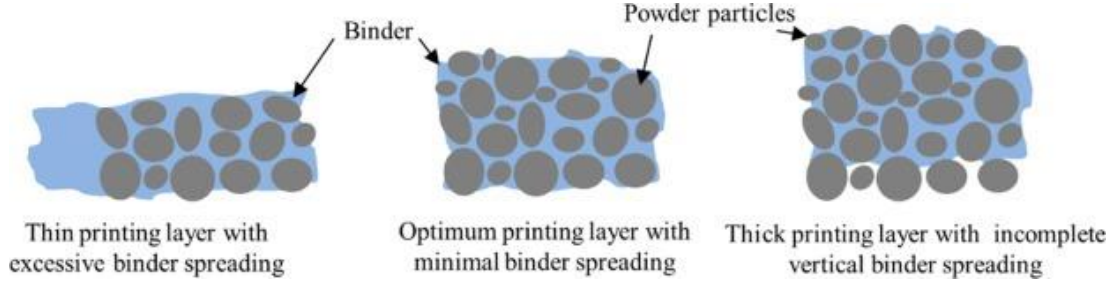
seviyelerinin tahmin edilebilirliğini arttırdığı tespit edildi (Y. Wang, Jia, Yang, Peng ve Zhang, 2018). Gerçekleştirilen başka bir çalışmada bağlayıcı damlacık infiltrasyonu incelenmiştir. Bağlayıcı infiltrasyonu üzerinde, toz yatağı gözenekliliği (gözeneklilik arttıkça partiküller arası boşluk artacağından infiltrasyon azalmaktadır) ve bağlayıcı temas açısı (temas açısı arttıkça imfiltrasyon alanı azalmaktadır) olmak üzere iki etkili malzeme özelliği bulunmaktadır. Şekil 2.18.'da görüldüğü üzere belirli bir damlacık boyutuna sahip yazıcı kafası kullanılması durumunda, tek damlacık boyutu minimum doygunluğun çözünürlüğünü belirler. Doygunluğu değiştirmek için iki farklı yol bulunmaktadır, ilk olarak küçük adım boyutu ile doygunluğun elde edildiği üst üste binen damlacıklar (Şekil 2.18.), ikinci yöntem ise üst üste gelen damlacıklar dar ve derin bir alanı doygun hale getirebilir, bu sebeple kalın katmanların basımında kullanılabilir (Şekil 2.18.).



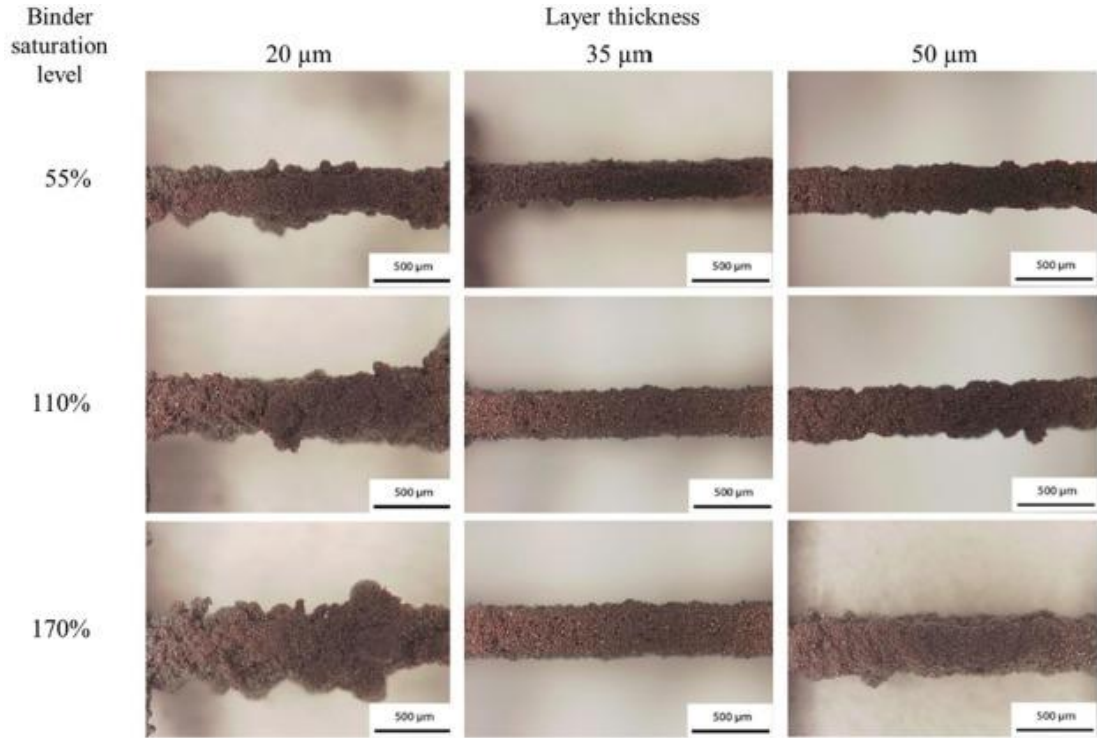
Şekil 2.18. Tek, yan yana ve üst üste binen üç damlacık boyutunun doygunluk alanı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması (Miyanaşi, Orth, et al., 2018).

Parça ve üretim gereksinimleri, sırasıyla yüzey pürüzlülüğü ve hız gibi katman ve ardından bağlayıcı doygunluğunu harekete geçirecek olan toz özelliklerini belirlemektedir. Şekil 2.19.'da görüldüğü üzere katman kalınlığının optimum seviyenin altında ince olması durumunda bağlayıcı miktarı fazla gelerek yanlardan yayılabilir. Bu sorun kanama olarak adlandırılır. Bağlayıcının aşırı yanal akışına ve dolayısıyla geometrik olarak istenilen parçadan uzak parçaların üretilmesine sebep olur. (Şekil 2.20.). Katman çok kalınsa, bağlayıcının nüfuz edebileceği daha fazla alan olduğundan daha az düzensiz yanal yayılma vardır. Bağlayıcının toz katmanını doyurması için yeterli zaman yoksa yüzey pürüzlülüğü artar. Optimizasyon yapıldıktan sonra bağlayıcı toz katmanını içerisindeki boşlukları dikey ve yanal yönde doldurarak yayılma / nüfuz etme işlemini tamamlar. Bu sebeple fiili bağlayıcı yayma

işlemi yerinde gözlemlenerek karar verilmeli hızlı bir yayılma hızı için uygun dikey yayılma mesafesi ve nispeten yüksek bir ıslatma oranı ile ideal bir toz bağlayıcı oranını gerektirecektir.



Şekil 2.19. Farklı katman kalınlıklarında bağlayıcının, yayılma ve kanama kusurlarının şematik gösterimi.



Şekil 2.20. Doğunluk seviyesi ve katman kalınlığının etkilerinin karşılaştırıldığı BJ yöntemiyle üretilmiş TiNiHf tozunun optik görüntüleri (Lu & Reynolds, 2008).

Toz paketleme ve ıslanabilirlik, bağlayıcı tipi seçimini, bağlayıcı doğunluğunu ve gerekli bağlayıcı hacmini etkileyen iki faktördür. Toz paketleme yoğunluğunun toz ve bağlayıcı arasındaki ıslatma oranını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Yoğun bir şekilde paketlenmiş toz yatağı için daha yüksek bir ıslatma oranı elde edilebilir (Lu ve Reynolds, 2008). Baskı kafasından püskürtülen bağlayıcı belirli bir dammla

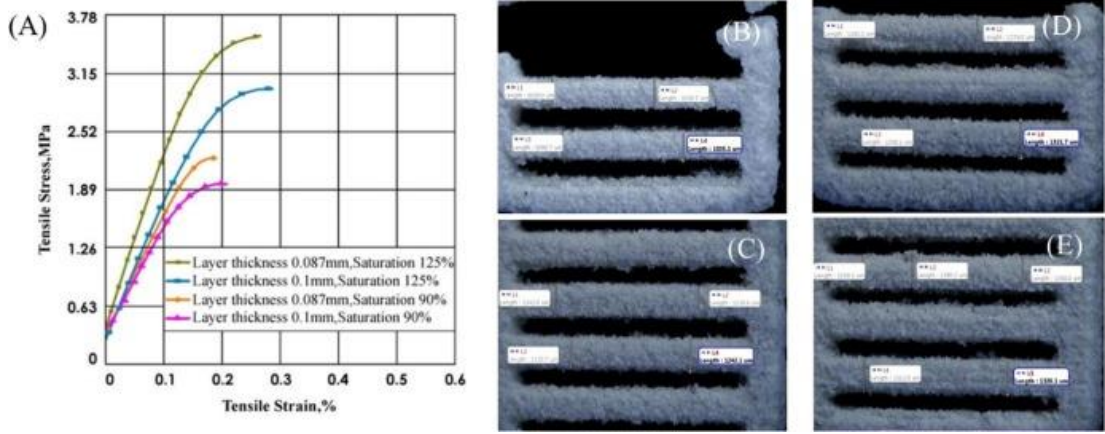
boyutuna sahiptir. Aynı zamanda, katman başına püskürtülen bağlayıcı maddenin toplam miktarı yayılmış tozun toplam hacmi ile orantılıdır. Bağlayıcı, toz yatağına ulaştığında hem dikey hem de yanal yönlerde toz parçacıkları arasında yayılır. Yapılan bir çalışmada 100 µm katman kalınlığı, 6mm/s merdane dönüş hızı ve toz besleme oranı 3:1 olduğunda %70 lik doygunluk seviyesinin optimum olduğu belirtilmiştir (Lu ve Reynolds, 2008).

Yapılan başka bir çalışmada, doğruluk ve esneklik arasında optimum çalışma noktasını belirlemek için bağlayıcı miktarının etkisi incelenmiştir (Kafara, Kemnitzer, Westermann ve Steinhilper, 2018). Bağlayıcı miktarının artmasıyla kübik numunelerin kenarları, bağlayıcı kanamasından dolayı daha yüksek bir sapma göstermiştir. Başka bir çalışmada işse bağlayıcı içeriğinin polimetilmetakrilatın (PMMA) şekillendirilebilirliğini ve özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir (Patirupanusara, Suwanpreuk, Rubkumintara ve Suwanprateeb, 2008). Parçaları PMMA'dan 3 boyutlu üretmek için %10'dan fazla bağlayıcı içeriğine ihtiyaç vardır. Aynı zamanda %40'ın üzerindeki bağlayıcı içeriği şekil bozulmasına sebep olmaktadır. Bağlayıcı içeriği %20'den %60'a çıkarıldığında yoğunluğun da 600'den 750 kg/m<sup>3</sup>'ye yükseldiği görülmüştür. Aynı zamanda üretilen parçadaki gözenekliliğin %57'den %42'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerin yanı sıra geometrik doğruluk ve şekil bozulmasına dayalı olarak %30-40 oranında bağlayıcı içeriğinin PMMA'nın 3 boyutlu imalatı için özellikleri optimize ettiği görülmüştür.

ZP102 toz parçalarının geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik dayanımı üzerinde katman kalınlığı (0.1 mm ve 0.087 mm) ve bağlayıcı doygunluk seviyesi (%90 ve %125) parametrelerinin etkileri araştırılmıştır (Şekil 2.21.) (Vaezi ve Chua, 2011). Bir parçanın green part mukavemeti toz partikülleri ve katmanlar arasındaki bağlanma kalitesinden kaynaklanır. Green part mukavemetin yetersiz olması durumunda; geometrik bozulmalar, zayıf yüzey kalitesi, distorsiyonlar ve çatlamlar veya bağlayıcı püskürtülen parçalarda bozulmalar meydana gelebilir. Katman kalınlığı sabit tutularak bağlayıcı doygunluk seviyesi %90 dan %125'e yükseltilmiştir. Bu durumda geometrik doğruluk ve yüzey kalitesi azalırken parçaların çekme ve eğilme mukavemetinde artışlar gerçekleşmiştir. Genel olarak katman kalınlığı arttıkça bağlayıcı doygunluk

seviyelerinin sabit tutulması daha iyi toz yayılmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak yayılma kusurlarında meydana gelen azalma sebebiyle üretilen parçaların bütünlüğünün ve mekanik mukavemetinin artması ön görülmüştür. Yatay bağlayıcı dağılımı dikey yöne göre daha fazladır. Bu nedenle doyma koşulları sabit bir sayı ise artan katman kalınlığı daha düşük mekanik mukavemet ve daha iyi bir yüzey homojenliği ile eğilme mukavemetinde bir artışa neden olacağı düşünülmüştür.

Aşağıdaki şekilde gösterilmek istenen sırasıyla, (A) ZP102 tozu için çekme testi sonuçları. (B) 0.1 mm ve (C) 0.087 mm katman kalınlığı ve %90 doygunluk, (D) 0.1 mm ve (E) 0.087 mm katman kalınlığı ve %125 doygunluk olan numunelerin stereomikroskop görüntüleri (Vaezi ve Chua, 2011).



Şekil 2.21. Toz parçalarının geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik dayanımı üzerinde katman kalınlığı ve bağlayıcı doygunluk seviyesinin etkisinin şematik gösterimi.

#### 2.4.3.4. Kuruma süresi ve ısıtıcı güç oranı

Toz katmanı üzerine bağlayıcı püskürtme işleminden sonra, toz yatağının yüzeyi, ilk sertleşme için dirençli bir ısıtıcı tarafından üretilen ısıya maruz kalır Bu durum üretim aşamasındaki kuruma süresi olarak bilinmektedir. Kuruma süresi, bağlayıcı doygunluk seviyesi seçimi, bağlayıcı bileşimi ve kimyası, katman kalınlığı, bağlayıcı ile tozun ıslanabilirliği ve toz yatağı (ısı iletkenlik, yüzey alanı, geçirgenlik ve paketleme yoğunluğu) özelliklerine bağlıdır. Örneğin, fenolik bağlayıcılar kuruma süresine ihtiyaç duymazken DEG bağlayıcıların kuruma süresi katman başına yaklaşık 15-45 s'dir. Bu kurutma adımı esnasında püskürtme uçlarının tıkanmasını önlemek için

yazıcı kafası aşırı bağlayıcıdan temizlenir. Bu nedenle çok kısa kuruma süresi, son parça yüzey kalitesi ve parça bütünlüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olan baskı kafası nozulunun ucu tıkanmıştır (Chen ve Zhao, 2016).

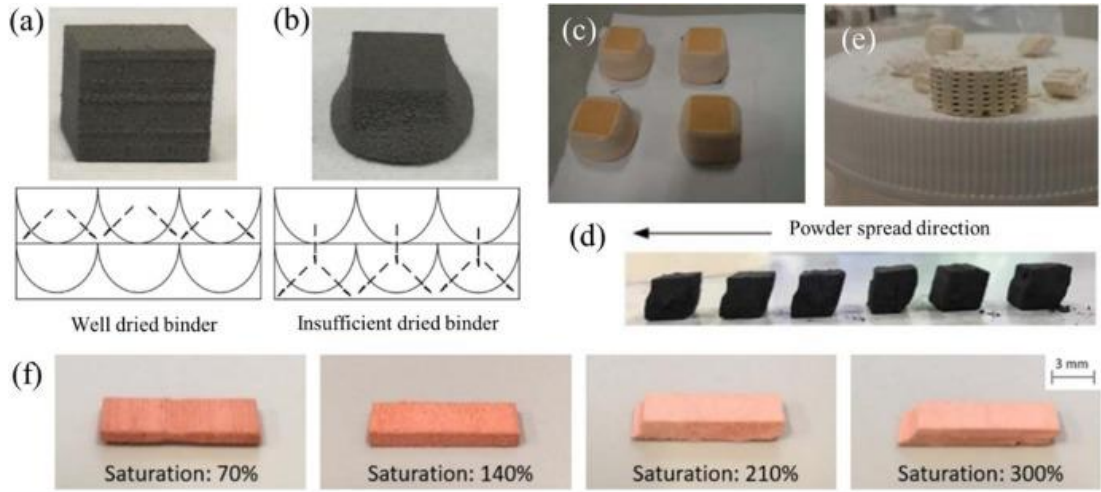
Kurutma adımıyla ilgili bir diğer özellik ise ısıtıcının güç tüketimi ve sıcaklığına bağlı olarak toz yatağı yüzeyinin ısıtma oranını ve en yüksek sıcaklığını tanımlayan kurutma gücü kontrol ayarı veya ısıtıcı güç oranıdır (Chen ve Zhao, 2016; Meteyer, Xu, Perry ve Zhao, 2014). Bu parametre, sıvı bağlayıcının kuruma süresini kontrol ettiği için önemli bir rol oynar, yapım aşamasında green part deformasyonunu, çekmesini, geometrik doğruluğunu ve yüzey kalitesini kontrol eder (Y. Zhou, Tang, Hoff, Garon ve Zhao, 2015). Genel olarak, düşük güç oranı sıvı bağlayıcının yetersiz kurumasına yol açarak yapının bozulmasına veya boyutsal doğruluğun ve yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına neden olur. Yüksek ısı uygulandığı zaman ise toz katmanı çok çabuk kurur bu durum baskı süresini uzatır, parçada yüksek deformasyon ve büzölmeye neden olur. Bu sebeple, daha yüksek bağlayıcı doygunluğu, daha geniş yüzey alanı ve zayıf termal iletkenliğe sahip tozlar için daha uzun kuruma süreleri gereklidir.

Şekil 2.22.'de görüldüğü üzere optimum ve uygun olmayan kurutma sürelerinin meydana getirdiği kusurlar gösterilmektedir. Genel olarak püskürtülen sıvı bağlayıcı fazla kurutulduğunda, yeni basılmış katmanın altındaki önceden kurumuş katmanlar dikey bağlayıcı penetrasyonunu kısıtlamaktadır bununla birlikte bağlayıcı penetrasyonu, çoğunlukla yeni katmanda, biriken damlacıklar arasındaki doymamış alanlarda meydana gelir. Bu durum, yeni katmanın basıldığı alanlarda gelişmiş doygunluğa ve daha iyi geometrik doğruluğa ve green part mukavemetine neden olur (Şekil 2.22.). Kuruma süreleri çok kısa olduğunda (Şekil 2.22.), dikey yöndeki bağlayıcı penetrasyonu katman kalınlığından daha fazladır ve kurutulmamış bağlayıcı, boyutsal yanlılıkla ve azalmış mukavemet ile sonuçlanır (Şekil 2.22.). Ek olarak, 3D baskı ilerledikçe, toz ve bağlayıcının birleşik ağırlığı harici bir basınç kaynağı olarak düşünülebilir, bu da parçanın geometrik doğruluğunu azaltır.

Aşağıdaki şekilde gösterilmek istenen sırasıyla; BJ yöntemiyle üretilmiş parçaların kurutma prosesi sonrasında şematik görünümü: (a) yetersiz kuruma süresi ve (b)



optimum kuruma (Miyanaji, Zhang, ve diğ erleri, 2018). (c) Yeterli kurutma ile aşırı bağlayıcı doygunluğuna bir örnek (Miyanaji ve diğ erleri, 2016). (d) Yetersiz kuruma süresi ile yeterli bağlayıcı doygunluğu ve (e) yetersiz bağlayıcı nüfuziyeti (Miyanaji, Orth, ve diğ erleri, 2018). (f) Artan bağlayıcı doygunluğunun zararlı etkisi, tozun yeniden serilmesi sırasında toz tabakasının kaymasına neden olur (Bai ve Williams, 2018b).



Şekil 2.22. BJ yöntemiyle üretilmiş parçaların kurutma süreci sonrasında şematik görünümü (Bai & Williams, 2018b).

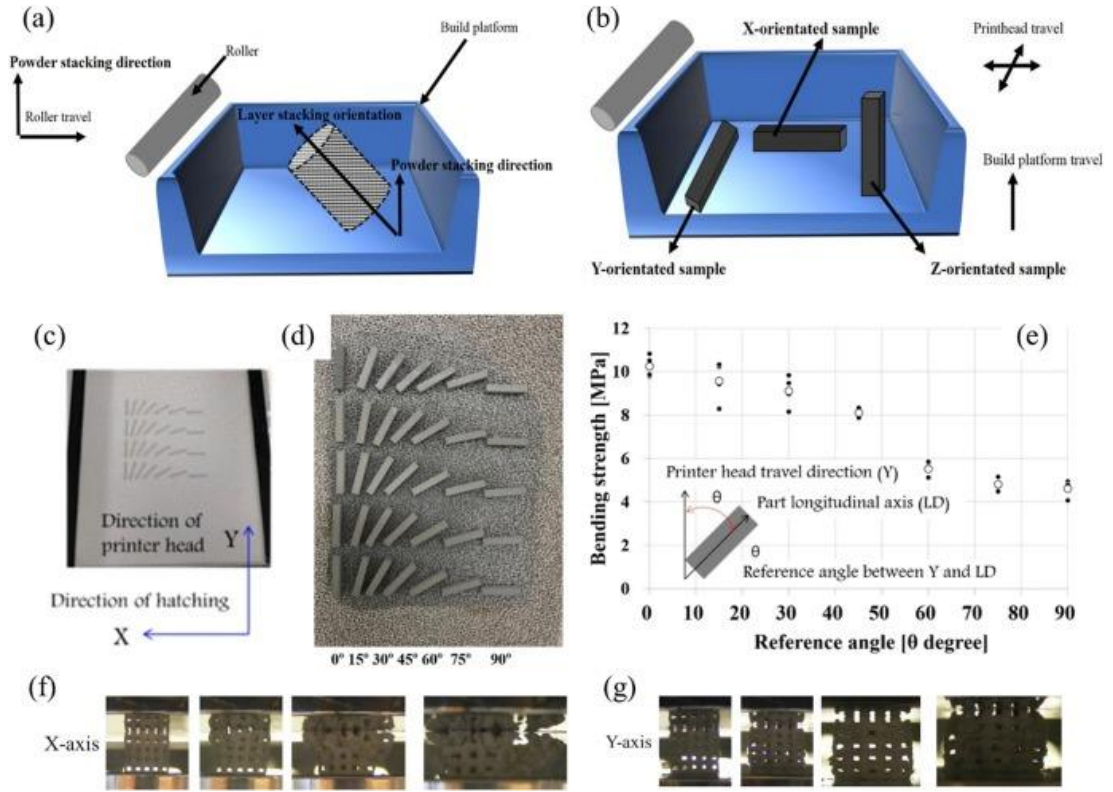
Her katman için optimize edilmiş kuruma süresi olmadığından, yeniden kaplama sırasında artan kesme kuvveti basılı parçayı deforme edilebilir (Şekil 2.22.). Benzer durum yüksek bağlayıcı doygunluk seviyelerinde aşırı bağlayıcıdan dolayı, yeniden kaplama sırasında bağlanmamış katmanların kaydırılmasından kaynaklanan parça bozulmasına neden olabilir (Şekil 2.22.) (Bai ve Williams, 2018b). Öte yandan, aşırı kurutma green partın katmanlar arası bağlanmanın zayıf olmasına neden olur. Bunun nedeni, üzerine yeni bir toz katmanının yayılmaya hazır olduğu kurutulmuş yüzey üzerinde bulunan artık sıvı bağlayıcı miktarının azalmasıdır. Sonuç olarak, bağlayıcı önceki ve yeni eklenen toz katmanları arasındaki arayüz boyunca etkili bir şekilde sürekli bir sıvı faz oluşturamaz ve katmanlar arası bağlarda güç kaybına sebep olur. Bu durum Şekil 2.22.'de gösterildiği gibi yeşil kısımda delaminasyon meydana getirebilir. Son olarak artan kuruma süresi, toz yatağına eşit ısıtma uygulanmasını kolaylaştırır ancak işlem süresini önemli ölçüde uzatır.

### 2.4.3.5. Baskı yönü

Genel olarak, katman istifleme yönü ve baskı yönü olmak üzere yazdırma yönüyle ilgili 3 boyutlu baskı sürecinde iki terimin tanımlanması gereklidir (Salehi ve diğerleri, 2019). Katman istifleme yönü (Şekil 2.23.) silindir tarafından toz istifleme yönüne göre (yani z eksen) basılan parçanın oryantasyonudur. Katman istifleme yönü, mürekkep püskürtmeli 3D baskılı parçaların gözenek yüzdesine ve mekanik özelliklerine katkıda bulunabilir. Yapılan bir çalışmada  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında çeşitli istifleme yönelimlerine sahip amorf kalsiyum polifosfat tozu ( $75-150 \mu\text{m}$  PSD'li düzensiz şekilli toz) için gözeneklilik ölçümleri, gözeneklilik değerinin istifleme yönüne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Vlasea, Pilliar ve Toyserkani, 2015). Üstelik, istiflenmiş katmanların çeşitli yönelimlerine sahip numuneler, mekanik özellikler ve yüzey özelliklerinde önemli farklılıklar sergilemiştir (Asadi-Eydivand, Solati-Hashjin, Farzad ve Abu Osman, 2016; Li ve Cao, 2012; Vlasea ve diğerleri, 2015).  $45^\circ$  yönelimli numunenin  $13,4 \pm 4,6$  MPa basınç dayanımına ve  $\%37 \pm 2$  gözenekliliğe sahip olduğu,  $90^\circ$  yönelimli numunelerin ise  $45,1 \pm 6,8$  MPa basınç dayanımı ve  $\%30 \pm 2$  gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada mekanik basınç yüküne paralel olarak istiflenen katmanların, yüke dik olarak istiflenen katmanlardan yaklaşık olarak  $\%48$  daha güçlü olduğu gösterilmiştir (Shanjani, Hu, Pilliar ve Toyserkani, 2011). Binder Jetting yöntemiyle parça üretiminde genellikle küresel morfolojiye sahip daha ince parçacıklar kullanıldığından, katman istifleme oryantasyonunun, bu yöntem ile üretilen parçalarda gözeneklilik seviyesi veya mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olma ihtimalinin düşük olduğu dikkate alınmalıdır.

Aşağıdaki şekilde sırasıyla gösterilmek istenen; yapı haznesi ve üretim yönlerine göre parçaların şematik gösterimi; (a) katman istifleme yönü ve (b) parça oluşturma yönü (M. Salehi, 2018). (c) Parçaların basıldığı toz yatağını gösteren 2D görüntü, (d) oluşturulan green partlar ve (e) üç nokta eğilme mukavemeti sonuçları (Oh, Nahm, Kim ve Choi, 2019). BJ yöntemiyle üretilen parçalarda meydana gelen arıza mekanizmaları (f) x-yönelimli parçada meydana gelen arıza ve (g) y-yönelimli parçada meydana gelen arıza (Cox, Thornby, Gibbons, Williams ve Mallick, 2015).





Şekil 2.23. Yapı haznesi ve üretim yönlerine göre parçaların şematik gösterimi.

Yapı yönü, Şekil 2.23.'de gösterilen yapı platformunun x, y, z eksenlerine göre yazdırılan parçaların hizalanmasına karşılık gelir. Yapılan bazı çalışmalarda yapım yönelimlerinin üretilen parçaların özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ileri sürülmüştür (Asadi-Eydivand, Solati-Hashjin ve Abu Osman, 2018; Asadi-Eydivand ve diğerleri, 2016; Castilho ve diğerleri, 2013; Farzadi ve diğerleri, 2014; Yao ve Tseng, 2002; W. Zhang ve diğerleri, 2009). Baskı yönünü, Binder Jetting yöntemiyle üretilen parçalarda püskürtme sorunlarına yol açabilir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişim, yüzeyde toz partikül dağılımının ve parçanın yönlendirilmiş yüzeylerine mürekkep damlacıklarının iz düşümünün neden olduğu sorunlardan biridir. Yapılan bir çalışmada bilgisayar yazılımı yardımıyla piksel taraması kullanılarak baskı yönünden etkilenen yüzey kalitesi iyileştirmesi testi yapıldı (Gardan, 2017). XY düzleminin yüzey kalitesi açısından daha iyi bir kaliteye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada baskı açısı Z yönüne göre 0° 'den 45° ye çıktığında yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir (Myers ve diğerleri, 2019). Aynı zamanda ortalama green part yoğunluğu, baskı sırasında ara katman kusurlarının oluşması nedeniyle artan baskı açısı ile azalmıştır. Başka bir çalışmada Y yönünde yönelimli

numunelerin, y eksenini boyunca daha muntazam bir toz taakasının basılması nedeniyle önemli ölçüde daha büyük özelliklere ve daha düşük gözeneklilik yüzdelere sahip olduğu görülmüştür (W. Zhang ve diğerleri, 2009). Z yönelimli örnekler, X veya Y yönelimli örneklerle kıyasla daha fazla sayıda katmanın istiflenmesi gerekliliğinden, en düşük özellikleri göstermiştir. Ek olarak, XY düzlemi diğer düzlemlere kıyasla daha iyi yüzey topografyası göstermiştir (Li ve Cao, 2012). Bu nedenle mikro gözenek ve boşluk oluşumundan ve katman içi boyunca zayıf bağlanmış katmanlardan dolayı numunelerin içerisinde kusurların oluşması mümkündür (M. Salehi, 2018). Başka bir çalışmada ise X ve Y yönelimli baskı yönleri kullanılarak 3 boyutlu olarak basılmış gözenekli hidroksiapatit iskeletler ve Y yönelimli parçalar için basınç dayanımının X yönelimli parçalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Cox ve diğerleri, 2015). Aslında, X yönelimli yapı iskeletlerinin düşük basınç dayanımı ve yıkıcı başarısızlık, ara katman bağının yüklemeye yönüne paralel olarak daha zayıf olduğu ima edilmiştir (Şekil 2.23.). Yapılan başka bir çalışmada Binder Jetting yöntemiyle paslanmaz çelik tozu kullanılarak üretilen parçalarda baskı yönünün eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 2.23.). Y yönelimli numuneler için eğilme mukavemetinin, X yönelimli parçalardan iki kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. X yönelimli örneklerde bağlayıcı dağılımındaki asimetric yayılma ve süreksizliklerin yönelim bağımlı eğilme mukavemetinin ana nedeni olduğu düşünülmüştür. Binder Jetting yöntemiyle, seramik-fiber kompozit malzeme kullanılarak üretilen parçalarda y yönelimli baskılı numunelerin X yönelimli numuneye kıyasla %60 daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmüştür (Sara M Gaytan ve diğerleri, 2013).

## **BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **3.1. Giriş**

Bu çalışmada bağlayıcıların parçanın mekanik özelliklerine ve yüzey kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Hidroksiapatitin su ile düşük reaktivitesi sebebiyle Binder Jetting yöntemiyle üretiminde başarılı olamamıştır. Bu sebeple bağlayıcıların etkisini incelemek için ana yapı malzemesi olarak HA kullanılmıştır. Yapılan çalışmada 2 farklı sıvı bağlayıcı ve 2 farklı toz bağlayıcı kullanılmıştır. Toz bağlayıcı ana malzeme olan Hidroksiapatit ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Her bir numune için 6 adet parça üretilmiştir. Mekanik özelliklerin test edilmesi amacıyla basma testi yapılmıştır. Aynı zamanda XRD ve SEM analizleri yapılmıştır.

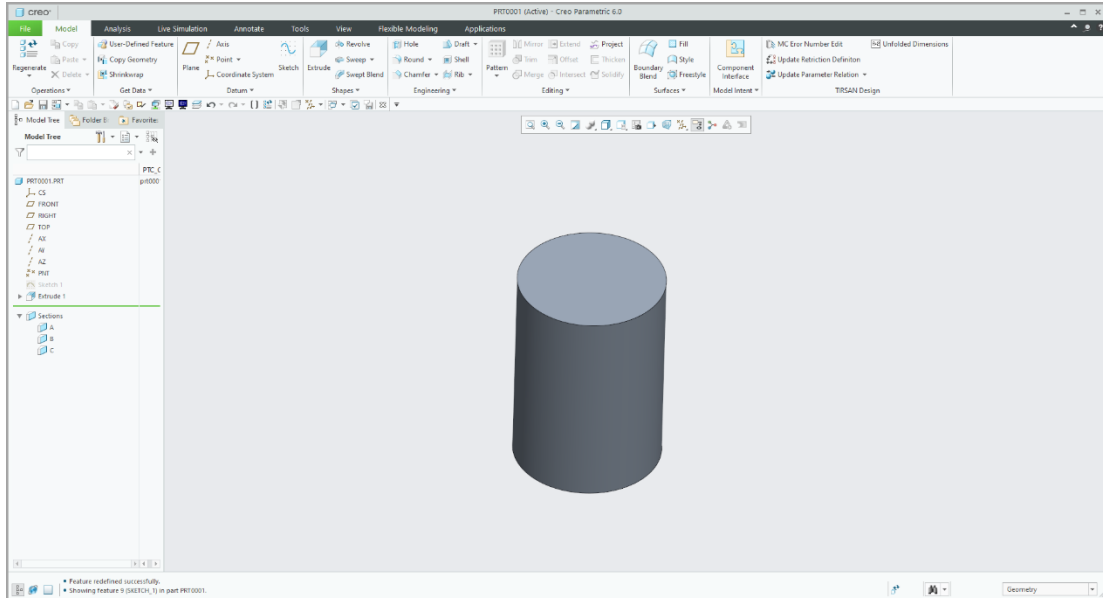
Numunelerin üretimi Sakarya Üniversitesi'nde gerçekleştirilen Binder Jetting tipi 3 Boyutlu yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılacak olan test ve analizler için Sakarya Üniversitesi imkanları kullanılmıştır.

### **3.2. Modelleme**

Bu adımda öncelikle üretilecek parçanın geometrisine karar verildi. Daha sonra ise parçanın boyutları belirlendi. Daha önce yapılan çalışmalarda incelenerek silindirik bir numune yapımına ve boyutlarının da çapı 7 mm ve boyu 10 mm olacak şekilde karar verildi. Parçanın bilgisayar destekli tasarım programları ile tasarlanması ve bu tasarımın 3 boyutlu baskı için hazır hale getirilmesi gerektiğinden ilk adım olan modelleme adımı CAD modelin ve STL dosyasının oluşturulması olacak şekilde iki başlık altında incelenmiştir.

### 3.2.1. CAD modelinin oluşturulması

Numune üretimi yapılacak parçanın geometrisine ve boyutlarına karar verildikten sonra bir CAD programı yardımıyla katı model olarak çizimi yapılır. CAD Modeli Creo 6.05 sürümü ile çizilmiştir. Aynı zamanda Catia, Solidworks, Inventor, NX gibi diğer CAD programları ile de çizim yapılabilir. Şekil 3.1.'de Creo programının çizilen numune gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Creo ortamında üretilecek numunenin tasarlanması.

### 3.2.2. STL dosyasının oluşturulması

Stl Dosyası dilimleyici programının kabul ettiği formattır. CAD Model içerisinde direk olarak STL formatında kaydetmek mümkündür. Kaydedilen STL format bir dilimleyici programı yardımıyla katman katman dilimlenerek üretim için G-Codeları çıkarılır ve parça imalat için hazırlanmış olur.

### 3.3. BJ Yöntemi için Malzeme Hazırlama

Test numuneleri için üretim prosesine başlamadan önce birtakım hazırlıkların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada toz malzeme olarak Hidroksiapatit

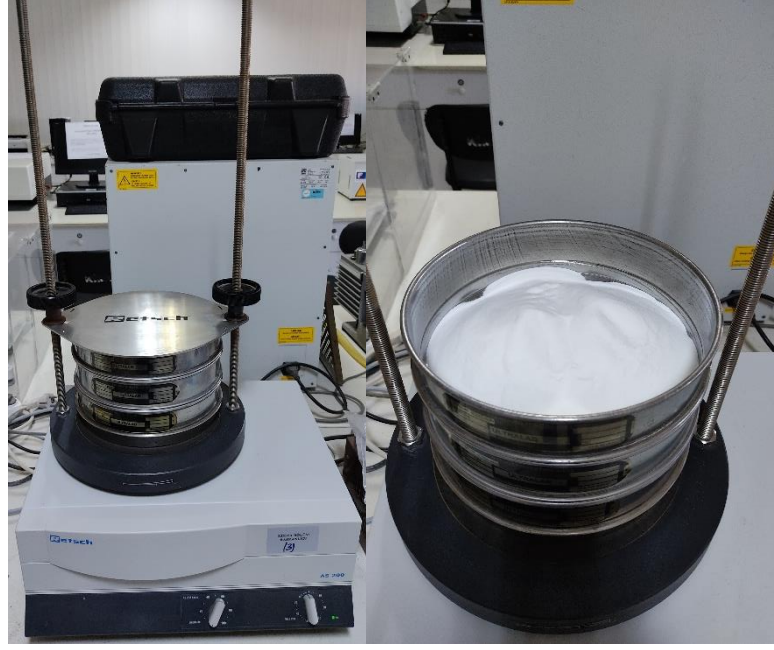
kullanılmıştır. Aynı zamanda toz bağlayıcı olarak Akrilik ve PVA (Polivinil Alkol) kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılacak toz malzemelerin belirli boyutlar arasında olması gerekmektedir. Hazırlık aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler tane boyutu ve toz parçacıklarının homojen dağılımıyla ilgilidir. Bu başlık altında bu parametreler dikkate alınıp malzeme hazırlık aşamasında yapılan işlemler ile ilgili detaylı bilgi yer almaktadır.

### **3.3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler**

Bu çalışmada yapı malzemesi olarak Hidroksiapatit kullanılmıştır. Toz bağlayıcı olarak Akrilik ve PVA kullanılmıştır. Bunun yanı sıra sıvı bağlayıcı olarak HP 45 siyah kartuş ile ZB10 bağlayıcısı kullanılmıştır. Toz malzeme planlanan tane boyutu 30 µm ile 106 µm arasında belirlenmiştir.

### **3.3.2. Eleme**

Eleme işlemi ön hazırlık aşamasının en önemli işlemlerinden biridir. Bu aşamada numune üretiminde kullanılacak olan tozların tane boyutu istenilen değerler arasına getirilir. Toz tane boyutu, tozun akış kabiliyeti, tozun homojen dağılımı, katman yüksekliği gibi üretim kalitesine doğrudan etki eden parametreleri etkilemektedir. Bu çalışmada toz eleme işlemi için Retsch AS200 marka eleme makinası kullanılmıştır. Toz eleme işlemi Hidroksiapatit, PVA ve Akrilik malzemeleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Her toz değişiminde elekler su ve ultrasonic yardımıyla temizlenerek kullanıma devam edilmiştir. 100 titreşim genliğinde 5'er dakikalık 3 seans şeklinde toz eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tozlar tane boyutlarına göre farklı kaplara konulmuştur. Şekil 3.2.'de eleme esnasında çekilen görseller yer almaktadır.



Şekil 3.2. Toz eleme işlemlerinin yapıldığı makina (Retsch AS 200).

### 3.3.3. Karıştırma

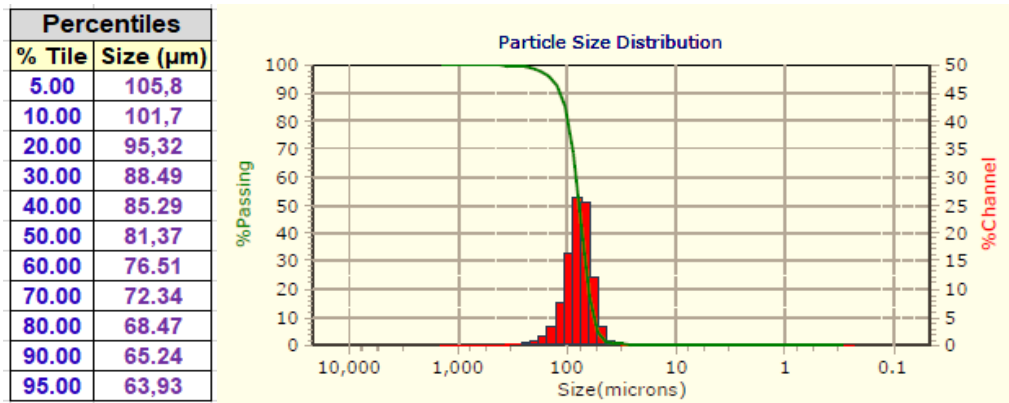
Ana yapı malzemesi olan hidroksiapatit ve bağlayıcı toz malzemesi olarak kullanılacak olan PVA ve akrilik ağırlıkça %20, %30 ve %40 oranlarında karıştırılmıştır. Ağırlıkça istenilen oranlarda karışım yapılabilmesi için hassas terazi kullanılmıştır. Ağırlıkça istenilen karışımlar yapıldıktan sonra toz dağılımındaki homojen karışımın sağlanabilmesi için bir aksenel karıştırıcı yardımıyla 2saat süre ile tüm karışım oranları için ayrı ayrı uygulanmıştır. Tozlar arasındaki homojen dağılım yapı içerisindeki poroziteyi etkiler bu durumda yapının mekanik özelliklerine doğrudan etki edeceği için karıştırma işlemi üretim malzemelerinin hazırlanması için kritik bir aşamadır. Kullanılan hassas terazi ve karıştırıcı (Turbula T2F) görselleri Şekil 3.3.'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.3. Ağırlıkça karışım oranlarının hazırlanmasında kullanılan hassas tartı ve hazırlanan karışımların karıştırılması için kullanılan makina (Turbula T2F).

### 3.3.4. Toz boyutu analizi

Elde edilen karışımların toz boyut analizi Microtrac s3500 cihazında yapılmıştır. Karışım içerisindeki toz boyutu genel olarak 105,8  $\mu\text{m}$  ile 63,93  $\mu\text{m}$  arasında olduğu görülmüştür. Ortalama toz boyutunun ise 85  $\mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiştir. Yapılan teorik araştırmaya istinaden bu değerler üretim açısından uygun değerler olarak kabul edilmiştir. Yapılan toz boyutu analizine dahil görseller Şekil 3.4.'te ve Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Hidroksiapatit, PVA ve akrilik toz boyutu dağılımı.



Şekil 3.5. Elde edilen karışımların toz boyut analizi için kullanılan Microtrac s3500.

### 3.3.5. Toz malzemenin akışkanlığının teorik olarak hesaplanması

Toz malzemelerin akışkanlığı tozun yayılma (serpilme) ve nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkiler. Binder Jetting yöntemiyle üretim esnasında toz malzeme platform üzerine homojen bir kalınlıkta yayılması için toz akışkanlığının yeterli değerlerde olması gerekmektedir. Toz boyutunun dağılımı, toz taneciklerinin şekli, toz kütlesinin içerdiği nem miktarı, elektrostatik yük, yüzey enerjisi ve elastisite toz malzemenin akışkanlığını doğrudan etkilemektedir. Toz malzemelerin akış özelliğinin teorik olarak hesaplanması için Hausner oranı kullanılmaktadır. Bu çalışmada da toz taneciklerinin akışkanlığının hesaplanması için Hausner oranı kullanılmıştır. Hausner oranı aşağıdaki denklemde (Denklem 3.1) gösterilmiştir.

$$\text{Hausner Oranı}(HR) = \frac{V_o}{V_f} \quad (3.1)$$

Denklemde  $V_o$  serbest olarak bulunan tozun görünür hacmini ifade etmektedir.  $V_f$  ise bir süre titreştirilen tozun görünen hacmini ifade etmektedir. Hausner oranı toz akış özelliklerini yorumlamak için kullanılabilir. Tablo 3.1.'de Hausner oranı ve akışkanlık ölçüğü gösterilmiştir.



Tablo 3.1. Hausner oranı ve akışkanlık ölçütü.

Hausner oranı	Akışkanlık ölçütü
1,00 – 1,11	Mükemmel
1,12 – 1,18	İyi
1,19 – 1,25	Makul
1,26 – 1,34	Geçebilir / orta
1,35 – 1,45	Kötü/Zayıf
1,46 – 1,59	Çok kötü / çok zayıf
>1,60	Uygun değil

Bu çalışmada kullanılan Hidroksiapatit, PVA karışımı Hidroksiapatit Akrilik karışımlarının akışkanlık ölçütünü belirlemek için 50 ve 15 ml hacmindeki kaplara doldurulan karışımların ilk olarak görünür hacmi daha sonra titreştirildikten sonra sıkıştırılmış görünür hacmi ölçülerek hesaplanmıştır. Elde edilen Hidroksiapatit, akrilik karışımı için Hausner oranı sırasıyla 1,22 ve 1,25 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen Hidroksiapatit PVA karışımı için Hausner oranı sırasıyla 1,18 ve 1,20 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 3.1. üzerinden değerlendirildiğinde iki farklı karışım içinde uygun değerlerin olduğu görülmektedir.

### 3.4. Bağlayıcı Türleri

Binder Jetting yönteminde kullanılan bağlayıcılar genel olarak iki kategori altında incelenmektedir. Bunlar sıvı bağlayıcılar ve toz bağlayıcılardır. Toz bağlayıcılar Ana yapı malzemesi ile homojen olarak karıştırılarak kullanılır. Ana yapı malzemesi içerisinde yer alan toz bağlayıcılar bir çözücünün nozullardan püskürtülmesi ile çözünerek ana yapı tozları arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Sıvı bağlayıcılar ile bu çözünme işlemini önceden yaparak elde edile bağlayıcı sıvıyı direk olarak yapı tozları üzerine püskürtülmesi kullanılır. Bu çalışmada her iki bağlayıcı türünde birlikte kullanılarak bunları parça üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### **3.4.1. Toz halinde ilave edilen bağlayıcılar**

Bağlayıcılar, üretim sırasında farklı şekillerde imalat sürecine dahil edilmektedir. Toz bağlayıcılar, akışkanlığın artırılması ve malzemelerin daha iyi bağlanmasını sağlayarak yüzey kalitesini iyileştirmektedir. Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan toz bağlayıcılar incelenmiştir.

#### **3.4.1.1. PVA**

PVA açılımı Polivinil alkol olarak bilinmektedir. PVA malzemesinin biyo uyumluluğu, düşük protein yapışma eğilimi ve düşük toksitesi nedeniyle çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılır. Yapılan araştırmalara göre PVA toz bağlayıcılar arasındaki şimdiki kadar en iyi sonuç veren malzemedir. Biyo uyumluluğu ve bağlayıcı özelliğinin güçlü olmasından dolayı bu çalışmada PVA kullanılmıştır.

#### **3.4.1.2. Akrilik**

Akrilik endüstride sıkça kullanılan bir toz bağlayıcı malzemesidir. Biyo uyumluluğunun düşük olmasına rağmen bağlayıcı özelliğinin güçlü olacağı düşünüldükten toz bağlayıcılar arasına eklenmiştir.

### **3.4.2. Sıvı bağlayıcılar**

Sıvı bağlayıcılar, ham haldeki tozların ilk şekillendirme sırasında birleştirilmesi ve sinterleme sürecine kadar şeklini koruması amacıyla üretime dahil edilen bağlayıcılardır. Bu bağlayıcıların türü ve üretim sırasındaki kullanım miktarı, tüm tozların yeterli miktarda bir arada tutulmasına katkı sağlamaktadır. Sıvı bağlayıcı miktarının yeterli olmaması ise, daha üretim aşamasında tozların dağılmasına ve üretimin başarısız olmasına neden olmaktadır. Bu kısımda tez çalışmasında kullanılan sıvı bağlayıcılar incelenmiştir.

### **3.4.2.1. ZB10**

Z Corporation firmasına ait olan ZB 10 sıvı bağlayıcısı toz yatağı içerisinde ilave bir bağlayıcı toz kullanılmadan da tek başına iyi sonuçlar vermektedir. Ancak bu sıvı bağlayıcının toz yatağı içerisinde yer alan toz bağlayıcılar ile gireceği etkileşim sayesinde daha güçlü bir bağlantı sağlanması hedeflenmektedir. Bu senepile sıvı bağlayıcı olarak ZB10 kullanılmıştır.

### **3.4.2.2. HP 45 mürekkep**

HP 45 mürekkep, bağlayıcı özelliği çok güçlü olmayan %99 su içeren bir maddedir. Güçlü bir sıvı bağlayıcı ile %99 su içeren bir sıvı bağlayıcının parçalar üzerindeki bağlanma performansının incelenmesi için kullanılmıştır. Aynı zamanda toz yatağında bulunan toz bağlayıcıları çözme kabiliyetleride bağlanma mekanizmasını etkileyecektir.

## **3.5. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi**

Binder Jetting yönteminde kullanılan üretim parametreleri üretilen parçanın yüzey ve mekanik özelliklerine, üretim süresine direkt olarak etki etmektedir. Kullanılan üretim parametreleri; katman kalınlığı, bağlayıcı miktarı (doygunluğu), toz serme hızı, numune oryantasyonu, bağlayıcı sıcaklığı gibi parametrelerdir. Hazırlanan karışımlara en uygun üretim parametrelerinin optimize edilmesi için pekçok üretim denemeleri yapılmıştır.

### **3.5.1. Katman kalınlığı**

Katman kalınlığı doğrudan toz boyutuyla ilişkilidir. Minimum katman kalınlığı maksimum toz boyutundan yüksek olmalıdır. Bu durum göz önünde bulundurularak 100  $\mu\text{m}$ , 110  $\mu\text{m}$ , 120  $\mu\text{m}$  ve 130  $\mu\text{m}$  katman kalınlıklarında deneme üretimleri yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda 110  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı değerinin kullanılan karışımlar için daha doğru sonuç verdiği tespit edilmiştir. 110  $\mu\text{m}$

değerinden yüksek olan değerler için bağlayıcı doygunluğunun yeterli olmadığı görülmüştür. Katman kalınlığının maksimum toz boyutundan küçük olduğu durumlarda ise merdane ile toz serimi aşamasında tozlar düzgün olarak serilemez ve büyük boyutlu partiküllerin üretim hatalarına sebep olduğu tespit edilmiştir.

### **3.5.2. Bağlayıcı miktarı (doygunluğu)**

Binder Jetting teknolojisiyle parça üretimi esnasında bağlayıcı ve toz arasındaki etkileşime göre farklı miktarlarda bağlayıcı kullanılabilir. Bağlayıcı miktarı için 1 kat, 2 kat ve 3 kat olmak üzere değişmektedir. Bu çalışmada 3 farklı miktarda denenmiş olup optimum etkililiği sağlayan 2 kat bağlayıcı miktarı olmuştur. Bağlayıcı miktarının az geldiği 1 kat ile yapılan üretimlerde bağlayıcı ve toz arasındaki etkileşim sağlanamadığı için toz parçacıkları arasındaki bağlanma yeterli seviyede olmamıştır. 3 kat ile yapılan üretimlerde ise bağlayıcı miktarı fazla geldiğinde kanama olarak adlandırılan yüzey kusurları ortaya çıkmıştır.

### **3.5.3. Bağlayıcı sıcaklığının ayarlanması**

Bağlayıcı sıcaklığı bağlayıcının akışkanlığını etkilemektedir. Bağlayıcı sıcaklığı ile bağlayıcı akışkanlığı doğru orantılıdır. Bağlayıcı sıcaklığı arttıkça bağlayıcı akışkanlığıda artmaktadır. Bağlayıcı akışkanlığı fazla olduğunda toz ile bağlayıcı arasındaki etkileşim düşük olmuştur. Bu durum bağlayıcının parça sınırları dışına taşarak kanama olarak adlandırılan yüzey kusurlarına sebep olmuştur. Bağlayıcı akışkanlığı düşük olduğunda ise bağlayıcı tozlar içerisine yayılımı tam olarak sağlanamadığından geometrik olarak düşük doğrulukta parçalar üretilmektedir. Bu çalışmada bağlayıcı sıcaklığı ZB 10 bağlayıcısı için 50-60 °C, HP 45 mürekkep için ise 40-50 °C olarak belirlenmiştir.

### **3.5.4. Toz serme hızı**

Toz serme hızı ve bağlayıcı püskürtme hızı bağlayıcının geometrik doğruluğunu etkilemektedir. Toz serme hızı toz biriktirme düzenini etkilemektedir. Toz serme hızı

arttıkça toz biriktirme düzeni ve paketlenme yoğunluğu düzensiz bir şekilde birleştirilebilir. Bu çalışmada toz serme hızı 8mm/s, bağlayıcı püskürtme hızı ise 6mm/s olarak belirlenmiştir.

### **3.5.5. Numune oryantasyonu (numunenin yerleşimi)**

Numune yerleşimi baskı yönünü etkilemektedir. Numunenin uygulanacağı baskı yönüne dik olacak şekilde parça yerleştirilmelidir. Aksi halde yapılan araştırmalara göre parça basma dayanımı değişmektedir.

### **3.6. Numune Üretimi**

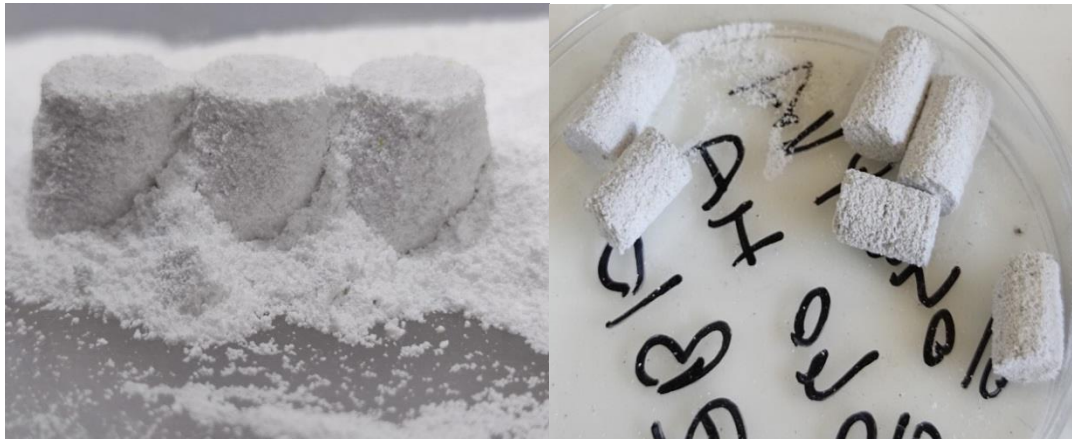
Numune parçaların üretimi için Sakarya Üniversitesi BİMAYAM laboratuvarında tasarlanan Binder Jetting tipi 3D yazıcı ile üretilmiştir. Modellenen test numuneleri .stl formatında kaydedilip yazıcı için kullanılan programın içerisine yüklenerek üretim fazına geçilmiştir. Yazıcı için kullanılan program arayüzü üzerinden, toz miktarı, bağlayıcı miktarı, merdane dönme hızı, katman kalınlığı, bağlayıcı hızı, üretim hızı gibi daha önce yapılan deneme numunelerde belirlenen optimum parametrelerin girişi yapılır. Daha sonra girilen parametreler kontrol edildikten sonra üretim başlatılır. Yazıcı üretime başladıktan sonra ilk olarak toz serilir ve merdane yardımıyla tozun sıkıştırılması ve homojen olarak dağılması sağlanır. Serilen tozun üzerine parça sınırlarına göre bağlayıcı püskürtülür. Bu işlemler parça nihai hale gelene kadar katman katman tekrarlanır. En son katma tamamlandıktan sonra üretim sonlanmış olur. Şekil 3.4.'te sol tarafta üretimin yapıldığı 3D Printer gösterilmiştir. Sağ tarafta ise üretim aşaması henüz tamamlanmış test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Numune üretiminde kullanılan 3D Printer ve Binder Jetting yöntemiyle üretimi tamamlanmış test numuneleri.

### 3.7. Numunenin Temizlenmesi

Üretim tamamlandıktan sonra numunenin çevresinde biriken tozların temizlenmesi gereklidir. Numunenin temizlenmesi aşamasında çok hassas davranılmalıdır. Parça henüz ıslak olduğundan dolayı üretilen parça hasara uğrayabilir. Parça etrafındaki tozların temizlenmesi için küçük fırçalar kullanılabilir. Parça henüz sinterlenmediği için fırça darbeleri parçanın yüzeyinde fırça izlerine ve parçada deformasyona yol açabilir. Ancak parçanın vakumla temizlenmesi durumunda parça daha az hasar görebilir ve yüzey kalitesi daha yüksek olmaktadır. Şekil 3.5.'te sol tarafta üretim sonunda üzerinde fazladan toz katmanları bulunan numuneler sağ tarafta ise fazlalık tozlardan arındırılmış numuneler gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Binder Jetting yöntemiyle üretilen numunelerin fazlalık tozlarından arındırılmadan önceki hali ve arındırıldıktan sonraki hali.

### 3.8. Ön Sinterleme

Parçalar Binder Jetting yöntemiyle üretildikten sonra kullanılan bağlayıcıdan dolayı parça ıslak olmaktadır. Bu sebeple üretilen parçaların üzerindeki fazlalık tozlar temizlendikten sonra parça kurutma işlemi için 75 °C de iki saat bekletilmiştir. Bu işlem parçaların içerisindeki fazlalık bağlayıcı uçurarak parçanın sertleşmesini sağlamaktadır. Şekil 3.6.'da numuneler ve ön sinterleme yapıldığı fırın gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Binder Jetting yöntemiyle üretilen numunelerin ön sinterleme işleminin yapıldığı fırın ve numuneler.

### 3.9. Analiz ve Testler

Parça üretimleri tamamlandıktan sonra parçaların mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını belirlemek için bazı mekanik testler ve karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan Hidroksiapatit biyo uyumlu malzeme imalatında kullanıldığından ve biyo uyumlu malzemelerde genellikle basma yüküne maruz kaldığından bu çalışmada ilk olarak basma testleri yapılmıştır. Malzemenin mikro yapılarını incelemek, numune içerisindeki kalıntıları ve fazları tespit etmek için ise bazı karakterizasyon analizleri yapılmıştır.

#### 3.9.1. Yoğunluk analizi

Üretilen parçaların yoğunluklarını hesaplamak için ilk olarak parçalar tartılarak kütleleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen kütlelerin hacimlere bölünmesiyle parçaların görünür yoğunlukları hesaplanmıştır. Aşağıdaki denklem (Denklem 3.2)

kullanılmıştır. Ancak düzgün bir şekle sahip olmayan parçaların yoğunluk hesabında Aşimet prensibi kullanılabilir.

$$\rho = \frac{m}{v} \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (3.2)$$

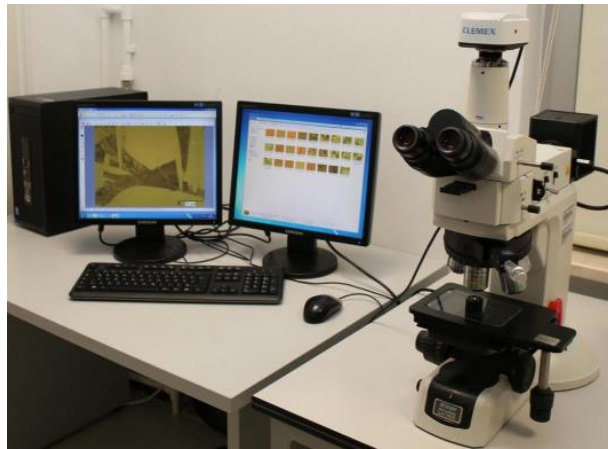
### 3.9.2. Porozite analizi

Porozite üretilen parçalar içerisindeki boşlukları ifade etmektedir. Poroz yapılar hafif olması ve yeterli mukavemete sahip olması sebebiyle avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada porozitenin mukavemete olan etkisi deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Porozite oranının belirlenmesi için aşağıdaki denklem (Denklem 3.3) kullanılmıştır. ( $\rho$ : Ölçülen alaşım yoğunluğu,  $\rho_s$ : hidroksi apatit karışımlarının hesaplanan teorik yoğunluğu)

$$P = \frac{1-\rho}{\rho_s} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.9.3. Optik Görüntü Analizi

Üretilen parçaların iç yapı analizinin yapılabilmesi için 10x büyütme oranı ile ICON Eclipse Optik Mikroskop kullanılmıştır. Şekil3.9.'da kullanılan optik mikroskop gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Optik Mikroskop (NICON Eclipse)



### 3.9.4. Basma testi

Üretilen parçaların basma dayanımları ZwickRoell (Z50, USA) cihazında yapılan basma testleri ile belirlenmiştir. Ağırlıkça farklı yoğunluklardaki ve farklı bağlayıcılarla üretilen her bir durum için 3'er tane numune üretilerek teste tabi tutulmuştur. 3 farklı numuneden ortaya çıkan değerler ortalaması alınarak her bir durum için basma dayanımları belirlenmiştir. Basma testlerinde tüm parçalar için 1 mm/dk basma hızı uygulanmıştır.



Şekil 3.10. Basma test cihazı (ZwickRoell Z50).

## BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

### 4.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada bağlayıcı tiplerinin parçanın mekanik özelliklerine ve mikro yapılarına olan etkileri araştırılmıştır. 2 Farklı tipte (toz, sıvı) bağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı tipinin nihai parçanın mukavemetine ve mikro yapılarına etki ettiği görülmüştür. Sıvı bağlayıcı olarak kullanılan ZB10 ve Hp 45 bağlayıcı arasında ZB 10 bağlayıcının daha mukavim yapılar oluşturduğu ve toz bağlayıcılar ile arasında daha iyi etkileşim gösterdiği görülmüştür. Hp 45 mürekkep ise %99 su olduğu için herhangi bir bağlayıcı özelliği bulunmadığından sadece toz yatağı içerisinde bulunan toz bağlayıcıları çözerek bağlanma sağlamaktadır. Bu sebeple üretilen parçalarda yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri bakımından karşılaştırma yapıldığında ZB 10 bağlayıcı daha iyi sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte kullanılan toz bağlayıcılar PVA ve Akrilik ana yapı malzemesi olan hidroksiapatit ile birlikte farklı oranlarda (ağırlıkça %20, %30, %40) karıştırılarak parça üretimi sağlanmıştır. Burada kullanılan PVA ve Akrilik oranı arttıkça parçaların mukavemetinin ve yüzey kalitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak HA tozu ile ağırlıkça %20 oranında karıştırılan akrilik ve PVA karışımları ile üretilen numuneler çok düşük geometrik doğruluk ve rijitliğe sahip olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. PVA ve Akrilik karşılaştırıldığında PVA'nın daha iyi mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine imkan sağladığı görülmüştür. Ayrıca HA ve PVA karışımları ile üretilen numunelerin daha sünek yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda göre ağırlıkça %40 oranında hidroksiapatit ile karıştırılan PVA toz bağlayıcısı ve ZB 10 sıvı bağlayıcısı ile üretilen ürün numunelerinin basma testi sonucu gösterdiği 9.91 MPA basma dayanımı ile tüm numuneler arasında en dayanıklı üretim varyasyonu olmuştur.



Şekil 4.1. BJ Yöntemiyle üretilen numune görselleri.

#### 4.2. Yüzey Kalitesi ve Geometrik Doğruluk Değerlendirmesi

HA tozu ile ağırlıkça %20 oranında karıştırılan Akrilik ve PVA tozu ile üretilen numuneler ilgili mekanik test dayanımını karşılayacak hassasiyette olmadığı görülmüştür. Bu sebeple HA tozu ile ağırlıkça %30 ve %40 oranında yapılan karışımlar ile üretilen numuneler, ilgili test ve analizlere tabi tutulmuştur. HA ana yapı tozu tek başına sıvı bağlayıcılar ile yeterli bağlanma kabiliyetine sahip olmadığı için PVA ve Akrilik tozuyla karıştırılarak bağlanma kabiliyeti arttırılmıştır. Yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk açısından karşılaştırılan numunelerin birbirlerine yakın değerler sağladığı görülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda PVA ile hazırlanan karışımların Akrilik ile hazırlanan karışımlara göre geometrik doğruluk ve yüzey kalitesi bakımından daha iyi sonuçlar verdiği ve karışımlar içerisindeki PVA oranı arttıkça bu değerlerinde doğru orantılı olarak iyileştiği gözlemlenmiştir.

Üretimde kullanılan sıvı bağlayıcılar ZB10 ve HP45 mürekkep içerisinde en iyi bağlanma kabiliyetini ZB10 sıvı bağlayıcı sağlamıştır. Özetle, HA ile ağırlıkça %40 oranında PVA karışımı ve sıvı bağlayıcı olarakta ZB10 kullanılan numuneler %96 geometrik doğruluk oranı ile en sonucu vermiştir.

Tablo 4.1. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin bağıl geometrik doğruluk değerleri.

Numune	Ortalama Çap(mm)	BOY (mm)	Doğruluk Oranı
70:40wt.% HA:PVA & ZB10	6,75	10,7	96,8%
70:40wt.% HA:PVA & HP45	6,8	9,9	96,1%
70:30wt.% HA:PVA & ZB10	6,7	10,1	96,7%
70:30wt.% HA:PVA & HP45	7,2	9,3	95,9%
70:40wt.% HA:Akrilik & ZB10	6,75	9,8	94,5%
70:40wt.% HA:Akrilik & HP45	6,73	11,15	92,7%
70:30wt.% HA:Akrilik & ZB10	6,9	9,2	90,7%
70:30wt.% HA:Akrilik & HP45	6,71	9,3	89,1%
CAD Model Numune Ölçüsü	7	10	100%

### 4.3. Yoğunluk

Binder Jetting yöntemiyle yapılan parça üretiminin en önemli dezavantajı parça yoğunluğunun düşük olmasıdır. Üretim esnasında herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamasından sadece sıvı bağlayıcının bağlanma kabiliyeti ile toz malzemelerin birleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yöntemde numunenin yoğunluğunu etkileyen en temel faktörler, kullanılan toz malzemenin tane boyutu ve dağılımı, üretim parametreleri, sinterleme koşulları ve üretim sonrasında uygulanan işlemlerdir. Bu çalışmada numune yoğunluğunu etkileyen faktörler tüm numuneler için sabit tutulduğundan yani üretim parametreleri, sinterlem koşulları, toz tane boyutu ve dağılımı parametreleri sabit olduğundan dolayı üretilen numunelerin yoğunluklarının birbirine çok yakın olması beklenmekteydi. Nitekim yapılan ölçümler sonucunda aşağıda görüldüğü üzere yoğunluk değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Tablo 4.2. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin kütle hacim ve bağıl yoğunluk değerleri.

Numune	Hacim (mm <sup>3</sup> )	Kütle (gr)	Yoğunluk (%)
70:40wt.% HA:PVA & ZB10	382,7	0,824	90,77%
70:40wt.% HA:PVA & HP45	359,35	0,771	90,45%
70:30wt.% HA:PVA & ZB10	355,91	0,82	89,68%
70:30wt.% HA:PVA & HP45	378,45	0,87	89,48%
70:40wt.% HA:Akrilik & ZB10	350,51	0,75	90,21%
70:40wt.% HA:Akrilik & HP45	396,43	0,83	88,27%
70:30wt.% HA:Akrilik & ZB10	343,83	0,79	89,44%
70:30wt.% HA:Akrilik & HP45	328,69	0,75	88,82%

### 4.4. Porozite

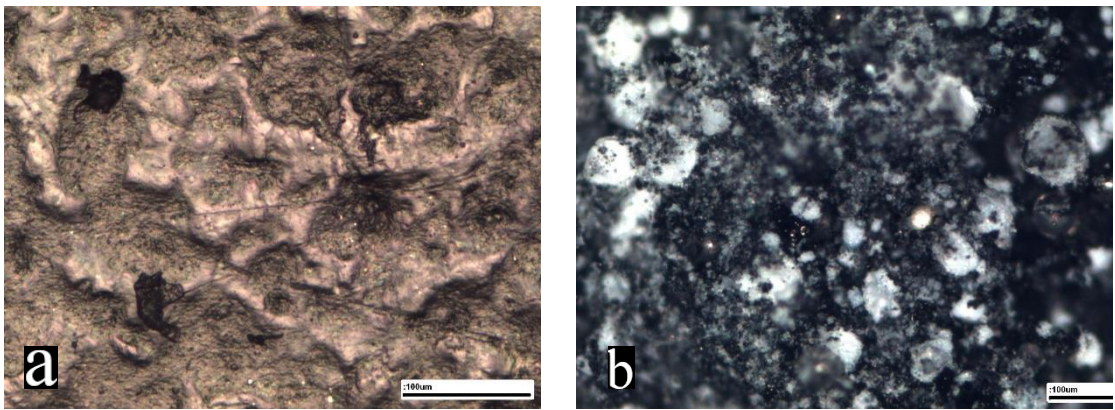
Binder Jetting yöntemiyle üretilen numunelerin Optik görüntü analizleri şekil 4.2'de gösterilmektedir. Binder jetting yöntemiyle üretilen numunelerin görüntüleri

incelendiğinde boşlukların düzenli bir şekle sahip olmadığı ve düzensiz bir yapıda olduğu görülmektedir. Binder Jetting yönteminde sıkıştırma bamsıncı olmadığından dolayı ve bağlayıcının püskürtme esnasında oluşturduğu damlacık etkisinde sebebiyle oluşan boşluklar düzensiz yapıda olmaktadır.

#### 4.5. Optik Görüntü Analizi

Optik görüntü analizleri incelendiği zaman HA ve PVA toz karışımının ZB10 sıvı bağlayıcı ile üretilen numunelerinde, sıvı bağlayıcının toz olarak kullanılan PVA ile etkileşime girerek çözüldüğü ve bağlayıcı özellik kazandığı görülmüştür. Bu sebeple optik görüntüler incelendiğinde Şekil 4.2a'da Daha az boşluk ve büyük tanecikli yapıların oluştuğu görülmüştür. Ancak HA ve PVA toz karışımlarının HP45 sıvı bağlayıcı ile olan üretimlerinde sıvı bağlayıcının toz bağlayıcı olarak kullanılan PVA ile etkileşime girmediği bu sebeple ana yapı malzemesi olan HA ile iyi bir bağlanma sağlayamadığı görülmüştür. Şekil 4.2b incelendiğinde daha küçük tane yapısı ve daha fazla boşluklu yapıların oluştuğu görülmektedir.

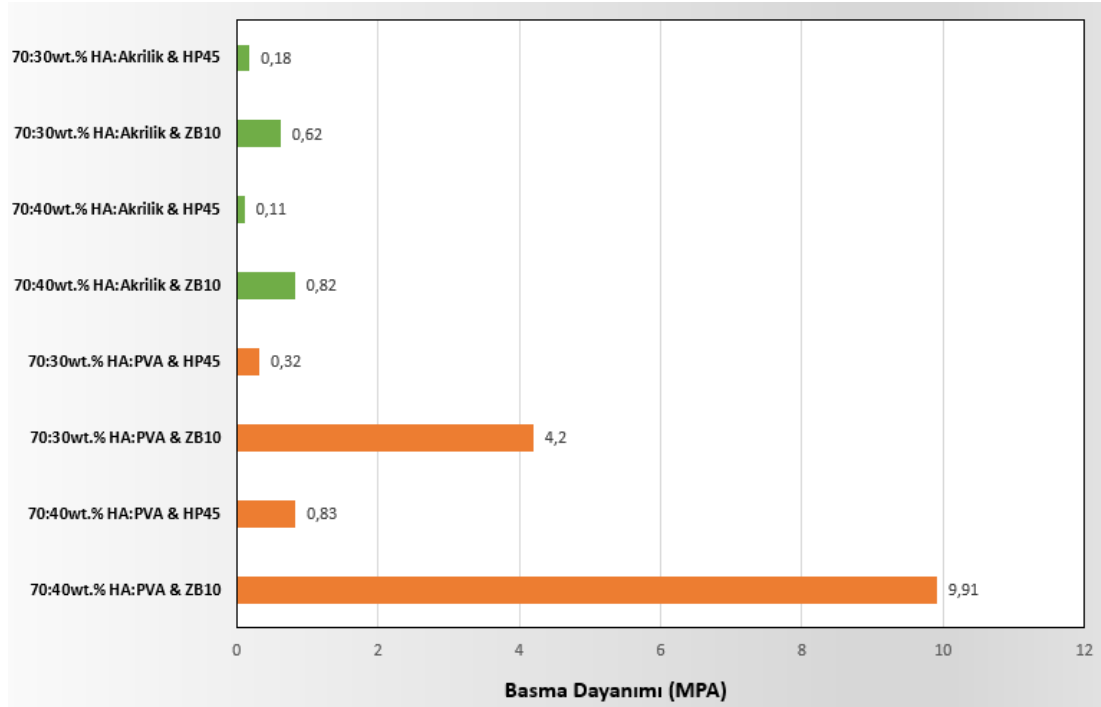
Sonuç olarak, ZB10 bağlayıcı ile üretilen tüm numuneler ZB10 sıvı bağlayıcısının çözücü özelliği ve içerdiği bağlayıcı özelliği sayesinde geometrik doğruluk ve mukavemet açısından daha sağlam parçaların üretimine imkan sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.2. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin optik görüntüleri. a) HA ve PVA karışımlarının ZB 10 bağlayıcı ile üretilen numunelerin optik görüntüleri. b) HA ve PVA karışımlarının HP45 bağlayıcı ile üretilen numunelerin optik görüntüleri.

#### 4.6. Basma Testi sonuçları

Hidroksiapatit malzemesi biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle implat üretiminde hafif olması ve uzun yorulma ömrü sebebiyle önemli avantajlar sağlamaktadır. HA dayanımı toz malzeme özelliklerine, parçanın yoğunluğuna boşluk miktarına ve dağılımına göre farklılık göstermektedir. Yapılan basma testi sonucuna göre HA ve Akrilik karışımıyla üretilen numunelerin beklenildiği gibi bağlanma sağlayamadığı ve dolayısıyla dayanım açısından çok düşük değerler verdiği görülmüştür. Kullanılan bağlayıcılar arasında HP45 kartuş herhangi bir bağlayıcı özelliği olmadığından dolayı sadece içerdiği su miktarı ile numunelerin çözünmesinde yeterli olmadığı ve bu sebeple basma dayanımı değerlerinin çok düşük çıktığı görülmektedir. Yapılan diğer çalışmalarda da belirtildiği üzere mekanik dayanım açısından HA ile yapılan karışımlarda PVA şimdilik en iyi sonuçları vermektedir. Yaptığımız çalışmada HA ile ağırlıkça %40 PVA karışımı ve sıvı bağlayıcı olarak kullanılan ZB10 bağlayıcı ile üretilen numunelerin 9,91 MPA basma dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. BJ yöntemiyle üretilen numunelerin basma testi sonuçları.

#### 4.7. Değerlendirme

Bu çalışmada Binder Jetting yöntemi ile parça üretiminde bağlayıcıların parçanın mekanik dayanımına, geometrik doğruluğuna ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri incelenmiştir. Bağlayıcılarını etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için sıvı bağlayıcılar ile yeterli etkileşime giremeyerek başarılı üretim sonuçları elde edilemeyen HA ana yapı malzemesi kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda HA ana yapı malzemesi ile PVA ve Akrilik tozları karıştırılarak bağlanma kabiliyeti arttırılmıştır. Daha önce bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda PVA malzemesi HA ile birlikte en iyi sonuçları veren malzemeydi. Akrilik malzemesinin düşük biyo uyumluluğuna rağmen ağırlıkça daha düşük miktarlarda hazırlanan karışımlar ile (üretilen parça içerisindeki HA ana yapı malzemesini maksimum oranda tutabilmek için) daha yüksek bağlanma kabiliyeti ve daha yüksek mekanik dayanım, geometrik doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü elde etmek amaçlanmıştır. Üretilen numuneler, geometrik doğruluk, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluk ve porozite gibi sonuçları karşılaştırıldığında PVA malzemesi ile çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak bununla birlikte Akrilik karışımları ile üretilen numunelerin PVA malzemesine göre çok daha düşük mekanik dayanıma sahip olduğu görülmüştür. İçerisinde %40 Akrilik ile %60 HA karışımı bulunan toz malzeme ile sıvı bağlayıcı olarak ZB10 kullanıldığı varyasyonda en yüksek mekanik dayanıma sahip olmuştur bu değerde 0,82 MPA gibi çok düşük bir değerdir. Dolayısıyla HA ile numune üretiminde Akrilik malzemesi PVA ya alternatif bir malzeme olamamıştır. PVA ile yapılan üretimlerde toz malzeme içerisindeki PVA miktarının arttıkça mekanik dayanımında arttığı görülmüştür. İçerisinde %40PVA ile %60 HA malzemeleri bulunan toz karışımı ile birlikte kullanılan ZB10 sıvı bağlayıcı varyasyonunda 9,91 MPA ile en yüksek mekanik dayanım değerine sahip olmuştur. Bu değer şimdiye kadar yapılan çalışmalar içerisinde en yüksek basma dayanım değeridir. Üretim aşamalarında kullanılan HP45 ile ZB10 sıvı bağlayıcıları arasında kıyaslama yapıldığında ZB10 bağlayıcısının bağlanma kabiliyeti ve toz malzeme içerisindeki toz bağlayıcıları çözebilme kabiliyeti açısından HP 45 kartuşa göre daha iyi olduğu görülmüştür. HP 45 içerisinde %99 oranında su bulundurduğundan ve ilave olarak herhangi bir bağlayıcı madde bulundurmadığından dolayı bu farkın oluştuğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak BJ yöntemiyle numune üretiminde en problemlili olduğu düşünölen HA malzemesi bile çeşitli bağlayıcı varyasyonları ile yüksek doğrulukta ve mekanik dayanımda numuneler üretilmesine imkan sağlmıştır. Bağlayıcıların, özellikle green part numuneleri üzerindeki etkisinin çok önemli olduğu görölmüştür. Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında farklı sıvı bağlayıcılar kullanılarak PVA malzemesinin ağırlıkça daha düşük oranlarda karıştırılması ile aynı veya daha iyi sonuçların elde edilmesi amaçlanabilir. Burada HA ana yapı malzemesinin fazla olması üretilen numunenin biyo uyumluluğunu ve medikal uygulamalarda daha doğru sonuçlar vereceğinden bu yönde yapılan çalışmalar büyük öneme sahiptir.



## KAYNAKLAR

- Agland, S. I. S. M. (y.y.). Chemeca 99: Chemical Engineering: Solutions in a Changing Environment - The impact of liquid drops on powder bed surfaces (Engineering Collection) - Informit. 2 Ocak 2021 tarihinde <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=946712245425974;res=IELENG> adresinden erişildi.
- Asadi-Eydivand, M., Solati-Hashjin, M. ve Abu Osman, N. A. (2018). Mechanical behavior of calcium sulfate scaffold prototypes built by solid free-form fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1392–1400. doi:10.1108/RPJ-06-2015-0077.
- Asadi-Eydivand, M., Solati-Hashjin, M., Farzad, A. ve Abu Osman, N. A. (2016). Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 57–67. doi:10.1016/j.rcim.2015.06.005.
- Ashoke Raman, K., Jaiman, R. K., Lee, T. S. ve Low, H. T. (2016). Lattice Boltzmann study on the dynamics of successive droplets impact on a solid surface. *Chemical Engineering Science*, 145, 181–195. doi:10.1016/j.ces.2016.02.017.
- Averardi, A., Cola, C., Zeltmann, S. E. ve Gupta, N. (2020). Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 24, 100964. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.100964.
- Bai, Y., Wall, C., Pham, H., Esker, A. ve Williams, C. B. (2019). Characterizing Binder-Powder Interaction in Binder Jetting Additive Manufacturing Via Sessile Drop Goniometry. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 141(1). doi:10.1115/1.4041624.
- Bai, Y. ve Williams, C. B. (2015). An exploration of binder jetting of copper. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 177–185. doi:10.1108/RPJ-12-2014-0180.
- Bai, Y. ve Williams, C. B. (2017). Binderless Jetting: Additive Manufacturing of metal parts via jetting nanoparticles. <https://www.desktopmetal.com/products/production/> adresinden erişildi.
- Bai, Y. ve Williams, C. B. (2018a). Binder jetting additive manufacturing with a particle-free metal ink as a binder precursor. *Materials and Design*, 147, 146–156. doi:10.1016/j.matdes.2018.03.027.

- Bai, Y. ve Williams, C. B. (2018b). The effect of inkjetted nanoparticles on metal part properties in binder jetting additive manufacturing. *Nanotechnology*, 29(39), 395706. doi:10.1088/1361-6528/aad0bb.
- Butscher, A., Bohner, M., Doebelin, N., Galea, L., Loeffel, O. ve Müller, R. (2013). Moisture based three-dimensional printing of calcium phosphate structures for scaffold engineering. *Acta Biomaterialia*, 9(2), 5369–5378. doi:10.1016/j.actbio.2012.10.009.
- Caputo, M., Solomon, C. V., Nguyen, P.-K. ve Berkowitz, A. E. (2016). Electron Microscopy Investigation of Binder Saturation and Microstructural Defects in Functional Parts Made by Additive Manufacturing. *Microscopy and Microanalysis*, 22(S3), 1770–1771. doi:10.1017/s1431927616009697.
- Castilho, M., Dias, M., Gbureck, U., Groll, J., Fernandes, P., Pires, I., ... Vorndran, E. (2013). Fabrication of computationally designed scaffolds by low temperature 3D printing. *Biofabrication*, 5(3), 035012. doi:10.1088/1758-5082/5/3/035012.
- Castilho, M., Gouveia, B., Pires, I., Rodrigues, J. ve Pereira, M. (2015). The role of shell/core saturation level on the accuracy and mechanical characteristics of porous calcium phosphate models produced by 3Dprinting. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 43–55. doi:10.1108/RPJ-02-2013-0015.
- Chen, H. ve Zhao, Y. F. (2016). Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 527–538. doi:10.1108/RPJ-11-2014-0149.
- Cho, W., Sachs, E. M., Patrikalakis, N. M. ve Troxel, D. E. (2003). A dithering algorithm for local composition control with three-dimensional printing. *CAD Computer Aided Design*, 35(9), 851–867. doi:10.1016/S0010-4485(02)00122-7.
- Chumnanklang, R., Panyathanmaporn, T., Sitthiseriratip, K. ve Suwanprateeb, J. (2007). 3D printing of hydroxyapatite: Effect of binder concentration in pre-coated particle on part strength. *Materials Science and Engineering C*, 27(4), 914–921. doi:10.1016/j.msec.2006.11.004.
- Colton, T., Liechty, J., Mclean, A. ve Crane, N. (y.y.). INFLUENCE OF DROP VELOCITY AND DROPLET SPACING ON THE EQUILIBRIUM SATURATION LEVEL IN BINDER JETTING.
- Cooke, A. ve Slotwinski, J. (y.y.). Properties of Metal Powders for Additive Manufacturing: A Review of the State of the Art of Metal Powder Property Testing. doi:10.6028/NIST.IR.7873.
- Cox, S. C., Thornby, J. A., Gibbons, G. J., Williams, M. A. ve Mallick, K. K. (2015). 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering C*, 47, 237–247. doi:10.1016/j.msec.2014.11.024.

- Crane, N. B., Wilkes, J., Sachs, E. ve Allen, S. M. (2006). Improving accuracy of powder-based SFF processes by metal deposition from a nanoparticle dispersion. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 266–274. doi:10.1108/13552540610707022.
- Derby, B. (2010). Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annual Review of Materials Research*, 40(1), 395–414. doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502.
- Derby, B. ve Reis, N. (2003, 31 Ocak). Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions. *MRS Bulletin*. Materials Research Society. doi:10.1557/mrs2003.230.
- Dini, F., Ghaffari, S. A., Jafar, J., Hamidreza, R. ve Marjan, S. (2020). A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition. *Metal Powder Report*, 75(2), 95–100. doi:10.1016/j.mprp.2019.05.001.
- Do, T., Bauder, T. J., Suen, H., Rego, K., Yeom, J. ve Kwon, P. (2018). Additively manufactured full-density stainless steel 316L with binder jet printing. *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2018 içinde* (C. 1). American Society of Mechanical Engineers (ASME). doi:10.1115/MSEC2018-6681.
- Do, T., Kwon, P. ve Shin, C. S. (2017). Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 121, 50–60. doi:10.1016/j.ijmachtools.2017.04.006.
- Duineveld, P. C., de Kok, M. M., Buechel, M., Sempel, A., Mutsaers, K. A. H., van de Weijer, P., ... Haskal, E. I. (2002). Ink-jet printing of polymer light-emitting devices. Z. H. Kafafi (Ed.), *Organic Light-Emitting Materials and Devices V içinde* (C. 4464, s. 59). SPIE. doi:10.1117/12.457460.
- Elliott, A., AlSalihi, S., Merriman, A. L. ve Basti, M. M. (2016). Infiltration of Nanoparticles into Porous Binder Jet Printed Parts. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(1), 128–133. doi:10.3844/ajeassp.2016.128.133.
- Elliott, A. M. ve Love, L. J. (y.y.). OPERATOR BURDEN IN METAL ADDITIVE MANUFACTURING. <http://energy.gov/downloads/doe-public-adresinden-erişildi>.
- Elliott, A. M., Nandwana, P., Siddel, D. ve Compton, B. G. (2016). A Method for Measuring Powder Bed Density in Binder Jet Additive Manufacturing Process and the Powder Feedstock Characteristics Influencing the Powder Bed Density. <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan-adresinden-erişildi>.
- Emady, H. N., Kayrak-Talay, D. ve Litster, J. D. (2013). Modeling the granule formation mechanism from single drop impact on a powder bed. *Journal of Colloid and Interface Science*, 393(1), 369–376. doi:10.1016/j.jcis.2012.10.038.

- Emady, H. N., Kayrak-Talay, D., Schwerin, W. C. ve Litster, J. D. (2011). Granule formation mechanisms and morphology from single drop impact on powder beds. *Powder Technology*, 212(1), 69–79. doi:10.1016/j.powtec.2011.04.030.
- Enneti, R. K. ve Prough, K. C. (2019). Effect of binder saturation and powder layer thickness on the green strength of the binder jet 3D printing (BJ3DP) WC-12%Co powders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, 104991. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.104991.
- Farzadi, A., Solati-Hashjin, M., Asadi-Eydivand, M. ve Abu Osman, N. A. (2014). Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering. *PLoS ONE*, 9(9), e108252. doi:10.1371/journal.pone.0108252.
- Fayazfar, H., Salarian, M., Rogalsky, A., Sarker, D., Russo, P., Paserin, V. ve Toyserkani, E. (2018). A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 144, 98–128. doi:10.1016/j.matdes.2018.02.018.
- Forny, L., Marabi, A. ve Palzer, S. (2011). Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. *Powder Technology*, 206(1–2), 72–78. doi:10.1016/j.powtec.2010.07.022.
- Fradl, D., Panditaratne, J., Bi, J., Fu, R. ve Oancea, V. (2017). Finite Element Simulation of the Multi Jet Fusion (MJFTM) Process using Abaqus Composites simulation View project Frictional stability View project Jing Bi Dassault Systèmes Finite Element Simulation of the Multi Jet Fusion (MJFTM) Process using Abaqus. <https://www.researchgate.net/publication/318724916> adresinden erişildi.
- Gardan, J. (2017). Method for characterization and enhancement of 3D printing by binder jetting applied to the textures quality. *Assembly Automation*, 37(2), 162–169. doi:10.1108/AA-01-2016-007.
- Gaytan, S. M., Cadena, M. A., Karim, H., Delfin, D., Lin, Y., Espalin, D., ... Wicker, R. B. (2015). Fabrication of barium titanate by binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 41(5), 6610–6619. doi:10.1016/j.ceramint.2015.01.108.
- Gaytan, Sara M, Cadena, M., Aldaz, M., Herderick, E., Medina, F. ve Wicker, R. (2013). Analysis of ferroelectric ceramic fabricated by binder jetting technology.
- Gilmer, D., Han, L., Hong, E., Siddel, D., Kisliuk, A., Cheng, S., ... Saito, T. (2020). An in-situ crosslinking binder for binder jet additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101341. doi:10.1016/j.addma.2020.101341.

- Gonzalez, J. A., Mireles, J., Lin, Y. ve Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559–10564. doi:10.1016/j.ceramint.2016.03.079.
- Hoffmann, A. C. ve Finkers, H. J. (1995). A relation for the void fraction of randomly packed particle beds. *Powder Technology*, 82(2), 197–203. doi:10.1016/0032-5910(94)02910-G.
- Holland, S., Foster, T., MacNaughtan, W. ve Tuck, C. (2018). Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 12–19. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.06.008.
- Hutchings, I. M., Martin, G. D. ve Hoath, S. D. (2007). High speed imaging and analysis of jet and drop formation. *Journal of Imaging Science and Technology* içinde (C. 51, ss. 438–444). doi:10.2352/J.ImagingSci.Technol.(2007)51:5(438).
- Kafara, M., Kemnitzer, J., Westermann, H. H. ve Steinhilper, R. (2018). Influence of Binder Quantity on Dimensional Accuracy and Resilience in 3D-Printing. *Procedia Manufacturing* içinde (C. 21, ss. 638–646). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.promfg.2018.02.166.
- Kernan, B. D., Sachs, E. M., Oliveria, M. A. ve Cima, M. J. (2003). Three dimensional printing of tungsten carbide-cobalt using a cobalt oxide precursor. 12 Aralık 2020 tarihinde <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/78566> adresinden erişildi.
- Kingery, W. D. ve Narasimhan, M. D. (1959). Densification during sintering in the presence of a liquid phase. II. Experimental. *Journal of Applied Physics*, 30(3), 307–310. doi:10.1063/1.1735156.
- Kumar, A., Bai, Y., Eklund, A. ve Williams, C. B. (2017). Effects of Hot Isostatic Pressing on Copper Parts Fabricated via Binder Jetting. *Procedia Manufacturing*, 10, 935–944. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.084.
- Kwon, K. S. ve Kim, W. (2007). A waveform design method for high-speed inkjet printing based on self-sensing measurement. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 140(1), 75–83. doi:10.1016/j.sna.2007.06.010.
- Lanzetta, M. ve Sachs, E. (2003). Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution. *Rapid Prototyping Journal*, 9(3), 157–166. doi:10.1108/13552540310477463.
- Legeros, R. Z. ve Craig, R. G. (2009). Strategies to affect bone remodeling: Osteointegration. *Journal of Bone and Mineral Research*, 8(S2), S583–S596. doi:10.1002/jbmr.5650081328.

- Li, S. ve Cao, S. (2012). Print parameters influence on parts' quality and calibration with 3DP-part I: Print parameters influence on parts' surface topography. *Advanced Materials Research içinde* (C. 399–401, ss. 1639–1645). Trans Tech Publications Ltd. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.399-401.1639.
- Lu, K. ve Reynolds, W. T. (2008). 3DP process for fine mesh structure printing. *Powder Technology*, 187(1), 11–18. doi:10.1016/j.powtec.2007.12.017.
- M. Randall, Suri, P. ve Park, S. J. (2009). Review: Liquid phase sintering. *Journal of Materials Science*, 44(1), 1–39. doi:10.1007/s10853-008-3008-0.
- M. Salehi, M. G. S. M. N. M. L. S. (2018). Inkjet Based 3D Additive Manufacturing of Metals .
- Maleksaeedi, S., Meenashisundaram, G., Lu, S., Salehi, M. ve Jun, W. (2018). Hybrid Binder to Mitigate Feed Powder Segregation in the Inkjet 3D Printing of Titanium Metal Parts. *Metals*, 8(5), 322. doi:10.3390/met8050322.
- Manogharan, G., Kioko, M. ve Linkous, C. (2015). Binder Jetting: A Novel Solid Oxide Fuel-Cell Fabrication Process and Evaluation. *JOM*, 67(3), 660–667. doi:10.1007/s11837-015-1296-9.
- Marston, J. O., Sprittles, J. E., Zhu, Y., Li, E. Q., Vakarelski, I. U. ve Thoroddsen, S. T. (2013). Drop spreading and penetration into pre-wetted powders. *Powder Technology*, 239, 128–136. doi:10.1016/j.powtec.2013.01.062.
- Marston, J. O., Thoroddsen, S. T., Ng, W. K. ve Tan, R. B. H. (2010). Experimental study of liquid drop impact onto a powder surface. *Powder Technology*, 203(2), 223–236. doi:10.1016/j.powtec.2010.05.012.
- Martin, G. D., Hoath, S. D. ve Hutchings, I. M. (2008). Inkjet printing - The physics of manipulating liquid jets and drops. *Journal of Physics: Conference Series*, 105(1), 012001. doi:10.1088/1742-6596/105/1/012001.
- Mendoza Jimenez, E., Ding, D., Su, L., Joshi, A. R., Singh, A., Reeja-Jayan, B. ve Beuth, J. (2019). Parametric analysis to quantify process input influence on the printed densities of binder jetted alumina ceramics. *Additive Manufacturing*, 30, 100864. doi:10.1016/j.addma.2019.100864.
- Meteyer, S., Xu, X., Perry, N. ve Zhao, Y. F. (2014). Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. *Procedia CIRP içinde* (C. 15, ss. 19–25). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.procir.2014.06.030.
- Miyajani, H., Momenzadeh, N. ve Yang, L. (2018). Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing*, 20, 1–10. doi:10.1016/j.addma.2017.12.008.
- Miyajani, H., Momenzadeh, N. ve Yang, L. (2019). Effect of powder characteristics on parts fabricated via binder jetting process. *Rapid Prototyping Journal*, 25(2), 332–342. doi:10.1108/RPJ-03-2018-0069.

- Miyanaji, H., Orth, M., Akbar, J. M. ve Yang, L. (2018, 1 Aralık). Process development for green part printing using binder jetting additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering*. Higher Education Press. doi:10.1007/s11465-018-0508-8.
- Miyanaji, H. ve Yang, L. (2016). Equilibrium Saturation In Binder Jetting Additive Manufacturing Processes: Theoretical Model Vs. Experimental Observations..
- Miyanaji, H., Zhang, S., Lassell, A., Zandinejad, A. ve Yang, L. (2016). Process Development of Porcelain Ceramic Material with Binder Jetting Process for Dental Applications. *JOM*, 68(3), 831–841. doi:10.1007/s11837-015-1771-3.
- Miyanaji, H., Zhang, S. ve Yang, L. (2018). A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 124, 1–11. doi:10.1016/j.ijmachtools.2017.09.001.
- Mostafaei, A., Behnamian, Y., Krimer, Y. L., Stevens, E. L., Luo, J. L. ve Chmielus, M. (2016). Effect of solutionizing and aging on the microstructure and mechanical properties of powder bed binder jet printed nickel-based superalloy 625. *Materials and Design*, 111, 482–491. doi:10.1016/j.matdes.2016.08.083.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., ... Chmielus, M. (2020, 15 Haziran). Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, and challenges. *Progress in Materials Science*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100707.
- Mostafaei, A., Stevens, E. L., FERENCE, J. J., Schmidt, D. E. ve Chmielus, M. (2017). Binder jet printing of partial denture metal framework from metal powder. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2017, MS and T 2017 içinde* (C. 1, ss. 289–291). Association for Iron and Steel Technology, AISTECH. doi:10.7449/2017/MST\_2017\_289\_291.
- Mostafaei, A., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Biery, S. D., Hilla, C. ve Chmielus, M. (2016). Powder bed binder jet printed alloy 625: Densification, microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 108, 126–135. doi:10.1016/j.matdes.2016.06.067.
- Mostafaei, A., Toman, J., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Krimer, Y. L. ve 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. doi:10.1016/j.actamat.2016.11.021.
- Mundozah, A. L., Cartwright, J. J., Tridon, C. C., Hounslow, M. J. ve Salman, A. D. (2018). Hydrophobic/hydrophilic static powder beds: Competing horizontal spreading and vertical imbibition mechanisms of a single droplet. *Powder Technology*, 330, 275–283. doi:10.1016/j.powtec.2018.02.032.

- Myers, K., Paterson, A., Iizuka, T. ve Klein, A. (2019). The Effect of Print Speed on Surface Roughness and Density Uniformity of Parts Produced Using Binder Jet 3D Printing.
- Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H. ve Babu, S. S. (2017). Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges☆. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 207–218. doi:10.1016/j.cossms.2016.12.002.
- Nguyen, T., Shen, W. ve Hapgood, K. (2009). Drop penetration time in heterogeneous powder beds. *Chemical Engineering Science*, 64(24), 5210–5221. doi:10.1016/j.ces.2009.08.038.
- Nied, H. F., Taylor, C. A. ve Delorenzi, H. G. (1990). Three-dimensional finite element simulation of thermoforming. *Polymer Engineering and Science*, 30(20), 1314–1322. doi:10.1002/pen.760302009.
- Nilsson, M., Fernández, E., Sarda, S., Lidgren, L. ve Planell, J. A. (2002). Characterization of a novel calcium phosphate/sulphate bone cement. *Journal of Biomedical Materials Research*, 61(4), 600–607. doi:10.1002/jbm.10268.
- O.A. Basaran. (2002). Small-scale free surface flows with breakup: Drop formation and emerging applications - ProQuest. 2 Ocak 2021 tarihinde <https://search.proquest.com/openview/e915ea34cc7021b335911519cfd9e047/1?pq-origsite=gscholar&cbl=7879> adresinden erişildi.
- Oh, J. W., Nahm, S., Kim, B. ve Choi, H. (2019). Anisotropy in green body bending strength due to additive direction in the binder-jetting additive manufacturing process. *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*, 57(4), 227–235. doi:10.3365/KJMM.2019.57.4.227.
- Oostveen, M. L. M., Meesters, G. M. H. ve van Ommen, J. R. (2015). Quantification of powder wetting by drop penetration time. *Powder Technology*, 274, 62–66. doi:10.1016/j.powtec.2014.09.021.
- Özgün, Ö., Gulsoy, H. O., Yilmaz, R. ve Findik, F. (2013). Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 576, 140–153. doi:10.1016/j.jallcom.2013.04.042.
- Parab, N. D., Barnes, J. E., Zhao, C., Cunningham, R. W., Fezzaa, K., Rollett, A. D. ve Sun, T. (2019). Real time observation of binder jetting printing process using high-speed X-ray imaging. *Scientific Reports*, 9(1). doi:10.1038/s41598-019-38862-7.
- Paranthaman, M. P., Shafer, C. S., Elliott, A. M., Siddel, D. H., McGuire, M. A., Springfield, R. M., ... Ormerod, J. (2016). Binder Jetting: A Novel NdFeB Bonded Magnet Fabrication Process. *JOM*, 68(7), 1978–1982. doi:10.1007/s11837-016-1883-4.



- Parteli, E. J. R. ve Pöschel, T. (2016). Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing. *Powder Technology*, 288, 96–102. doi:10.1016/j.powtec.2015.10.035.
- Patirupanusara, P., Suwanpreuk, W., Rubkumintara, T. ve Suwanprateeb, J. (2008). Effect of binder content on the material properties of polymethyl methacrylate fabricated by three dimensional printing technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1–3), 40–45. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.058.
- Peter Baker, by R. (1997). THREE DIMENSIONAL PRINTING WITH FINE METAL POWDERS. Massachusetts Institute of Technology. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/46287> adresinden erişildi.
- Pond, S. F. (2000). Inkjet technology and product development strategies.
- RL Coble. (1958). Initial Sintering of Alumina and Hematite. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(2), 55–62. doi:10.1111/j.1151-2916.1958.tb13519.x.
- SA'UDE, N., IBRAHIM, M., ISMAIL, N. A. ve IBRAHIM, R. (2011). 3228 Freeform Fabrication of Titanium Based Powder by Inkjet 3D Printer. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21*, 2011.6(0), \_3228-1\_- \_3228-5\_. doi:10.1299/jsmelem.2011.6.\_3228-1.
- Sachs EM, C. M. C. M. G. J. S. J. S. P. (2003). Jetting layers of powder and the formation of fine powder beds thereby.
- Salehi, M., Gupta, M., Maleksaeedi, S. ve Sharon, N. M. L. (2018). Inkjet Based 3D Additive Manufacturing of Metals. 2 Ocak 2021 tarihinde [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=ppRLDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP6&ots=qCnsl5rpH5&sig=IrruGMy240pXyuWZELChM6xUL7k&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=ppRLDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP6&ots=qCnsl5rpH5&sig=IrruGMy240pXyuWZELChM6xUL7k&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) adresinden erişildi.
- Salehi, M., Maleksaeedi, S., Nai, S. M. L., Meenashisundaram, G. K., Goh, M. H. ve Gupta, M. (2019). A paradigm shift towards compositionally zero-sum binderless 3D printing of magnesium alloys via capillary-mediated bridging. *Acta Materialia*, 165, 294–306. doi:10.1016/j.actamat.2018.11.061.
- Sama, S. R., Badamo, T. ve Manogharan, G. (2020). Case Studies on Integrating 3D Sand-Printing Technology into the Production Portfolio of a Sand-Casting Foundry. *International Journal of Metalcasting*, 14(1), 12–24. doi:10.1007/s40962-019-00340-1.
- Schaafsma, S. H., Vonk, P., Segers, P. ve Kossen, N. W. F. (1998). Description of agglomerate growth. *Powder Technology*, 97(3), 183–190. doi:10.1016/S0032-5910(97)03399-8.
- Schmutzler, C., Stiehl, T. H. ve Zaeh, M. F. (2019). Empirical process model for shrinkage-induced warpage in 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(4), 721–727. doi:10.1108/RPJ-04-2018-0098.

- Shanjani, Y., De Croos, J. N. A., Pilliar, R. M., Kandel, R. A. ve Toyserkani, E. (2010). Solid freeform fabrication and characterization of porous calcium polyphosphate structures for tissue engineering purposes. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 93B(2), 510–519. doi:10.1002/jbm.b.31610.
- Shanjani, Y., Hu, Y., Pilliar, R. M. ve Toyserkani, E. (2011). Mechanical characteristics of solid-freeform-fabricated porous calcium polyphosphate structures with oriented stacked layers. *Acta Biomaterialia*, 7(4), 1788–1796. doi:10.1016/j.actbio.2010.12.017.
- Shanjani, Y., Toyserkani, E. ve Wei, C. (2008). Modeling and characterization of biomaterials spreading properties in powder-based rapid prototyping techniques. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings içinde (C. 2, ss. 135–143)*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. doi:10.1115/IMECE2007-42530.
- Sheydaeian, E. ve Toyserkani, E. (2018a). Additive manufacturing functionally graded titanium structures with selective closed cell layout and controlled morphology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9–12), 3459–3469. doi:10.1007/s00170-018-1815-2.
- Sheydaeian, E. ve Toyserkani, E. (2018b). A new approach for fabrication of titanium-titanium boride periodic composite via additive manufacturing and pressure-less sintering. *Composites Part B: Engineering*, 138, 140–148. doi:10.1016/j.compositesb.2017.11.035.
- Sheydaeian, E., Vlasea, M., Woo, A., Pilliar, R., Hu, E. ve Toyserkani, E. (2017). Effect of glycerol concentrations on the mechanical properties of additive manufactured porous calcium polyphosphate structures for bone substitute applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 105(4), 828–835. doi:10.1002/jbm.b.33616.
- Shi, J. L. (1999). Solid state sintering of ceramics: Pore microstructure models, densification equations and applications. *Journal of Materials Science*, 34(15), 3801–3812. doi:10.1023/A:1004600816317.
- Shrestha, S. ve Manogharan, G. (2017). Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. *JOM*, 69(3), 491–497. doi:10.1007/s11837-016-2231-4.
- Simchi, A. (2004). The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 35(5), 937–948. doi:10.1007/s11663-004-0088-3.
- Simmons, J. H., Mohr, R. K., Tran, D. C., Macedo, P. B. ve Litovitz, T. A. (1979). Optical properties of waveguides made by a porous glass process. *Applied Optics*, 18(16), 2732. doi:10.1364/ao.18.002732.

- Song, J. H. ve Nur, H. M. (2004). Defects and prevention in ceramic components fabricated by inkjet printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3), 1286–1292. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.292.
- Spierings, A. B. ve Levy, G. (y.y.). Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades.
- Stoyanov, P., Andre, K., Prichard, P., Yao, M. ve Gey, C. (2016). Microstructural and Mechanical Characterization of Mo-containing Stellite Alloys Produced by three Dimensional Printing. *Procedia CIRP içinde* (C. 45, ss. 167–170). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.procir.2016.02.358.
- Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y. H., Hong, G. S. ve Chiu, A. (2015). A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. *Procedia Manufacturing içinde* (C. 1, ss. 308–319). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.057.
- Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C. ve Newkirk, J. W. (2016). Powders For Additive Manufacturing Processes: Characterization Techniques And Effects On Part Properties.
- Suwanprateeb, J., Sangam, R., Suvannapruk, W. ve Panyathanmaporn, T. (2009). Mechanical and in vitro performance of apatite-wollastonite glass ceramic reinforced hydroxyapatite composite fabricated by 3D-printing. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(6), 1281–1289. doi:10.1007/s10856-009-3697-1
- Suwanprateeb, J. ve Suwanpreuk, W. (2009). Development of translucent and strong three dimensional printing models. *Rapid Prototyping Journal*, 15(1), 52–58. doi:10.1108/13552540910925063.
- Suwanprateeb, Jintamai, Kerdsook, S., Boonsiri, T. ve Pratumpong, P. (2011). Evaluation of heat treatment regimes and their influences on the properties of powder-printed high-density polyethylene bone implant. *Polymer International*, 60(5), 758–764. doi:10.1002/pi.3006.
- Tay Vikas, B. K. B., Patel, V. ve Bradford, D. S. (1999). Calcium sulfate- and calcium phosphate-based bone substitutes mimicry of the mineral phase of bone. *Orthopedic Clinics of North America*, 30(4), 615–623. doi:10.1016/S0030-5898(05)70114-0.
- Techapiesancharoenkij, R. (2001). Bimetallic Bars with Local Control of Composition by Three-Dimensional Printing. Massachusetts Institute of Technology. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16626> adresinden erişildi.
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. ve Charitidis, C. (2018, 1 Ocak). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.mattod.2017.07.001.

- Utela, B. R., Storti, D., Anderson, R. L. ve Ganter, M. (2010). Development process for custom three-dimensional printing (3DP) material systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 132(1), 0110081–0110089. doi:10.1115/1.4000713.
- Utela, B., Storti, D., Anderson, R. ve Ganter, M. (2008, 1 Temmuz). A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*. Elsevier BV. doi:10.1016/j.jmapro.2009.03.002.
- Vaezi, M. ve Chua, C. K. (2011). Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1–4), 275–284. doi:10.1007/s00170-010-2821-1.
- Vlasea, M., Pilliar, R. ve Toyserkani, E. (2015). Control of structural and mechanical properties in bioceramic bone substitutes via additive manufacturing layer stacking orientation. *Additive Manufacturing*, 6, 30–38. doi:10.1016/j.addma.2015.03.001.
- Wagner, J. J., Shu, H., Kilambi, R., Fred, C. ve Iii, H. (y.y.). *Experimental Investigation Of Fluid-Particle Interaction In Binder Jet 3d Printing*.
- Wang, H. R., Cima, M. J., Kernan, B. D. ve Sachs, E. M. (2004). Alumina-doped silica gradient-index (GRIN) lenses by slurry-based three-dimensional printing (S-3DPTM). *Journal of Non-Crystalline Solids içinde (C. 349, ss. 360–367)*. North-Holland. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.251.
- Wang, Y., Jia, P., Yang, W., Peng, K. ve Zhang, S. (2018). Simulation and experimental study of binder droplet infiltration in 3DP technology. *Modern Physics Letters B*, 32(23). doi:10.1142/S021798491850272X.
- Watters, M. P. ve Bernhardt, M. L. (2017). Modified curing protocol for improved strength of binder-jetted 3D parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 1195–1201. doi:10.1108/RPJ-09-2016-0146.
- Weber, S., Briens, C., Berruti, F., Chan, E. ve Gray, M. (2006). Agglomerate stability in fluidized beds of glass beads and silica sand. *Powder Technology*, 165(3), 115–127. doi:10.1016/j.powtec.2006.03.006.
- Will, J., Melcher, R., Treul, C., Travitzky, N., Kneser, U., Polykandriotis, E., ... Greil, P. (2008). Porous ceramic bone scaffolds for vascularized bone tissue regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19(8), 2781–2790. doi:10.1007/s10856-007-3346-5.
- Williams, Christopher B., Rosen ve David W. (2007). *Manufacturing Metallic Parts with Designed Mesostructure via Three-Dimensional Printing of Metal Oxide Powder*. 12 Aralık 2020 tarihinde <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/80224> adresinden erişildi.

- Wu, B. M., Borland, S. W., Giordano, R. A., Cima, L. G., Sachs, E. M. ve Cima, M. J. (1996). Solid free-form fabrication of drug delivery devices. *Journal of Controlled Release*, 40(1–2), 77–87. doi:10.1016/0168-3659(95)00173-5.
- Wu, C., Fan, W., Zhou, Y., Luo, Y., Gelinsky, M., Chang, J. ve Xiao, Y. (2012). 3D-printing of highly uniform CaSiO<sub>3</sub> ceramic scaffolds: Preparation, characterization and in vivo osteogenesis. *Journal of Materials Chemistry*, 22(24), 12288–12295. doi:10.1039/c2jm30566f.
- Yamane, M., Yasumori, A., Iwasaki, M. ve Hayashi, K. (1990). Graded index materials by the sol-gel process. J. D. Mackenzie ve D. R. Ulrich (Ed.), *Sol-Gel Optics* içinde (C. 1328, s. 133). SPIE. doi:10.1117/12.22553.
- Yao, A. W. L. ve Tseng, Y. C. (2002). A robust process optimization for a powder type rapid prototyper. *Rapid Prototyping Journal*, 8(3), 180–189. doi:10.1108/13552540210431004.
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y. ve Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275–285. doi:10.1016/j.precisioneng.2017.05.015.
- Yin, F. L. ve Huo, B. Q. (2013). Image transformation for digital printing machine. *Applied Mechanics and Materials* içinde (C. 401–403, ss. 180–183). Trans Tech Publications Ltd. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.180.
- Zhang, W., Melcher, R., Travitzky, N., Bordia, R. K. ve Greil, P. (2009). Three-Dimensional Printing of Complex-Shaped Alumina/Glass Composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(12), NA-NA. doi:10.1002/adem.200900213.
- Zhang, X., Du, X., Li, D., Ao, R., Yu, B. ve Yu, B. (2018). Three dimensionally printed pearl powder/poly-caprolactone composite scaffolds for bone regeneration. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 29(14), 1686–1700. doi:10.1080/09205063.2018.1475096.
- Zhao, H., Ye, C., Fan, Z. ve Wang, C. (2017). 3D printing of CaO-based ceramic core using nanozirconia suspension as a binder. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(15), 5119–5125. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.06.050.
- Zhigang Zak Fang. (2010). *Sintering of Advanced Materials* - Google Kitaplar. Woodhead Publishing. 12 Aralık 2020 tarihinde [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=NYpwAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fang+ZZ,+editor.+Sintering+of+advanced+materials:+Fundamentals+and+processes%3B+2010.&ots=rs7V3eXcYI&sig=7yoXoKGaIra\\_ZrggxsgUuSyK0iI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=NYpwAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fang+ZZ,+editor.+Sintering+of+advanced+materials:+Fundamentals+and+processes%3B+2010.&ots=rs7V3eXcYI&sig=7yoXoKGaIra_ZrggxsgUuSyK0iI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) adresinden erişildi.

- Zhou, Y., Tang, Y., Hoff, T., Garon, M. ve Zhao, F. Y. (2015). The Verification of the Mechanical Properties of Binder Jetting Manufactured Parts by Instrumented Indentation Testing. *Procedia Manufacturing* içinde (C. 1, ss. 327–342). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.038.
- Zhou, Z., Buchanan, F., Mitchell, C. ve Dunne, N. (2014). Printability of calcium phosphate: Calcium sulfate powders for the application of tissue engineered bone scaffolds using the 3D printing technique. *Materials Science and Engineering C*, 38(1), 1–10. doi:10.1016/j.msec.2014.01.027.
- Zhou, Z., Cunningham, E., Lennon, A., McCarthy, H., Buchanan, F. ve Dunne, N. (2018). Development of three-dimensional printing polymer-ceramic scaffolds with enhanced compressive properties and tuneable resorption. *Materials Science and Engineering C*, 93, 975–986. doi:10.1016/j.msec.2018.08.048.
- Zhou, Z., Lennon, A., Buchanan, F., McCarthy, H. O. ve Dunne, N. (2020). Binder jetting additive manufacturing of hydroxyapatite powders: Effects of adhesives on geometrical accuracy and green compressive strength. *Additive Manufacturing*, 101645. doi:10.1016/j.addma.2020.101645.
- Zhou, Z., Mitchell, C. A., Buchanan, F. J. ve Dunne, N. J. (2013). Effects of Heat Treatment on the Mechanical and Degradation Properties of 3D-Printed Calcium-Sulphate-Based Scaffolds. *ISRN Biomaterials*, 2013, 1–10. doi:10.5402/2013/750720.
- Zocca, A., Günster, J., Zocca, A., Lima, P. ve Günster, J. (2017). LSD-based 3D printing of alumina ceramics. *J. Ceram. Sci. Tech*, 8–9. doi:10.4416/JCST2016-00103.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Emrecañ Makaraç

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Tasarımı ve İmalatı Bilim Dalı	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makina Mühendisliği	2016
Lise	Kırklareli Anadolu Lisesi	2012

### İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Tırsan Treyler	CAD&PLM Admin
2016-2017	Başkurt Motor San. A.Ş	Ür-Ge Mühendisi

### YABANCI DİL

İngilizce

### ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1.-

2.-

### HOBİLER

İnsansız hava araçları, 3D Printer, Masa Tenisi, Yüzme, Fotoğraf çekmek