

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HESAPLAMALI BİLİMLER ANA BİLİM DALI**



**BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİNDE ADAPTİF
DİLİMLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMA TEKNOLOJİSİ**

Doktora Tezi

Hasan BAŞ

Danışman

Prof. Dr. Fatih YAPICI

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.21.006 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Hasan BAŞ tarafından, **Prof. Dr. Fatih YAPICI** danışmanlığında hazırlanan **“BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİNDE ADAPTİF DİLİMLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMA TEKNOLOJİSİ”** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 19.6.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Fatih YAPICI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Cengiz TEPE Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kontrol ve Kumanda Sistemleri Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Zeynep CEYLAN Samsun Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğretim Üyesi Erhan ERGÜN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilgisayar Donanımı Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

19 / 06 / 2023
Hasan BAŞ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİNDE ADAPTİF DİLİMLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMA TEKNOLOJİSİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 11.05.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 2

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

19 / 06 / 2023
Prof. Dr. Fatih YAPICI

ÖZET

BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİNDE ADAPTİF DİLİMLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMA TEKNOLOJİSİ

Hasan BAŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Hesaplamalı Bilimler Ana Bilim Dalı
Doktora, Haziran/2023
Danışman: Prof. Dr. Fatih YAPICI

Eklemeli imalatın, klasik yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan karmaşık parçaları üretebilmesi, daha az malzeme kullanılması, yerinde üretim olanağıyla tedarik zincirini rahatlatması, her türlü malzeme ile üretim yapabilmesi ve daha hafif parça üretebilme gibi birçok avantajından dolayı çoğu endüstri kolunda kullanımı ciddi anlamda artmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden olan ve bu tez kapsamında araştırılan bağlayıcı püskürtme tekniğinin ise birçok ekonomik rapora göre önümüzdeki on yıl içerisinde en çok büyüyecek eklemeli imalat yöntemi olacağı öngörülmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinin birçok avantajı bulunmasına rağmen üretim hızı bakımından klasik imalat yöntemlerine göre yavaş kalabilmektedir. Bunun için bu çalışmada bağlayıcı püskürtme yönteminde imalat hızının artırılması amaçlanmıştır.

İmalat hızının artırılması için bağlayıcı püskürtmede adaptif dilimlemenin kullanılması önerilmiştir. Adaptif dilimlemenin bağlayıcı püskürtme tekniğinde verimli bir şekilde kullanılabilmesi için değişken bağlayıcı miktarı algoritması (DBMA) geliştirilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda DBMA, tecrübeye ve literatüre dayanan parametre verileri ile denenmiş olup başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak DBMA’da özellikle katman kalınlığının ve doyumluk oranının optimize edilmesi gerekmektedir. Bunun için Taguchi yöntemi kullanılarak, adaptif dilimlemede katman kalınlığı ve doyumluk oranı optimizasyonu yapılmıştır. Taguchi deney tasarımına göre 9 farklı koşulda, 3’er tekrür olmak üzere toplam 27 adet numune üretilmiştir. Numunelerin ham hallerinin en boyutunun ölçüsüne bakılmıştır. Sonrasında numuneler 1500°C’de 2 saat sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası yüzey pürüzlülük ve yoğunluk testleri yapılmıştır. Bu testlerin sonucunda optimum baskı koşulu olarak katman kalınlığı için 180-250 µm, doyumluk için ise %50 değerine karar verilmiştir. Sonrasında adaptif dilimlemeyi uygulamak için ayrı bir test numunesi tasarlanmıştır. Bu test numunesi belirlenen parametreler ile adaptif (180 µm-250 µm), ince katman (180 µm) ve kalın katman (250 µm) olmak üzere 3 adet üretilmiştir. Adaptif dilimlenmiş numune ile ince katmanlı numunenin pürüzlülük değerleri birbiri ile benzer olup kalın katmanlı numuneden daha iyi çıkmıştır. Adaptif numunede ince katmanlı numuneye göre %12,31 daha az katman kullanılarak benzer sonuç elde edilmiştir. Dolayısıyla kullanılan yöntemlerin başarılı olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülük ölçümlerini daha kolay ve ekonomik yapmak adına görüntü işleme ile ölçüm olanakları araştırılmıştır. Görüntü işleme verileri ile pürüzlülük ölçüm cihazıyla alınan veriler birbirleri ile uyumlu çıkmıştır.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat, Bağlayıcı püskürtme, Adaptif dilimleme, Görüntü işleme.

ABSTRACT

ADAPTIVE SLICING METHOD AND APPLICATION TECHNOLOGY IN BINDER JETTING TECHNIQUE

Hasan BAŞ
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Computational Sciences
Ph.D., June/2023
Supervisor: Prof. Dr. Fatih YAPICI

It is one of the most important features of additive manufacturing that it can produce complex parts that cannot be produced by conventional methods and that it lightens parts by methods such as topology optimization. In addition, its use in the industry is increasing, thanks to its ability to relax the supply chain with on-site production and its ability to produce with all kinds of materials. According to many economic reports, the binder jetting technique, one of the additive manufacturing methods investigated within this thesis's scope, is predicted to be the fastest-growing additive manufacturing method in the next decade. Although additive manufacturing methods have many advantages, they can be slower in production speed compared to traditional manufacturing methods. Therefore, this study aims to increase the manufacturing speed of the binder jetting method.

Adaptive slicing in binder jetting has been proposed to increase manufacturing speed. The variable binder amount algorithm (VBAA) has been developed to use adaptive slicing efficiently in binder jetting. VBAA was tested with parameter data based on experience and literature in preliminary studies, and successful results were obtained. However, optimization of layer thickness and saturation ratio is required in VBAA. For this purpose, layer thickness and saturation ratio optimization in adaptive slicing have been performed using the Taguchi method. According to the Taguchi experimental design, 27 samples were produced with 9 different designs, each with 3 copies. The dimensions of the raw samples were measured, and then the samples were sintered at 1500°C for 2 hours. After sintering, surface roughness, and density tests were performed. Based on the results of these tests, a layer thickness of 180-250 μm and a saturation ratio of 50% was determined. Then, a separate test sample was designed to apply adaptive slicing. This test sample was produced in 3 different types, which are adaptive (180 μm -250 μm), thin layer (180 μm), and thick layer (250 μm) with the determined parameters. The roughness values of the adaptive and thin-layered samples were similar and better than the thick-layered samples. Similar roughness was obtained by using 12.31% fewer layers in the adaptive sample compared to the thin-layered sample. Therefore, the methods used have been proven to be successful. In addition, image processing was investigated for easy and inexpensive surface roughness measurements. Consistent results were obtained with image processing for the data obtained from the roughness measurement device.

Keywords: Additive manufacturing, Binder jetting, Adaptive slicing, Image processing.

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan ve her konuda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fatih YAPICI'ya, tezimde birçok konuda bana yardımcı olan ve tezimin ilerlemesinde katkıları bulunan değerli hocalarım Sayın Dr. Öğretim Üyesi İbrahim İNANÇ ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Erhan ERGÜN'e, elektronik işlerde bana destek olan Arş. Gör. Mehmet Serdar ÇELİK'e, istatistiksel konularda bana yardım eden Arş. Gör. Müberra TERZİ'ye, lisansüstü eğitiminde katkıları bulunan değerli bölüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca tez savunma jürimde yer alan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ, Doç. Dr. Cengiz TEPE ve Doç. Dr. Zeynep CEYLAN'a faydalı eleştirileri ve yönlendirmelerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Doktora süresince manevi desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen sevgili ailem ve sevgili eşime de sonsuz teşekkür ederim.

Hasan BAŞ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Eklemeli İmalat	4
2.2. Eklemeli İmalatın Süreçleri	10
2.2.1. CAD Programlarında 3B Modelin Tasarlanması	11
2.2.2. Dilimleme ve G-kod Oluşturma	11
2.2.3. G-Kod Dosyalarının Makineye Aktarılması ve Makine Ayarlarının Yapılması	12
2.2.4. Baskı Aşaması	13
2.2.5. Baskının Makinadan Alınması	13
2.2.6. Baskı Sonrası Ek İşlemler	14
2.2.7. Uygulama	15
2.3. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile Alümina Parça Üretimi	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Materyal	17
3.1.1. Açık Kaynak 3B Yazıcı Tasarım ve İmalatı	17
3.1.2. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar	19
3.2. Yöntem	20
3.2.1. Adaptif Dilimleme Yönteminin Uyarlanması	20
3.2.2. Değişken Bağlayıcı Miktarı Algoritmasının (DBMA) Geliştirilmesi	26
3.2.3. Adaptif Dilimleme ve Değişken Bağlayıcı Miktarı Algoritmasının Uygulandığı Modeller	27
3.2.4. Taguchi Yöntemi ile Parametre Optimizasyonu	30
3.2.5. Parametre Optimizasyonu Sonrası Adaptif Dilimlemenin Uygulanacağı Model	34
3.2.6. Görüntü İşleme	35
4. BULGULAR	38
4.1. Yarımküre Modellerine ait Bulgular	38
4.2. Kompresör Çarkı ve Kalite Testi Modellerine ait Bulgular	46
4.3. Çeyrek Küre Modele ait Bulgular	50
4.3.1. Kalın Katmanlı Adaptif Modele ait Bulgular	51
4.3.2. İnce Katmanlı Adaptif Modele ait Bulgular	53
4.4. Taguchi Deney Tasarımı Bulguları	58
4.4.1. Taguchi Analizi Sonrası Adaptif Numunenin Üretilmesi	64
4.4.2. Görüntü İşleme ile Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
5.1. Tartışma	75
5.2. Öneriler	80
KAYNAKLAR	82
ÖZ GEÇMİŞ	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

DMBA	: Değişken Bağlayıcı Miktarı Algoritması
MAPE	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
FFF	: Eriyik Filament Fabrikasyonu
STL	: Eklemeli İmalattaki Ortak Dosya Formatı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
DPI	: İnç Başına Nokta
TYY	: Toz yatak yoğunluğu
Q	: Sezgisel Kalite Parametresi
R_a	: Yüzey Pürüzlülüğü
TSH	: Toz Serme Hızı
SD	: Silindir Devri
T_s	: Sinterleme Sıcaklığı
t_s	: Sinterleme Süresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İlk kavramsal eklemeli imalat denemesi.....	4
Şekil 2.2. Eklemeli imalat patent başvurusu	5
Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme yöntemi	8
Şekil 2.4. Karmaşıklık maliyeti.....	9
Şekil 2.5. Viridis 3D kum yazıcı.....	9
Şekil 2.6. Normal dilimleme (sağ), Adaptif dilimleme (sol)	10
Şekil 2.7. CAD model (sol), STL model (sağ).....	12
Şekil 2.8. Örnek G-kod dosyası	12
Şekil 2.9. Baskı aşaması.....	13
Şekil 2.10. Bağlayıcı püskürtme yönteminde parçanın yazıcıdan alınması	14
Şekil 2.11. Toz yatak füzyon yöntemindeki destek yapıları	14
Şekil 3.1. Açık kaynak 3B yazıcı katı modeli.....	18
Şekil 3.2. Yapılan açık kaynak 3B yazıcı	18
Şekil 3.3. Kullanılan tozun SEM görüntüsü (Uzak çekim).....	20
Şekil 3.4. Kullanılan tozun SEM görüntüsü (Yakın çekim)	20
Şekil 3.5. Merdiven etkisi – Staircase effect	21
Şekil 3.6. Doruk yüksekliği	22
Şekil 3.7. Slic3r adaptif dilimleme algoritmasında dikkate alınan iki faktör.....	23
Şekil 3.8. %30 kalite parametresi ile dilimlenmiş model.....	24
Şekil 3.9. %70 kalite parametresi ile dilimlenmiş model.....	25
Şekil 3.10. Normal dilimleme (sol), Adaptif dilimleme (sağ)	25
Şekil 3.11. Bağlayıcı miktarı katman kalınlığı ilişkisi.....	26
Şekil 3.12. Değişken bağlayıcı miktarı algoritması	27
Şekil 3.13. Yarımküre model	28
Şekil 3.14. a) Kompresör çarkı, b) Kalite testi numunesi	29
Şekil 3.15. Çeyrek küre model.....	30
Şekil 3.16. Taguchi deney tasarım numunesinin 3 boyutlu görünümü	32
Şekil 3.17. Adaptif numune CAD modeli.....	34
Şekil 3.18. Adaptif numunenin bazı ölçüleri	35
Şekil 3.19. Yüzey örneği, tepeler ve çukurlar.....	36
Şekil 3.20. Görüntü işleme ile yüzey pürüzlülük ölçümü.....	37
Şekil 3.21. Görüntü işleme ile yüzey pürüzlülük ölçümü akış diyagramı	37
Şekil 4.1. U100 sinterlenmemiş hali	38
Şekil 4.2. U100 sinterlenmiş hali.....	39
Şekil 4.3. U100'ün SEM görüntüsü.....	40
Şekil 4.4. U100'ün SEM görüntüsü (uzak çekim)	40
Şekil 4.5. A18:100-44'ün sezgisel kalite parametresi (100 – 44 µm).....	41
Şekil 4.6. A18:100-44'ün katman kalınlık grafiği (100 – 44 µm)	41
Şekil 4.7. A18:100-44'ün sinterlenmemiş hali	42
Şekil 4.8. A18:100-44'ün sinterlenmiş hali	42
Şekil 4.9. A18:100-44'ün alt bölgesinin SEM görüntüsü.....	43
Şekil 4.10. Adaptif numunenin üst bölgesinin SEM görüntüsü.....	43
Şekil 4.11. A12:100-44'ün Slic3r programında dilimlenmiş hali.....	44
Şekil 4.12. A12:100-44'ün katman kalınlıklarını (100 – 44 µm)	44
Şekil 4.13. A12:100-44'ün sinterlenmemiş hali	45
Şekil 4.14. A12:100-44'ün sinterlenmiş hali	45
Şekil 4.15. A12:100-44'ün SEM görüntüsü	46
Şekil 4.16. Kompresör çarkının Slic3r programında dilimlenmiş hali	47
Şekil 4.17. Kompresör çarkı katman kalınlıkları	47
Şekil 4.18. Kalite test numunesinin Slic3r programında dilimlenmiş hali.....	48
Şekil 4.19. Kalite test numunesinin katman kalınlıkları	48
Şekil 4.20. Kompresör çarkı	49
Şekil 4.21. Kalite test numunesi	50

Şekil 4.22. A400-150'nin katman kalınlığı grafiği	51
Şekil 4.23. A400-150'nin katman kalınlığı grafiği	51
Şekil 4.24. A400-150'nin sinterlenmemiş hali	52
Şekil 4.25. a) A400-150'ün üst bölgesi, b) A400-150'ün alt bölgesi	52
Şekil 4.26. A60-28'in katman kalınlıkları	53
Şekil 4.27. A60-28'in katman kalınlıkları	53
Şekil 4.28. Adaptif numunenin katman kalınlıkları (0,028 – 0,06 mm)	54
Şekil 4.29. Sinterlenmiş numuneler	54
Şekil 4.30. Sinterlenmiş numuneler	55
Şekil 4.31. Yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırması	57
Şekil 4.32. Taguchi parametre numuneleri	58
Şekil 4.33. Katman kalınlığı 225 µm ve %50 doygunluktaki numunenin sinterlenmiş hali..	60
Şekil 4.34. Ölçüm için yapılan aparat	60
Şekil 4.35. Boyutsal doğruluk Taguchi analizi	62
Şekil 4.36. Yüzey pürüzlülük Taguchi analizi	62
Şekil 4.37. Yoğunluk Taguchi analizi.....	63
Şekil 4.38. 150 µm katman kalınlığındaki numuneler	64
Şekil 4.39. A250-180'nin kalite ayarı.....	64
Şekil 4.40. A250-180'nin katman kalınlıkları	65
Şekil 4.41. U180'nin 4 yüzünün görünüşü	66
Şekil 4.42. U250'nin 4 yüzünün görünüşü	66
Şekil 4.43. A250-180'nin 4 yüzünün görünüşü	67
Şekil 4.44. Numunelerin sinterlenmiş hali.....	67
Şekil 4.45. Deney ve görüntü işleme verilerinin grafiği	70
Şekil 4.46. Optimizasyon numunesinin renkli ve siyah beyaz resmi.....	71
Şekil 4.47. Görüntü işleme ile elde piksel grafiği.....	71
Şekil 4.48. Sinterlenmiş adaptif numunenin renkli ve siyah beyaz resmi.....	73
Şekil 4.49. Sinterlenmiş A250-180'den görüntü işleme ile elde edilen piksel grafiği.....	74

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	6
Tablo 2.2. Bağlayıcı püskürtme yönteminde alumina ile yapılan bazı çalışmalar.....	16
Tablo 3.2. Taguchi deney tasarım matrisi.....	34
Tablo 4.1. Normallik testi	56
Tablo 4.2. Tanımlayıcı istatistikler	56
Tablo 4.3. Varyans analizi	57
Tablo 4.4. Yoğunluk değerleri	58
Tablo 4.5. En ölçüleri için tanımlayıcı istatistikler	59
Tablo 4.6. Yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri	61
Tablo 4.7. Yoğunluk değerleri.....	61
Tablo 4.8. A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmiş hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri.....	68
Tablo 4.9. Optimizasyon numunelerinin görüntü işleme ile elde edilen yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri	69
Tablo 4.10. MAPE değerleri ve tahmin ilişkisi	69
Tablo 4.11. Pürüzlülük cihazı verilerinin normallik testi	70
Tablo 4.12. Deney ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin kıyaslanması.....	70
Tablo 4.13. A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmemiş ham hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri	71
Tablo 4.14. A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmiş hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri.....	72
Tablo 4.15. A250-180, U250 ve U180'in yüzey pürüzlülük verilerinin normallik testi sonuçları	72
Tablo 4.16. Kruskal-Wallis testi sonuçları.....	73
Tablo 4.17. Tukey grupları	73

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, günümüzdeki en önemli mühendislik teknolojilerinden birisi olup her geçen gün önemi ve farklı alanlardaki kullanımı artmaktadır. Bu teknoloji için literatürde hızlı prototipleme, katmanlı imalat, 3 boyutlu baskı gibi terimler de kullanılmaktadır. Ayrıca bu teknoloji için geliştirilen makinelere de popüler olarak 3 boyutlu (3B) yazıcılar denmektedir. Tasarımcılar tasarladıkları ürünün prototipini 3B yazıcıları kullanarak hızlı bir şekilde üretebilmektedir. Bu makineler başlangıçta hızlı prototip yapmada kullanıldığı için bu teknolojiye ilk olarak hızlı prototipleme (rapid prototyping-RP) denilmiştir. Zaman içerisinde geliştirilen yeni teknikler, 3B yazıcılar ile üretilen parçaların imalatıta direkt olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Özellikle imalat sektöründe kullanılan 3B yazıcılar ileri teknolojik özelliklere sahip pahalı makineler olup yüksek hassasiyetle üretim yapabilmektedir. 3B yazıcılar, sahip oldukları hassasiyetlerinden dolayı, karmaşık parçaların imalatını kolaylıkla gerçekleştirebilmektedir. Günümüzde üç boyutlu yazıcılar ile nihai ürün üretme kapasitesine ulaşıldığı için artık hızlı prototipleme terimi yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM International) hızlı prototipleme yerine eklemeli imalat (additive manufacturing - AM) terimini öne sürmüştür.

İlk ticari eklemeli imalat yöntemi olan stereolitografi 1984 yılında icat edilmiştir (Hull, 1984). Sonrasında birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, malzeme ekstrüzyon yöntemi (material extrusion), doğrudan enerji biriktirme yöntemi (direct energy deposition), laminasyon yöntemi (sheet lamination), toz yatak füzyon yöntemi (powder bed fusion), malzeme püskürtme yöntemi (material jetting), bağlayıcı püskürtme yöntemi (binder jetting) ve vat fotopolimerizasyon (vat photopolymerization) yöntemi olmak üzere yedi ana başlık altında toplanabilir. Her yöntemin kendine özgü farklı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, bağlayıcı püskürtme yönteminde adaptif dilimleme kullanarak parça üretiminde yüzey kalitesini düşürmeden üretim sürelerinin azaltılacağı öngörülmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bağlayıcı püskürtme yönteminde normal dilimleme (uniform slicing) kullanılmaktadır. Normal dilimleme kullanımında iyi yüzey kalitesi elde etmek için çok ince katman kalınlığı seçilmelidir. Bu durumda da üretim süreleri ve buna bağlı olarak da üretim maliyetleri artmaktadır. Kalın katman kalınlığı seçildiğinde ise üretim hızı artmasına rağmen

yüzey kalitesi ciddi şekilde düşmektedir. Bu durumu optimize etmek için adaptif dilimleme yönteminin kullanımı amaçlanmıştır. Adaptif dilimlemenin bağlayıcı püskürtme tekniğinde kullanımı ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Ancak adaptif dilimlemede katman kalınlıkları değişken olduğu için yapılan bazı ön denemelerde bağlayıcı miktarı ile ilgili sorunlarla karşılaşmıştır. Adaptif dilimlenmiş numunede farklı kalınlıktaki katmanlara aynı miktarda bağlayıcı gönderilmemesi gerekmektedir. Katman kalınlığı ince, bağlayıcı miktarı fazla ise bağlayıcı istenmeyen bölgelere taşmaktadır. Eğer katman kalınlığı fazla ve bağlayıcı miktarı yetersizse de katmanlar arası bağ oluşmamaktadır. Bu sorunları önlemek ve adaptif dilimlemenin daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi için tez çalışması kapsamında değişken bağlayıcı miktarı algoritması (DBMA) geliştirilmiştir. Bağlayıcı püskürtme tekniğinde daha önce adaptif dilimleme kullanılmadığı için DBMA benzeri bir algoritma da geliştirilmemiştir. Hem adaptif dilimleme hem de DBMA kullanılarak yüzey kalitesi daha iyi olan parçalar hızlı bir şekilde üretilmiştir.

Tezde yapılan bütün bu çalışmalar açık kaynak bir 3B yazıcı ile yapılmıştır. Çünkü ticari olarak satılan bağlayıcı püskürtme yazıcıları çok pahalı makineler olmakla birlikte kullanılan dilimleme yazılımları adaptif dilimleme yöntemi için uygun değildir. Ayrıca ticari yazıcıların yazılımlarına DBMA'nın eklenmesi gerekli izinler olmadan mümkün değildir. Kullanılan bu açık kaynak 3B yazıcı yazılım ve mekaniksel olarak modifiye edilip geliştirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak yüzey pürüzlülük ölçümleri için daha kolay ve düşük maliyetli olması açısından görüntü işleme tekniğinden faydalanılmıştır. Görüntü işleme ile başarılı bir şekilde yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Ayrıca görüntü işleme tekniği sayesinde cihaz ile ölçüm yapılması mümkün olmayan sinterlenmemiş numunelerin de yüzey pürüzlülükleri ölçülebilmektedir.

Tez giriş, literatür araştırması, materyal ve yöntem, bulgular ve sonuç ve öneriler olmak üzere beş kısımdan oluşmaktadır. Literatür araştırması kısmında eklemeli imalatın tarihçesinden ve eklemeli imalat yöntemlerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Ayrıca eklemeli imalatın aşamalarına ve alümina ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Materyal ve yöntem kısmında 3B yazıcının tasarımı ve imalatı, kullanılan diğer malzeme ve ekipmanlar, adaptif dilimleme ve DBMA'dan bahsedilmiştir. Adaptif dilimleme ve DBMA kullanılarak üretilen modellerin ayrıntılarına bu kısımda yer

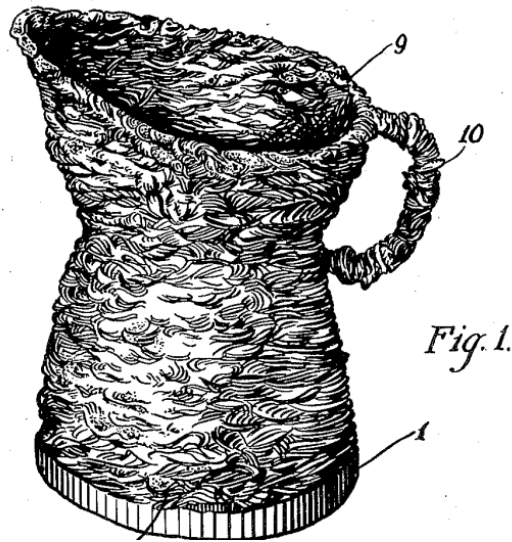
verilmiştir. Tez kapsamında yapılan parametre optimizasyonu ve görüntü işleme ile yüzey pürüzlülük ölçümünün teorik bilgileri de bu bölümde yer almaktadır.

Bulgular kısmında ise adaptif dilimleme ve DBMA kullanılarak üretilen bütün numuneler ve bu numuneler üzerinde yapılan testler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Numunelerden elde edilen veriler istatistiki analizlerle değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Sonuç ve öneriler kısmında ise çalışma genel olarak ele alınmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca bu kısımda bu alandaki çalışmaların geliştirilmesi önerilerde bulunulmuştur.



üretilebileceği başka bir metot önerilmiştir (Şekil 2.2). Nicola Tesla'yı alternatif akım çalışmalarında destekleyen ve alternatif akımın yaygınlaşması sağlayan Westinghouse Electric firması bu alanda da çok ileri görüşlü bir atılım yapmıştır. Ancak o yıllarda eklemeli imalat yöntemlerinin geliştirilmesi için gerekli altyapı yoktu ve herhangi bir gelişme olmamıştır. Fakat günümüzde Baker'ın önerdiği bu yöntem de geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir (Kumar vd, 2022). Bu patentlerin dışında ilgi görmemiş, ticarileşmemiş ya da tamamlanmamış birçok çalışma mevcuttur (Bourella vd, 2009). Bu çalışmaların başarı ile sonuçlanmamasının nedeni o dönemlerde bilgisayar teknolojilerinin henüz gelişmemiş olması, hatta elektriğin çok gelişmiş olmaması (Willème ve Baker'ın döneminde transistör bile icat edilmemiştir.), elektriğin ve bilgisayar teknolojilerinin zayıf olması nedeniyle programlamanın çok yetersiz olması gibi problemlerdir. Bütün bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmaların yapanların dönemlerinin çok ilerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

R. BAKER
METHOD OF MAKING DECORATIVE ARTICLES
Filed Nov. 12, 1920



Şekil 2.2. Eklemeli imalat patent başvurusu (Baker, 1920)

Hull'un (1986) patentinden sonra birçok eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler; malzeme ekstrüzyon yöntemi (material extrusion), doğrudan enerji biriktirme yöntemi (direct energy deposition), laminasyon yöntemi (sheet lamination), toz yatak füzyon yöntemi (powder bed fusion), malzeme püskürtme yöntemi (material jetting), bağlayıcı püskürtme yöntemi (binder jetting) ve vat fotopolimerizasyon yöntemi (vat photopolymerization) olmak üzere yedi ana başlık altında toplanabilir

(ASTM, 2012). Literatürde başka şekilde de sınıflandırma yaklaşımları (Pham ve Gault, 1998) mevcut olmakla birlikte genel olarak ASTM'nin sınıflandırması dikkate alınmaktadır (Tablo 2.1). ASTM sınıflandırma başlıklarının altında ifade edilebilen birçok yöntem de vardır. Son yıllarda bu yöntemlere ek olarak direkt yazma (direct write), tomografik eklemeli imalat ve eriterek elektro yazma (melt electrowriting), elektrokimyasal 3B baskı gibi farklı yöntemler de geliştirilmektedir (Loterie vd, 2020; Ou vd, 2023; Sun vd, 2023; van Nisselroy vd, 2022; Wang vd, 2023; Zhang vd, 2023).

Tablo 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri

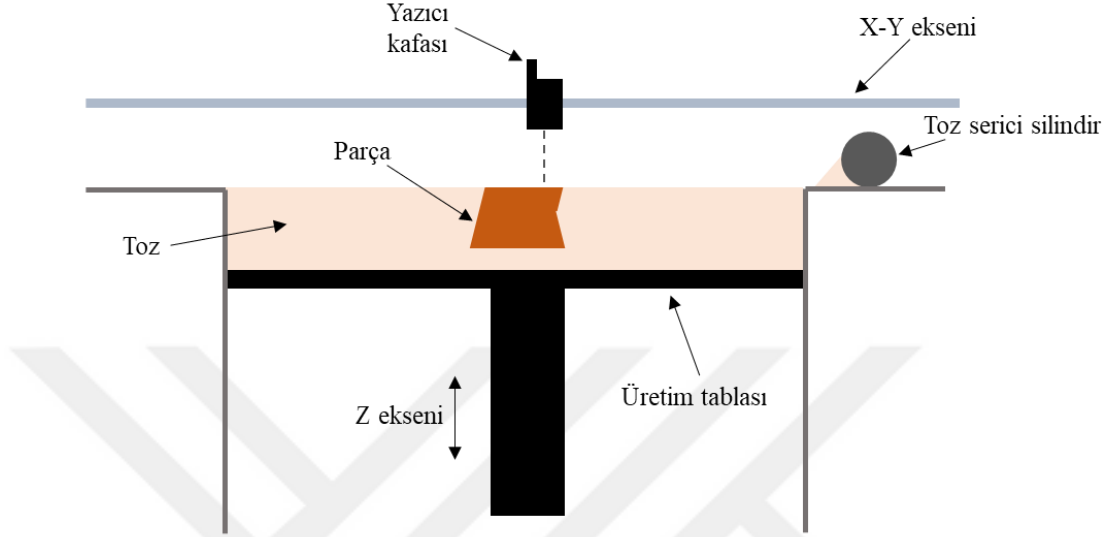
Ana Yöntemler	Alt Yöntemler
Vat Fotopolimerizasyon	-Vektör taramalı stereolitografi (SLA) -Çift fotonlu SLA (two-photon photopolymerization) -Projeksiyon Yöntemi (digital light processing) -LED ve oksijenli yöntem (continuous digital light processing) -Maske SLA
Malzeme Ekstrüzyon	-Filament ergitme yöntemi (fused filament fabrikasyonu) -Pistonlu ekstrüzyon (plunger based extrusion) -Vidalı ekstrüzyon (screw based extrusion) -Pelet beslemeli Sistem -Bioekstrüzyon
Malzeme Püskürtme	-Malzeme püskürtme -Nano partikül püskürtme (nano particle jetting) -Soğuk sprej (cold spray) -Döner malzeme püskürtme (rotational material jetting)
Bağlayıcı Püskürtme	-Renkli baskı (plastik malzeme) -Metal veya seramik malzeme kullanılan sistemler -Kum kalıp yapan sistemler -Yüksek hızlı ergitme (multi jet fusion)
Toz Yatak Füzyon	-Lazer sinterleme (selective laser sintering) -Lazer ergitme (selective laser melting) -Elektron ışını ile ergitme
Doğrudan Enerji Biriktirme	-Lazerli yöntem (laser engineering net shape) -Elektron ışını yöntemi (elektron beam additive manufacturing) -Ark kaynağı metodu (wire arc additive manufacturing) -Sürtünme metodu (friction stir additive manufacturing)
Laminasyon Yöntemi	-Kağıt ile renkli veya renksiz 3B baskı alan sistemler -Kompozit malzeme kullanılan sistemler -Ultrasonik Eklemeli İmalat (ultrasonic additive manufacturing)

Eklemeli imalat yöntemlerinin her birinin kullanım alanına göre avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. Vat fotopolimerizasyon yöntemleri en iyi yüzey kalitesi veren metottur (Bhushan ve Caspers, 2017; Mitchell vd, 2018). Bu yöntemde genellikle sıvı fotopolimer malzemeler kullanılır. Metal ve seramik tozlar içeren birkaç ticari fotopolimer reçine bulunmaktadır (Tethon3D, 2020). Bunların yanında metal veya seramik toz içeren fotopolimer reçinelerle ilgili birçok akademik çalışma da mevcuttur (Bae ve Halloran, 2018; Bartolo ve Gaspar, 2008; Deng vd, 2020; Hafkamp vd, 2018).

Malzeme ekstrüzyon yöntemi en çok kullanılan yöntemlerden birisi olup özellikle eriyik filament fabrikasyonu (fused filament fabrication – FFF ya da fused deposition modeling - FDM) en yaygın ve en ucuz eklemeli imalat yöntemlerindendir (Di Angelo vd, 2017). Malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden biyoekstrüzyon yöntemi ise tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır (Morouço vd, 2016). Doğrudan enerji biriktirme yöntemleri metal parçaların yapımında kullanılmakta olup üretilen parçaların kopma dayanımı diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha üstündür. Bununla birlikte toz yatak füzyon yöntemleri ile elde edilen parçaların kopma dayanımları doğrudan enerji biriktirme yöntemlerine yakın değerdedir (Zhang vd, 2018). Ancak kompleks geometrilerin basılmasında toz yatak füzyon yöntemleri daha üstündür. Toz yatak füzyon yöntemlerinde metal malzemenin dışında seramik ve plastik malzemelerde kullanılmaktadır. Toz yatak füzyon yöntemlerinde termal streten kaynaklı problemler yaşanabilmektedir. Laminasyon yöntemi genellikle prototip amaçlı kullanılmakta olup nihai ürün için kullanımı sınırlıdır. Malzeme püskürtme yönteminde ise yüksek çözünürlükte ve renkli prototipler elde etmek mümkündür. Metal, seramik ve plastik malzemeler kullanılabilir.

Bağlayıcı püskürtme yöntemi, Sachs vd (1993) tarafından MIT (Massachusetts Institute of Technology)'de geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yönteme 3 boyutlu yazıcı tekniği adını vermişlerdir. Literatürde ilk başlarda bu yöntemin adı 3D yazıcı (3D Printing) olarak geçmiştir. Ancak sonradan bağlayıcı püskürtme olarak anılmaya başlanmıştır. Bağlayıcı püskürtme yönteminde toz halindeki malzeme belirli bir katman kalınlığında bir platform üzerine çeşitli mekanik elemanlar vasıtasıyla serilir. Sonrasında bir ink-jet yazıcı kafasıyla gerekli olan bölgelere bağlayıcı püskürtülerek tozların birleştirilmesi sağlanır (Şekil 2.3). Bu işlemler tekrar edilerek nihai ürün elde edilir. Bu yöntemde pek çok çeşit toz malzeme ile parça üretmek mümkündür. Ancak metal malzemedan üretilen parçaların mekanik özellikleri toz yatak füzyonu ve doğrudan enerji biriktirme yöntemine göre biraz daha düşüktür (Zhang vd, 2018). İnfiltrasyon, sıcak izostatik presleme gibi ek işlemlerle mekanik özelliklerde ciddi iyileştirmeler yapılabilir. Bu iyileştirmeler ile seramik ve metal parçalar için toz yatak füzyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu yöntemde artık gerilme problemi olmadığı için özellikle seramik parçaların üretiminde avantajı bulunmaktadır (Mirzababaei ve Pasebani, 2019). Metal ve seramik parçaların üretimi iki aşamalıdır. İlk aşamada yazıcıdan literatürde yeşil parça (green part) denilen parça

elde edilir. Yeşil parçada metal ya da seramik toz ile bağlayıcı yapışık halde bulunur. Burada nihai ürünün elde edilmesi için bağlayıcıdan arındırılması ve ürünün yoğunluğunun arttırılması gerekmektedir. Bunun için direkt sinterleme ya da önce bağlayıcı arındırma (debinding) sonra sinterleme yapılmaktadır (Lv vd, 2019).



Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme yöntemi

Bağlayıcı püskürtme yönteminin en çok kullanıldığı alanlardan birisi de döküm sektörüdür. Kum kalıpların model kullanılmadan direkt olarak yapılmasını sağlayan kum yazıcılar geliştirilmiştir. Kum yazıcılarda kum malzemenin üzerine kum kalıbı yapımında kullanılan reçineler püskürtülmektedir. Genellikle furan ve fenolik reçineler kullanılmaktadır. Kum yazıcılarla karmaşık parçaların kum kalıplarının yapımı çok kolay hale gelmiştir. Parçanın karmaşıklık düzeyi arttıkça kum yazıcılar geleneksel yöntemlerden daha ekonomik olmaktadır (Şekil 2.4). Ancak parça basit ve çok sayıda üretilecek ise geleneksel yöntemler ile üretim daha hızlı olmaktadır. Geleneksel yöntemlerde model yapımı çok maliyetli bir işlem olsa da parça sayısı arttıkça modelin maliyeti amorti edilmektedir. Ayrıca model elde edildikten sonra hızlı bir şekilde kum kalıp hazırlanmaktadır. Geleneksel yöntemlerin hız açısından avantajına karşılık olarak kum yazıcılarda da şekilsel özgürlük olarak bir avantaj bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde talaşlı imalatın sınırları çerçevesinde model yapılmaktadır. Kum yazıcılarda ise eklemeli imalatın sunduğu şekilsel özgürlüklerden, döküm tekniğinin izin verdiği sınırlar içerisinde faydalanılabilir. Literatürde kum yazıcılar kullanılarak malzeme israfının azaltıldığı, daha hafif parçaların elde edildiği ve değişik kum kalıp tasarımlarının yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Sama vd,

2019; Sivarupan vd, 2019; Snelling vd, 2015; Wang vd, 2019). Kum yazıcılar sahip olduğu avantajlardan dolayı döküm sektöründe büyük bir ses getirmiştir. Kum yazıcıların sahip olduğu avantajlarına rağmen kalıp imal etme hızların arttırılması gerekmektedir. Kalıp imal etme hızlarının arttırılması geleneksel yöntemler yerine kum yazıcıların tercih edilmesini sağlayabilecektir.



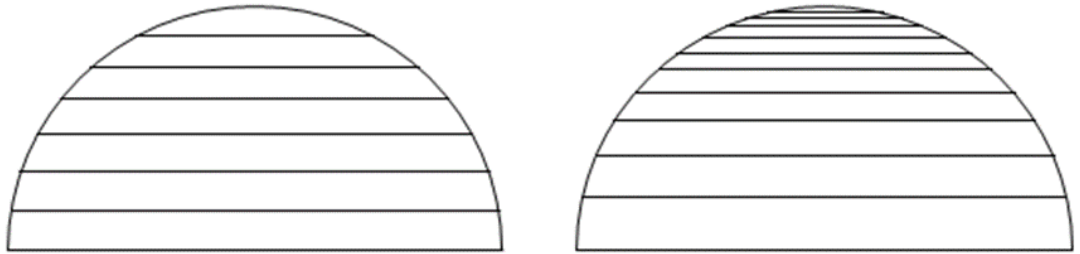
Şekil 2.4. Karmaşıklık maliyeti (Almaghariz vd, 2016)

Kum yazıcıların veya diğer bağlayıcı püskürtme makinelerinin üretim hızlarının arttırılması için bir eksen boyunca yazıcı başlıklarının konulması ile X-Y eksen hareketinin sadece tek eksene indirilmesi bir çözüm olabilir (Şekil 2.5). Sadece tek eksen hareketinin olması büyük bir hız kazandırmaktadır. Üretimin kesintisiz bir şekilde devam etmesi için Voxelfet firmasının geliştirdiği bir bant sistemi de mevcuttur (Ederer ve Hartmann, 2013). Bu sistemde toz eğimli bir yüzeye serilmekte olup kesintisiz bir şekilde üretim yapılmaktadır.



Şekil 2.5. Viridis 3D kum yazıcı (Lowder, 2017)

Bağlayıcı püskürtme yönteminde üretim hızının mekanik iyileştirmeler ile artırılması çok iyi bir ilerlemedir. Bütün bu gelişmeler üretim hızını arttırsa da kum kalıp imalatının ya da diğer bağlayıcı püskürtme uygulamalarının daha hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun için katı model dosyasının (STL ya da CAD dosyası) dilimlenmesinde iyileştirmeler yapılabilir. Dilimleme aşaması bütün eklemeli imalat yöntemlerinde yapılması gereken bir aşamadır. Dilimleme aşamasında 3 boyutlu CAD dosyası STL formatına çevrilir. STL formatındaki dosya dilimleme programları vasıtasıyla dilimlenir ve yazıcının çalışması için gerekli olan G-kodları oluşturulur. Başka bir yöntemde ise CAD dosyası STL formatına çevrilmeden direkt olarak dilimlenir (Mohan vd, 2003). Dilimleme yöntemleri de kendi arasında farklılık göstermektedir. Dilimleme yöntemleri normal dilimleme ve adaptif olmak üzere ikiye ayrılabilir (Mohan vd, 2003). Normal dilimleme yönteminde dilimlerin kalınlıkları sabit iken adaptif dilimlemede katmanların kalınlıkları detay bölgelerde ince, detay gerektirmeyen bölgelerde ise kalın olacak şekilde ayarlanır (Şekil 2.6). Bu sayede hızlı bir şekilde kaliteli ürünleri üretebilmek mümkündür. Normal dilimlemede iyi yüzey kalitesi elde etmek için mutlaka ince katman kalınlığı seçilmelidir. Ancak bu durumda bütün katmanlar ince olacağı için üretim hızı çok yavaşlar. Katman kalınlığı yüksek seçilir ise de yüzey kalitesi bozulacaktır.



Şekil 2.6. Normal dilimleme (sağ), Adaptif dilimleme (sol), (Ghazanfari vd, 2015)

Bağlayıcı püskürtme yönteminde adaptif dilimleme kullanılarak üretim hızları ciddi oranda artırılabilir. Bilindiği kadarıyla literatürde bağlayıcı püskürtme yönteminde adaptif katman kalınlığı kullanılan bir çalışma henüz mevcut değildir. Adaptif dilimleme kullanılarak parça imalatında yüzey kalitesini düşürmeden üretim süreleri azaltılıp maliyetler düşürülebilir.

2.2. Eklemeli İmalatın Süreçleri

Eklemeli imalatla 3B model tasarımından ürünün nihai haline getirilmesine kadar birçok aşama bulunmakta olup bunlar; CAD programlarında 3B modelin

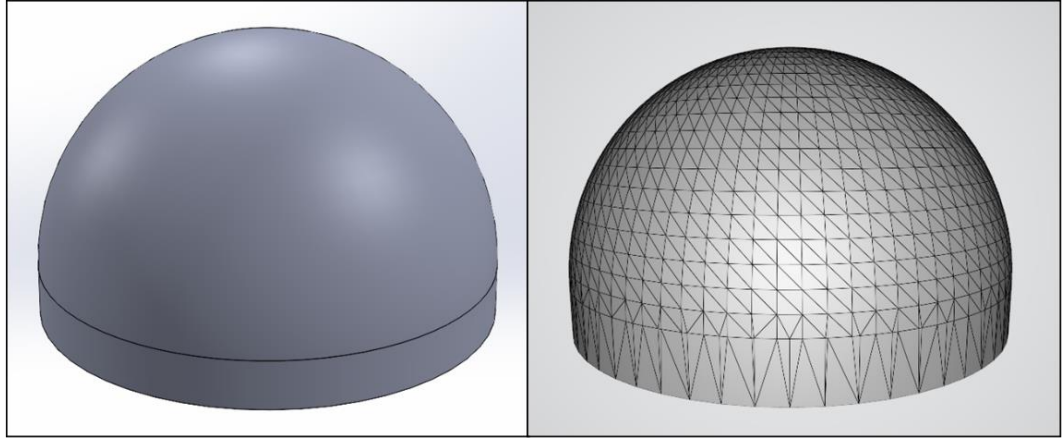
tasarlanması, dilimleme ve G-kod oluşturma, G-kod dosyalarının makineye aktarılarak gerekli ayarlarının yapılması, baskı aşaması, baskının makineden alınması, baskı sonrası ek işlemler ve uygulama olarak ifade edilebilir. Bazı ürünlerin üretiminde bu aşamaların hepsi uygulanırken bazı durumlarda ise bu aşamaların bir kısmının uygulanmasına gerek kalmamaktadır (Gibson vd, 2021).

2.2.1. CAD Programlarında 3B Modelin Tasarlanması

Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilecek bütün parçaların 3B modellerinin oluşturulması gerekmektedir. 3B model herhangi bir CAD programından bir tasarımcı vasıtasıyla oluşturulabilir. 3B model lazer ya da optik tarama gibi yöntemlerle de hızlı bir şekilde oluşturulabilir (Gibson vd, 2021).

2.2.2. Dilimleme ve G-kod Oluşturma

3B modelin tasarlandıktan sonra dilimlenmesi gerekmektedir. Dilimleme öncesi CAD model STL formatına çevrilmektedir. STL formatı eklemeli imalat için evrensel bir dosya formatı olup hemen hemen bütün dilimleme yazılımlarında kullanılabilir. Dilimleme genellikle STL dosyası üzerinden yapılmakta olup bazı dilimleme yazılımları direkt olarak CAD dosyası üzerinden dilimleme yapmaktadır. STL modeller üçgenlerden oluşurken CAD dosyasında durum daha farklıdır (Şekil 2.7). Dilimlemeden sonra takım yollarının oluşturulması gerekmektedir. Takım yolları genellikle g-kodlar ile oluşturulmaktadır. G-kod nümerik kontrollü tezgahlarda kullanılan evrensel bir kodlama sistemidir. Bu takım yolları oluşturma aşamasına da bilgisayar destekli imalat (computer aided manufacturing – CAM) denmektedir. 3B yazıcılarda takım yollarının oluşturulması da farklı türde bir CAM'dir. Birçok 3B yazıcı geleneksel g-kod sistemini kullansa da bazı yazıcılarda farklı sistemler de kullanılabilmektedir. Şekil 2.8'de FFF (Fused filament fabrication) tipi yazıcılar için kullanılan örnek bir G-kod dosyası gösterilmektedir.



Şekil 2.7. CAD model (sol), STL model (sağ)

```

Kure18mm180derece06mm.gcode - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
; generated by Slic3r 1.3.0 on 2022-06-14 at 23:08:59

; external perimeters extrusion width = 0.29mm (1.15mm^3/s)
; perimeters extrusion width = 0.36mm (0.63mm^3/s)
; infill extrusion width = 0.32mm (1.50mm^3/s)
; solid infill extrusion width = 0.36mm (0.42mm^3/s)
; top infill extrusion width = 0.36mm (0.32mm^3/s)|

M190 S20 ; set bed temperature and wait for it to be reached
M104 S20 ; set temperature

M109 S20 ; set temperature and wait for it to be reached
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for extrusion
G92 E0
G1 Z0.000 F6000.000
G1 X66.150 Y79.357 F6000.000
G1 X66.186 Y78.632 E0.00495
G1 X66.313 Y77.772 E0.01087
G1 X66.525 Y76.929 E0.01679

```

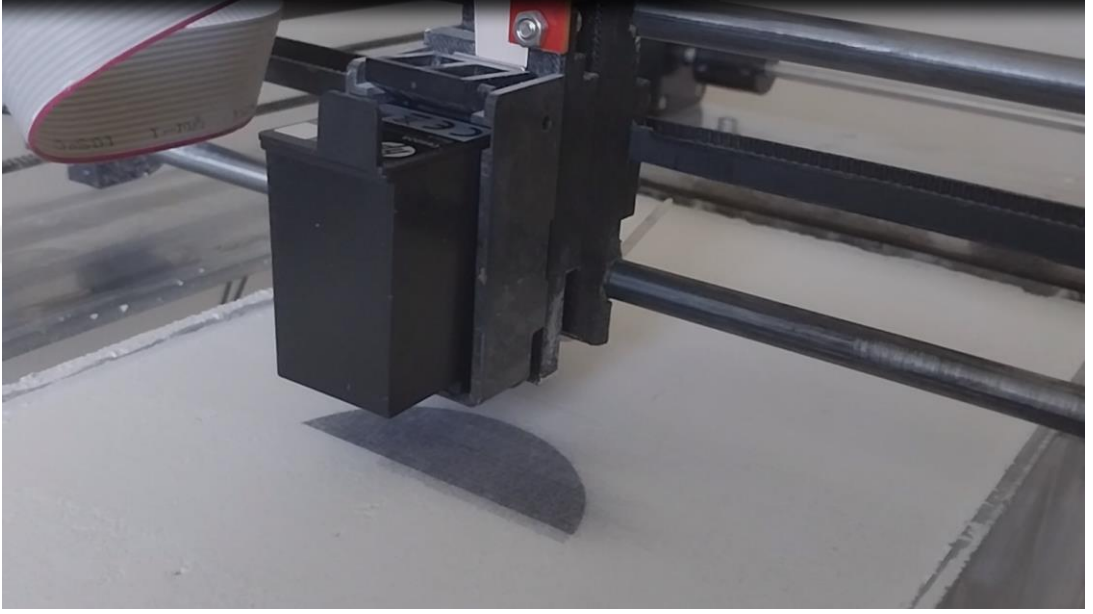
Şekil 2.8. Örnek G-kod dosyası

2.2.3. G-Kod Dosyalarının Makineye Aktarılması ve Makine Ayarlarının Yapılması

Baskı işleminin gerçekleştirilmesi için g-kod dosyasının ya da başka bir formattaki takım yolu dosyasının 3B yazıcıya aktarılması gerekmektedir. Dosya aktarımı harici bellekle, kablolu bağlantı ya da kablosuz bağlantı gibi değişik yöntemlerle yapılabilir. Sonrasında ise makinanın baskı işlemi için hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bunlar; baskı haznesinin ısıtılması, baskı hızı ayarı, enerji kaynağının kontrolü gibi işlemlerdir. Bu işlemler eklemeli imalat yöntemine ve üretilcek parçanın özelliğine göre değişmektedir.

2.2.4. Baskı Aşaması

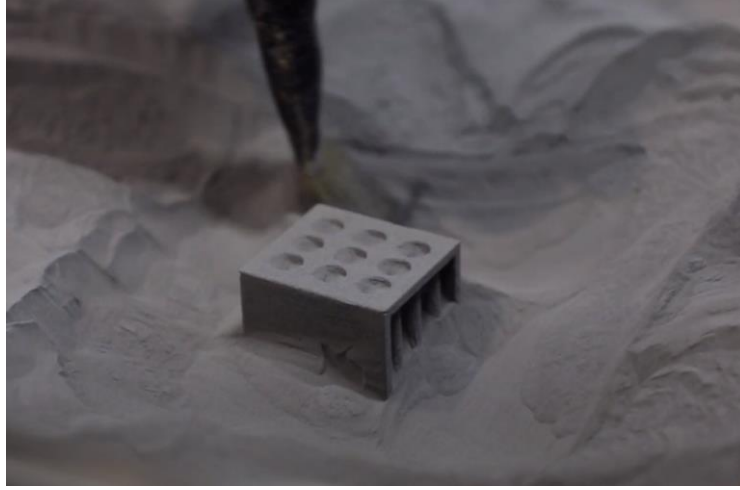
Dosya makinaya aktarıldıktan ve makinada gerekli ayarlar yapıldıktan sonra baskı işlemi yapılabilir. Baskı işlemi otomatik bir süreç olup herhangi bir operatör olmadan gerçekleşebilir. Ancak oluşabilecek hataların kontrolü ve önlenmesi için gözleme ihtiyaç duyulabilmektedir. Şekil 2.9’da tez kapsamında yapılan yazıcının baskı sırasında çekilen bir resmi gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Baskı aşaması

2.2.5. Baskının Makinadan Alınması

Baskı işlemi bittikten sonra ürünün hassas bir şekilde makinadan alınması gerekmektedir. Birçok eklemeli imalat yöntemi olduğu için bu işlem yöntemden yönteme farklılık göstermektedir. Bazı yöntemlerde parçalar düşük bir el kuvveti ile tabla üzerinden alınabilirken bazı yöntemlerde ise parça üzerindeki tozlar dikkatli bir şekilde temizlenmekte ve sonra parça alınmaktadır (Şekil 2.10). Ürünün makinadan alınması sırasında ürüne zarar verilebilir. Bu yüzden bu işlem dikkat edilmesi gereken bir işlemdir.

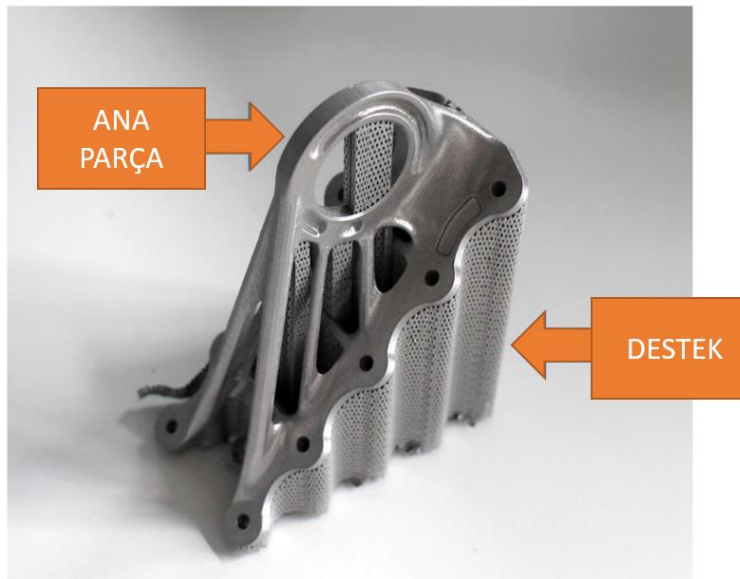


Şekil 2.10. Bağlayıcı püskürtme yönteminde parçanın yazıcıdan alınması (Anonim, 2019)

2.2.6. Baskı Sonrası Ek İşlemler

Parça makinadan alındıktan sonra bazı ek işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir. Birçok parça destek yapıları ile birlikte üretilir (Şekil 2.11). Bu desteklerin parça üzerinden temizlenmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda bu destek yapıları elle çıkartılabilirken bazı durumlarda ise mekanik yollarla kesilmesi gerekmektedir. Toz malzeme kullanılan yöntemlerde parça üzerindeki gereksiz tozların dikkatli bir şekilde temizlenmesi gerekmektedir.

Bazı yöntemlerde ise parçanın nihai halini alması için sinterleme, infiltrasyon veya ısıl işlem gibi süreçlere tabi tutulması gerekmektedir. Baskı sonrası parça üzerinde kumlama gibi yüzey pürüzlülüğünü giderme işlemleri de yapılabilmektedir.



Şekil 2.11. Toz yatak füzyon yöntemindeki destek yapıları (Claire, 2023)

2.2.7. Uygulama

Baskı sonrası gerekli işlemler yapıldıktan sonra parça artık kullanılabilir durumdadır. Parça diğer mekanik ya da elektronik parçalarla monte edilip kullanılabilir. Ürünler bazı durumlarda sadece prototip olarak kullanılmakta olup bazı durumlarda ise nihai ürün olarak da kullanılmaktadır.

Tasarımcılar tasarladıkları ürünün görselini daha iyi anlamak için 3B yazıcıları kullanabilmektedir. 3B yazıcılar mimari ve dekoratif amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen ürünler 3B yazıcılar kullanılarak daha hafif ve aynı mukavemette üretilebilmektedir (Anonim, 2022b). Bu şekilde özellikle havacılık sektöründe birçok parça hafifletilmektedir. Bazı motor parçaları eklemeli imalat yöntemleri ile hafif bir şekilde üretilerek ya da fonksiyonelliği geliştirilerek motorların performansı arttırılabilmektedir (Anonim, 2022a). Eklemeli imalat yöntemleri havacılık-uzay, savunma, sağlık, otomotiv, inşaat, telekomünikasyon gibi birçok alanda uygulanmaktadır.

2.3. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile Alümina Parça Üretimi

Alümina önemli mühendislik malzemelerinden birisidir. Alümina aşınma ve korozyona karşı dirençli, çok iyi ısıl kararlılığı olan, yüksek elektrik yalıtkanlığına sahip, biyoyumlu bir malzemedir. Dolayısıyla alümina kesici aletlerin ve aşındırıcıların yapımında, su arıtmada, yalıtım parçalarında, refrakter malzemelerinde, protezlerde, implantlarda, entegre devrelerde, optik uygulamalarda, havacılık, mekatronik, kimya mühendisliği gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bağlayıcı püskürtme tekniği alümina malzemelerin üretimi için uygun bir yöntemdir. Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi artık gerilme problemi olmaması, seri üretime uygun olması, destek yapılarına gerek duyulmaması, üretim maliyetinin düşük olması gibi avantajlar sayesinde bağlayıcı püskürtme tekniğinde seramik malzemelerin üretimi mantıklı olmaktadır. Bağlayıcı püskürtme tekniğinde değişik boyutsal dağılıma ve morfolojik özelliklere sahip alümina tozlar birçok çalışmada farklı parametreler ile kullanılmıştır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Bağlayıcı püskürtme yönteminde alumina ile yapılan bazı çalışmalar

Toz Boyutu (μm)	Katman K. (μm)	Doy. (%)	TSH (mm/sn)	SD (rpm)	TYT (%)	T _s (C°)	t _s (sa)	Yoğunluk (%)	Y. Prz. (μm)	Kaynak
20-40	100	100	-	-	-	1650	2	86	-	(Maleksaeedi vd, 2014)
30, 45, 53	-	60	-	-	-	1600	2, 16	64-96,51	-	(Gonzalez vd, 2016)
20-40	66, 100	50, 70, 90	20, 75, 130	-	-	-	-	-	-	(Mendoza Jimenez vd, 2019)
D ₅₀ =7,78	-	100	-	-	-	1200-1500	2	65	11-13	(Huang vd, 2019)
10, 70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Du vd, 2019)
53-90	120	-	30	500	6-15,8	1600	2	32-50,7	-	(Miao vd, 2020)
D ₅₀ =7,73 D ₅₀ =45,81	110, 130, 150	-	-	-	-	1500, 1650	1,5-2	66,4-70,1	9,55-16,73	(Cao vd, 2020)
15, 21	100, 150, 250	--	-	-	-	1700	10, 48	43,6-70,9	-	(Lee vd, 2020)
0,1	5, 30	100	5	100	9-15	1650	4	72	-	(Moghadasi vd, 2021)
D ₁₀ =10,1 D ₅₀ =21,6 D ₉₀ =39	100	-	5	300	-	1700	12	78	-	(Oropeza ve Hart, 2021)
D ₅₀ =1,7 D ₅₀ =9	50	55, 75	-	-	-	1500, 1750	3	75,4	-	(Mariani vd, 2021)
3+50-70	300	-	-	-	-	1650	2	39,49	-	(Manotham vd, 2021)
D ₅₀ =73,3	100	-	5	-	-	1300, 1400, 1500	2	83	-	(Yu vd, 2022)
D ₅₀ =70, 15-120	160	35	100	500	59,2	-	-	-	-	(Li vd, 2022)
0,4+12,1-167	200	50, 70	-	-	33-34,7	1200, 1400, 1600	6	55,3-87,9	-	(Chen vd, 2022a)
20	50, 75, 100	80-140	-	-	-	1500	2	43,5	5,7-7,55	(Peng vd, 2022)
20,3	50, 100	70	55, 65	150	-	1500-1950	5, 10	90	-	(Vogt vd, 2022)
1,65 +3	200	-	-	-	-	1700	2	93,69	-	(Manotham ve Tesavibul, 2022)
2,3-323,3	150-300	42-119	10, 50	-	22,3-34,8	1600	6	64,2	-	(Chen vd, 2022b)

*Doy.=Doygunluk, TSH=Toz serme hızı, SD=Silindir devri, T_s=Sinterleme sıcaklığı, t_s=Sinterleme süresi, Y.Prz.= Yüzey pürüzlülüğü

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması üç boyutlu yazıcı yapımı, adaptif dilimlemenin bağlayıcı püskürtmeye uyarlanması, değişken bağlayıcı miktarı algoritmasının geliştirilmesi, adaptif dilimlemenin ve DBMA algoritmasının farklı modeller üzerine uygulanması ve parametre optimizasyonu gibi aşamalarından oluşmaktadır.

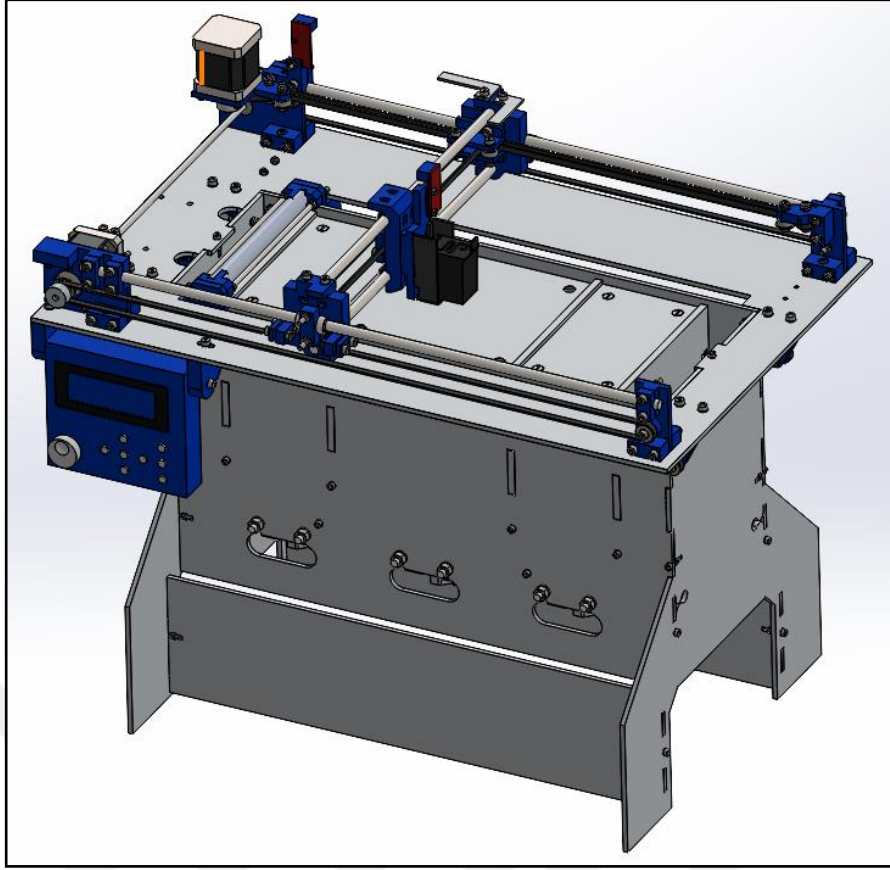
3.1. Materyal

Bu kısımda adaptif dilimleme ve DBMA'nın denenmesi için üretilen 3B yazıcıdan, test örneklerinin üretilmesinde kullanılan malzemelerden ve tez çalışması kapsamında kullanılmış olan diğer ekipmanlardan bahsedilmiştir.

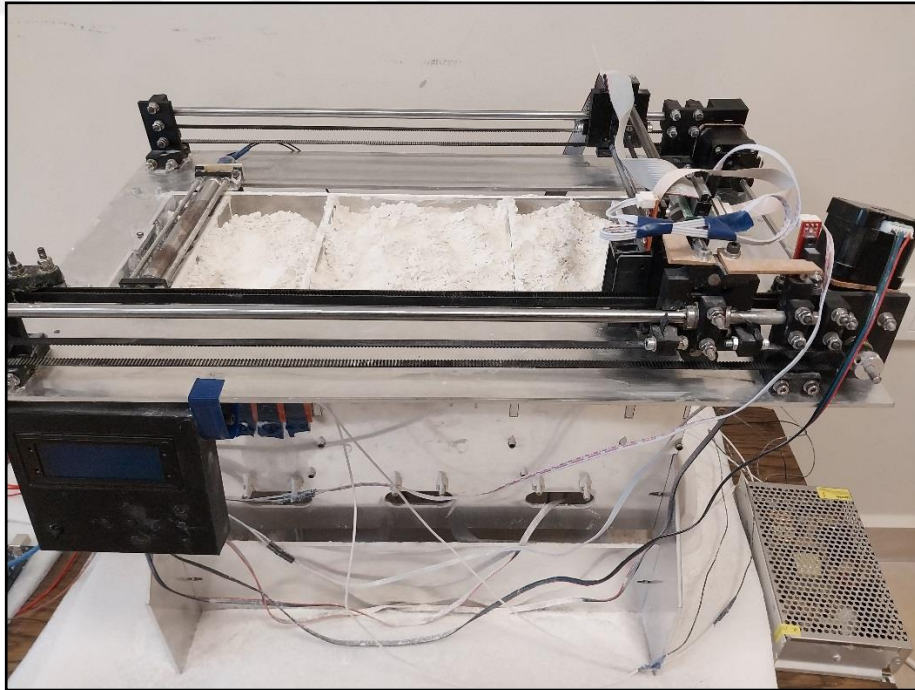
3.1.1. Açık Kaynak 3B Yazıcı Tasarım ve İmalatı

Adaptif dilimleme ve DBMA'nın bağlayıcı püskürtme yöntemine uygulanabilmesi için açık kaynak bir 3B yazıcıya ihtiyaç vardır. Önceden de bahsedildiği gibi var olan ticari bağlayıcı püskürtme yazıcıları kapalı sistemler olup adaptif dilimlemenin kullanımı mümkün olmamaktadır. Ticari yazıcıların ne dilimleme programları ne de kendi makine yazılımları buna müsaade etmemektedir. Bunun için Ondokuz Mayıs Üniversitesinden Bilimsel Araştırma Projesi (Proje no: PYO.MUH.1904.21.006) desteği alınarak açık kaynak bir 3B yazıcı (Ytec, 2014a) imal edilmiştir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Test örneklerinin daha iyi üretilebilmesi için 3B yazıcıda mekanik, yazılım ve elektronik olarak bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Akışkan olmayan tozların daha iyi serilebilmesi için yazıcıya orijinal halinden farklı olarak ters dönen silindir (counter rotating roller) mekanizması eklenmiştir.

Yazıcının baskı alanının boyutları 150x150x100 mm'dir. Yazıcının genel boyutu ise 550x350x450 mm'dir. Yazıcıda HP C6602A termal baskı kafası kullanılmış olup çözünürlüğü 96 DPI (inç başına 96 damla) ve ortalama damla hacmi 160 pL'dir. Kullanılan baskı kafasının toplam 12 adet nozulu olup maksimum püskürtme frekansı 1,5 kHz'dir (Anonymous 2023; Budding vd, 2013).



Şekil 3.1. Açık kaynak 3B yazıcı katı modeli



Şekil 3.2. Yapılan açık kaynak 3B yazıcı

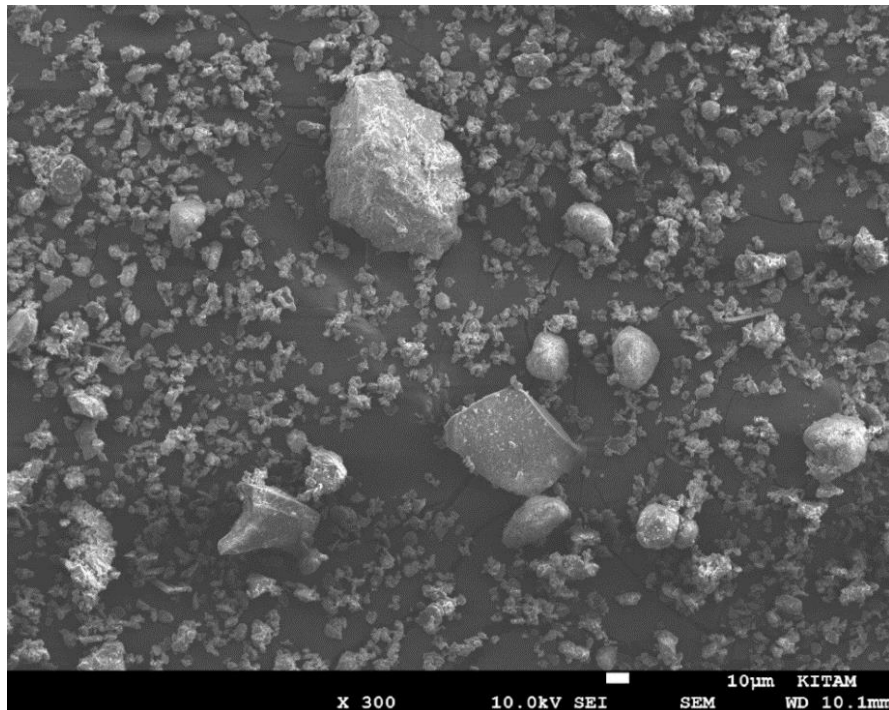
3.1.2. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

Deney örneklerinin üretilmesinde hammadde olarak geniş kullanım alanına sahip olan alümina toz tercih edilmiştir. Tethon3D (Tethon3D, 2019) marka alümina toz yurtdışından temin edilmiştir. Bağlayıcı olarak ise siyah mürekkep ve Tethon3D markasının Tethonite bağlayıcısı kullanılmıştır.

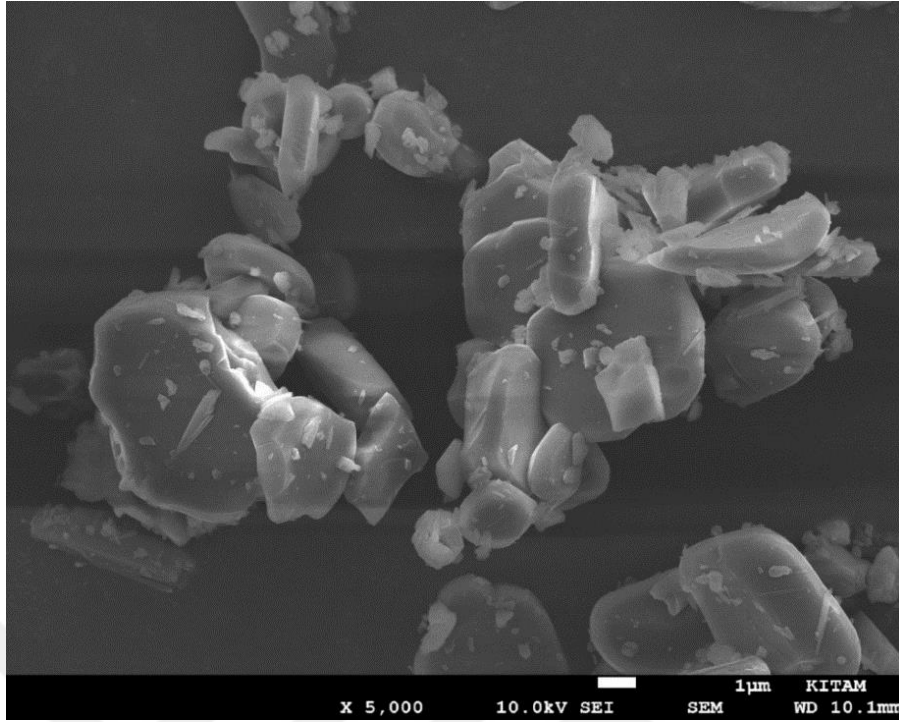
Tethon3D marka tozun taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri çekilmiştir (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4). Miao vd (2022) kullanılan Tethon3D marka alümina tozunun morfolojisini ve toz boyut dağılımını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmaya göre D10 değeri 5 μm (hacimce %10'u 5 μm altı), D50 değeri 10 μm (hacimce %50'si 10 μm altı) ve D90 ise 100 μm (hacimce %90'ı 100 μm altı)'dır. Kullanılan tozun hacimce %75'i ise 60 μm ve altındadır.

Küresel numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümünde Mitutoyo SJ-400 cihazı kullanılmıştır. Üçgen şekilli numunelerin eğimli yüzeylerinden pürüzlülük ölçümü yapmak için ise PCE-RT marka portatif yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. SEM ölçümleri de JEOL JSM-7001F cihazında gerçekleştirilmiştir.

Yoğunluk ölçümleri Arşimet yöntemiyle yapılmıştır. Arşimet yöntemi özellikle amorf yapıdaki malzemelerin yoğunluğunun belirlenmesinde en sık kullanılan metotlarından birisidir. Tablo 2.2'de yer alan çalışmalarda yoğunluk ölçümlerin çoğunluğu Arşimet yöntemi ile yapıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Kullanılan tozun SEM görüntüsü (Uzak çekim)



Şekil 3.4. Kullanılan tozun SEM görüntüsü (Yakın çekim)

3.2. Yöntem

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında kullanılan ve geliştirilen yöntemlerden, test örneği olarak üretilen modellerden ve farklı deney stratejilerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

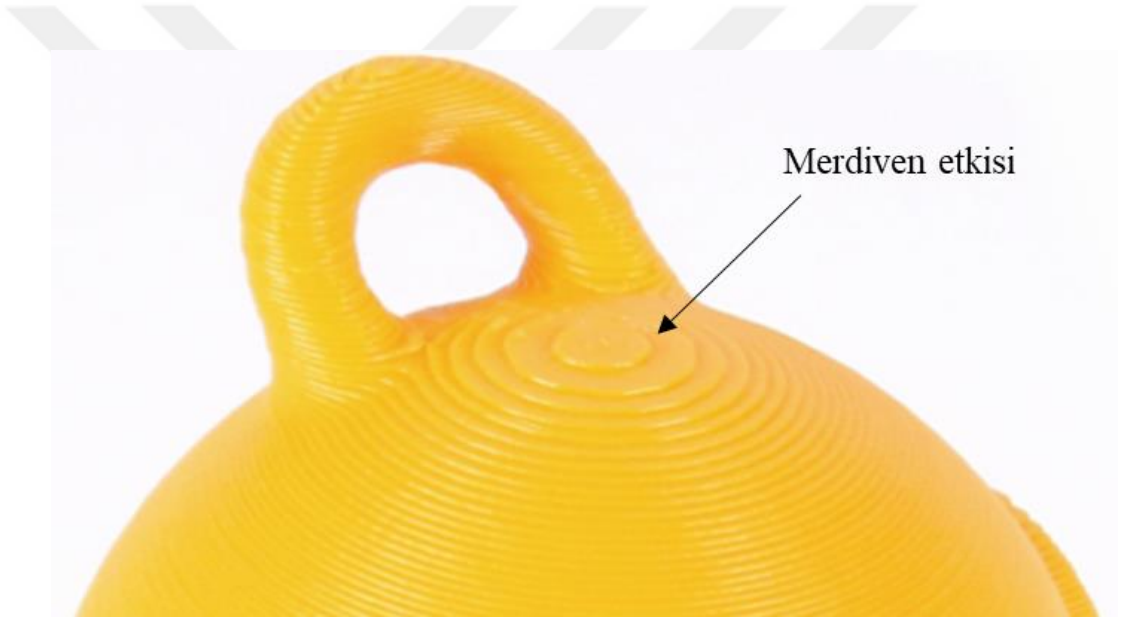
3.2.1. Adaptif Dilimleme Yönteminin Uyarlanması

Eklemeli imalatta üretim yapılabilmesi için nesnelerin 3B katı modellerinin dilimlenmesi gerekmektedir. Dilimleme aşaması eklemeli imalatın en önemli aşamalarından birisidir (Ding vd, 2016; Xu vd, 2018). 3B katı model önce dilimlere ayrılır. Daha sonra bu dilimlerin ayrı ayrı takım yolları ya da lazerli bir sistem ise tarama yolları oluşturulmaktadır. Bu takım yolları genellikle G-kod denilen evrensel kodlar olmakla birlikte bazı yazıcılarda farklı sistemler şeklinde de olabilmektedir. Oluşturulan bu kodlar bir dosyaya yazdırılır. Daha sonra bu dosya yazıcıya aktarılır ve bu kodların yönlendirmesiyle her bir katman sırayla üretilerek tasarlanan nesne imal edilir.

Dilimleme bazı özel programlar vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu programlar açık kaynak (Repetier, 2020; Slic3r, 2020) ya da ticari firmaların kendi özel yazılımları olabilir. Bu yazılımlarda katman kalınlığı, baskı hızı, baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı,

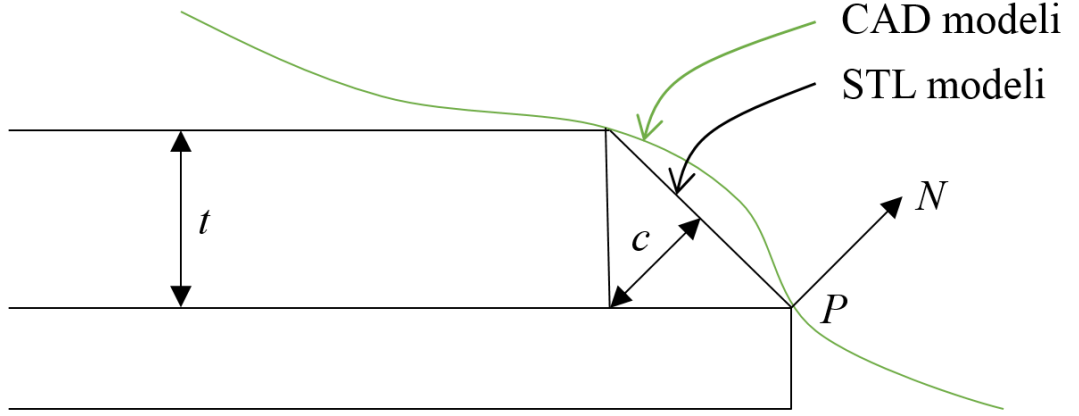
lazer tarama hızı, silindir devri, silindir serme hızı, doygunluk gibi parametreler ayarlanmaktadır. Her eklemeli imalat yönteminin farkı parametreleri vardır. Bir yöntemde olan parametre başka bir yöntemde olmayabilir ya da aynı parametrenin değeri veya yapısı farklılık gösterebilir. Örneğin tomografik eklemeli imalatta çok farklı bir dilimleme yaklaşımı vardır (Kelly vd, 2019). Klasik dilimleme yöntemlerinde nesneler Z eksenini boyunca dilimlere ayrılırken tomografik eklemeli imalat yönteminde dilimler radyal bir şekilde içten dışa doğru ayarlanmaktadır.

Eklemeli imalat ilk geliştirildiğinde normal dilimleme kullanılmıştır. Normal dilimlemede bütün katman kalınlıkları sabittir. Ancak bazı eğimli ya da açılı yüzeylere sahip nesnelerin üretiminde normal dilimlemenin kullanılması merdiven etkisi (Şekil 3.5) denilen sorunlara yol açmaktadır (He vd, 2014).



Şekil 3.5. Merdiven etkisi – Staircase effect (Jackson, 2017)

Merdiven etkisinin azaltılması için katman kalınlığı düşürülmelidir. Fakat bu durum üretim sürelerini ciddi oranda arttırmaktadır. Üretim sürelerini çok fazla arttırmadan bu etkiyi azaltmak için adaptif dilimleme yöntemi geliştirilmiştir (Dolenc ve Mäkelä, 1994). Dolenc ve Mäkelä (1994) önerdikleri algoritmada doruk yüksekliği (cusp height) diye adlandırılan bir parametre tanımlamaktadır (Şekil 3.6). Bu parametrenin bir maksimum değeri olup bu değere göre katmanlar oluşturulmaktadır.



Şekil 3.6. Doruk yüksekliği (Mohan Pandey vd, 2003)

Şekil 3.6'deki N, P noktasının normalini ifade etmekte olup Denklem (3.1) de gösterilmiştir.

$$N = (N_x, N_y, N_z) \quad (3.1)$$

Doruk noktasının vektörü ise,

$$C = cN \quad (3.2)$$

şeklinde gösterilir. C vektörünün skaler değeri, Önceden belirlenen C_{maks} değerinden büyük olamaz (Denklem 3.3).

$$|C| = c \leq C_{maks} \quad (3.3)$$

Katman kalınlığı t ise C_{maks} değerinin N_z 'ye bölünmesiyle elde edilir (Denklem 3.4).

$$t = \frac{C_{maks}}{N_z}, \quad N_z \neq 0 \quad (3.4)$$

Katman kalınlığı t değerinin belirli bir aralıkta olması gerekir. Bunun için t değeri,

$$t_{min} \leq t \leq t_{maks} \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sınırların aşılması durumunda,

$$t_{min} > t \rightarrow t = t_{min} \quad (3.6)$$

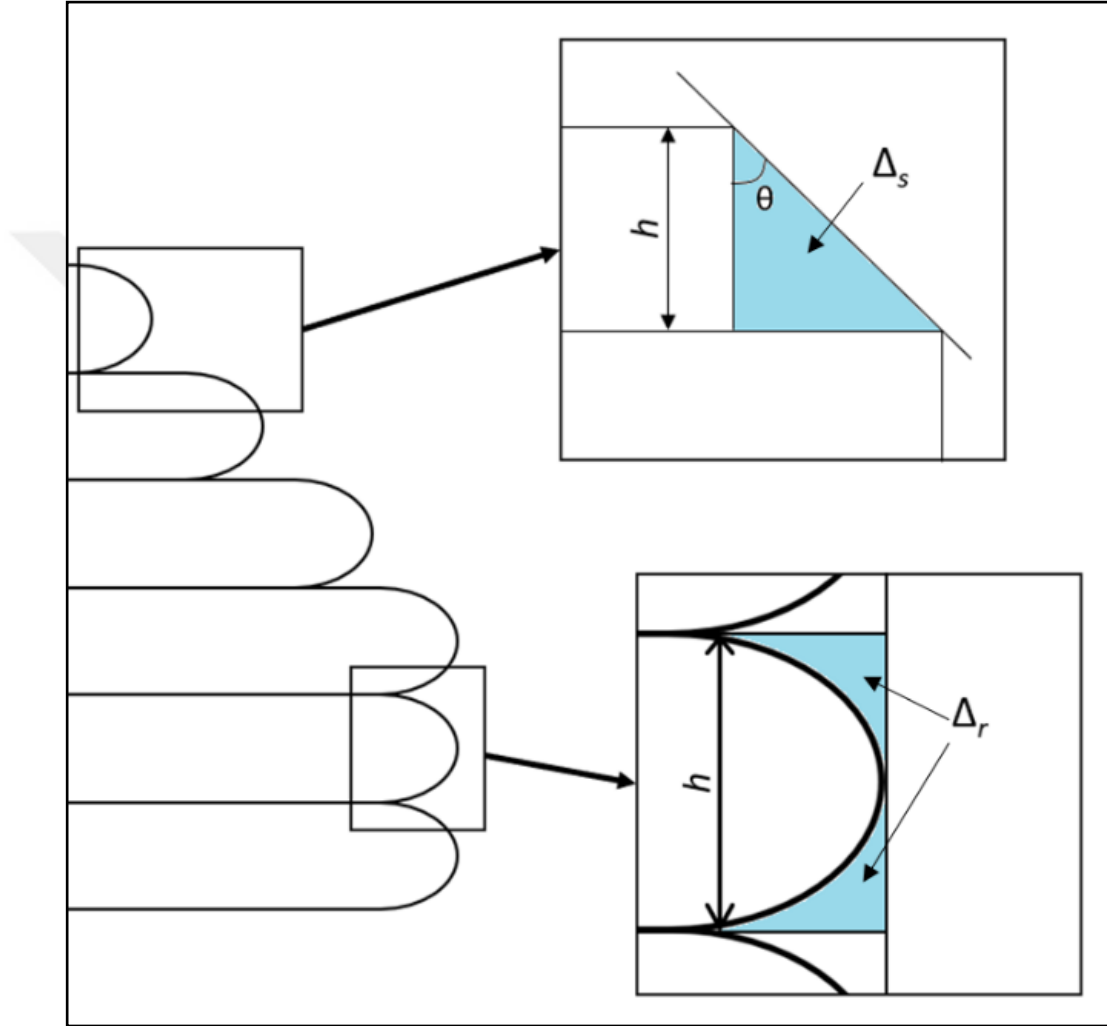
$$t > t_{maks} \rightarrow t = t_{maks} \quad (3.7)$$

denklemlerine göre t değeri belirlenir.

Adaptif dilimleme için geliştirilen başka algoritmalar da vardır. Adaptif dilimlemede katman kalınlıkları nesnenin bölgesine göre farklılık göstermektedir (Hope vd, 1997; Kulkarni ve Dutta, 1996; Mani vd, 1999; Nageshwar vd, 2001;

Sabourin vd, 1996; Tang vd, 2022). Adaptif dilimlemede sayesinde modellerde oluşan merdiven etkisi sorununun üstesinden gelinmiştir.

Bu çalışmada dilimleme programı olarak Slic3r programı kullanılmıştır. Wasserfall vd (2017), Slic3r programının adaptif dilimleme kısmını geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algorithmada merdiven etkisini ve katmanların kenarlarındaki yuvarlaklığı dikkate alarak yüzey kalitesini arttırmayı amaçlamışlardır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Slic3r adaptif dilimleme algoritmasında dikkate alınan iki faktör: Δ_s = merdiven etkisinden oluşan alan, Δ_r = katmanların yuvarlak yapısından dolayı oluşan alan

Slic3r programının adaptif dilimleme algoritmasında Şekil 3.7’de gösterilen iki alanın toplamı bir hata verisi olarak kullanılmıştır (Denklem 3.8).

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_r = \frac{\sin \theta}{2} \cdot h + C_r \cdot h \quad (3.8)$$

Algorithmada Δ değeri kontrol parametresi olarak kullanılmıştır. Bu parametreye göre katman kalınlığı h belirlenmektedir (Denklem 3.9). C_r ise yüzeydeki

yuvarlaklığın ampirik olarak belirlendiği sabit bir parametredir.

$$h \leq \frac{\Delta}{(\sin \theta)/2 + C_r} \quad (3.9)$$

Δ parametresini maksimum (h_{maks}) ve minimum (h_{min}) katman kalınlık değerleri etkilemektedir. Ayrıca, algoritmaya Δ parametresini daha iyi belirlemek için 0 ile 1 arasında değişen ve sezgisel olarak belirlenen Q kalite parametresi eklenmiştir.

Δ parametresinin en düşük olduğu durum Denklem 3.8’de $\sin \theta$ değerinin 0’a eşit olduğu durumdur. Bu durumda denklem,

$$\Delta_{min} = C_r \cdot h_{min} \quad (3.10)$$

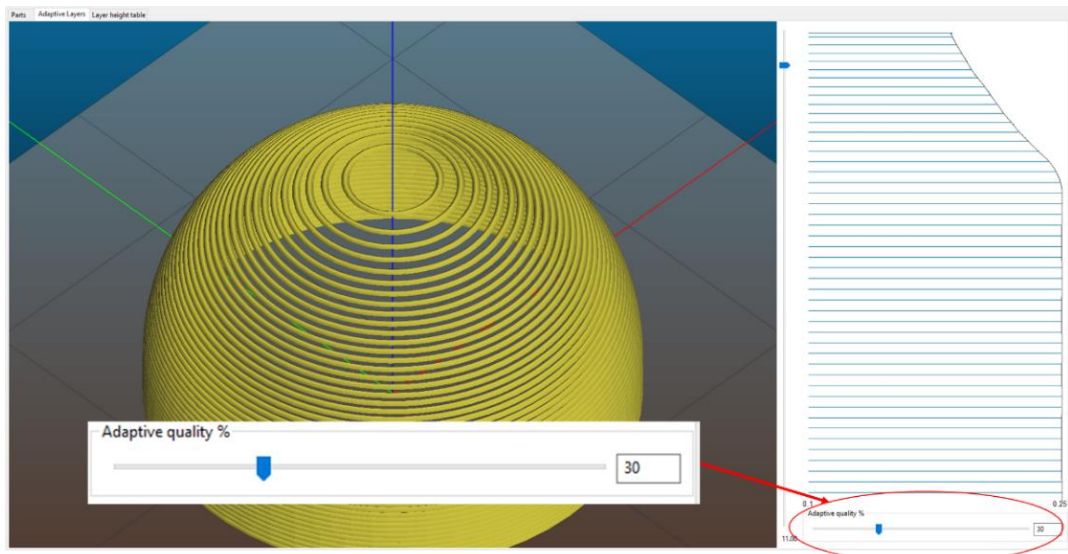
şeklini alır. Δ parametresinin en yüksek olduğu durumda ise $\sin \theta$ değeri 1’e eşit olur ve denklem,

$$\Delta_{maks} = \frac{h_{maks}}{2} + C_r \cdot h_{maks} \quad (3.11)$$

ifadesine dönüşür. Bu ifadelerle sezgisel Q parametresi eklenirse,

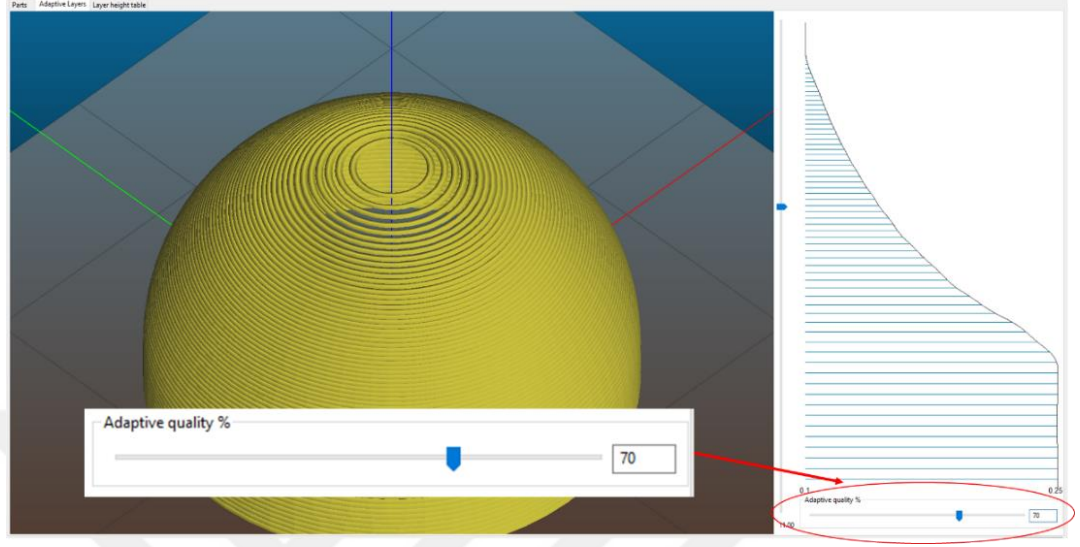
$$\Delta = Q \cdot (\Delta_{maks} - \Delta_{min}) + \Delta_{min} \quad (3.12)$$

olur. Denkleme göre $Q = 0$ olursa katmanların hepsi en küçük kalınlık değerine zorlanır. $Q = 1$ olursa da katmanların hepsi en büyük kalınlık değerine sahip olur. Q ’nun alacağı ara değerlerde ise değişik adaptif katman kalınlıklarına sahip birçok farklı dilimlenmiş model elde edilebilir (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).



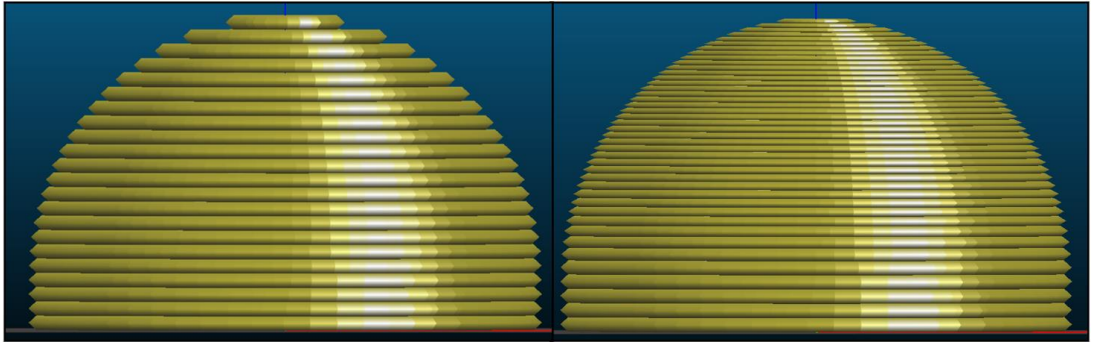
Şekil 3.8. %30 kalite parametresi ile dilimlenmiş model

Şekil 3.8’de kalite parametresi %30 olarak ayarlandığı için dilimlerin kalınlıkları biraz daha fazla çıkmıştır. Kalite parametresi %70 olduğunda da dilimler çok daha incedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. %70 kalite parametresi ile dilimlenmiş model

Kalite parametresi sezgisel olarak ayarlanarak adaptif dilimleme ile Slic3r programında merdiven etkisi azaltılabilmektedir. Şekil 3.10’da Slic3r programında normal ve adaptif olarak dilimlenmiş küre bir modelin dilimleri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde adaptif dilimleme kullanılmasıyla merdiven etkisinin ciddi oranda azaldığı görülmektedir.

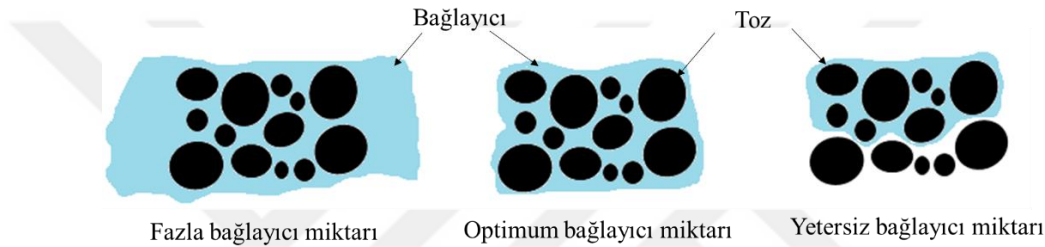


Şekil 3.10. Normal dilimleme (sol), Adaptif dilimleme (sağ)

Numuneler Slic3r programında dilimlendikten ve g-kodları oluşturulduktan sonra ek bir operasyona daha ihtiyaç duyulmaktadır. Slic3r programından elde edilen baskı dosyası açık kaynak 3B yazıcıda kullanılamamaktadır. Ayrı bir yazılım ile g-kod dosyaları yazıcıda kullanılabilir hale getirilmektedir (Ytec, 2014b).

3.2.2. Değişken Bağlayıcı Miktarı Algoritmasının (DBMA) Geliştirilmesi

Adaptif dilimlemenin bağlayıcı püskürtme yöntemine daha verimli bir şekilde uygulanması için DBMA geliştirilmiştir. Adaptif dilimlemede katman kalınlıkları değiştiği için farklı kalınlıktaki katmanlara aynı miktarda bağlayıcı gönderilmesi bazı sorunlara neden olmaktadır. Eğer katman kalınlığı ince ve bağlayıcı miktarı fazla ise bağlayıcı yanlara doğru taşacaktır. Eğer katman kalınlığı fazla ve bağlayıcı miktarı az ise bu sefer alt katman ile bağlantı sağlanamayacak olup parçada kopmalar meydana gelecektir (Şekil 3.11). Çalışmanın ilk aşamalarında bu tarz durumlarla karşılaşmış ve bu sorunu çözmek için DBMA geliştirilmiştir. DBMA sayesinde her katmana en uygun miktarda bağlayıcı gönderilebilmektedir.



Şekil 3.11. Bağlayıcı miktarı katman kalınlığı ilişkisi

Literatürde baskı için gerekli olan bağlayıcı miktarı bilgisi doygunluk denilen parametre ile belirlenmektedir. Dolayısıyla öncelikle en uygun doygunluk oranının belirlenmesi gerekmektedir. Doygunluk,

$$S = \frac{V_{bağlayıcı}}{V_{hava}} = \frac{V_{bağlayıcı}}{(1 - TYY) \times V_{katı}} \quad (3.13)$$

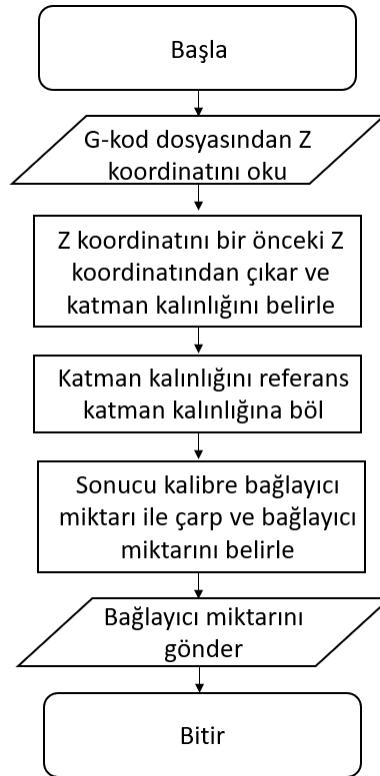
bağlayıcı hacminin toz içerisindeki havanın hacmine oranıdır. Denklem 3.13'deki TYY ise,

$$TYY = \frac{V_{toz}}{V_{toz} + V_{hava}} \quad (3.14)$$

toz yatak yoğunluğu olup toz hacminin, toz hacmi ve hava hacmine oranıdır. Deney tasarımı metotlarıyla farklı katman kalınlıkları ve doygunluk oranları ile numuneler üretilerek en uygun doygunluk bulunabilir. Sonrasında 3B yazıcının yazılımına referans bir katman kalınlığı ve bu katman kalınlığı için gerekli olan bağlayıcı miktarı bilgisi girilmelidir. Referans katman kalınlığının boyutu çok önemli değildir. Sadece hesaplama için kullanılmaktadır. Ancak referans kalınlık için gerekli olan bağlayıcı miktarının doğru olması gerekir. Optimum doygunluk belirlendiği için referans

katman kalınlığı için gerekli olan bağlayıcı miktarı Denklem 3.13'den hesaplanabilir. Bu bağlayıcı miktarına kalibre bağlayıcı miktarı denilebilir.

DBMA'nın ilk aşamasında g-kod dosyasından Z koordinatı okunur (Şekil 3.12). İkinci aşamada okunan bu Z koordinatı değeri bir önceki Z koordinatı değerinden çıkarılır ve katman kalınlığı bulunur. Üçüncü aşamada katman kalınlığı referans katman kalınlığına bölünür. Dördüncü aşamada, üçüncü aşamada bulunan sonuç ile kalibre bağlayıcı miktarı çarpılır. Bu şekilde o andaki katman kalınlığı için gerekli olan bağlayıcı miktarı bulunmuş olur. Sonrasında bu bağlayıcı miktarı bilgisi yazıcının genel yazılımının gerekli kısmına gönderilir. Geliştirilen bu algoritma çalışmada kullanılan açık kaynaklı yazıcının yazılımına eklenmiştir.



Şekil 3.12. Değişken bağlayıcı miktarı algoritması

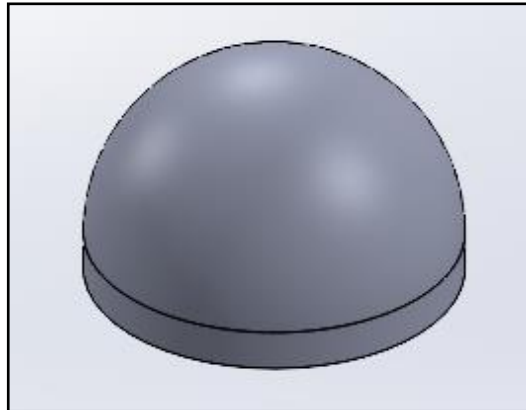
3.2.3. Adaptif Dilimleme ve Değişken Bağlayıcı Miktarı Algoritmasının Uygulandığı Modeller

Tez çalışması kapsamında adaptif dilimleme ve DBMA'nın uygulanabilmesi için farklı 3B katı modeller üzerine çalışılmıştır. İlk basamak olarak adaptif dilimleme ve DBMA etkisini anlamak için yarımküre, çeyrek küre ve literatürde kabul görmüş performans modelleri herhangi bir parametre optimizasyonu yapılmadan üretilmiştir. Üretilen numunelerin üzerinde yüzey pürüzlülüğü ve doygunluk testleri yapılarak

sonuçlar rapor edilmiştir. Daha sonra adaptif dilimleme için uygun katman kalınlığı aralığı ve doğgunluğun belirlenmesi için bir parametre optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Parametre optimizasyonu için bir ön test numunesi tasarlanmıştır. Optimum parametreler belirlendikten sonra tasarlanan başka bir numunede adaptif dilimleme ve DBMA belirlenen bu parametreler ile uygulanmıştır.

3.2.3.1. Yarımküre Model

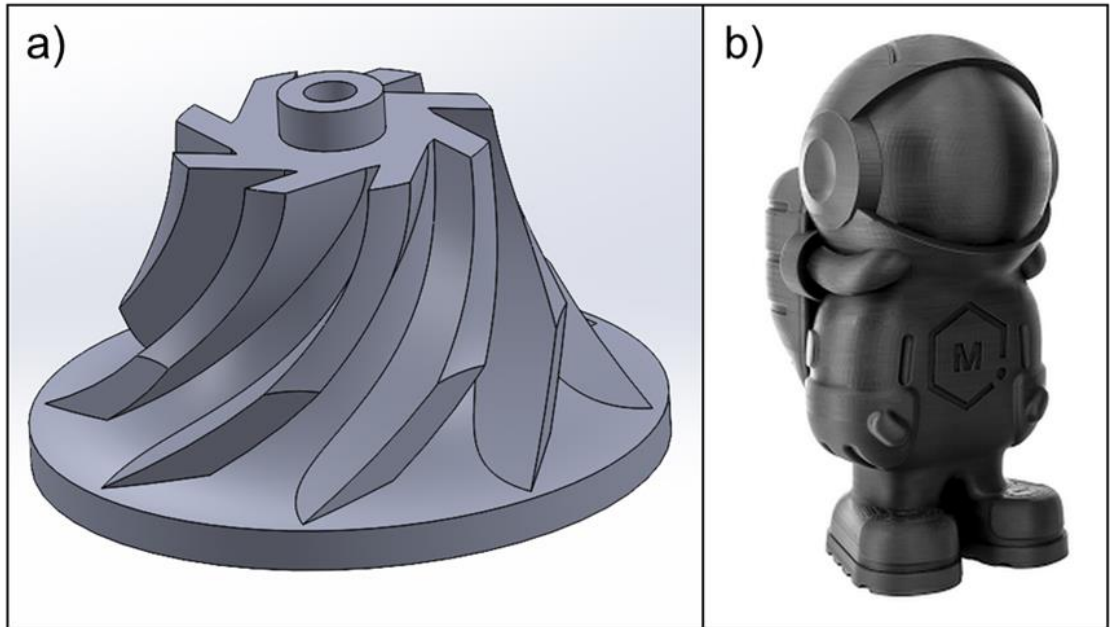
Eğimli yüzeylere sahip şekiller 3 boyutlu yazıcılarda üretildiğinde daha önce de belirtildiği gibi merdiven etkisi ve yüzey pürüzlülüğü problemleri ile karşılaşılmaktadır. Bundan dolayı hem merdiven etkisi problemini hem de yüzey pürüzlülüğü problemini ortadan kaldırmak ve adaptif dilimlemenin faydasını daha iyi göstermek adına küre modeller tercih edilmiştir. Küre zerindeki eğim sürekli olarak değiştiği için adaptif dilimleme yapıldığında katman kalınlıkları daha değişken olacaktır. Yüzeyde meydana gelen değişimi ve kullanılan yöntemlerin (Adaptif dilimleme ve DBMA) etkisini daha net görebilmek için 18 ve 12 mm çapındaki yarımküre modeller (şekil 3.13) alümina tozun morfolojik özellikleri ve literatür dikkate alınarak dilimlenmiştir. Bu kapsamda 18 mm çapında ve sabit katman kalınlığında bir deney rneği (U100) retilmiştir. Ayrıca 18 ve 12 mm çapında iki ayrı yarımküre model (A18:100-44 ve A12:100-44) adaptif olarak dilimlenmiş ve üretilmiştir. Deney rneklerinin üretilmesinde baskı hızı 40 mm/sn, toz serme hızı 3 mm/sn, silindir devri 200 rpm ve doğgunluk oranı %36 olarak ayarlanmıştır. Bağlayıcı olarak siyah mürekkep kullanılmıştır. Elde edilen deney rnekleri 1500°C’de 2 saat süre ile laboratuvar tipi fırında sıcaklık artış ve azalış hızı 10°C /dk olacak şekilde sinterlenmiştir.



şekil 3.13. Yarımküre model

3.2.3.2. Kompresör Çarkı ve Kalite Testi (Benchmark) Modelleri

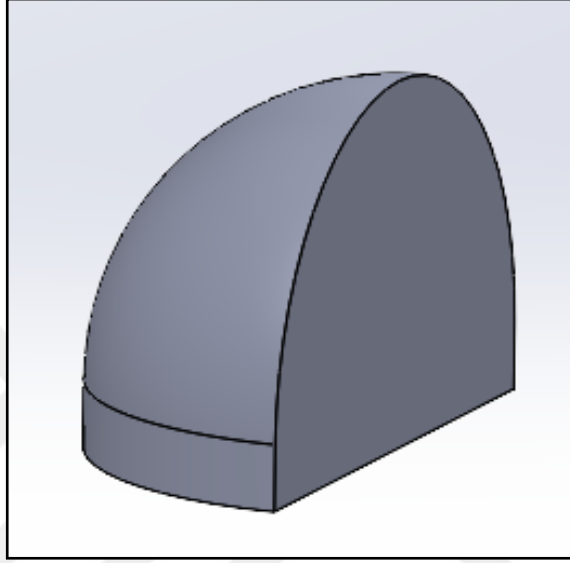
Kompresör çarkı modelleri 3B yazıcıların performanslarını ölçmek için birçok çalışmada kullanılmıştır (Hernández ve Fragoso, 2022; Jayawardane vd, 2022; Kapil vd, 2018; Mao vd, 2021; Peng vd, 2022; Raghavan vd, 2022). Bundan dolayı üretilen yazıcı, adaptif dilimleme ve geliştirilen DBMA'nın performansını ölçmek için kompresör çarkı modeli (Şekil 3.14) test amaçlı olarak üretilmiş ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca tezde, 3B yazıcıları test etmek için literatürde sıklıkla kullanılan, kabul görmüş bir model olan kalite testi numunesi (MatterHackers, 2023) de üretilmiştir (Şekil 3.14). Bu modeller 400-150 μm katman kalınlığı aralığında adaptif olarak dilimlenmiştir. Kompresör çarkı ve kalite test numunesi üretilirken bu modellerin daha fazla detay içermesi ve daha büyük olmalarından dolayı doygunluk %53 olarak ayarlanmıştır. Çünkü bu numuneler yarımküre ve çeyrek küre modellerde olduğu gibi düşük doygunluk oranlarıyla üretilenmemiştir. Katman kalınlığı arttıkça DBMA ile daha fazla yapışkan püskürtüleceği için baskı frekansı artmaktadır. Yüksek doygunluk nedeniyle baskı kafasının frekansını aşmamak için baskı hızı 10 mm/sn'ye indirilmiştir. Toz serme hızı 3 mm/sn, silindir devri 200 rpm olarak ayarlanmıştır. Bağlayıcı olarak siyah mürekkep kullanılmıştır.



Şekil 3.14. a) Kompresör çarkı, b) Kalite testi numunesi (MatterHackers izniyle)

3.2.3.3. Çeyrek Küre Model

Yarım küre numuneler üzerinden görüntü alınırken bazı problemlerle karşılaşmıştır. Özellikle yan yüzeylerden dik açıyla SEM görüntülerinin alınması mümkün olamamıştır. Bunun için dört parçaya bölünmüş 18 mm çapında çeyrek küre şekilli model tasarlanmıştır ve daha önce bahsedilen yarımküre modeller ile aynı baskı koşullarında üretilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Çeyrek küre model

Çeyrek küre modeller sayesinde numunelerden istenildiği gibi dik açıyla görüntüler alınabilmektedir. Çeyrek küre model adaptif dilimlenirken yine tozun morfolojisi dikkate alınarak kalın katmanlı adaptif (A400-150 μm) ve ince katmanlı adaptif (A60-28 μm) olmak üzere iki farklı strateji uygulanmıştır. Ayrıca ince katman aralıklarındaki daha hassas numunelerin üretilmesinde adaptif dilimleme ve DBMA'nın nasıl sonuç verdiğini tespit etmek için 28 μm (U28) ve 60 μm (U60) sabit katmanlı 2 adet numune üretilerek yüzey pürüzlülük değerleri istatistiki açıdan değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerinin SEM görüntüleri de alınarak yüzey özellikleri incelenmiştir.

3.2.4. Taguchi Yöntemi ile Parametre Optimizasyonu

İlk aşamada test numuneleri olarak üretilen yarımküre ve çeyrek küre modeller için belirlenen baskı parametreleri daha çok ön denemelerde kazanılan tecrübelerle göre belirlenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak bazı parametrelerin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu yapılarak adaptif dilimleme ve DBMA'nın daha verimli kullanılması

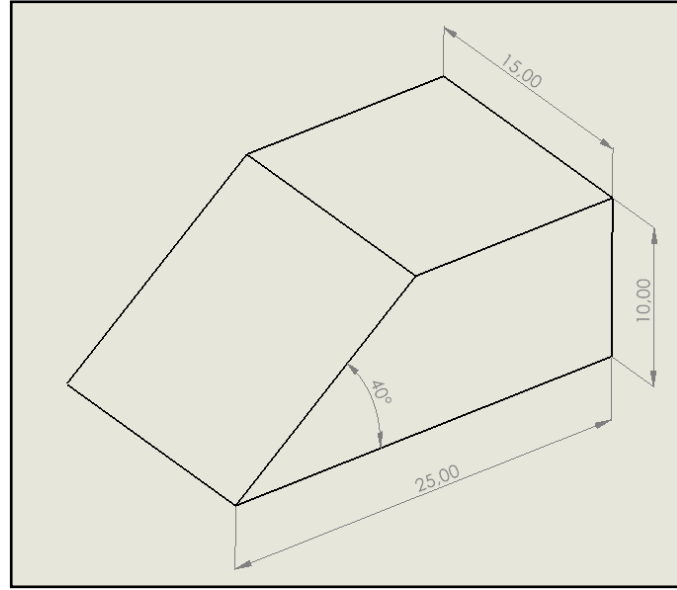
amaçlanmıştır. İstatistiksel deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi Yöntemi, en az deney yaparak maliyetleri en düşük seviyede tutma prensibine dayanan ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Taguchi, 1987). Taguchi yöntemi Japon mühendis G. Taguchi tarafından geliştirilmiş bir deney tasarımı yöntemidir (Taguchi ve Konishi, 1992). Taguchi yöntemiyle kısa zamanda ve düşük maliyetlerle etkili sonuçlar alınabilmektedir (Taphasanoğlu, 2020). Bundan dolayı sıklıkla kullanılan bir yöntem olup literatürde gerek bağlayıcı püskürtme gerek diğer eklemeli imalat yöntemleri gerek ise diğer mühendislik alanları olmak üzere Taguchi yöntemi kullanılan birçok çalışma mevcuttur (Ada, 2017; Alpay, 2020; Cai vd, 2023; Dağdevir, 2020; Elfarah, 2018; Javidi vd, 2023; Lores vd, 2022; Modi ve Sahu, 2021; Ni vd, 2023; Pulipaka vd, 2023; Sahu ve Modi, 2022; Taphasanoğlu, 2020; Ülker, 2015).

Taguchi yönteminde performans karakteristiği olarak 3 farklı durum söz konusudur. Bunlar en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal en iyi durumlarıdır (Taphasanoğlu, 2020). Bu durumlar için en uygun koşullar incelenirken sinyal gürültü oranına (S/G) bakılır. Tez çalışmasında performanslar ölçülürken en küçük en iyi ve en büyük en iyi durumları dikkate alınmıştır. En küçük en iyi durumu için hesaplanması gereken S/G oranı Denklem 3.15’de, en büyük en iyi durumu için ise Denklem 3.16’de gösterilmiştir.

$$S/G = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (3.15)$$

$$S/G = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) / n \right) \quad (3.16)$$

Hızlı ve ekonomik bir şekilde sonuç alınmasından dolayı bu çalışmada parametre optimizasyonu için Taguchi yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Adaptif dilimleme ve DBMA’da belirlenmesi gereken katman kalınlığı ve doyumluk optimize edilecek parametreler (faktörler) olarak seçilmiştir. Seçilen 2 faktör (katmak kalınlığı ve doyumluk yüzdesi) ve 3 seviye dikkate alınarak belirlenen deney koşullarında adaptif dilimleme ve DBMA kullanılarak deney modelleri (Şekil 3.16) üretilmiştir.



Şekil 3.16. Taguchi deney tasarım numunesinin 3 boyutlu görünümü

Deney tasarımındaki katman kalınlığı ve doygunluk seviyeleri literatürden (Tablo 2.2) ve yapılan ön denemelerden elde edilen bilgilere göre belirlenmiştir. Literatüre göre katman kalınlığı 15 ile 300 μm arasında değişmektedir (Mostafaei vd, 2021). Ayrıca katman kalınlığının en büyük parça boyutunun en az 3 katı (Butscher vd, 2013; Utela vd, 2010) ya da en az 2 katı (Lu ve Reynolds, 2008) ya da en azından en büyük parça boyutundan daha büyük (Mostafaei vd, 2021; Nandwana vd, 2017; Zhou vd, 2013) olması gerekmektedir. Tezde kullanılan tozun (Tethon3D – Tethonite High Alumina Ceramic powder) en büyük parça boyutu yaklaşık 150 μm 'dir (Miao vd, 2022). Bu bilgiler ışığında katman kalınlıkları 150 ile 300 μm arasında belirlenmiştir.

Literatürden elde edilen bilgilerde en uygun doygunluk oranının %70 olduğu, %40 doygunluğun altına inilmesi ve %90 doygunluğun üstüne çıkılması durumunda bazı sorunların çıktığı belirtilmektedir. (Chen vd, 2022a). Doygunluk değerinde toz yatak yoğunluğu (TYY) önemli bir faktördür (Denklem 3.14). Doygunluk önceden de belirtildiği gibi bağlayıcı hacminin toz içerisindeki boşluğun (havanın) hacmine oranıdır (Denklem 3.13). TYT düşükse yüksek doygunluk sağlamak için daha fazla bağlayıcı gönderilmesi gerekmektedir. Denklem 3.13'e göre doygunluğun hesaplanabilmesi için bağlayıcı hacminin deneysel olarak bulunması gerekmektedir. Ancak doygunluk teorik olarak da hesaplanabilir (Denklem 3.17). Denklem 3.17'deki V, yazıcı kafasından çıkan bir damlanın hacmini, X ve Y damlalar arasındaki mesafe, Z ise katman kalınlığını ifade etmektedir.

$$S = \frac{1000 \times V}{\left(1 - \left(\frac{PO}{100}\right)\right) \times X \times Y \times Z} \quad (3.17)$$

Tezde doygunluk hesaplamaları teorik olarak gerçekleştirilmiştir. TYY deneysel olarak tespit edilmiş olup yaklaşık %25 çıkmıştır. Bu rakam literatür değerlerine göre biraz düşük bir değerdir. Ancak bazı çalışmalarda daha düşük TYY değerleri de rapor edilmiştir (Chen vd, 2022b; Moghadasi vd, 2021). TYY, toz kalitesi ve toz serme koşulları ile değişmektedir. Tezde kullanılan tozun morfolojisi küresel değildir. Ayrıca tezde kullanılan yazıcının da serme mekanizmalara pahalı ticari yazıcılar gibi çok iyi değildir. Dolayısıyla TYY biraz düşük çıkmaktadır. TYY düşük olduğundan dolayı istenilen doygunluğun sağlanması için daha fazla bağlayıcı gönderilmesi gerekmektedir. Ancak bu durumda bağlayıcı istenmeyen bölgelere yayılmakta ve ölçüler büyümektedir. Yapılan denemelerde %70 doygunluk oranının üstüne çıkılması durumunda ölçüde büyük sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı %70 doygunluk st sınır olarak belirlenmiştir. Doygunluk oranının %40'ın altında olması durumunda baskıda birleşmeme ve mukavemet sorunları olmaktadır. Dolayısıyla çalışmada doygunluk için %50, %60 ve %70 değerleri belirlenmiştir. Literatürde toz serme hızının (roller traverse speed) 4mm/sn'den yüksek olması durumunda bozuk bir yüzey çıktığı gözlemlenmiştir (Mostafaei vd, 2021). Yapılan n testlerde de aynı durumla karşılaşılmıştır. Dolayısıyla toz serme hızı 3mm/sn olarak belirlenmiştir. Silindir devri kullanılan redüktörlü motordan dolayı 200 rpm'dir. Kullanılan yazıcı kafası için önerilen baskı frekansı 1.5 kHz'dir. Bu yüzden baskı hızı 20 mm/sn ile sınırlandırılmıştır. Normal mrekkap kullanılarak üretilen sinterlenmemiş ham numuneler deformasyona çok meyillidir. O yüzden 3B yazıcıda üretilen deney örneklerinin yazıcıdan alınması ve temizlik aşamasında deformasyon oluşmaması için Tethon 3D marka su bazlı Tethonite bağlayıcı kullanılmıştır.

Taguchi yönteminde uygun ortogonal dizinin seçimi için serbestlik derecesinin hesaplanması gerekmektedir. Dikkate alınan her bir faktör için belirlenen seviyelerin 1 eksiği o faktörün serbestlik derecesini verir. Daha sonra her bir faktörün serbestlik derecesi toplanır. Burada toplam serbestlik derecesi 4 olarak hesaplanmıştır. Serbestlik derecesinin bir fazlası uygun ortogonal diziyi vermekte olup ortogonal dizi en az L5 olmalıdır. İlgili parametreler (2 faktör ve 3 seviye) için L9 ortogonal dizisine dayalı deney tasarımı (Tablo 3.2) Minitab programı aracılığı ile analiz edilmiştir.

Tablo 3.1. Taguchi deney tasarım matrisi

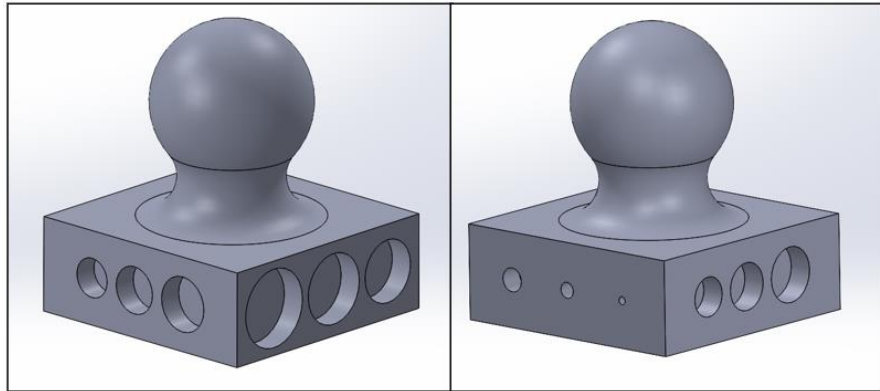
Deney No	Katman Kalınlığı (μm)	Doygunluk (%)
1	150	50
2	150	60
3	150	70
4	225	50
5	225	60
6	225	70
7	300	50
8	300	60
9	300	70

Taguchi deney deseni ve parametreler belirlendikten sonra numuneler 3B yazıcı ile üretilmiştir. Her bir koşul için 3'er tekrar olmak üzere toplam 27 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin boyutsal doğruluğu, yoğunluk değeri ve yüzey pürüzlülük değerleri deneysel olarak tespit edilerek irdelenmiştir.

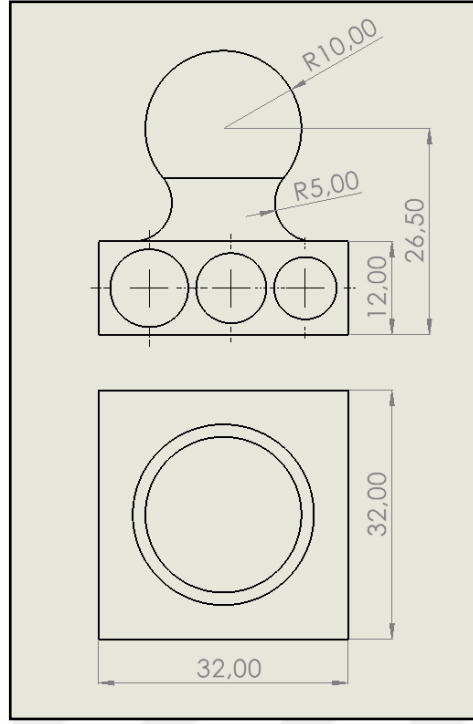
3.2.5. Parametre Optimizasyonu Sonrası Adaptif Dilimlemenin Uygulanacağı Model

Taguchi deney tasarımına göre belirlenen deney koşullarında, adaptif dilimleme ve DBMA'nın uygulanması için farklı detaylara sahip yeni bir numune tasarlanmıştır (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18). Baskı kalitesinin daha hassas değerlendirilmesi için numunenin yan yüzeylerinde sırasıyla 10, 9, 8, 7, 6, 5, 3, 2 ve 1 mm çaplarında ve 3 mm derinliklerinde delikler konulmuştur. Numune üzerinde kullanılan bu detaylar ile adaptif dilimleme ve DBMA'nın etkisinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Üretilen numuneler literatür de dikkate alınarak daha önceki sinterleme sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta (1290°C 'de 12 saat süre ile sıcaklık artış hızı 10°C/dk , sıcaklık azalış hızı ise 5°C/dk) sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde daha düşük sıcaklıklarda numunelerde yoğunluğun ne olacağı incelenmek istenmiştir.



Şekil 3.17. Adaptif numune CAD modeli



Şekil 3.18. Adaptif numunenin bazı ölçüleri

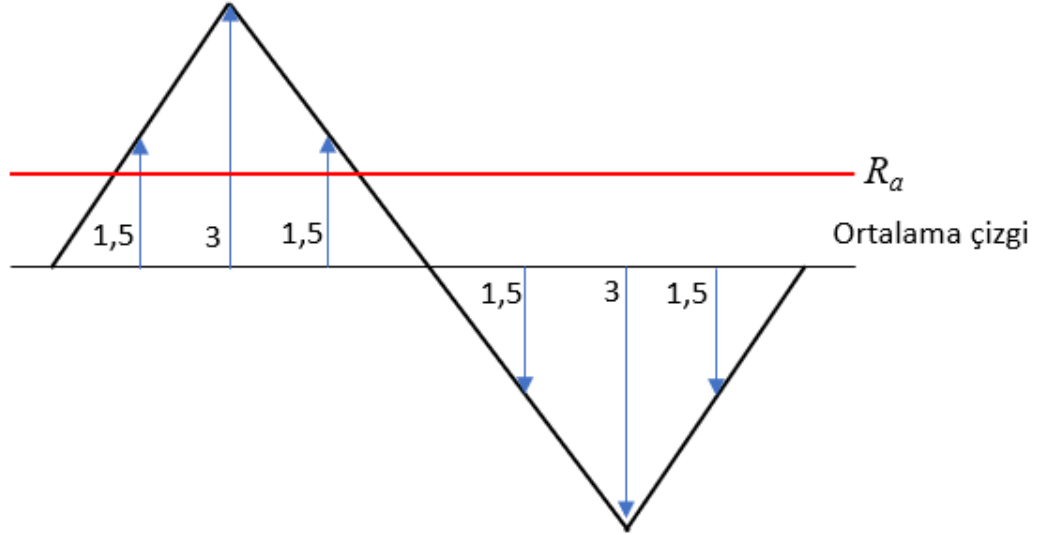
3.2.6. Görüntü İşleme

Düz yüzeylerin ölçümü için portatif pürüzlülük ölçüm cihazları kolay bulunabilen cihazlardır. Ancak eğimli yüzeylerin ölçümü için kullanılan cihazlar pahalı cihazlar olup her zaman ulaşmak zordur. Bundan dolayı numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini kolay ve ucuz bir şekilde elde etmek için görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır.

Literatürde yüzey pürüzlülüğü ve görüntü işleme ile alakalı birçok çalışma mevcuttur (Abhilash ve Ahmed, 2023; Babu, 2023; Chebrolu vd, 2023; Fu vd, 2023; Mahashar Ali vd, 2023; Momeni vd, 2023; Pan vd, 2022; Ross vd, 2023; Yang vd, 2023). Yüzey pürüzlülük ölçümünde genellikle R_a değerine bakılır. R_a değeri, bir yüzey üzerindeki tepelerin ve çukurların ölçülerinin mutlak değerlerinin ortalaması hesaplanarak elde edilir (Şekil 3.19). Örnek olarak Şekil 3.17'deki yüzeyin R_a değeri,

$$\frac{1,5 + 3 + 1,5 + 1,5 + 3 + 1,5}{6} = 1 \mu\text{m}$$

olarak hesaplanır.

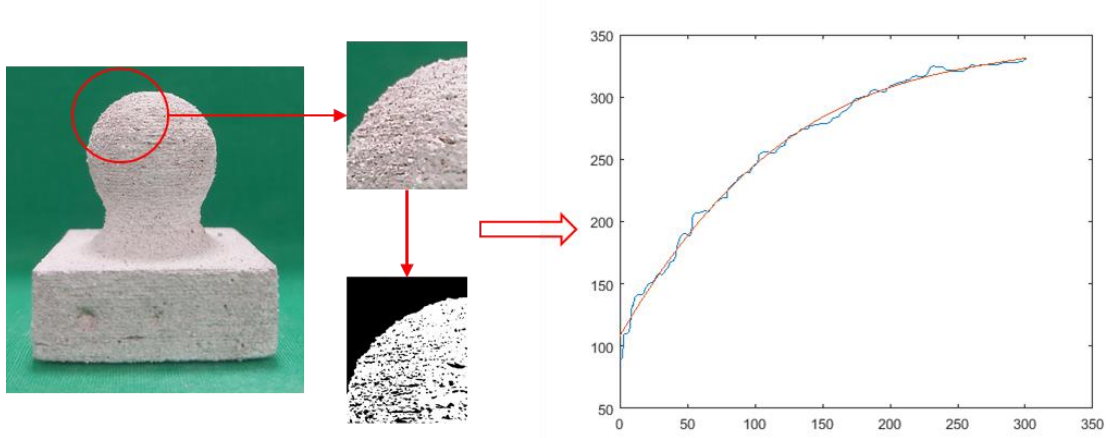


Şekil 3.19. Yüzey örneği, tepeler ve çukurlar (ölçüler µm)

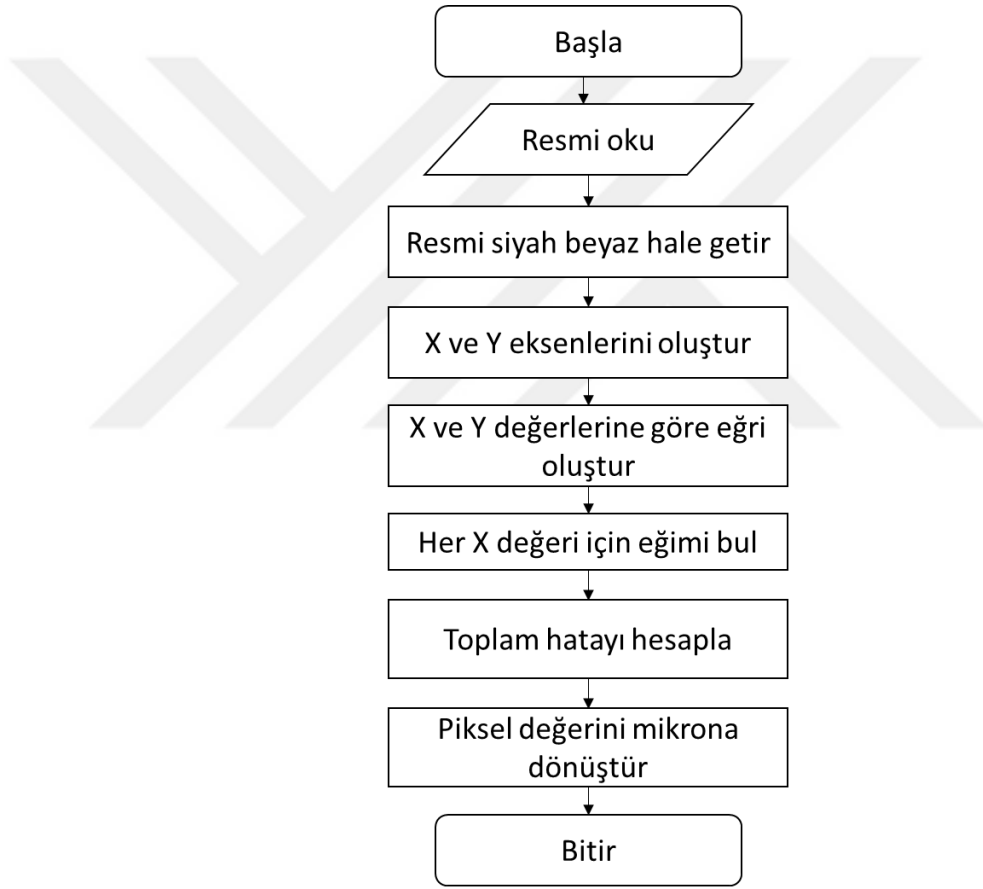
Pürüzlülük ölçüm cihazları Şekil 3.19 için örnek olarak gösterilen pürüzlülük hesabına çeşitli yöntemler ile yakınsamaya çalışmaktadır. Ölçüm yapılırken bütün yüzey kullanılamayacağı için numunenin belirli kısımlarından ölçüm alınmaktadır. Eğimli yüzeyler için yapılan hesap düz yüzeyler için yapılan hesaptan çok farklı değildir. Ortalama çizgi bu sefer düz değil de eğimli olmaktadır. Düz yüzeydeki gibi gerçek çizgi ile ortalama çizgi arasındaki mutlak fark dikkate alınarak hesaplama yapılmaktadır.

Görüntü işleme ile pürüzlülük ölçümü yapılırken numunelerin öncelikle yüksek çözünürlükte resimleri çekilmektedir. Sonra ölçüm yapılmak istenen kısım kırılır. Kırılan resim görüntü işlemede kullanılan Matlab programı ile siyah beyaz hale getirilmektedir (Şekil 3.20). Daha sonra program, elde edilen siyah beyaz resimden yüzeyin gerçek çizgisini ve bu yüzeyin ideal çizgisini grafik olarak oluşturduktan sonra, bu grafik üzerinden R_a değerini hesaplamaktadır. Grafikte koordinatlar X ve Y koordinatları olup piksel cinsindendir (Şekil 3.20). Program piksel hesabını µm'ye dönüştürmektedir (Şekil 3.21).

Görüntü işleme yöntemi kullanılarak Taguchi deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri hesaplanmış ve pürüzlülük cihazı (PCE-RT model portatif pürüzlülük ölçüm cihazı) ile elde edilen deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonuçları bulgular kısmında detaylı olarak verilmiştir. Taguchi parametre optimizasyonu sonrası üretilen karmaşık şekilli numunelerin yüzey pürüzlülükleri de görüntü işleme ile ölçülmüştür.



Şekil 3.20. Görüntü işleme ile yüzey pürüzlülük ölçümü



Şekil 3.21. Görüntü işleme ile yüzey pürüzlülük ölçümü akış diyagramı

4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında belirlenen üretim koşullarında (doygunluk oranı, baskı hızı, toz serme hızı, silindir devri ve bağlayıcı türü), 12 ve 18 mm çapındaki yarımküre ve çeyrek küre modeller, kompresör çarkı ve kalite test numuneleri yazıcı performansının ve adaptif dilimleme-DBMA etkisinin tespiti için üretilmiştir. Ayrıca Taguchi deney tasarımı modellerinin nasıl dilimlendiği ve üretildiği bu bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir. İlk defa uygulanan adaptif dilimleme ve geliştirilen DBMA'nın etkileri tasarlanan modeller üzerinde incelenmiştir.

4.1. Yarımküre Modellerine ait Bulgular

18 mm çapındaki yarımküre model, 100 μ m sabit katman kalınlığı ile dilimlenmiştir. Dilimleme sonrasında 100 μ m katman kalınlığındaki numune (U100) üretilmiştir (Şekil 4.1). Numunedeki katman sayısı 110 olup şekil incelendiğinde küre üzerindeki eğim sürekli olarak değiştiği için katmanlar ve merdiven etkisi çıplak gözle dahi net olarak anlaşılabilmektedir.



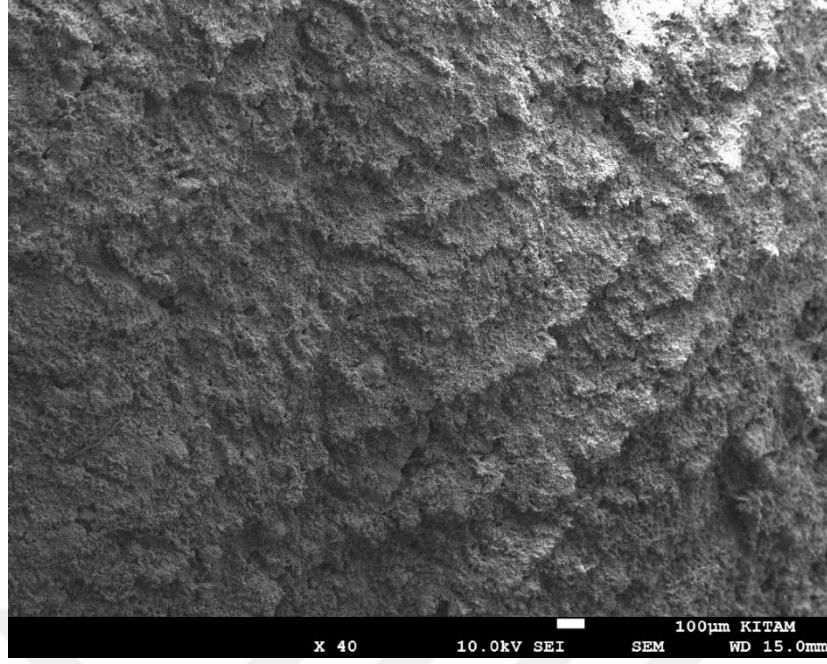
Şekil 4.1. U100 sinterlenmemiş hali

Sonrasında bu numune yüksek sıcaklık fırınında 1500°C’de 2 saat süre ile sinterlenmiştir (Şekil 4.2). Sinterleme aşamasında sıcaklık artış ve azalış hızı 10°C /dk olacak şekilde belirlenmiştir.

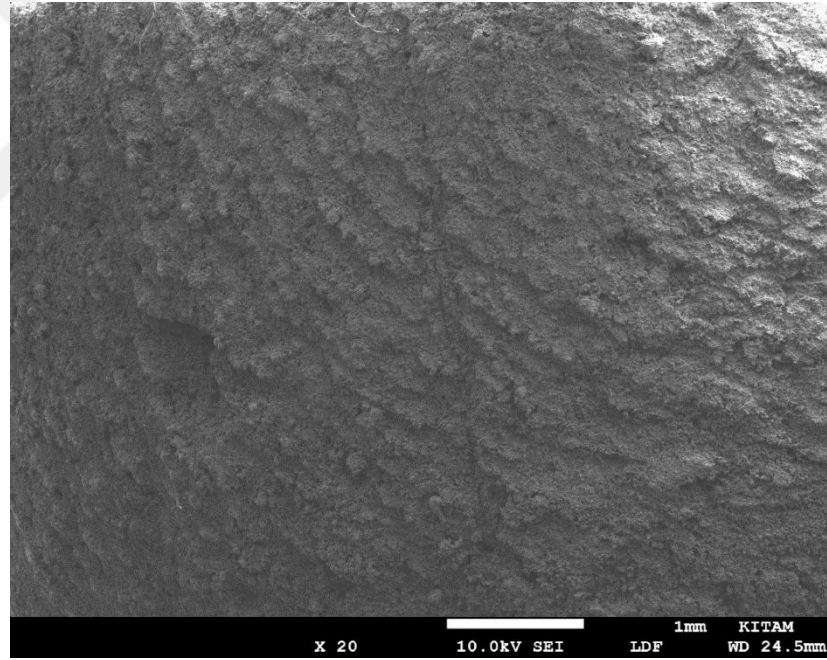


Şekil 4.2. U100 sinterlenmiş hali (SEM öncesi kaplama yapılmıştır)

Numunede yapılan sinterleme işlemi sonrasında da yüzeyde katmanların değişimi ve merdiven etkisi izlenebilmektedir (Şekil 4.2). Oluşan bu etkiyi daha iyi görebilmek için numuneden SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). SEM görüntülerinden katman kalınlığının biraz fazla olmasından kaynaklanan yüzey bozuklukları net bir şekilde görülebilir. SEM görüntüleri dikkatli incelendiğinde katmanlar arasındaki geçişlerin net olarak belli olduğu anlaşılmaktadır.



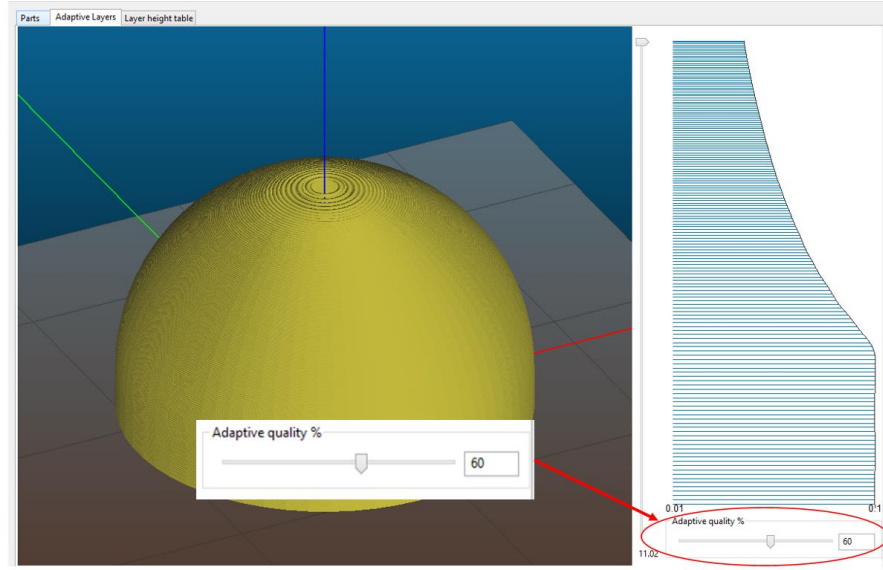
Şekil 4.3. U100'ün SEM görüntüsü



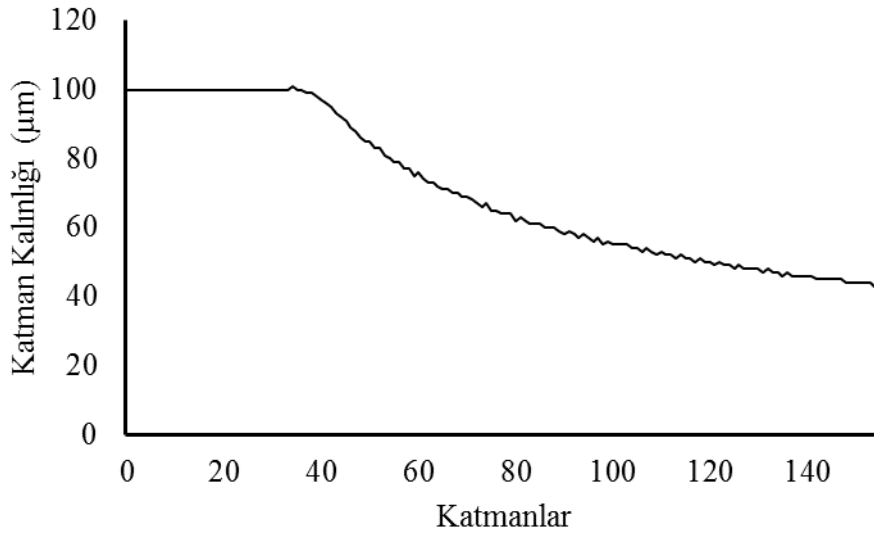
Şekil 4.4. U100'ün SEM görüntüsü (uzak çekim)

Tez çalışması kapsamında adaptif dilimlemenin ve DBMA'nın etkisini görebilmek için aynı çapta (18 mm) yarımküre model Slic3r programında adaptif olarak dilimlenmiştir. Adaptif dilimlemede üst sınır olarak U100'ün katman kalınlığı olan 100 µm ölçüsü seçilmiştir. Sezgisel kalite ayarı %60 olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.5). Adaptif numunenin (A18:100-44) dilimleme sonucunda katman sayısı 156 olup kalınlıkları 100 µm ile 44 µm arasında çıkmıştır (Şekil 4.6). İlk 36 katman 100 µm

kalınlıdır. Sonraki katmanların kalınlığı ise eğime bağı olarak azalmaktadır.



Şekil 4.5. A18:100-44'ün sezgisel kalite parametresi (100 – 44 μm)



Şekil 4.6. A18:100-44'ün katman kalınlık grafiği (100 – 44 μm)

A18:100-44 (Şekil 4.7) incelendiğinde U100'e göre katmanlar arasındaki değişim anlaşılamamaktadır. Çünkü A18:100-44'ün 156 katmanından 120 tanesinin katman kalınlıklarının yüzey özelliklerine göre değişim gösterdiği, özellikle de üst bölgelerdeki katmanların neredeyse birbirinden ayırt edilemediği ve merdiven etkisinin oluşmadığı anlaşılmaktadır. Adaptif dilimlemenin ve DBMA'nın birçok uygulamada oldukça önemli bir parametre olan yüzey kalitesini ciddi oranda iyileştirdiği söylenebilir.



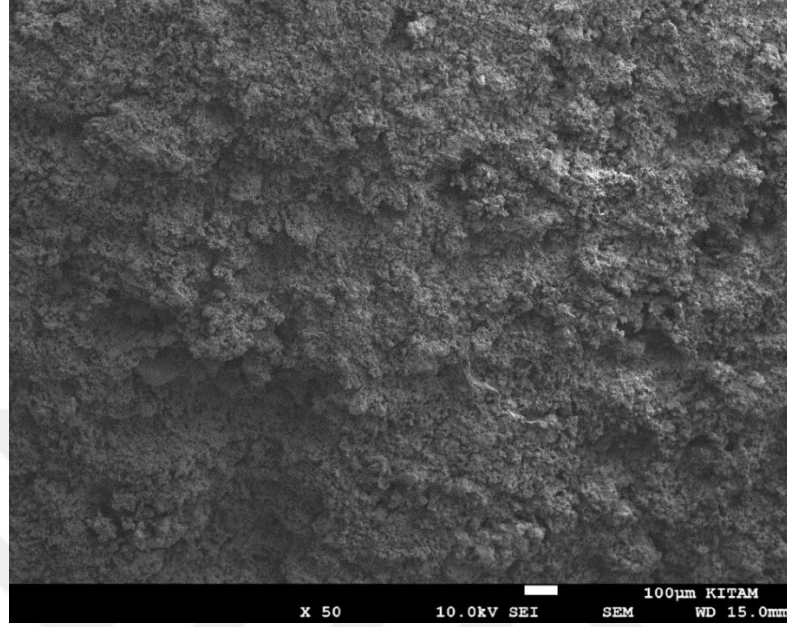
Şekil 4.7. A18:100-44'ün sinterlenmemiş hali

Baskı sonrası bu numune yüksek sıcaklık fırınında 1500°C'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir (Şekil 4.8). Sıcaklık artış ve azalış hızı 10°C /dk'dır.



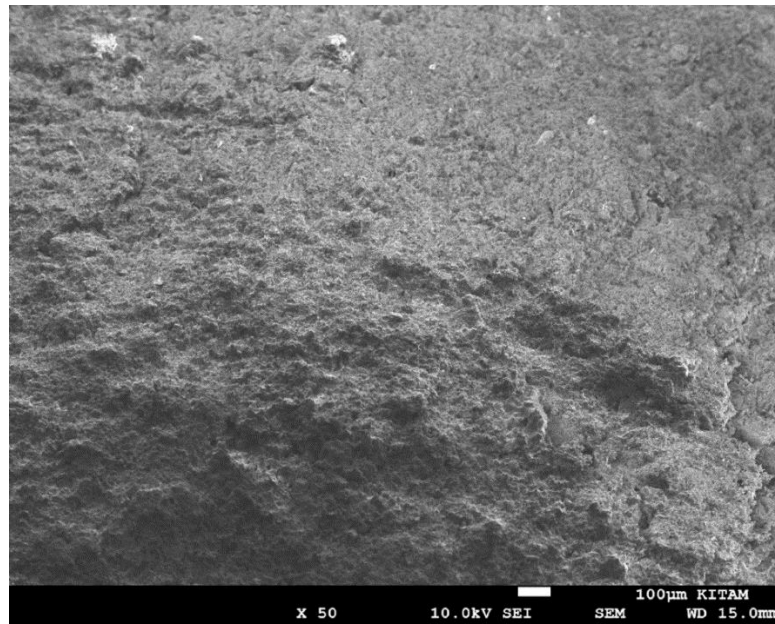
Şekil 4.8. A18:100-44'ün sinterlenmiş hali (SEM öncesi kaplama yapılmıştır)

Sinterleme sonrasında A18:100-44'ün alt ve üst bölgelerinin SEM görüntüleri çekilmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Bu bölgede katman kalınlığı 100 μm 'dir. Katman kalınlığı fazla olması nedeniyle U100'e benzer yüzey elde edilmiştir.



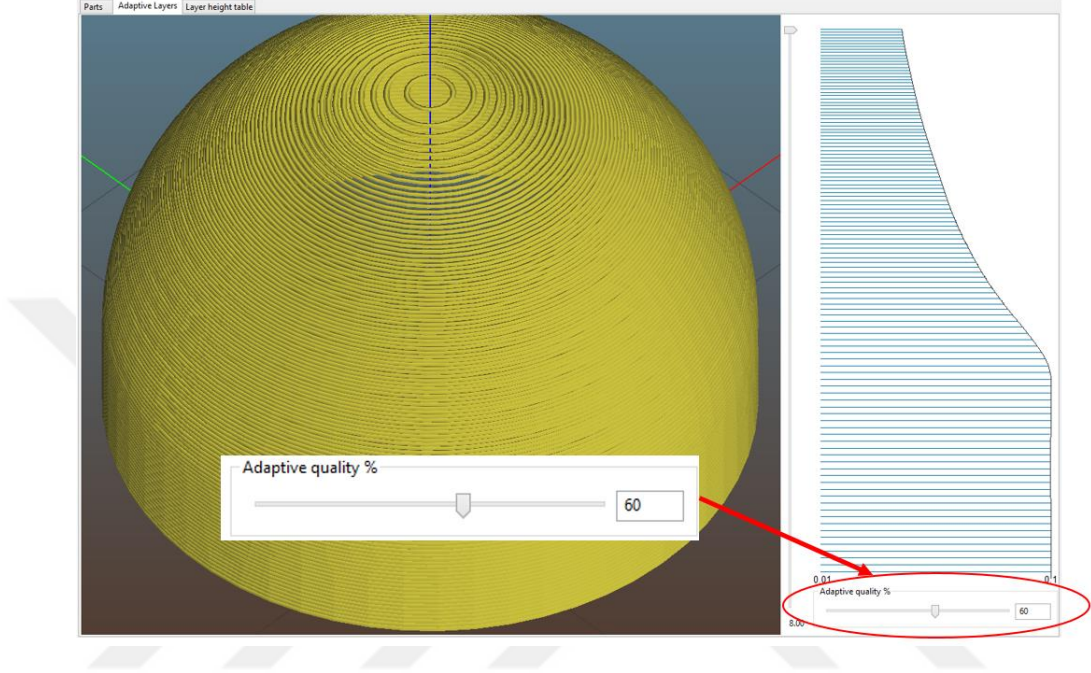
Şekil 4.9. A18:100-44'ün alt bölgesinin SEM görüntüsü

A18:100-44'ün üst bölgesinin SEM görüntüsü incelendiğinde, katman kalınlık grafiğinden de (Şekil 4.6) anlaşılabacağı gibi, bu bölgelerde katman kalınlıkları değişken ve 100 μm 'den çok daha azdır. Bu durumdan dolayı numuneden elde edilen SEM görüntüsünde yüzeyin U100'e göre daha düzgün olduğu görülmektedir.



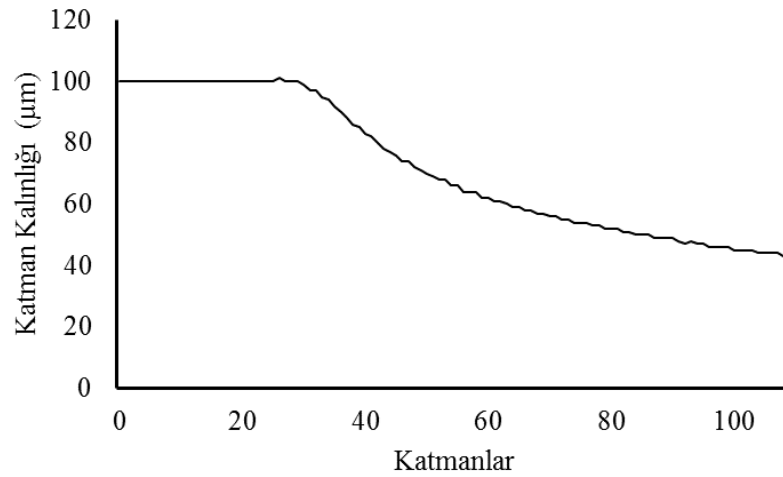
Şekil 4.10. Adaptif numunenin üst bölgesinin SEM görüntüsü

Üretilen 18 mm'lik yarımküre modellerde başarılı bir şekilde sonuç veren yöntemin daha küçük hacimli örneklerde de benzer performansı gösterip göstermediğini test etmek için küçük çaplı (12 mm) bir örnek üretilmiştir. 12 mm'lik yarımküre model A18:100-44'ün koşullarında Slic3r programında adaptif olarak dilimlenmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. A12:100-44'ün Slic3r programında dilimlenmiş hali

Katman kalınlığı grafiği incelendiğinde (Şekil 4.12) A12:100-44'ün katman kalınlıkları 100 μm ve 44 μm arasında değişmekte olup toplam 111 adet katmanı bulunmaktadır. İlk 31 katman 100 μm olup sonrasında kademeli olarak azalmaktadır. Dilimleme sonrası A12:100-44, 3B yazıcıda üretilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.12. A12:100-44'ün katman kalınlıklarını (100 – 44 μm)

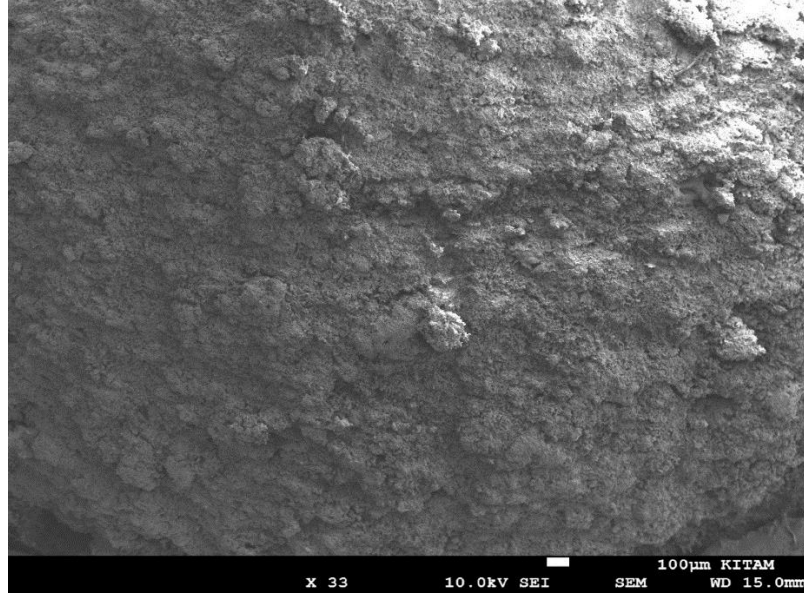


Şekil 4.13. A12:100-44'ün sinterlenmemiş hali

A12:100-44, 3B yazıcıda üretildikten sonra yüksek sıcaklık fırınında 1500°C'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir (Şekil 4.14). Sıcaklık artış ve azalış hızı 10°C/dk'dır. Sinterleme sonrasında A12:100-44'ün SEM görüntüleri de alınmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.14. A12-100-44'ün sinterlenmiş hali

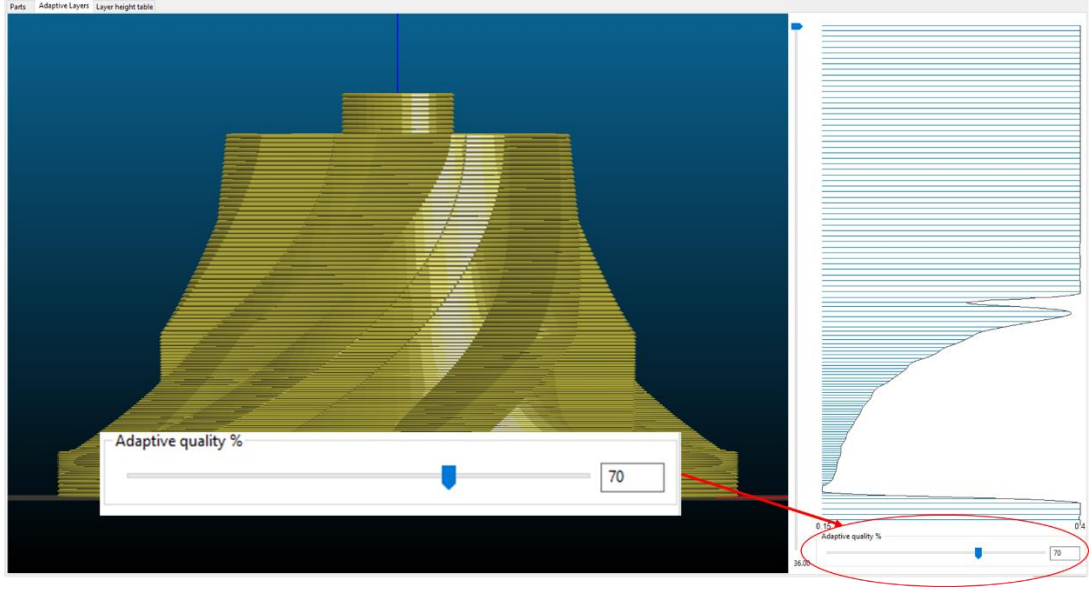


Şekil 4.15. A12-100-44'ün SEM görüntüsü

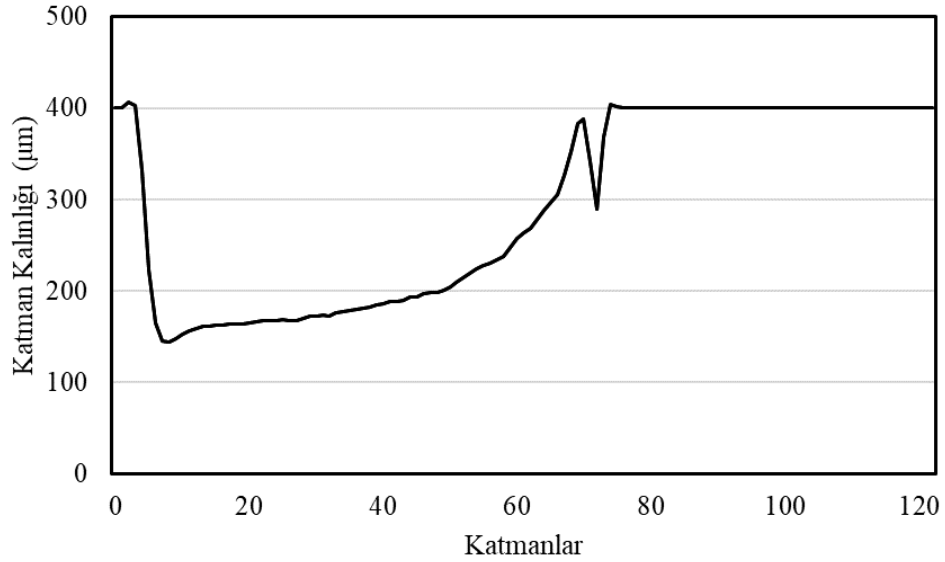
Yapılan denemeler sonucunda 18mm çapındaki küre numunelerde yüzey kalitesi açısından görülen olumlu değişiminin daha küçük çaplı (12mm) parçalar için de görülebileceği anlaşılmıştır.

4.2. Kompresör Çarkı ve Kalite Testi Modellerine ait Bulgular

Eklemeli imalat yöntemlerinde tasarlanan-kullanılan yazıcı ve yöntemlerin performanslarının tespitinde literatürde kabul görmüş bazı örnekler kullanılmaktadır. Bu örnekler arasında en çok kullanılanlardan ikisi kompresör çarkı ve kalite testi modelleridir (Hernández ve Fragoso, 2022; Jayawardane vd, 2022; Kapil vd, 2018; Mao vd, 2021; MatterHackers, 2023; Peng vd, 2022; Raghavan vd, 2022). Bu numuneler farklı detaylara sahip, üretilmesi oldukça zor numuneler olup yazıcı ve geliştirilen yöntemlerin performansını daha net görebilmek için kullanılmıştır. Kompresör çarkının STL modeli Slic3r programında adaptif olarak dilimlenmiştir. Bu numunelerde katman kalınlıkları yarımküre modellere göre daha geniş aralıklarda kullanılmıştır. Dilimleme yapılırken üst sınır 400 µm, alt sınır ise 150 µm olarak ayarlanmıştır. Sezgisel kalite parametresi Q %70 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.16). Dilimlenmiş modelin toplam katman sayısı 123'dür.



Şekil 4.16. Kompresör çarkının Slic3r programında dilimlenmiş hali



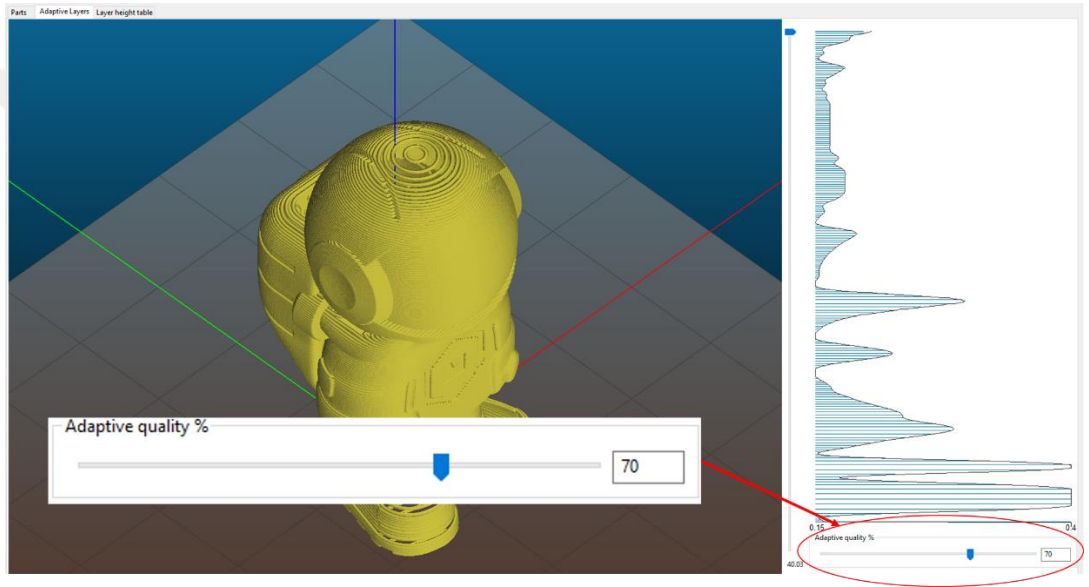
Şekil 4.17. Kompresör çarkı katman kalınlıkları

Katman kalınlık grafiği (Şekil 4.17) incelendiğinde kompresör çarkı numunesinin katman kalınlıklarının önceki küresel numunelere göre (A18:100-44, A12:100-44) daha değişken olduğu, katman kalınlıklarının yüzey özelliklerine göre farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni kompresör çarkının daha karmaşık yapıda bir parça olmasıdır.

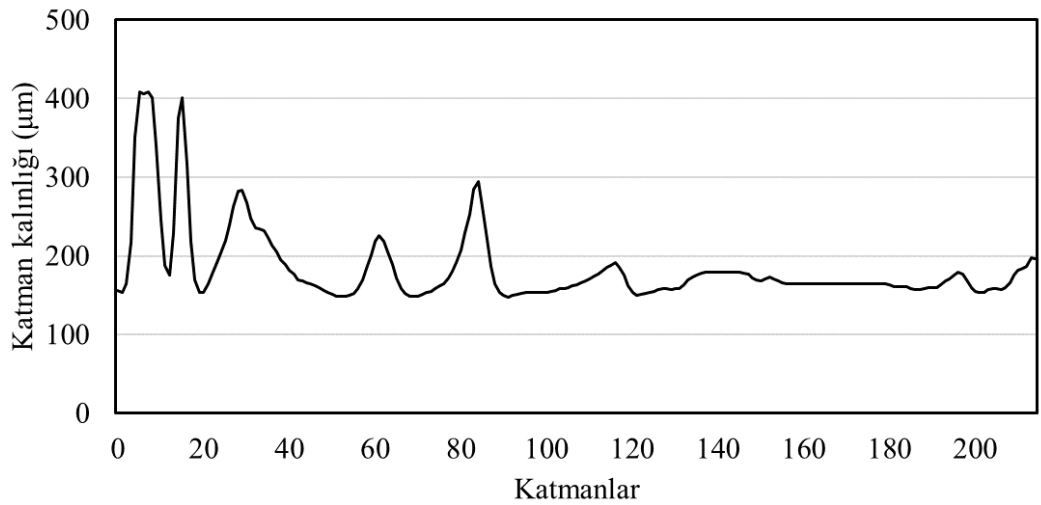
Kompresör çarkında adaptif dilimleme yerine 150 µm sabit katman kalınlığı ile dilimleme yapılır ise çok fazla katman olacak ve üretim süreleri artacaktır. 400 µm sabit katman kalınlığı ile dilimleme yapılırsa da yüzey kalitesi düşük olacak ve numunedeki detaylar net bir şekilde ortaya çıkmayacaktır. Ancak adaptif dilimleme

kullanılarak bu tarz çok karmaşık parçaların hızlı ve kaliteli bir şekilde üretilebileceği görülmektedir.

Kalite test numunesi de Slic3r programında adaptif olarak dilimlenmiştir. Dilimleme yapılırken kompresör çarkı modelinde olduğu gibi üst sınır 400 μm , alt sınır ise 150 μm olarak ayarlanmıştır. Kalite parametresi Q yine %70 olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.18). Şekil 4.19'da kalite test numunesinin katman kalınlığı grafiği gösterilmektedir. Kalite test numunesi daha karmaşık detaylara sahip olmasından dolayı toplam katman sayısı daha fazla (215 katman) olup katman kalınlıkları kompresör çarkına göre daha değişkendir.



Şekil 4.18. Kalite test numunesinin Slic3r programında dilimlenmiş hali



Şekil 4.19. Kalite test numunesinin katman kalınlıkları

Katman kalınlık grafiğinden (Şekil 4.19) görüleceğı gibi kalite test numunesinin kompresör çarkından da daha karmaşık bir model olduğı anlaşılmaktadır. Adaptif dilimleme detay bölgelerde ince katman kullanırken diğeri daha düz veya değışim açısının daha az olduğı bölgelerde ise daha kalın katman kullanarak çok iyi bir optimizasyon yapmaktadır. Yani adaptif dilimleme ile yüzey kalitesi ve üretim hızı optimizasyonu en iyi şekilde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.20. Kompresör çarkı (Baş vd, 2023)

Dilimleme sonrası kompresör çarkının 3B yazıcıda basılmıştır (Şekil 4.20). Kompresör çarkı numunesi incelendiğinde düşük eğim açılı bölgelerde katman kalınlıkları daha ince ($150\text{ }\mu\text{m}$) olup herhangi bir merdiven etkisi gözlenmemektedir. Ancak yüksek eğime sahip açılı bölgelerde ise katman kalınlıkları $400\text{ }\mu\text{m}$ ' dur. Bu bölgelerde de katman kalınlıkları çok büyük olmasına rağmen herhangi bir sorun görünmemektedir. Ayrıca katman kalınlık aralığı ($150\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$) bu numunede çok geniştir. Bu kadar geniş bir aralıkta verimli baskı yapabilmek DBMA sayesinde olmaktadır. DBMA olmadan baskı yapılırsa ya ölçüde çok büyük bozukluklar

meydana gelecek ya da parça baskı haznesinden alınma esnasında dağılacaktır.



Şekil 4.21. Kalite test numunesi

Kompresör çarkından sonra kalite test numunesi de üretilmiştir (Şekil 4.21). Kullanılan tozun akışkanlığının çok az olması, baskı kafasının düşük çözünürlüklü (96 DPI) olması ve çok kalın katman aralığı nedeniyle bazı ince detayların tam olarak çıkmadığı görülse de genel hatlarıyla yekpare ve iyi bir numune üretilmiştir. Kompresör çarkı numunesinde de belirtildiği gibi çok geniş bir katman aralığında başarılı numunelerin üretilmesi her katmana özgü yeterli miktarda bağlayıcı kullanılmasını sağlayan DBMA algoritması sayesinde.

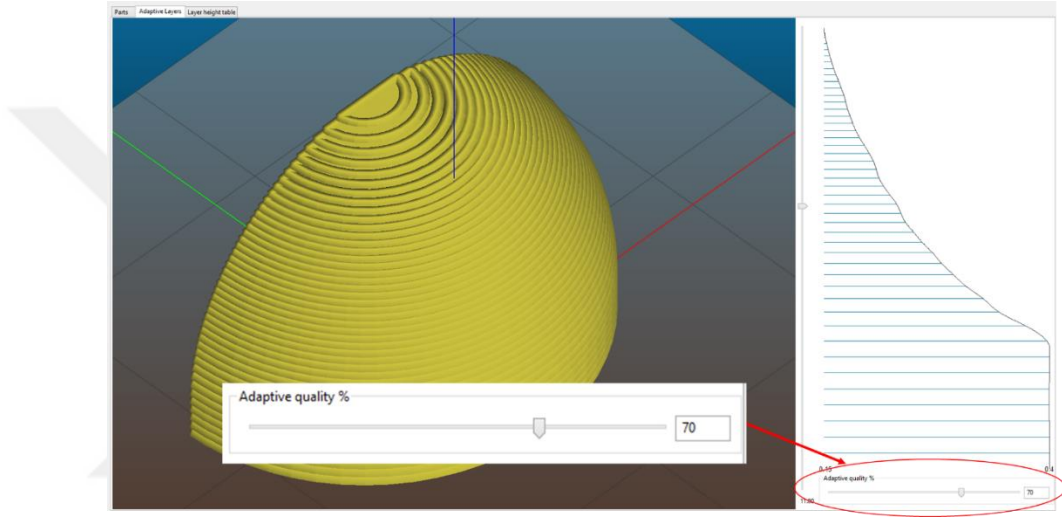
4.3. Çeyrek Küre Modele ait Bulgular

18mm ve 12mm çapındaki yarımküre deney örneklerine göre daha kolay SEM görüntüleri alabilmek için farklı dilimleme stratejileri ile çeyrek küre modeller üretilmiştir. Adaptif dilimleme ve geliştirilen DBMA'nın etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çeyrek küre modelin adaptif dilimlemesinde kalın katmanlı (150-400 μm) ve ince katmanlı (28-60 μm) olmak üzere iki farklı strateji uygulanmıştır. Adaptif dilimlemenin etkilerinin gözle daha net görülecek şekilde incelenmesi için kalın katmanlı numune üretilmiştir. İnce katmanlı numunelerde ise A18:100-44 ve A12:100-44'den farklı olarak daha düşük katman kalınlıklarında (60-28 μm) adaptif dilimleme ve DBMA'nın nasıl sonuç vereceğine bakılmıştır. Numuneler adaptif, 28 μm sabit ve 60 μm sabit olmak üzere üç farklı şekilde dilimlenmiş ve birbirleri ile

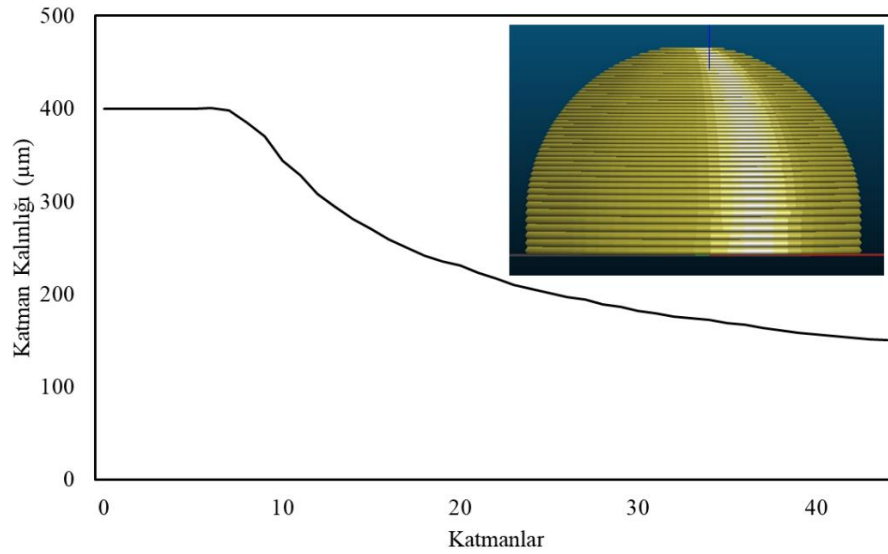
kıyaslanmışlardır. Kullanılan baskı parametreleri ve bağlayıcı yarımküre modellerdeki gibidir.

4.3.1. Kalın Katmanlı Adaptif Modele ait Bulgular

Kalın katmanlı adaptif numunede katman kalınlık aralığı 400-150 μm olarak belirlenmiştir. Sezgisel kalite parametresi %70 olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.22). Numunenin toplam 45 adet katmanı olup, ilk 7 katman 400 μm kalınlığındadır. Sonraki katmanlar ise kademeli olarak azalmaktadır (Şekil 4.23). Numunenin katman kalınlıkları karmaşık detaylı numunelere göre daha düzgün olduğu söylenebilir.

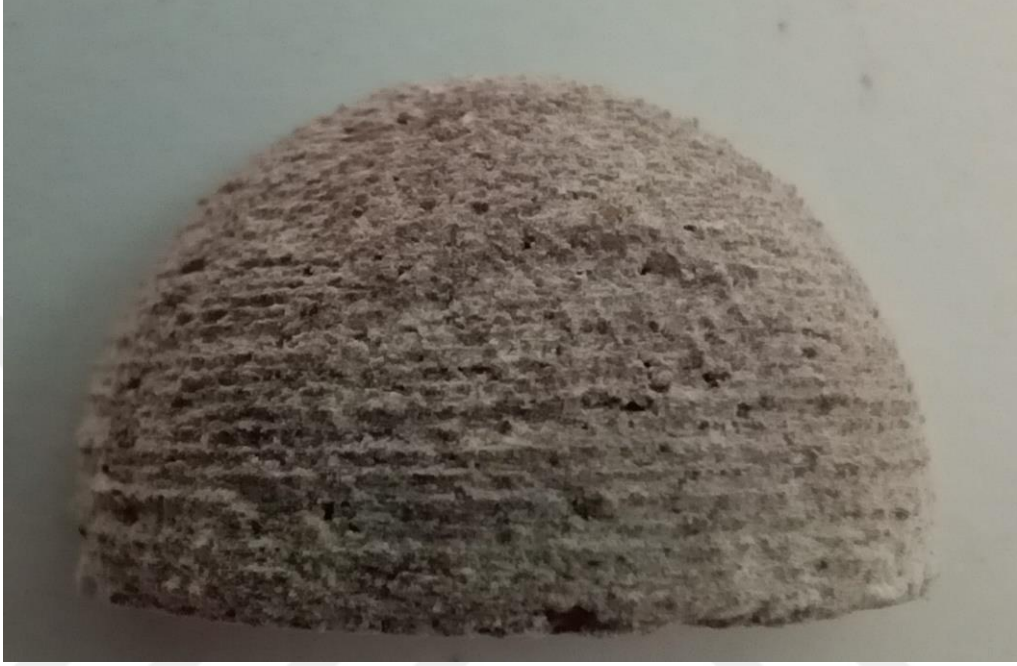


Şekil 4.22. A400-150'nin katman kalınlığı grafiği



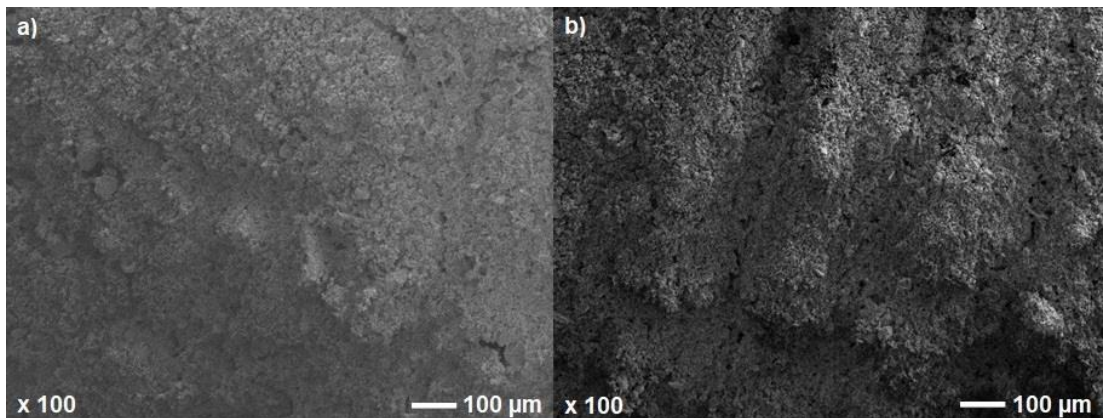
Şekil 4.23. A400-150'nin katman kalınlığı grafiği

Dilimleme sonrasında numune (A400-150) 3B yazıcıda üretilmiştir. A400-150 dikkatli incelendiğinde katmanlar arasındaki değişim anlaşılmaktadır (Şekil 4.24). Ayrıca katmanların üst bölgelere doğru incelendiği görülebilmektedir. A400-150’de katman kalınlığı üst bölgeye doğru düzenli olarak azaldığı için kalınlık değişimi kompresör çarkı ve kalite test numunesine göre daha net bir şekilde izlenebilmektedir.



Şekil 4.24. A400-150’nin sinterlenmemiş hali

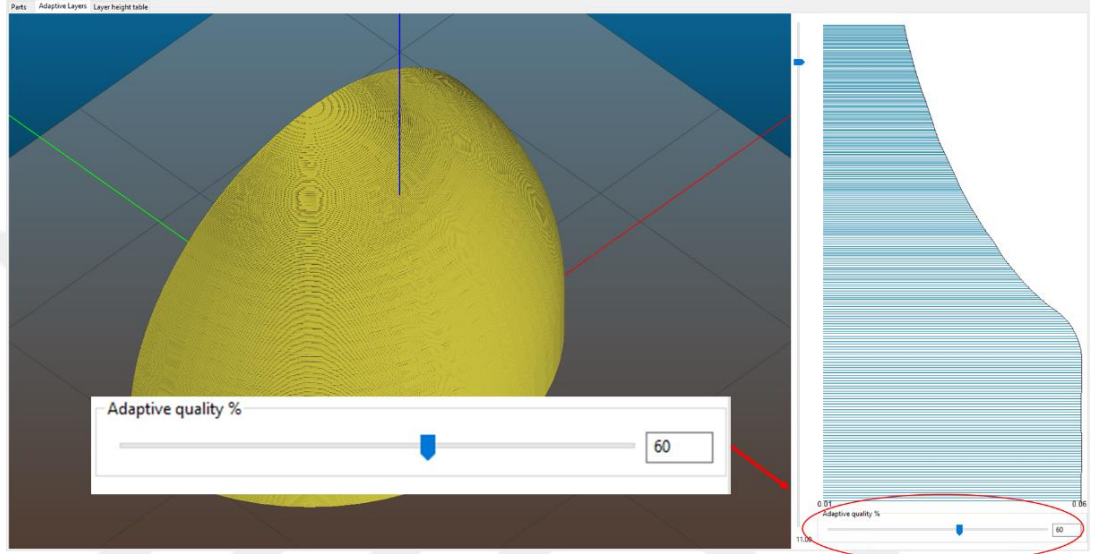
A400-150, 1250°C’de 2 saat boyunca sinterlenmiştir. Sıcaklık artış azalış hızı 10°C/dk’dır. Sinterleme sonrası SEM analizleri yapılmıştır (Şekil 4.25). Üst bölgenin alt bölgelere göre biraz daha düzgün olduğu görülmektedir.



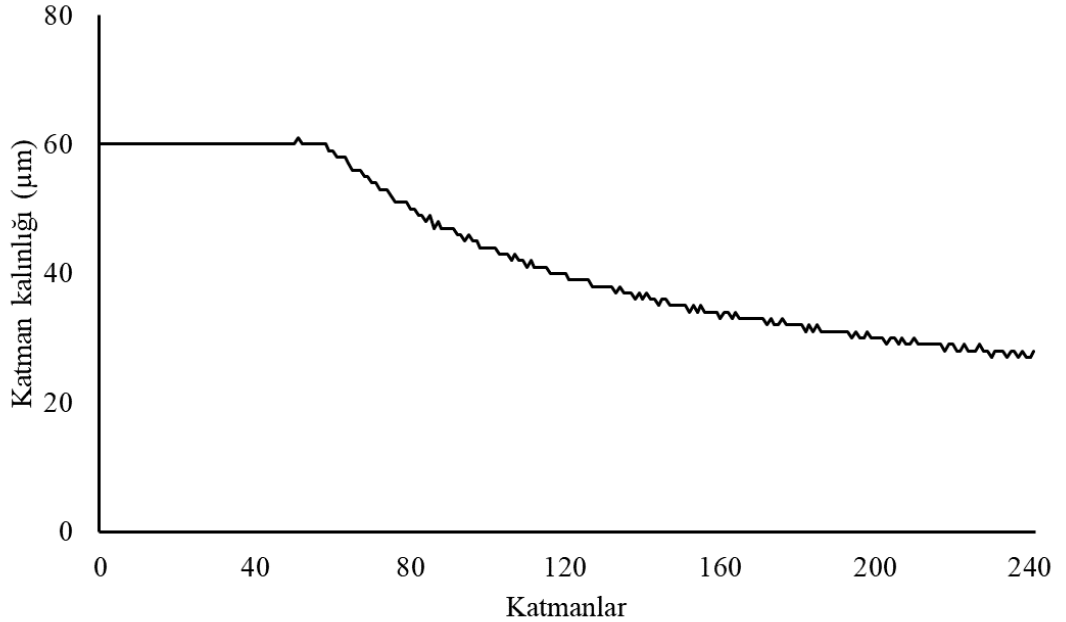
Şekil 4.25. a) A400-150’nün üst bölgesi, b) A400-150’nün alt bölgesi

4.3.2. İnce Katmanlı Adaptif Modele ait Bulgular

İnce katmanlı adaptif dilimlemede, katman kalınlığının üst sınırı 60 μm olarak belirlenmiştir. Kalite parametresi %60 olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.26). Çeyrek küre model adaptif olarak dilimlenmiş ve katmanlar 28 ile 60 μm arasında olmuştur. Adaptif numune 242 katmanlı olup ilk 58 katman 60 μm kalınlığındadır. Sonraki katmanlarda kalınlık giderek azalmaktadır (Şekil 4.27).



Şekil 4.26. A60-28'in katman kalınlıkları



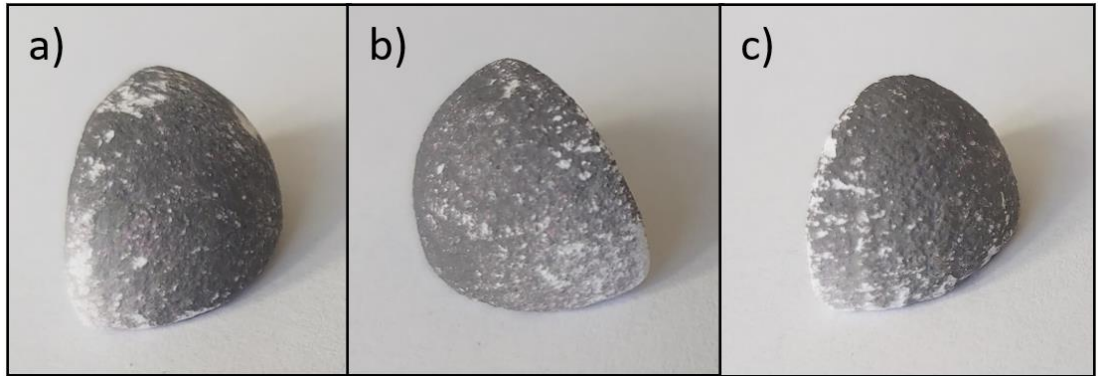
Şekil 4.27. A60-28'in katman kalınlıkları

Adaptif (A60-28), 28 μm sabit katmanlı (U28) ve 60 μm sabit katmanlı (U60) olmak üzere toplam 3 adet numune üretilmiştir (Şekil 4.28). Bütün numuneler yarım küre modellerin baskı parametreleriyle üretilmiştir. U28'in katman sayısı 392 olup 302 dakikada üretilmiştir. U60'ın katman sayısı 183 olup 141 dakikada üretilmiştir. Adaptif numune ise 242 katmanlı olup 182 dakikada imal edilmiştir. U28, U60 ve A60-28'in katmanları yarım küre modellere göre (A18:100-44, A12:100-44, U100) daha zor anlaşılmakta ve hatta çıplak gözde neredeyse izlenememektedir.



Şekil 4.28. Adaptif numunenin katman kalınlıkları (0,028 – 0,06 mm)

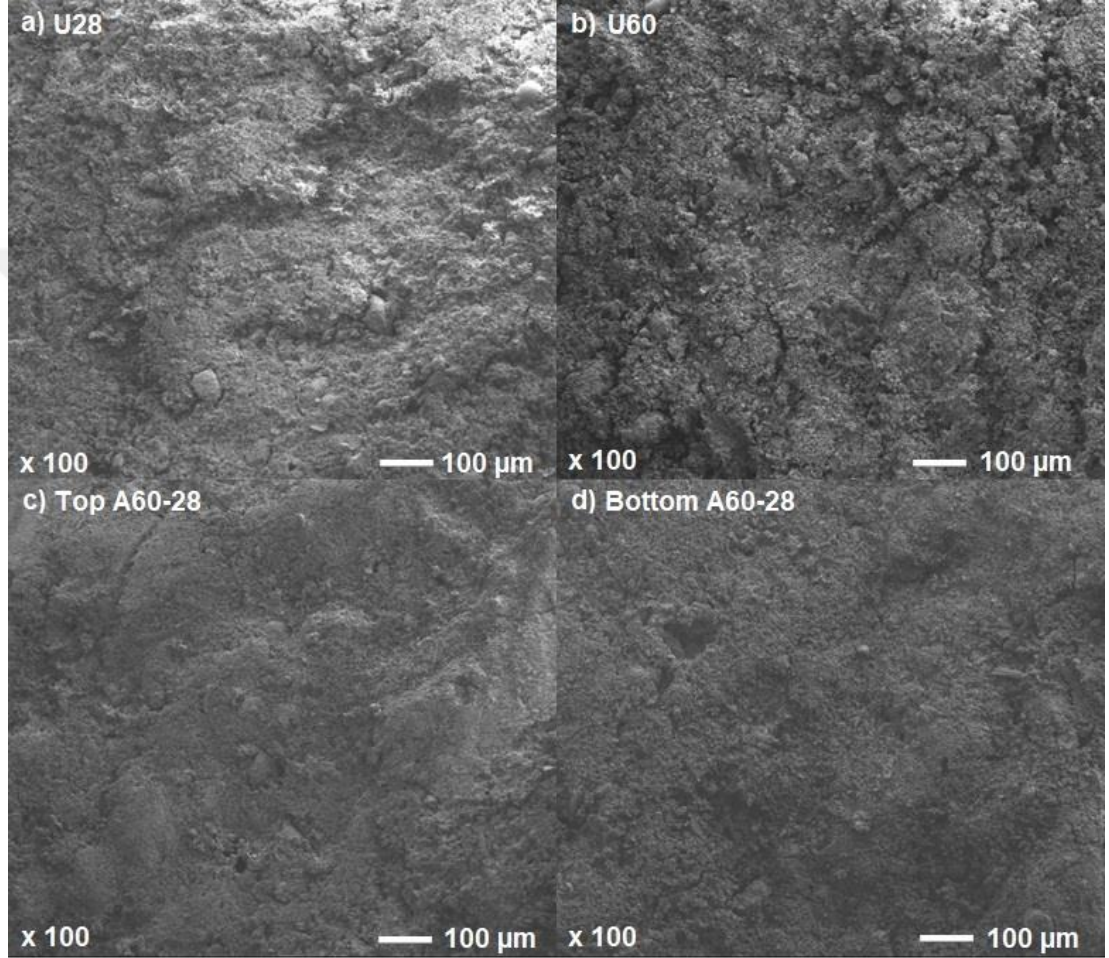
Baskı sonrası U28, U60 ve A60-28 1250°C'de 2 saat sinterlenmiştir (Şekil 4.29). Sıcaklık ve azalış hızları yine 10°C/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.29. Sinterlenmiş numuneler, a) U28, b) U60, c) A60-28 (Siyahlıklar SEM öncesi yapılan kaplamadan dolayı oluşmuştur)

Sinterleme sonrası numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.30). SEM görüntüleri incelendiğinde katman kalınlığının artması ile yüzey kalitesinin düştüğü

görülmektedir. İnce katmanlı (U28) numunenin yüzey özellikleri ile adaptif dilimleme (A60-28) ile üretilen numunenin yüzeylerinin birbirine benzediği görülmektedir. Katman kalınlığı yüksek olan (U60) numunenin yüzeyinde, U28 ve A60-28'e kıyasla girinti ve çıkıntılar daha belirgin olup çok daha kaba olduğu anlaşılmaktadır. Değişken katman kalınlığı uygulanarak elde edilen numunenin (A60-28) üst bölgelerinin daha sık ve ince katmanlardan oluşmasından dolayı daha düzgün olduğu görülmektedir.



Şekil 4.30. Sinterlenmiş numuneler, a) U28, b) U60, c) A60-28'in üst bölgesi, d) A60-28'in alt bölgesi

Çalışma kapsamında imal edilen yazıcı, adaptif dilimleme ve DBMA'nın entegrasyonu ile küçük ve hassas numuneleri çok daha düşük katman kalınlıklarında başarılı bir şekilde üretilen numunelerde yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri için Mitutoyo SJ-400 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Üretilen numunelerin üst ve alt bölgelerinden 3'er adet olmak üzere her numuneden toplam 6'şar adet ölçüm alınmıştır. Numunenin yüksekliği 11 mm olup alt bölge, numunenin tabandan 5.5 mm'ye kadar olan bölgesini ifade ediyor iken üst bölge, numunenin orta noktasından en üst noktaya kadar olan kısmını ifade etmektedir.

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinden sonra elde edilen verilerin normallik testleri yapılmıştır (Tablo 4.1). Deneysel olarak elde edilen pürüzlülük verilerinin yapılan testlerin sonucuna göre normal dağıldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4.1. Normallik testi

Numune/ Bölge	Kol.-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	df	Sig.	İstatistik	df	Sig.
Numune	U28	0,284	6	0,140	6	0,251
	U60	0,182	6	0,200	6	0,947
	A60-28	0,184	6	0,200	6	0,541
Bölge	Üst	0,171	9	0,200	9	0,651
	Alt	0,169	9	0,200	9	0,566

Verilerin tanımlayıcı istatistikleri de elde edilmiştir (Tablo 4.2). Veriler incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 8.12 μm ile 14.95 μm arasında değiştiği görülmektedir. Katman kalınlığı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı yani iyileşmenin olduğu söylenebilir. En düşük varyans değeri adaptif numunede (A60-28) çıkmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü, adaptif dilimlemenin yapısı gereği yüzey pürüzlülüğün her bölgede hemen hemen aynı olması gerekir. Bu durumu sağlamada DBMA algoritmasının çok büyük etkisi vardır. Şekil 3.11 ve başka kısımlarda da belirtildiği gibi DBMA algoritması kullanılmaz ise ya kalın katmanlar arasında bağ oluşmayacak ve parça dağılacak ya da ince katmanlarda bağlayıcı istenmeyen bölgelere yayılacak, yüzey kalitesi ve ölçü bozulacaktır. Normal dilimlenmiş numunelerde ise (U28 ve U60) varyans değerlerinin daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin normal dilimlemedeki merdiven etkisinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 4.2. Tanımlayıcı istatistikler

Numune-Bölge		Ort. (μ)	Std. Sapma	Min.	Maks.	Varyans
Numune	U28	10.458	2.051	8.120	14.230	4.206
	U60	12.737	1.559	10.610	14.950	2.431
	A60-28	11.965	0.795	11.070	13.070	0.632
Bölge	Alt	11.670	1.778	9.620	14.950	3.161
	Üst	11.770	1.842	8.120	14.230	3.391
Total		11.720	1.757	8.120	14.950	3.086

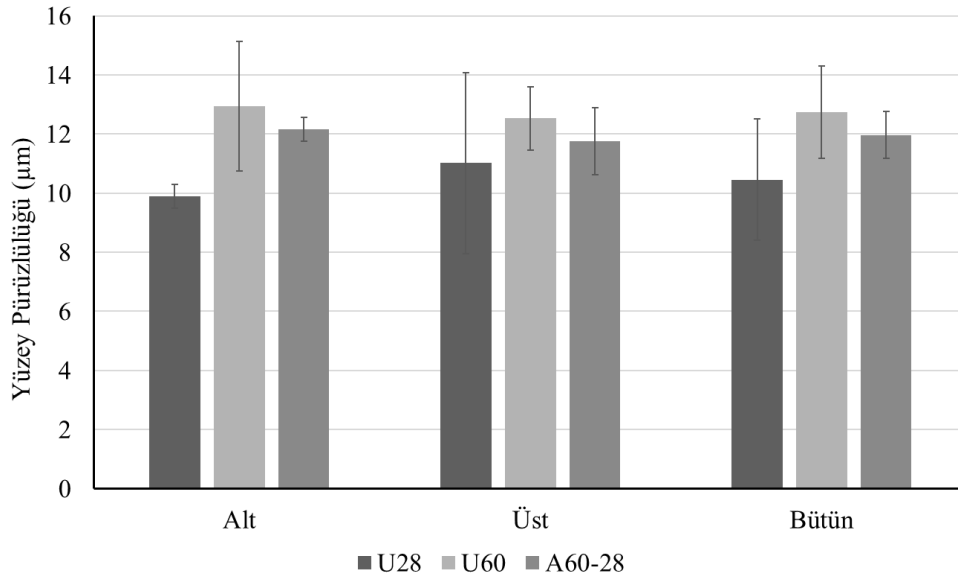
Verilerin varyans analizleri de yapılmıştır (Tablo 4.3). Varyans analizi sonuçlarına göre katman kalınlığı, ölçüm alınan bölge ve bunların karşılıklı etkileşimlerinin yüzey pürüzlülük değerlerine etkisinin, istatistiki açıdan %95 güven aralığında anlamlı olmadığı görülmektedir. Bu durum, katman kalınlığı değişiminin

mikron düzeyinde çok küçük değerde olmasından, yani deney örneklerinin homojen bir şekilde başarılı üretilmiş olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 4.3. Varyans analizi

Bağımlı Değişkenler	Ölçüm				
Kaynak	Tip III kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Anlamlılık düzeyi (p<0.05)
Doğrulanmış model	18.514	5	3.703	1.309	0.324
Kesişen Numune	2472.451	1	2472.451	874.040	0.000
Bölge	16.113	2	8.056	2.848	0.097
Numune * Bölge	0.045	1	0.045	0.016	0.902
Numune	2.356	2	1.178	0.416	0.669
Hata	33.945	12	2.829		
Total	2524.910	18			
Doğrulanmış Total	52,459	17			
a. R ² = 0.353 (Ayarlanmış R ² =0.083)					

Yüzey pürüzlülük değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Grafiğe göre U28 en iyi yüzey kalitesine sahip iken U60 en kötü yüzey kalitesine sahiptir. Normal dilimlenmiş numunelerde (U28 ve U60) alt bölgelerin yüzey pürüzlülüğü üst bölgelerden daha iyidir. Bu durum, daha önce de belirtildiği gibi merdiven etkisinden kaynaklanmaktadır. Adaptif numunede (A60-28) ise üst ve alt bölgelerin pürüzlülük değerlerinin, beklenildiği gibi birbirine çok yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni de adaptif dilimlemenin merdiven etkisini önlemesi ve DBMA’nın bağlayıcı miktarını düzgün bir şekilde ayarlamasındandır.



Şekil 4.31. Yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırması

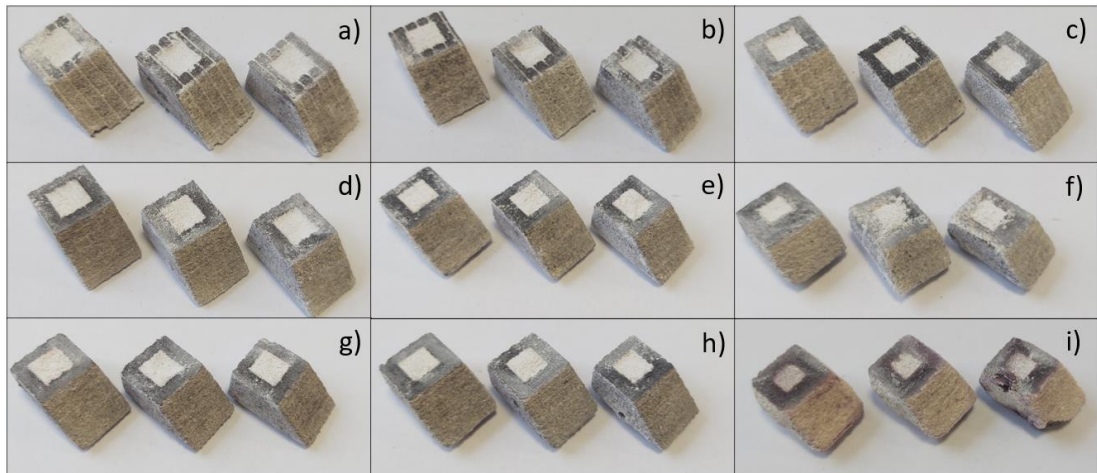
Yüzey pürüzlülük ölçümlerine ek olarak deneysel olarak üretilen numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 4.4). Yoğunluk değerleri birbirine çok yakın olacak şekilde çıkmıştır. Yoğunluk değerlerinin birbirine çok yakın çıkması özellikle çalışma kapsamında geliştirilen DBMA'nın başarılı bir şekilde çalıştığını göstermesi açısından oldukça önemli bir gösterge olduğu söylenebilir. Yoğunluk değerleri incelendiğinde literatürdeki izafi yoğunluk sonuçları ile (%32-%96,51) benzer sonuçların çıktığı anlaşılmaktadır (Tablo 2.2).

Tablo 4.4. Yoğunluk değerleri

Numune	Yoğunluk (gr/cm ³)	İzafi Yoğunluk (%)
U28	2,69	68,14
U60	2,70	68,47
A60-28	2,81	71,20

4.4. Taguchi Deney Tasarımı Bulguları

Taguchi deney deseni ve parametreler belirlendikten sonra numuneler 3B yazıcı ile üretilmiştir. Her bir koşul için 3'er tekrar olmak üzere toplam 27 adet numune üretilmiştir (Şekil 4.32). Materyal ve yöntem kısmında da belirtildiği gibi deney tasarımındaki numunelerin katman kalınlığı ve doygunluk seviyeleri literatürden ve yapılan ön denemelerden elde edilen bilgilere göre belirlenmiştir (Bölüm 3.2.4). Tablo 3.2'de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi katman kalınlık değerleri 150-225-300 (μm) ve doygunluk değerleri ise %50-60-70 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.32. Taguchi parametre numuneleri, a) 150 μm ve %50 doygunluk, b) 150 μm ve %60 doygunluk, c) 150 μm ve %70 doygunluk, d) 225 μm ve %50 doygunluk, e) 225 μm ve %60 doygunluk, f) 225 μm ve %70 doygunluk, g) 300 μm ve %50 doygunluk, h) 300 μm ve %60 doygunluk, i) 300 μm ve %70 doygunluk

Ham numuneler üretildikten sonra dijital kumpas ile numunelerin en ölçüleri 0,1 mm hassasiyet ile belirlenmiştir. Örneklerin en boyutunun tasarlanan ölçüsü 15 mm'dir. Örneklerden elde edilen ölçüm değerlerinin tanımlayıcı istatistiki bilgileri hesaplanmıştır (Tablo 4.5). Ölçüm değerleri 15 ile 19,6 mm arasında değişmektedir. Deney örneklerinin en ölçüsüne ait değerlerin ortalaması 16,05 mm olup standart sapması 1,25'dir. %50 doygunluk oranına sahip numunelerde sapma yaklaşık olarak %0,47 olup bu değer göz ardı edilebilir bir değerdir. Ancak doygunluk oranı arttıkça ölçüde ciddi sapmalar meydana gelmiştir. Katman kalınlığının 300 μ m olduğu durumda ise doygunluk %50 olsa bile ölçüde ciddi sapmalar (%3,8) meydana gelmiştir. Veriler incelendiğinde yüksek doygunluğun ve kalın katman kalınlığının uygun olmayacağı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni kalınlık ve doygunluğun artmasıyla daha fazla bağlayıcı püskürtülmekte ve fazla bağlayıcı da yanal olarak hareket edip numune ölçüsünü genişletmektedir.

Tablo 4.5. En ölçüleri için tanımlayıcı istatistikler (mm)

Katman K. (μ m)	Doy. (%)	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
150	50	3	15,07	0,12	15,00	15,00	15,20
	60	3	15,37	0,23	15,50	15,10	15,50
	70	3	15,53	0,12	15,60	15,40	15,60
	Total	9	15,32	0,25	15,40	15,00	15,60
225	50	3	15,10	0,17	15,00	15,00	15,30
	60	3	15,80	0,20	15,80	15,60	16,00
	70	3	16,77	0,25	16,80	16,50	17,00
	Total	9	15,89	0,75	15,80	15,00	17,00
300	50	3	15,57	0,15	15,60	15,40	15,70
	60	3	16,03	0,06	16,00	16,00	16,10
	70	3	19,20	0,35	19,00	19,00	19,60
	Total	9	16,93	1,72	16,00	15,40	19,60
Total	50	9	15,24	0,27	15,20	15,00	15,70
	60	9	15,73	0,33	15,80	15,10	16,10
	70	9	17,17	1,63	16,80	15,40	19,60
	Total	27	16,05	1,25	15,60	15,00	19,60

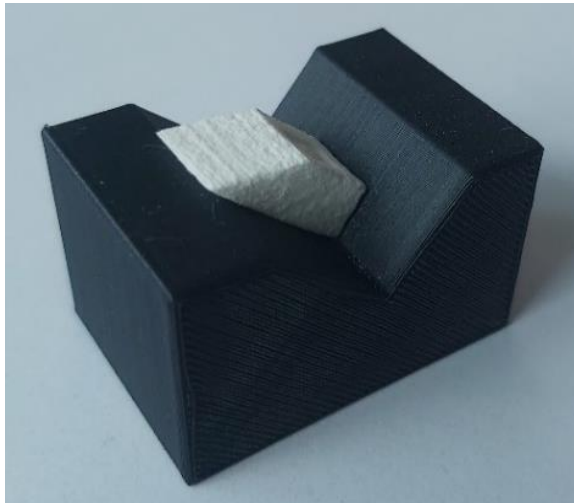
Alüminanın erime sıcaklığı 2072°C'dir. Literatürde 1300, 1400, 1500, 1700 °C ve daha farklı sinterleme sıcaklıklarında çalışmalar mevcuttur (Li vd, 2021; Miao vd, 2022; Renaux vd, 2021). Literatürde sıcaklık artış ve azalış hızı olarak 3, 5, 10 °C/dk vb., sinterleme süresi olarak 30, 120, 240 dk gibi değerler kullanılmıştır (Chen vd, 2022a; Li vd, 2021; Renaux vd, 2021). Literatür bilgileri dikkate alınarak en ölçümlerinden sonra ham numuneler 1500 °C'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Sıcaklık artış ve azalış miktarı 10°C/dk olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.33'de katman kalınlığı 225 μ m ve %50 doygunlukta üretilen numunenin sinterlenmiş hali örnek

olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Katman kalınlığı 225 μm ve %50 doygunluktaki numunenin sinterlenmiş hali

Sinterleme sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülük testleri yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri, katman kalınlık farkını daha iyi anlamak adına eğimli bölgeden yapılmıştır. Eğimli bölgeden rahat bir şekilde ölçüm alabilmek için FFF tipi bir üç boyutlu yazıcı ile yardımcı aparat yapılmıştır (Şekil 4.34). Ölçümler PCE-RT marka portatif pürüzlülük ölçer cihazı ile alınmıştır. Her numuneden 4'er adet olmak üzere ($3 \times 3 \times 3 \times 4 = 108$) toplam 108 ölçüm alınmıştır. Ölçüm değerlerinin tanımlayıcı istatistiksel analizleri de yapılmıştır (Tablo 4.6). Yüzey pürüzlülük değerleri 15,01-24,01 μm arasında değişmekle birlikte ortalaması 19,30 μm ve standart sapma ise 1,93 μm 'dir. Veriler incelendiğinde katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün beklenildiği gibi kısmen arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.34. Ölçüm için yapılan aparat

Tablo 4.6. Yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri (µm)

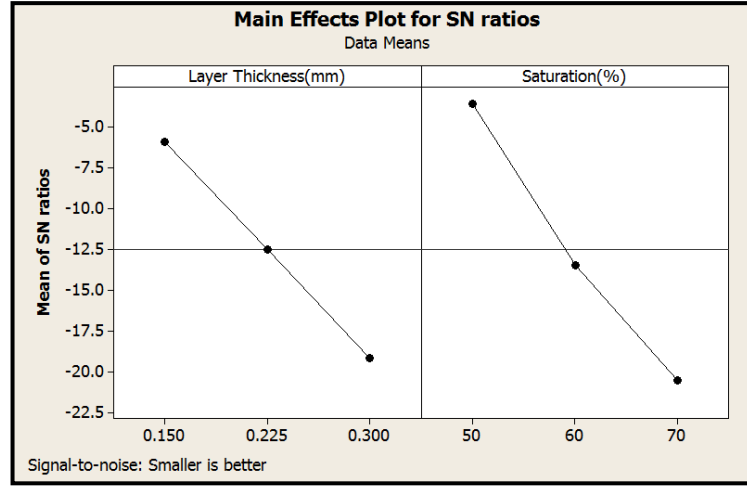
Katman K.	Doy. (%)	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
150	50	12	16,97	1,41	17,21	15,01	19,16
	60	12	18,52	1,49	18,67	15,84	20,46
	70	12	19,86	1,18	20,03	17,76	21,87
	Total	36	18,45	1,79	18,67	15,01	21,87
225	50	12	19,82	1,50	19,25	18,24	24,01
	60	12	19,21	1,74	19,36	16,45	22,83
	70	12	18,02	2,32	18,09	15,22	21,71
	Total	36	19,02	1,98	19,17	15,22	24,01
300	50	12	21,06	1,33	21,22	18,99	23,03
	60	12	20,52	1,19	20,18	18,54	22,28
	70	12	19,73	1,60	20,05	16,30	21,89
	Total	36	20,43	1,46	20,34	16,30	23,03
Total	50	36	19,28	2,21	19,18	15,01	24,01
	60	36	19,42	1,67	19,61	15,84	22,83
	70	36	19,20	1,91	19,66	15,22	21,89
	Total	108	19,30	1,93	19,47	15,01	24,01

Sinterlenmiş numunelerin Arşimet yöntemi ile yoğunluk hesaplamaları da yapılmıştır. Elde edilen değerlerin tanımlayıcı istatistiksel analizleri de yapılmıştır (Tablo 4.7). Yoğunluk değerleri 2,63 ile 3,10 g/cm³ arasında değişmektedir. Yoğunluk değerlerinin ortalaması 2,98 g/cm³ olup standart sapması 0,09'dur.

Tablo 4.7. Yoğunluk değerleri (gr/cm³)

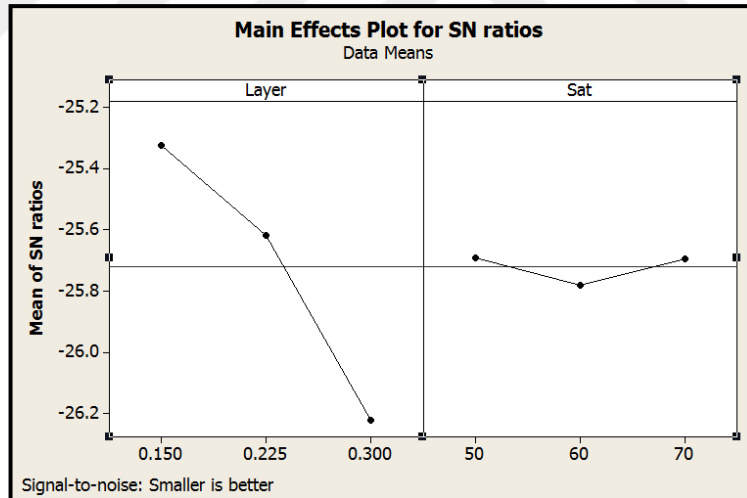
Katman K. (µm)	Doy. (%)	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
150	50	3	2,81	0,16	2,84	2,63	2,95
	60	3	2,99	0,01	2,98	2,98	3,00
	70	3	2,98	0,01	2,98	2,97	2,99
	Total	9	2,92	0,12	2,98	2,63	3,00
225	50	3	2,99	0,02	2,98	2,97	3,01
	60	3	3,02	0,01	3,02	3,02	3,03
	70	3	2,97	0,04	2,95	2,95	3,02
	Total	9	2,99	0,03	3,01	2,95	3,03
300	50	3	2,99	0,01	2,99	2,98	3,00
	60	3	3,07	0,04	3,09	3,03	3,10
	70	3	2,99	0,05	3,00	2,94	3,04
	Total	9	3,02	0,05	3,00	2,94	3,10
Total	50	9	2,93	0,12	2,98	2,63	3,01
	60	9	3,03	0,04	3,02	2,98	3,10
	70	9	2,98	0,03	2,98	2,94	3,04
	Total	27	2,98	0,09	2,99	2,63	3,10

Yapılan testlerden sonra Minitab programı üzerinden Taguchi analizleri yapılmıştır. Boyutsal doğruluk için, en ölçüsündeki yüzde değişim dikkate alınarak Taguchi analizi yapılmıştır. En ölçüsündeki yüzde değişimin en az olması istenmektedir. Dolayısıyla Taguchi analizinde daha küçük daha iyi durumuna göre hesaplamalar yapılmıştır. SN oranları incelendiğinde en iyi parametre koşullarının katman kalınlığı için 150 µm, doygunluğun ise %50 olduğu görülmektedir (Şekil 4.35).



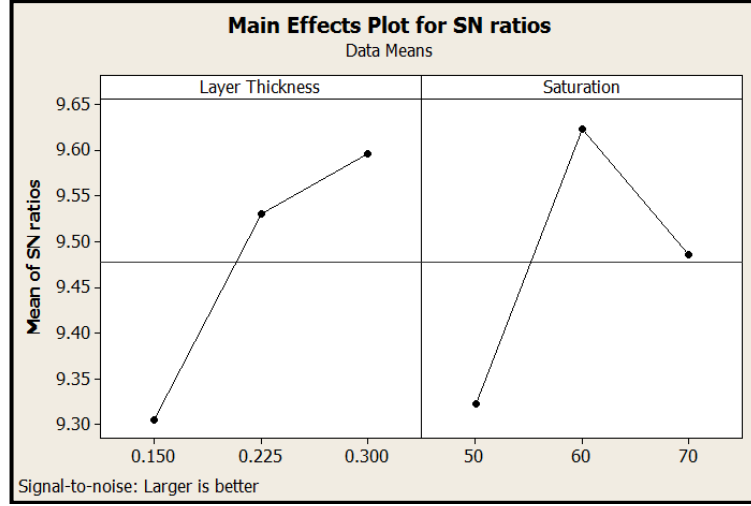
Şekil 4.35. Boyutsal doğruluk Taguchi analizi

Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması istenilmektedir. Dolayısıyla Taguchi analizinde boyutsal doğruluktaki gibi daha küçük daha iyi durumuna göre hesaplamalar yapılmıştır. SN oranları incelendiğinde katman kalınlığı için en uygun değerin 150 μm olduğu görülmektedir (Şekil 4.36). Doygunluk için SN oranı hem %50 hem de %70 için -25,69 çıkmıştır. Dolayısıyla bu iki değerde kullanılabilir değerlerdir.



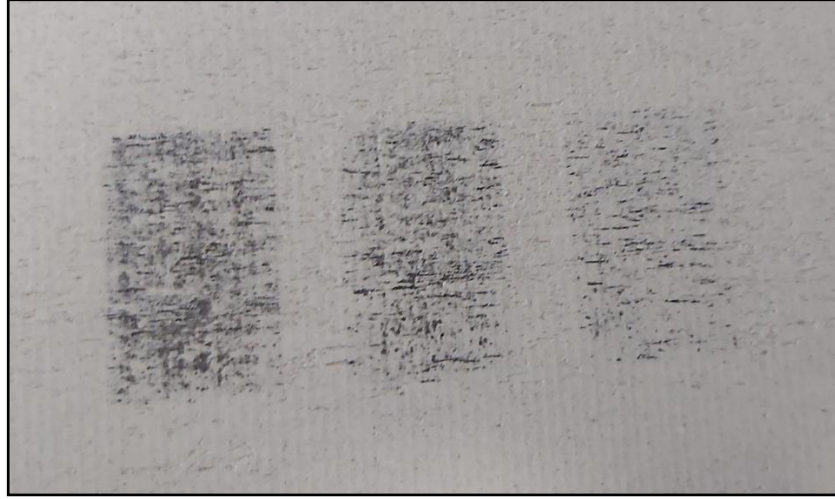
Şekil 4.36. Yüzey pürüzlülük Taguchi analizi

Yoğunluk değerinin diğer parametrelerin aksine yüksek olması istenmektedir. Dolayısıyla Taguchi analizinde daha büyük daha iyi durumu göre hesaplama yapılmıştır. Analize göre en uygun katman kalınlık değeri 300 μm , en uygun doygunluk ise %60 çıkmıştır (Şekil 4.37).



Şekil 4.37. Yoğunluk Taguchi analizi

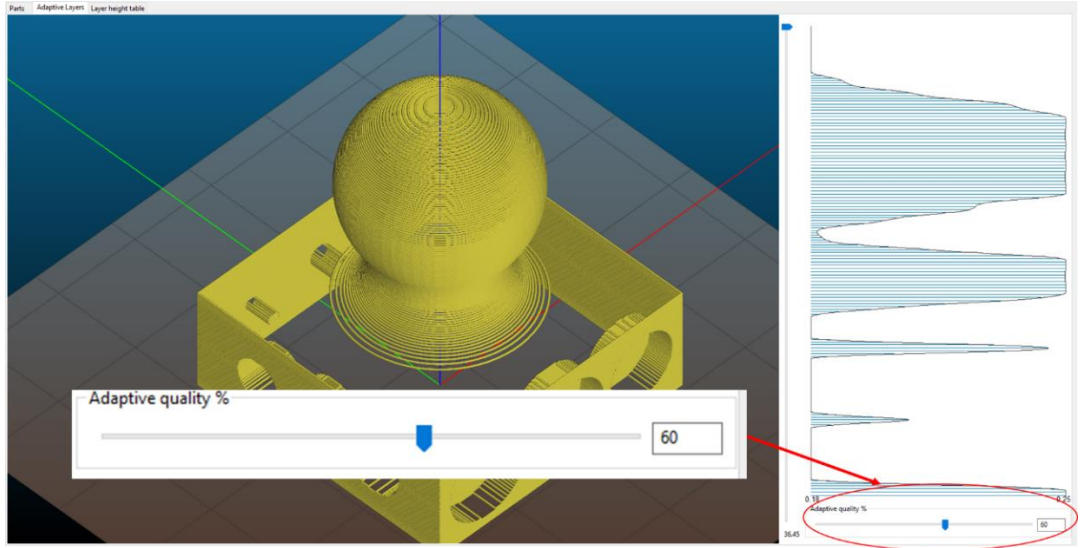
Taguchi deney tasarımına göre üretilen numuneler üzerinden yapılan test ve analizlere göre adaptif dilimlenecek modelin parametreleri belirlenecek hale gelmiştir. Katman kalınlığı için 2 farklı değer, doygunluk için de 1 değer seçilmelidir. Adaptif dilimlemede katman kalınlıkları bu 2 farklı değer arasında olacaktır. 300 μm kalınlık değerinin yoğunluk için uygun olsa da boyutsal doğruluk ve pürüzlülük için uygun olmadığı görülmektedir. Özellikle boyutsal doğruluk ve pürüzlülük ölçülerinde ciddi sapmalar meydana gelmiştir. 150 μm ve 225 μm kalınlık değerleri uygun olsa da 150 μm kalınlığındaki numune üretilirken tozun bazı bölgelere düzgün serilemediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.38). Bunun nedeni toz içerisindeki en büyük parça boyutunun 150 μm 'ye yakın olması ve kötü bir morfolojiye sahip olmasıdır. Bu sorunu azaltmak adına ön denemeler ile katman kalınlığı için alt sınır 180 μm olarak belirlenmiştir. Üst sınır olarak da katman kalınlığı aralığını genişletmek adını yine ön denemeler ile 225 μm yerine 250 μm değerine karar kılınmıştır. Yoğunluk çok önemli bir parametredir. Katman kalınlığının artması ile yoğunluk normalde azalması gerekirken en büyük parça boyutunun yaklaşık 150 μm olması nedeniyle bu durum tersine dönmüştür. Kalınlığın biraz artması yoğunluğu olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum Taguchi analizinde de görülmektedir (Şekil 4.37). Bundan dolayı kalınlık değerlerinde yapılan bu ufak düzeltmeler olumlu görülmüştür. Doygunluk için %50 değerine karar kılınmıştır. Çünkü hem boyutsal doğruluk hem de pürüzlülük analizlerinde (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36) en uygun değerdir. Ayrıca daha yüksek doygunluk değerleri için parça boyutunda büyük sapmalar meydana gelmektedir.



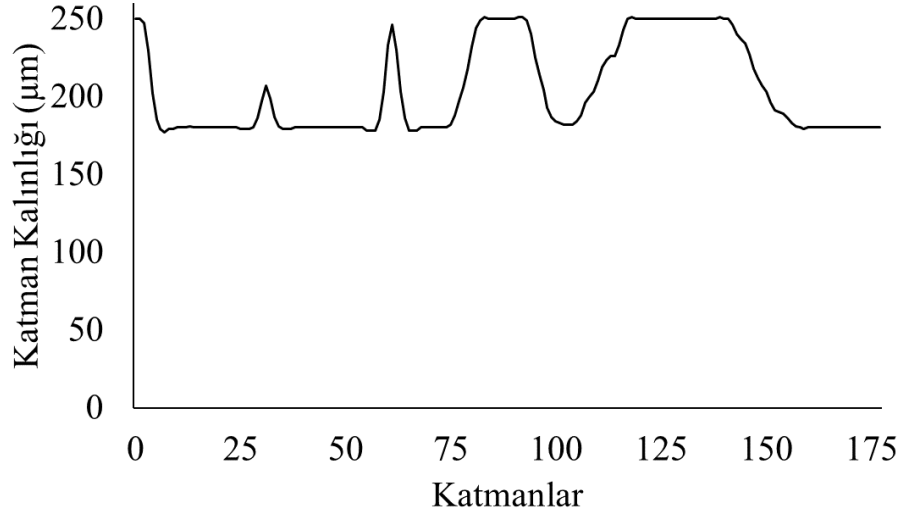
Şekil 4.38. 150 μm katman kalınlığındaki numuneler

4.4.1. Taguchi Analizi Sonrası Adaptif Numunenin Üretilmesi

Taguchi deney tasarımına ile parametrelere ait sınır değerleri belirlendikten sonra adaptif (180-250 μm), kalın katmanlı (250 μm) ve ince katmanlı (180 μm) olmak üzere 3 adet numune üretilmiştir. Adaptif numunenin (A250-180) sezgisel kalite parametresi %60 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.39). A250-180'nin toplam 178 katmanı olup katman kalınlıkları çok değişkendir (Şekil 4.40). Kalın katmanlı numunenin katman sayısı 146, ince katmanlı numunenin ise 203'dür.

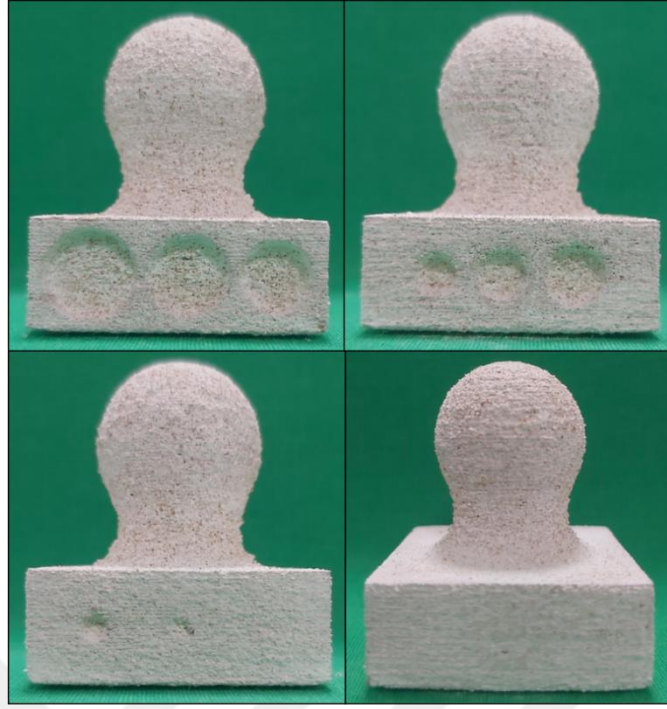


Şekil 4.39. A250-180'nin kalite ayarı



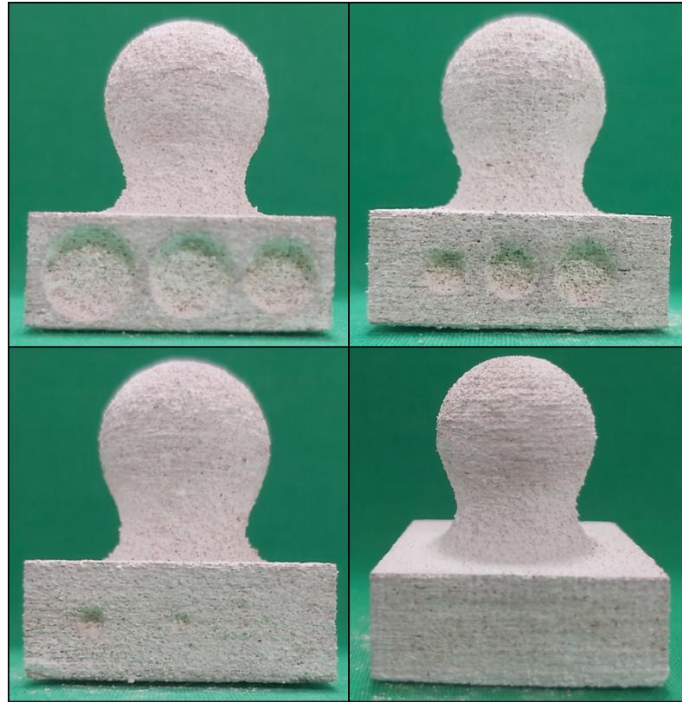
Şekil 4.40. A250-180'nin katman kalınlıkları

180 μm katman kalınlığına sahip numune (U180) 3B yazıcıda üretilmiştir (Şekil 4.41). Numunenin dikdörtgen prizma kısmının 3 yüzünde bulunan delikleri incelediğimizde 10 mm çapındaki deliğin en düzgün forma sahip olduğu tespit edilmiştir. 9 ve 8 mm çapındaki delikler de nispeten düzgün bir forma sahiptir. Ancak çap düştükçe deliklerin formları bozulmakla birlikte 1 mm çapındaki delik hiç oluşmamıştır. Deliklerin bazılarının düzgün oluşmamasının sebebi kullanılan tozun morfolojisinin bozuk olması ve tozun akışkan olmamasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.3-3.4). Tozun morfolojisi (mikro düzeyde) küresel bir yapıda olsaydı deliklerin hepsi daha düzgün bir şekilde oluşabilirdi.



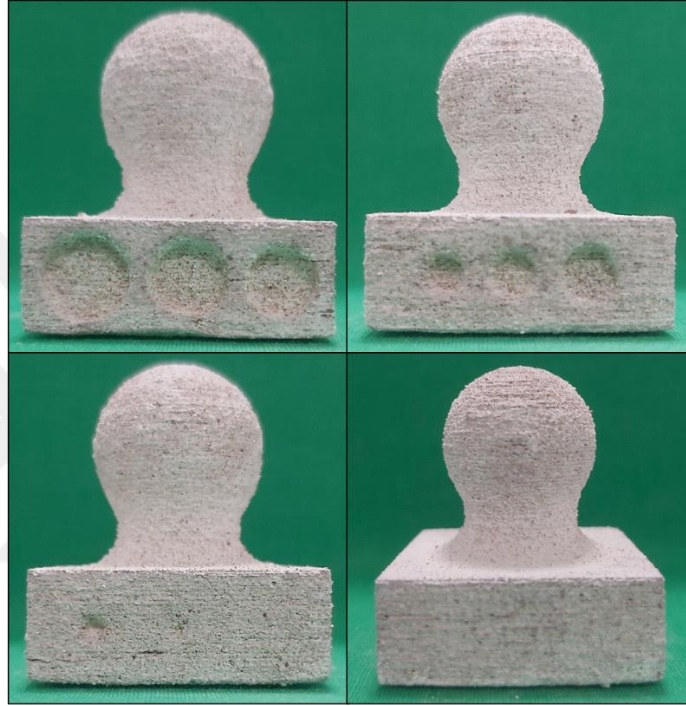
Şekil 4.41. U180'nin 4 yüzünün görünüşü

250 μm katman kalınlığına sahip numune (U250) belirlenen koşullarda üretilmiştir (Şekil 4.42). U250'de deliklerin durumu U180'e benzer bir sonuç vermiştir.



Şekil 4.42. U250'nin 4 yüzünün görünüşü

Diğer numuneler gibi A250-180 de belirlenen koşullar altında 3B yazıcıda üretilmiştir (Şekil 4.43). Deliklerin durumu diğer numunelerdeki gibidir. Daha önce de belirtildiği gibi tozun morfolojisi çok bozuk olduğu için deliklerdeki durumun katman kalınlığına göre değişimi anlaşılamamıştır. Bütün numuneler için benzer durumlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Küresel morfolojide akışkan bir toz kullanılması halinde deliklere ait detaylar daha iyi oluşabilir ve anlamlı bir kıyaslama yapılabilir.



Şekil 4.43. A250-180'nin 4 yüzünün görünüşü

Numuneler üretildikten sonra 1290°C'de 12 saat sinterlenmiştir (Şekil 4.44). Sıcaklık artış hızı 10°C/dk, azalış hızı ise 5°C/dk'dır.



Şekil 4.44. Numunelerin sinterlenmiş hali

Numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür (Tablo 4.8). Yoğunluk değerleri optimizasyon numunelerine (Tablo 4.7) göre daha düşük çıkmıştır. Toz serme hızı, silindir devri, osilatör devri, toz morfolojisi, toz yatak yoğunluğu, toz boyut dağılımı, doyguluk, katman kalınlığı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, sinterleme ortamı (basınç ya da vakumlu ortam) ve diğer pek çok parametre yoğunluk değerini etkilemektedir. Yoğunluk değerinin düşük çıkmasının en büyük nedeni sinterleme sıcaklığının 1290°C olmasıdır. Optimizasyon numuneleri gibi 1500°C’da sinterleme yapılsaydı benzer yoğunluk değerleri elde edilecekti. Yoğunluk değerleri düşük çıksa da bazı uygulamalarda gözenekli ve düşük yoğunluklu parçalar özellikle istenilmektedir. Literatürde ve endüstride düşük yoğunluklu, gözenekli parçaların üretildiği birçok uygulama mevcuttur. Özellikle kemik üretimi ve ısı transferi uygulamalarında gözenekli yapılar tercih edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda Tablo 4.8’deki değerlere benzer ve hatta daha da düşük yoğunluk sonuçları rapor edilmiştir (Tablo 2.2). Dolayısıyla elde edilen yoğunluk değerleri literatür ile uyum içerisindedir.

Tablo 4.8. A250-180, U250 ve U180’in sinterlenmiş hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri

Numune	Yoğunluk(gr/cm ³)	İzafi Yoğunluk (%)
U180	1,71	43,24
U250	1,72	43,53
A250-180	1,70	43,07

4.4.2. Görüntü İşleme ile Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Taguchi parametre optimizasyonu için üretilen 27 adet numunenin sinterlenmiş hallerinin ve parametre optimizasyonu sonrası üretilen A250-180, U250, U180’in ham ve sinterlenmiş hallerinin görüntü işleme ile pürüzlülük ölçümleri Şekil 3.20’de belirtilen yollarla yapılmıştır. Optimizasyon numuneleri düz olduğu için bir yüzeyden 1 adet ölçüm yapılabilmiştir. A250-180, U250 ve U180’in küresel yüzeylerinden her yönde ölçüm yapılabilirdiği için ölçüm yapılmak istenen yüzeyin tamamını temsil edebilecek şekilde 21’er adet ölçüm alınmıştır. Optimizasyon numunelerinin görüntü işleme ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin tanımlayıcı istatistiksel analizleri de yapılmıştır (Tablo 4.9).

Tablo 4.9. Optimizasyon numunelerinin görüntü işleme ile elde edilen yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri (μm)

Katman K.	Doy. (%)	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
150	50	3	19,84	3,03	20,20	16,65	22,67
	60	3	21,54	2,03	22,51	19,20	22,90
	70	3	23,78	1,83	22,99	22,48	25,88
	Total	9	21,72	2,66	22,51	16,65	25,88
225	50	3	24,08	2,03	23,18	22,66	26,40
	60	3	23,17	3,06	24,10	19,76	25,66
	70	3	20,10	1,93	20,16	18,15	22,00
	Total	9	22,45	2,75	22,66	18,15	26,40
300	50	3	26,02	0,34	25,96	25,72	26,39
	60	3	24,35	2,86	22,93	22,47	27,64
	70	3	22,99	2,28	21,95	21,42	25,61
	Total	9	24,45	2,26	25,61	21,42	27,64
Total	50	9	23,31	3,29	23,18	16,65	26,40
	60	9	23,02	2,63	22,90	19,20	27,64
	70	9	22,29	2,43	22,00	18,15	25,88
	Total	27	22,88	2,73	22,67	16,65	27,64

Pürüzlülük cihazı ölçümleri ile görüntü işleme sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmıştır (Tablo 4.12). Pürüzlülük cihazı ile elde edilen verilerin bir kısmı normal dağılmadığından dolayı (Tablo 4.11) MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) değerini hesaplamak için medyana bakılmalıdır. Ancak ortalamalar için de hesaplamalar konulmuştur. Medyan için hesaplanan MAPE değeri 17,18'dir. MAPE değerleri 10-20 arasında olması iyi tahmin anlamına gelmektedir (Tablo 4.10) (Montaño Moreno vd, 2013).

Tablo 4.10. MAPE değerleri ve tahmin ilişkisi (Montaño Moreno vd, 2013)

MAPE	Tahmin ilişkisi
<10	Yüksek doğrulukta tahmin
10-20	İyi tahminleme
20-50	Makul tahmin
>50	Kötü tahmin

Görüntü işleme ile elde edilen verilerin deneysel olarak ölçülen veriler ile uyumluluk gösterdiği söylenebilir. Veriler grafiksel olarak incelendiğinde de deneysel ve görüntü işleme ile ölçülen verilerin uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.45).

Tablo 4.11. Pürüzlülük cihazı verilerinin normallik testi

Durum	Numune	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		İstatistik	df	Sig.	İstatistik	df	Sig.
Katman Kalınlığı	50	0,117	36	0,200	0,980	36	0,740
	60	0,089	36	0,200	0,971	36	0,456
	70	0,125	36	0,169	0,935	36	0,035
Doygunluk	150	0,088	36	0,200	0,969	36	0,393
	225	0,118	36	0,200	0,969	36	0,388
	300	0,085	36	0,200	0,973	36	0,526

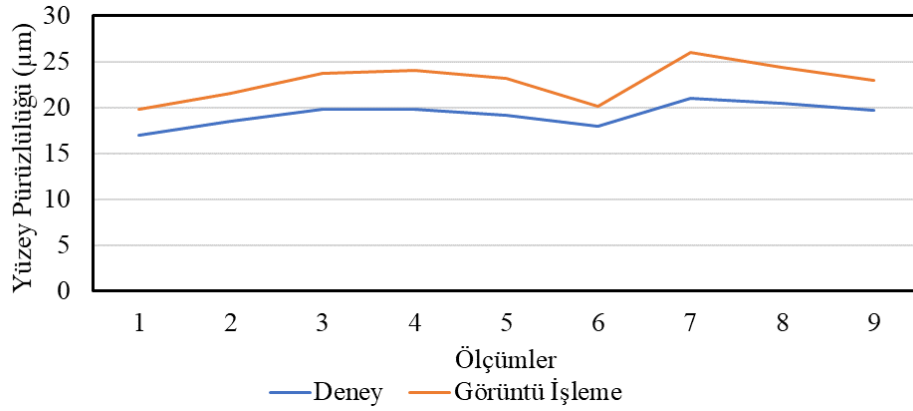
Tablo 4.12. Deney ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin kıyaslanması

Katman K. (µm)	Doy. (%)	Ortalamalar			Medyanlar		
		Deneysel Veriler	Gör. İş. Verileri	Mutlak Y. H.	Deneysel Veriler	Gör. İş. Verileri	Mutlak Y. H.
150	50	16,97	19,84	0,17	17,21	20,20	0,17
	60	18,52	21,54	0,16	18,67	22,51	0,21
	70	19,86	23,78	0,20	20,03	22,99	0,15
225	50	19,82	24,08	0,21	19,25	23,18	0,20
	60	19,21	23,17	0,21	19,36	24,10	0,24
	70	18,02	20,10	0,12	18,09	20,16	0,11
300	50	21,06	26,02	0,24	21,22	25,96	0,22
	60	20,52	24,35	0,19	20,18	22,93	0,14
	70	19,73	22,99	0,17	20,05	21,95	0,09

$$*MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Den.-G.İ.}{Den.} \right| * 100$$

$$*MAPE=18,38$$

$$*MAPE =17,18$$

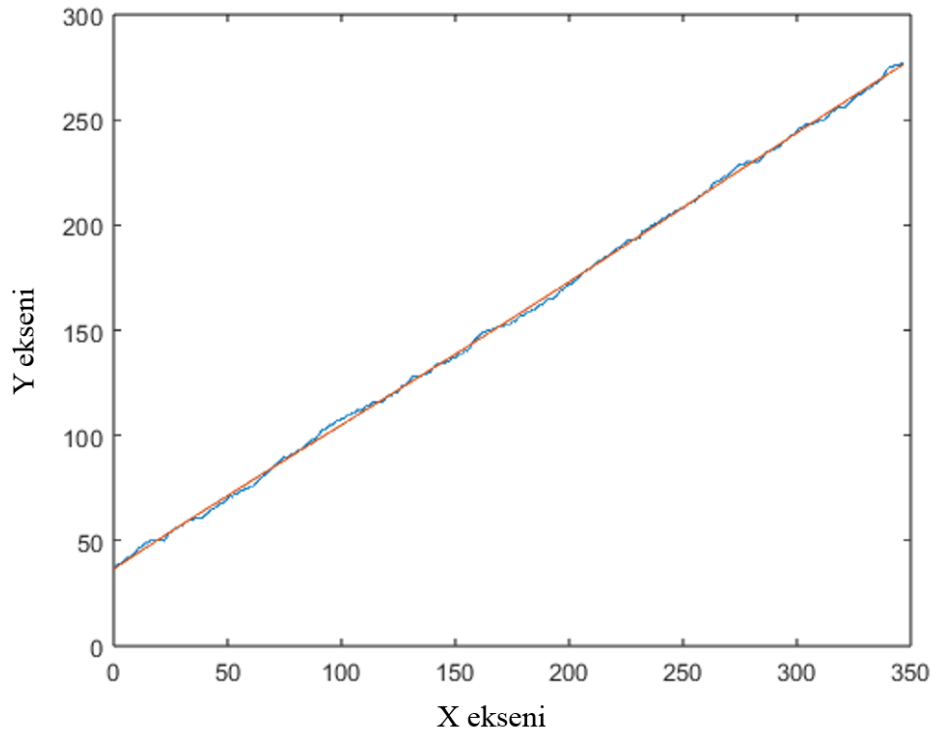


Şekil 4.45. Deney ve görüntü işleme verilerinin grafiği

Şekil 4.46'da 150 µm katman kalınlığına ve %50 doygunluğa sahip optimizasyon numunesinden alınan resim ve bu resmin görüntü işleme tekniği ile siyah beyaz hale getirilmiş hali örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 4.47'de ise siyah-beyaz hale dönüştürülen resimden görüntü işleme ile elde edilen piksel grafiği gösterilmektedir. Matlab da hazırlanan yazılımın bu görüntüden elde ettiği pürüzlülük sonucu 20,90 µm'dir.



Şekil 4.46. Optimizasyon numunesinin renkli ve siyah beyaz resmi



Şekil 4.47. Görüntü işleme ile elde piksel grafiği (mavi çizgi gerçek yüzey çizgisi iken turuncu çizgi programın oluşturduğu eğriyi temsil etmektedir)

A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmemiş ve sinterlenmiş hallerinden görüntü işleme ile elde edilen pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel analizleri yapılmıştır (Tablo 4.13 ve Tablo 4.14).

Tablo 4.13. A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmemiş ham hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri (μm)

Katman K.	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
180	21	42,79	6,50	42,95	30,95	55,12
Adaptif	21	42,38	5,25	42,49	33,10	54,16
250	21	53,70	8,56	56,69	32,80	64,11
Total	63	46,29	8,61	44,61	30,95	64,11

Tanımlayıcı istatistikler (Tablo 4.13 ve Tablo 4.14) incelendiğinde sinterleme öncesinde numunelerin ortalama pürüzlülük değeri 46,29 μm iken sinterleme sonrası yüzde 39,29'luk bir düşüş ile 28,10 μm olmuştur. Yani sinterleme sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme olduğu anlaşılmaktadır. Sinterleme öncesi elde edilen veriler 30,95 – 64,11 μm arasında dağılmakta olup standart sapması 8,61'dir (Tablo 4.13). Sinterleme sonrası elde edilen veriler ise 20,14 – 36,78 μm arasındadır. Verilerin standart sapması ise 3,76'dır (Tablo 4.14). Ayrıca U180 ile A250-180'nin pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olup U250'ye göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.14. A250-180, U250 ve U180'in sinterlenmiş hallerinin görüntü işleme yüzey pürüzlülük verilerinin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri (μm)

Katman K.	N	Ort.	Std. Sap.	Medyan	Min	Maks
180	21	26,90	2,97	27,40	20,14	32,03
Adaptif	21	26,26	3,16	25,83	21,80	31,00
250	21	31,13	3,21	31,30	25,35	36,78
Total	63	28,10	3,76	28,16	20,14	36,78

A250-180, U180 ve U250'nin sinterlenmiş ve sinterlenmemiş hallerinin yüzey pürüzlülük verilerine normallik testi yapılmıştır (Tablo 4.15). Normallik testi sonuçlarına göre U250'nin sinterlenmemiş halinin normal dağılmadığı ancak diğer verilerin ise normal dağıldığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.15. A250-180, U250 ve U180'in yüzey pürüzlülük verilerinin normallik testi sonuçları

Durum	Numune	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		İstatistik	df	Sig.	İstatistik	df	Sig.
Sinterlenmemiş	U180	0,09	21	0,20	0,98	21	0,96
	A250-180	0,10	21	0,20	0,98	21	0,89
	U250	0,20	21	0,02	0,89	21	0,02
Sinterlenmiş	U180	0,13	21	0,20	0,97	21	0,76
	A250-180	0,14	21	0,20	0,91	21	0,07
	U250	0,12	21	0,20	0,95	21	0,38

Numunelerin sinterlenmemiş ve sinterlenmiş halleri birbirinden bağımsız bir şekilde değerlendirilmiştir. U250'nin sinterlenmemiş halinin verileri normal dağılmadığı için sinterlenmemiş numunelere Kruskal-Wallis testi yapılmıştır (Tablo 4.16). Test sonucuna göre U180 ve A250-180 arasında istatistiksel açıdan bir fark yok iken U250'nin diğer numunelerden farklı olduğu tespit edilmiştir. Adaptif dilimleme ve DBMA kullanımı sayesinde adaptif numune (A250-180) ile ince katmanlı numune (U180) benzer pürüzlük değerlerinde üretilmiştir.

Tablo 4.16. Kruskal-Wallis testi sonuçları

Numune	Ort. Std.	Med (min - maks)	p
U180	6,50	42,95 (30,95 - 55,12) ^a	<0,05
A250-180	5,25	42,38 (33,10 - 54,16) ^a	
U250	8,56	56,69 (32,80 - 64,11) ^b	

*a-b : harfler grupları temsil etmektedir.

Sinterlenmiş numunelerin verileri normal dağıldığı için varyans analizi yapıp Tukey gruplarına bakılmıştır (Tablo 4.17). Tukey testi sonuçları sinterlenmemiş durumla aynı çıkmıştır. Yani U180 ile A250-180 aynı grupta iken U250 farklı gruptadır. Numunelerin hem sinterlenmemiş hem de sinterlenmiş verilerinin istatistiksel sonuçları incelendiğinde Adaptif dilimleme ve DBMA sayesinde U180'den %12,31 daha az katman kullanılarak benzer pürüzlülük değeri elde edilmiştir.

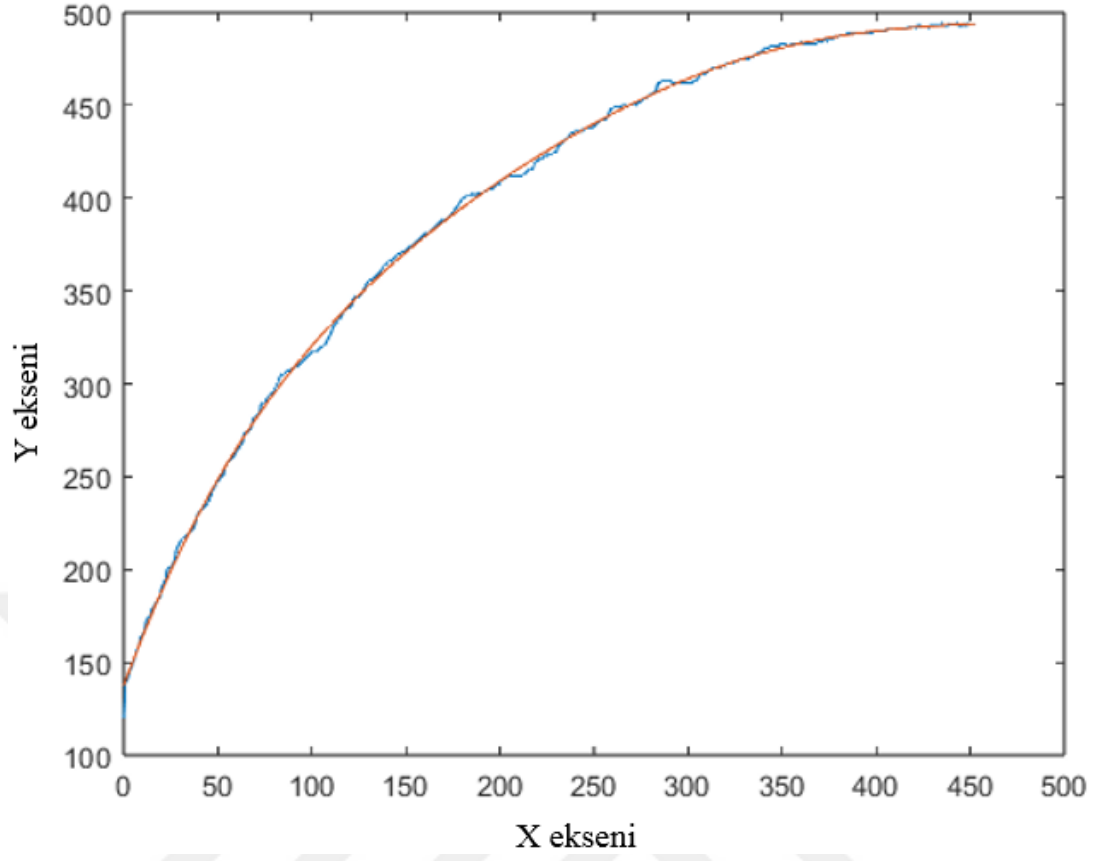
Tablo 4.17. Tukey grupları

Numune	N	Ortalama	Grouping	p
U180	21	26,90	B	<0,05
A250-180	21	26,26	B	
U250	21	31,13	A	

Şekil 4.48'de sinterlenmiş adaptif numunenin herhangi bir açısından alınan resim ve bu resmin siyah beyaz hali gösterilmektedir. Ayrıca bu resimden görüntü işleme ile elde edilen piksel grafiği de verilmiştir (Şekil 4.49). Matlab da hazırlanan yazılımın bu görüntüden elde ettiği pürüzlülük sonucu 22,17 μm 'dir.



Şekil 4.48. Sinterlenmiş adaptif numunenin renkli ve siyah beyaz resmi



Şekil 4.49. Sinterlenmiş A250-180'den görüntü işleme ile elde edilen piksel grafiği (mavi çizgi gerçek yüzey çizgisi iken turuncu çizgi programın oluşturduğu eğriyi temsil etmektedir)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojinin hızla gelişmesi günlük yaşam seyrini, insanların tercihlerini ve beklentilerini sürekli değiştirmektedir. Geleneksel imalat yöntemleri bu ihtiyacı karşılamada bazı alanlarda yetersiz kalmaktadır. Yoğun bir şekilde yaşanan küreselleşme ve teknolojik yenilik hareketleri bütün dünyada rekabeti ciddi oranda artırmış, geleneksel üretim sistemleri yerini bilgi yoğun, Ar-Ge ve inovasyona dayalı yeni nesil üretim sistemlerine bırakmıştır. Üretim sistemlerinde yaşanan bu değişim, rekabetin de boyut değiştirmesine neden olmuştur. Artık rekabet edebilmek için herhangi bir malı veya hizmeti sadece daha düşük maliyetle üretebilmek tek başına yeterli olmayıp verimlilik, kalite, hız ve esneklik gibi hususlar da büyük önem kazanmıştır.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanıcılarına pek çok fırsatlar sunmaktadır. Bu yöntemler ile karmaşık şekillerin, kişiye özgü tasarımların hassasiyetle ve yüksek kalitede üretilmesini mümkündür. Eklemeli imalatta kullanılan yöntemlerin pek çok avantajı olsa da geliştirilmeye açık yönleri de vardır. Bunlar arasında en önemli parametrelerden biri yüzey kalitesidir. Özellikle bağlayıcı püskürtme yönteminde katmanlar arasındaki geçişlerden kaynaklı merdiven etkisinin ortadan kaldırılması veya en az düzeye indirilmesi bilimsel açıdan oldukça önemli bir adım olacaktır. Bu sorunları çözmek için bağlayıcı püskürtme yöntemine adaptif dilimleme uygulanmış ve adaptif dilimlemenin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için DBMA geliştirilmiştir.

5.1. Tartışma

DBMA ve adaptif dilimleme ile farklı üretim parametreleri kullanılarak 18 ve 12 mm çapında yarımküre-çeyrek küre modeller ile kompresör çarkı ve kalite test numuneleri üretilmiştir. Ayrıca, Taguchi deney tasarımı yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Taguchi deney tasarımı koşullarında üretilen deney örneklerinin yüzey pürüzlülük değerleri hem deneysel olarak ve hem de görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında ilk aşama olarak, 3D yazıcıda üretilen yarım küre modeller ile yüzeyde oluşacak merdiven etkisinin incelenmiştir. Bunun için normal (sabit katman kalınlığında-uniform) dilimlenmiş kalın katmanlı (U100) ve adaptif katmanlı (A18:100-44, A12:100-44) olmak üzere üç farklı numune üretilmiştir. U100

numunesinin bütün bölgelerinde sabit katman kalınlığı (100 μm) kullanıldığından dolayı özellikle üst bölgelere yaklaşıldıkça katmanlar arasındaki geçişler ve bundan dolayı oluşan merdiven etkisi çıplak gözle dahi bariz bir şekilde belli olmaktadır (Şekil 4.1). Adaptif dilimleme ile üretilen A18:100-44 numunesinde toplam 156 katmanın ilk 36 tanesi 100 μm iken diğer 120 adet katmanın kalınlığı ise numunenin üst bölgelerine doğru azalacak şekilde oluşmuştur. Adaptif dilimleme ile üretilen 12 çapındaki diğer numune (A12:100-44) ise toplamda 111 katmandan oluşmaktadır. Bu numunede 111 katmandan ilk 31 adeti 100 μm kalınlığında iken diğer geri kalan katmanların kalınlıkları ise numunenin üst bölgelerine doğru azalmaktadır. Deney örnekleri incelendiğinde kullanılan adaptif dilimleme ve geliştirilen DYMA'nın merdiven etkisini ortadan kaldırdığı tespit edilmiştir. Numunelerden alınan SEM görüntülerinde de bu durum daha net olarak tespit edilmiştir. Bu yönüyle kullanılan yöntemler (adaptif dilimleme ve değişken bağlayıcı miktarı algoritması) ilk aşamada belirlenen katman kalınlıkları için başarılı sonuçlar vermiştir.

Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan yazıcı ve yöntemlerin performanslarının tespitinde literatürde kabul görmüş, zor ve farklı detaylara sahip kompresör çarkı ve kalite testi modelleri adaptif dilimleme kullanılarak üretilmiştir. Numunelerdeki katman kalınlık aralığı toz morfolojisi dikkate alınarak daha geniş (400-150 μm) seçilmiştir. Kompresör çarkı 123, kalite testi numunesi ise 215 katmandan oluşmaktadır. Adaptif dilimleme sayesinde örneklerin detay bölgelerinde daha ince katman kullanılırken daha düz veya eğimin daha az olduğu bölgelerde ise daha kalın katman kullanılarak numunelerin başarılı bir şekilde üretilbildiği görülmüştür. Özellikle geliştirilen DBMA sayesinde kompresör çarkı ve kalite testi numunesi gibi karmaşık ve farklı detaylara sahip örnekler geniş katman kalınlığı aralıklarında başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Çalışmada çeyrek küre modeller daha düşük katman aralıklarında üretilmiştir. Çeyrek küre modellerin üretiminde kullanılan tozun partikül boyutları dikkate alınarak kalın katmanlı (A400-150) ve ince katmanlı (A60-28 μm) olmak üzere 2 adet adaptif numune üretilmiştir. Ayrıca kullanılan yöntemlerin etkisini daha net görebilmek için ince katmanlı adaptif dilimlemenin alt (28 μm) ve üst (60 μm) sınırları dikkate alınarak 2 adet sabit katman kalınlıklarında (U28 ve U60) deney numunesi üretilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Adaptif numunelerden A400-150'de toplam 45 katmandan ilk 7 katmanı 400 μm iken diğer katmanlarda kalınlık kademeli olarak

azalmaktadır. SEM görüntülerinde numunenin alt bölgeleri ile üst bölgeleri arasındaki yüzey özelliklerine ait değişim net bir şekilde anlaşılmaktadır. SEM görüntüleri dikkatle incelendiğinde üst bölgelerin daha düzgün bir yüzeye sahip olduğu belirlenmiştir.

Adaptif dilimleme kullanılarak üretilen diğer deney numunesi A60-28'in toplam 242 katmanından ilk 58 katmanı 60 μm kalınlığında olup sonraki katmanların kalınlığı ise kademeli bir şekilde azalarak 28 μm seviyesine inmektedir. U28'in 392, U60'ın ise 183 katmanı vardır. A60-28'de %38 daha az katman kullanılmasına rağmen ince katmanlı deney örneğine (U68) benzer yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Katman kalınlığının azalması ile numunelerin üretim sürelerinin arttığı ve yüzey kalitesinin toz morfolojine bağlı olarak kısmen iyileştiği belirlenmiştir.

A60-28'de yüzey pürüzlülüğünün standart sapması (0,795) normal dilimlenmiş numunelere (U28=2,051; U60=1,559) göre çok daha düşük çıkmıştır. Bu durum incelenen SEM görüntülerinde de anlaşılmaktadır. Bunun nedeni daha önceden de ifade edildiği gibi adaptif dilimlemenin merdiven etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca DMYA algoritmasının kullanılması bu duruma olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Eğer DMYA algoritması kullanılmaz ise ya ince katmanlı bölgelere fazla yapıştırıcı püskürtülecek ve bu nedenle yüzey pürüzlülüğü bozulacak ya da kalın katmanlı bölgelere az yapıştırıcı püskürtülecek ve bu durumda katmanlar arası bağ oluşmayacaktır. Kullanılan tozun morfolojik özellikleri ve boyut dağılımı özellikle U28, U60 ve A60-28 gibi düşük katman kalınlıkları için kaba olmasına rağmen hassas örneklerin üretiminde de kullanılabileceği belirlenmiştir.

Yarımküre ve çeyrek küre modeller literatür ve toz karakteristiği dikkate alınarak farklı doygunluk seviyesi ve katman kalınlığı aralığında herhangi bir optimizasyon çalışması yapılmaksızın üretilmiştir. Mevcut koşullar altında daha mükemmel numuneler üretmek ve sonuçlar elde edebilmek için adaptif dilimlemede en uygun katman kalınlık aralığı ve DBMA de ise en uygun doygunluk oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için hızlı ve ekonomik bir şekilde sonuç vermesi nedeniyle Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi deney tasarımı katman kalınlığı için 150, 225 ve 300 μm ve doygunluk için %50, %60 ve %70 olmak üzere 3'er seviye belirlenmiştir. Her bir koşulda 3'er tekrür olmak üzere 27 adet optimizasyon numunesi üretilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen numunelerin boyutsal değişim (en), yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Deney örneklerinin eni 15 mm olarak tasarlanmış olup elde edilen en ölçümlerinin 15 ile 19,6 mm aralığında olduğu belirlenmiştir. Deney örneklerinin en ölçüsüne ait değerlerin ortalaması 16,05 mm ve standart sapması 1,25'dir. %50 doygunluk oranına sahip numunelerde sapma yaklaşık olarak %0,47 iken doygunluk oranının ve katman kalınlığının artması ile en ölçülerinde ciddi sapmalar meydana geldiği görülmüştür. Veriler incelendiğinde yüksek doygunluğun ve kalın katman kalınlığının artması ile daha fazla bağlayıcı püskürtülmesinden dolayı uygulanan fazla bağlayıcı numune ölçüsünü yanal olarak genişletmektedir. Sonrasında veriler üzerinde yapılan Taguchi analizine göre katman kalınlıkları için en uygun değerin 150 mikron ve doygunluk için ise %50 olduğu tespit edilmiştir.

Taguchi deney tasarımına göre üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğ değerlerinin 15,01-24,01 μm aralığında değiştii bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğ verilerinin ortalaması 19,30 μm , standart sapması ise 1,93 μm 'dir. Taguchi analizine göre katman kalınlığı için en uygun değer 150 μm iken doygunluk için %50 ve %70 olmuştur. Yoğunluk için yapılan Taguchi analizi göre de en uygun katman kalınlık değeri 300 μm , doygunluk ise %60 çıkmıştır.

Taguchi optimizasyon numunelerinin yüzey pürüzlülüğ değerleri görüntü işleme yöntemi ile belirlenerek deneysel ölçümler ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda hesaplanan MAPE değerlerin 17,18 olarak bulunmuştur. Görüntü işleme ile elde edilen verilerin deneysel olarak ölçülen veriler ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğ, yoğunluk ve boyutsal değişim için yapılan Taguchi analizleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde en uygun üretim koşullarına katman kalınlığı için 180-250 μm aralığı, doygunluk oranı için ise %50 olarak karar verilmiştir. Belirlenen bu optimum koşullar için farklı detaylara sahip yeni bir model tasarlanmış ve 1 adaptif, 2 normal dilimli olmak üzere 3 adet numune üretilmiştir. Adaptif numunenin (A250-180) katman kalınlık aralığı optimizasyon sonucunda da belirlendiği gibi 180-250 μm arasındadır. Normal dilimlemiş diğer numunelerin (U180 ve U250) katman kalınlıkları ise sırasıyla 180 ve 250 μm 'dir. Üretilen numunelerden A250-180'nin katman sayısı 178'dir. U180'in katman sayısı 203 iken, U250'nin katman sayısı 140'dır.

A250-180, U180 ve U250'nin sinterlenmemiş ve sinterlenmiş hallerinin yüzey

pürüzlülük ölçümleri görüntü işleme yöntemiyle belirlenmiştir. Her bir numuneden ölçüm alınan tüm yüzeyi temsil edecek şekilde farklı açılardan 21'er adet görüntü alınmıştır. Sinterlenmemiş ve sinterlenmiş durumlardaki ölçümlerde U180 (sinterlenmemiş = 42,79 μm ve sinterlenmiş = 26,90 μm) ve A250-180'nin (sinterlenmemiş = 42,38 μm ve sinterlenmiş = 26,26 μm) pürüzlülük değerleri birbirine çok yakın çıkmış olup U250'den (sinterlenmemiş = 53,70 μm ve sinterlenmiş = 31,13 μm) daha düşüktür. Elde edilen sonuçlar bulgular kısmında da ifade edildiği gibi öngörüldüğü şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum yapılan istatistiki analiz sonuçlarında da görülmektedir. Verilerin istatistiksel analizleri yapıldığında sinterlenmemiş ve sinterlenmiş verilerin hepsinde A250-180 ve U180 aynı grupta iken U250 farklı grupta çıkmıştır. Yani adaptif dilimleme ve DBMA sayesinde A250-180'de U180'e göre %12,31 daha az katman kullanılarak benzer pürüzlülük sonucu elde edilmiştir. A250-180 ve U180'nin pürüzlülük değerleri ise U250'den daha düşüktür.

Sonuç olarak merdiven etkisini azaltarak iyi yüzey kalitesine sahip örnekleri çok daha kısa sürede imal etmek için bağlayıcı püskürtme yöntemine adaptif dilimleme uygulanmış ve adaptif dilimlemenin verimli bir şekilde kullanılması için de DBMA geliştirilmiştir. Adaptif dilimleme bağlayıcı püskürtme yöntemine ilk defa uygulanmış olup başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Adaptif dilimlemenin başarılı olmasında DBMA'nın rolü çok büyüktür. Adaptif dilimlemede katman kalınlıkları değişken olduğu için farklı kalınlıklardaki katmanlara aynı miktarlarda bağlayıcı gönderilmemelidir. DBMA farklı kalınlıklardaki katmanlara gerekli miktarda bağlayıcı gönderilmesini sağlamak ve bu sayede çok geniş kalınlık aralıklarında üretim gerçekleştirilebilmektedir. Geniş katman kalınlığı aralığı sayesinde de daha kısa üretim sürelerinde kaliteli numuneler üretilebileceği görülmüştür.

Eklemeli imalat yöntemleri özellikle basit parçaların üretiminde geleneksel imalat yöntemlerine göre yavaş kalabilmektedir. Adaptif dilimleme ve DBMA'nın uygulanması üretim sürelerini kısaltacağı için bağlayıcı püskürtme metodunun hem diğer eklemeli imalat hem de geleneksel imalat yöntemlerine göre kullanımını arttıracaktır. Ayrıca adaptif dilimlemenin ve DBMA'nın bağlayıcı püskürtme tekniğinde ilk defa uygulanmasıyla bu alanda yen bir kapı açılmıştır. Yapılan bu öncü çalışma, adaptif dilimleme ve bağlayıcı püskürtme ile ilgili araştırmaların artmasını sağlayacaktır.

5.2. Öneriler

Adaptif dilimleme ve DBMA bağlayıcı püskürtme tekniğinde ilk defa uygulandığı için bu alanda yapılması gereken çok fazla çalışma bulunmaktadır. Yapılabilecek çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir. Bunlar;

- Bağlayıcı püskürtme yöntemi için yeni bir dilimleme programı geliştirilebilir. Çünkü, bağlayıcı püskürtme için adaptif dilimlemeyi içeren bir dilimleme programı henüz yoktur. Tez kapsamında kullanılan Slic3r dilimleme programı FFF yöntemleri için kullanılan bir programdır. Bu programdan elde edilen g-kod dosyası nihai dosya olmayıp ek bir program ile yeni bir g-kod dosyası elde edilmesi gerekmektedir. Elde edilen son g-kod dosyası ise her zaman hatalı olmakta ve gerekli yerlerin manuel olarak düzeltilmesi gerekmektedir. Bu durum süreci çok uzatmakta, zaman kaybına neden olmakta ve tasarımda bazı kayıplar oluşturmakta ve bundan dolayı kullanışlı değildir. Bunun için bağlayıcı püskürtme yönteminde adaptif dilimlemeyi kapsayacak yeni bir dilimleme programı geliştirilebilir.

- DBMA algoritması daha da geliştirilerek katman kalınlığı aralığı genişletilebilir. Katman kalınlığı aralığının genişletilmesi üretim sürelerini daha da kısalabilir.

- Yapılan tezde baskı hızı, toz serme hızı, silindir devri gibi bazı parametreler sabit tutulmuştur. İleriki aşamalarda bu ve eklenecek farklı parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak gri ilişkisel analizi gibi yöntemlerle optimum baskı koşulları araştırılabilir.

- Kullanılan ticari tozun morfolojik özellikleri çok kaliteli değildir. Daha kaliteli tozlar kullanmak adaptif dilimleme ve DBMA'nın daha etkili sonuçlar vermesini sağlanabilir. Dolayısıyla iyi morfolojik özelliklere sahip tozlar kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir. Morfolojik özelliklerin dışında farklı malzemeler de kullanılabilir.

- Kullanılan makinanın yazıcı kafasının çözünürlüğü düşüktür (96 DPI). Adaptif dilimleme ve DBMA yüksek çözünürlüklü yazıcı kafalarına sahip (1200 DPI, 1600 DPI) ticari yazıcılarda denenebilir ya da yüksek çözünürlüğe sahip yazıcı kafası kullanılarak özel tasarım bir 3B yazıcı yapılabilir. Yüksek çözünürlüğe sahip yazıcı kafaları kullanarak adaptif dilimleme ve DBMA'nın etkinliği daha da artırılabilir.

-Çalışmada kullanılan görüntü işleme yöntemi üzerinde çalışmalar daha da

geliştirilerek yöntemin tahmin doğruluğu arttırılabilir. Görüntü elde etmek için daha iyi düzenekler kurularak daha sağlıklı resimler elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abhilash, P. M., and Ahmed, A. (2023). An image-processing approach for polishing metal additive manufactured components to improve the dimensional accuracy and surface integrity. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(7-8), 3363-3383. doi:10.1007/s00170-023-10916-1
- Ada, H. (2017). *API borularının kaynaklı birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, 274, Ankara.
- Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B., and Fang, M. (2016). Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240-252. doi:10.1007/s40962-016-0027-5
- Alpay, Y. A. (2020). *Kızılötesi ısıtma ile kürlenen karbon fiber katkılı kompozit malzemede taguchi yöntemi kullanılarak optimum kür çevriminin belirlenmesi*. Doktora Tezi. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 110, Düzce.
- Anonymous, (2019). *SOOTHING SCIENCE: Binder Jet 3D printing*. <https://www.youtube.com/watch?v=qFBf00KtiBM> (Retrieved: 08.04.2023)
- Anonymous (2022a). 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS. Retrieved 10 Haziran, 2023, from <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>
- Anonymous (2022b). Additive manufacturing for a Camera Head Unit (CHU) bracket. Retrieved 8 Haziran, 2023, from https://www.trumpf.com/en_GB/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-fusion/use-case-star-tracker/
- Anonymous, (2023). HP C6602A TIJ 1.0 Black Ink Cartridge. <https://www.arrayink.com/hp-c6602a-tij-1-0-black-ink-cartridge.html> (Retrieved: 19.3.2023)
- ASTM. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. In. *West Conshohocken, PA: ASTM International*. Retrieved April 11, 2019, from <https://www.astm.org/f2792-12a.html>
- Babu, A. R. (2023, 2023//). “A Machine Learning Approach for Prediction of Surface Roughness from the Images of Machined Components”. *Advances in Forming, Machining and Automation* (pp. 405-416). Singapore: Springer.
- Bae, C.-J., and Halloran, J. W. (2018). A segregation model study of suspension-based additive manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(15), 5160-5166. doi:https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.008
- Baker, R. (1920). “Method of making decorative articles”. United States Patent No. 1,533,300. U. S. P. Office.
- Bartolo, P. J., and Gaspar, J. (2008). Metal filled resin for stereolithography metal part. *CIRP Annals*, 57(1), 235-238. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.124
- Baş, H., Yapıcı, F. and İnanç, İ. 2023. Using adaptive slicing method and variable binder amount algorithm in binder jetting. *Rapid Prototyping Journal*, ahead-of-print:ahead-of-print. doi: 10.1108/RPJ-11-2022-0372
- Bhushan, B., and Caspers, M. (2017). An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, 23(4), 1117-1124. doi:10.1007/s00542-017-3342-8

- Bourella, D. L., Beaman, J. J., Leub, M. C., and Rosenc, D. W. (2009). *History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing : Looking Back and Looking Ahead*. Paper presented at the US – TURKEY Workshop On Rapid Technologies.
- Budding, A., Vaneker, T. H. J., and Winnubst, A. J. A. (2013). Open Source Powder based Rapid Prototyping Machine for Ceramics. *Procedia CIRP*, 6, 533-538. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.101>
- Butscher, A., Bohner, M., Doebelin, N., Galea, L., Loeffel, O., and Müller, R. (2013). Moisture based three-dimensional printing of calcium phosphate structures for scaffold engineering. *Acta Biomaterialia*, 9(2), 5369-5378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.10.009>
- Cai, W., Zhang, Y., Li, L., Peng, T., Lai, K.-h., and Wiercigroch, M. (2023). Cutting mechanics and efficiency of forward and reverse multidirectional turning. *International Journal of Mechanical Sciences*, 242, 108031. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.108031>
- Cao, S., Xie, F., He, X., Zhang, C., and Wu, M. (2020). Postprocessing Study for the Controllable Structures of Ceramic Green Parts Realized by a Flexible Binder Jetting Printing (BJP) Solution. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 3865752. doi:10.1155/2020/3865752
- Chebrolu, V., Koon, R., and Raju, R. S. U. (2023). Automated Evaluation of Surface Roughness using Machine Vision based Intelligent Systems. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 82(1), 11-25. doi:10.56042/jsir.v82i1.69946
- Chen, Q., Juste, E., Lasgorceix, M., Lefebvre, G., Tenailleau, C., Duployer, B., Grossin, D., Petit, F., and Leriche, A. (2022). Post-infiltration to improve the density of binder jetting ceramic parts. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(15), 7134-7148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.005>
- Chen, Q., Juste, E., Lasgorceix, M., Petit, F., and Leriche, A. (2022). Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters. *Open Ceramics*, 9, 100218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100218>
- Claire, S. (2023). Everything You Need To Know About Support Structures In 3D Printing. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.3dnatives.com/en/support-structures-in-3d-printing-120420234/#!>
- Dağdevir, T. (2020). *Nanoakışkan kullanarak ve iç eleman yerleştirilmiş düz yatay boruda ısı transferinin Taguchi yöntemi yardımıyla araştırılması*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 211, Kayseri.
- Deng, F., Nguyen, Q.-K., and Zhang, P. (2020). Multifunctional liquid metal lattice materials through hybrid design and manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33, 101117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101117>
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., and Marzola, A. (2017). Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9), 3655-3662. doi:10.1007/s00170-017-0763-6
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., and van Duin, S. (2016). Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 139-150. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.002>
- Dolenc, A., and Mäkelä, I. (1994). Slicing procedures for layered manufacturing techniques. *Computer-Aided Design*, 26(2), 119-126. doi:[https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90032-9)

- Du, W., Ren, X., Ma, C., and Pei, Z. (2019). Ceramic binder jetting additive manufacturing: Particle coating for increasing powder sinterability and part strength. *Materials Letters*, 234, 327-330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.118>
- Ederer, I., and Hartmann, A. D. (2013). "Method for producing three-dimensional models with special construction platforms and drive systems". Germany Patent No. DE 10 2012 010 272 A1
- Elfarah, T. T. K. (2018). *Magnezyum matrisli karbür takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretiminin Taguchi metodu ile optimizasyonu*. Doktora Tezi. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 163, Kastamonu.
- Fu, H., Yang, H., and Chen, C. (2023). Real-Time 3D Reconstruction of Large-Scale Scenes with LOD Representation. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 37(2). doi:10.1142/S0218001423550017
- Ghazanfari, A., Li, W., Leu, M. C., and Landers, R. G. (2015, August). "Planning Freeform Extrusion Fabrication Processes with Consideration of Horizontal Staircase Effect". *The Twenty-Sixth Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium*, Austin, Texas.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer Nature.
- Gonzalez, J. A., Mireles, J., Lin, Y., and Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.079>
- Hafkamp, T., van Baars, G., de Jager, B., and Etman, P. (2018). A feasibility study on process monitoring and control in vat photopolymerization of ceramics. *Mechatronics*, 56, 220-241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.006>
- He, Y., Xue, G.-h., and Fu, J.-z. (2014). Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. *Scientific Reports*, 4(1), 6973. doi:10.1038/srep06973
- Hernández, F., and Fragoso, A. (2022). Fabrication of a Stainless-Steel Pump Impeller by Integrated 3D Sand Printing and Casting: Mechanical Characterization and Performance Study in a Chemical Plant. *Applied Sciences*, 12(7), 3539.
- Hope, R. L., Roth, R. N., and Jacobs, P. A. (1997). Adaptive slicing with sloping layer surfaces. *Rapid Prototyping Journal*, 3(3), 89-98. doi:10.1108/13552549710185662
- Huang, S., Ye, C., Zhao, H., and Fan, Z. (2019). Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting. *Additive Manufacturing*, 29, 100802. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100802>
- Hull, C. W. (1984). "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography". United States Patent No. 4,575,330. U. S. Patent.
- Jackson, B. (2017). Prusa levels FFF 3D prints with smooth variable layer height add-on for Slic3r. Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/news/prusa-levels-fff-3d-prints-smooth-variable-layer-height-add-slic3r-108633/>
- Javidi, M. J., Hosseini, S. M., Khodabakhshi, F., Mohammadi, M., Orovci, L., Nagy Trembošová, V., Nagy, S., and Nosko, M. (2023). Laser powder bed fusion of 316L stainless steel/Al₂O₃ nanocomposites: Taguchi analysis and material characterization. *Optics and Laser Technology*, 158, 108883. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108883>
- Jayawardane, H., Davies, I. J., Gamage, J. R., John, M., and Biswas, W. K. (2022). Investigating the 'techno-eco-efficiency' performance of pump impellers: metal 3D

- printing vs. CNC machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9), 6811-6836. doi:10.1007/s00170-022-09748-2
- Kapil, S., Joshi, P., Kulkarni, P. M., Negi, S., Kumar, R., and Karunakaran, K. P. (2018). Elimination of support mechanism in additive manufacturing through substrate tilting. *Rapid Prototyping Journal*, 24(7), 1155-1165. doi:10.1108/RPJ-07-2017-0139
- Kelly, B. E., Bhattacharya, I., Heidari, H., Shusteff, M., Spadaccini, C. M., and Taylor, H. K. (2019). Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction. *Science*, 363(6431), 1075-1079. doi:doi:10.1126/science.aau7114
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three- dimensional plastic model with photo- hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770-1773. doi:10.1063/1.1136492
- Kulkarni, P., and Dutta, D. (1996). An accurate slicing procedure for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 28(9), 683-697. doi:https://doi.org/10.1016/0010-4485(95)00083-6
- Kumar, N., Bhavsar, H., Mahesh, P. V. S., Srivastava, A. K., Bora, B. J., Saxena, A., and Dixit, A. R. (2022). Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, 285, 126144. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144
- Lee, G., Carrillo, M., McKittrick, J., Martin, D. G., and Olevsky, E. A. (2020). Fabrication of ceramic bone scaffolds by solvent jetting 3D printing and sintering: Towards load-bearing applications. *Additive Manufacturing*, 33, 101107. doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101107
- Li, H., Liu, Y., Liu, Y., Zeng, Q., Hu, K., Lu, Z., Liang, J., and Li, J. (2021). Influence of debinding holding time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramic cores. *Ceramics International*, 47(4), 4884-4894. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.061
- Li, M., Miao, G., Du, W., Pei, Z., and Ma, C. (2022). Difference between powder bed density and green density for a free-flowing powder in binder jetting additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 448-456. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.030
- Lores, A., Azurmendi, N., Agote, I., Espinosa, E., and García-Blanco, M. B. (2022). A study of parameter and post-processing effects on surface quality improvement of Binder Jet 3D-printed Invar36 alloy parts. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(5), 917-930. doi:10.1007/s40964-022-00267-w
- Loterie, D., Delrot, P., and Moser, C. (2020). High-resolution tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature Communications*, 11(1), 852. doi:10.1038/s41467-020-14630-4
- Lowder, A. (2017). Viridis3D Shows Off the Digital Foundries of the Future. Retrieved January 26, 2023, from <https://www.3dprintingmedia.network/viridis3d-shows-off-digital-foundries-future/>
- Lu, K., and Reynolds, W. T. (2008). 3DP process for fine mesh structure printing. *Powder Technology*, 187(1), 11-18. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.12.017
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., and Liu, Y. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609-12624. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012
- Mahashar Ali, J., Siddhi Jailani, H., and Murugan, M. (2023). “Speckle Image-Based Surface Roughness Parameter Characterization of Milled Surfaces”. *Recent Trends in Product Design and Intelligent Manufacturing Systems* (pp 623–632). Singapore: Springer.

- Maleksaeedi, S., Eng, H., Wiria, F. E., Ha, T. M. H., and He, Z. (2014). Property enhancement of 3D-printed alumina ceramics using vacuum infiltration. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7), 1301-1306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.01.019>
- Mani, K., Kulkarni, P., and Dutta, D. (1999). Region-based adaptive slicing. *Computer-Aided Design*, 31(5), 317-333. doi:[https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(99\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(99)00033-0)
- Manotham, S., Channasanon, S., Nanthananon, P., Tanodekaew, S., and Tesavibul, P. (2021). Photosensitive binder jetting technique for the fabrication of alumina ceramic. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 313-322. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.011>
- Manotham, S., and Tesavibul, P. (2022). Effect of particle size on mechanical properties of alumina ceramic processed by photosensitive binder jetting with powder spattering technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(4), 1608-1617. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.11.062>
- Mao, Y., Li, J., Li, W., Cai, D., and Wei, Q. (2021). Binder jetting additive manufacturing of 316L stainless-steel green parts with high strength and low binder content: Binder preparation and process optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 117020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117020>
- Mariani, M., Beltrami, R., Brusa, P., Galassi, C., Ardito, R., and Lecis, N. (2021). 3D printing of fine alumina powders by binder jetting. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), 5307-5315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.006>
- MatterHackers, (2023). 3D Phil. Retrieved January 2, 2023, from <https://www.matterhackers.com/store/l/matterhackers-mascot-phil-ament/sk/M6DV4FS2>
- Mendoza Jimenez, E., Ding, D., Su, L., Joshi, A. R., Singh, A., Reeja-Jayan, B., and Beuth, J. (2019). Parametric analysis to quantify process input influence on the printed densities of binder jetted alumina ceramics. *Additive Manufacturing*, 30, 100864. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100864>
- Miao, G., Du, W., Moghadasi, M., Pei, Z., and Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of granulation on properties of feedstock powder and printed and sintered parts. *Additive Manufacturing*, 36, 101542. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101542>
- Miao, G., Moghadasi, M., Du, W., Pei, Z., and Ma, C. (2022). Experimental investigation on the effect of roller traverse and rotation speeds on ceramic binder jetting additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 887-894. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.039>
- Mirzababaei, S., and Pasebani, S. (2019). A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 82.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., and Semprimoschnig, C. (2018). Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.038>
- Modi, Y. K., and Sahu, K. K. (2021). Process parameter optimization for porosity and compressive strength of calcium sulfate based 3D printed porous bone scaffolds. *Rapid Prototyping Journal*, 27(2), 245-255. doi:10.1108/RPJ-04-2020-0083
- Moghadasi, M., Miao, G., Li, M., Pei, Z., and Ma, C. (2021). Combining powder bed compaction and nanopowders to improve density in ceramic binder jetting additive manufacturing. *Ceramics International*, 47(24), 35348-35355. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.077>

- Mohan, P., PulakVenkata Reddy, N., and Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 274-288. doi:10.1108/13552540310502185
- Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N., and Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 274-288. doi:10.1108/13552540310502185
- Momeni, A., Torkan, M., Azhari, A., Uotinen, L., and Baghbanan, A. (2023b). Evaluation of surface roughness of rock-like joints using close range photogrammetry method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1124(1), 012062. doi:10.1088/1755-1315/1124/1/012062
- Montaño Moreno, J. J., Palmer Pol, A., Sesé Abad, A., and Cajal Blasco, B. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*, 25(4), 500-506. doi:10.7334/psicothema2013.23
- Morouço, P., Biscaia, S., Viana, T., Franco, M., Malça, C., Mateus, A., Moura, C., Ferreira, F. C., Mitchell, G., and Alves, N. M. (2016). Fabrication of Poly(ε-caprolactone) Scaffolds Reinforced with Cellulose Nanofibers, with and without the Addition of Hydroxyapatite Nanoparticles. *BioMed Research International*, 2016, 1596157. doi:10.1155/2016/1596157
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., and Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707. doi:https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707
- Munz, O. J. (1951). “Photo-Glyph Recording”. United States Patent No. 2,775,758, 1956
- Nageshwar, R. P., Chandrasekar, M., and Dillibabu, M. (2001). *Adaptive Slicing with Sloping Layer Surfaces in Rapid Prototyping*. SAE Technical Papers, 2001-28-0072.
- Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H., and 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:https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.002
- Ni, J., Yuan, Y., Cui, Z., Lou, B., and He, L. (2023). Investigation of machinability in turning of PTFE based on MRR and cutting energy. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 122-131. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.030
- Oropeza, D., and Hart, A. J. (2021). Reactive binder jet additive manufacturing for microstructural control and dimensional stability of ceramic materials. *Additive Manufacturing*, 48, 102448. doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102448
- Ou, Y., Cao, S., Zhang, Y., Zhu, H., Guo, C., Yan, W., Xin, F., Dong, W., Zhang, Y., Narita, M., Yu, X., and Knowles, T. P. J. (2023). Bioprinting microporous functional living materials from protein-based core-shell microgels. *Nature Communications*, 14(1), 322. doi:10.1038/s41467-022-35140-5
- Pan, H. C., Pan, J. W., and Chang, K. D. (2022). Prediction of surface roughness in different machining methods using a texture mask feature extraction method. *Applied Optics*, 61(36), 10637-10643. doi:10.1364/AO.475290
- Peng, L., Jiang, W., Yang, L., Chen, Z., Li, G., Guan, F., and Fan, Z. (2022). Effect of silica sol on performance and surface precision of alumina ceramic shell prepared by binder jetting. *Ceramics International*, 48(17), 24372-24382. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.021

- Pham, D. T., and Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10), 1257-1287. doi:[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- Pulipaka, A., Gide, K. M., Beheshti, A., and Bagheri, Z. S. (2023). Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 368-386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.057>
- Raghavan, S., Dzugan, J., Rzepa, S., Podany, P., Soh, N., Hao, L. J., and Khan, N. (2022). Effect of post-treatment on local mechanical properties of additively manufactured impellers made of maraging steel. *Rapid Prototyping Journal, ahead-of-print*(ahead-of-print). doi:10.1108/RPJ-03-2022-0089
- Renaux, M., Méresse, D., Pellé, J., Thuault, A., Morin, C., Nivot, C., and Courtois, C. (2021). Mechanical modelling of microwave sintering and experimental validation on an alumina powder. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(13), 6617-6625. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.06.013>
- Repetier. (2020). Firmware for Arduino based RepRap 3D printer. Retrieved from <https://github.com/repetier/Repetier-Firmware>
- Ross, N. S., Sheeba, P. T., Shibi, C. S., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., and Sharma, V. S. (2023). A novel approach of tool condition monitoring in sustainable machining of Ni alloy with transfer learning models. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-023-02074-8
- Sabourin, E., Houser, S. A., and Böhn, J. H. (1996). Adaptive slicing using stepwise uniform refinement. *Rapid Prototyping Journal*, 2(4), 20-26. doi:10.1108/13552549610153370
- Sachs, E. M., Haggerty, J. S., Cima, M. J., and Williams, P. A. (1993). "Three-dimensional printing techniques". United States Patent No. 5,204,055. U. S. Patent.
- Sahu, K. K., and Modi, Y. K. (2022). Multi response optimization for compressive strength, porosity and dimensional accuracy of binder jetting 3D printed ceramic bone scaffolds. *Ceramics International*, 48(18), 26772-26783. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.375>
- Sama, S. R., Badamo, T., Lynch, P., and Manogharan, G. (2019). Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing. *Additive Manufacturing*, 25, 563-578. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.009>
- Sivarupan, T., Upadhyay, M., Ali, Y., El Mansori, M., and Dargusch, M. S. (2019). Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds. *Journal of cleaner production*, 224, 411-420.
- Slic3r. (2020). Open source 3D printing toolbox. Retrieved from <https://slic3r.org/>
- Snelling, D., Li, Q., Meisel, N., Williams, C. B., Batra, R. C., and Druschitz, A. P. (2015). Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds. *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 923-932. doi:<https://doi.org/10.1002/adem.201400524>
- Sun, Y., Wang, L., Ni, Y., Zhang, H., Cui, X., Li, J., Zhang, S., Chen, Y., and Li, M. (2023). 3D printing of thermosets with diverse rheological and functional applicabilities. *Nature Communications*, 14(1), 245. doi:10.1038/s41467-023-35929-y
- Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design, Quality Resources*. New York: UNIPUB/Kraus International Publications
- Taguchi, G., and Konishi, S. (1992). *Taguchi methods, research and development*. American Supplier Institute in conjunction with the Japanese Standards Association.

- Tang, Z., Chen, G., Han, Y., and Zhu, Y. (2022, May). "An Dynamic Adaptive Slicing Algorithm Based on Improved Greedy Algorithm". *3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning and International Conference on Computer Engineering and Applications*, CVIDL and ICCEA 2022, Changchun
- Taphasanoğlu, S. (2020). *Çok yanıtli problemlere sürekli-sürekli kalite karakteristikleri için dinamik Taguchi yöntemi yaklaşımı*. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 261, Kocaeli.
- Tethon3D, (2019). Tethonite High Alumina Ceramic Powder. Retrieved August 18, 2020, from <https://tethon3d.com/product/tethonite-high-alumina-ceramic-powder/>
- Tethon3D, (2020). Ferrolite Iron Resin – 500ml. Retrieved August 18, 2020, from <https://tethon3d.com/product/ferrolite-iron-resin-500ml/>
- Utela, B. R., Storti, D., Anderson, R. L., and Ganter, M. (2010). Development Process for Custom Three-Dimensional Printing (3DP) Material Systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(1). doi:10.1115/1.4000713
- Ülker, A. (2015). *Yüksek yoğunluklu polietilen polimer malzemenin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırılması ve kaynak parametrelerinin taguchi deneysel tasarım yöntemi ile optimizasyonu*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 300, İzmir.
- van Nisselroy, C., Shen, C., Zambelli, T., and Momotenko, D. (2022). Electrochemical 3D printing of silver and nickel microstructures with FluidFM. *Additive Manufacturing*, 53, 102718. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102718>
- Vogt, J., Friedrich, H., Stepanyan, M., Eckardt, C., Lam, M., Lau, D., Chen, B., and Chan, J. (2022). Improved green and sintered density of alumina parts fabricated by binder jetting and subsequent slurry infiltration. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(2), 161-171. doi:10.1007/s40964-021-00222-1
- Wang, J., Sama, S. R., and Manogharan, G. (2019). Re-Thinking Design Methodology for Castings: 3D Sand-Printing and Topology Optimization. *International Journal of Metalcasting*, 13(1), 2-17. doi:10.1007/s40962-018-0229-0
- Wang, Z., Wu, Y., Zhu, B., Chen, Q., Wang, L., Zhao, Y., Sun, D., Zheng, J., and Wu, D. (2023). A magnetic soft robot with multimodal sensing capability by multimaterial direct ink writing. *Additive Manufacturing*, 61, 103320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103320>
- Wasserfall, F., Hendrich, N., and Zhang, J. (2017, August). "Adaptive slicing for the FDM process revisited". *13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Xi'an.
- Willème, F. (1864). "Photographing sculpture". United States Patent No. 43,822. U. S. Patent.
- Xu, J., Gu, X., Ding, D., Pan, Z., and Chen, K. (2018). A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(6), 1012-1025. doi:10.1108/RPJ-10-2017-0196
- Yang, R., Wang, Y., Liao, S., and Guo, P. (2023). DPPS: A deep-learning based point-light photometric stereo method for 3D reconstruction of metallic surfaces. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 210. doi:10.1016/j.measurement.2023.112543
- Ytec. (2014a). Plan B. Retrieved May 4, 2018, from <https://ytec3d.com/plan-b/>
- Ytec. (2014b). Software for Plan-B. Retrieved from <https://ytec3d.com/plan-b-software/>

- Yu, T., Zhao, Z., and Li, J. (2022). Effect of sintering temperature and sintering additives on the properties of alumina ceramics fabricated by binder jetting. *Ceramics International*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.172>
- Zhang, F., Cao, K., Zaeri, A., Zgeib, R., Buckley, C., Ma, Y., and Chang, R. C. (2023). Design, fabrication, and characterization of tubular scaffolds by way of a melt electrowriting process. *Additive Manufacturing*, 62, 103383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103383>
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J., and Zhang, J. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13. doi:[10.1007/s11665-017-2747-y](https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y)
- Zhou, Z., Mitchell, C. A., Buchanan, F. J., and Dunne, N. J. (2013). Effects of Heat Treatment on the Mechanical and Degradation Properties of 3D-Printed Calcium-Sulphate-Based Scaffolds. *ISRN Biomaterials*, 2013, 750720. doi:[10.5402/2013/750720](https://doi.org/10.5402/2013/750720)



EKLER

Ek 1

```
1      % Puruzluluk olcme yazilimi
2      clear all;
3      % Kaynak resim: Asrc
4      Asrc=imread ('C:resim.png');
5      % Kaynak görüntüde B(mavi) degerin 150'yi gectigi alan ROC
6      Abin=Asrc(:,:,3)>150;
7      % ROC disindaki parcalari temizleyelim (500 pikselden kucukler)
8      Abin=bwareaopen(Abin,500);
9      [sat, sut]=size(Abin);
10     imshow(Abin);
11     % X eksenini olusturalim
12     X=[0:sut-1];
13     % Y eksenini olusturalim (asagi indikce azalmali)
14     % Yfrm ardisil 0 -(sut-1) araligindaki sutunlar kumesi
15     for i=1:sut
16         Yfrm(:,i)=[sat-1:-1:0]';
17     end
18     % Yfrm ile binary sinir carpilince görüntüyü temsileden Y degerleri kalir
19     Y=max(Abin.*Yfrm);
20     figure
21     plot(X,Y)
22     % M sistemin derecesi
23     M=1;
24     A=polyfit(X,Y,M);
25     Yt = polyval(A,X);
26     hold on
27     plot(X,Yt)
28     % HATA HESABI:
29     % Egrinin turev vektorunu bulalim
30     Ad =polyder(A);
31     % Her X degeri için turev vektorunu uygulayalim
32     Egim = polyval(Ad,X);
33     Efakt = cos(atan(Egim));
34     % hata: ortalama hata, toplam taha / mesafe
35     hata = sum( Efakt.*(abs(Y-Yt)) )/(sut-1);
36     % W: Kumpas ile olculen ebat (mm cinsinden)
37     % P: Olculen boyutun kirpilmis piksel sayisi
38     % 1000*hata*W/P mikron cinsinden puruzluluk
39     W=21.11;
40     P=1011;
41     mikronhata = 1000*hata*W/P;
```

ÖZ GEÇMİŞ

Hasan BAŞ Samsun Huriye Süer Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünden 16.06.2011 tarihinde mezun oldu. 2016 yılında OMÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programını bitirdi. 2017 yılında ise OMÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Akıllı Sistemler Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programını bitirdi. 2017 yılında OMÜ LEE Hesaplamalı Bilimler Ana Bilim Dalı Doktora programına başladı. 2015 yılından bu yana araştırma görevlisi olarak görev yapan Hasan Baş, iyi derecede İngilizce bilmektedir. Temel ilgi alanı mühendisliktir. (19.06.2023).

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0001-5214-3394

Yayınlar:

1. Bas, H., Yapıcı, F. and Inanc, I. 2023. Using adaptive slicing method and variable binder amount algorithm in binder jetting. *Rapid Prototyping Journal*. Doi: 10.1108/RPJ-11-2022-0372
2. Baş, H., Yapıcı, F. ve İnanc, İ. 2022. Yapışkan püskürtme yönteminde üretim parametrelerinin önemi ve örnek uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10:4, 1354-1361.
3. Taşdemir, N., Yapıcı, F., Baş, H. ve Furugi, A. 2021. Sağlık sektöründe yalın felsefe. *Samsun Sağlık Bilimleri Dergisi*, 6:1, 11-17
4. Baş, H. ve Yapıcı, F. 2020. İş istasyonlarında çalışanlarda zorlanmaya neden olan duruşların ergonomik açıdan irdelenmesi: örnek uygulama. *Ergonomi*, 3:3, 128-137.
5. Baş, H., Elevli, S. and Yapıcı, F. 2019. Fault Tree Analysis for Fused Filament Fabrication Type Three-Dimensional Printers. *Journal of Failure. Analysis and Prevention*, 19, 1389–1400.
6. Baş, H. , Sönmez, H. A. , Öztürk, H. ve Yapıcı, F. (2018). Çalışma duruşunun kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına etkileri ve örnek uygulama. *Ergonomi*, 1:2, 103-107.
7. Bas, H. and Keleş. 2015. Novel approach to transient thermal stress in an annular fin. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 29: 4, 705–710.

8. Yapıcı, F., Esen, R., Erkeymaz, O. ve Baş, H. 2015. Modeling of compressive strength parallel to grain of heat treated scotch pine *pinus sylvestris* L wood by using artificial neural network. *Drvna industrija*, 66:4, 347–352
9. Yapıcı, F. ve Baş, H. 2015. Verimlilikte ergonomik faktörler. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3:3, 591-595.
10. Baş, H. ve Yapıcı, F. (2015). Ergonomik tasarım ve üretimde hızlı prototipleme teknolojisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3:3, 199-204.

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. İstanbul Uluslararası Buluş Fuarı ISIF 2023 Bronz Madalya (Yapışkan Püskürtme Tekniğinde Adaptif Dilimleme ve Değişken Yapışkan Püskürtme Yöntemi)

Patent ve Faydalı Modeller

1. Baş, H. 2018. Piezoelektrik Enerji Paneli. Türk Patent Enstitüsü Başvuru No: 2018/11767
2. Baş, H. ve Yapıcı, F. 2019. Toz Fotopolimerizasyon Yöntemi. Türk Patent Enstitüsü Başvuru No: 2019/16625
3. Baş, H. 2019. Kübik Bor Nitrür Kesici Takım İmalat Yöntemi. Türk Patent Enstitüsü Başvuru No: 2019/16625
4. Baş, H., Yapıcı, F. ve İnanç, İ. 2022. Yapışkan Püskürtme Tekniğinde Adaptif Dilimleme ve Değişken Yapışkan Püskürtme Yöntemi. Türk Patent Enstitüsü Başvuru No: 2022/009076
5. Baş, H. 2022. Üç Boyutlu Baskı Cihazı ve Bunun Çalışma Yöntemi. Türk Patent Enstitüsü Başvuru No: 2022/ 021814