



**SLE YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN EKLEMELİ İMALAT PARÇALARININ
SERİ ÜRETİME UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Fatih ŞAHİNER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Fatih ŞAHİNER

19/01/2024

SLE YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN EKLEMELİ İMALAT PARÇALARININ SERİ ÜRETİME UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Fatih ŞAHİNER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Gelişen teknoloji ve altyapılar, son yıllarda geleneksel üretim metotlarına alternatif olarak eklemeli imalat yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Bilgisayar destekli tasarlanan parçaların 3B yazıcılar aracılığıyla katman katman üretilmesi, bu yeni üretim yaklaşımını başlangıçta hızlı prototipleme için kullanılan bir yöntemden, seri üretimde de dikkate alınan bir stratejiye evrimleştirmiştir. Geleneksel üretim süreçleriyle zor ya da çok aşamalı üretilen parçalar, eklemeli imalat yöntemleri sayesinde daha etkili bir şekilde üretilebilir hale gelmiş, tasarımcılara ise daha fazla esneklik sağlamıştır. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLE) metodunun seri üretime uygunluğu araştırılmıştır. Aynı anda üretilen çok adette parçanın yarısına H900 ısıtma işlemi uygulanmış ve diğer yarısı olduğu gibi bırakılarak mekanik özellikleri karşılaştırılmış yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, çekme dayanımı ve X-ray görüntüleme analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Üretimde kullanılan malzeme olarak PH 17-4 olarak bilinen ve içeriği %17 krom ve %4 nikel olan paslanmaz çelik tozu tercih edilmiştir. Çeşitli mekanik özellikleri karşılaştırmak için yapılan çalışmada, yoğunluklar arasında $\pm 0,8$ bağıl standart sapma gözlemlenmiştir. Sertlik değerlerinde rölatif standart sapma ± 14 olarak belirlenirken, yüzey pürüzlülüğünde bu değer ± 50 olarak saptanmıştır. Tasarım beklentilerine bağlı olarak, üretilen parçaların beklenen sertliğe ulaşması için çeşitli sertleştirme yöntemlerine tabi tutulabileceği veya geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak nihai yüzey pürüzlülüğüne ulaştırılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, gelecekte SLE yöntemine ait parametrelerin değiştirilerek yeniden test edilmesi ve bu çalışmanın verileriyle karşılaştırma yapılması için bir temel sağlamayı amaçlamaktadır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, SLE, paslanmaz çelik, imalat

Sayfa Adedi : 51

Danışman : Prof. Dr. Tolga TOPGÜL

INVESTIGATION OF SUITABILITY OF ADDITIVE MANUFACTURING PARTS
PRODUCED BY SLM METHOD FOR MASS PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Fatih ŞAHİNER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Developing technology and infrastructures have introduced additive manufacturing methods as alternatives to traditional production methods in recent years. The layer-by-layer production of computer-aided designed components through 3D printers has evolved from being initially used for rapid prototyping to a strategy considered in mass production. Parts that were traditionally challenging or multistage to produce with conventional manufacturing processes can now be more effectively manufactured through additive manufacturing methods, providing designers with greater flexibility. This study explores the suitability of the Selective Laser Melting (SLM) method, one of the additive manufacturing methods, for mass production. Half of a large quantity of simultaneously produced parts underwent heat treatment (H900), while the other half was left untreated. Mechanical properties, including density, surface roughness, hardness, tensile strength, and X-ray imaging analysis results, were evaluated. Stainless steel powder known as PH 17-4, with a composition of 17% chromium and 4% nickel, was chosen as the material for production. In the conducted study to compare various mechanical properties, a relative standard deviation of $\pm 0.8\%$ was observed among densities. While the relative standard deviation in hardness values was determined as $\pm 14\%$, for surface roughness, this value was found to be $\pm 50\%$. Depending on design expectations, it was concluded that the produced parts could undergo various hardening methods to achieve the expected hardness or be subjected to traditional manufacturing methods to reach the final surface roughness. This study aims to provide a foundation for future experimentation by altering parameters of the SLM method and comparing the results with the data obtained from this study.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, SLM, stainless steel, manufacturing

Page Number : 51

Supervisor : Prof. Dr. Tolga TOPGÜL

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezimi tamamlamamda bana destek olan birçok kişiye minnettarlığımı ifade etmek isterim.

İlk olarak, bana bu zorlu yolculukta, yardım eden, yönlendiren ve rehberlik eden danışmanım Prof. Dr. Tolga TOPGÜL’e teşekkür etmek isterim. Bana sunduğu bilgi birikimi, sabır ve değerli önerileriyle bu çalışmayı daha nitelikli hale getirmeme yardımcı oldu.

Aileme, özellikle de Babam Mevlüt ŞAHİNER’e, destekleri, anlayışları ve sevgileri için teşekkür ederim. Her zaman benim yanımda oldular ve bu tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasında büyük rol oynadılar.

Ayrıca, ROKETSAN'nda çalışmaktan dolayı duyduğum gururu ifade etmek isterim. Şirketimizin sağladığı imkanlar, teknik destek ve çalışma ortamı, bu tezi tamamlamamda önemli bir etken oldu.

Tez sürecimde bana değerli katkıları olan ve bu süreçte desteklerini esirgemeyen amirlerime ve iş arkadaşlarıma teşekkür etmek isterim. İşbirliği ve dayanışma duygusuyla geçen bu süreçte sizinle birlikte çalışmak büyük bir zevkti.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ	3
2.1. Teknede Fotopolimerizasyon	5
2.1.1. Stereolitografi.....	6
2.1.2. Dijital ışık işleme	6
2.1.3. Devamlı dijital ışık işleme	7
2.2. Malzeme Ekstrüzyonu	8
2.2.1. Eriyik biriktirme veya eriyik filamentli üretim	9
2.3. Toz Yatağında Birleştirme.....	10
2.3.1. Seçici lazer sinterleme.....	11
2.3.2. Seçici lazer ergitme ve doğrudan lazer ergitme	12
2.3.3. Elektron ışını ile ergitme	13
2.3.4. Çoklu jet füzyonu	14
2.4. Malzeme Püskürtme Yöntemi	15
2.4.1. Malzeme püskürtme	15

Sayfa

2.4.2. Nano parçacık Püskürtme	16
2.4.3. Damlacık püskürtme yöntemi	17
2.5. Bağlayıcı Püskürtme	17
2.6. Doğrudan Enerji Biriktirme	19
2.6.1. Elektron ışını ile eklemeli imalat	19
2.6.2. Lazerle tasarlanmış net şekillendirme	20
3. LİTERATÜR ÖZETLERİ	21
4. MATERYAL METOT	25
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
5.1. X-Ray Görüntüleri	35
5.2. Yoğunluk Ölçümleri	36
5.3. Yüzey Pürüzlülüğü	38
5.4. Sertlik Ölçümleri	39
5.5. Çekme Testi	41
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Renishaw AM400 cihazına ait teknik özellikler.....	25
Çizelge 5.1. Kübik numunelerin sertlik değerleri ve standart ile karşılaştırılması	41
Çizelge 5.2. Silindirik numunelerin çekme testi verileri ve standart ile karşılaştırması.	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Teknede fotopolimerizasyon genel görünüm	5
Şekil 2.2. SLA yöntemi genel görünüm.....	6
Şekil 2.3. DLP Yöntemi genel görünüm.....	7
Şekil 2.4. CDLP Yöntemi genel görünüm	8
Şekil 2.5. Malzeme ekstrüzyon yöntemi genel görünüm.....	9
Şekil 2.6. FFF-FDM yöntemi genel görünüm	10
Şekil 2.7. Toz yatağı yöntemi genel görünüm	11
Şekil 2.8. Seçici lazer sinterleme yöntemi genel görünüm.....	12
Şekil 2.9. Seçici lazer ergitme yöntemi genel görünüm	13
Şekil 2.10. Elektron ışıını ile ergitme yöntemi genel görünüm	14
Şekil 2.11. Çoklu jet füzyonu yöntemi genel görünüm	15
Şekil 2.12. Nano parçacık püskürtme yöntemi genel görünüm	16
Şekil 2.13. Damlacık püskürtme yöntemi genel görünüm.....	17
Şekil 2.14. Bağlayıcı püskürtme yöntemi genel görünüm.....	18
Şekil 2.15. Elektron ışıını ile eklemeli imalat yöntemi genel görünüm.....	20
Şekil 2.16. Lazerle tasarlanmış net şekillendirme yöntemi genel görünüm	20
Şekil 4.1. Üretimi yapılan numunelerin tabla üzerindeki yerleşim krokisi	26
Şekil 4.2. Üretimi yapılan numunelerin tabla üzerindeki üç boyutlu yerleşimleri	27
Şekil 4.3. ASTM E8/E8M-22 standardından alınan çekme kuponu ölçüleri	33
Şekil 5.1. Isıl işlem görmemiş numunelerin yoğunluk değerlerinin dağılımı.....	37
Şekil 5.2. Isıl işlem görmüş numunelerin yoğunluk değerlerinin dağılımı.....	37
Şekil 5.3. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin dağılımı.....	39
Şekil 5.4. Isıl işlem görmemiş numunelerin sertlik değerlerinin dağılımı.....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Isıl işlem uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin dağılımı	40
Şekil 5.6. Silindirik numunelerin çekme testi sonuç grafiği	42
Şekil 5.7. 1 ve 18 numaralı paçaların çekme testi sonuç grafiği	42

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. SLE 3B yazıcı	25
Resim 4.2. Üretim sonrası numunelerin tabla üzerindeki görüntüsü	27
Resim 4.3. Silindirik numunelerin yan yana dizili görüntüsü.....	28
Resim 4.4. Kübik numunelerin yan yana dizili görüntüsü.....	28
Resim 4.5. Isıl işlem için kullanılan fırının görüntüsü	29
Resim 4.6. Isıl işlem uygulanmış silindirik numunelerin yan yana dizili görüntüsü	29
Resim 4.7. Isıl işlem uygulanmış kübik numunelerin yan yana dizili görüntüsü.....	30
Resim 4.8. Yoğunluk ölçüm cihazı	30
Resim 4.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	31
Resim 4.10. Sertlik ölçüm cihazı.....	31
Resim 4.11. Zımparalama cihazı	32
Resim 4.12. Sertlik ölçümü.....	32
Resim 4.13. Sertlik ölçüm sonucu	33
Resim 4.14. Çekme testi cihazı.....	34
Resim 4.15. X-ray görüntüleme cihazı	34
Resim 5.1. Silindirik kuponların x-ray görüntüleri	35
Resim 5.2. Kübik kuponların x-ray görüntüleri.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

mm

Milimetre

MPa

Mega paskal

µm

Mikrometre

Ra

Yüzey pürüzlülük değeri

W

Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

SLE

Seçici Lazer Ergitme

UV

Ultraviyole

3B

Üç Boyutlu

1. GİRİŞ

İnsanoğlu ihtiyaç duyduğu mal ve hizmetleri kolay, sağlıklı, yeterli, ekonomik ve ayrıca içinde bulunduğumuz yüzyılda çevreye daha da duyarlı bir şekilde karşılamak için çaba sarf etmektedir. Bu çabaların sonucu olarak gelişen bilimin uygulama alanı olan teknoloji ile birlikte gün geçtikçe hedeflenen amaçların yenilikler ve yenilikçi yaklaşımlar sağladığı görülmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım ve uygulamaların imalat sektöründe de hayata geçtiği ve geliştiği geleneksel imalat yöntemlerine alternatif metotların ortaya konulmasıyla kendini göstermektedir. Bu alternatif yöntem literatürde eklemeli imalat olarak ifade edilmektedir.

Eklemeli imalat yöntemleri ile günümüzde yapılan üretimler genellikle tek seferde tek ürün alma üzerine devam etmektedir. Geleneksel yöntemlere göre avantajları fazla olan bir yöntem olsa da seri üretime uygunluğu açısından geliştirmeye açık bir yöntemdir. Literatürde yer alan çalışmalar daha çok eklemeli imalat ile yapılan üretimlerin incelenmesi üzerinedir. Bu çalışmalarda genellikle parametre değişikliklerinin ve yöntemlerin karşılaştırması yapılmıştır.

Yapılan çalışmada birçok eklemeli imalat yöntemi mevcut olmasına karşın lazer ile seçici ergitme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin seçilmesinin temel nedeni uygun makineler kullanılarak daha yaygın olan plastik türevi hammaddeler yerine titanyum, paslanmaz çelik gibi malzemeler ile çalışılabilme imkanının olmasıdır. Bu çalışmada lazer ile seçici ergitme yöntemi kullanılarak mikron boyutundaki PH17.4 malzeme kullanılmıştır. Makine tablasının her katman için mikron düzeyinde aşağı yönlü hareketi ile katmanlar lazer ile ergitilerek birleştirilmiş ve nihai ürünler ortaya çıkmıştır.

Bu araştırmanın literatürde genelde yapılan araştırmalardan farkı yöntemlerin test edilmesi değil seçilen yöntem ile çoklu üretim yapılması durumunda çıkacak sonuçları gözlemlemektir. Literatürde seçilen amaca benzer çalışmaların azlığı gözlemlenmiş ve çalışmanın sonuçları ile lazer seçici ergitme yönteminin seri üretime uygunluğu hakkında çıkarımlarda bulunulması hedeflenmiştir. Tasarım kriterlerine göre çıkan sonuçların seri üretimde kullanılması hakkındaki kararlar değişebilecekken sayısal verilerin incelenmesi ile genel bir yorum yapılabilecektir. Sayısal verilerin uygunluğu durumunda eklemeli imalatla seri üretime uygun parçaların üretilmesi ve seri üretimde kullanılabilmesinin durum

değerlendirmesi yapılabilecektir. Bu bakış açısı ile eklemeli imalatın genel olarak prototipleme dışında seri üretimde kullanılabilme durumu ortaya çıkabilecektir.

2. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

Metal, kompozit, plastik, organik vb. malzemeler kullanılarak üç boyutlu baskı ile oluşturulan katmanların üst üste getirilmesiyle bir nesnenin elde edilmesi yöntemi eklemeli imalat olarak nitelendirilmektedir. Geleneksel üretim yöntemlerinden biri olan talaşlı imalatta üretilen parça bir malzeme bloğundan talaş kaldırılıp uzaklaştırılması yoluyla elde edilirken eklemeli imalat yöntemlerinde parça birbiri ardı sıra oluşturulan katmanların bir araya gelmesiyle oluşturulduğundan yeni nesil olan bu üretim modelinde daha az malzeme kullanılması mümkün olmaktadır. Ayrıca eklemeli imalat yöntemleri bir parçanın tasarımı aşamasında kolaylık sağlamakta ve özellikle geleneksel yöntemlerde üretimi zor olabilecek parçaların üretimi mümkün olabilmektedir. Bu nedenlerle eklemeli imalat günümüzde otomotiv, enerji, inşaat, havacılık ve sağlık gibi birçok sektörde dikkate alınan bir yöntemdir. Uygulamada kullanılacak malzeme ve malzeme formuna göre çok çeşitli eklemeli imalat teknolojileri görülmektedir. Örneğin metal tozu; sinterleme yapılarak, ergitilerek veya yapıştırılarak farklı yöntemlerle seçici lazer ergitme, direk metal lazer sinterleme veya bağlayıcı püskürtme gibi teknolojiler ile eklemeli imalatta kullanılabilir [1-5].

Bir ürünün tasarımı, üretimi ve nihai kullanıcıya ulaştırılması aşamalarında eklemeli imalat gelecekte önemini daha da arttırmaya ve dikkate değer adımlar atmaya hazır bir teknoloji olarak ele alınmaktadır. Bu teknolojinin özelleştirilebilir malzeme özelliklerine sahip karmaşık geometriler oluşturma yeteneği hem akademik hem de endüstriyel alanda ilgi çekmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra eklemeli imalat teknolojilerinin müşterileri doğrudan tasarım aşamasına dâhil ederek ürünlerin özelleştirilmesine daha fazla yardımcı olabileceği düşünülmektedir [6].

Endüstride yeni ihtiyaçların doğması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte eklemeli imalat günümüzde yaygınlaşmaya başlamıştır. Eklemeli imalat geleneksel üretim metodlarından farklı ve daha modern bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde bilgisayar destekli üç boyutlu veriler kullanılır. Bilgisayar destekli tasarım programlarında istenilen ürünün üç boyutlu modelleri oluşturulur. Tasarım üç boyutlu modelin oluşturulmasının ardından eklemeli imalat arayüz birimi olan STL formatına çevrilir. Bundan sonraki aşamada ise farklı bilgisayar programları ile parçaların tablaya yerleşimi, kullanılacaksa destek yapılarının

eklenmesi ve parametre belirlemeleri yapılır. Eklemeli imalat yönteminde tasarlanan parça yatayda katmanlar halinde parçalara ayrılarak üretilir. Geleneksel üretimlerden biri olan talaşlı imalatla bütünden parçalar çıkarılarak ürün elde edilebilir. Ara operasyonlar ve istasyonlar tasarıma bağlı olarak artarak fazla işçiliklere ve zaman kayıplarına sebep olabilir. Geleneksel yöntemlere örnek olarak freze, tornalama, delme, raybalama, kaynak, sıvama, döküm vb. örnek gösterilebilir. Geleneksel yöntemler için genellikle farklı tipte ekipmanlar ve kalifiye personel gerekmektedir. Bu yöntemler veya yöntemlerden birkaçı kullanılarak nihai ürüne gidilirken eklemeli imalatla ara operasyonlar kısaltılarak zamandan, maliyetten, işçilikten tasarruf edilebilmektedir.

Bunun yanında karmaşık ve geleneksel yöntemlerle üretimin zor olduğu parçalar veya parça grupları eklemeli imalat ile daha az parçaya indirgenebilmekte veya tek parçaya düşürülebilmektedir. Bu da tasarımda özgürlük ve yeniliklere altyapı sağlamaktadır. Bu gibi sebeplerden dolayı eklemeli imalat teknolojisi havacılık, savunma sanayi, tıp ve otomotiv gibi sektörlerde yeni bir uygulama alanı açmıştır.

Eklemeli imalat ile üretilmiş ürünler diğer yöntemler gibi bazı sapmalara sahip olabilirler. Bu sapmalar ölçüsel olabileceği gibi yapısal da olabilmektedir. Tolere edilebilecek limitlerin dışındaki sapmalar parçaların ve dolayısı ile parçanın kullanılacağı sistemin güvenilirliğini ve sağlamlığını riske atabilmektedir. Parçaların kullanım alanlarına ve teknik isterlerine göre farklı türde muayeneler yapılabilir.

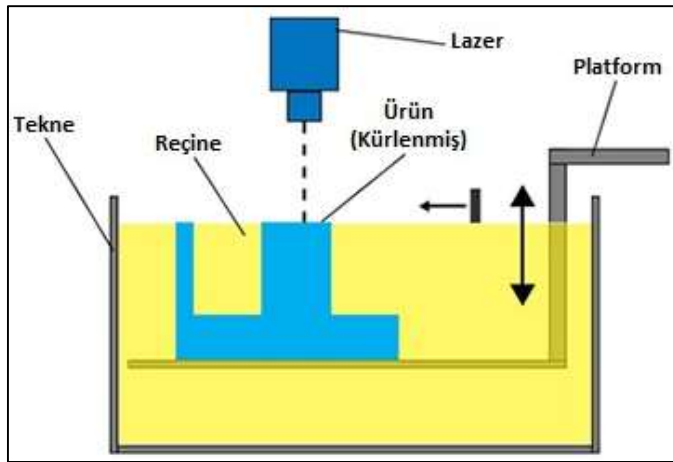
Eklemeli imalat teknolojileri katmanların birbiri ile bağlanması ile gerçekleşen bir üretim türüdür. Bu yöntem ile 3B veriye uygun ürünler üretilir [7]. Bu bağlanma metaller için bir lazer enerjisi yardımı ile elektron demeti enerjisi yardımı ile veya imalat bölgesinde tel eritme yöntemi ile olabilir. Bu şekilde her bir katman diğeri ile birleştirilerek nihai ürün ortaya çıkarılır.

Günümüzde yaygın olan eklemeli imalat yöntemlerini reçine bazlı üretim, malzeme ekstrüzyonu ile üretim ve toz yatağında birleştirme şeklinde gruplandırabiliriz. Genel olarak eklemeli imalat teknoloji yöntemleri ele alınacak olursa farklı alt gruplara ayrıldığı görülebilir.

Vat fotopolimerizasyon ile baskı yapan teknolojiler diğer plastik malzeme ile üretim yapılan eklemeli imalat teknolojilerine göre daha fazla yüzey pürüzlülüğü ve daha fazla boyutsal hassasiyet sağlamaktadır [11].

2.1.1. Stereolitografi (SLA)

SLA yöntemi bir teknede fotopolimerizasyon yöntemidir [12]. Stereolitografi (SLA), üç boyutlu modellerin üretiminde kullanılan bir 3B baskı tekniğidir (Şekil 2.2). Bu yöntem, yüksek hassasiyetli ve ayrıntılı tasarımların üretilmesine izin verir. SLA baskı, bir UV lazeri kullanarak sıvı reçine malzemeleri küçük katmanlar halinde sertleştirir. Malzeme her bir katmanın üstüne uygulanır ve her katman UV lazer tarafından sertleştirildikten sonra bir sonraki katman uygulanır. Bu şekilde, katman katman bir model oluşturulur. SLA baskı, yüksek çözünürlüklü detaylar içeren modellerin üretimi için kullanışlıdır ve genellikle prototip üretimi veya diğer endüstriyel uygulamalar için kullanılır [13].

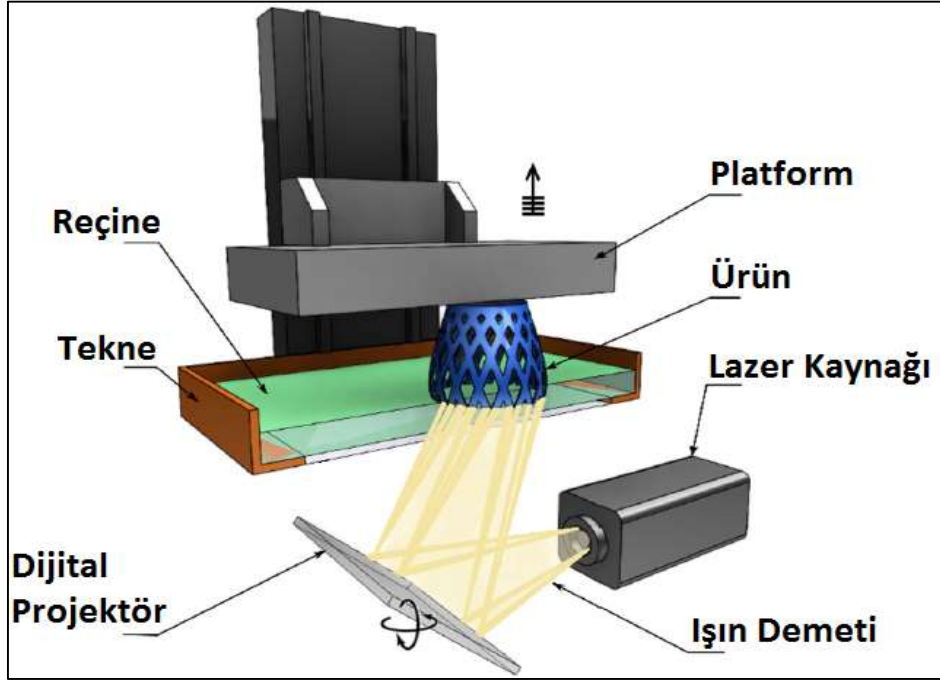


Şekil 2.2. SLA yöntemi genel görünüm [14]

2.1.2. Dijital ışık işleme (DLP)

Literatürde DLP olarak ifade edilen bu yöntem İngilizce “Digital Light Processing” kelimelerinin kısaltmasından oluşmaktadır [15]. Aslında bu yöntem de bir 3B baskı teknolojisi olan teknede fotopolimerizasyon yöntemlerinden biridir. Şekil 2.3’te görüldüğü gibi bu teknolojiye bir ışık kaynağından gelen ışık, bir dijital aynalama aygıtı (DMD-Digital Micromirror Device) tarafından yönlendirilir ve reçine havuzu içindeki sıvı reçine katmanına düşürülür [16]. Düşen ışık, reçine katmanında kürlenerek sertleşmeyi tetikler ve

katman katman tasarlanmış olan model oluşturulur. DLP 3B baskı teknolojisi, SLA (Stereolitografi) teknolojisiyle aynı temel mantık ile çalışır ancak DLP yönteminde kullanılan yonga daha hızlı baskı süresi ve daha yüksek çözünürlük sağlar [17].

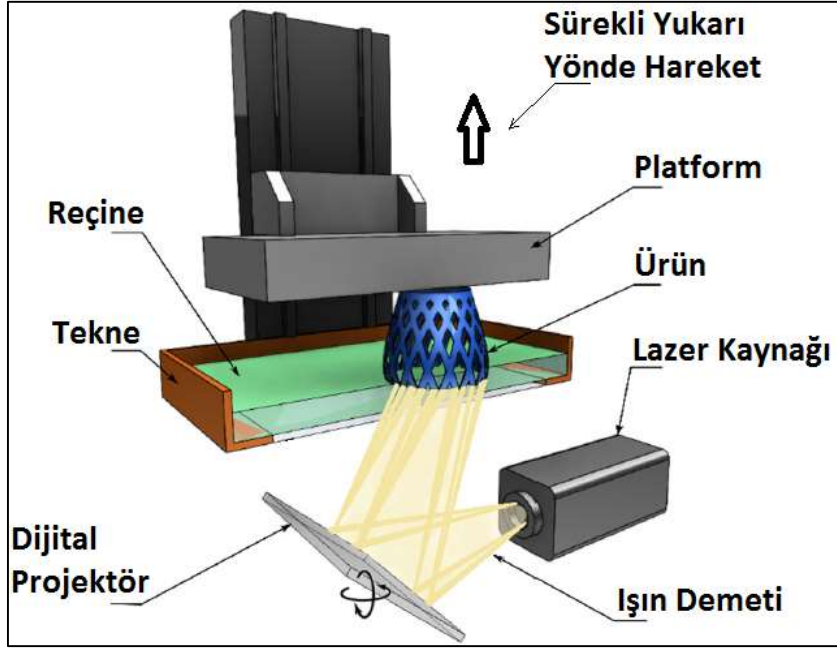


Şekil 2.3. DLP Yöntemi genel görünüm [18]

2.1.3. Devamlı dijital ışık işleme (CDLP)

Devamlı dijital ışık işleme (CDLP-Continuous Digital Light Processing), üç boyutlu yazıcıların üretim sürecinde kullanılan bir teknolojidir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bu teknolojiye işlenen malzeme kesintisiz bir şekilde katmanlar halinde polimerize edilir. CDLP, DLP teknolojisine benzer şekilde çalışmaktadır ancak "Z" ekseninde kesintisiz hareket etmektedir. Bu sayede DLP yöntemine göre daha hızlı üretim olanağı sağlamaktadır.

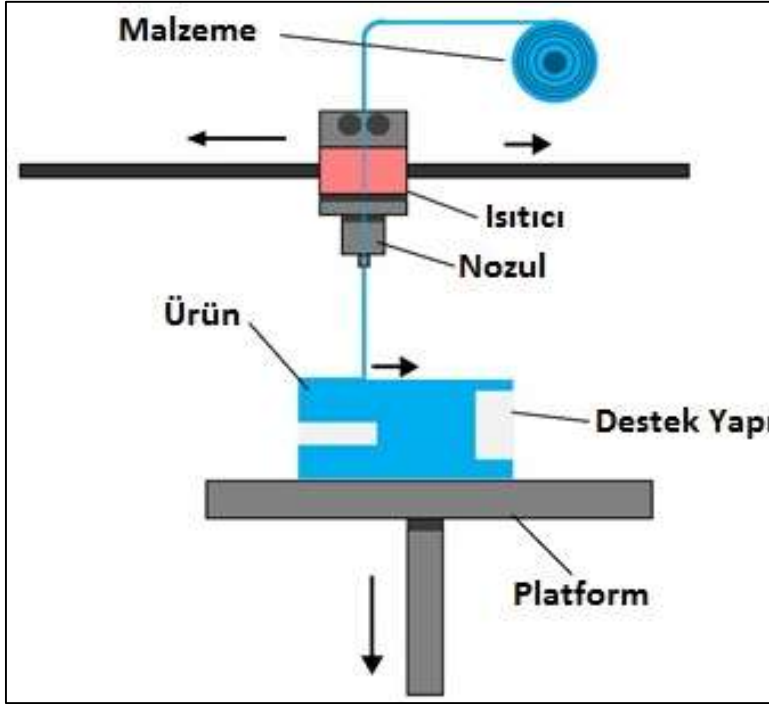
CDLP teknolojisi, üç boyutlu baskıda yüksek hassasiyet ve hız sağlar. Bu nedenle, endüstriyel üretim süreçlerinde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca CDLP teknolojisi, geleneksel baskı teknolojilerine göre daha az atık üretir ve daha ekonomiktir [19].



Şekil 2.4. CDLP Yöntemi genel görünüm [18]

2.2. Malzeme Ekstrüzyonu

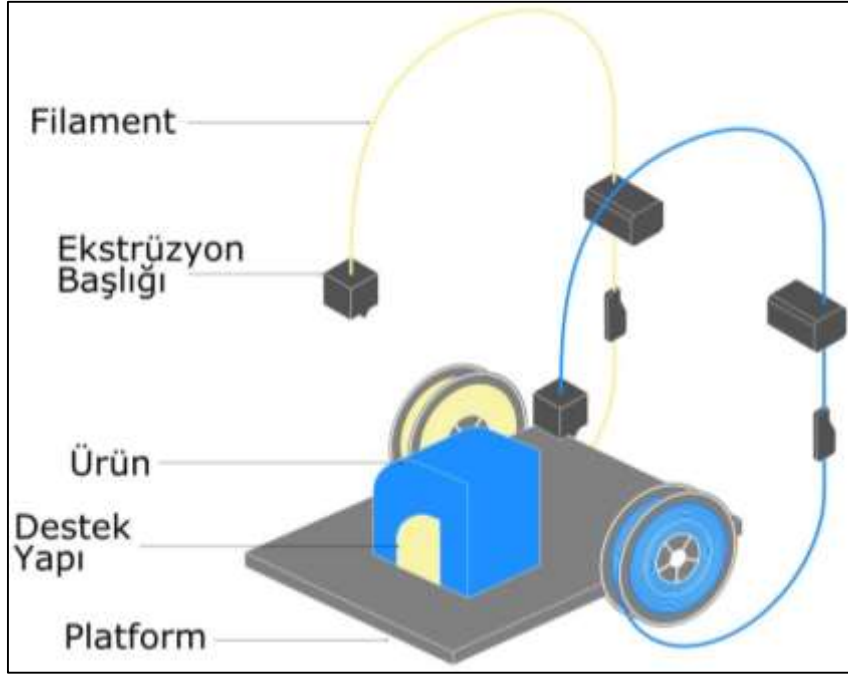
Ham maddenin ekstrüzyon yöntemi ile ergitilmesi yöntemi ile gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemidir (Şekil 2.5). Genellikle polimer malzeme, ekstrüzyon yöntemi ile filamentler halinde ergitilerek CAD modelin katmanlarını oluşturacak şekilde platform üzerinde aktarılır. Bir katmanın tamamlanması ile platform bir sonraki katman için hareket eder ve ilk katman üzerine ikinci kez ergitilmiş filament ekstrüzyon yöntemi ile aktarılır ve birleşmeleri sağlanır. Bu işlemlerin tekrar ile nihai ürün ortaya çıkar. Bu yöntemde nihai ürün yüzey pürüzlülüğü yüksektir [20].



Şekil 2.5. Malzeme ekstrüzyon yöntemi genel görünüm [21]

2.2.1. Eriyik biriktirme veya eriyik filamentli üretim (FDM/FFF)

Eriyik biriktirme yöntemi literatürde “Fused Filament Fabrication” kelimelerinin kısaltması “FFF” olarak ifade edilir. Şekil 2.6 görülen bu yöntem eriyik filamentli üretim olarak da bilinir (Fused Deposition Modeling-FDM). Bu 3B baskı teknolojisinde, termoplastik bir filament (genellikle PLA veya ABS) eritilir ve önceden tasarlanmış bir modelin katmanlarını oluşturmak için bir nozuldan geçirilir. Malzeme katmanları eritildikten sonra soğutulur ve katman katman birleştirilerek nihai ürün oluşturulur. FFF birçok malzeme seçeneği sunar ve kolay kullanımı, düşük maliyeti ve geniş bir kullanıcı kitlesi nedeniyle popülerdir, baskıları sıklıkla daha düşük kaliteli ve daha az ayrıntılıdır. Ancak, yüzey pürüzlülüğü ve baskı hassasiyeti açısından bazı sınırlamaları vardır [22].



Şekil 2.6. FFF-FDM yöntemi genel görünüm [23]

2.3. Toz Yatağında Birleştirme

Ekleme imalat yöntemleri veya 3B baskı olarak da bilinen toz yatağında birleştirme, üç boyutlu nesnelerin katman katman oluşturulduğu bir imalat yöntemidir (Şekil 2.7). Bu yöntem, bir toz malzemesinin, genellikle metal veya plastik katmanlar halinde birleştirilerek istenen nesnenin oluşturulmasını sağlar.

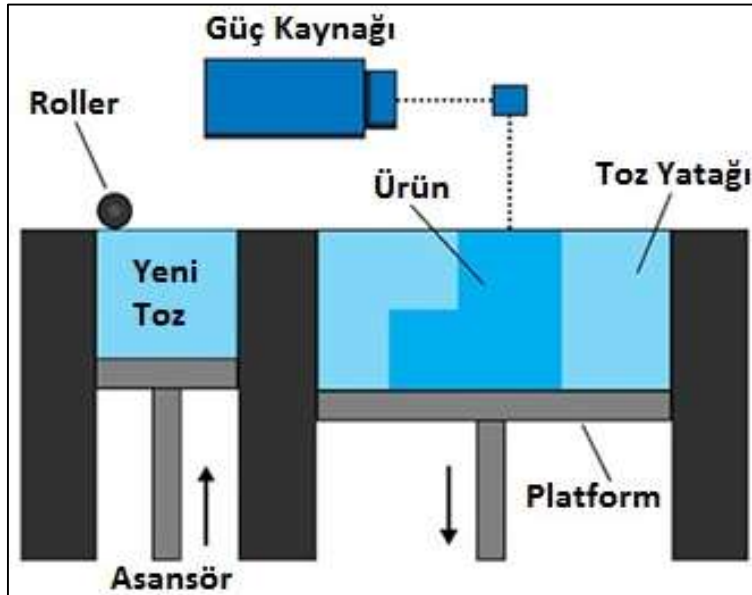
Toz yatağında birleştirme işlemi genellikle aşağıdaki adımları içerir:

- **Model Hazırlama:** İmal edilmek istenen nesne, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak modellenir veya dijital bir 3D modeli kullanılır.
- **Veri Hazırlama:** 3D model, bir yazılım aracılığıyla dilimlere (katmanlara) ayrılır. Her dilim, nesnenin kesiti ve yapısını temsil eder.
- **Toz Malzemesi Yatağı:** İmalat alanında, bir toz malzemesi (genellikle metal veya plastik) ince bir tabaka şeklinde düz bir platforma yayılır. Bu toz tabakası, nesnenin ilk katmanının oluşturulacağı alanı temsil eder.
- **Birleştirme:** Birleştirme işlemi, katman katman gerçekleştirilir. İlk katmanın şekli, bir lazer veya elektron ışını gibi bir enerji kaynağıyla toz malzemesinin belirli bölgelerinin eritilmesi veya yapıştırılmasıyla oluşturulur. Ardından, platform bir katman kalınlığı

kadar aşağı indirilir ve bir sonraki katmanın oluşturulması için toz malzemesi tekrar yayılır. Bu işlem, tüm katmanlar tamamlanana kadar devam eder.

- Soğutma ve Son İşlemler: Nesne tamamlandıktan sonra soğutma işlemi gerçekleştirilir. Ardından, gerektiğinde destek malzemeleri çıkarılır, yüzey işlemleri uygulanır ve son olarak nesne hazırlanır.

Toz yatağında birleştirme, prototip üretimi, karmaşık geometrili parçaların imalatı, özelleştirilmiş üretim ve tıp endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanılan bir imalat yöntemidir. Bu yöntem, tasarım özgürlüğü, hızlı üretim süreci ve karmaşık geometrili parçaların üretimi gibi avantajlara sahiptir.

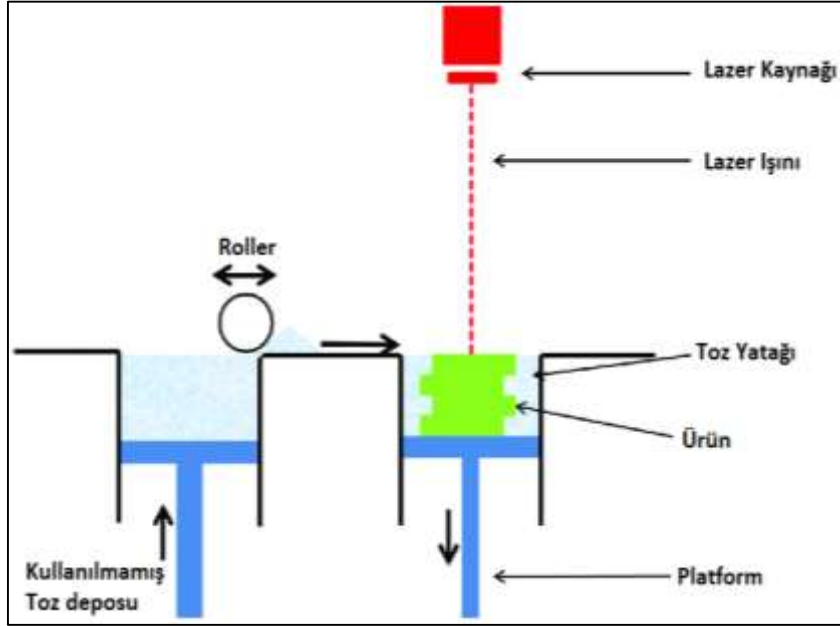


Şekil 2.7. Toz yatağı yöntemi genel görünüm [24]

2.3.1. Seçici lazer sinterleme (SLS)

Şekil 2.8’de görülen seçici lazer sinterleme “SLS-Selective Laser Sintering”, 3B baskı teknolojilerinden biridir. Bu yöntemde, plastik, metal veya seramik gibi çok farklı çeşitte toz malzemeler kullanılabilir. SLS işlemi, katman katman birleştirilerek nesnenin 3B modelinin oluşturulması şeklinde gerçekleştirilir. Her bir katman toz serici mekanizmalar yardımıyla tabla üzerine serilir. Genellikle toz katmanı kalınlığı 0,1-0,3 mm’dir. Bu yöntemde, lazer ışını, toz malzeme yatağı üzerine yansıtılarak tasarlanan modelin katmanlarını ısı enerjisi yardımıyla sinterleyerek birleştirir. Bu işlem, nesnenin yüksek hassasiyetle ve kısa sürede

oluşturulmasına olanak tanır. SLS yöntemi, özellikle endüstriyel ve mühendislik uygulamaları için idealdir [25]. Sinterlenmiş malzemenin mekanik özellikleri düşük olacağı için istenilen özelliklere bağlı olarak sonrasında ısıtılma işlemi gerektirebilir.

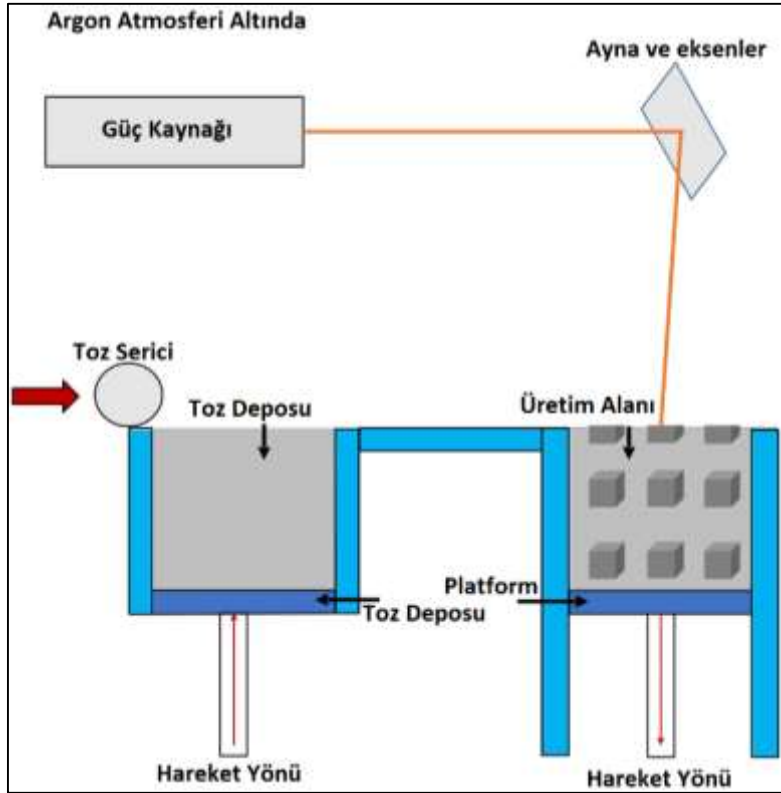


Şekil 2.8. Seçici lazer sinterleme yöntemi genel görünüm [26]

2.3.2. Seçici lazer ergitme ve doğrudan lazer ergitme (SLM & DMLS)

Seçici lazer ergitme “SLM-Selective Laser Melting” bir 3B baskı teknolojisidir (Şekil 2.9). Bu teknoloji, toz halindeki metal alaşımlarının ergitilmesi ile gerçekleştirilir. Üç boyutlu model, yüksek enerjili bir lazer kullanılarak toz malzemelerin eritilmesi ve ardından katman katman şekillendirilmesi yoluyla oluşturulur. SLM, özellikle karmaşık geometrilerin üretilmesi için kullanışlıdır ve metal parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. SLM ile üretim genellikle argon gazının oluşturduğu atmosfer altında yapılır. Bu şekilde olası oksidasyonun da önüne geçilmiş olur [7].

Bu yöntemde kullanılan malzemenin metal olması ve yoğun ısı girdisi ile işlem yapmasından dolayı çarpılmaları ve iç gerilimleri beraberinde getirir. Bunun önüne geçmek için ise ürün destek yapıları ile güçlendirilir ve üretim sonunda bu destek yapılar üründen uzaklaştırılır ve gerekmesi durumunda zımparalama, parlatma gibi son işlemler yapılır. SLM ve DMLS yöntemleri birbirlerine çok benzer ve genel olarak birbirlerinin yerine kullanılabilir. Daha çok ABD’de DMLS olarak bilinirken Avrupa’da SLM olarak geçmektedir [27].



Şekil 2.9. Seçici lazer ergitme yöntemi genel görünüm [28]

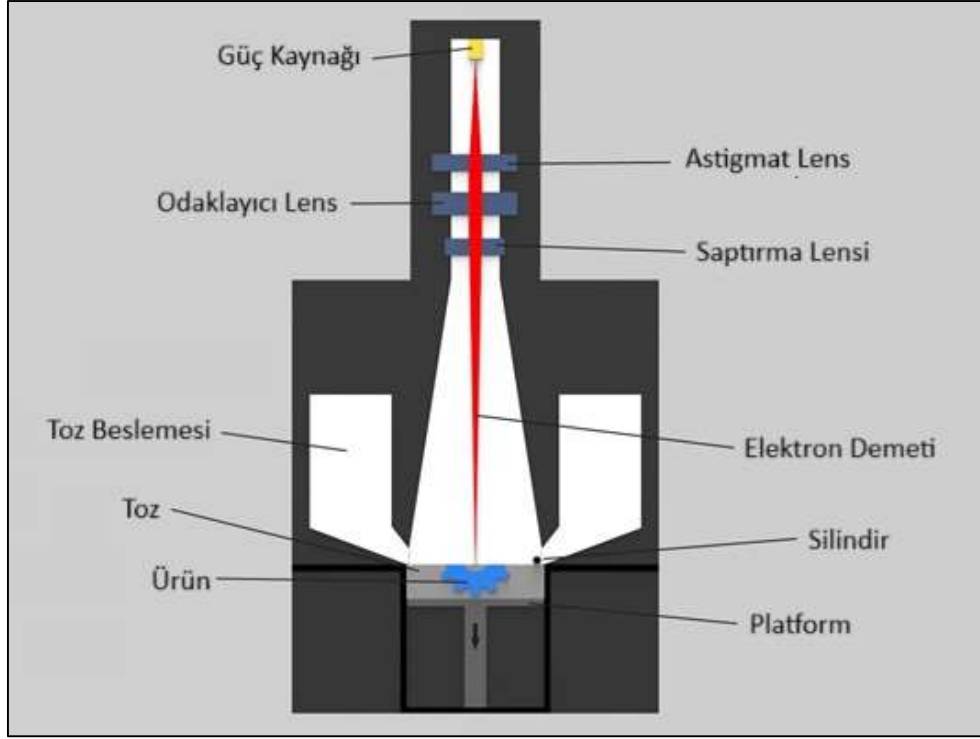
Bu yöntemin endüstriyelmesi ile prototip ürünlerin üretimi, tekil özel sipariş parçaların üretimi veya geleneksel yöntemler ile üretilemeyecek parçaların üretimlerine olanak sağlamıştır [29].

Doğrudan lazer ergitme “DMLS-Direct Metal Laser Sintering”, metal 3B baskı teknolojisidir. Bu yöntem, lazer ışınlarının kullanıldığı bir teknolojidir. Seçici lazer ergitme yöntemine çok benzer mantıktadır. Malzeme tozları, yüksek enerjili lazer ışınları ile sinterlenerek katman katman birleştirilir. Bu işlem sonucu, karmaşık geometrili, dayanıklı ve hassas metal parçalar üretilebilir. DMLS, havacılık, otomotiv, tıbbi cihazlar ve savunma gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [30].

2.3.3. Elektron ışını ile ergitme (EBM)

Elektron ışını ile ergitme “EBM-Electron Beam Melting”, 3B baskı teknolojilerinden biridir ve birçok endüstride kullanılır (Şekil 2.10). Özellikle medikal uygulamalar için SLM ve EBM yönteminin son zamanlarda toz yataklı en popüler ve ticari uygulama olmuştur.

EBM, özellikle havacılık ve tıbbi implant endüstrilerinde kullanılır. Bu teknoloji, yüksek yoğunluklu metal parçaların üretilmesine izin verir ve aynı zamanda kompleks geometrilerin üretilmesini sağlar. Bu teknoloji, bir yüksek enerjili elektron ışını kullanarak metal tozları eriterek 3B parçalar oluşturur [7].



Şekil 2.10. Elektron ışını ile ergitme yöntemi genel görünüm [31]

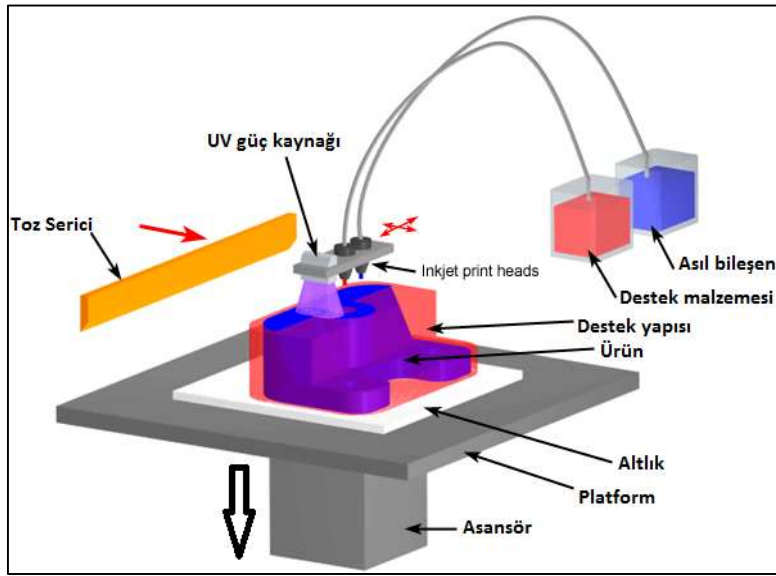
EBM yöntemi genel olarak SLM ile benzer ve tüm toz yataklı üretimler ile aynı mantıktadır. Toz yatağı üzerine enerji kaynağı yansıtılması ile üretim gerçekleşir. EBM yönteminde üretim SLM yönteminden farklı olarak vakum ortamında yapılır. Bunun sebebi ise elektron demetlerinin enerji kaybını önlemektir [7].

EBM ile üretilen parçalar, sert ve dayanıklıdır. Ayrıca, yüksek mukavemetli ve yüksek hassasiyetli parçaların üretiminde kullanılabilirler.

2.3.4. Çoklu jet füzyonu (MJF)

Çoklu jet füzyonu literatürde “Multi Jet Fusion” kelimelerinin kısaltması olan MJF ifadesi ile belirtilir. Endüstriyel kullanım için ideal olan ve Şekil 2.11’de görülen bu üç boyutlu yöntemin ilk uygulayıcısı 2016 yılında Hewlett-Packart’tır. Yaygın olarak polipropilen

kullanılmaktadır. Bu yöntemde, bir malzeme yatağı üzerinde çoklu mürekkep püskürtme başlıkları kullanılarak malzemelerin katman katman birleştirilmesiyle parça oluşturulur. Toz yatağı üzerine katman katman serilen tozlar bağlayıcı bir madde ile birleştirilir ve enerji kaynağı yardımı ile katman tamamlanarak bir sonraki katmana geçilir. MJF yöntemi, yüksek hassasiyet ve hızlı baskı süresi sunar ve daha büyük parçaların üretimine de olanak tanır. Ayrıca, MJF yöntemi sırasında kullanılan malzemeler nispeten daha ucuzdur ve malzeme seçenekleri geniştir [32].



Şekil 2.11. Çoklu jet füzyonu yöntemi genel görünüm [33]

2.4. Malzeme Püskürtme Yöntemi

Malzeme püskürtme yöntemi de eklemeli imalat çeşitlerinden biridir. Bu yöntem daha çok mürekkepli yazıcılara benzetilebilir. Tabla üzerine jet nozulları ile püskürtülen ve UV ışınlar ile kürleşebilen malzeme ve destek malzemesi, UV ışık kaynağı yardımı ile sertleştirilir ve bu yöntemin devamlılığı ile katmanlar tamamlanır ve nihai ürün ortaya çıkar. Ürün bitiminde destek malzemeleri temizlenerek ürün nihai hale gelmiş olur.

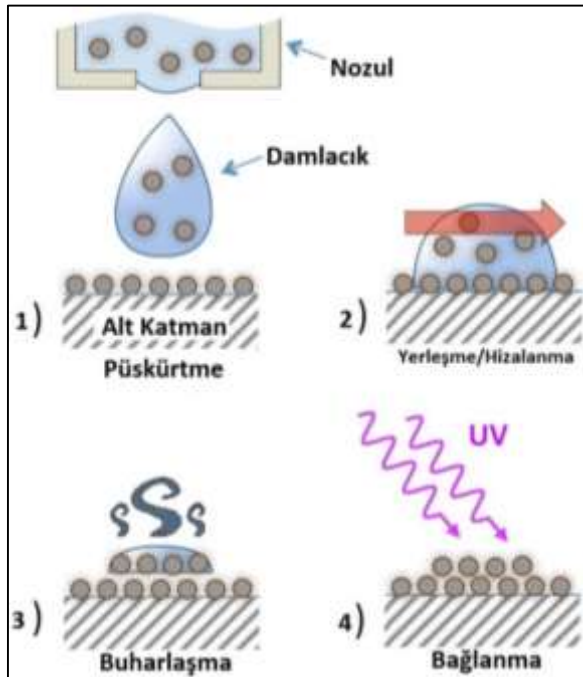
2.4.1. Malzeme püskürtme (Material Jetting)

Malzeme püskürtme, 3B baskı teknolojilerinden biridir ve bir tür inkjet yazıcı mantığıyla çalışır. Bu teknolojiye, sıvı hale getirilen fotopolimer malzeme birçok nozul içeren püskürtme kafası ile hassas bir şekilde malzeme yüzeyine püskürtülür ve UV ışın ile hızla

katılır. Bu süreç, katman katman tekrarlandığında, istenilen nesnenin 3B modeli oluşturulur. Malzeme püskürtme teknolojisi, hassas baskı yapma kabiliyeti ve farklı malzemelerin kullanılabilmesi nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır [8,32].

2.4.2. Nano parçacık püskürtme (NPJ)

Nano parçacık püskürtme (Nano Particle Jetting-NPJ) tekniği (Şekil 2.12), 3B parçaların üretiminde kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu yöntem, mürekkep püskürtme teknolojisine benzer şekilde çalışır. Nano ölçekteki partiküller, çok sayıdaki nozullardan püskürtülerek bir alt katman veya kaplanacak malzeme üzerine düşürülür ve ardından sinterleme adımı gerçekleştirilerek parçalar oluşturulur. Püskürtülen bu nano partiküller sıvı formdadır ve içeriğinde asıl yapı malzemesi ve sıvı formda birleştirici bulunmaktadır. Ek olarak sonradan temizlenip uzaklaştırılmak üzere destek yapıları da kullanılabilir. Proses yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için püskürtülme sonrası sıvılar buharlaşır ve geriye sadece nano partikül içindeki yapı malzemeleri kalır. İşlem sonunda ise kullanılmışsa destek yapıları uzaklaştırılır ve nihai ürün sinterlenerek son haline getirilir. Nano parçacık püskürtme, yüksek çözünürlük ve hassasiyet ile hızlı ve etkili bir üretim sağlar ve genellikle metalik ve seramik malzemelerin üretiminde kullanılır [34].



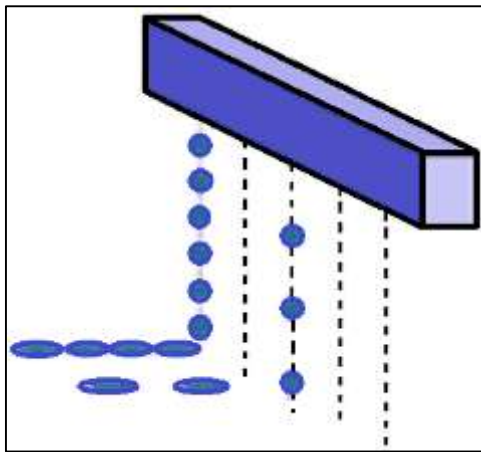
Şekil 2.12. Nano parçacık püskürtme yöntemi genel görünüm [35]

2.4.3. Damlacık püskürtme yöntemi (Drop on Demand–DOD)

Drop on demand" (DOD), bir eklemeli imalat (3B baskı) yöntemidir ve bu yöntemde malzeme damlacıkları belirli bir noktaya düşürülerek katman oluşturulur. Bu teknoloji (Şekil 2.13) genellikle sıvı malzemelerin kullanıldığı bir 3B baskı tekniğidir [36]. DOD adımları kısaca şu şekildedir:

- Damlacık oluşturma: DOD 3B yazıcılar, genellikle bir püskürtme kafasına sahiptir. Bu kafa, sıvı malzemeyi belirli bir konumda oluşturan bir dizi küçük damlacığı kontrol eder.
- Damla yerleştirme: Oluşturulan damlacıklar belirli bir konumda düşürülerek bir tabaka oluşturulur. Düşen damlalar önceki katmanın üzerine yerleştirilir ve malzemenin katman katman bir ürün oluşturmaya izin verir.
- Katman Oluşturma: İlk katman tamamlandıktan sonra, baskı platformu veya tablanın konumunu değiştirerek bir sonraki katmanın oluşturulmasına geçilir. Bu süreç, nesnenin tamamının inşa edilmesi için tekrarlanır.

DOD yönteminde yüksek çözünürlük ile hassas ürünler alınabilir. Bu yöntem farklı endüstrilerde kullanılabilmektedir.



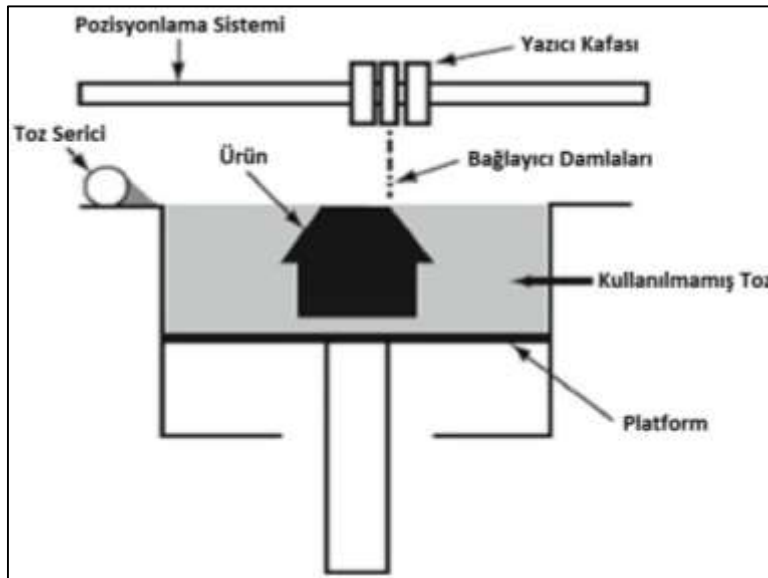
Şekil 2.13. Damlacık püskürtme yöntemi genel görünüm [37]

2.5. Bağlayıcı Püskürtme

Eklemeli imalat yöntemlerinden olan bağlayıcı püskürtme yöntemi (Şekil 2.14) Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından 90'larda geliştirilmiş olmasına

rağmen ticarileşmesi 2010'da olmuştur. Bu yöntemde metal ve alaşımlar veya seramikler kullanılabilir. Teknik olarak ise toz haline getirilebilen birçok malzeme kullanılabilir. Bu yöntemde iki çeşit yapı malzemesi vardır. Birisi ana malzeme olan toz halde bulunan metal veya seramik türevleri, diğeri ise bağlayıcı özelliğe sahip malzeme. Genel olarak toz haldeki yapı malzemesi katı fazdadır, bağlayıcı madde ise sıvı fazdadır. Bağlayıcı maddenin renklendirilebilir özelliği sayesinde renkli ürünler elde edilebilir.

Üretim yöntemi diğerk eklemeli imalat yöntemlerine benzemektedir. Bilgisayar ortamında tasarlanmış tasarımların toz üzerine bağlayıcı püskürtülerek katmanlar halinde üretimi ile gerçekleşmektedir. Üretimin tamamlanmasının ardından ise sinterleme, ısıl işlem gibi süreçler tasarıma göre uygulanmak durumundadır [38].



Şekil 2.14. Bağlayıcı püskürtme yöntemi genel görünüm [39]

Bu teknikte, tabla üzerine bir mekanizma ile ince bir toz yatağı serilir. Sonrasında ise tabla katman kalınlığı kadar aşağı yönde hareket eder. Sonrasında ise bu ince toz tabakası üzerine bağlayıcı sıvı madde püskürtülür. Toz yatağındaki malzeme ile bağlayıcı sıvının birleşmesinin ardından kürleşme için ısıya maruz bırakılır. Bu işlem, her katman için tekrarlanarak, nesne katman katman inşa edilir. Bu teknik, diğerk bazı 3D baskı tekniklerine göre daha hızlıdır ve ticari olarak çok fazla malzeme kullanımına olanak sağlar. Bu malzemeler metal ve seramik gruplarıdır [40]. Ayrıca çok renkli baskı ve fotoğraf baskısı gibi özellikleri vardır. Ancak, bu teknik diğerk bazı tekniklere göre daha az hassasiyet ve düşük çözünürlük sunabilir.

2.6. Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)

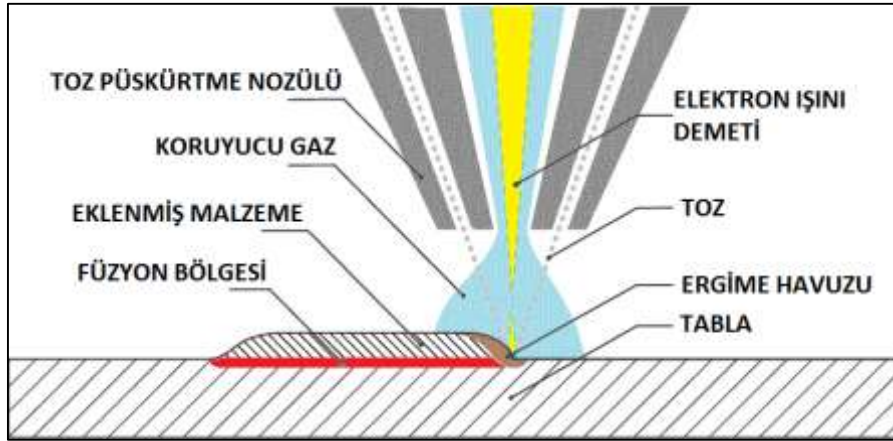
Doğrudan Enerji Biriktirme, genellikle bir üretim süreci olan ve malzeme katmanlarının doğrudan biriktirildiği bir teknolojiyi ifade eder. Bu terim genellikle metal katmanlarını bir malzeme üzerine doğrudan birleştirmek için kullanılan bir tür eklemeli imalat sürecini tanımlar. Bu yöntemde metal tozları veya tel istenilen şekilde doğrudan katmanlar halinde bir enerji kaynağı tarafından eritilir. Genellikle bir robot kol yardımıyla gerçekleştirilen işlem kaynak işlemine benzer niteliktedir. Hızlı prototipleme yanı sıra bu yöntem parça tamirinde de kullanılabilmekte olup havacılık ve uzay endüstrisinde daha çok kullanılabilmektedir. Direkt enerji biriktirme yöntemi, çeşitli metaller ve alaşımların kullanılmasına olanak tanır. Bu, farklı uygulama ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş malzeme özelliklerini sağlamak açısından avantajlıdır.

Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha esnek ve özelleştirilebilir olabilir. Ancak, belirli uygulamalar için uygunluğunu belirlemek ve optimize etmek için malzeme bilimi, tasarım ve üretim süreçleri üzerine detaylı bir çalışma gerektirir.

2.6.1. Elektron ışını ile eklemeli imalat (Electron Beam Additive Manufacturing-EBAM)

Bu yöntem elektron demeti kaynağı kullanarak malzemelerin üç boyutlu şekillendirilmesini sağlayan bir üretim teknolojisidir. Şekil 2.15'te görülen bu yöntemle; metaller, alaşımlar ve kompozit malzemelerin yanı sıra seramikler ve camlar da üretilebilir. Elektron demeti, malzemelerin eritilmesi için yüksek enerjili ışınlar kullanarak işlenir ve istenen şekil oluşturulur. Bu yöntem, diğer yöntemlere göre daha hızlı ve doğrudan bir üretim süreci sağlar.

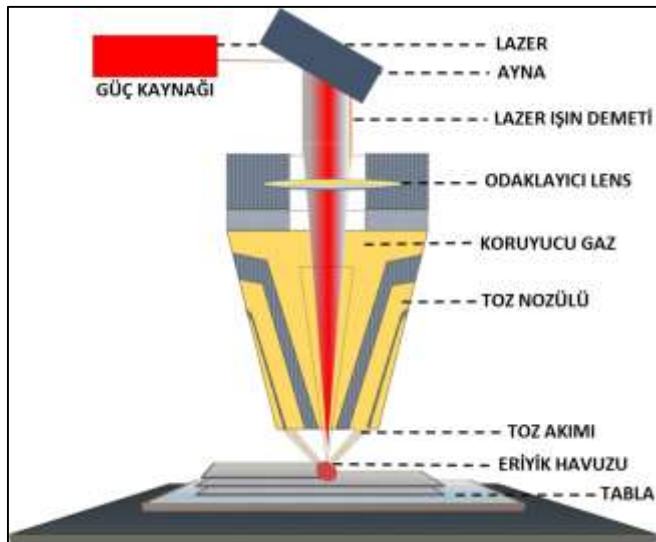
Elektron ışını ile eklemeli imalat teknolojisinde toz metal malzeme kullanarak, yüksek enerjili bir elektron ışını ile birleştirilerek katman katman parça oluşturur. Elektron ışını, toz metal malzemenin erimesine ve bağlanmasına neden olur ve baskı bir çeşit yüksek vakum altında gerçekleştirilir. Bu yöntem büyük ölçekli üretim ve hammadde atıklarını en aza indirme yeteneği nedeniyle havacılık ve savunma gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.15. Elektron ışını ile eklemeli imalat yöntemi genel görünüm [41]

2.6.2. Lazerle tasarlanmış net şekillendirme (Laser Engineered Net Shape-LENS)

Şekil 2.16'da görülen bu teknoloji, bir malzeme levhası üzerinde oluşturulan bir eriyik havuzunda eritilmiş metal tozlarının yoğunlaştırılması yoluyla 3B nesnelerin üretilmesine olanak tanır. LENS, özellikle metal parçaların üretiminde kullanılan bir 3B eklemeli imalat teknolojisidir ve genellikle havacılık ve savunma endüstrileri gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda kullanılır, gelişmiş ve pahalı bir teknolojidir.



Şekil 2.16. Lazerle tasarlanmış net şekillendirme yöntemi genel görünüm [42]

3. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Literatürdeki çalışmalar gözden geçirildiğinde geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak ortaya çıkan eklemeli imalat konusunun gün geçtikçe daha fazla ilgi kazandığı görülmektedir:

Kayacan ve Yılmaz tarafından yapılan çalışmada [43], doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yönteminin süreç geliştirilmesi ve maliyet analizi yapılmıştır. İmalat maliyetlerinin azaltılabilmesi için araştırmacılar tablaya yerleştirilen parça sayısının arttırılması ve parçaların yatay olarak yerleştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu uygulama ile her bir parçanın imalatı için geçen sürenin ve katman sayısının azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir.

Polat Çoban ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [44], farklı doluluk oranlarında eklemeli imalat ile üretilen poliaktik asit (PLA) levhaların birleştirmesinde (PLA-PLA) farklı yapıştırıcı ve yapıştırma kalınlıklarının mekanik dayanıma etkisi incelenmiştir. Birleştirilen levhalara çekme testi uygulandığında mukavemetin doluluk oranına bağlı olarak arttığı sonucuna varılmıştır. Yapıştırma kalınlığının mukavemete etkisi yapıştırıcı çeşidine göre farklı elde edilmiştir. Loctite EA 9492 kullanıldığında dayanım yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak artar iken Teroson PU 9225 ile tam tersi bir etki göstermiştir.

Sezer ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [45], eriyik yığma modellemede işlem parametreleri ve karbon fiber oranının polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Araştırmada elde edilen sonuçlar katmanların doğrusal yazdırılması durumunda karbon fiber takviyesinin elastisite modülü ve çekme dayanımını arttırdığını süneklik ve tokluğu ise azalttığını göstermiştir. Katmanların çapraz yazdırılması durumunda ise; elastisite modülü karbon fiber takviyesiyle artarken çekme dayanımı, süneklik ve tokluk azalmıştır.

Özsoy ve Sayın [46], çalışmalarında eriyik yığma modelleme ile farklı işlem parametreleri için elde edilen numunelerin çekme dayanımlarını karşılaştırmış ve üç farklı makine öğrenmesi kullanarak üretilen parçalar için çekme dayanımı tahminleri yapmışlardır. Çalışmada katmanlar arası bağın daha iyi sağlandığı PLA malzemeli numunelerde en yüksek

mukavemetin olduğu görülmüştür. En yüksek dayanımın elde edilmesinin diğer sebepleri olarak düşük katman kalınlığı ve tam dolgu oranı olduğu araştırmacılar tarafından ileri sürülmüştür. Ayrıca çekme dayanımı tahmininde en yüksek başarı oranı (%98,3) kısmi en küçük kareler algoritması ile sağlanmıştır.

Kayacan ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [47]. seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi ile titanyum alaşımı olan Ti6Al4V malzemesi kullanılarak elde edilen numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretim sürecinde ada tarama stratejisinin ızgara tarama stratejisine göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip numuneler elde edilmesine imkân verdiği saptanmıştır. Bunun sebebi olarak ada tarama stratejisi ile lazerin sinterleme işlemini rastgele karesel alanlar oluşturarak yapması ve bu sayede ara kesitte oluşan ısının daha hızlı bir şekilde parçadan uzaklaştırılması olduğu fikri ileri sürülmüştür. Bununla birlikte her bir üretim sürecinde elde edilen en yüksek çekme mukavemetleri karşılaştırıldığında lazer gücünün nispeten daha düşük, tarama hızının yüksek ve tarama mesafesinin düşük tutulduğu ızgara tarama stratejisi ile elde edilen numune grubunda daha yüksek dayanım (343 MPa'ya karşılık 346 MPa) görülmüştür. Basma dayanımı söz konusu olduğunda lazer enerji yoğunluğunun düşük olduğu numunelerin daha az dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. İlave olarak çekme testlerindeki benzer şekilde boşluksuz yapıya sahip olan tam dolu numunelerde mukavemet daha yüksek elde edilmiştir. Elde edilen mukavemet sonuçları karşılaştırıldığında basma yüküne maruz kalacak bir parçanın ızgara tarama stratejisi ile üretilmesinin daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Çentik darbe test sonuçları kıyaslandığında ızgara tarama stratejisinin lazer enerji yoğunluğundan daha fazla etkilendiği anlaşılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde en düşük enerji yoğunluğuna sahip parametrelerle üretilen numunelerin daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın çalışmada sertlik sonuçlarına bakarak malzemenin mekanik dayanımının daha iyi olduğu anlamının çıkarılamayacağı aksine daha kırılğan hale gelen parça için sertliğin istenmeyebileceği ifadesine yer verilmiştir. Araştırmacılar ızgara tarama stratejisi ile üretilen numunelerde sertlik farklılıklarının az olduğu ve bu yöntemde işlem parametrelerinden sertliğin fazla etkilenmediği sonucuna ulaşmışlardır.

Bahçe ve çalışmada yer alan diğer araştırmacılar [48]. eklemeli imalatla üretim yönünün parça üretimine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada PLA malzemesi kullanılarak dört farklı üretim yönü için inceleme yapılmıştır. Üretilen parçaların ağırlıkları karşılaştırıldığında en

ağır parça destek yapıları kullanılma ihtiyacının en çok olduğu yukarı yönlü (#3) üretim işleminde elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü parçanın üretimi esnasında sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan termal gerilmelerden daha çok etkilendiği yukarı ve aşağı yönlü (#3 ve #4) üretim işlemlerinde görülmüştür. Üretilen parçanın geometrik doğruluğu ise ölçümün alındığı doğrultu ve üretim yönüne göre değişiklik göstermiştir.

Duman ve Kayacan [49]. tarafından yapılan çalışmada doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) metodunda parça üretimine tezgâh işletme parametrelerinin (tarama şekli, tarama hızı ve lazer gücü) etkisi araştırılmıştır. Çalışmada iyi bir katman oluşumu için parametrelerin uygun aralıkta seçilmesinin önemi vurgulanmıştır. Tezgâh işletme parametrelerinin tekli çizgi, 85-100 mm/s tarama hızı ve 100-175 W lazer gücüne ayarlanması durumunda daha düzgün birleşme ile sağlandığı görülmüştür.

Prashanth ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [50]. SLE metodunda üretilen ürünlerin etkin bir şekilde üretilmesinin işlem parametrelerine bağlı olduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada Al-12Si malzeme kullanılarak enerji yoğunluğu sabit kalacak şekilde lazer hızı ve lazer gücü kombinasyonu değiştirilmiştir. Araştırmada optimum mekanik özelliklere sahip parça üretimi için lazer gücünün ve lazer tarama hızının bağımsız olarak ayarlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca araştırmacılar işlem parametrelerinin büyük ölçüde kullanılan metalin/alaşımın özelliklerine ve bunun lazerle etkileşimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yadroitsev ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [51]. SLE metodunda metal tozları kullanılarak gerçekleştirilen tek iz oluşumunda izin sürekli olduğu stabilite bölgeleri ve kararsızlık bölgeleri işlemin bir eşik karakterine sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada düşük tarama hızındaki düzensizlikler ve bozulmaların kararsızlıklara sebep olduğu çok yüksek hızın da topaklanma etkisine neden olduğu belirtilmiştir. Yüksek lazer gücü için optimum tarama hızı aralığı genişlerken yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler için daraldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Gusarov ve çalışmada yer alan diğer araştırmacılar [52]. SLE metodunda ısı transfer modeli ve stabilite analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada SLE metodu ile tek hatlı tarama işleminde tarama hızının belli bir aralığın dışında olması durumunda oluşturulan izlerin bozulduğu görülmüştür. Bununla birlikte tarama hızını azaltmak suretiyle eriyik havuzunun

uzunluk-genişlik oranını azaltmanın ve alt tabaka ile temas genişliğini artırmanın sürecin stabilizasyonunu sağladığı ifade edilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında SLE metodu kullanılarak bir tablada üretilen çok sayıda parçanın çeşitli mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılarak tek seferde üretilen parçalar arasındaki farklılıklar belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulgular aracılığıyla kullanılan eklemeli üretim metodunun seri üretime uygunluğu tartışılmıştır.

4. MATERİYAL METOT

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLE) metodu ile malzeme olarak PH 17-4 olarak ifade edilen %17 krom ve %4 nikel içeren ve parçacık büyüklüğü 17 – 48 mikron arasında değişen paslanmaz çelik tozu kullanılarak bir tablada üretilen parçaların çeşitli mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Mühendislik uygulamalarında sonsuz çeşitte tasarım ve bu tasarımların farklı mekanik gereksinimleri mevcut olabilmektedir. Bu çalışma ile aynı tabla üzerinde tek seferde üretilmiş numunelerin incelemeleri yapılmıştır. Çıkan sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak bu imalat yöntemi hakkında değerlendirme yapılması hedeflenmiştir. İmalat Resim 4.1’de görülen Renishaw marka AM400 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu cihazın teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



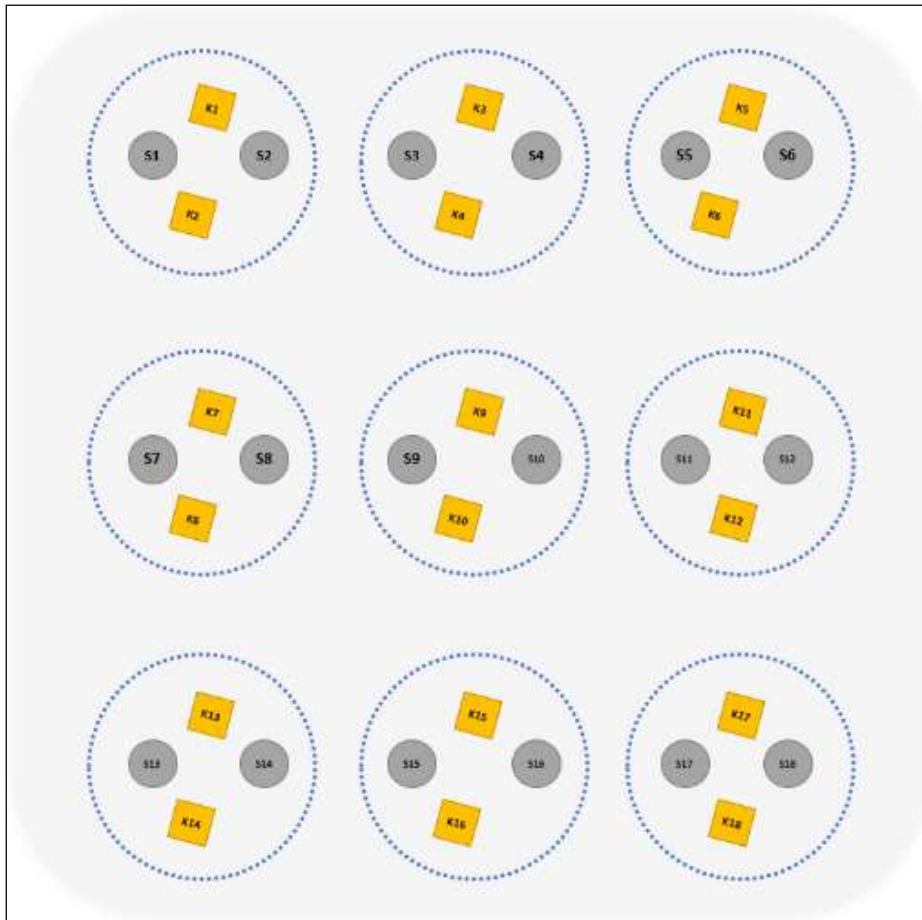
Resim 4.1. SLE 3B yazıcı [53]

Çizelge 4.1. Renishaw AM400 cihazına ait teknik özellikler

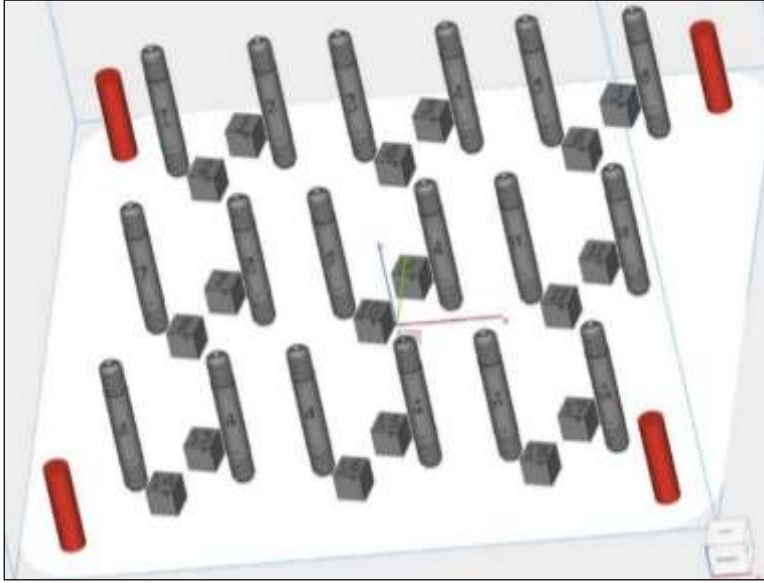
Üretim Hacmi	248 mm X 248 mm X 285 mm
Üretim Hızı*	20 cm ³ /h’e kadar
Toz Katman Kalınlığı	20 µm – 100 µm
Lazer Gücü	400 W
Lazer Odak Çapı	70 µm
Tarama Hızı	2 m/s’ye kadar
Pozisyonlama Hızı	7 m/s’ye kadar
Malzemeler	AlSi10Mg, CoCr, In625, In718, Paslanmaz çelik 316L, Ti6Al4V

* Üretim hızı parça geometrisine ve malzemeye bağlıdır.

Üretilmek istenen parçalar CATIA üç boyulu modelleme programı ile modellenmiştir. Oluşturulan datalar Magics 24.0 Programı ile Renishaw cihazında yerleştirilmiş ve gerekli parametre ayarlamaları yapılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 250x250 mm ölçüsündeki tablaya dokuz ana grup yerleştirilmiştir. Her bir grup 2 adet 1 cm³’lük kübik kupondan ve çekme testinde kullanılmak üzere 2 adet Ø8 mm ve 55,7mm yüksekliğinde silindirik kupondan oluşmaktadır. Tabla üzerine bu şekilde toplamda 18 adet kübik kupon, 18 adet ise silindirik kupon yerleştirilmiştir. Üretimi yapılan numunelerin tabla üzerindeki üç boyutlu yerleşimleri Şekil 4.2’de görülmektedir.

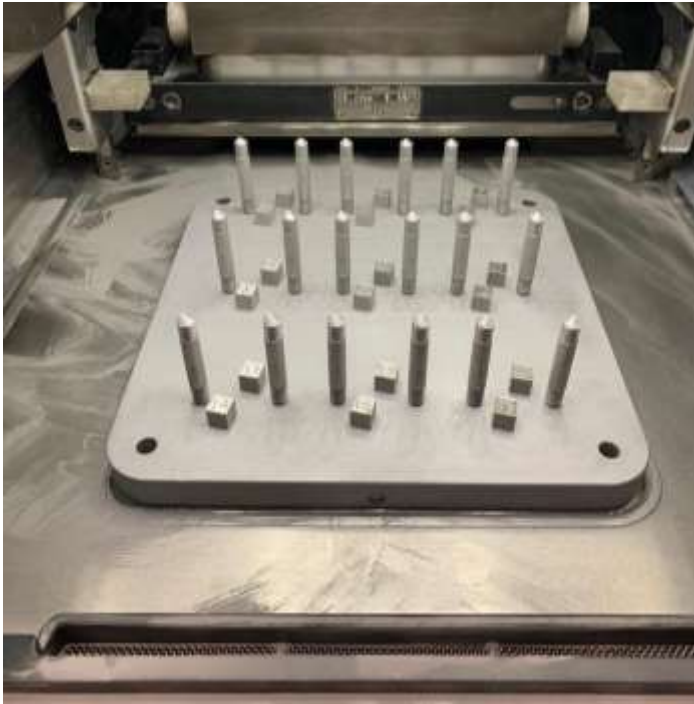


Şekil 4.1. Üretimi yapılan numunelerin tabla üzerindeki yerleşim krokisi



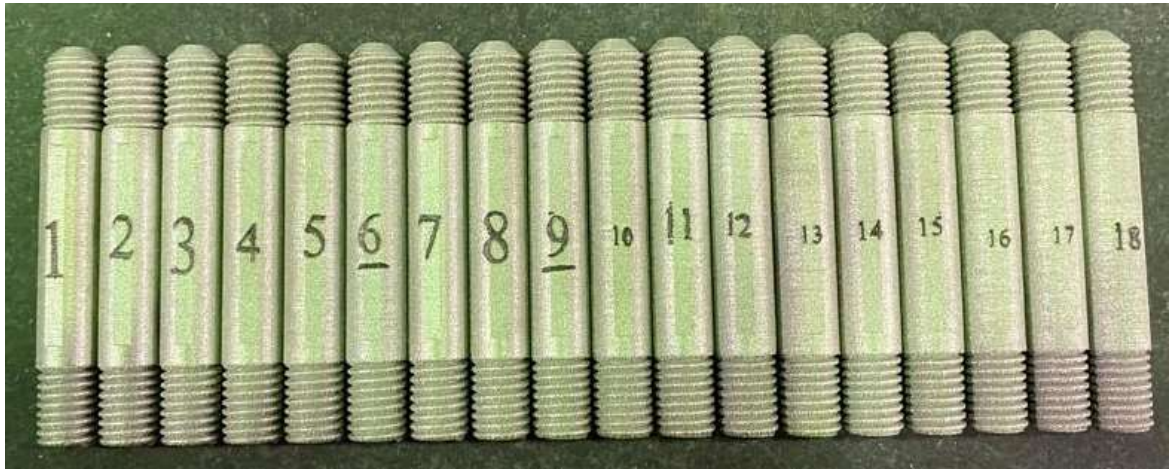
Şekil 4.2. Üretimi yapılan numunelerin tabla üzerindeki üç boyutlu yerleşimleri

Toz serpmeye yönünde herhangi bir kusura sebebiyet vermemek için parçalar 20° açı ile yerleştirilmiştir. Geometrik şekillerin ihtiyaç duymamasından dolayı herhangi bir destek yapı eklenmemiştir. Üretim vakumlanan üretim haznesinin argon gazı ile doldurulmasının ardından argon atmosferi altında gerçekleşmiştir. Üretimin ardından elde edilen numunelerin tabla üzerindeki görüntüsü Resim 4.2’de verilmiştir.

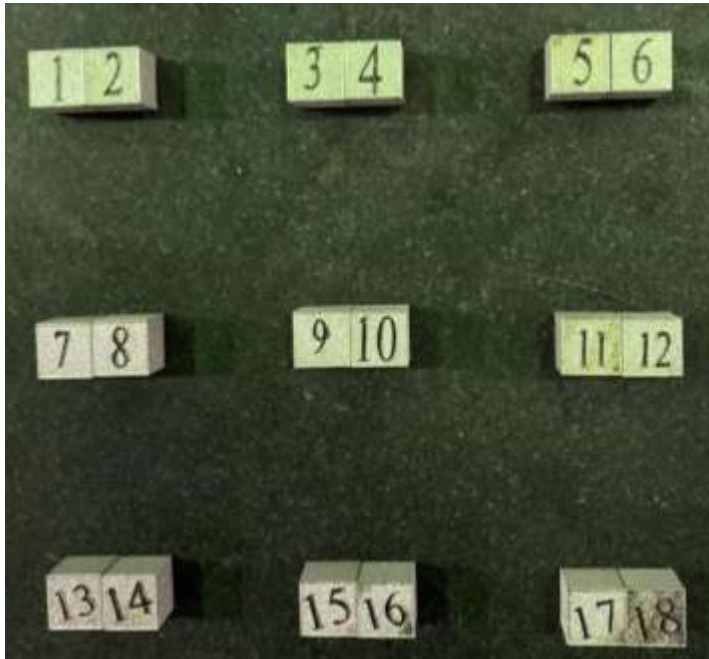


Resim 4.2. Üretim sonrası numunelerin tabla üzerindeki görüntüsü

Üretici tavsiyeleri dikkate alınarak cihazın genel parametreleri belirlenmiştir. Bununla birlikte benzer üretimler ile deneme üretimleri tecrübe edilerek lazer gücü 210 W, maruziyet noktaları arası mesafe 100 μm ve maruz kalma süresi 150 μs olacak şekilde parametreler belirlenmiştir. Üretim 30 mikronluk katmanlar halinde gerçekleştirilerek toplam 1857 katmandan oluşmuş ve yaklaşık 25 saatte tamamlanmıştır. Resim 4.3'te üretilen silindirik parçalar, Resim 4.4'te ise kübik parçalar görülmektedir. Üretim sonrası kuponlar tabla üzerinden tel erezyon kullanılarak ayrılmış ve hem kübik hem de silindirik kuponlar 1-18 arasında numaralandırılmıştır.



Resim 4.3. Silindirik numunelerin yan yana dizili görüntüsü



Resim 4.4. Kübik numunelerin yan yana dizili görüntüsü

Çalışmada eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin çeşitli özelliklerinin doğrudan karşılaştırılmasının yapılmasının yanı sıra elde edilen parçaların bir ısıtma işlemi tabi tutulması durumunun da göz ardı edilmemesi hedeflenmiştir. Bu amaçla çift rakamlı parçalara Resim 4.5'te görülen 1100 °C kapasiteli Nabertherm L24/11 marka fırında ısıtma işlemi (H900) uygulanmıştır. Parametreler SAE AMS2759/3 standardından alınmıştır [54]. Uygulanan ısıtma işlemin ardından elde edilen numunelerin görüntüsü Resim 4.6'da ve 4.7'de verilmiştir.



Resim 4.5. Isıtma işlemi için kullanılan fırının görüntüsü



Resim 4.6. Isıtma işlemi uygulanmış silindirik numunelerin yan yana dizili görüntüsü



Resim 4.7. Isıl işlem uygulanmış kübik numunelerin yan yana dizili görüntüsü

Tek tablada üretimi gerçekleştirilen numunelerin birbirleriyle karşılaştırılması için yoğunluk ölçümü, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ölçümü, çekme testi ve X-ray görüntüleme analiz sonuçları kullanılmıştır. Kübik parçalar tüm testlerde kullanılırken silindirik parçalara sadece çekme testi uygulanmıştır.

Doğrudan üretilen ve ısıl işlem uygulanan tüm kübik numunelerin yoğunluk ölçümleri Resim 4.8’de görülen 0,01 mg hassasiyetli Mettler Toledo marka cihaz ile yapılmıştır.



Resim 4.8. Yoğunluk ölçüm cihazı

Resim 4.9’da görülen Mitutoyo SJ-201 cihazı yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılmıştır. Bu cihaz 0,01 ile 100 mikron (Ra değeri) arası ölçüm aralığına ve %1 hassasiyete sahiptir. Periyodik kalibrasyonları düzenli bir şekilde yapılmakta olan bu cihazın ölçüm öncesinde prob kalibrasyonu kendi plakası ile sıfırlanmıştır.



Resim 4.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Numunelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde Rockwell metodu kullanılmıştır. Ölçümler 0,1 HRC hassasiyetine sahip Wilson Hardness Rockwell 574 cihazı ile yapılmıştır. Sertlik değerleri 10 kg ön yükleme ve 150 kg toplam yükleme ile tespit edilmiştir (Resim 4.10).



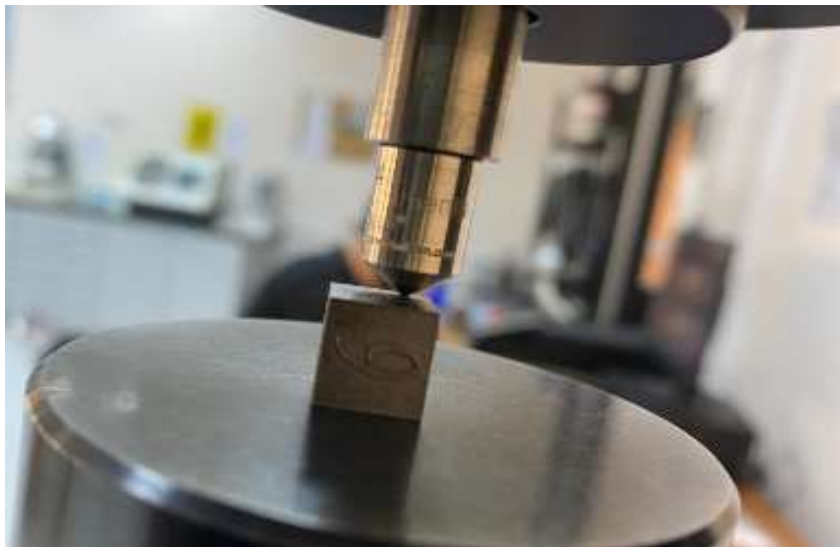
Resim 4.10. Sertlik ölçüm cihazı

Yüzeydeki geometrik bozuklukların ölçüm sonuçlarını etkilememesi için ölçümde kullanılacak yüzeyler zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde Resim 4.11’de görülen Buehler Surfmet 1 marka cihaz kullanılmıştır.



Resim 4.11. Zımparalama cihazı

Resim 4.12’de kübik bir parçanın sertlik ölçüm işleminin görüntüsü verilmiştir. Resim 4.13’te ise; cihazın dijital ekranında okunan sertlik değerinin görüntüsü yer almaktadır.

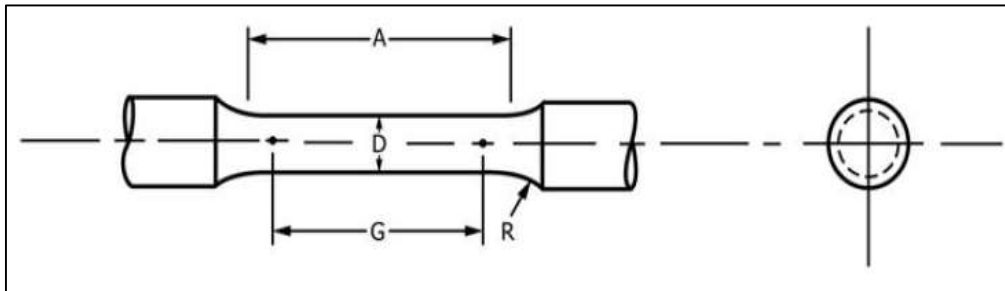


Resim 4.12. Sertlik ölçümü



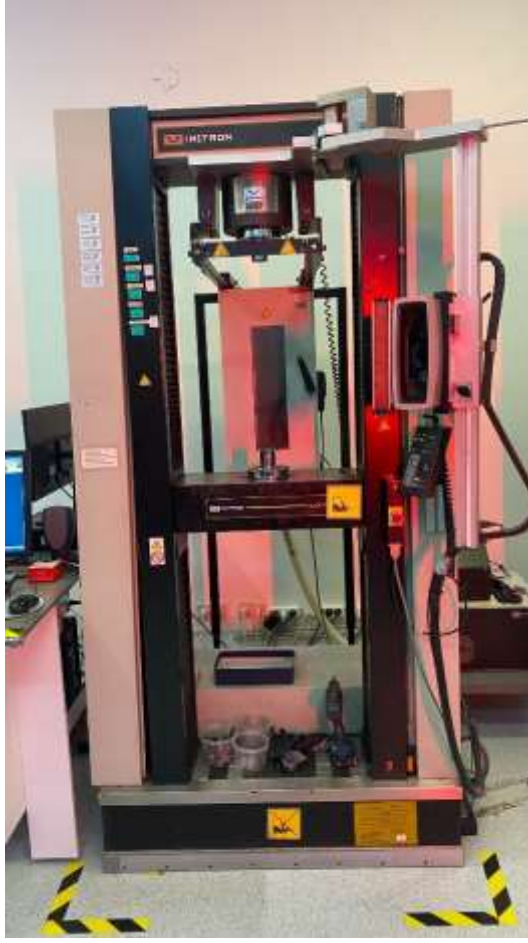
Resim 4.13. Sertlik ölçüm sonucu

Isıl işleme tabi tutulan ve ısıl işlem uygulanmayan tüm silindirik parçalar çekme testinde kullanılmıştır. Silindirik formda üretilmiş olan parçalar Şekil 4.3'te görülen ve ASTM E8/E8M-22 standardında belirtilen ölçülere (A: 30 mm, D: $1 \pm 0,005$ mm, R: $0,25 \pm 0,005$ mm ve G: $24 \pm 0,1$ mm) CNC torna tezgâhı yardımı getirilmiştir.



Şekil 4.3. ASTM E8/E8M-22 standardından alınan çekme kuponu ölçüleri [55]

Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan tüm silindirik kuponlar Resim 4.14'te görülen Instron 5500RR cihazı ile çekme testine tabi tutulmuştur.



Resim 4.14. Çekme testi cihazı

Üretimi gerçekleştirilen parçaların X-ray görüntüleri ASTM E2033 standardına uygun olarak Industrex Flex XL Blue bilgisayarlı radyografi sistemi (Resim 4.15) ile elde edilmiştir.



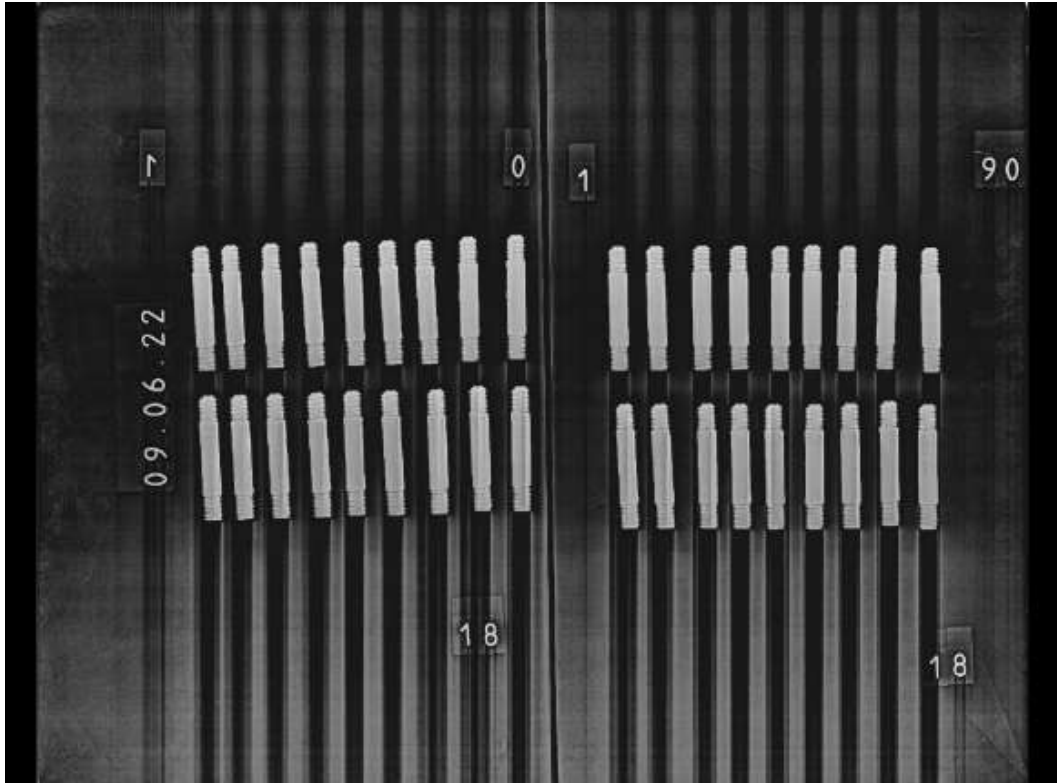
Resim 4.15. X-ray görüntüleme cihazı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

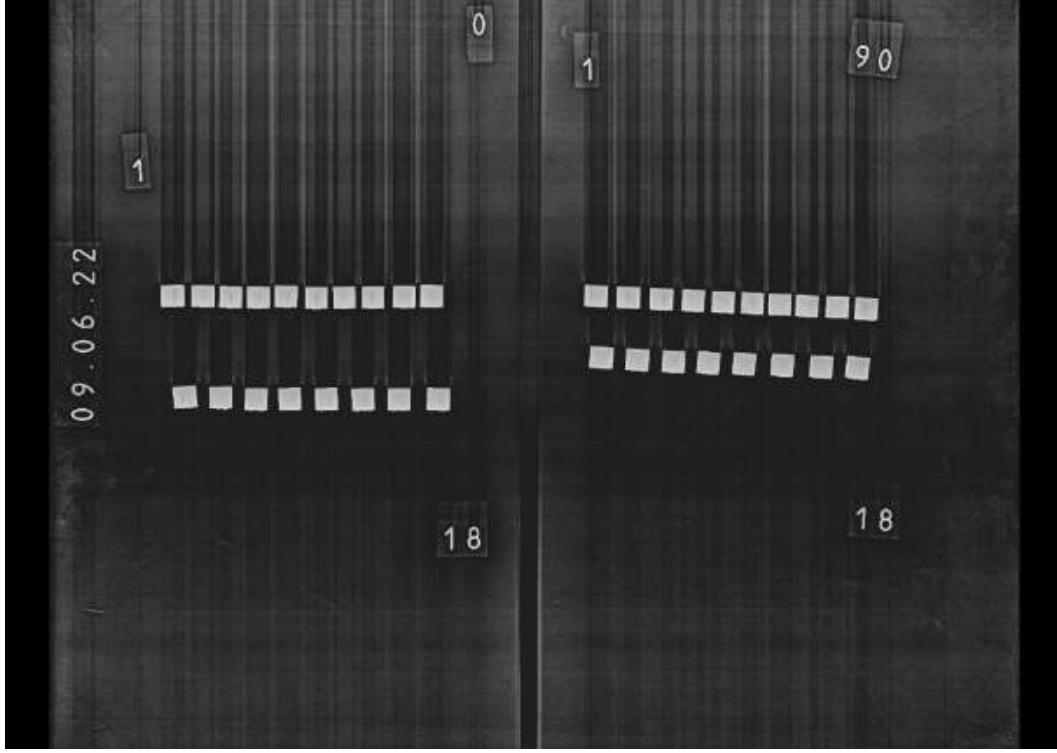
Bu çalışmada tek seferde bir tablada SLE metodu kullanılarak üretilen parçaların birbirlerinden ne kadar farklı olduğunun belirlenmesi için çeşitli mekanik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. X-ray görüntüleri analiz edilerek üretilen parçaların yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve çekme testi sonuçları analiz edilerek eklemeli imalat yönteminin seri üretime uygunluğu tartışılmıştır.

5.1. X-Ray Görüntüleri

Çalışma kapsamında hem çekme hem de yorulma numunelerinin mekanik testler öncesinde, üretim kaynaklı makro düzeyde kusurlarının olup olmadığını elde etmek amacıyla radyografik testleri gerçekleştirilmiştir. Resim 5.1 ve 5.2’de SLE metodu uygulanarak bir tablada üretilen tüm kuponların basım sonrası herhangi bir işlem yapılmadan alınan X-ray görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülemenin ilk aşamada yapılmasının temel nedeni ürünlerin doluluk miktarlarının ve basım kaynaklı hataların araştırılmasıdır. Yapılan incelemede ürünlerde herhangi bir boşluk, çatlak, delaminasyon veya kusur görülmemiştir.



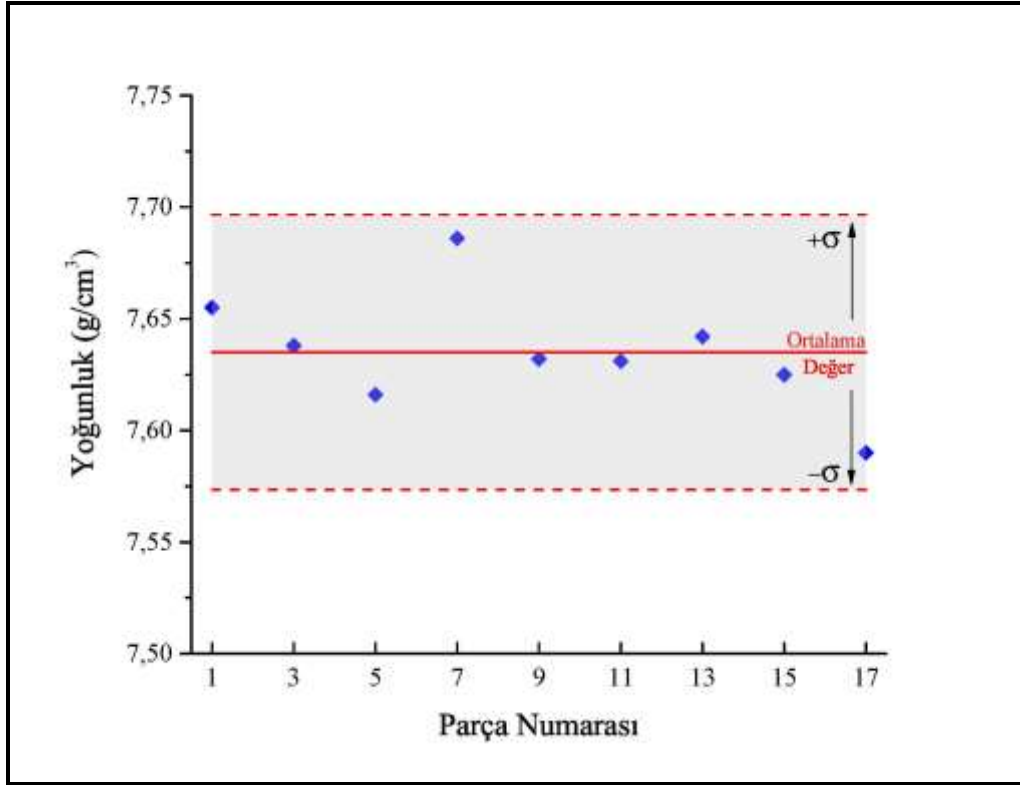
Resim 5.1. Silindirik kuponların x-ray görüntüleri



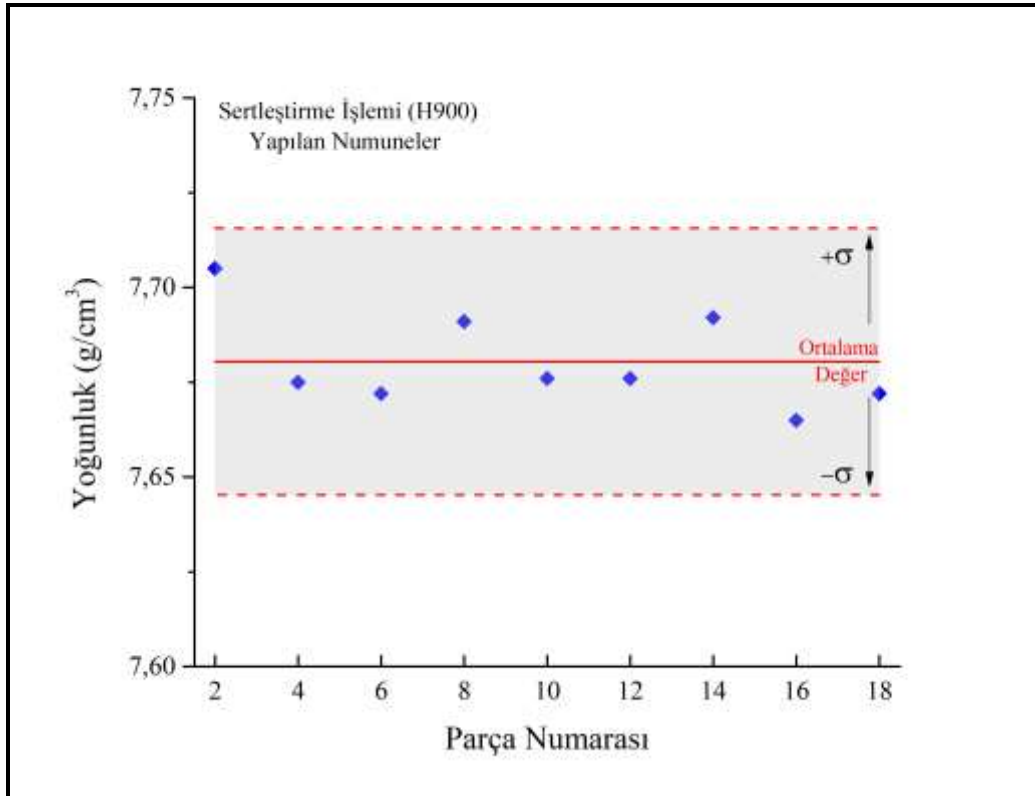
Resim 5.2. Kübik kuponların x-ray görüntüleri

5.2. Yoğunluk Ölçümleri

Üretimi gerçekleştirilen dokuz adet kübik parçanın yoğunluk ölçüm sonuçları Şekil 5.1’de, sertleştirme işlemi yapılan dokuz adet kübik parçanın sonuçları da Şekil 5.2’de verilmiştir. Her bir parçanın yoğunluk ölçümleri en az üç kez yapılmış ve alınan değerlerin ortalamaları belirlenerek ortalama değerler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi için Eşitlik 5.1’de yer alan standart sapma ifadesi kullanılmıştır. Bununla birlikte çeşitli mekanik özellikler için hesaplanan standart sapmanın daha anlamlı hale gelmesi ve kıyaslamayı kolaylaştırmak için Eşitlik 5.2’de görülen ve “%” olarak ifade edilen varyasyon katsayısı kullanılmıştır. Isıl işlem uygulamayan parçaların yoğunluk değerleri arasındaki standart sapma $\pm 0,06163 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir. Varyasyon katsayısının (bağıl standart sapma) ise %0,8072 olduğu görülmüştür. Isıl işlem uygulanan parçalar arasındaki standart sapmanın ($\pm 0,03515 \text{ g/cm}^3$) ve varyasyon katsayısının (%0,4577) daha az olduğu tespit edilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında üretilen tüm parçalar arasındaki farkların %1’in altında olduğu görülmüştür. Değişim miktarı dikkate alındığında bu tolerans aralığına uygun parçalar için seri üretiminin mümkün olabileceği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 5.1. Isıl işlem görmemiş numunelerin yoğunluk değerlerinin dağılımı



Şekil 5.2. Isıl işlem görmüş numunelerin yoğunluk değerlerinin dağılımı

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.1)$$

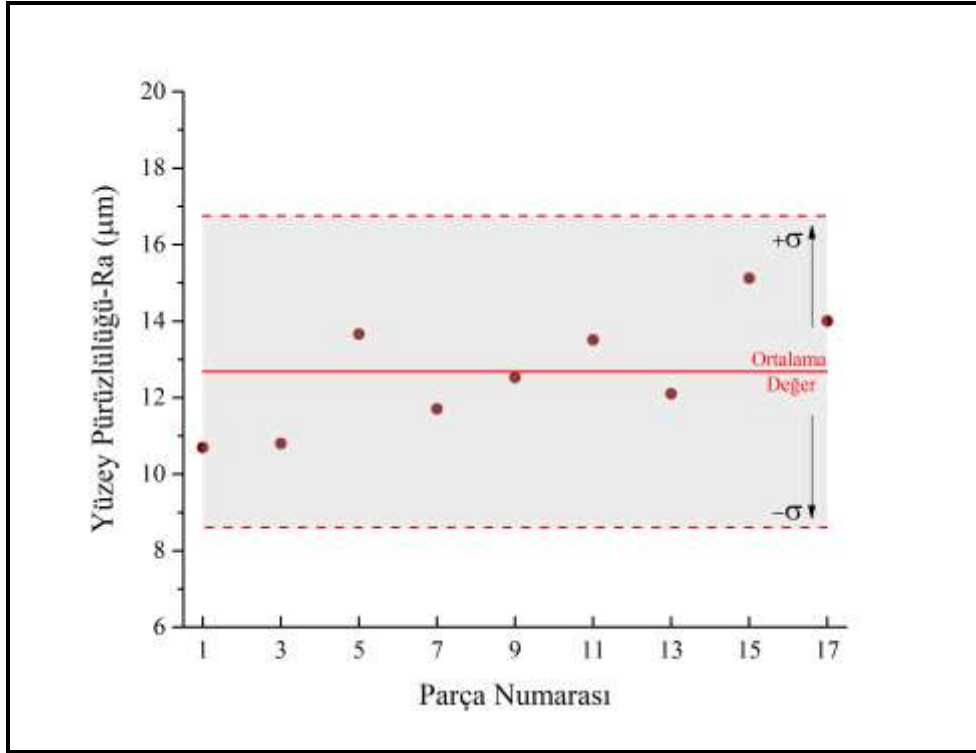
Eşitlik 5.1’de yer alan “ σ ” standart sapmayı, “ x_i ” ölçülen değeri, “ $\bar{x}$ ” ortalama değeri ve “ n ” ise parça sayısını ifade etmektedir. Varyasyon katsayısı (VK) “%” olarak Eşitlik 5.2 ile hesaplanabilir.

$$VK = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülükleri ısıtılma işlemine tabi tutulmayan kübik parçalar için belirlenmiştir. Isıl işlem uygulanan parçalarda kumlama işleminin yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu uygulamanın yüzey pürüzlülük değerlerine etki etmesi nedeniyle bu parçalar karşılaştırmada dikkate alınmamıştır.

Şekil 5.3’te ısıtılma işlemi uygulanmamış olan parçaların SLE yönteminin ardından yüzeyin temizlenmesi hariç herhangi bir işleme tabi tutulmadan ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Eklemeli imalat ile elde edildiği şekilde ilave işlem uygulanmayan parçaların pürüzlülükleri arasındaki standart sapmanın $\pm 4,07367 \mu\text{m}$ ve varyasyon katsayısının %32,13 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bağıl farkın yoğunluk sonuçlarından çok daha yüksek olmasına karşın yüzey hassasiyetinin yoğunluk kadar hassas elde edilmesinin kolay olmadığı göz ardı edilmemelidir. Ayrıca elde edilen bu pürüzlülük değerlerinin geleneksel üretim yöntemlerinden kaba tornalama veya frezelemeye yaklaşık olduğu söylenebilir. Yüzeyin hassas olması parçanın kullanım amacı açısından her zaman istenen bir özellik değildir. Ancak daha hassas bir yüzey ihtiyacı için geleneksel imalat yöntemleri ile hedeflenen nihai yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılabilir.



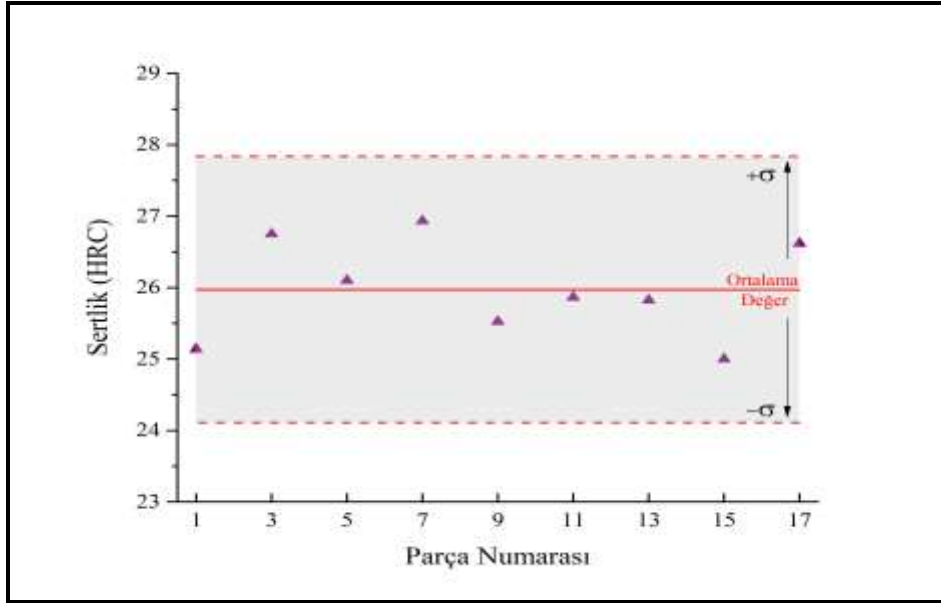
Şekil 5.3. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin dağılımı

5.4. Sertlik Ölçümleri

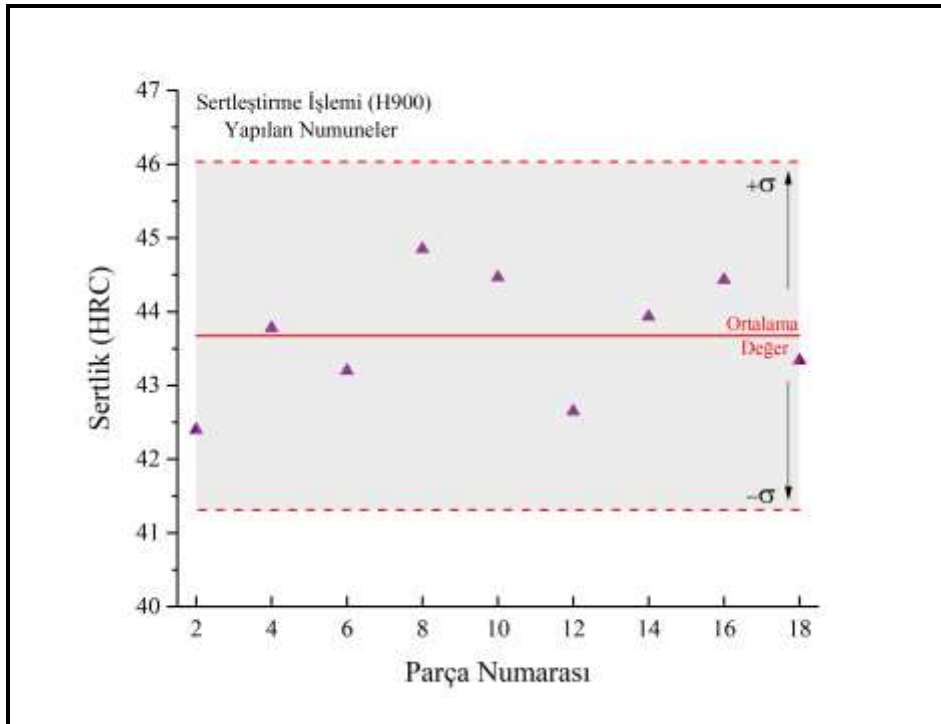
Sertlik ölçümleri üretilen tüm kübik numuneler için Rockwell yöntemi ile yapılmıştır. Isıl işlem uygulanan parçalarda sertlik değerleri ısıtıl işlemin tüm kesit boyunca uygulandığını belirleyebilmek için kalınlık boyunca elde edilmiştir.

Şekil 5.4'te ısıtıl işlem uygulanmamış dokuz kübik parçanın sertlik sonuçları, Şekil 5.5'te ise ısıtıl işlem uygulanan dokuz kübik parçanın sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış parçalar arasındaki standart sapma $\pm 1,8626$ HRC ve varyasyon katsayısı %7,17125 iken ısıtıl işleminden geçen parçalar arasındaki standart sapma $\pm 2,3617$ HRC ve varyasyon katsayısı %5,40765 olarak belirlenmiştir. Sertliğin yüksek olması malzemenin tokluğunun azalmasına neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında parçanın çalışma şartları dikkate alınarak değerlendirilmesi gereken bir özelliktir.

AMS2759/3J standardına[54]. uygun olarak H900'e göre ısıtıl işlem uygulanan kübik parçaların sertlik değerleri standartta belirtilen aralıklarda elde edilmiştir (Çizelge 5.1).



Şekil 5.4. Isıl işlem görmemiş numunelerin sertlik değerlerinin dağılımı



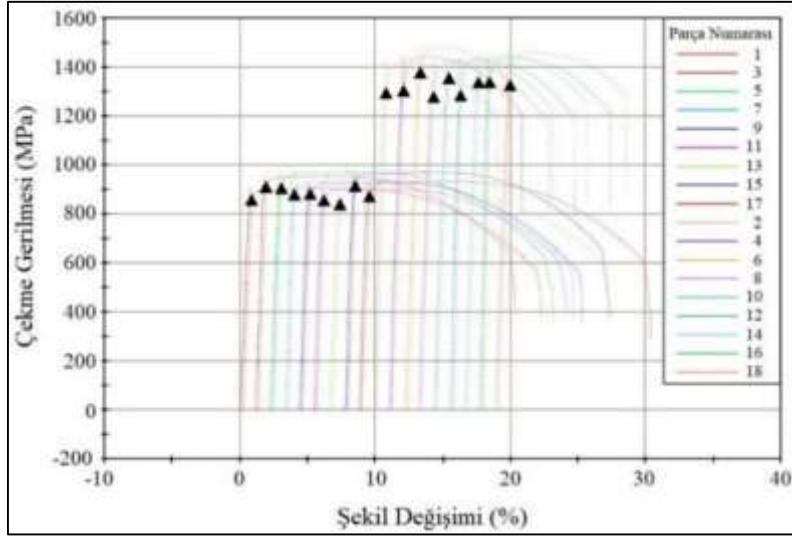
Şekil 5.5. Isıl işlem uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin dağılımı

Çizelge 5.1. Kübik numunelerin sertlik değerleri ve standart ile karşılaştırılması

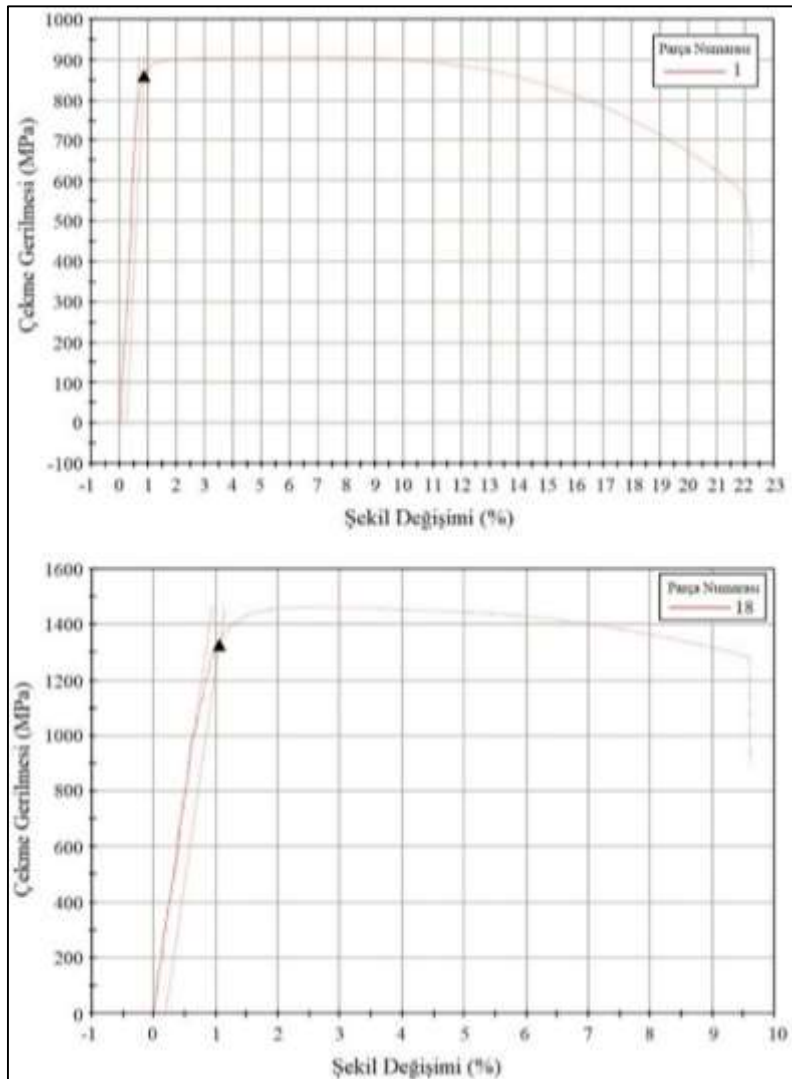
Parça Numarası		Sertlik Değerleri (HRC)	AMS2759/3J (HRC)	Parça Numarası		Sertlik Değerleri (HRC)	AMS2759/3J (HRC)
Isıl işlemsiz	1	25,14	-	Isıl İşlemli	2	42,40	40-47
	3	26,75	-		4	43,78	40-47
	5	26,10	-		6	43,20	40-47
	7	26,93	-		8	44,85	40-47
	9	25,53	-		10	44,47	40-47
	11	25,87	-		12	42,65	40-47
	13	25,825	-		14	43,93	40-47
	15	25	-		16	44,43	40-47
	17	26,62	-		18	43,34	40-47

5.5. Çekme Testi

Isıl işlemsiz ve ısıtıl işlem uygulanan parçaların çekme testi sonuçları Şekil 5.6'da yer almaktadır. Her bir gruptaki değişim birbirine oldukça yakın olmakla birlikte akma sınırındaki gerilimler dikkate alındığında ısıtıl işlemsiz parçalar arasındaki standart sapmanın $\pm 74,21$ MPa ve varyasyon katsayısının %8,42, ısıtıl işlem uygulanan parçalar arasındaki standart sapmanın $\pm 95,37$ MPa ve varyasyon katsayısının %7,215 olduğu görülmüştür. Ayrıca ısıtıl işlemsiz parçalarda ortalama kopma uzaması %20,3 iken ısıtıl işlem uygulanmasının ardından parçaların sünekliği azaldığından H900 ısıtıl işlemi uygulanmış numunelerde ortalama kopma uzaması %9,06 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.7'de ısıtıl işlemsiz ve ısıtıl işlemlili gruptan birer numunenin çekme testi sonucu verilmiştir.



Şekil 5.6. Silindirik numunelerin çekme testi sonuç grafiği



Şekil 5.7. 1 ve 18 numaralı paçaların çekme testi sonuç grafiği

Numunelerin çekme testlerine ait çeşitli verileri Çizelge 5.2’de verilmiştir. H900’e göre ısıtıl işlem uygulanan silindirik parçaların akma sınırı gerilmesi değerleri AMS2759/3J standardına[54]. uygun olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. Silindirik numunelerin çekme testi verileri ve standart ile karşılaştırması

Parça Numarası		Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yükteki Gerilme (MPa)	Akma Sınırı Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)	AMS2759/3J (MPa)
Isıl işlemsiz	1	11,34	907	859	22,0	-
	3	11,89	956	912	19,0	-
	5	12,17	974	908	20,5	-
	7	11,68	939	881	21,2	-
	9	11,69	930	884	20,7	-
	11	11,36	904	857	18,2	-
	13	11,26	896	842	20,4	-
	15	12,16	972	916	19,2	-
	17	11,68	934	873	21,3	-
Isıl İşlemli	2	17,91	1425	1295	9,0	1310
	4	18,06	1444	1304	9,6	1310
	6	18,55	1484	1378	7,8	1310
	8	17,88	1423	1278	9,4	1310
	10	17,82	1433	1355	8,5	1310
	12	17,90	1431	1285	9,1	1310
	14	18,16	1445	1338	8,9	1310
	16	18,10	1441	1338	9,6	1310
	18	18,29	1462	1326	9,6	1310

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma son yıllarda adından sıkça söz ettiren ve geleneksel imalat yöntemlerine bir alternatif veya tamamlayıcı olarak ortaya çıkan eklemeli imalat yöntemleri üzerinedir. Eklemeli imalatın dezavantaj olarak sayılabilecek bir özelliği seri üretim için çok uygun olmamasıdır. Üretim yapılan hacmin sınırlı olması sebebiyle parça boyutuna da bağlı olarak genelde tek seferde tek ürün üretilmektedir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan lazerle seçici ergitme yönteminin seri imalata uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın temel amaçları seri üretime uygunluğun araştırılması olduğu için tek seferde çoklu üretim yapılarak ürünlerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Tek seferde yapılan üretimde üretim tablası üzerine her biri dört parçadan oluşan dokuz ana grup yerleştirilmiştir. Yapılan üretimin ardından oluşturulan gruplara çeşitli testler uygulanarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Tek seferde aynı tabla üzerinde üretilen ürünler arasındaki farklılıkların standart sapmaları belirlenerek elde edilen sonuçlarla seri üretime uygunluk hakkında çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir.

Yapılan bu çalışmada çalışmayı sınırlandıran bazı faktörler olmuştur. Bunlar temel olarak üretimlerin zaman alması ve kullanılan makinenin sınırlı çalışma kapasitesi olarak ifade edilebilir. Çalışma tablasının boyutlarının belirli ya da sınırlı olması nedeniyle üretilen parçanın seçiminde herhangi bir tasarım değil daha sade olacak silindirik ve kübik numuneler seçilmiştir. Bu geometriler seçilerek hem yerden hem de zamandan tasarruf edilerek çok sayıda parçanın tek seferde üretiminin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Böylece bir tablada tek seferde üretilen çok sayıda parçanın mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada X-ray görüntüleme analiz sonuçları, yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ölçümleri ile çekme testi sonuçları kullanılmıştır.

Çeşitli mekanik özellikler karşılaştırıldığında ölçülen değerler arasında en az farklılığın $\pm 0,4577$ varyasyon katsayısı (bağıl standart sapma) ile ısıtma işlem uygulanan (H900) parçaların yoğunlukları arasında olduğu görülmüştür. En fazla değişim ise yüzey pürüzlülüğünde (varyasyon katsayısı $\pm 32,13$) elde edilmiştir.

Sonuç olarak üretimi yapılacak parçanın tasarım beklentileri dikkate alınarak hedeflenen toleransların bu çalışmada belirlenen sınırlar içinde olması durumunda SLE metodunun seri üretime uygun olduğu ifade edilebilir. Ayrıca daha hassas tolerans aralıkları için hibrit üretim sistemlerinin de kullanılabileceği göz ardı etmemek de yararlı olacaktır.

Yapılan bu çalışmada kullanılan parametreler değiştirilerek aynı tablada üretilen ürünler arasındaki farklılığa etkisi araştırılabilir. Yine benzer amaçla farklı eklemeli imalat yöntemleri uygulanabilir ve birbirleriyle karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 373-392.
2. Upcraft, S., Fletcher, R. (2003). The rapid prototyping Technologies. *Assembly Automation*, 23 (4), 318-330.
3. Sood, A. K., Ohdar, R. K., Mahapatra, S. S., (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31 (1), 287-295.
4. Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 606-621.
5. Başcı, Ü. G., Yamanoğlu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 5 (2), 339-352.
6. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C.B., Wang, C.C.L., Shin, Y.C., Zhang, S., Zavattieri, P.D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
7. Wysocki, B. Maj, P. Sitek, R. Buhagiar, J. Kurzydłowski, K., Świążkowski. W, (2017). Laser and Electron Beam Additive Manufacturing Methods of Fabricating Titanium Bone Implants. *Applied Sciences*, 7 (7), 657.
8. Gülcan, O. Günaydın, K., Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, 13 (16), 2829.
9. BSI British Standards, “Additive manufacturing- General principles- Fundamentals and vocabulary”,
10. Kumaresan, R. Samykano, M. Kadirgama, K. Ramasamy, D. Keng, N. W., Pandey. A. K. (2021). 3D Printing Technology for Thermal Application: A Brief Review. *ARFMTS*, 83 (2), 84-97.
11. Başcı, Ü. G., Yamanoğlu, R. (2022). Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) ile Eklemeli İmalat. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (2), 914-928.
12. Pagac, M. Hajnys, J., Jancar. L. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, *Challenges, and Future Trends of 3D Printing*. *Polymers*, (13) 4, 598.
13. Jirků, P. Urban. J. Müller, M., Kolář, V. (2023). Evaluation of Mechanical Properties and Filler Interaction in the Field of SLA Polymeric Additive Manufacturing. *Materials*, 16 (14), 2-20.
14. İnternet: Rapid Prototyping with SLA, URL: <https://www.nicerapid.com/rapid-prototyping-with-sla-a-568.html>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023.
15. Hornbeck, L. J. (1999, Ocak). *Digital light processing update: status and future applications*. In: Conference on Projection displays V, San Jose, California.

16. Monk, D. W., Gale, R. O. (1995). The digital micromirror device for projection display. *Microelectronic Engineering*, 27(4), 489–493.
17. Chaudhary, R. Fabbri, P. Leoni, E. Mazzanti, F. Akbari, R., Antonini, C. (2023). Additive manufacturing by digital light processing: a review. *Prog Addit Manuf*, 8(2), 331-351.
18. Pagac, M. Hajnys, J. Mesicek, Y., Stefek, P. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, 13(4), 598.
19. Frazelle, J. (2021). Out-of-this-world additive manufacturing. *Commun. ACM*, 64(3), 58-62.
20. Diegel, O. Nordin, A., Motte, D. (2019). *Additive Manufacturing Technologies, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer Singapore, 19-39.
21. İnternet: About Additive Manufacturing, URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023
22. Mazurchevici, A., Nedelcu, D., Popa, R. (2020). Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 27(2), 179-192.
23. İnternet: What does FFF mean in 3D printing? Introducing Fused Filament Fabrication, URL: <https://www.bcn3d.com/introduction-fff-3d-printing-technology-additive-manufacturing-basics/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023.
24. İnternet: What does FFF mean in 3D printing? Introducing Fused Filament Fabrication URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023.
25. Kruth, J. P. Wang, X. Laoui, T., Froyen , L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371.
26. Rider, P. Kačarević, Ž. Alkildani, S. Retnasingh, S. Schnettler, R., Barbeck, M. (2018). Additive Manufacturing for Guided Bone Regeneration: A Perspective for Alveolar Ridge Augmentation. *IJMS*, 19(11), 3308.
27. Patterson, A. E. Messimer, S. L., Farrington, P. A. (2017). Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies*, 5(2),15.
28. İnternet: Additive Manufacturing, SLM, URL: <https://www.3dmedical.fr/additive-manufacturing-slm/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.20023.
29. Louvis, E. Fox, P., Sutcliffe, C. J. (2011). Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 275-284.

30. Venkatesh, K. V., Nandini, V.V. (2013). Direct Metal Laser Sintering: A Digitised Metal Casting Technology. *Journal of Indian Prosthodontic Society*, 13(4), 389-392.
31. İnternet: What is Electron Beam Melting?, URL: <https://www.https://www.3d.directory/community/what-is-electron-beam-melting>, Son Erişim Tarihi: 18.12.2023
32. Wysocki, B. Maj, P. Sitek, R. Buhagiar, J. Buhagiar, K., Świążkowski, W. (2017). Laser and Electron Beam Additive Manufacturing Methods of Fabricating Titanium Bone Implants. *Applied Sciences*, 7(7), 657.
33. İnternet: 3D Printing Processes, URL: <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-material-jetting-part-7-8/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023
34. Bai, Y., Williams, C. B. (2017). Binderless Jetting: Additive Manufacturing of metal parts via jetting nanoparticles. *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Texas.
35. Clay, G. Song, H. Nielsen, J., Stasiak, J. (2015). 3D Printing Magnetic Material with Arbitrary Anisotropy. *print4fab*, 31(1), 307-310.
36. Yuran, A. F., Yavuz, İ. (2021). Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması. *Mühendis ve Makina*, 62(704), 580-606.
37. İnternet: What is “Drop-on-Demand” Printing?, URL: <https://epsvt.com/what-is-drop-on-demand-printing/>, Son Erişim Tarihi: 20.12.2023.
38. Gokuldoss, P. K. Kolla, S., Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, 10(6), 672.
39. Mirzababaei, S., Pasebani, S. (2019). A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. *JMMP*, 3(3), 82.
40. Gonzalez, J. A. Mireles, J. Lin, Y., Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564.
41. Petrat, T. Brunner-Schwer, C. Graf, B., Rethmeier, M. (2019). Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition. *Procedia Manufacturing*, 36,256-266.
42. Guddati, S. Kiran, A. S. Leavy, K. M., Ramakrishna, S. (2019). Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications. *Int J Adv Manuf Technol*, 105(1-4), 193-215.
43. Kayacan, M. Y., Yılmaz, N. (2019). DMLS eklemeli imalatla süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 22 (3): 763-770.
44. Polat, N. Anaç, N., Mert, F. (2023). Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 26,(3),1145–1154.

45. Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., Özdemir, V. (2019). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (2), 663-674.
46. Özsoy, K., Sayın, H. (2021). Eklemeli imalat ile üretilen PLA esaslı malzemenin çekme dayanımının makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak tahmini. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 15-25.
47. Kayacan, M. C., Delikanlı, Y. E., Duman, B., Özsoy, K. (2018). Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (1), 127-143.
48. Bahçe, E., Boyacı, S., Güler, M.S. (2022). Eklemeli İmalatta Üretim Yönünün Parça Üretimine Etkileri. *Giresun Üniversitesi Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 193-203.
49. Duman, B., Kayacan, M. C. (2017). Ar-ge amaçlı doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) tezgâhı işlem parametrelerinin araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 15-32.
50. Prashanth, K. G., Scudino, S., Maity, T., Das, J., Eckert, J. (2017). Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?, *Materials Research Letters*, 5(6), 386-390.
51. Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., Smurov, I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12), 1624-1631.
52. Gusarov, A. V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., and Smurov, I. (2007). Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*, 254 (4), 975-979.
53. Lopez, E. Brueckner, F, Grunert, C. (2018). Evaluation of 3D-printed parts by means of high-performance computer tomography. *Journal of Laser Applications*, 30(3), 3-10.
54. SAE Mobilus Havacılık - Uzay ve Otomotiv Teknik Raporları & Standartları “Sae Mobilus,” Sae Mobilus, May 28, 2020.
55. E28 Committee, “Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, ASTM International.



Gazili olmak ayrıcalıktır