



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN KATMANLI
YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Barış ŞENER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN KATMANLI YAPILARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Barış ŞENER
0000-0002-4512-3245

Doç. Dr. Celalettin YÜCE
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN KATMANLI YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Barış ŞENER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Seçici Lazer Ergitme yaygın kullanılan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu üretim şeklinin kullanılmasının en büyük sebebi ve diğer üretim yöntemlerinden ayıran en önemli avantajı yüksek boyut toleransına sahip karmaşık yapılar üretebilmesidir. Bu çalışmada, seçici lazer ergitme prosesindeki önemli parametrelerden olan tarama hızı, katman kalınlığı ve örtüşme oranının 316L paslanmaz çelik toz malzemeden üretilmiş numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Standartlara uygun olarak çekme testleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, radyografik incelemeler ve mikro sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, SLE yönteminde kullanılan üretim parametre/stratejilerinin 316L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen çekme testi sonuçları incelendiğinde katman kalınlığının 0,04 mm'den 0,05 mm'e çıkması ile hem akma hem de çekme dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Tarama hızındaki artışın çekme dayanımını belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. Akma dayanımında da azalma söz konusu olsa da belirgin bir düşüş gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Seçici lazer ergitme, 316L paslanmaz çelik, tarama hızı, katman kalınlığı, örtüşme oranı, mekanik özellikler
2023, xii + 54 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF LAYERED STRUCTURES MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING

Barış ŞENER

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Selective Laser Melting is a widely used additive manufacturing method. The biggest reason for using this production method and the most important advantage that distinguishes it from other production methods is that it can produce complex structures with high dimensional tolerance. In this study, the effects of scanning speed, layer thickness and overlap ratio, which are important parameters in the selective laser melting process, on the mechanical properties of the samples produced from 316L stainless steel powder material were experimentally investigated. Tensile tests, surface roughness measurements, radiographic examinations and microhardness tests were carried out in accordance with the standards. As a result, it has been determined that the production parameters/strategies used in the SLM method have a significant effect on the mechanical properties of 316L stainless steel. When the obtained tensile test results were examined, a decrease was observed in both yield and tensile strength with the layer thickness increasing from 0.04 mm to 0.05 mm. It was observed that the increase in scanning speed significantly decreased the tensile strength. Although there was a decrease in yield strength, no significant decrease was observed.

Key words: Additive manufacturing, selective laser melting, 316L stainless steel, scan speed, layer thickness, overlap rate, mechanical properties
2023, xii + 54 pages.

TEŐEKKÖR

Yüksek Lisans eğitiminin boyunca bana yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Celalettin YÜCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan aileme, desteklerinden dolayı değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Barış ŞENER
12/01/2023



İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | x |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 3 |
| 2.1. Eklemeli İmalatın Tanımı..... | 3 |
| 2.2. Eklemeli İmalatın Tarihçesi..... | 4 |
| 2.3. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler..... | 6 |
| 2.4. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları..... | 8 |
| 2.5. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları..... | 10 |
| 2.6. Eklemeli İmalat Yöntemi Çeşitleri..... | 10 |
| 2.6.1. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri..... | 11 |
| 2.6.1.1. Toz esaslı yöntemler..... | 12 |
| Seçici lazer sinterleme (SLS)..... | 13 |
| Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)..... | 14 |
| Lazer mikro sinterleme (LMS)..... | 15 |
| Seçici lazer ergitme (SLE)..... | 16 |
| 2.6.1.2. Akış bazlı yöntemler..... | 20 |
| 2.6.1.3. Levha laminasyon..... | 21 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 22 |
| 3.1. Deney Tasarımı..... | 22 |
| 3.2. Numunelerin Üretimi..... | 23 |
| 3.3. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları..... | 27 |
| 3.3.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... | 28 |
| 3.3.2. Çekme testi..... | 30 |
| 3.3.3. Mikrosertlik ölçümü..... | 31 |
| 3.3.4. Radyografik test..... | 33 |
| 4. BULGULAR..... | 34 |
| 4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Testi..... | 34 |
| 4.2. Çekme Testi..... | 38 |
| 4.3. Mikrosertlik Ölçümü..... | 41 |
| 4.4. Radyografik Test..... | 44 |
| 5. SONUÇ (TARTIŞMA ve SONUÇ)..... | 47 |
| KAYNAKLAR..... | 49 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 54 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| Simgeler | Açıklama |
|----------|-------------------------|
| P | Lazer gücü |
| h | Kayma mesafesi değişimi |
| V | Lazer tarama hızı |
| E | Enerji yoğunluğu |
| t | Katman kalınlığı |
| Cr | Krom |
| Fe | Demir |
| N | Nitrojen |
| Mn | Mangan |
| P | Fosfor |
| Si | Silikon |
| S | Sülfür |
| Mo | Molibden |
| C | Karbon |
| Ni | Nikel |

Kısaltmalar

| Kısaltmalar | Açıklama |
|-------------|--|
| SLE | Seçici Lazer Ergitme |
| CAD | Bilgisayar Destekli Tasarım |
| ASTM | Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu |
| UTS | Nihai Gerilme Kuvveti |
| ISO | Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu |
| LMD | Lazer Metal Biriktirme |
| DMD | Doğrudan Metal Biriktirme |
| LENS | Lazer Net Şekillendirme |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Eklemeli imalatı kullanan endüstri alanları..... | 8 |
| Şekil 2.2. Eklemeli imalatın uygulama alanları..... | 9 |
| Şekil 2.3. Eklemeli imalatın sınıflandırılması..... | 11 |
| Şekil 2.4. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri..... | 12 |
| Şekil 2.5. Toz yatak üretim döngüsü..... | 12 |
| Şekil 2.6. Seçici lazer sinterleme..... | 13 |
| Şekil 2.7. Doğrudan metal lazer sinterleme..... | 14 |
| Şekil 2.8. Lazer sinterleme..... | 15 |
| Şekil 3.1. Test numunelerinin CAM yazılımında oluşturulma görüntüleri..... | 24 |
| Şekil 3.2. Enavision 250P sle tezgahı..... | 25 |
| Şekil 3.3. SLE yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik malzemelerin görselleri | 27 |
| Şekil 3.4. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller..... | 29 |
| Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için üretilen numunelere ait görsel..... | 29 |
| Şekil 3.6. Mitutoyo yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının görselleri..... | 30 |
| Şekil 3.7. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller..... | 30 |
| Şekil 3.8. Shimadzu AG-X 50 kN cihaz görselleri..... | 31 |
| Şekil 3.9. Çekme testi sonrası çekme testi numune görselleri..... | 31 |
| Şekil 3.10. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller..... | 32 |
| Şekil 3.11. Yamer RBVHT-1875 mikrosertlik ölçüm cihazının görselleri..... | 32 |
| Şekil 3.12. Philips MU64 marka endüstriyel X-ray cihazına ait görseller | 33 |
| Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktalarına ait görseller..... | 34 |
| Şekil 4.2. Tarama hızının ortalama pürüzlülük değerine etkisi..... | 35 |
| Şekil 4.3. Katman kalınlığının ortalama pürüzlülük değerine etkisi..... | 36 |
| Şekil 4.4. Örtüşme oranının ortalama pürüzlülük değerine etkisi..... | 37 |
| Şekil 4.5. Tarama hızının akma ve çekme dayanımına etkisi..... | 38 |
| Şekil 4.6. Katman kalınlığının akma ve çekme dayanımına etkisi..... | 39 |
| Şekil 4.7. Örtüşme oranının akma ve çekme dayanımına etkisi..... | 40 |
| Şekil 4.8. Tarama hızının malzeme sertliğine etkisi..... | 42 |
| Şekil 4.9. Katman kalınlığının malzeme sertliğine etkisi..... | 43 |
| Şekil 4.10. Örtüşme oranının malzeme sertliğine etkisi..... | 44 |
| Şekil 4.11. Radyografik test numuneleri..... | 45 |
| Şekil 4.12. 1 nolu numuneye ait radyografik inceleme görüntüsü..... | 45 |
| Şekil 4.13. 2 ve 3 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri..... | 46 |
| Şekil 4.14. 4 ve 6 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri..... | 46 |
| Şekil 4.15. 7 ve 9 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri..... | 46 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Çizelge 3.1. Üretim parametre değerleri tablosu | 23 |
| Çizelge 3.2. 316 L paslanmaz çelik kimyasal birleşim | 24 |
| Çizelge 3.3. 316 L paslanmaz çelik mekanik değerler | 24 |
| Çizelge 3.4. Enavision 250P sle tezgahı | 26 |
| Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları | 35 |
| Çizelge 4.2. 1. deney seti çekme testi sonuçları | 38 |
| Çizelge 4.3. 2. deney seti çekme testi sonuçları | 39 |
| Çizelge 4.4. 3. deney seti çekme testi sonuçları | 40 |
| Çizelge 4.5. Üretim uygulamalarının mikrosertlik testi sonuçları..... | 41 |



1. GİRİŞ

Eklemeli imalat; bir model üretim şeklidir ve ürün oluşturmak üzere bir araya gelen katmanların eklenmesiyle işleyen bir üretim sürecine sahiptir. Eklemeli imalatı diğer imalat türlerinden ayıran en önemli özellik ise üretim yapılırken süreç planlamasına gerek duyulmadan model üretimi yapmasıdır. Üretim yapılacağı zaman eklemeli imalatın tercih edilmesinin en büyük sebebi ise karışık bir geometriye sahip modellerin ya da talaşlı imalat gibi geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyecek modelleri üretebilmesidir. Ayrıca üretim süreci hızlı gerçekleşen, kullanışlı ve yüksek verimli bir sisteme sahiptir. Bu sebeplerden dolayı eklemeli imalat ile üretim son zamanlarda çok fazla tercih edilmektedir. Eklemeli imalat kullanım alanları başlıca havacılık ve uzay, biyomedikal, savunma sanayi, otomotiv, enerji sektörü gibi önemli endüstriyel bölgelerdir. Biyomedikalde implant üretiminde büyük fayda sağlamaktadır. Eklemeli imalatın avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır, en dikkat çeken dezavantaj ise bu üretim şeklinin maliyetli olmasıdır. Küçük, basit parça üretiminde kullanıldığı zaman daha maliyetli olmaktadır bu yüzden eklemeli üretim şekli tamamen diğer üretim şekillerinin yerini alamamaktadır.

Eklemeli imalat birçok farklı yöntemlere sahiptir. Bu yöntemler: fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyon, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, toz yataklı füzyon, direkt enerji depolama, levha/sac laminasyon yöntemleridir.

Seçici lazer ergitme (SLE): Bir tür eklemeli imalat yöntemidir. 3B(üç boyutlu) baskı teknolojisi olarak da bilinir. SLE ham maddeyi toz formunda kullanabilmektedir. SLE’de gidişatı belirlenmiş bir lazer ışını kullanılarak aynı kalınlığa sahip ve ardışık olarak katmanlar halinde serpilmiş metal tozların ergitilmesi sağlanır. Bu işlem boyunca sürekli devam eden bir lazer taraması mevcuttur. Tozun tamamen bir araya gelmesini sağlamak için SLE işleminde daha yüksek bir güce sahip lazer kullanılması gereklidir. İşlemden kullanılan lazerler vuruş prensibi ile çalışır. Lazer türü olarak ise fiber lazerler kullanılmaktadır. İlk başlarda kullanışlı prototiplerin imal edildiği bu üretim şekli gün geçtikçe kullanıcıya direkt olarak ürünün teslimatının yapıldığı hızlı ve seri bir üretim tekniği olmayı başarmıştır. Bu üretim şeklinin kullanılmasının en büyük nedeni ve diğer üretim yöntemlerinden ayırt eden en mühim avantajı yüksek boyut toleransına sahip

kompleks yapılar üretebilmesidir. SLE'nin ileri teknolojide geniş bir kullanım alanı vardır. Tıpta, savunma sanayinde, havacılıkta, enerji ve otomotivde SLE üretim metodundan faydalanılır.

Bu çalışma kapsamında seçici lazer ergitme yönteminin parametrelerinden olan tarama hızı, katman kalınlığı ve örtüşme oranının 316L paslanmaz çelik toz malzemesinden üretilmiş numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için numunelere çekme testleri, yüzey pürüzlülük ölçümleri, radyografik incelemeler ve mikrosertlik testleri uygulanmıştır.

Çalışmanın Kurumsal Temeller ve Kaynak Araştırması bölümünde eklemeli imalatın tanımı, eklemeli imalatın tarihçesi, eklemeli imalatta kullanılan malzemeler, eklemeli imalatın kullanım alanları, eklemeli imalatın avantaj ve dezavantajları, eklemeli imalatın yöntem çeşitlerinden bahsedilmiştir. Seçici lazer ergitme üretim metodu tanıtılmış ve bu yöntemle 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak literatürde yapılan üretim çalışmaları ve bunların sonuçlarından bahsedilmiştir.

Materyal ve Yöntem kısmında numunelerin üretim detaylarından, deney tasarımından, deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve özelliklerinden, ölçüm detaylarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın Bulgular kısmında, malzemelere uygulanan testlerin sonuçları sayısal olarak ortaya koyulmuş ve belirlenen parametrelerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın Sonuç kısmında ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve çıktılar sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalatın Tanımı

Eklemeli imalat tarih boyunca birçok isimle tanımlanmıştır. Bu yöntemi kullanan kişiler ve araştırmacılar eklemeli imalat türünü hızlı prototipleme, katmanlı imalat, üç boyutlu baskılama, bağımsız form üretimi gibi terimlerle ifade ettikleri görülmektedir.

Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (ISO)'nun ISO/ASTM 52900:2015 sayılı standardına bakıldığında istenilen formun malzemelerin ardışık olarak eklenmesiyle elde edilmesine eklemeli şekillendirme denilmiştir (52900:2015, 2015). Ayrıca burada eklemeli imalat teknolojilerinin eklemeli şekillendirme prensibini baz alarak somut üç boyutlu geometrilerin inşasını gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Standartta malzemelerin ardışık eklenmesi ifadesiyle, imal edilmek istenilen malzeme için hammaddelerin bir araya getirilerek bağlama, kaynaklama gibi işlemler yardımıyla birleştirilmesi belirtilmiştir. Proseslerin belirleyici unsurlarının malzeme eklenmesi için kullanılan teknikler olduğu, farklı malzemelerin farklı füzyon ve bağlanma prensiplerine sahip olması nedeniyle, proseten prosese fark eden kullanılan ekleme yönteminin hangi malzemelerin hammadde olarak kullanılacağı konusunda belirleyici unsur olduğu belirtilmiştir. Yine bu standartta eklemeli imalat proseslerinde üretilen ürün özelliklerinin; malzemenin türü, uygulanan füzyon ya da bağlanma prensibi, malzeme eklenmesi için kullanılan hammadde formu ve malzemelerin nasıl birleştirildiği gibi özellikler ile oluştuğu ifade edilmiştir.

Eklemeli imalat prosesi, tek ve çok aşamalı eklemeli imalat olarak iki şekilde incelenebilir. Türüne bağlı olarak üretilmek istenen ürünün temel geometrisi ve özellikleri tek bir süreçte elde ediliyorsa tek aşamalıdır. Eğer ilk işlem geometrinin elde edilmesi ve sonrasında uygulanan ikincil işlem ile istenilen ürünün özellikleri sağlanabiliyorsa çok aşamalı eklemeli imalat prosesi olarak adlandırılmaktadır. Hem tek aşamalı hem de çok aşamalı eklemeli imalatta nihai üründe istenen malzeme özelliklerini elde edebilmek için ilave olarak bir ya da daha fazla proses sonrası işlemlerinin (ısıtılı işlemler, mekanik son işleme vb.) uygulanması gerekebilir (52900:2015, 2015).

Srivastava ve ark. (2020) Eklemeli imalatı, direkt olarak insanlar tarafından oluşturulan katmanlanmış üç boyutlu bilgisayar destekli tasarımların kalıp, fikstür ve takım kullanılmadan üretilmesini sağlayan bir imalat tekniği olarak ifade etmiştir. Üç boyutlu baskı teriminin eklemeli imalat için hatalı bir isimlendirme olduğunu fakat bu terimin popülerliğini koruduğunu belirtmiştir. Ayrıca birçok sektörde eklemeli imalat için üretken imalat ve hızlı imalat terimlerinin eş anlam taşıdığını belirtmiştir. Eklemeli imalatın istikrarlı ve yeniliklere yatkın olduğunu, otuz yıllık değişim süreci ile günümüzdeki önemine kavuştuğunu belirtmiştir.

Gibson ve ark. (2021), eklemeli imalatı hızlı prototipleme ve üç boyutlu baskı olarak isimlendirmiştir. Ayrıca sistem veya parçanın son sürümünün veya ticari aşama öncesinde sunum amaçlı hızlı bir şekilde üretilmesine olanak sağlayan bir yöntem olarak ifade etmiştir. Kullanıcıların hızlı prototipleme teknolojisiyle elde edilen ürünlerin kalitesinin istenen ürüne ulaşım kapsamında oldukça iyileşme gösterdiğini ve bu nedenle hızlı prototipleme teriminin mevcut olan teknolojiyi ifade etmekte eksik kalmaya başladığını düşündüklerini iletmiştir. Bu nedenle ASTM International bünyesindeki teknik heyetin dünya çapındaki çoğu standart gibi bu teknoloji için eklemeli imalat teriminin kullanımı konusunda fikir birliğine vardığını belirtmiştir.

2.2. Eklemeli İmalatın Tarihçesi

Kodama (1998), 1981 yılında sıvı foto-duyarlı malzemenin 300-400 nm aralığındaki dalga boyuna sahip ultraviyole ışına maruz kalmasıyla katılaştırabildiği kesitsel katmanlar ile katı model oluşturmayı başarmış ve yöntemini üç boyutlu plastik modellerin otomatik üretime yönelik yeni bir model olarak ifade etmiştir. Katılaştırılmış katman kalınlığının ultraviyole ışın yoğunluğuna ve maruz kalma süresine bağlı olduğunu, bu nedenle istenen şekle ve kalınlığa sahip katılmış bir 4 katmanın ışın maruz alanı, yoğunluğu ve maruz süresinin kontrolü ile büyütülebildiğini ifade etmiştir.

Hull (1984), Sıvı foto-duyarlı ortam ile dolu olan tekne içerisinde odaklanmış ultraviyole ışını ile kütleme yaparak üç boyutlu nesnelerin basımlarının gerçekleştirilmesi üzerine 1984 yılında patent başvurusunda bulunmuş, 1986 yılında patent olarak onay almıştır.

Dünyanın ilk üç boyutlu baskı cihazı şirketi 3D Systems'tir. Bu şirket Chuck Hull'un kurucu ortaklığı ile 1986 yılında kurulmuştur. Şirket ilk ticari üç boyutlu cihazını "SLA-1 Stereolithography printer" ismiyle 1987 yılında satışa sunmuştur (3D Systems 2021).

Deckard (1986), Metal, plastik, seramik ve polimer tozlarının bilgisayar sayesinde yönlendirilmiş lazerin ışınıyla sinterlenmesi yoluyla kaynaşmış olan katmanların oluşturulması, bu katmanların üst üste serilmesiyle nesnelerin aşağıdan yukarıya doğru imal edilmesini tanımlayan patent onayını almıştır.

Crump (1992), Cam, köpüklü plastikler, iki komponentli epoksiler, ergiyik metaller, termoplastik reçineler, kendiliğinden sertleşebilen mumlar gibi önceki var olan katmanlarına yapışarak katılan malzemelerin üretim bölgesine aktarımı öncesi belirlenen sıcaklıkta ısıtılması ve dağıtıcı kafa ile devamlı olarak yığılması yoluyla katmanların oluşturulması prensibine sahip patent onayı almıştır. Burada nesne üretimi dağıtıcı kafanın üretim tablası üzerinde üç eksenle hareketi ile aşağıdan yukarıya olacak şekilde yarı ergiyik malzemenin yığılmasıyla gerçekleşir.

Feygin (1988), aynı veya kademeli şekilde değişen levhaların tabakalar şeklinde üst üste serilmesi esasına dayanan eklemeli imalat teçhizatı ve yönteminin patentini almıştır. Bu yöntem levhaların lazerler sayesinde hassas bir şekilde kesimi, sonrasında foto direnç kaplama, mor ötesi ışık uygulama ve kimyasal dağlama gibi levha kesiti oluşturma aşamalarını içermektedir.

Shkolnik ve ark. (1998), iki eksenle hareket kabiliyetine sahip çizicinin iş tablası üzerinde üst üste yığımının gerçekleştirildiği çoklu levhaların şekillendirilmesi ile üç boyutlu nesne üretimini gerçekleştiren ve lamine nesne üretimi olarak isimlendirdikleri tekniğin patentini almışlardır. Katmanlar arasında ısıya duyarlı malzeme kullanılması söz konusu olan bu teknikte kaynaştırıcı veya birleştirici aygıtın uyguladığı kuvvet ve ısıyla katmanlar arasında tek taraflı bağ oluştuğunu belirtmişlerdir.

Eklemeli imalat sektörünün 2015'ten 2025'e kadar %15 bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile büyümesi bekleniyor. Bu büyüme, birçok sektörde 3B baskı teknolojisinin artan kullanımı ve 3B yazıcıların düşen fiyatlarından kaynaklanmaktadır (Anonim, n.d.-c). Eklemeli imalat teknolojisi ile ayrıntılı geometri, büyük boyutlu (Gosselin ve ark.

2016), mikro boyutlu (Vaezi ve ark. 2013) parçaların üretimine yönelik çalışmalar, maliyetin düşürülmesine yönelik çalışmalar (Yang ve Li 2018), geometrik hassasiyetin artırılmasına yönelik çalışmalar ve mukavemetin artırılmasına yönelik çalışmalar (Han ve ark. 2018; Wu ve ark. 2018), üretimde kullanılacak malzeme çeşitlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar (Singh ve ark. 2017) gibi birçok alanlarda yürütülen akademik araştırmalarla teknolojik ilerlemelere katkı üretmeye devam edilmektedir. Ayrıca üretimde son işlem evresini kolaylaştırmak amacıyla tasarım konseptleri geliştirilmekte ve buna ek olarak kolay sökülebilen, sıvı içerisinde çözülebilen kabiliyetli destek yapıları ile ilgili çalışmalara devam edilmektedir (Kim ve ark. 2018; Swanson ve ark. 2013). Önümüzdeki yıllarda yeni teknolojilerin geliştirilmesi, endüstri 4.0'a geçiş hızının artması ve eklemeli imalat yöntemiyle çalışan makinelerin daha çok yaygınlaşması ile 3B baskı maliyetlerinin daha da düşeceği, ayrıca 3B baskı teknolojilerinin otomotiv, uçak, biyomedikal ve doku mühendisliğinde çok önemli bir yere sahip olacağı anlaşılmaktadır (Sürmen 2019).

2.3. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler

Metal ve metal alaşımları eklemeli imalat yönteminde kullanılmaktadır. Örneğin; titanyum ve alaşımları yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğu, alüminyum ve alaşımlarının yüksek çekme mukavemeti ve hafif yapısı sayesinde otomotiv, tıp, havacılık sektörlerinde kullanılmaktadırlar. Bu metal ve metal alaşımlarının eklemeli imalat yönteminde kullanımı yaygındır. Ayrıca bu metallerin mekanik özellikleri ve mikro yapılarıyla alakalı çalışmalar devam etmektedir.

316L paslanmaz çelik, 316 kalite östenitik paslanmaz çelik ailesinde yer almaktadır. Belirtilen grup metal özelliklerini taşır. 316L tipi paslanmaz çeliğin yapısında genel olarak %60-65 demir (Fe), %17-19 oranında Cr, %12-14 oranında nikel (Ni) ve düşük miktarda nitrojen (N), Mangan (Mn), Mo, Fosfor (P), silikon (Si) ve Sülfür (S) bulunmaktadır (Pasinli 2004). 316L paslanmaz çelik 17Cr, 8Ni, 2Mo ve krom tükenmesinin önüne geçebilmek için az miktarda da olsa kendi yapısı içerisinde karbon bulunmaktadır. L ifadesi bu yüzden eklenmektedir. Gerilmeli korozyon çatlaklarına ve taneler arasındaki korozyona karşı dayanım özelliği iyi derecede yüksektir. Kombinasyon sağlayabilme özelliği ve mekaniksel üstünlükleri vardır.

En az %10,5 oranında yapısı içerisinde krom elementi bulunan demir karbon alaşımları paslanmaz çelik olarak değerlendirilmektedir. Yapısında bulunan bu krom elementi çeliğin paslanmasını engellemektedir. Korozyona karşı dirençli olan çeliklerin yapısında %12'sinden fazla krom (Cr) bulunmaktadır. Yapı içerisinde krom elementinin en az %12 oranında olması istenirken krom oranının %28'i geçmesi durumunda paslanmaz çeliğin korozyon direncinin artması için yapısına Molibden (Mo) eklenmiş ve 0,08 karbon (C) içeriğe sahip olan 316 paslanmaz çeliğinin karbon oranı 0,03'e düşürülerek 316L tipi paslanmaz çelik elde edilmiştir (Yetim 2009).

316L yapay kalça ve diz uygulamalarında çok kullanıma sahiptir. Diğer metal olan implantlara göre ekonomik olması, iyi derecede korozyon direnci ve biyouyumluluğu sayesinde avantajlı konumdadır. Fakat yapısında bulunan Ni ve Cr elementleri vücutta uzun süre kaldığında toksik etkiye neden olmaktadır. Ayrıca iyi derece korozyon direncine rağmen zayıf tribolojik özellikleri nedeniyle aşınma ve yorulmanın mühim olduğu yerlerde kullanımı sınırlıdır. Ayrıca 316L protezlerde gevşemeye neden olmaktadır. Bunun nedeni paslanmaz çeliğin elastisite modülünün kemiğe göre yüksek olmasıdır (Geetha ve ark. 2009).

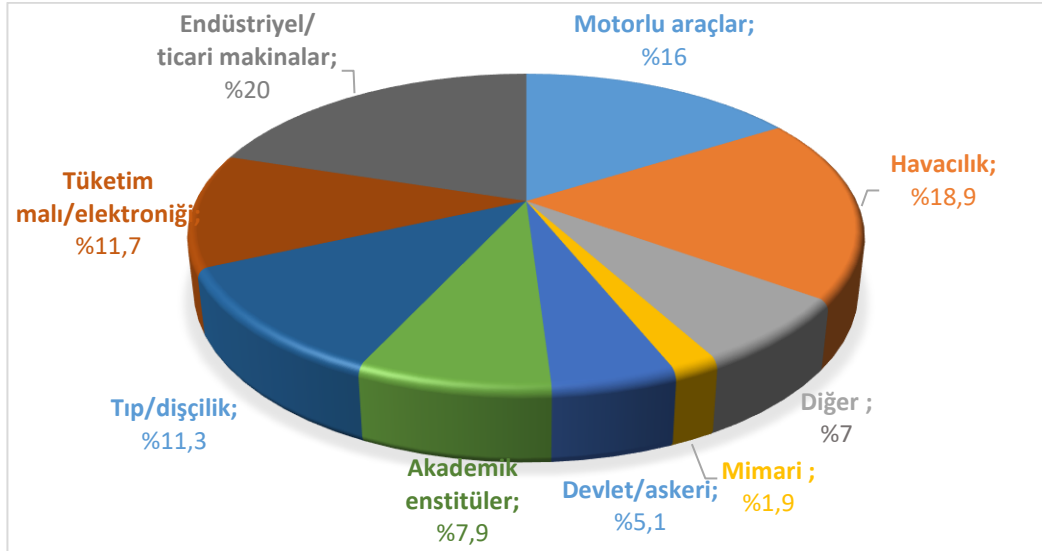
Seramik malzemeler talaşlı imalat yöntemiyle üretilmeleri oldukça zordur. Bunun nedeni ise yapıları karmaşık geometride olmasıdır. Talaşlı imalat yöntemiyle üretilmesi zor olan seramik malzemeler eklemeli imalat ile kolaylıkla üretilebilmekte ve bu yüzden eklemeli imalat bu malzeme üretimi için tercih edilmektedir. Biyomalzemeler karmaşık yapıya sahip oldukları için SLE yöntemiyle üretilmektedir. Moda ve tasarım endüstrisinde eklemeli imalat gün geçtikçe artmaktadır. İstenilen karmaşık tasarım için üretim kolaylığı bu imalat yönteminde mevcuttur. Uzay inceleme çalışmalarını gerçekleştirebilmek, istenilen ürünleri üretebilmek için eklemeli imalat teknolojisi de kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ihtiyaç olan birçok yapı malzemesi eklemeli imalat yöntemiyle kullanılmaktadır. Basınçla elektrik üretimi sağlayan malzemeler nano fabrikasyonlarda ve robotik alanlarda eklemeli imalat yöntemiyle kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemiyle şekil hafızalı akıllı malzeme üretimi sağlanabilmektedir. Ni-Ti gibi şekil hafızalı alaşımlar elektromekanik alanlarda kullanılmaktadır. Şekil hafızalı polimerler de mücevher, giyim ve medikal gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Yadav ve ark. (2021), Eklemeli imalat yöntemiyle ilerleyen zamanlarda gıda endüstrisinde kullanılacak malzemelerin üretileceğini düşünmektedirler.

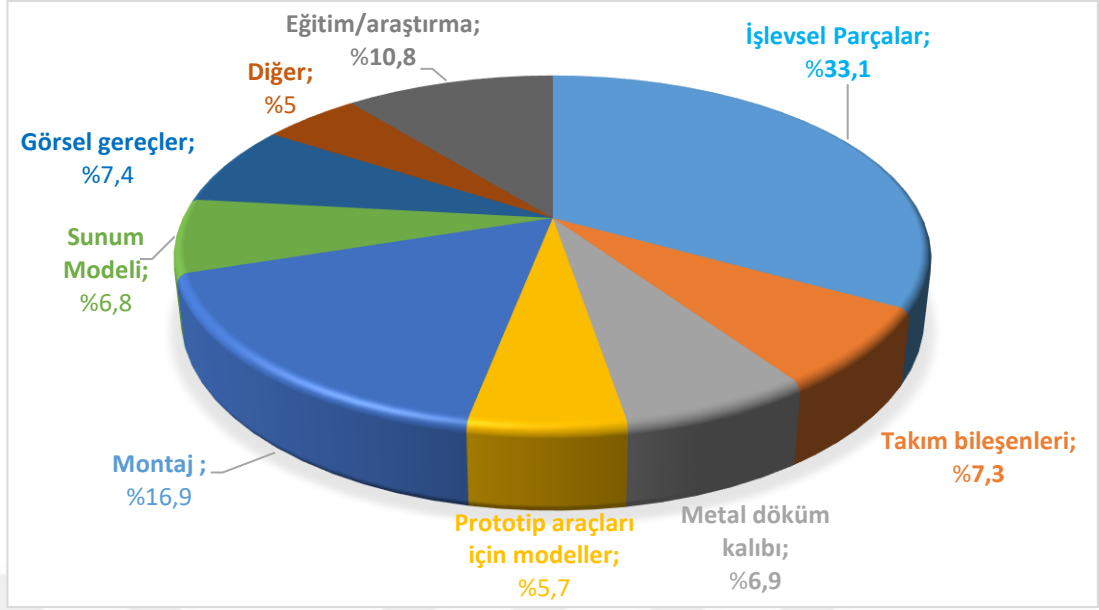
2.4. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları

Eklemeli imalatın kullanıldığı alanlar gün geçtikçe artmaktadır. Bu imalat yöntemi ilk zamanlarda daha çok hızlı prototipleme için kullanılmaya başlanıldığı görülsede şuan günümüzde bu yöntemle üretilen parçaların yarıdan fazlası gerçek parçalardan oluşmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi iki ana kol üzerinde genişlemeye devam etmektedir. Bunlar kişisel ve endüstriyel alanlardır. Kişisel alanlarda bireysel kullanıcılar istedikleri tasarımları yaparak üretim sağlamaktadırlar. İşlevsel kullanabilecekleri aletlerden süs eşyalarına kadar yelpazesi geniş bir alanı oluşturmaktadır. Endüstriyel kullanımda ise kişisel alanlara göre daha pahalı cihazlar ve hammaddeler kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda kullanılan cihazlar gün geçtikçe hızla gelişmekte ve kullanılan malzeme çeşitliliği de artmaktadır.

Eklemeli imalatın uygulama alanları Şekil 2.1. ve bu yöntemi kullanan endüstri alanları Şekil 2.2.'de verilmiştir (Diegel ve ark. 2019).



Şekil 2.1. Eklemeli imalatı kullanan endüstri alanları (Diegel ve ark. 2019).



Şekil 2.2. Eklemeli imalatın uygulama alanları (Diegel ve ark. 2019).

Metal eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer ergitme yönteminin ise iki ana uygulama alanı vardır. Bunlar biyomedikal ve havacılık-uzay sanayi alanlarıdır. Biyomedikal sanayisinde gözenekli implantların yapılması için SLE yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır (Yuan ve ark. 2019). Bu alanda 2022 yılının sonuna kadar 116 milyar dolar küresel pazara ulaşılması beklenmektedir (Maconachie ve ark. 2019). İmplantla yönelik kişilere özel, karmaşık yapıda, yüksek kaliteye sahip ve kişinin kemiğiyle aynı elastisiteye sahip metalik parçaların üretilmesi için seçici lazer ergitme yöntemi çok uygundur (Alabort ve ark. 2019). Bu üretilen parçalar vücuda çok iyi uyum sağlayacak şekilde tasarlanmakta ve mükemmel kemik içi gelişim ile implant-kemik bağı oluşabilmektedir (Mullen ve ark. 2009).

Eklemeli imalatın havacılık ve uzay endüstrisinde ilgi çekici noktası katı cisimlerin, yakın mukavemete sahip gözenekli yapıda olan malzemelerle değiştirilip hafifletme sağlanmasıdır (Duoss ve ark. 2014; Bici ve ark. 2018). Çeşitli endüstrilerde ki uygulamalar için alternatif seçenek olabilmesinin nedeni ise boşluklu yapılar ile soğutma kanalları oluşturabilmesidir (Liu ve ark. 2017; Najmon ve ark. 2019).

Uzay mekiklerinde yer alan termal kontrolcüler mekikte yer alan elektronik aksamın ısısını kontrol etmektedir. Geleneksel yöntemlerle imal edilen kontrolcüye göre seçici lazer ergitme yöntemiyle imal edilen gözenekli yapının ağırlıkta ısı kapasitesi %50 artmıştır (Maconachie ve ark. 2018).

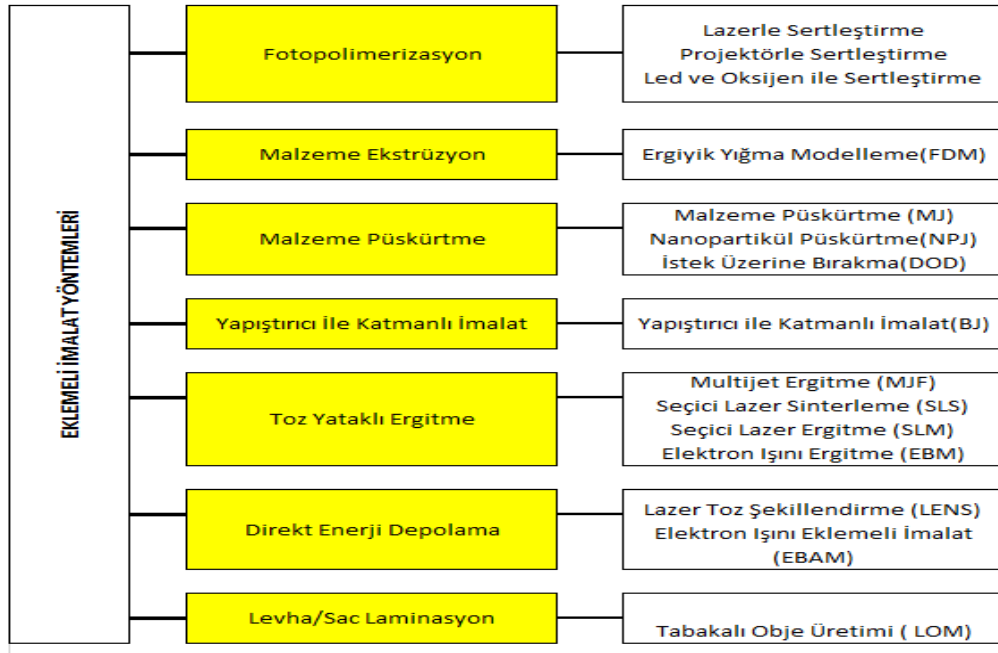
2.5. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalat teknolojisi karmaşık şekilli parçaların üretilmesi, topoloji optimizasyonlu hafif parçaların üretilmesi, kalıp endüstrisinde kullanmak için gerekli olan parçaların üretilmesi, tıbbi alanda kullanılacak olan implantların üretilmesi gibi farklı birçok sektörde kullanılabilir. 3B CAD modelinin kullanılmasıyla metal parçaların ekstra bir alet kullanılmadan hızlı bir şekilde üretilmesi bu imalat ile mümkündür. Hızlı bir şekilde üretilmesi zamandan tasarruf anlamında ciddi bir kazançtır. Ayrıca bu imalat ile prototiplerin veya küçük serilerin üretimi yapılabilmektedir. Eklemeli imalat medikal implant alanında çok büyük avantaja sahiptir. Çünkü kişiye özel üretim imkanı vermektedir. Bu teknoloji kafes yapıları gibi karmaşık geometrilerin üretilmesi noktasında 3B CAD modelinin kullanılmasıyla elverişlidir. Fakat bu imalatta kullanılan makineler, modern CNC makineleriyle karıştırılabilir fiyatlara sahip olmakta, malzeme fiyatı stok malzemeye göre hala yüksek kalmaktadır.

Eklemeli imalat, özel ürünlerin üretilmesi noktasında geniş olanak sağlamakta fakat yakın gelecekte klasik üretim teknolojilerinin yerini tamamen alamayacaktır. Eklemeli imalat yöntemiyle sınırsız geometrilerde parçalar üretilebilir ancak gerilme, porozite, yüzey pürüzlülüğü, parça boyutu ve eklemeli imalata uyumlu mevcut olan malzemelerin sınırlamalarının dikkate alınması gerekmektedir (Vranić ve ark. 2017).

2.6. Eklemeli İmalat Yöntemi Çeşitleri

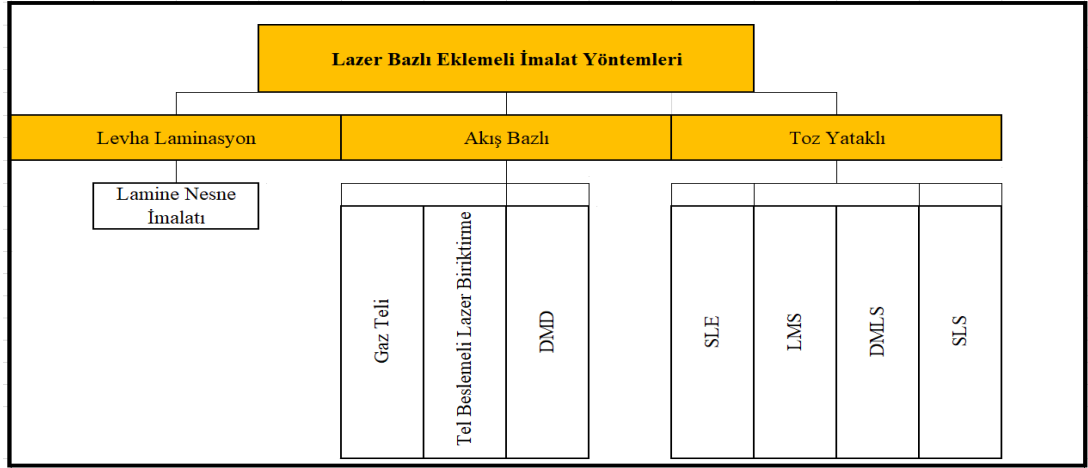
Eklemeli imalatın birçok farklı türde teknikleri vardır. Eklemeli imalat kendi içinde sınıflandırıldığı zaman üretimde kullanılan araç ve gereçler, malzeme özellikleri gibi birçok birbirinden farklı özellikler dikkate alınmaktadır. Wendel ve arkadaşlarına göre eklemeli imalatın sınıflandırılması Şekil 2.3.'te gösterilmektedir (Wendel ve ark. 2008).



Şekil 2.3. Eklemeli imalatın sınıflandırılması (Wendel ve ark. 2008).

2.6.1. Lazer Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri

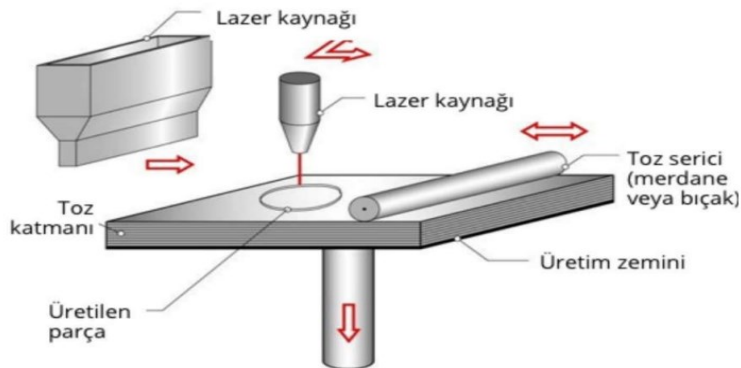
Bu yöntem lazerin ilk kullanımıyla karşılaştırıldığında üretim sahasında birçok üretilen ürünün geliştirilmesine ve yeni pazarların ortaya çıkmasına olanak sağlayan bir teknolojidir. Lazer teknolojisi kullanılarak yapılan imalatlar geleneksel yöntemler kullanılarak üretilen ürünlerin yerini alan bir teknoloji olmuş ve üretilen ürünlerin kalitesini iyileştirmek, maliyetlerini azaltmak, üretkenliklerini arttırmak gibi katkıları ön plana çıkmaktadır. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemlerine ait bir sınıflandırma aşağıda Şekil 2.4.'te verilmiştir. Bu bölümde lazer esaslı eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılıp detaylı açıklamalarına yer verilecektir.



Şekil 2.4. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri (Bian ve ark. 2017).

2.6.1.1. Toz Esaslı Yöntemler

Toz esaslı yöntemler lazer, toz katmanlama aparatı (rulo veya serici), proseslerin kontrolü için bilgisayar sistemi ve soy gaz koruma sistemi, toz yatak ön ısıtma sistemi gibi yardımcı mekanizmalardan oluşmaktadır. Üretim döngüsü Şekil 2.5’te verilmiştir. Toz esaslı yöntemlerde, toz önce bir rulo yada serici silgi yardımıyla alt tabaka üzerinde birikmesi sağlanır. Sonrasında, yüksek lazer gücü, birikmiş tozu seçici olarak ısıtır ve kaynaştırır. Ardından, bir katman kalınlığı kadar üretim platformu aşağıya, bir katman kalınlığı kadar toz platformu da yukarı hareket ederek ve rulo aracılığıyla toz serilip lazer yardımıyla ergitilmesi sağlanır. Nihai ürün elde edilene kadar bu işleme devam edilir (Bian ve ark. 2017).



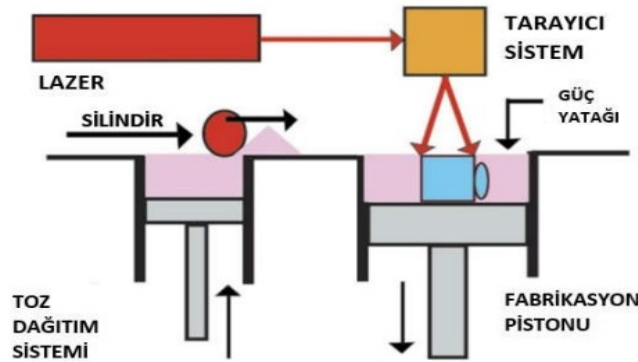
Şekil 2.5 Toz yatak üretim döngüsü (Wroe 2015).

Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme yöntemi oluşturulmak istenen katı parça için CAD modeline karşılık gelen alanlarda her seferinde bir katman olmak üzere tozları kaynaştırmak için hareketli olan bir lazer ışını kullanır. Tozlar erime noktalarının hemen altına kadar önceden ısıtılır. Bunun nedeni bağlanmayı kolaylaştırmak ve bitmiş ürünün bozulmasını azaltmaktır. Ön ısıtma yapmak ayrıca kullanılan lazerin güç gereksinimlerini de azaltır. Tozlar, katmanlar halinde kademeli olarak üç boyutlu parçanın geometrisini oluşturan katı kütleyle bağlanır. Katman kalınlığı ortalama 0,075 ile 0,50 mm aralığındadır. Seçici lazer sinterleme işlemi oksidasyona duyarlı olma ihtimali olan tozların (örnek metaller) bozulmasını minimuma indirmek için azot ile doldurulmuş bir bölümde gerçekleşir (Groover 2012).

LENS, DMD, LMD tekniklerinde tozlar erimiş havuz oluşturmak için yüksek bir lazer ışınının odağına bir gaz akışı içinde iletilir. Seçici lazer sinterleme tekniğinde bu tekniklerden başlıca farkı tozların besleme yatağından diğer tarafa yayılmasıdır. Rulo yardımıyla parça yatağı eriyiğin katılma işleminden sonra ince katı bir katman oluşur ve önceki sinterlenmiş katmana kaynaştırılır. İşlem tekrarlandıkça tamamına yakın yoğun bir yapı oluşturulabilir (Subbiah 2015).

Seçici lazer sinterleme yöntemine ait şema Şekil 2.6.'da gösterilmektedir (Anonim, n.d.-b).

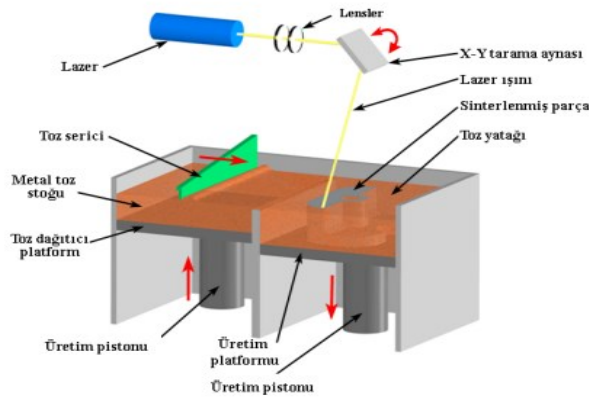


Şekil 2.6. Seçici lazer sinterleme (Anonim, n.d.-b).

Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemi seçici lazer ergitme yöntemiyle oldukça benzerdir. Bu yöntemde moleküler düzeyde toz yalnızca sinterlenir, ergitilmez. Böylece ergitme yönteminden daha az gözenekli parçalar üretilir. En büyük avantajı, farklı ergitme noktalarına sahip malzemeler içeren alaşımların kolayca birleştirilmesine olanak sağlar. Ayrıca metal ve plastik malzemeler dahil birçok malzeme bu yöntemler birleştirilir. Örnek verecek olursak, naylon tozu ve alüminyum tozu karışımı olan Alumid bu yöntemle birleştirilir. Sinterleme ve ergitme arasındaki diğer fark, metal tozunun ergitilmesi için kullanılan sıcaklıktır. Seçici lazer ergitme, metal tozunu tamamen ergitene kadar ısıtır. Fakat doğrudan metal lazer sinterleme metal tozunu ergitmez. Böylece daha az enerji harcanmış olur. Sinterleme, toz parçacıklarını kendi yüzeyleri birbirine kaynatacak kadar ısıtır. Son parçanın çözünürlüğünü toz boyutu ve şekli sınırlar. Daha küçük toz boyutu daha ayrıntılı parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Doğrudan metal lazer sinterleme teknolojisinde çözünürlük sınırları, lazer noktasının boyutu ve katman yüksekliğidir. Bu süreçte diğer 3B baskı süreçleri gibi model birden çok ince katmana bölünerek, katman katman üretimin gerçekleştirilmesi sağlanır. (Anonim 2021a).

Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemine ait şema Şekil 2.7.'de yer almaktadır (Anonim 2008).



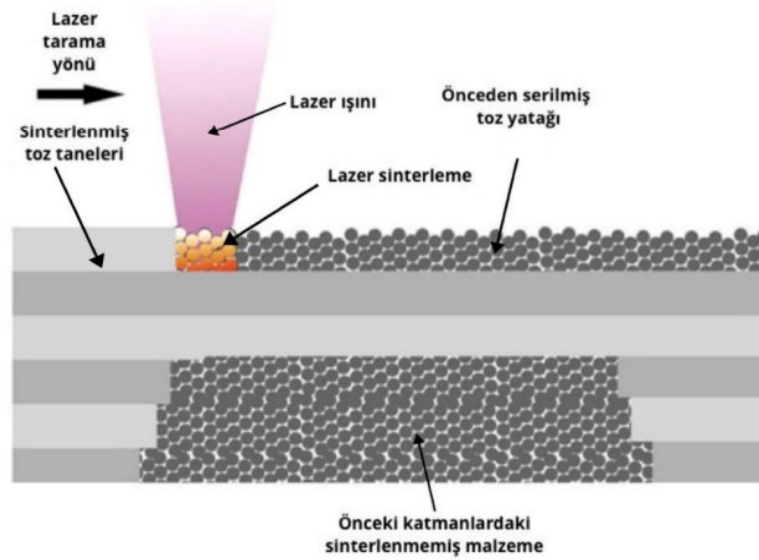
Şekil 2.7. Doğrudan metal lazer sinterleme (Anonim 2008).

Metal içinde artık gerilimlerden ve iç kusurlardan arındırılmış parçalar üretilmesi Doğrudan metal lazer sinterleme yönteminin en büyük avantajlarından. Fabrikasyon parçaların en zayıf kompozit fazının mekanik özelliklerini sergilemesi, ağır işler için gerekli olan işlevselliğin kaybolması ve üretilen parçaların tamamen yoğun olmaması ise bu yöntemin dezavantajlarından (Bian ve ark. 2017).

Lazer Mikrosinterleme (LMS)

Bu yöntem eklemeli üretim ve mikro işlemenin avantajlarını bir araya toplamaktadır. Yüksek doğruluk, detay çözünürlüğü ve yüzey kalitesine sahip mikro metal parçalar bu şekilde üretilebilmektedir. Bu yöntemle minimum pürüzlülüğe ($R_a=1.5 \mu\text{m}$) ve yüksek çözünürlüğe ($<30 \mu\text{m}$) sahip parçalar üretilebilir. Bu yöntem q-anahtarlı Nd:YAG-lazer darbesinin kullanılmasıyla nihai ürünlerdeki kalıntı gerilme seviyesini oldukça düşürür. Böylece hareketli parçaların ve düzeneklerin tek bir adımda üretilmesi sağlanır. Bu yöntemin kullanıldığı endüstriler; medikal, makine mühendisliği, havacılık, enerji, yarı iletken malzeme üretimi, kuyumculuk ve saatçilik (Anonim 2021b).

Lazer sinterleme yöntemine ait şema Şekil 2.8.'de gösterilmektedir (Wroe 2015).



Şekil 2.8. Lazer sinterleme (Wroe 2015).

Seçici Lazer Ergitme (SLE)

Seçici lazer ergitme yöntemi 1980'lerin sonlarında ortaya çıkmıştır. Seçici lazer ergitme işlemi sırasında, lazer ışınının etkileşimi ile ardışık toz katmanları seçici olarak ergitilir ve böylece bir ürün oluşturulur. Toz malzeme ışınlama sayesinde ısıtılır ve yeterli güç uygulanırsa ergiyerek sıvı bir havuzu oluşturur. Sonrasında ergimiş havuz hızlı bir şekilde katılarak soğur ve katı bir ürün elde edilmeye başlar. Bir katmanın enine kesiti tarandıktan sonra, yapı platformu katman kalınlığına eşit miktarda düşürülür ve yeni toz katmanı biriktirilir. Bu işleyiş ürün bitene kadar tekrarlanmaktadır (Anonim, n.d.-a). Seçici lazer ergitme yöntemi karmaşık parçaların üretilmesini sağlayan ve talaşlı imalatta olduğu gibi son işlem ihtiyacını ortadan kaldırarak zaman tasarrufu sağlayan toz yatak esaslı bir üretim yöntemidir.

Seçici lazer ergitme yöntemi en önemli 3B baskı teknolojilerinden biridir. Bu yöntem hızlı prototip üretme ve seri üretim amacıyla kullanılmaktadır. Doğrudan metal lazer ergitme (DMLM) olarak adlandırılmaktadır. Seçici lazer ergitme yönteminin seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminden iki büyük farkı vardır. Seçici lazer ergitme yönteminde düşük ergitme noktalarına sahip elementlerin eklenmesine gerek olmadan toz malzemedan üretim yapılabilir. Ayrıca tozun tamamen birleşebilmesi için bu yöntemde yüksek güçte lazer kullanılması gerekmektedir. Seçici lazer ergitme yönteminin dezavantajlarından birisi de ergitme işlemi anında üretilecek malzemede meydana gelen yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan artık gerilmelerdir. Malzemede meydana gelen bu artık gerilmeler parçanın bozulmasına neden olabilir. Fakat, malzemeyi önceden ısıtarak ve oda içindeki sıcaklığı sabit olarak yüksek seviyede tutarak artık gerilme en aza indirilebilir (Bian ve ark. 2017).

Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen ürünlere ait kimyasal, mekanik, morfolojik ve tribolojik özellikleri birçok üretim parametresi etkilemektedir. Bu etkileyen parametreler aşağıda verilmektedir.

- *Lazer gücü,
- *Lazer tarama hızı,
- *Katman kalınlığı,
- *Tarama stratejisi,
- *İnşa oryantasyonu,
- *Demet çapı
- *Vuruş modu şeklinde sıralanabilir (Kaya 2019).

Seçici lazer ergitme yönteminde bütün sağlanmalı ve böylece katmanlar arasında dayanım yüksek olmalıdır. Bu bütünlük, üretim parametreleri olan lazer gücü (P), lazer tarama hızı (V), katman kalınlığı (t), yana kayma mesafesinin (h) değişimi ile kontrolü sağlanan enerji yoğunluğu (E) ile gerçekleştirilmektedir. Belirtilen tüm bu parametreler malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir (Kaya 2019; Thijs ve ark. 2010). Belirtilen bu üretim parametreleri ve enerji yoğunluğu arasındaki ilişki aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$E = \frac{P}{V.h.t} \quad (1.1)$$

Paslanmaz çelikler birçok alanda kullanılmaktadır. 316 L paslanmaz çelik ise en yaygın kullanımı sağlanan paslanmaz çelik türlerindedir. Bu tez çalışmasında SLE yönteminde etkin parametreler olan tarama hızı, katman kalınlığı ve örtüşme oranının 316L paslanmaz çelik malzemesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

Liverani ve arkadaşları, seçici lazer ergitme yöntemiyle imal edilen 316L paslanmaz çelik parçaların tarama hızı, lazer gücü, inşa oryantasyonu ve bindirme mesafesi parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırarak en uygun işlem şartlarını oluşturmuşlardır (Liverani ve ark. 2017).

Cherry ve arkadaşları, seçici lazer ergitme yönteminde yer alan üretim parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve fiziksel özellikleri üstündeki etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada lazer gücü üretilen malzemenin gözenekliliğini ve sertliğini etkileyebileceğini söylemişlerdir. Ayrıca araştırmalarında en düşük gözeneklilik

oranını, 104.52 J/mm³ enerji yoğunluğunda % 0.38 olarak tespit etmişlerdir (Cherry ve ark. 2015).

Bartolomeu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 316 L paslanmaz çeliğın mikroyapısı, mekanik ve aşınma davranışı üzerindeki üç farklı üretim teknolojisinin etkisini incelemişlerdir. SLE yöntemi pres ve geleneksel döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu yöntemle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin ve tribolojik performansının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen 316 L paslanmaz çelik parçaların yüksek aşınma ve mekanik performansı sahip olduğu ince taneli mikroyapıdan kaynaklandığını belirtmişlerdir (Bartolomeu ve ark. 2017).

Seçici lazer ergitme yöntemiyle farklı inşa yönlerinde imal edilen 316 L paslanmaz çelik parçaların yoğunluğu, mikroyapısı, yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, kırılma tokluğu sonuçları performans kriteri esas alınarak proses parametreleri araştırılmıştır. Ayrıca üretim parametrelerinin imal edilen parçaların mekanik performansı üzerindeki etkisini incelemek için çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. İmal edilen parçaların yoğunluğunun %96 olduğu sertliğin geleneksel üretimle üretilen malzemeye kıyasla benzer olduğu tespit edilmiştir. Üretim platformuna yatay olan inşa yönünde 176 MPa.√m kırılma tokluğu değeri elde edilmiş ve bu değeri bu çalışma için en yüksek kırılma tokluğu değeri dir. En düşük değeri üretim platformuna dik olan inşa yönündedir ve sonuç 145 MPa.√m olarak bulunmuştur. Bu çalışmada inşa yönünün, parçaların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi üzerinde mühim bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Gözenekli bir yapının oluşması, parçaların kenar kısımlarında bulunan boşluklar ve çatlaklar sebebiyle, üretim platformuna dik olacak şekilde gerçekleştirilen imal stratejisi, kırılma tokluğu değeri açısından en düşük sonuçları vermiştir (Alsalla ve ark. 2018).

Liu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı proses parametrelerinin kullanılmasıyla SLE yöntemiyle imal edilen 316 L paslanmaz çelik malzemesinin çekme davranışı ve mikrosertlik değeri incelenmiştir. Artan enerji girişi ile nihai çekme mukavemeti bir miktar azalmıştır. Fakat artan enerji kuvveti ile kopma uzamasının arttığı görülmüştür. Yüksek tarama hızı kullanılarak imal edilen parçalarda, düşük açılı tane

sınırlarına sahip olan ince özellikli tanelerin bulunduğu hücresel yapılar gözlemlenmiştir. Düşük tarama hızıyla (800 mm/sn) üretilen parçaların daha yüksek bir süneklik gösterdiği de tespit edilmiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman seçici lazer ergitme yönteminin mikroyapı özelliğini değiştirmek için bir fiziksel metalurji yöntemi olarak hareket edebileceğini ve bu nedenle metalik parçaların mekanik performans değerini iyileştirebileceğini göstermiştir (Liu ve ark. 2020).

Tucho ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemiyle imal edilen paslanmaz çelik malzemede proses parametrelerin gözeneklilik seviyeleri, malzeme sertliği ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seçici lazer ergitme yöntemiyle imal edilen malzemelerde mekanik özellikler olumsuz yönde etkileyen en önemli kusurlardan birisinin porozite olduğu bu yüzden uygulamalarda istenilen özellikleri sağlayabilmek adına malzemelerin yoğunlaştırılmasının optimize edilmesinin önemli bir yere sahip olduğu söylenmiştir. İncelenen malzemeler 50-80 J/mm³ enerji yoğunluğu aralıklarına sahiptir ve çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Enerji yoğunluğunun sertlik ve gözeneklilik ile güçlü bir bağı olduğu doğrulanmış ve gözenekliliği kontrol edebilecek ve malzemelerin yoğunluğunu iyileştirebilecek en önemli değişken olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir (Tucho ve ark. 2018).

Zhang ve arkadaşları artan lazer gücü veya azalan tarama hızı ile akma ve gerilme mukavemetinin azaldığını bulmuşlardır; ancak, lazer gücündeki veya tarama hızındaki değişikliklerle birlikte uzamada tutarlı bir eğilim olmadığını görmüşler. Ayrıca, eritme havuzu sınırının SLM ile üretilmiş 316 L paslanmaz çelik için büyük önem taşıdığı kanıtlanmıştır (Zhang ve ark. 2014).

Jiangwei ve arkadaşları SLE yöntemi ile üretilen 316 L paslanmaz çelik malzemesinde tarama hızının mikroyapı ve mekanik davranışa etkisini incelemiştir. Sonuç olarak UTS (Nihai gerilme kuvveti)'nin artan enerji yoğunluğu ile hafifçe azaldığını, kopma uzaması için ters eğilim gösterdiğini gözlemlemiştir. Testlerde 707 MPa'lık maksimum UTS'ye 1000 mm/sn'lik tarama hızıyla iyi süneklik korunurken (toplam uzama %30) ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca tarama hızının, erime havuzu sınırlarını, artık gözenekleri, katılma hücrelerinin, nano-inklüzyonların yanı sıra tane

boyutunu ve dağılımlarını önemli ölçüde değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Maksimum kopma uzaması (%55), 800 mm/sn'lik düşük tarama hızında elde etmişler ve yüksek sünekliğin güçlendirilmesi, esas olarak yüksek oranda yoğunlaştırılmış mikro yapıya ve ayrıca erime havuzu sınırlarının en aza indirilmesine bağlandığını söylemişlerdir (Jiangwei ve ark. 2020).

Ahmadi ve arkadaşları SLM işleminde tarama hızının tek değişen parametre olması durumunda, tarama hızının artmasıyla çekme dayanımının azaldığı sonucuna varmıştır. Bu, daha yüksek enerji yoğunluğuna ve parçacıklar arasındaki metalurjik bağın artmasına bağlanmıştır (Ahmadi ve ark. 2016).

Hao ve arkadaşları daha yüksek lazer gücünün zayıf yüzey kalitesine yol açabilmesine rağmen, bunu artırarak ve sonuç olarak erime seviyesini artırarak yoğunluğun ve mekanik özelliklerin iyileşeceği belirtmişler. Ayrıca, çekme mukavemetinin en yüksek olduğu tarama hızı için optimum bir değer olduğu bulmuşlardır (yani, tarama hızının düşürülmesi gerilme mukavemetini belirli bir noktaya kadar artırır ve sonra bozar (Hao ve ark. 2011). Taban ve arkadaşları daha yüksek tarama hızında işlem gören seçici lazer ergitme numunelerinin, daha düşük tarama hızında işlem gören numunelere göre daha iyi yoğunlaştırma, rafine edilmiş mikro yapı ve mükemmel mekanik özellikler sergilediklerini belirtmişlerdir. Bunun başlıca nedeni, daha yüksek tarama hızlarıyla işlem gören numunelerde elde edilen daha yüksek soğutma hızı nedeniyle daha yüksek yoğunlaştırma ve rafine edilmiş mikro yapı oluşması olduğunu söylemişlerdir (Taban ve ark. 2020).

2.6.1.2. Akış Bazlı Yöntemler

Bu yöntem alt tabakaya toz veya tel gibi malzemeleri lazer odak bölgesine iletmek için bir nozul kullanır. Ayrıca nozullar aracılığıyla tozu, gaz dağıtım sistemine ileten bir toz besleyicide kullanılmaktadır. Sonrasında iş parçasına yakın mercekle tarafından yüksek enerjili lazer odaklanarak nozulun ortasına yansıtılır. Kullanılan lens ve toz püskürtme sisteminin z ekseninde hareket ettirilmesi hem toz odaklarının hem de lazerin yüksekliğini kontrol eder. İş parçası ayrıca operatör tarafından fonksiyonel alanın altında yer alan XY düzleminde hareket ettirilerek üretim sağlanmaktadır (Bian ve ark. 2017).

2.6.1.3. Levha Laminasyon

Bu yöntem yuvarlanan levha ile katman oluşturmak için toplama ve çıkarma tekniklerini birleştiren hızlı bir prototipleme tekniğidir. Bu teknikler ilk olarak 1991 yılında Helisys şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılan CO2 lazer CAD ve STL (STereoLithography) dosyasındaki 3B modele dayalı olarak her katmanın şeklini keser. Bu katmanlar termal yapıştırıcı kullanılarak basınç ve ısı maruziyeti ile birbirine bağlanır. CAD görüntüsünden bir günden daha kısa bir sürede tam ölçekli karmaşık bir prototipin oluşturulması bu tekniğin en önemli avantajlarından. Büyük parçalar bu teknik ile bozulma, büzülme ve deformasyona uğramadan üretilebilir. Üretilen parçalar yüksek dayanıklılığa ve düşük kırılabilirliğe sahiptirler. Reaktif ve toksik olmayan malzemelerin işlenmesiyle elden çıkarılması daha kolaydır. Ayrıca daha düşük maliyetle üretim yapılmasına olanak sağlar (Bian ve ark. 2017).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, SLE yönteminde etkin parametreler olan tarama hızı, katman kalınlığı ve örtüşme oranı parametrelerinin 316 L paslanmaz çelik ürününün mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma esnasında 3 farklı deney seti oluşturulmuştur. Her deney setinde ise 3 farklı parametre kullanılarak malzemeler üretilmiştir. Birinci deney setinde 3 farklı tarama hızı, ikinci deney setinde 3 farklı katman kalınlığı, üçüncü deney setinde 3 farklı örtüşme oranı kullanılmış ve diğer parametreler aynı olacak şekilde numuneler üretilmiştir. Her deney setinin her parametresinde 4 adet çekme testi numunesi, 2 adet yüzey pürüzlülüğü numunesi, 1 adet radyografik inceleme-mikro sertlik inceleme numunesi üretilmiştir. Toplamda 3 deney seti için 63 adet numune üretilmiştir. Deneylerin sonucunda çıktı parametreleri olarak mikro-sertlik, yüzey pürüzlülüğü, akma ve çekme dayanımı, malzeme boşluğu belirlenmiştir. Çalışma esnasında kullanılan malzeme, yöntem ve cihazlar aşağıda verilmiştir.

3.1. Deney Tasarımı

Üretim parametre değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Birinci deney setinde 3 farklı tarama hızı kullanılmıştır. Bu tarama hızları 900- 1100- 1300 mm/s'dir. İkinci deney setinde 3 farklı katman kalınlığı kullanılmıştır. Bu katman kalınlıkları 0,04-0,05-0,06 mm'dir. Üçüncü deney setinde 3 farklı örtüşme oranı kullanılmıştır. Bu örtüşme oranları %0,75-0,833- 0,916 'dır.

Bu çalışmada 3 farklı deney seti ve toplamda 9 farklı üretim uygulaması yapılmıştır. Her deney seti kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. İlk deney setinde tarama hızlarındaki değişimlerin malzemenin mekanik üzerindeki etkisi, ikinci deney setinde katman kalınlığındaki değişimlerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, üçüncü deney setinde ise değişken örtüşme oranı olmuştur. 1-2-3 numaralı üretim uygulamaları 1.deney seti, 4-5-6 numaralı üretim uygulamaları 2. deney seti, 7-8-9 numaralı üretim uygulamaları ise 3. deney setine tabidir. 2-5-8 numaralı üretim uygulamalarının tüm şartları ve parametreleri aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Buradaki amaç SLE cihazının kalibresini kontrol etmektir. Lazer gücü tüm deney setlerinde 370 W olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Üretim parametre değerleri tablosu

| Üretim Uygulamaları | P (W) Lazer Gücü | V (mm/s) Tarama Hızı | t (mm) Katman Kalınlığı | h (mm) Tarama Boşluğu | Ø (mm) Gerçek Spot | Overlap (%) Örtüşme Oranı | Deney Seti |
|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|------------|
| 1 | 370 | 900 | 0,05 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 1 |
| 2 | 370 | 1100 | 0,05 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 1 |
| 3 | 370 | 1300 | 0,05 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 1 |
| 4 | 370 | 1100 | 0,04 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 2 |
| 5 | 370 | 1100 | 0,05 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 2 |
| 6 | 370 | 1100 | 0,06 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 2 |
| 7 | 370 | 1100 | 0,05 | 0,09 | 0,12 | 0,75 | 3 |
| 8 | 370 | 1100 | 0,05 | 0,1 | 0,12 | 0,833 | 3 |
| 9 | 370 | 1100 | 0,05 | 0,11 | 0,12 | 0,916 | 3 |

Her deney setinin her parametresinde 4 adet çekme testi numunesi, 2 adet yüzey pürüzlülüğü numunesi, 1 adet radyografik inceleme-mikrosertlik inceleme numunesi üretilmiştir. Toplamda 3 deney seti için 63 adet numune üretilmiştir.

3.2. Numunelerin Üretimi

Bu çalışmada 316 L paslanmaz çelik SLE yöntemiyle üretilmiştir. 316 L paslanmaz EN standartlarına göre 1.4404 kalite paslanmaz olarak numaralandırılmaktadır. 316 L paslanmaz aynı zamanda EN standardına göre X2CrNiMo17-12-2 olarak da isimlendirilmektedir. 316 ve 316 L kalite paslanmaz dünyada 304 kalite paslanmaz ile birlikte en yaygın kullanılan paslanmazlar sınıfında yer almaktadır. Bu paslanmaz çelik kalitesindeki yer alan malzemelere iyi şekil verilebilmekte ve iyi kaynak yapılabilmektedir. Bu kalitede yer alan paslanmalar mıknatısı çekmez ve yüksek derece korozyona karşı dirençlidir. 316 L kalite paslanmaz çeliğin korozyona karşı direnci, 304 ve 304 L paslanmaz çeliklere göre daha iyidir. Bu malzemenin mekanik özellikleri ve kimyasal birleşimi aşağıda verilmiştir.

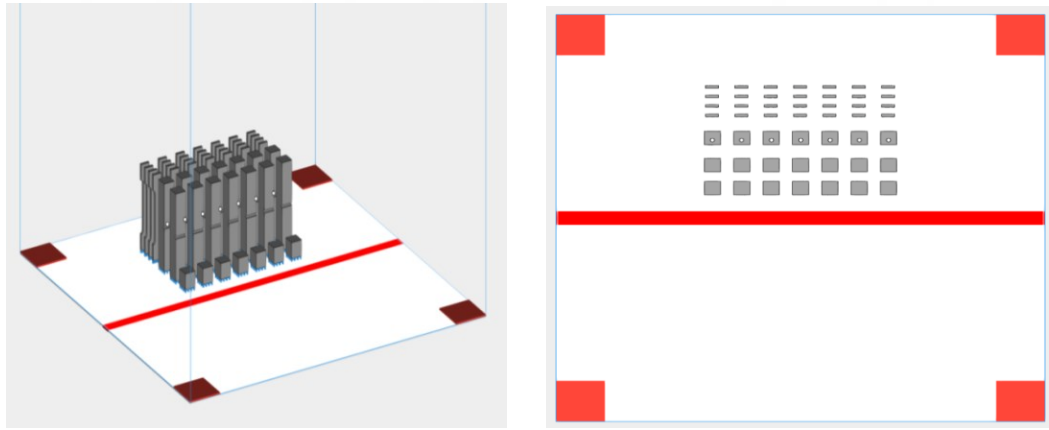
Çizelge 3.2. 316 L paslanmaz çelik kimyasal birleşim

| KİMYASAL BİRLEŞİM | | | | | | | | |
|-------------------|------|-------|----|----|-------|-----|------|-------------|
| Kalite | C | Cr | Ni | Mo | S | Mn | Si | Diğer |
| 316L 1.4404 | 0,02 | 16-17 | 10 | 2 | 0,025 | 1,8 | 0,50 | Cu- 0,04 |

Çizelge 3.3. 316 L paslanmaz çelik mekanik değerler

| MEKANİK DEĞERLER | | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------|---------------------------|
| KALİTE | Çekme (Rm/Nmm ²) | Akma (Rp 0,2N/mm ²) | Uzama (A5%) | Sertlik (HRB Rockwell) |
| 316L 1.4404 | 480-600 | Min 170 | >40 | Max 95 |

Deney numunelerinin üretimi Ermaksan/BURSA firmasının ENAVISION 250P eklemeli imalat makinesinde gerçekleştirilmiştir. Makinenin üretim kapasitesi (inşa platformu) 300 mm x 300 mm x 300mm şeklindedir. Test numuneleri STL formatında Materialise Magics (CAM) yazılımında oluşturulmuştur. Bunlara ait görüntüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1. Test numunelerinin CAM yazılımında oluşturulan görüntüleri

500 W'lık Single mode'ta fiber lazer kullanılmıştır. Bu lazerler Ermaksan firmasının ürettiği EON lazerlerdir. ENAVISION 250 P eklemeli imalat makinesi çift lazerli olmasına rağmen üretimler tek lazerle yapılmıştır. Bunun nedeni iki lazer arasında çok küçükte olsa kalibre farkından kaynaklanabilecek aynı parametreye sahip aynı ölçüde olan malzemelerde farklılık oluşabilme ihtimaline karşı yapılmıştır. Azot gazı atmosferinde single mode kullanılarak gerçekleştirilen üretimde oksijen miktarı %0,2'nin altında tutulmuştur. Koruyucu gaz çıkış basıncı 7 bardır. Gaz akış yönü Y(+)’dan Y(-)’ye doğru olmaktadır. Toz serme yönü X(+)’dan X(-)’ye doğru devam etmektedir. İnşa yönü Z ekseninde gerçekleşmiştir. Üretim plakası ön ısıtma değeri 80 derecedir. 316L paslanmaz çelik toz malzeme için toz boyutu 15-45µm aralığındadır. Üretimde gerçek spot değeri 120 µm iken 90-100-110 µm'luk yana kayma (tarama boşluğu) değerleri kullanılmıştır. Tarama açısı 67 ile başlayıp akabindeki her katmanda 67 derece artarak devam etmiştir.

ENAVISION 250P SLE tezgahına ait görsel Şekil 3.2.'de verilmiştir. Cihazın genel özellikleriyle alakalı bilgiler Çizelge 3.4.'te yer almaktadır.



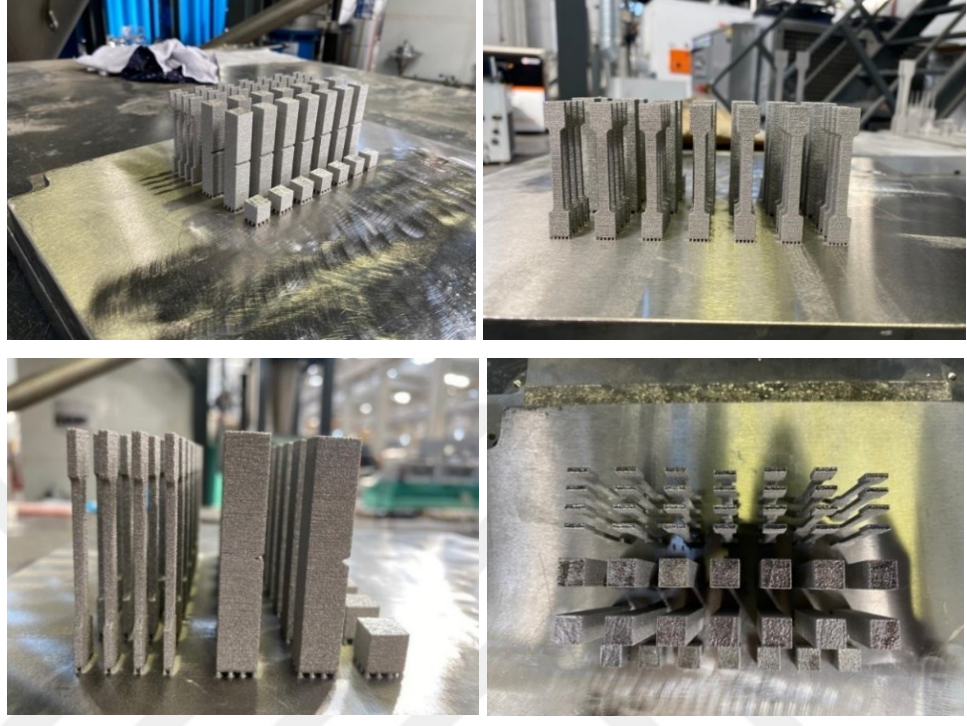
Şekil 3.2. Enavision 250P SLE tezgahı

Çizelge 3.4. Enavision 250P SLE Tezgahı (Anonim 2021c) .

| GENEL ÖZELLİKLER | ENAVISION TWIN 250 P |
|---------------------------------|----------------------------------|
| Üretim Hacmi (mm ³) | 300x300x300 |
| Ayarlanabilir Katman Yüksekliği | 20-100 µm |
| Lazer Tipi | Fiber Lazer |
| Lazer Gücü | 2x500 W* |
| Tarama Hızı | 0-11 m/s'kadar |
| Tarayıcı Sistem | 3D dinamik odaklı tarama sistemi |
| Makine Ölçüleri (LXWXH) | 2700x1440x2030 |
| Elektrik Voltajı | 400V, 3 Ph, 50/60 Hz |
| Elektrik Akımı | 32A |
| Yardımcı/Proses Gaz Tipi | Argon/Azot |
| Oksijen Seviyesi | 100 ppm |
| Vakum Pompası | Evet |
| İşletim Sistemi | Windows 10/X |
| Ağ Mimarisi | Ethernet/Ethercat |
| Üretim Platformu Isıtma | 200 °C 'e kadar |
| KONTROL ÜNİTESİ | |
| Kontrol Sistemi | Beckhoff Endüstriyel PC |
| İşlemci | İntel i5-i7 |
| İşletme Sistemi | Windows 10/X |
| HMI | 21,5 inch , Dokunmatik |
| YAZILIM | |
| CAD Yazılımı | Materillase Magics |
| Üretim Yazılımı | Ermaksan Build Processor |
| Desteklenen Dosya Tipleri | STL, 3MF, AMF, DAE, FBX, VRML... |

Her deney setinin her bir parametresi için 4 adet çekme numunesi, 2 adet yüzey pürüzlülüğü numunesi ve 1 adet radyografik inceleme-mikrosertlik inceleme numunesi üretilmiştir. Toplamda 3 farklı deney setinde her deney seti için 3 farklı parametre uygulanarak 9 adet üretim uygulaması yapılmıştır. 9 farklı üretim uygulamasında 2-5-8 numaralı üretim uygulamalarının tüm parametreleri aynı seçilmiş ve nedeni ise yapılan

testlerdeki cihazların kalibre kontrolünü yapmaktadır. Yapılan üretim numunelerine ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3. SLE yöntemiyle üretilen 316 L paslanmaz çelik malzemelerin görselleri

3.3. DeneYlerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

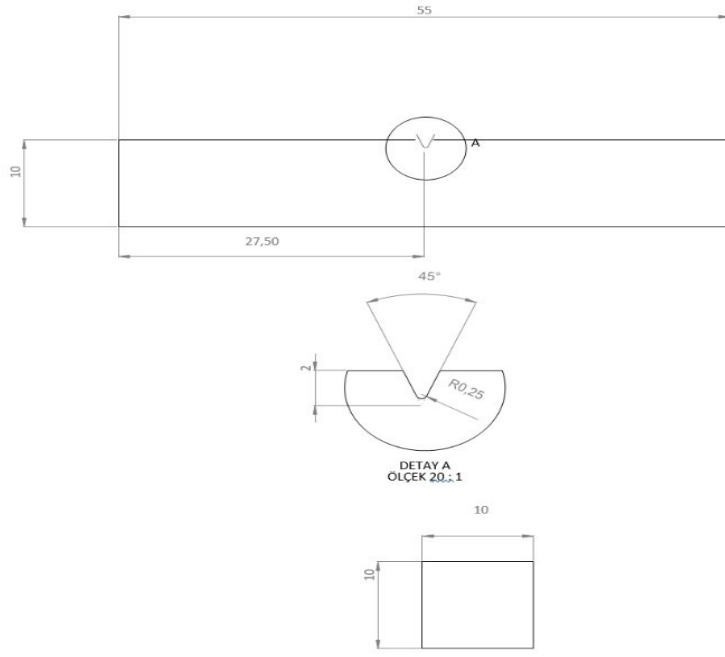
Bu çalışmada, deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için belirlenen parametrelerin çekme-akma dayanımına, mikrosertliğine, malzeme boşluğuna, yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin sonuçlarına bakılmıştır. Üretilen numunelerde değişken parametrelerin malzeme üzerindeki etkisini inceleyebilmek için kullanılan ölçüm cihazları, cihazların özellikleri ve ölçüm detayları aşağıda verilmiştir.

3.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Testi

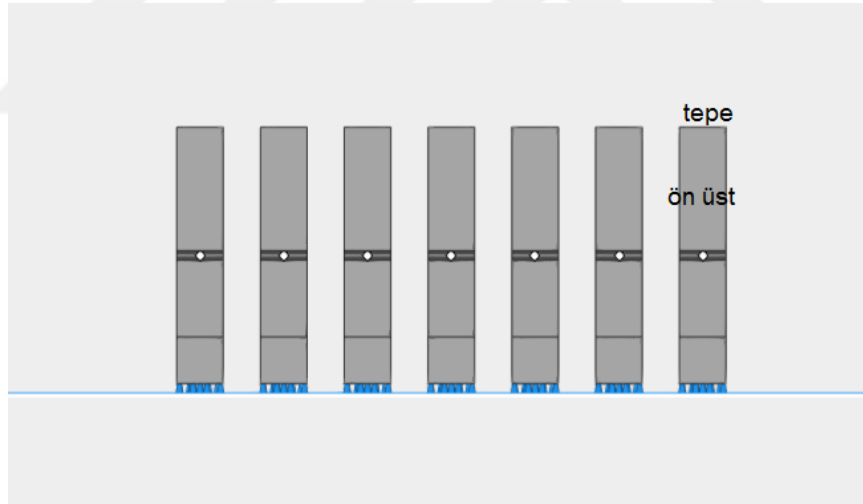
Yüzey pürüzlülüğü değerleri uygun seviyelerde olması sağlanırsa malzemenin yorulma-kırılma dayanımı, korozyona karşı dayanımı artar. Ayrıca estetik olarak bakıldığı vakit güzel görünüm sağlamaktadır yani yüzey pürüzlülüğü bir ürünün kalitesini göstermektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemlerine bakıldığı zaman ikiye ayrıldığı görülmektedir. Bunlar karşılaştırma metoduyla ölçüm ve cihaz ile doğrudan ölçümdür. Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen malzemelerimize yüzey pürüzlülüğü ölçümü cihaz ile doğrudan yapılmıştır. Bu yöntemde kalem bir uç kullanılarak yüzey pürüzlülüğü değerleri numerik olarak belirlenmektedir. Kalem, parçanın yüzeyinde ilerler ve sonuçlar cihazın ekranından okunmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü testi Durmazlar/BURSA firmasının kalite bölümünde gerçekleştirilmiştir. Test MİTUTOYO Surfrest SJ-210 marka cihazla yapılmıştır. Testin sağlıklı olabilmesi için cihaz her deney öncesinde kalibre blokları ile kalibre edilmiştir. Test işlemini gerçekleştirirken cihazın probu (kalemi) ile ölçülecek parçanın aynı hizada olabilmesi için Mitutoyo sabitleme aparatları ve seviye şimleri kullanılmıştır. Cihazın özelliklerine bakacak olursak; cihazın ağırlığı 500 gramdır. Minimum ve maximum tarama yolu 0-17,5 mm'dir. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm aralığı 360 µm'dir. Yüzey pürüzlülüğü algılama hızı 0,25 mm/s, 0,5 mm/s, 0,75 mm/sn'dir. Maksimum ölçme kuvveti 0.75 Nm'dir. Tarama metodu diferansiyel indüksiyondur. Sensör ucu 2 µm ve sensör ucu açısı 60 derecedir. Probun ucu elmas malzemesindedir ve prob sistemi kayma rayı şeklindedir.

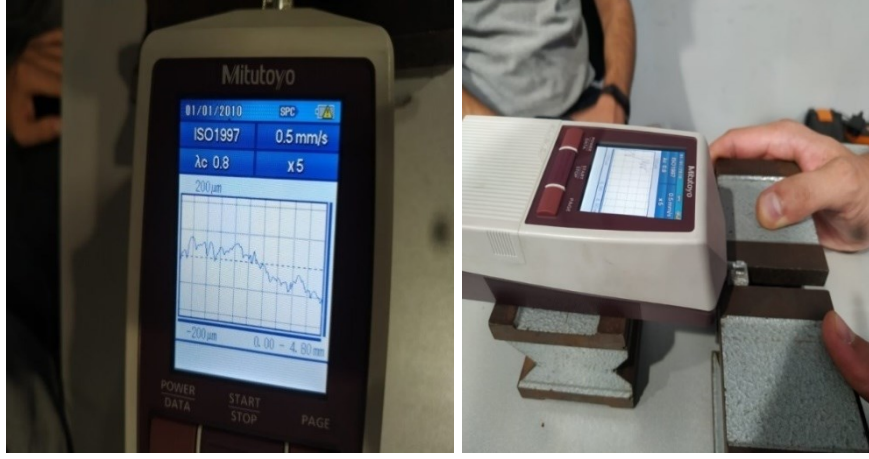
Bu test için üretilen 55x10x10 mm boyutlarındaki numunelere ait teknik resim Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Aşağıda Şekil 3.5.'te gösterilen parçanın tepe noktasından 2 adet ve ön üst bölgesinden 2 adet ölçüm yapılarak iki bölge içinde ayrı ortalamaları alınmıştır. Testlerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının görseli Şekil 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.4. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller



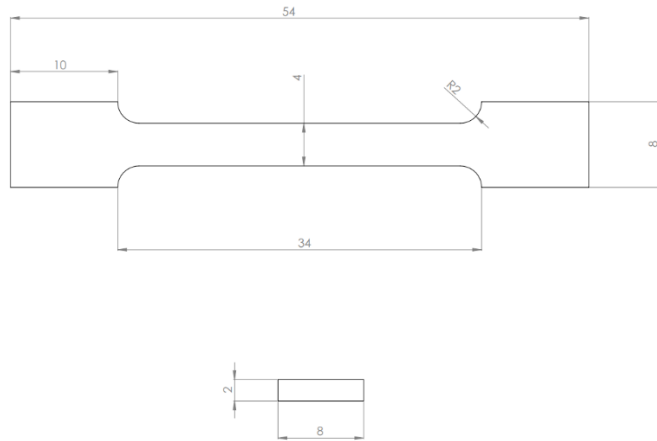
Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için üretilen numunelere ait görsel



Şekil 3.6. Mitutoyo yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının görselleri

3.3.2. Çekme Testi

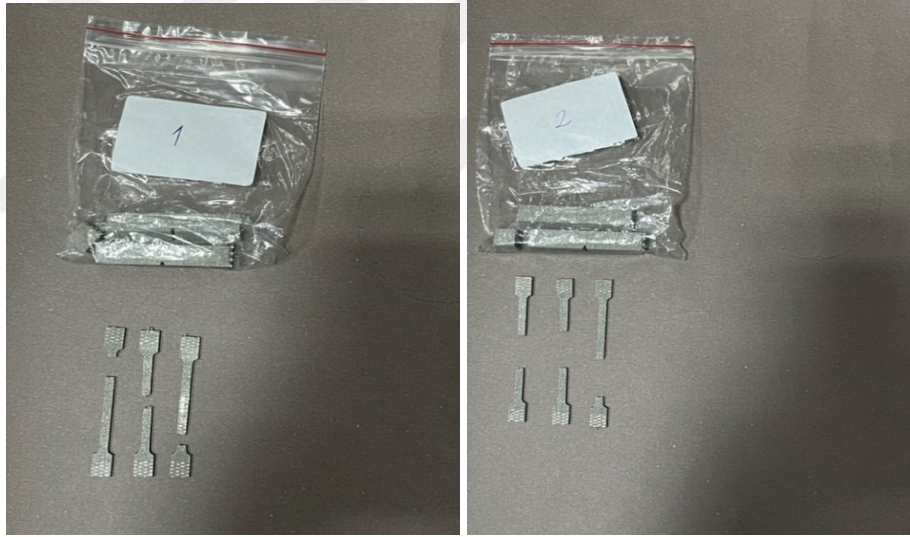
Çekme testi üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini ve mukavemetini belirlemede önemli bir testtir. Çekme testi Bursa Teknik Üniversitesi'nde yapılmıştır. Test Shimadzu marka AG-X 250 kN kapasiteye sahip cihazda yapılmıştır. Testler 1 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Bu test için üretilen 54x8x2 mm boyutlarındaki numunelerine ait teknik resim Şekil 3.7.'de verilmiştir. Cihaza ait görseller Şekil 3.8.'de, test sonrası numune görselleri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller



Şekil 3.8. Shimadzu AG-X 250 kN cihaz görselleri



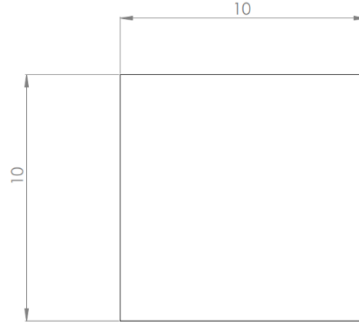
Şekil 3.9. Çekme testi sonrası çekme testi numune görselleri

3.3.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri üretilen malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir ölçümdür. Mikrosertlik ölçümleri KPS Bağlantı Malzemeleri/BURSA firmasında üretilen malzemenin üst noktası referans alınarak yapılmıştır. Ölçümler Yamer RBVHT-1875 marka sertlik ölçüm cihazında 100 kg yük altında yapılmıştır. Test sertlik sonuçları

HRB (Rockwell) cinsinden alınmıştır. Test cihazına ait özelliklere bakacak olursak; ön yük 98.1N(10kgf)'dur. Cihaza ait Rockwell skalası HRB (20-100) arasındadır. Çözünürlük 0.1 Rockwell'dir. Maximum test parçası yüksekliği 175 mm olup maximum yatay boşluk 160mm (merkezden)'dir.

Bu test için üretilen numunelere ait teknik resim Şekil 3.10.'da verilmiştir. Cihaza ait görseller Şekil 3.11.'de verilmiştir. Radyografik inceleme-mikrosertlik testi numunelerinin teknik ölçüleri 10x10x10 mm'dir.



Şekil 3.10. Üretilen numunelerin teknik resimlerine ait görseller



Şekil 3.11. Yamer RBVHT-1875 mikrosertlik ölçüm cihazının görselleri

3.3.4. Radyografik Test

Bu yöntemde X ışınları ve Gama ışınları kullanılmaktadır. Testin prensibi; kullanılan ışınların yardımıyla malzeme görüntüsünün bir film üzerine yansıtılarak oluşturulmasına dayanmaktadır. Testi yapılan parçanın içine nüfuz eden X-Gama ışınları, kalın ve ince kısımlarda farklı bir şekilde absorbe edildiği için parçanın arka tarafına koyulan filmin üzerinde yer alan görüntüdeki renkler malzemenin kalınlığına göre farklılık göstermektedir. Eğer parçanın içerisinde boşluk yer alıyorsa görüntü daha koyu, eğer ana malzemenin yoğunluğundan daha yoğun bir süreksizlik yer alıyorsa görüntü daha açık renkli olmaktadır. Yapılan bu test Röntgensan/BURSA firmasında Philips MU64 marka endüstriyel X-ray cihazla yapılmıştır. Bu testte kullanılan numuneler mikro-sertlik testleri için kullanılan numunelerle aynı ölçülerdedir. Cihaza ait görseller Şekil 3.12.'de verilmiştir.



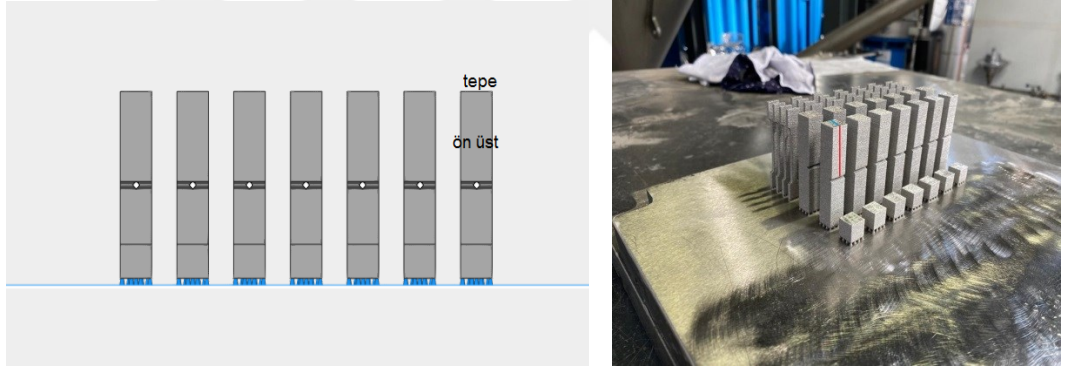
Şekil 3.12. Philips MU64 marka endüstriyel X-ray cihazına ait görseller

4. BULGULAR

4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Her bir üretim uygulaması için 2 adet yüzey pürüzlülüğü numunesi üretilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü bu test için üretilen numunelerin tepe noktasının orta ve yan kısmından, ön yüzeyinin üst kısmının orta ve yan kısmından ölçüler alınarak yapılmıştır. Toplamda bir numune için tepe noktasından iki, ön üst noktasından iki ölçüm alınarak her iki bölge içinde ortalama pürüzlülük değeri Ra belirlenmiştir. Ölçü alınan yerlere ait görseller Şekil 4.1.'de verilmiştir.

2-5-8 numaralı üretim uygulamalarının tüm parametreleri aynı olduğu için kendi aralarında yapılan ölçümlerde de Ra değerleri birbirine çok yakın çıktığından, karşılaştırmalarda 5-8 nolu üretim uygulamalarının yerine 2 nolu üretim uygulamalarının Ra değerleri kullanılmıştır.

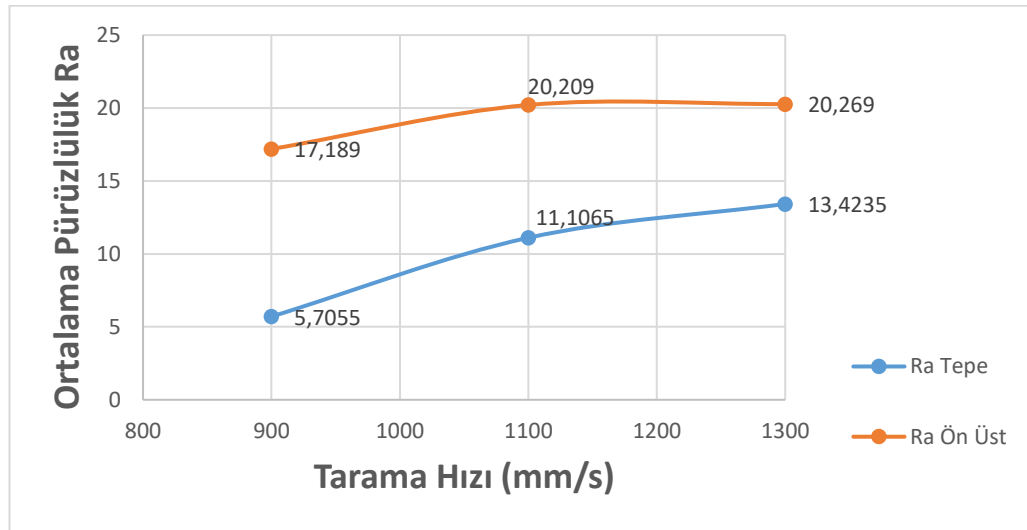


Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktalarına ait görseller

Numunelere uygulanan yüzey pürüzlülüğü testi sonuçları Çizelge 4.1.'de ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirmeler Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te verilmiştir.

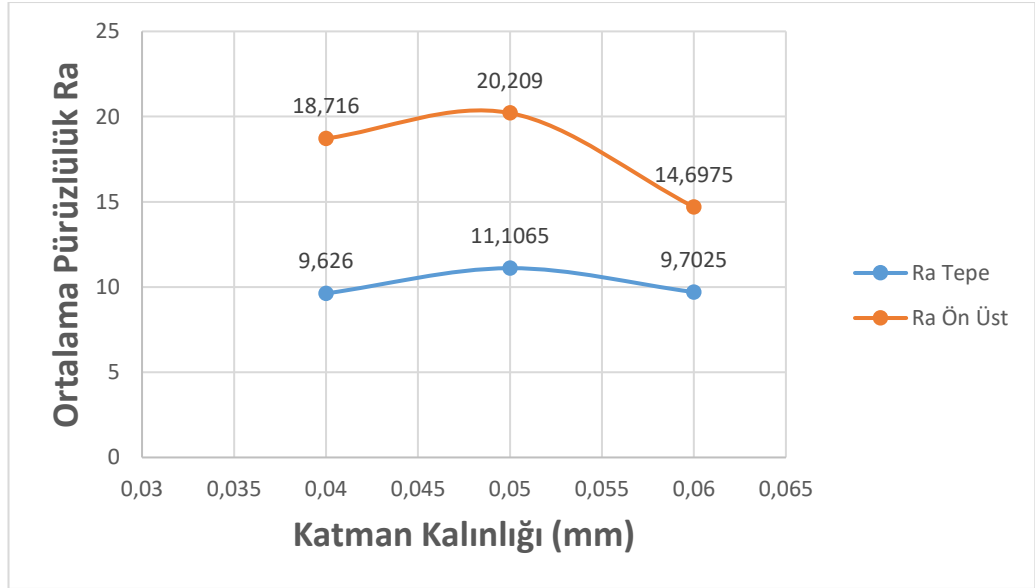
Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

| | ORTA | YAN | ORTALAMA PÜRÜZLÜLÜK Ra (μm) |
|----------|--------|--------|---|
| 1 TEPE | 4,289 | 7,122 | 5,7055 |
| 1 ÖN ÜST | 17,189 | - | 17,189 |
| 2 TEPE | 12,122 | 10,091 | 11,1065 |
| 2 ÖN ÜST | 20,265 | 20,153 | 20,209 |
| 3 TEPE | 13,676 | 13,171 | 13,4235 |
| 3 ÖN ÜST | 19,631 | 21,627 | 20,269 |
| 4 TEPE | 10,059 | 9,193 | 9,626 |
| 4 ÖN ÜST | 17,598 | 19,834 | 18,716 |
| 6 TEPE | 8,525 | 10,88 | 9,7025 |
| 6 ÖN ÜST | 15,188 | 14,207 | 14,6975 |
| 7 TEPE | 7,724 | 10,493 | 9,1085 |
| 7 ÖN ÜST | 25,167 | 18,838 | 22,0025 |
| 9 TEPE | 12,136 | 12,762 | 12,449 |
| 9 ÖN ÜST | 19,154 | 18,977 | 19,0655 |



Şekil 4.2. Tarama hızının ortalama pürüzlülük değerine etkisi

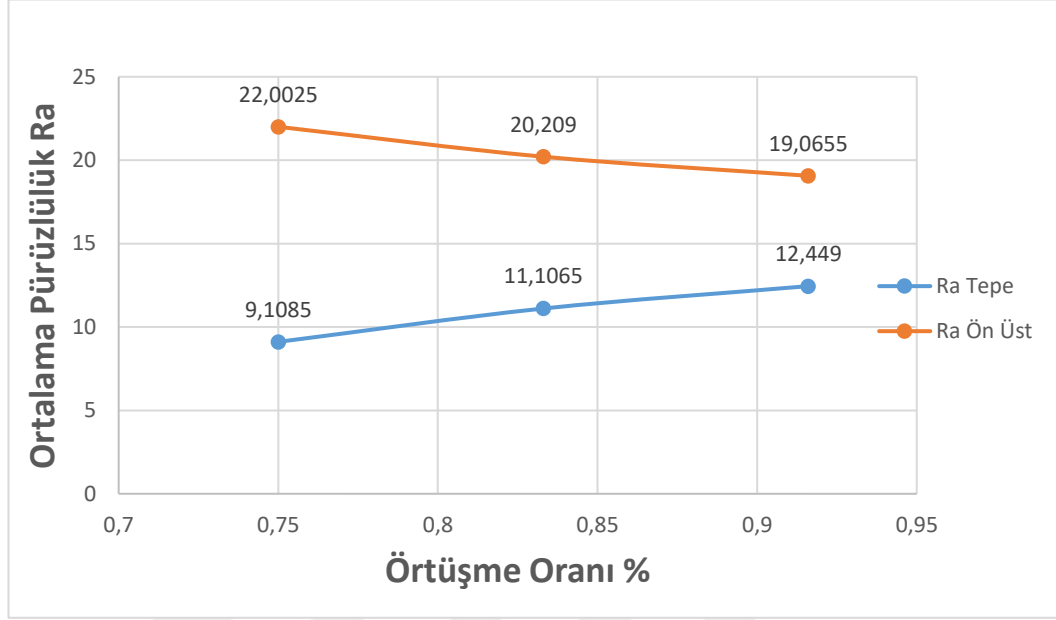
1.deney setinde 3 farklı tarama hızı kullanılmıştır. 1.üretim uygulamasında 900mm/s tarama hızında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 5,7055 μm , ön üst bölgenin ortalama pürüzlülük değeri 17,189 μm ölçülmüştür. 2.üretim uygulamasında 1100 mm/s tarama hızında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 11,1065 μm , ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 20,209 μm ölçülmüştür. 3.üretim uygulamasında 1300 mm/s tarama hızında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 13,4235 μm , ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 20,269 μm ölçülmüştür. Sonuç olarak bakıldığı zaman tarama hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Katman kalınlığının ortalama pürüzlülük değerine etkisi

2.deney setinde 3 farklı katman kalınlığı kullanılmıştır. 4.üretim uygulamasında 0,04 mm katman kalınlığında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 9,626 μm , ön üst bölgenin ortalama pürüzlülük değeri 18,716 μm ölçülmüştür. 5.üretim uygulamasında 0,05 mm katman kalınlığında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 11,1065 μm , ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 20,209 μm ölçülmüştür. 6.üretim uygulamasında 0,06 mm katman kalınlığında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 9,7025 μm , ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 14,6975 μm ölçülmüştür. Sonuç olarak bakıldığı zaman katman kalınlığı 0,04 mm'den 0,05 mm çıktığında ortalama

pürüzlülük değerinin arttığı, 0,05 mm katman kalınlığından 0,06 mm değerine çıkınca ortalama pürüzlülük değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Örtüşme oranının ortalama pürüzlülük değerine etkisi

3.deney setinde 3 farklı katman kalınlığı kullanılmıştır. 7. üretim uygulamasında % 0,75 örtüşme oranında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 9,1085 µm, ön üst bölgenin ortalama pürüzlülük değeri 22,0025 µm ölçülmüştür. 8. üretim uygulamasında % 0,833 örtüşme oranında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 11,1065 µm, ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 20,209 µm ölçülmüştür. 9. üretim uygulamasında % 0,916 örtüşme oranında tepe noktasının ortalama pürüzlülük değeri 12,449 µm, ön üst bölgesinin ortalama pürüzlülük değeri 19,0655 µm ölçülmüştür. Sonuç olarak bakıldığı zaman örtüşme oranı % 0,75 - % 0,833 çıktığı zaman Ra değerinin tepe yüzeyi için arttığı, ön üst yüzeyi için azaldığı, örtüşme oranının % 0,833 - % 0,916 çıktığı zaman tepe yüzeyi için arttığı, ön üst yüzeyi için azaldığı görülmüştür.

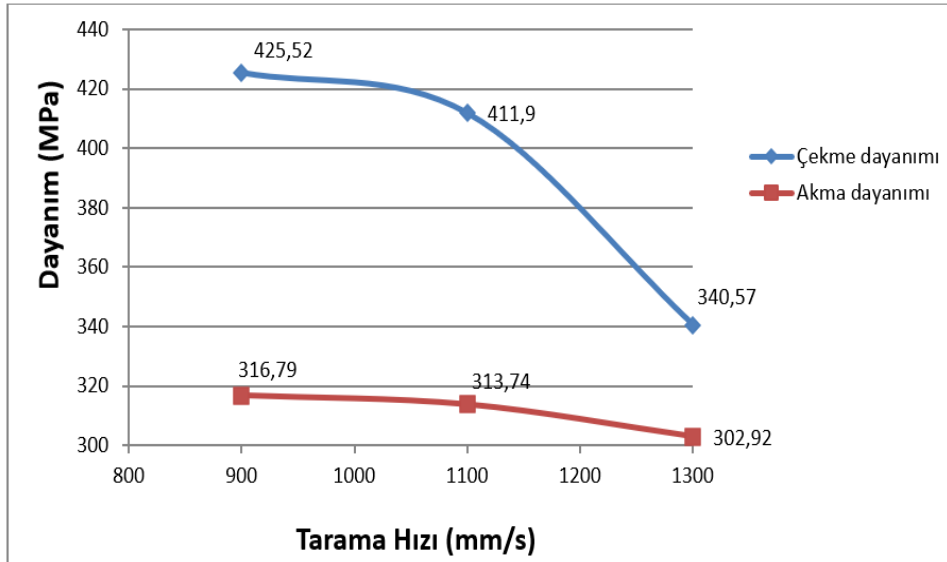
4.2. Çekme Testi

Her bir üretim uygulaması için toplamda 4 adet çekme testi numunesi üretilmiştir. Tespit edilen sonuçlar 4 numune testi sonuçlarının ortalamalarıdır. 9 üretim uygulaması için toplamda 36 adet numune üretilmiştir. 2-5-8 nolu üretim uygulamalarının tüm parametreleri aynı olduğu için sonuçları da kontrol edildiğinde birbirine çok yakın çıkmıştır. Karşılaştırmalarda 5-8 nolu üretim uygulamalarının sonuçları yerine 2 nolu üretim uygulamasının ortalama değerleri yer almıştır.

1.deney setinde 3 farklı tarama hızı kullanılmıştır. 1.deney seti numunelerine uygulanan çekme testi sonuçları Çizelge 4.2.'de ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. 1.deney seti çekme testi sonuçları

| 900 mm/s | | 1100 mm/s | | 1300 mm/s | |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 1 | | 2 | | 3 | |
| Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma |
| 425,52 | 316,79 | 411,9 | 313,74 | 340,57 | 302,92 |



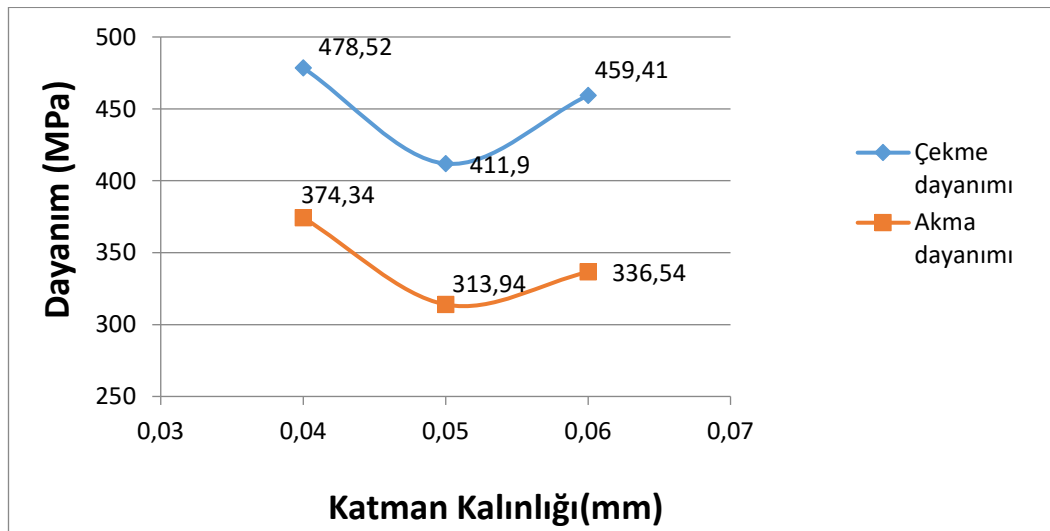
Şekil 4.5. Tarama hızının akma ve çekme dayanımına etkisi

1. üretim uygulamasında 900mm/s tarama hızında 425,52 Mpa çekme dayanımı, 316.79 Mpa akma dayanımı görülmüştür. 2. üretim uygulamasında 1100 mm/s tarama hızında 411,9 Mpa çekme dayanımı, 313,74 Mpa akma dayanımı olduğu görülmüştür. 3. üretim uygulamasında 1300 mm/s tarama hızında 340,57 Mpa çekme dayanımı, 302,92 Mpa akma dayanımı olduğu görülmüştür. Sonuçlara bakıldığı zaman tarama hızındaki artışın çekme dayanımını belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmektedir. Artan tarama hızında akma dayanımında düşüş görülse de bu değişim kısıtlı kalmıştır.

2. deney setinde 3 farklı katman kalınlığı kullanılmıştır. 2. deney seti numunelerine uygulanan çekme testi sonuçları Çizelge 4.3.'te ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.3. 2. Deney seti çekme testi sonuçları

| 0,04 | | 0,05 | | 0,06 | |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 4 | | 2 | | 6 | |
| Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma |
| 478,52 | 374,34 | 411,9 | 313,94 | 459,41 | 336,54 |



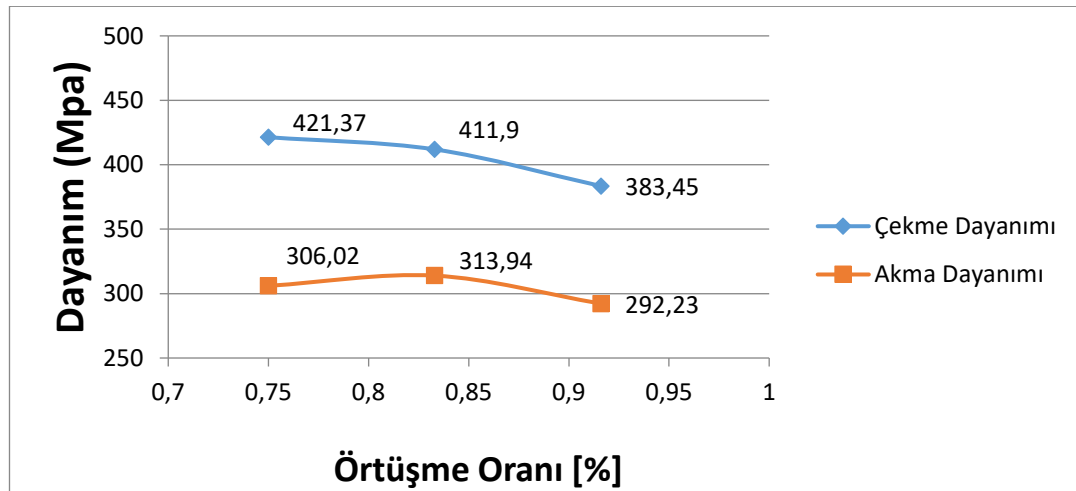
Şekil 4.6. Katman kalınlığının akma ve çekme dayanımına etkisi

4. üretim uygulamasında 0,04 mm katman kalınlığında çekme dayanımı 478,52 Mpa, akma dayanımı 374,34 Mpa olduğu görülmüştür. 5(2). üretim uygulamasında 0,05mm katman kalınlığında çekme dayanımı 411,9 Mpa, akma dayanımı 313,94 Mpa olduğu görülmüştür. 6. üretim uygulamasında 0,06 mm katman kalınlığında çekme dayanımı 459,41 Mpa, akma dayanımı 336,54 Mpa olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bakıldığı zaman katman kalınlığının 0,04 mm'den 0,05 mm'ye çıkması ile hem akma hem de çekme dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Ancak katman kalınlığı 0,05mm'den 0,06 mm'ye çıktığında bu değerlerin arttığı tespit edilmiştir.

3. deney setinde 3 farklı örtüşme oranı kullanılmıştır. 3. deney seti numunelerine uygulanan çekme testi sonuçları Çizelge 4.4.'te ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 3. Deney seti çekme testi sonuçları

| 0,75 [%] | | 0,833 [%] | | 0,916 [%] | |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 7 | | 2 | | 9 | |
| Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma | Max Gerilme | Akma |
| 421,37 | 306,02 | 411,9 | 313,94 | 383,45 | 292,23 |



Şekil 4.7. Örtüşme oranının akma ve çekme dayanımına etkisi

7. üretim uygulamasında % 0,75 örtüşme oranında 421,37 Mpa çekme dayanımı, 306,02 Mpa akma dayanımı olduğu görülmüştür. 8(2). üretim uygulamasında % 0,833 örtüşme oranında 411,9 Mpa çekme dayanımı, 313,94 Mpa akma dayanımı olduğu görülmüştür. 9. üretim uygulamasında % 0,916 örtüşme oranında, 383,45 Mpa çekme dayanımı, 292,23 Mpa akma dayanımı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bakıldığı zaman; Örtüşme oranı % 0,75-% 0,833 çıktığı zaman çekme dayanımının azaldığı, akma dayanımının arttığı görülmüştür. Örtüşme oranının % 0,833-% 0,916 çıktığı zaman çekme dayanımının azaldığı, akma dayanımının da azaldığı görülmüştür.

4.3. Mikrosertlik Ölçümü

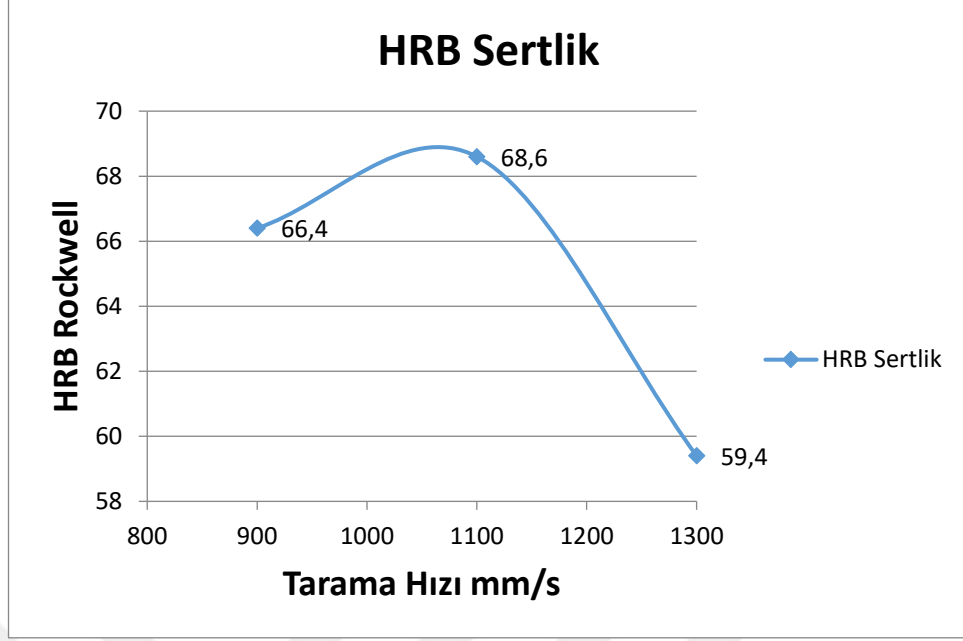
Her bir üretim uygulaması için 1 mikrosertlik testi numunesi üretilmiştir. 9 üretim uygulaması için toplamda 9 adet numune üretilmiştir. 2-5-8 numaralı üretim uygulamalarının tüm parametreleri aynı olduğu için sonuçları da kontrol edildiğinde birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu yüzden karşılaştırmalarda 5-8 üretim uygulamalarının sonuçları yerine 2 numaralı üretim uygulamasının sonuçları yer almaktadır.

Üretim uygulamalarının mikrosertlik testi sonuçları Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Üretim uygulamalarının mikrosertlik testi sonuçları

| Tarama Hızı | HRB Rockwell | Katman Kalınlığı | HRB Rockwell | Örtüşme Oranı | HRB Rockwell |
|-------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|
| 900 | 66,4 | 0,04 | 71,5 | 0,75 | 65,2 |
| 1100 | 68,6 | 0,05 | 68,6 | 0,833 | 68,6 |
| 1300 | 59,4 | 0,06 | 72,8 | 0,916 | 74 |

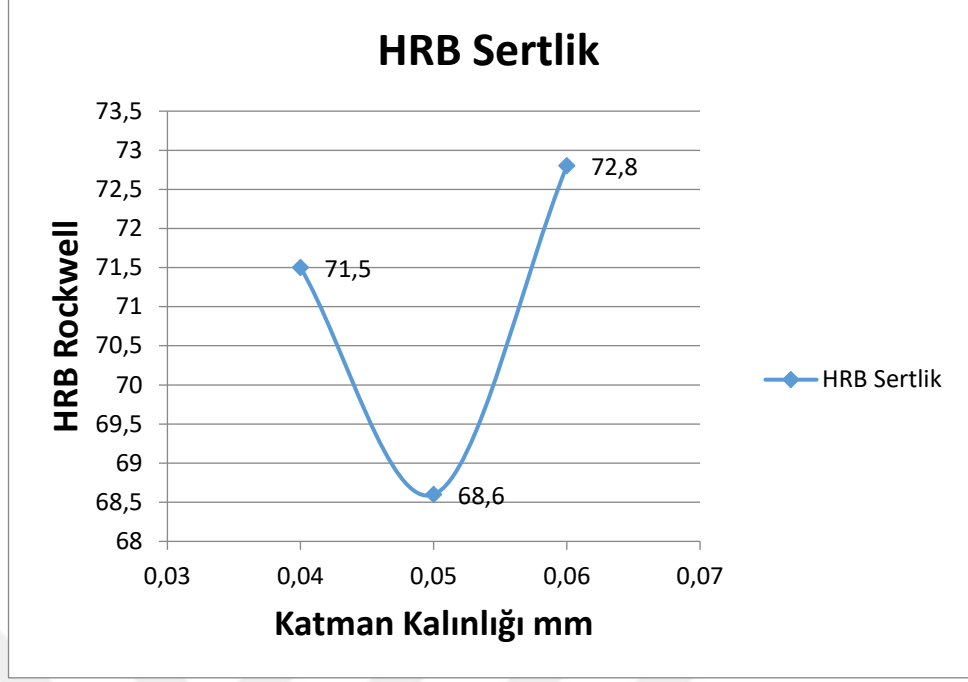
1. deney setinde 3 farklı tarama hızı kullanılmıştır. 1. deney seti numunelerine uygulanan mikrosertlik testi sonuçlarına ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Tarama hızının malzeme sertliğine etkisi

1. üretim uygulamasında 900mm/s tarama hızında 66,4 HRB sertlik tespit edilmiştir.
2. üretim uygulamasında 1100 mm/s tarama hızında 68,6 HRB sertlik tespit edilmiştir.
3. üretim uygulamasında 1300 mm/s tarama hızında 59,4 HRB sertlik tespit edilmiştir.
Sonuç olarak bakıldığı zaman, 900-1100mm/s tarama hızı arttıkça malzeme sertliğinin arttığı, 1100-1300mm/s tarama hızının artıkça malzeme sertliğinin düştüğü gözlemlenmiştir.

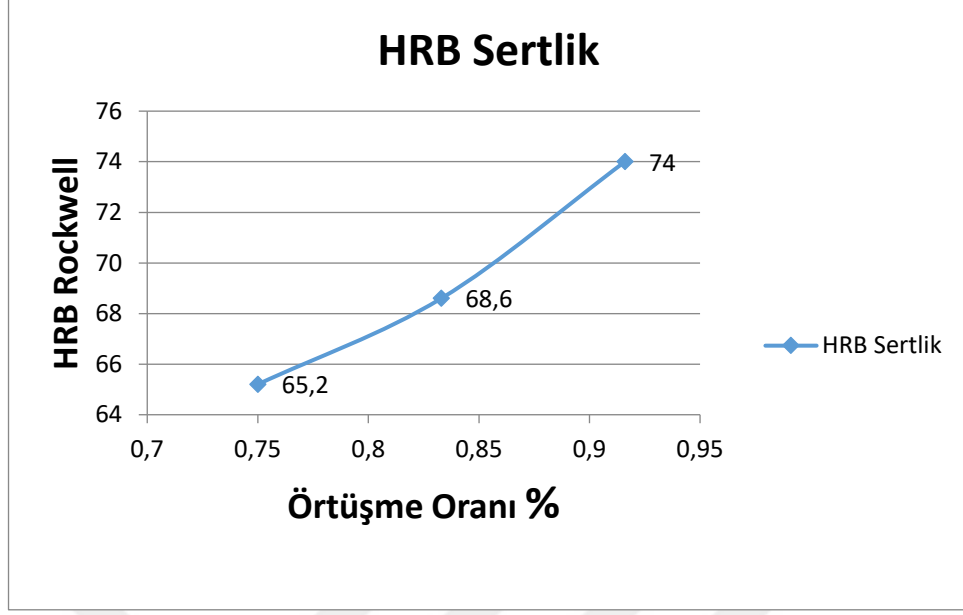
2. deney setinde 3 farklı katman kalınlığı kullanılmıştır. 2. deney seti numunelerine uygulanan mikrosertlik testi sonuçlarına ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.9.'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Katman kalınlığının malzeme sertliğine etkisi

4. üretim uygulamasında 0,04 mm katman kalınlığında 71,5 HRB sertlik tespit edilmiştir.
5(2). üretim uygulamasında 0,05mm katman kalınlığında 68,6 sertlik tespit edilmiştir.
6. üretim uygulamasında 0,06 mm katman kalınlığında 72,8 HRB sertlik tespit edilmiştir.
Sonuç olarak bakıldığı zaman, katman kalınlığı 0,04 mm'den 0,05 mm çıktığında sertliğin düştüğü, katman kalınlığının 0,05'den 0,06 mm çıktığında ise sertliğin arttığı görülmüştür.

3. deney setinde 3 farklı örtüşme oranı kullanılmıştır. 3. deney seti numunelerine uygulanan mikrosertlik testi sonuçlarına ait grafiksel değerlendirme Şekil 4.10.'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Örtüşme oranının malzeme sertliğine etkisi

7. üretim uygulamasında %0,75 örtüşme oranında 65,2 HRB sertlik gözlem tespit edilmiştir. 8(2). üretim uygulamasında % 0,833 örtüşme oranında 68,6 HRB sertlik tespit edilmiştir. 9. üretim uygulamasında % 0,916 örtüşme oranında 74 HRB sertlik tespit edilmiştir. Sonuç olarak bakıldığı zaman, örtüşme oranının arttıkça sertliğin arttığı görülmüştür.

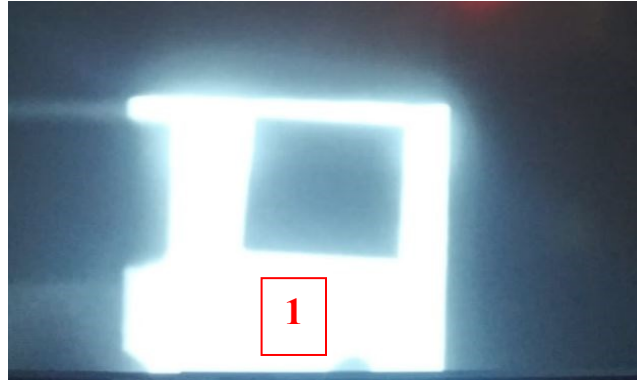
4.4. Radyografik Test

Her bir üretim uygulaması için 1 radyografik testi numunesi üretilmiştir. 9 üretim uygulaması için toplamda 9 adet numune üretilmiştir. 2-5-8 numaralı üretim uygulamalarının tüm parametreleri aynı olduğu için sonuçları da kontrol edildiğinde hiçbirinde malzemede boşluğa-porozite ve çatlığa rastlanılmamıştır. Bu yüzden karşılaştırmalarda 5-8 üretim uygulamalarının sonuçları yerine 2 numaralı üretim uygulamasının sonuçları yer almaktadır. Mikrosertlik testi ile bu test aynı numunelere yapılmıştır. Radyografik inceleme-mikrosertlik testi numunelerinin teknik ölçüleri 10x10x10 mm'dir. Test numunelerine ait görsel Şekil 4.11.'de verilmiştir.

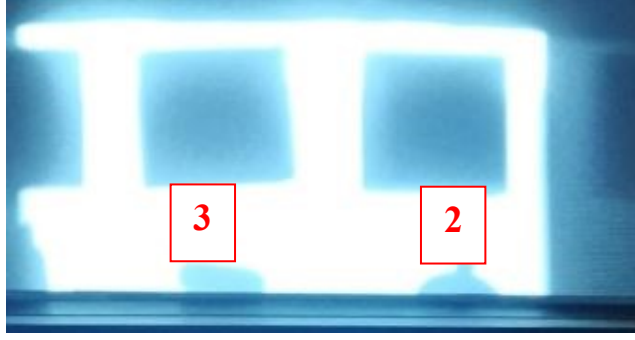


Şekil 4.11. Radyografik test numuneleri

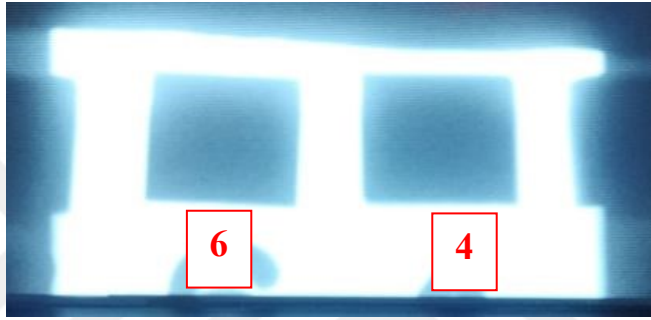
Sonuç olarak bakıldığı zaman, malzemelere çekilen röntgenlerde hiçbir malzemede boşluğa-poroziteye ve çatlığa rastlanılmamıştır. Test sonuçlarına ait görseller Şekil 4.12., Şekil 4.13., Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.’te verilmiştir.



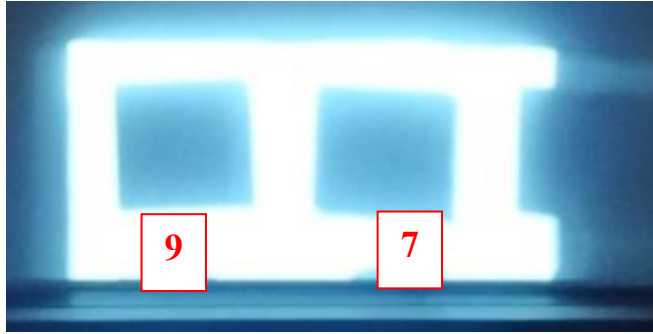
Şekil 4.12. 1 nolu numuneye ait radyografik inceleme görüntüsü



Şekil 4.13. 2 ve 3 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri



Şekil 4.14. 4 ve 6 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri (sol 6 – sağ 4)



Şekil 4.15. 7 ve 9 nolu numunelere ait radyografik inceleme görüntüleri (sol 9 – sağ 7)

5. SONUÇ (TARTIŞMA ve SONUÇ)

Bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemindeki önemli proses parametrelerinden olan lazer tarama hızı, katman kalınlığı ve örtüşme oranı parametrelerinin 316L paslanmaz çelik tozları kullanılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sabit 370 W lazer gücünde, üç farklı tarama hızı (900 mm/s, 1100 mm/s ve 1300 mm/s) ve üç farklı katman kalınlığı (0,04 mm, 0,05 mm ve 0,06 mm) ve üç farklı örtüşme oranı (% 0,75, % 0,833, % 0,916) kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri çekme, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, radyografik testler ile incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar yüzey pürüzlülüğü için incelendiğinde, lazer tarama hızının arttıkça erimiş malzemenin sıçramasına neden olarak toplama kusurlarını oluşturduğu ve artan oksidasyon nedeniyle yüzey kalitesini düşürdüğü (yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı) görülmüştür. Katman kalınlığı 0,04 mm'den 0,05 mm'ye çıktığında yüzey kalitesi bozularak ortalama pürüzlülük değerinin arttığı gözlemlenmiştir. İmal edilen parçanın tepe yüzeyi için yapılan ölçümlerde örtüşme oranı arttıkça yüzey akışını kesmek için yeterli gerilimsiz süre olmadığından parçanın yüzey kalitesini bozduğu yani ortalama yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı görülmüştür. En ideal ortalama yüzey pürüzlülüğüne (tepe yüzeyinden alınan ölçümlere göre) 1.deney setinde 370 W lazer gücünde 0,05 mm katman kalınlığında, %0,833 örtüşme oranında 900 mm/s tarama hızına sahip 1 numaralı üretim uygulamasının sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar çekme testi için incelendiğinde, katman kalınlığının 0,04 mm'den 0,05 mm'ye çıkması ile hem akma hem de çekme dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Tarama hızındaki artışın çekme dayanımını belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise artan tarama hızlarında ısı girdisinin düşmesi sonucunda birleşmenin yeterli seviyede gerçekleşmemesidir. Artan tarama hızlarında akma dayanımında da azalma söz konusu olsa da belirgin bir düşüş gözlenmemiştir. Örtüşme oranındaki artışın çekme dayanımını belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. Akma dayanımında ise örtüşme oranının %0,833'den %0,916'a çıkması ile düşüş gözlemlenmiştir. SLE metodunda uygun parametre kombinasyonlarının belirlenememesi durumunda elde edilen mekanik özelliklerin kötüleştiği tespit edilmiştir. En yüksek çekme ve akma

dayanımına 2.deney setinde 370 W lazer gücünde 0,04 mm katman kalınlığında, %0,833 örtüşme oranında 1100 mm/s tarama hızına sahip 4 numaralı üretim uygulamasının sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar mikrosertlik için incelendiğinde, tarama hızındaki artışın malzeme sertliğini arttırdığı (900–1100 mm/s çıkarken) belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Katman kalınlığı 0,04 mm'den 0,05 mm'ye çıktığında malzeme sertliği biraz düşse de 0,05 mm'den 0,06 mm'ye çıktığında arttığı ve 0,04 mm'deki katman kalınlığından daha sert bir yapıda olduğu görülmüştür. Örtüşme oranındaki artışın malzeme sertliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. En sert malzeme yapısına 3.Deney setinde 370W lazer gücünde 0,05 mm katman kalınlığında %0,916 örtüşme oranında 1100 mm/s tarama hızına sahip 9 numaralı üretim uygulamasının sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar radyografik test için incelendiğinde, malzemelere çekilen röntgenlerde hiçbir malzemedede boşluğa-poroziteye ve çatlığa rastlanılmamıştır.

KAYNAKLAR

Alabort, E., Barba, D., and Reed, R. C. (2019). Design of metallic bone by additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 164, 110-114.

Alsalla, H. H., Smith, C., & Hao, L. (2018). Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 9–17. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0068>

Anonim. (2008). Direct Metal Laser Sintering. Custompart.Net
<https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>

Anonim. (2021a). What Is DMLS? All3dp. <https://all3dp.com/2/direct-metal-lasersintering-dmls-simply-explained/>

Anonim. (2021b). What is Micro Laser Sintering? 3D MicroPrint GmbH.
<https://www.3dmicroprint.com/technology/what-is-micro-laser-sintering/>

Anonim, (2021c). 3D eklemeli imalat makinesi.
https://www.ermaksan.com.tr/tr-TR/katalog/ENAVISION_TR-K.pdf

Anonim. (n.d.-a). Introduction of SLM process. *University of Birmingham*.
<https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/irc/amp-lab/SLM.pdf>

Anonim. (n.d.-b). SLS. 3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3dprinting-technologies-overview/#sls

Anonim. (n.d.-c). Today's Additive Manufacturing Technologies
<https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-history>

A. Ahmadi, R. Mirzaeifar, N. Shayesteh, A. Sadi, H.E. Karaca, M. Elahinia, Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting : a computational framework, *Mater. Des. 112 (2016)* 328–338.

Bian, L., Shamsaei, N., & Usher, J. M. (2017). Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties. In *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties (Vol. 148)*. <https://doi.org/10.1201/9781315151441>

Bici, M., Brischetto, S., Campana, F., Ferro, C. G., Secli, C., Varetto, S., Maggiore, P., and Mazza, A. (2018). Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 67, 215-220.

Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Carvalho, O., Silva, F. S., & Miranda, G. (2017). 316L stainless steel mechanical and tribological behavior— A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 16, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.007>

Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), 869- 60 879. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>

Crump, S. (1992). *FDM Stratasys Patent* (pp. 1–2)

Deckard, C. (1986). *SLS Patent*. 19. <https://patents.google.com/patent/US4863538>

Diegel, O., Nordin, A., and Motte, D. (2019). Introduction to Additive Manufacturing. in: A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. *Singapore: Springer*, 1- 17.

Duoss, E. B., Weisgraber, T. H., Hearon, K., Zhu, C., Small IV, W., Metz, T. R., Vericella, J. J., Barth, H. D., Kuntz, J. D., Maxwell, R. S., Spadaccini, C. M., and Wilson, T. S. (2014). Three-dimensional printing of elastomeric, cellular architectures with negative stiffness. *Advanced Functional Materials*, 24(31), 4905-4913.

Feygin, M. (1988). US4752352.

Geetha, M., A. K. Singh, R. Asokamani, and A. K. Gogia. 2009. “Ti Based Biomaterials, the Ultimate Choice for Orthopaedic Implants - A Review.” *Progress in Materials Science* 54(3): 397–425.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Additive Manufacturing Technologies (Third). *Springer Nature Switzerland*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9_2

Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J. ve Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders. *Materials ve Design*, 100, 102-109.

Groover, M. P. (2012). Metal Forming and Sheet Metalworking. *In Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System*.

Han, Y., Wang, F., Wang, H., Jiao, X. ve Chen, D. (2018). High-strength boehmite-acrylate composites for 3D printing: Reinforced filler-matrix interactions. *Composites Science and Technology*, 154, 104-109. doi:10.1016/j.compscitech.2017.10.026

Hull, C. W. (1984). Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereolithography. *Patent*, 19, 16. <https://patents.google.com/patent/US4575330>

Kodama, H. (1998). Automatic method for fabricating a three- dimensional plastic model with photo- hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(June 1998), 2–6.

Kaya, G. (2019). Seçici Lazer Ergitme Yöntemi Kullanılarak Farklı Üretim Parametrelerinde Üretilen Ti6al4v Alaşımının Yapısal Ve Tribolojik Özelliklerinin Karakterizasyonu. *Erzurum Teknik Üniversitesi*.

Kim, M. K., Kim, J. H., Park, S. E. ve BACK, S. A. (2018). U.S. Patent Application No. 15/745,736.

Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser 61 melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249(November 2016), 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>

Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., and Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing*:

Liu, J., Song, Y., Chen, C., Wang, X., Li, H., Zhou, C., Wang, J., Guo, K., & Sun, J. (2020). Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials and Design*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108355>

L. Hao, S. Dadbakhsh, O. Seaman, M. Felstead, Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (17) (2011) 5793–5801.

L. Jiangwei, S.Yanan, C. Chaoyue, W. Xiebin, L. Hu, Z. Chang'an , W. Jiang, G. Kai, S. Jie, Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel Fabricated by selective laser melting , *Mater. Des.* (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519307932>

L. Taban, K. Manigandan, G. Dariusz, A. Bandar, B. Tushar, Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting, *Material Science and Engineering A* 770 (2020) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509319312419>

Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., and Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*, 183, 108137.

Mullen, L., Stamp, R. C., Brooks, W. K., Jones, E., and Sutcliffe, C. J. (2009). Selective laser melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 89(2), 325-334.

Najmon, J. C., Raesi, S., and Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive manufacturing for the aerospace industry*, 7-31.

Shkolnik, A., Angeles, L., Diamond, M. N., Dvorskiy, E., & Angeles, L. (1998). Laminated Object Manufacturing System.

Singh, S., Ramakrishna, S. ve Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185-200. doi:10.1016/j.jmapro.2016.11.006

Srivastava, M., Rathee, S., Maheshwari, S., & Kundra, T. K. (2020). Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements. *CRC Press*.

Subbiah, S. (2015). Science of machining. In *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_1

Sürmen H., (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 2

S. Wen, S. Li, Q. Wei, C. Yan, S. Zhang, Y. Shi, Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts, *J. Mater. Process. Technol.* 214 (2014) 2660–2667, <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2014.06.002>.

Swanson, W. J., Mannella, D. F. ve Schloesser, R. G. (2013). *U.S. Patent No. 8,459,280*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.004>

Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 910–925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>

Vaezi, M., Seitz, H. ve Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1721-1754. doi:10.1007/s00170-013-4962-5

Vranić, A., Bogojević, N., Ćirić-Kostić, S., Croccolo, D., & Olmi, G. (2017). Advantages and drawbacks of additive manufacturing. *IMK-14 - Istrazivanje i Razvoj*, 23(3), 57–62. <https://doi.org/10.5937/imk1702057v>

Yadav, A., Srivastav, A., Singh, A., Mushtaque, MD, Khan, SA, Kumar, H., Arora, P.K. 2021. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler Üzerine Bir Araştırma: *Materyaller Bugün: Bildiriler*, 43, 154-157.

Yang, Y. ve Li, L. (2018). Cost modeling and analysis for Mask Image Projection Stereolithography additive manufacturing: Simultaneous production with mixed geometries. *International Journal of Production Economics*, 206, 146-158. doi:10.1016/j.ijpe.2018.09.023

Yuan, L., Ding, S., and Wen, C. (2019). Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: *A review*. *Bioactive Materials*, 4(1), 56-70.

Yetim, A. Fatih. 2009. “Biyomalzeme Olarak Kullanılan AISI316L Paslanmaz Çelik ve Ti6Al4V Alaşımının Plazma İle Nitrüleme Davranışı, Ti-Dlc İnce Film Kaplama İle Karşılaştırılması, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 1.”

Wendel, B., Rietzel, D., Kühnlein, F., Feulner, R., Hülder, G., & Schmachtenberg, E. (2008). Additive processing of polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(10), 799–809. <https://doi.org/10.1002/mame.200800121>

Wroe, J. (2015). Introduction to Additive Manufacturing Technology: *A Guide for Designers and Engineers*. *European Powder Metallurgy Association*, 28–34. www.epma.com/am

52900:2015, A. (2015). Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. *ASTM International*, i, 1–9. http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900+15

3D Systems, “Our story”, <https://www.3dsystems.com/our-story> (Erişim tarihi: 1 Haziran 2021)