

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ METAL
LEVHALARDA YAZDIRMA YÖNÜ VE KAYNAKLI
BİRLEŞTİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

TUBA ÇINAR

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ
METAL LEVHALARDA YAZDIRMA YÖNÜ VE KAYNAKLI
BİRLEŞTİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

TUBA ÇINAR

Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Mustafa TÜMER

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK

Jüri Üyesi, Akdeniz Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Tuba ÇINAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Tuba ÇINAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Katmanlı imalat teknolojileri ile yapılan makine elemanları ve sistemlerinin üretim işlemleri; karmaşık geometrilere sahip farklı tasarım parçalarının üretilebilmesi, prototip ve AR GE tasarım araştırma sürelerinin kısılması, ağırlık kazancı olan optimal yapıların fiziksel olarak ortaya konulması, yeni ürün imalatında kalıp işlemlerine ihtiyaç duyulmaması, artık malzeme /oluşmaması gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada EOS M290 model 3B metal yazıcı ve DIN 1.2709 toz malzemesi kullanılarak 0° - 45° - 90° yönlerinde çekme çubuk numuneleri ASTM E8 normuna göre yazdırılmıştır. Yazdırma yönünün mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi ısı işlem öncesi ve sonrası incelenerek ortaya konmuştur. 0° - 45° - 90° plakalar yazdırılarak TIG kaynağı ile birleştirme yapıp tel erezyonda çekme numunesi çıkarılmıştır. Kaynak yapılan bölgede mikroyapıya bakılıp ısı etki altındaki bölge incelenmiştir. 0° - 45° - 90° yazdırılan kaynaklı ve kaynaklı numunelerin çekme testleri ve mikroyapıları incelenerek, mekanik özellikleri arasındaki farklılıklar ortaya konmuştur. Bu çalışma sonucunda küçük ölçekli katmanlı imalatla üretilen bir parçanın büyük ölçekli parçalarla kaynaklı birleştirildiğinde yöne bağlı mekanik özelliklerdeki değişimler ortaya konmuştur.

Tezimi hazırlama aşamasında her an yardımlarıyla beni destekleyen, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Abdülkadir CENGİZ'e, çalışmalarım sırasında itici güç olan Sayın Prof. Dr. Mehmet UÇAR'a, kaynak ve deneysel çalışmalarım benden desteğini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜMER'e, katmanlı imalat tarafında alan tecrübesini paylaşan Sayın Doç. Dr. H. Kürşat Çelik'e, numunelerin imalatı ve deneysel çalışma aşamasında her türlü çalışma imkanı veren Kırpart firmasına ve Sayın Kemal ATAMAY'a, numunelerin hazırlanması aşamasında destek veren ANKE ve ARON Kalıp firmasına, tez sürecimde destek olan firmam voestalpine/BÖHLER'e, tüm öğrenim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve tez çalışmam sürecinde gösterdiği fedakarlık nedeniyle eşim Sayın Dr. Recep ÇINAR'a teşekkür ederim.

Haziran-2022

Tuba ÇINAR

İÇİNDEKİLER

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ..... | i |
| YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI | ii |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR..... | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | v |
| TABLolar DİZİNİ..... | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | vii |
| ÖZET | viii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. GENEL BİLGİLER..... | 2 |
| 2.1. Katmanlı İmalat Yöntemleri | 3 |
| 2.2. Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) Katmanlı İmalat Yöntemi | 4 |
| 2.3. Katmanlı İmalat Teknolojisinin Faydaları ve Kısıtları..... | 5 |
| 2.4. Katmanlı İmalatta İşlem Adımları | 6 |
| 2.5. Katmanlı İmalatta Kullanılan Malzemeler | 9 |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM | 11 |
| 3.1. DIN 1.2709 Toz Malzemesi | 11 |
| 3.2. EOS M290 3B Metal Yazıcı..... | 12 |
| 3.3. Deney Numunelerinin İmalatı ve Son İşlemler | 14 |
| 3.4. Sertlik Ölçümü..... | 22 |
| 3.5. Mikroyapı İncelemesi | 23 |
| 3.6. Çekme Testi..... | 24 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 25 |
| 4.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları | 25 |
| 4.2. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları | 27 |
| 4.3. Çekme Testi Sonuçları..... | 29 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 32 |
| KAYNAKLAR..... | 34 |
| KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER..... | 36 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 37 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. | Katman teknolojisi prensibi | 2 |
| Şekil 2.2. | Lazer sinterleme yönteminin genel çalışma prensibi | 4 |
| Şekil 2.3. | Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen karmaşık tasarım örnekleri | 5 |
| Şekil 2.4. | Katmanlı imalat işlem adımları | 7 |
| Şekil 2.5. | DMLS yöntemiyle üretilmiş bazı ürünler | 10 |
| Şekil 3.1. | EOS M290 3B metal yazıcı..... | 12 |
| Şekil 3.2. | EOS M290 3B metal yazıcının tasarım yapısı | 13 |
| Şekil 3.3. | ASTM E8 standardına göre belirlenen numune ölçüleri..... | 14 |
| Şekil 3.4. | Kaynaksız numunelerin 3B CAD modeli..... | 15 |
| Şekil 3.5. | Kaynaklı numuneler için hazırlanmış plakaların 3B CAD modeli | 15 |
| Şekil 3.6. | Deney numunelerinin EOS M290 3B metal yazıcıda imalatı | 17 |
| Şekil 3.7. | Kaynaklı numuneler için yazdırılan plakalar | 18 |
| Şekil 3.8. | Isıl işlem sepetindeki numuneler..... | 18 |
| Şekil 3.9. | Isıl işlem prosesinin zaman-sıcaklık diyagramı | 19 |
| Şekil 3.10. | Kullanıma hazır hale gelen kaynaksız çekme testi numuneleri | 19 |
| Şekil 3.11. | TIG kaynağı parametreleri ve şematik gösterimi | 20 |
| Şekil 3.12. | Kaynaklı çekme testi numuneleri | 20 |
| Şekil 3.13. | Kaynaklı çekme testi numuneleri üzerinde frezeleme operasyonu | 21 |
| Şekil 3.14. | Kullanıma hazır hale gelen kaynaklı çekme testi numuneleri..... | 21 |
| Şekil 3.15. | SHIMADZU HMV-G mikro vickers sertlik test cihazı | 22 |
| Şekil 3.16. | Olympus PME3 optik mikroskop ve bakalite alınmış numuneler | 23 |
| Şekil 3.17. | Olympus MX40 optik mikroskop ve bakalite alınmış numune | 24 |
| Şekil 3.18. | UVE MNR 100 çekme test cihazı ve Epsilon 3542 ekstansometre | 24 |
| Şekil 4.1. | 0° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı..... | 26 |
| Şekil 4.2. | 45° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı..... | 26 |
| Şekil 4.3. | 90° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı..... | 26 |
| Şekil 4.4. | Mikroyapı incelemesi 0° - 500x büyütme | 27 |
| Şekil 4.5. | Mikroyapı incelemesi 45° - 500x büyütme | 27 |
| Şekil 4.6. | Mikroyapı incelemesi 90° - 500x büyütme | 28 |
| Şekil 4.7. | Mikroyapı incelemesi 0° - TIG kaynak bölgesi 200x büyütme | 29 |
| Şekil 4.8. | Çekme testinde kopan kaynaksız deney numuneleri..... | 29 |
| Şekil 4.9. | Çekme testinde kopan kaynaklı deney numuneleri..... | 30 |
| Şekil 4.10. | Kaynaksız her bir numune için çekme testi sonuçları..... | 30 |
| Şekil 4.11. | Kaynaklı her bir numune için çekme testi sonuçları | 31 |

TABLULAR DİZİNİ

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. | Katmanlı imalat proses kategorileri | 3 |
| Tablo 2.2. | Proses kategorilerine göre kullanılan malzeme tipleri | 10 |
| Tablo 3.1. | Kimyasal bileşim (ortalama %)..... | 11 |
| Tablo 3.2. | Isıl işlem sonrası erişilebilen mekanik özellikler | 11 |
| Tablo 3.3. | EOS M290 3B metal yazıcı teknik verileri | 13 |
| Tablo 3.4. | DIN 1.2709 malzemesi için EOS M290 imalat parametreleri | 16 |
| Tablo 3.5. | Isıl işlem proses adımları..... | 18 |
| Tablo 4.1. | Kaynaksız numuneler için ölçülen ortalama sertlik değerleri..... | 25 |



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| A | : Amper |
| dak | : Dakika |
| hPa | : Hectopascal |
| HRc | : Rockwell Sertliği |
| J | : Joule |
| l | : Litre |
| m | : Metre |
| mm | : Milimetre |
| MPa | : Mega Pascal |
| s | : Saniye |
| V | : Volt |
| W | : Watt |
| μm | : Mikrometre |
| σ_{max} | : Maksimum gerilme, (MPa) |
| $^{\circ}\text{C}$ | : Santigrat Derece |

Kısaltmalar

| | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM | : American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu) |
| CAD | : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım) |
| DMLS | : Direct Metal Laser Sintering (Direkt Metal Lazer Sinterleme) |
| TIG | : Tungsten Inert Gas Welding (Tungsten Asal Gaz Kaynağı) |

KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ METAL LEVHALARDA YAZDIRMA YÖNÜ VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Katmanlı imalat ile imal edilen parçalar tasarımda sağladıkları esneklikler ve üretim kolaylığı nedeni ile son zamanlarda talep görmektedir. Ancak ölçü kısıtlamaları nedeni ile büyük parça üretiminde makine maliyetlerindeki artış dezavantaj oluşturmaktadır. Katmanlı imalat ile elde edilen küçük parçaların kaynakla birleştirilerek büyük parça imal edilmesi tasarım esnekliği açısından parça imalatında önemlidir. Bu çalışmada DMLS yöntemi ile DIN 1.2709 metal tozu kullanılarak 0, 45 ve 90 derece yönlerinde yazdırılan çekme testi numuneleri (kaynaklı ve kaynaklı olmayan) üzerinde sertlik ölçümü, mikroyapı analizi ve çekme testi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı olmayan numunelerde elde edilen sonuçlarda yazdırma yönünün mikroyapıya ve sertliğe etkisi görülmemiştir. 0 derece yazdırma yönüne sahip numunelerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri konvansiyonel yollarla elde edilen malzemenin çekme mukavemeti değerleriyle örtüşmektedir. 45 ve 90 derece yazdırma yönüne sahip numunelerde ise yaklaşık yüzde 85 oranında çekme mukavemeti değerleri uyumluluk göstermektedir. ERNiCr-3 ile TIG kaynağı ile birleştirilen numuneler incelendiğinde kaynak birleştirme bölgesinde mikroyapı katılama açısından uygun görünmektedir. Kaynaklı numunenin çekme mukavemeti kaynaklı olmayan numuneye göre yüzde 75 oranında düşük çıkmıştır. Kaynaklı bölgenin sertlik ölçüm değerlerinin ana malzeme sertlik değerlerine göre düşük olduğu görülmüştür. Bu yüzden birleştirme gereken yerlerde bu yöntem kullanılabilir ancak çekme mukavemeti ve sertlik ihtiyacı olan uygulamalar için alternatif malzeme ve yöntemler denenmelidir.

Anahtar Kelimeler: DIN 1.2709, DMLS, Katmanlı İmalat, Kaynak, Mekanik Özellikler.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRINTING DIRECTION AND WELDED JOINING ON MECHANICAL PROPERTIES OF METAL PLATES MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

ABSTRACT

Parts manufactured with additive manufacturing have been in demand recently due to the flexibility they provide in design and ease of production. However, it is at a disadvantage due to the increase in machine costs in large part production because of size restrictions. Manufacturing large parts by welding small parts obtained by additive manufacturing is important in part manufacturing in terms of design flexibility. In this study, hardness measurement, microstructure analysis and tensile test were performed on tensile test specimens (welded and weldless) printed in 0, 45 and 90 degrees orientations using DIN 1.2709 metal powder with DMLS method. No effect of printing orientation on microstructure and hardness was observed in the results obtained from weldless samples. The tensile strength values obtained in the samples with 0 degree printing orientation coincide with the tensile strength values of the material obtained by conventional methods. In samples with 45 and 90 degrees printing orientation, the tensile strength values of approximately 85 percent are compatible. When the samples joined by TIG welding with ERNiCr-3 are examined, it seems that the microstructure in the weld joint region is suitable in terms of solidification. The tensile strength of the welded sample was 75 percent lower than that of the weldless sample. It was observed that the hardness measurement values of the welded area were lower than the hardness values of the base material. Therefore, this method can be used where joining is required. But alternative materials and methods should also be examined.

Keywords: DIN 1.2709, DMLS, Additive Manufacturing, Welding, Mechanical Properties.

1. GİRİŞ

Katmanlı imalat teknolojileri ile yapılan makine sistemleri ve elemanlarının üretim işlemleri; karmaşık geometrilere sahip farklı tasarım parçalarının üretilebilmesi, prototip ve AR-GE tasarım araştırma sürelerinin kısalması, ağırlık kazancı olan optimal yapıların fiziksel olarak ortaya konulması, yeni ürün imalatında kalıp işlemlerine ihtiyaç duyulmaması, artık malzeme oluşmaması gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu teknolojinin diğer avantajı prototip ürün imalatında değişik özellikte malzemeler kullanılabilmesine ek olarak özellikle metal malzeme kullanımı ile nihai/son kullanıcı ürünlerin de ortaya konabilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle metalik malzemelerin imalatında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı her geçen gün daha çok dikkat çekmektedir. Ancak, büyük hacimli parçaların üretiminde 3 boyutlu metal yazıcıların yazma boyutları yetersiz kalabilmekte veya yazma boyutları büyüdüğünde metal yazıcıların yatırım maliyetleri çok fazla artış gösterebilmektedir. Bu nedenle küçük hacimlere sahip alt bileşenlerin yazılması ve bu bileşenlerin kaynaklı bağlantı yapılarak birleştirilmesi ve tasarlanan büyük hacimli parçaların oluşturulması son zamanlarda metalik katmanlı imalat teknolojileri ile ortaya konan parçaların üretiminde güncel araştırma konularından birisidir. Bu büyük hacimli parçaların çalışır prototip olması ya da nihai ürün formatında tanımlanabilmesi için kaynaklı birleştirme bölgelerindeki mukavemet sürekliliğinin yani mukavemete dayalı tasarım-malzeme özelliklerinin ortaya konması önemli bir tasarım-üretim karar kriteri olmaktadır. Literatürde katmanlı imalat yöntemi ile üretilen metalik parçalarda kaynaklı birleştirme ve kaynak performanslarının incelenmesine ait yapılan çalışmaların oldukça sınırlı sayıda olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, bu konu ile ilgili bilimsel literatüre katkı sağlayacak ve özellikle metal malzemeler ile imal edilmiş test numunelerinin bazı mekanik özelliklerini ortaya koyarak gelecekte yer alabilecek büyük hacimli metalik katmanlı imalat tasarım çalışmalarına referans olabilecek sonuçlar ortaya konmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

Yalnızca geometriye yönelik olan imalat teknolojisi eksiltici imalat teknolojisi, şekillendirici imalat teknolojisi ve katmanlı imalat teknolojisi olmak üzere genel anlamda üç temel gruba ayrılmıştır (Burns, 1993).

Eksiltmeli imalat teknolojisinde istenen geometri frezeleme veya tornalama gibi talaşlı imalat yöntemleriyle malzeme kaldırarak elde edilir. Şekillendirici imalat teknolojinde istenen geometri bükme, dövme veya döküm gibi yöntemlerle dış kuvvetler veya ısı uygulayarak şekil değiştirilerek elde edilir. Katmanlı imalat teknolojisinde ise malzeme ekleyerek, tercihen konturlu katmanları üst üste sıralayarak istenen geometri oluşturur.

Katman teknolojisinin ilkesi, herhangi bir nesnenin geometrisinin karmaşıklığından bağımsız olarak katmanlara bölünebileceği ve bu katmanlar kullanılarak yeniden oluşturulabileceği (Şekil 2.1) gerçeğine dayanmaktadır (Gebhardt ve Hötter, 2016).



Şekil 2.1. Katman teknolojisi prensibi

ASTM (American Society for Testing and Materials) organizasyonunun “katmanlı imalat teknolojileri için standart terminoloji” isimli yayınında katmanlı imalat (AM: Additive Manufacturing) "eksiltmeli imalat yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden nesnelere üretmek için malzemeleri katman katman birleştirme prosesi" olarak tanımlanmaktadır.

Katmanlı imalat, katman teknolojisine dayalı otomatik bir üretim prosesidir ve iki ana alt prosesi birleştirir. Bu iki proses parçayı oluşturmak için her bir katmanın fiziksel olarak yapılması ve sonraki katmanların sırayla birleştirilmesi şeklindedir. Katmanlı imalat oluşturma prosesi, genellikle sanal ürün modeli olarak adlandırılan parçanın 3B verilerini gerektirir. Sadece geometrinin değil, aynı zamanda parçanın malzeme özelliklerinin de inşa sürecinde üretilmesi katmanlı imalatın bir özelliğidir.

2.1. Katmanlı İmalat Yöntemleri

Katmanlı imalat yöntemleri geleneksel imalat yöntemlerine (frezeleme, tornalama, bükme, dövme, döküm vb.) alternatif olarak görülmektedir (Huang ve diğ., 2013). Katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması proses, malzeme, makine tipi vb. kategorilerde yapılabilmektedir. ISO ve ASTM organizasyonları eğitim ve standart geliştirmek, mevcut ve gelecekteki katmanlı imalat makine teknolojilerini proses benzerliklerine göre gruplamak için Tablo 2.1’de verilen 7 kategoriden oluşan bir yapı ortaya koymuştur (ISO/ASTM 52900).

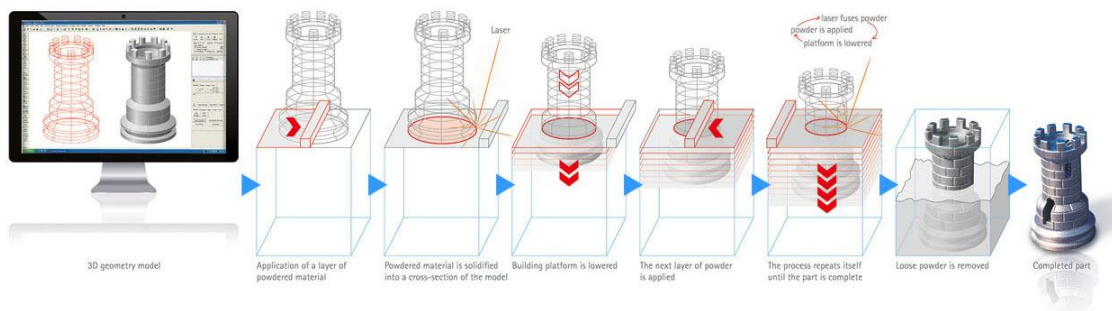
Tablo 2.1. Katmanlı imalat proses kategorileri

| Proses Kategorisi | Açıklama |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting – BJT) | Toz malzemeleri birleştirmek için sıvı bir bağlama maddesinin seçici olarak biriktirildiği katmanlı imalat süreci. |
| Doğrudan Enerji ile Yığıma (Directed Energy Deposition – DED) | Malzemeleri biriktirirken eriterek kaynaştırmak için odaklanmış ısı enerjisinin kullanıldığı katmanlı imalat süreci. |
| Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion – MEX) | Malzemenin bir nozul yoluyla seçici olarak dağıtıldığı katmanlı imalat süreci. |
| Malzeme Püskürtme (Material Jetting – MJT) | Hammadde damlacıklarının seçici olarak biriktirildiği katmanlı imalat süreci. |
| Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion – PBF) | Isı enerjisinin bir toz yatağındaki bölgeleri seçici olarak eritip birleştirdiği katmanlı imalat süreci. |
| Levha Laminasyonu (Sheet Lamination – SHL) | Bir parça oluşturmak için malzeme tabakalarının birleştirildiği katmanlı imalat süreci. |
| Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization – VPP) | Bir kazandaki sıvı fotopolimerin ışıkla aktive olan polimerizasyon ile seçici olarak kürlendiği katmanlı imalat süreci. |

2.2. Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) Katmanlı İmalat Yöntemi

Bu çalışmada kullanılacak olan numuneler DMLS yöntemi ile yazdırılmıştır. DMLS katmanlı imalat yöntemi proses olarak toz yatağı füzyonu kategorisinde yer almaktadır. DMLS yöntemi ile işleme gerektirmeden doğrudan 3B CAD verilerinden 3B metal parçalar üretmek mümkündür. 3B parçaları üretmek için ana bileşen bir metal alaşımın tozudur. DMLS yönteminde dayanımı yüksek parçalar ve prototipler üretmek için paslanmaz çelik, kobalt, krom ve inconel gibi çeşitli metal ve alaşım malzemeler kullanılır. DMLS teknolojisi, 3B baskılı metal parçaların seri üretimi için çok çeşitli endüstrilerde kullanılır. Ana uygulamalar havacılık, otomotiv, medikal, kalıpcılık ve turbo makinelerdir.

DMSL yöntemiyle imalat yapan 3B metal yazıcıda, inşa prosesinin başlangıcında yazdırma tablası başlangıç konumuna getirilir ve yazdırma tablasının üzerine ultra ince bir metal tozu katmanı serilir. Daha sonra metal tozlarının oksidasyonunu önlemek için yazdırma odası inert gazla doldurulur. Makinedeki oksijen belirlenen limitin altına düştüğünde inşa prosesi başlar. 3B yazıcıdaki güçlü bir lazer metal tozu tam olarak CAD modeli tarafından tanımlanan noktalarda eritir. Bu şekilde 3B olarak yazdırılan parçanın bir katmanı tamamlanmış olur. Daha sonra yazdırma tablası bir katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir metal tozu katmanı serilir. Metal tozu tekrar eritilir. Şekil 2.2’de gösterilen bu prosedür parça tamamlanana kadar tekrarlanır (EOS, 2017).



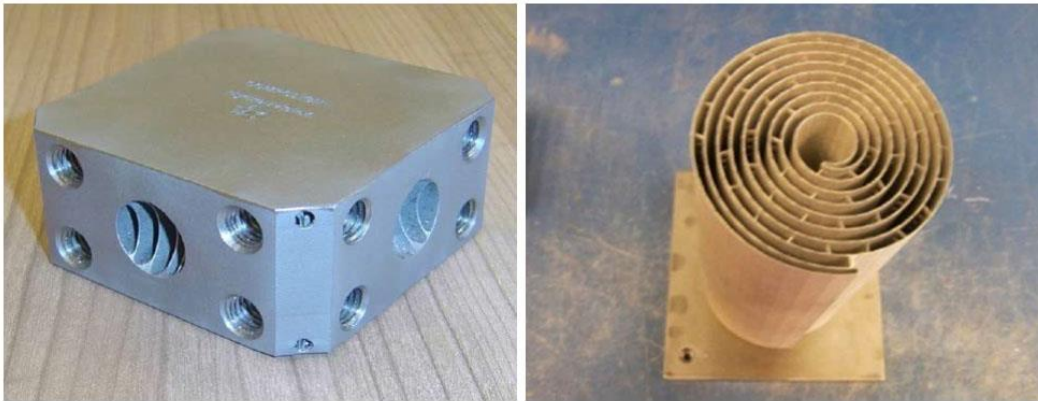
Şekil 2.2. Lazer sinterleme yönteminin genel çalışma prensibi

2.3. Katmanlı İmalat Teknolojisinin Faydaları ve Kısıtları

Metal katmanlı imalat teknolojileri birçok önemli fayda sağlar. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir (Kopp ve Riou, 2019).

- Geleneksel döküm ve talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tasarım özgürlüğü sağlar.
- Kafes yapıya sahip tasarımının kullanılmasıyla veya malzemenin yalnızca olması gereken yerde olduğu parçaların tasarlanmasıyla hafif yapılar.
- Karmaşık iç kanallara (kalıplarda soğutma kanalı vb) sahip parça tasarlama olanağı veya tek seferde bir kaç parçanın inşası gibi yeni işlevsellikler.
- Pahalı veya işlenmesi zor alaşımlar söz konusu olduğunda işlemeye kıyasla 25 kata kadar daha az hammadde tüketimi sağlayan net şekil süreci. Net şekil yeteneği, yalnızca tek adımda karmaşık parçaların oluşturulmasına yardımcı olur ve böylece kaynak gibi montaj işlemlerinin sayısını azaltır.
- Kalıplar, metal şekillendirme veya talaş kaldırma gerektiren diğer geleneksel imalat proseslerinin aksine herhangi bir takım veya alete ihtiyaç yoktur.
- Katmanlı imalat makinelerinde karmaşık parçalar birkaç saat içinde katman katman üretilebilir. Son işlemler dahil toplam döngü süresi genellikle birkaç gün veya haftadır ve genellikle birkaç aylık üretim döngüleri gerektiren geleneksel metalurji süreçlerinden çok daha kısadır.

Şekil 2.3'te geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen bazı karmaşık tasarım örnekleri verilmiştir.



Karmaşık iç kanallara sahip hidrolik prototip 316L vakumlu süzücü protatip

Şekil 2.3. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen karmaşık tasarım örnekleri

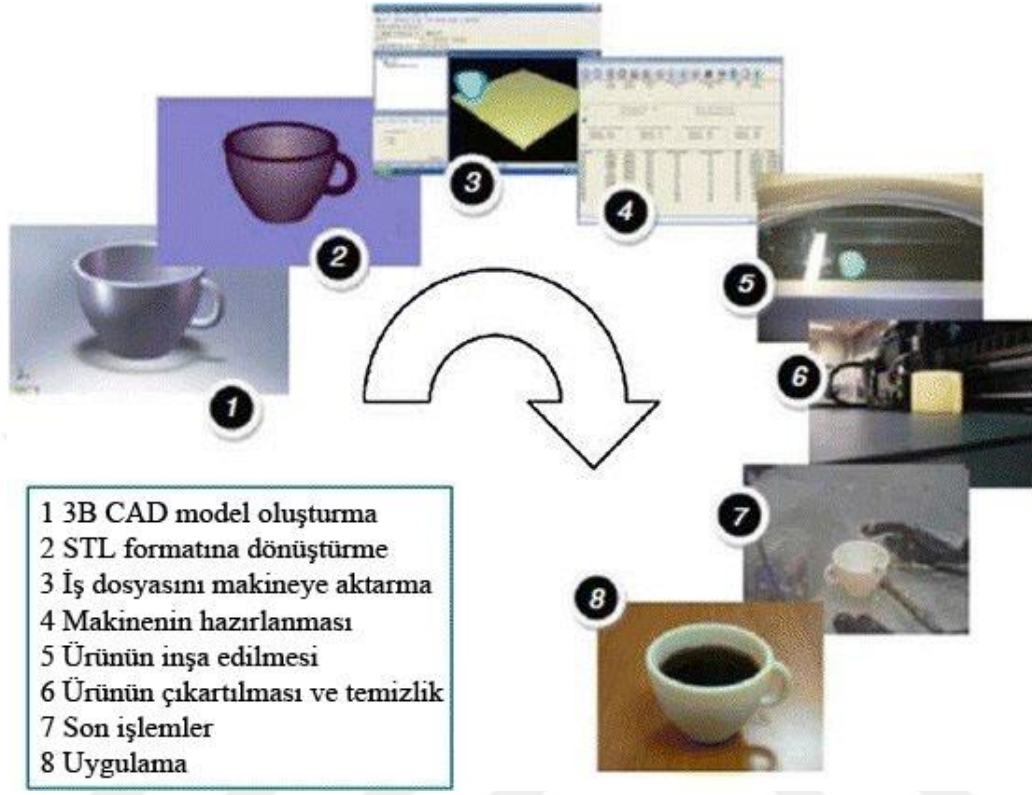
Katmanlı imalat teknolojilerinden tam olarak yararlanmak için bazı sınırlamaların farkında olmak önemlidir. Bu sınırlamalar aşağıda belirtilmiştir (Kopp ve Riou, 2019).

- Parça boyutu: Toz yatağı teknolojisinde yazdırılan parça boyutu standart toz yatağı sistemleri için 250 x 250 x 250 mm boyutuyla sınırlıdır. Bununla birlikte, doğrudan enerji ile yığıma prosesinde parça boyutları daha büyük olabilir. Ancak, toz katmanlarının kalınlıklarının küçük olması nedeniyle uzun veya çok büyük parçalar oluşturmak çok yavaş ve maliyetli olabilir.
- Seri imalat: Katmanlı imalat prosesleri genellikle tek parça veya küçük adetli imalatlar için uygundur ve seri imalat için uygun değildir. Makine üretkenliğini ve dolayısı ile seri imalat kapasitesini artırmak için çalışmalar devam etmektedir. Küçük boyutlu parçalar için 25000 parça/yıl'a kadar seri imalat mümkündür.
- Parça tasarımı: Toz yatağı teknolojisinde sarkma açısı 45°'nin altında olduğunda çıkarılabilir destek yapılarına ihtiyaç vardır.
- Malzeme seçimi: Birçok alaşım mevcut olmasına rağmen, kaynak yapılamayan metaller katmanlı imalat ile işlenemez ve kaynaklanması zor alaşımlar özel yaklaşımlar gerektirir.
- Malzeme özellikleri: Katmanlı imalatla yapılan parçalar, Z ekseninde (yapım yönü) anizotropi gösterme eğilimindedir. Ayrıca, %99.9'luk yoğunluklara ulaşılabilese de, bazı iç boşluklar oluşabilmektedir. Mekanik özellikler genellikle döküm parçalardan üstündür ancak genel olarak dövme parçalardan daha düşüktür.

2.4. Katmanlı İmalatta İşlem Adımları

Katmanlı imalat yöntemlerinde sanal 3B CAD modelden fiziksel 3B parçaya ulaşmak için bir dizi işlem adımın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Farklı ürünler katmanlı imalat yöntemlerini farklı şekillerde ve farklı derecelerde kullanabilir. Küçük ve nispeten basit ürünler yalnızca görselleştirme modelleri için katmanlı imalatı kullanabilirken daha fazla mühendislik gerektiren büyük ve karmaşık ürünler geliştirme süreci boyunca birçok aşamada ve tekrarlı olarak katmanlı imalatı kullanabilmektedir. Ayrıca ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında ön taslak prototipler gerektiğinde üretim hızları nedeniyle katmanlı imalat tercih edilebilmektedir. Katmanlı imalat ile üretilen parçalar kullanılmadan önce dikkatli bir temizlik ve son işlemler (zımparalama, yüzey hazırlama,

boyama vb.) gerektirebilmektedir. Genel anlamda katmanlı imalat süreci Şekil 2.4'te görülen 8 adımdan oluşmaktadır (Gibson ve diğ., 2010).



Şekil 2.4. Katmanlı imalat işlem adımları

- 3B CAD model oluşturma: Katmanlı imalat için ilk adım üretilecek parçanın bilgisayar ortamında 3B CAD modelinin oluşturulmasıdır. 3B CAD model oluşturmak için CATIA, SOLIDWORKS, NX, CREO vb. bir ticari CAD yazılımı kullanılabilir.
- CAD modelin STL formatına dönüştürülmesi: STL (Standard Triangulation Language), hacim verilerinin yüzey verilerine dönüştürülmesi için bir endüstri standardıdır. STL formatı kullanılarak CAD parçasındaki yüzeyler çok sayıda üçgene dönüştürülür. Neredeyse her katmanlı imalat makinesi fiili bir standart haline gelen STL dosya formatını kabul etmekte ve günümüzde neredeyse her CAD yazılımı bu dosya formatı çıktısını verebilmektedir. Bu dosya, orijinal CAD modelinin dış kapalı yüzeylerini tanımlar ve katmanların hesaplanması için temel oluşturur.
- STL dosyasının işlenmesi ve iş dosyasının makineye aktarılması: Katmanlı imalatta hedef üretilecek parçayı tanımlayan STL dosyasının oluşturulup onarıldıktan sonra doğrudan makineye gönderilmesi ve yazdırılması şeklindedir. Fakat parça

üretiminden önce STL veri üzerinde birçok eylem (parçanın konumlandırılması, ölçeklenmesi, kopyalanarak çoğaltılması, metin eklenmesi vb.) yapılması gerekebilmektedir. Bazı durumlarda STL verilerinin bölünmesi veya birden çok STL dosyasının bir araya getirilmesi ihtiyacı ile karşılaşılmaktadır. Dosyayı makineye göndermeden önce bu tip eylemleri gerçekleştirmek için ticari, ücretsiz ya da makine üreticisi tarafından sağlanan STL dosya işleme yazılımları kullanılabilir.

- Makinenin hazırlanması: Parça inşa sürecine başlamadan önce katmanlı imalat makinesin yapılacak işin gereksinimlerine uygun bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Bu aşamada malzeme kısıtları, enerji kaynağı, katman kalınlığı, zaman vb. inşa parametrelerinin ayarlamaları yapılmaktadır.
- Ürünün katmanlar halinde inşa edilmesi: Bu adımda parça katmanlar halinde inşa edilir. Parçanın tamamlanma süresi geometrik boyutlara, katman yüksekliğine, baskı hızına, destek elemanı kullanımı vb. etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. İnşa süreci temelde otomatik bir süreçtir ve makine büyük ölçüde denetim olmadan devam edebilir. Malzemenin bitmesi, güç kesintileri, yazılım hataları vb. durumlardan kaynaklanan hataların olmadığından emin olmak için makinenin yüzeysel olarak izlenmesi gerekmektedir.
- Bitmiş ürünün makineden dışarı çıkartılması ve temizlik: Katmanlı imalat makinesi inşa sürecini tamamladıktan sonra parçalar makinenin yazdırma odasından dışarı çıkartılır. Bu aşamada çalışma sıcaklıklarının yeterince düşük olmasına ve aktif hareket eden bir ekipman olmamasına dikkat edilmelidir. Katmanlı imalat makinesinden çıkartılan parçaların minimum müdahale ile kullanıma hazır olması tercih edilmektedir. Fakat parçalar makineden çıkarıldıktan sonra kullanıma hazır hale gelmeden önce temizlik ve bazı son işlemler gerektirebilmektedir. Her durumda parça yazdırıldığı tabla üzerinden ayrılmalı ya da parçayı çevreleyen inşa malzemesinden çıkartılmalıdır. Bazı katmanlı imalat prosesleri parçayı oluştururken çökme veya bükülmeleri önlemek için destek yapıları kullanabilmektedir. Parça çıkarıldıktan sonra bu destek yapılarının temizlenmesi gerekmektedir. Örnek olarak metal katmanlı imalatta parçayı yazdırma plakasından ve destekleri parçadan çıkarmak için tel erezyon, şerit testere veya frezeleme operasyonu gerekebilmektedir. Farklı katmanlı imalat parçalarının farklı temizlik gereksinimleri olmaktadır. Temizlik aşaması son işlem adımının ilk kısmı olarak da düşünülebilir.

- Son işlemler: Bu aşama kullanım amaçlarına yönelik parçaların üzerinde yapılan son işlem (genellikle manuel) aşamalarını ifade eder. Bu işlemler parlatma ve zımparalama gibi aşındırıcı işlemler veya kaplama uygulamaları olabilir Sürecin bu aşaması parçanın kullanıma özeldir. Bazı kullanımlar minimum son işlem gerektirirken bazıları hassasiyet ve kaliteli bir yüzey sağlamak için parçaların çok dikkatli bir şekilde kullanılmasını gerektirebilir. İhtiyaç duyulan parça özelliklerini elde etmek için parçalara kimyasal veya ısıl işlemler uygulanabilir. Farklı katmanlı imalat proseslerinin boyutsal doğruluk açısından farklı sonuçları vardır ve bu nedenle nihai boyutlar için parçalar üzerinde işleme operasyonları gerekebilmektedir. Bununla birlikte bazı son işlemlerde elektrikli aletlerden, CNC işleme operasyonlarından ve parlatma havuzu ya da kurutma/pişirme fırınları gibi ek ekipmanlardan yararlanılabilir.
- Uygulama: Son işlemler sonrası parçalar kullanıma hazır hale gelmektedir. Nihai bir model veya ürün oluşturmak için diğer mekanik veya elektronik bileşenlerle birlikte monte edilmeleri gerekebilir. Parçalar, diğer imalat süreçlerinde (kalıplama ve döküm gibi) kullanılan benzer malzemelerden yapılsa da parçaların standart malzeme özelliklerine göre davranmayabileceğine dikkat edilmelidir. Bazı katmanlı imalat süreçleri, içlerinde sıkışmış küçük boşluklara sahip parçalar oluşturabilmektedir ve bu mekanik gerilme altında parça arızasının kaynağı olabilmektedir. Ek olarak, bazı işlemler malzemenin yapım sırasında bozulmasına, malzemelerin optimum şekilde bağlanmamasına veya kristalleşmemesine neden olabilmektedir. Hemen hemen her durumda, özellikler anizotropiktir. Çoğu metal katmanlı imalat prosesi için hızlı soğutma, geleneksel üretimden farklı mikro yapılara neden olmaktadır. Sonuç olarak, katmanlı imalat yöntemleriyle üretilen parçalar, daha geleneksel bir üretim yaklaşımı kullanılarak yapılan parçalardan farklı davranır. Bu davranış belirli bir uygulama için daha iyi veya daha kötü olabilir ve bu nedenle tasarımcı bu farklılıkların farkında olmalı ve tasarım aşamasında bunları dikkate almalıdır.

2.5. Katmanlı İmalatta Kullanılan Malzemeler

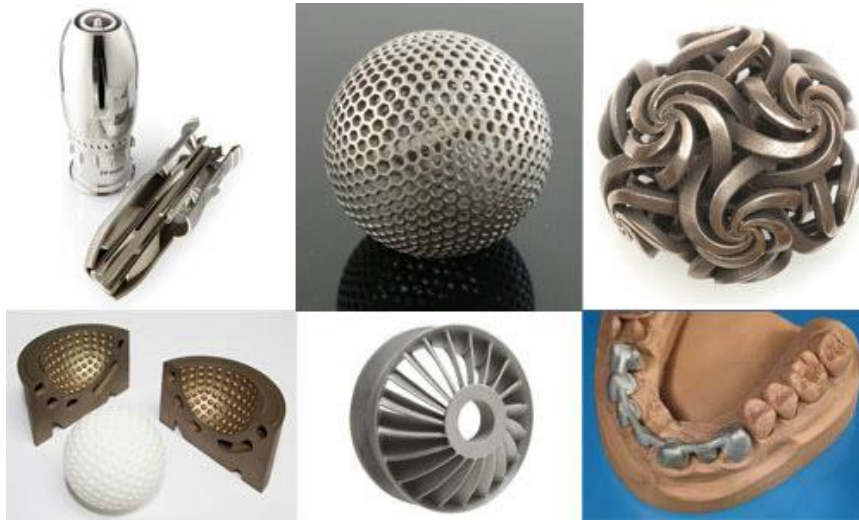
Katmanlı imalat makinelerinde genel olarak katı, sıvı ve toz olmak üzere üç formda malzeme kullanılmaktadır. Üretilecek ürünün ihtiyaç duyulan özelliklere uygun olmasını sağlamak için malzeme seçimi büyük önem arz etmektedir (Şahin ve Turan, 2018).

Tablo 2.2’de ASTM standartları ile belirlenen katmanlı imalat proses kategorilerinde kullanılan imalat malzemeleri ve bu malzemelerin formu verilmiştir (Kunt, 2019).

Tablo 2.2. Proses kategorilerine göre kullanılan malzeme tipleri

| Proses Kategorisi | İmalat Malzemesi | Malzeme Formu |
|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| Bağlayıcı Püskürtme | Metal, Seramik, Polimer | Toz |
| Doğrudan Enerji ile Yığıma | Metal | Toz veya Tel |
| Malzeme Ekstrüzyonu | Polimer | Katı (Filament) |
| Malzeme Püskürtme | Polimer (Fotopolimer) | Sıvı Reçine |
| Toz Yatağı Füzyonu | Metal, Polimer | Toz |
| Levha Laminasyonu | Metal, Polimer, Kâğıt | Katı (Tabaka) |
| Fotopolimerizasyon | Polimer (Fotopolimer) | Sıvı Reçine |

DMLS katmanlı imalat yönteminde kullanılan toz malzeme portföyü oldukça geniştir. Bu portföy alüminyum, kobalt krom, nikel bazlı, ısıya dayanıklı metal, paslanmaz çelikler, takım çelikleri ve titanyum alaşımlarını içermektedir. AlSi10Mg hafif alüminyum alaşımı mühendislik ve otomotive uygulamaları için, MS1 martenzitik (maraging) çeliği (DIN 1.2709) enjeksiyon kalıpcılığı ve mühendislik parçaları için, Inconel 718 nikel alaşımı havacılık (yüksek sıcaklığa maruz türbin parçaları) için, GP1 (DIN 1.4542) ve PH1 (DIN 1.4540) paslanmaz çelikleri mühendislik ve medikal uygulamalar için, Ti6Al4V hafif titanyum alaşımı havacılık ve uzay uygulamaları için, CoCrMo MP1 süper alaşımı mühendislik, medikal ve dental uygulamaları için, CoCrMo SP2 süper alaşımı dental uygulamalar için kullanılmaktadır (Karakoç, 2016). Şekil 2.5’te DMLS yöntemiyle üretilmiş bazı ürünler görülmektedir (URL-1).



Şekil 2.5. DMLS yöntemiyle üretilmiş bazı ürünler

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada teorik ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Uygulama bölümünde materyal olarak DMLS yöntemiyle imal edilen ve son işlemlerle (ısıl işlem, tel erezyon ile kesim, frezeleme, kaynak vb.) kullanıma hazır hale getirilen deney numuneleri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında metal toz malzeme, 3B metal yazıcı, sertlik ölçüm cihazı, optik mikroskop ve çekme testi cihazı kullanılmıştır.

3.1. DIN 1.2709 Toz Malzemesi

Özellikle hibrit parça çalışmalarında uygun metallerin geleneksel ve katmanlı imalat yöntemleriyle birlikte kullanımı üretim maliyetlerinde düşme sağlayabilmektedir. Bu konu dikkate alınarak, bu çalışmada yüksek dayanım özelliği, yüksek tokluk özelliği ve hibrit parça üretiminde sağladığı avantaj ile öne çıkan DIN 1.2709 çeliği (martenzitik) ele alınmıştır. Yazdırma tablası veya yazdırma odasının ilaveten ısıtılmasına gerek duyulmadan kullanılabilir. 55 HRC'lik ulaşılabilir sertlik, bu malzemeyi, basınçlı döküm uygulamaları gibi konformal soğutmanın gerekli olduğu takım çeliği uygulamaları için iyi bir çözüm haline getirmektedir.

Partikül boyutu dağılımı 15 - 45 µm olan BÖHLER AMPO W722 - DIN 1.2709 toz malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 3.1'de, bu malzeme ile yazdırılan parçanın ısıl işlem sonrası erişilebilen mekanik özellikleri ise Tablo 3.2'de verilmiştir (URL-2).

Tablo 3.1. Kimyasal bileşim (ortalama %)

| Mo | Ni | Co | Ti |
|------|----|------|------|
| 4,90 | 18 | 9,30 | 1,10 |

Tablo 3.2. Isıl işlem sonrası erişilebilen mekanik özellikler

| Özellik | Değer |
|------------------------|---------------|
| Çekme dayanımı | 2030 ± 70 MPa |
| Akma dayanımı | 1950 ± 70 MPa |
| Uzama (%) | 6 ± 2 |
| Sertlik | 53 ± 2 HRc |
| Çarpma tokluğu (ISO V) | 18 ± 2 J |

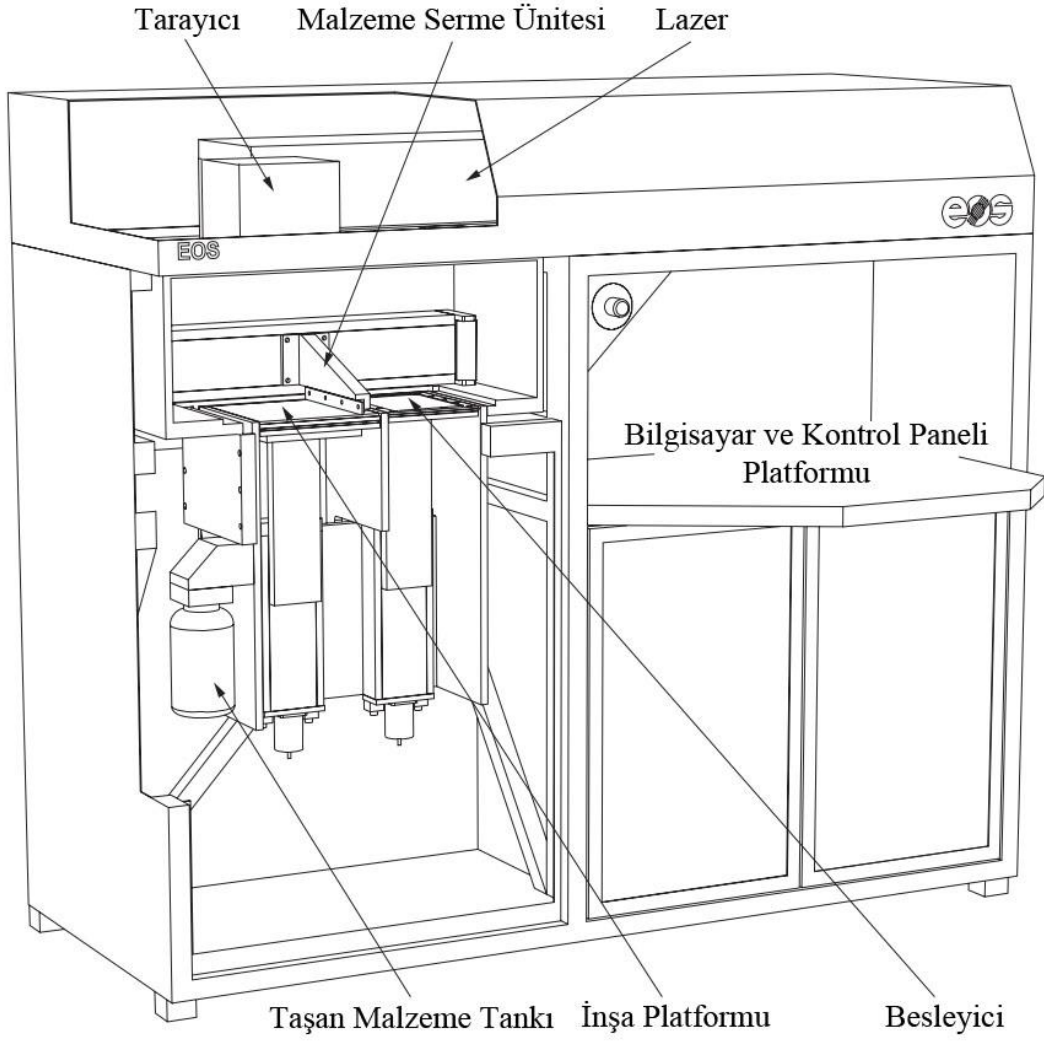
3.2. EOS M290 3B Metal Yazıcı

Bu çalışmada deney numunelerinin imal edilmesi için Şekil 3.1’de gösterilen EOS M290 3B metal yazıcı kullanılmıştır. EOS M290 yazıcı toz yatağı füzyonu proses kategorisinde yer alan Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) katmanlı imalat yöntemi (metal tozlarını eriterek) ile üretim yapmaktadır.



Şekil 3.1. EOS M290 3B metal yazıcı

Şekil 3.2’de tasarım yapısı gösterilen EOS M290 3B metal yazıcı 250 x 250 x 325 mm (yükseklik yazdırma tablasını da içermektedir) ölçülerinde tamamen kapalı yazdırma alanına sahiptir. Toz haznesi inşa platformunun altındadır ve inşa düzlemine açılmaktadır. Toz serme ünitesi malzemeyi haznedan alıp inşa düzlemine serer ve işlem için gerekli olmayan malzemeyi taşıma tankına taşır. Sistem tek yönlü olarak çalışır ve bu nedenle inşa düzlemi üzerinde iki kez süpürme yapar. Toz serme sistemi asimetric bir bıçak olarak tasarlanmıştır. Tarayıcı sisteminin aynaları ısıdan kaynaklanan deformasyonu önlemek ve doğruluğu artırmak için soğutulur. Makine, koruyucu gazlarla etkin çalışmayı sağlayan gaz geçirmez bir proses odasına sahiptir. EOS M290, yüksek ışın kalitesi ve ışın yoğunluğu birleştiren 400 W Yb fiber lazerle donatılmıştır. 0,1 ila 0,5 mm ışın çapına sahip değişken odak sağlamaktadır (Gebhardt ve Hötter, 2016).



Şekil 3.2. EOS M290 3B metal yazıcının tasarım yapısı

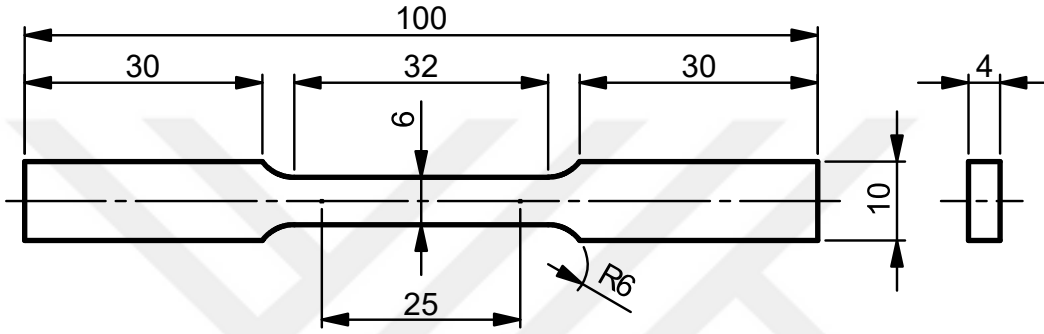
EOS M290 3B metal yazıcıya ait teknik veriler Tablo 3.3'te verilmiştir (URL-3).

Tablo 3.3. EOS M290 3B metal yazıcı teknik verileri

| Özellik | Değer |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Yazdırma hacmi | 250 x 250 x 325 mm |
| Lazer Tipi | Yb (ytterbium) fiber lazer; 400 W |
| Hassas optik tertibat | F-theta merceği; yüksek hızlı tarayıcı |
| Tarama Hızı | Maksimum 7.0 m/s |
| Odak Çapı | 100 µm |
| Güç Kaynağı | 32 A / 400 V |
| Güç Tüketimi | Maks. 8,5 kW / ortalama 2,4 kW /platform ısıtmalı 3,2 kW'a kadar |
| Basıncılı Hava Kaynağı | 7,000 hPa; 20 m ³ /h |

3.3. Deney Numunelerinin İmalatı ve Son İşlemler

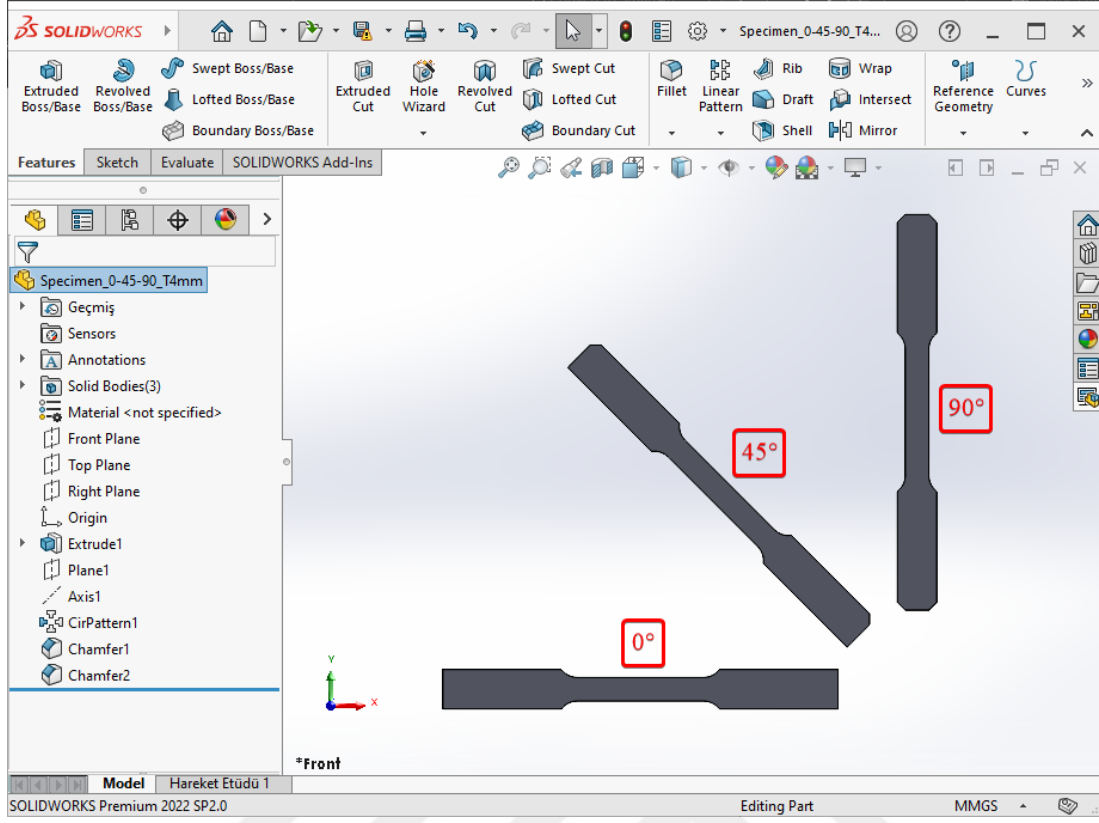
Bu çalışmada kaynaklı ve kaynaklı olmak üzere 2 kategoride deney numuneleri hazırlanmıştır. Kaynaklı numuneler 3B metal yazıcıda direkt yazdırılmıştır. Kaynaklı numuneler ise plakalar şeklinde yazdırılıp kaynakla birleştirildikten sonra tel erezyon ile kesilerek elde edilmiştir. Numuneler “ASTM E8/E8M – 13a - Metalik Malzemelerin Çekme Testi için Standart Test Yöntemleri” normunda belirtilen ölçülere göre boyutlandırılmıştır (Şekil 3.3).



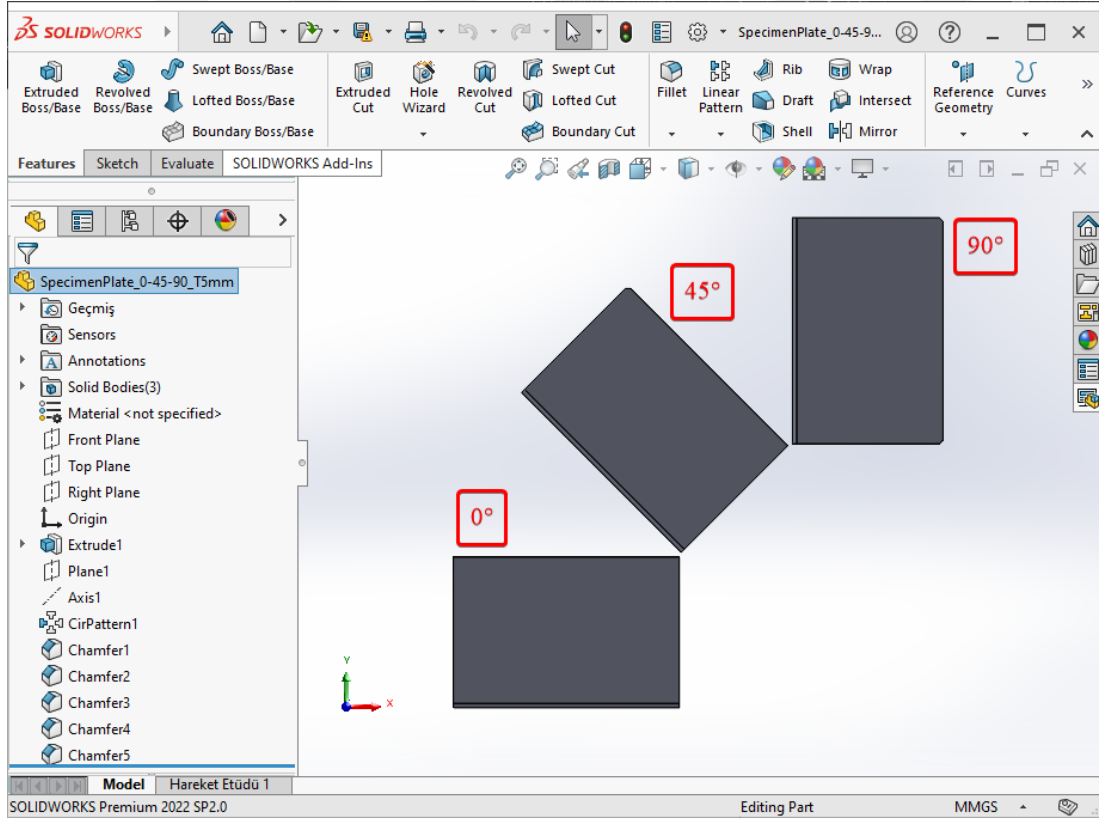
Şekil 3.3. ASTM E8 standardına göre belirlenen numune ölçüleri

Numunelerinin hazırlanması sürecinde “Katmanlı İmalatta İşlem Adımları” başlığı altında anlatılan ve aşağıda detaylarıyla belirtilen adımlar takip edilmiştir.

- 3B CAD model oluşturma: DMLS yöntemiyle 3B metal yazıcıda yazdırılacak olan 3B modeller SOLIDWORKS 3B CAD yazılımında tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda yazdırma yönünün etkileri de inceleneceği için kaynaklı numuneler ASTM E8 standardında belirtilen ölçülerde ve 0°-45°-90° olarak modellenmiştir (Şekil 3.4). Kaynaklı numuneler için yazdırılan plakalar ise 120x80x5 mm ölçülerinde 0°-45°-90° olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 3.5). Plaka kalınlıklarına sonradan yapılacak son işlemler de göz önüne alınarak 1 mm işleme payı eklenmiştir. Plakaların modellenmesinde kaynak ağızları da hesaba katılmıştır. Yazdırma yönünü takip edebilmek için numunelerin köşelerine pahlar kırılmıştır. Pah kırılmayan numuneler 0°, tek pah olan numuneler 45° ve iki pah kırılan numuneler ise 90° yazdırma yönünü ifade etmektedir.



Şekil 3.4. Kaynaksız numunelerin 3B CAD modeli



Şekil 3.5. Kaynaklı numuneler için hazırlanmış plakaların 3B CAD modeli

- CAD modelin STL formatına dönüştürülmesi: SOLIDWORKS 3B CAD yazılımında tasarlanan modeller bir sonraki adımda Materialise Magics yazılımında kullanılmak üzere STL formatında dışarı aktarılmıştır.
- STL dosyasının işlenmesi ve iş dosyasının makineye aktarılması: İyi veri hazırlığı, inşa prosesinin doğru işlemesi için büyük önem arz etmektedir. Düşük kaliteli veri veya veri hataları, bir işin çökmesine veya parça kalitesinin düşük olmasına neden olabilmektedir (EOS, 2017). Bu adımda STL formatında dışarı aktarılan veri Materialise Magics yazılımında içeri alınmış ve veri bütünlüğü kontrol edilmiştir. EOS M290 tezgahındaki imalat konumları ve çoğaltmalarıyla birlikte destek tasarımları gerçekleştirilmiştir. Deneyler 3'er örnekleme ile gerçekleştirileceği için kaynaklı numuneler 0°-45°-90° yazdırma yönlerinde 3'er kopya (toplamda 9 adet) olacak şekilde çoğaltılmıştır. Kaynaklı birleştirme yapılacak plakalar ise 0°-45°-90° yazdırma yönlerinde 2'şer kopya (toplamda 6 plaka – aynı yöndeki 2 plaka kaynatılarak birleştirilecek ve kaynaklı numuneler tel erzyon ile kesilerek çıkartılacaktır) olacak şekilde çoğaltılmıştır. Daha sonra imal edilecek her bir numuneye ait konumlanmış ve çoğaltılmış STL verileri ve destek yapıların SLI (Slice Layer Interface) verileri Materialise Magics yazılımından dışarıya aktarılmıştır. İmal edilecek numunelere ait STL veriler EOS RP-Tools yazılımında katman kalınlığına göre dilimlenmiş SLI (*.sli) verisine dönüştürülmüştür. SLI formatındaki numune verileri ve her bir numuneye ait destek yapı verisi kullanılarak EOS Print 2.6 yazılımı ile Tablo 3.4'te belirtilen parametrelerde imalat yapılması için iş dosyası (*.job) oluşturulmuş ve EOS M290 3B metal yazıcısına gönderilmiştir.

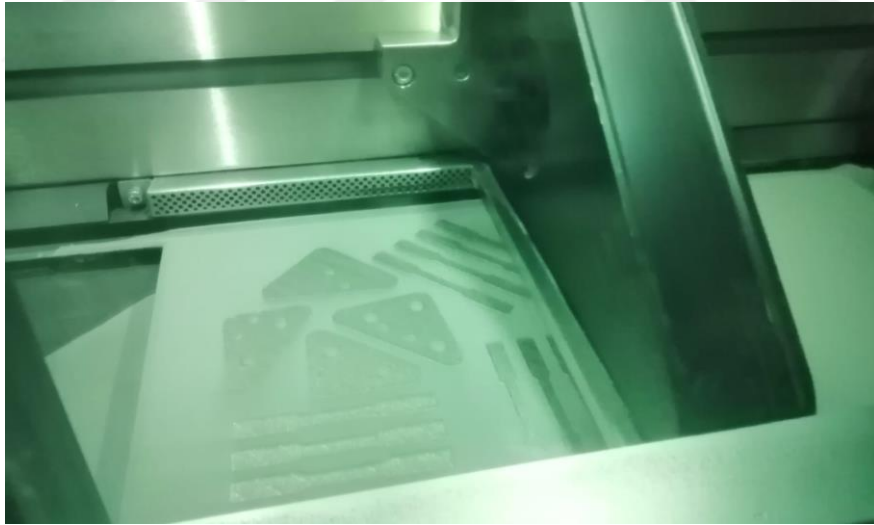
Tablo 3.4. DIN 1.2709 malzemesi için EOS M290 imalat parametreleri

| Parametre | Değer |
|------------------|------------------------|
| Lazer gücü | 100 W |
| Lazer hızı | 400 mm/s |
| Tarama mesafesi | 0.1 mm |
| Enerji yoğunluğu | 6.25 J/mm ² |
| Katman kalınlığı | 40 µ |

- Makinenin hazırlanması: Bu adımda EOS M290 3B metal yazıcı ile numuneleri yazdırma işlemine başlamadan önce bazı ön hazırlıkların yapılması gerekmektedir. İlk adım olarak şalter açılarak makineye enerji verilmiş ve emiş fanı çalıştırılmıştır.

Soğutma ünitesinin su seviyesi ve kimyasal karışım sıcaklığı (15-20 °C arası) kontrol edilmiştir. Parçalar DIN 1.2709 toz malzemesi kullanılarak yazdırılacağı için koruyucu gaz olarak Nitrojen seçilmiştir. İnşa platformu yazdırma tablasını yerleştirmek için yukarı alınmıştır. Tabla yerleştirildikten sonra bağlama cıvataları deliklerine bırakılmış ve inşa platformu ısıtıcısı açılarak yazdırma tablasının sıcaklığı 40 °C' ye getirilmiştir. Yazdırma tablasının cıvataları sıkılmıştır. Toz serme bıçağı (recoating blade) olarak kullanılan toz malzemeye göre üretici firma tarafından tavsiye edilen seramik bıçak kullanılmıştır. Ölçüm saati yardımıyla x ve y eksenlerinden üçer bölgeden sıfırlama yapılarak inşa platformunun düzlemselliği sağlanmıştır. İlk katman (first layer) için toz serme işlemleri yapıldıktan sonra kontrol paneli üzerinden iş menüsünden yapılacak iş seçilmiş ve başlat tuşuna basılmıştır. İmalat için gerekli olan inşa platformu sıcaklığı, oksijen konsantrasyonu ve basınç değerine ulaşıldığında yazdırma işlemi başlatılmıştır.

- Ürünün katmanlar halinde inşa edilmesi: Makine hazırlıkları yapıp numunelerin yazdırılması için hazırlanan iş dosyası seçildikten sonra Şekil 3.6'daki gibi deney numuneleri katmanlar halinde inşa edilmiştir.



Şekil 3.6. Deney numunelerinin EOS M290 3B metal yazıcıda imalatı

- Bitmiş ürünün makineden dışarı çıkartılması ve temizlik: İnşa süreci tamamlandıktan sonra numuneleri çevreleyen inşa malzemesi temizlenmiş ve yazdırılan numuneler yazdırma tablasıyla birlikte yazıcıdan dışarı çıkartılmıştır (Şekil 3.7). Daha sonra numuneler kesici aletler yardımıyla yazdırma tablasından çıkartılmış ve destek yapıları temizlenmiştir.



Şekil 3.7. Kaynaklı numuneler için yazdırılan plakalar

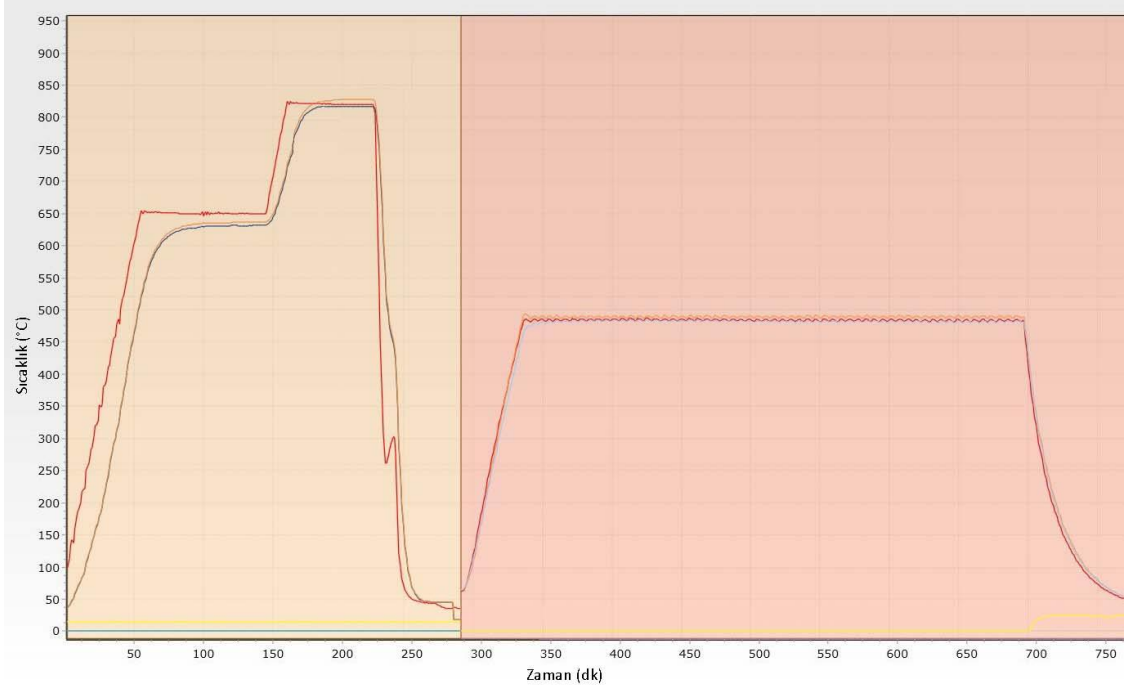
- Son işlemler: Bu adımda kaynaklı ve kaynaklı numuneleri oluşturmak için kullanılacak plakalarda destek yapı kalıntılarını gidermek için öncelikle taşlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Taşlama işleminden sonra numuneler Şekil 3.8’ deki gibi ısıtım sepetine yerleştirilerek (plakalar sepete dik olarak yerleştirilmiştir) ısıtım fırınına koyulmuş ve Tablo 3.5’de belirtilen toz üreticisi firmanın önerdiği ısıtım prosesi uygulanmıştır (URL-2). Uygulanan prosese ait zaman-sıcaklık diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir. Kırmızı eğri malzeme üzerine bağlanan termokupl üzerinden alınan değerleri, mavi ve turuncu eğriler ise fırının içerisine bağlanan termokupllar üzerinden alınan değerleri ifade etmektedir.



Şekil 3.8. Isıtım sepetindeki numuneler

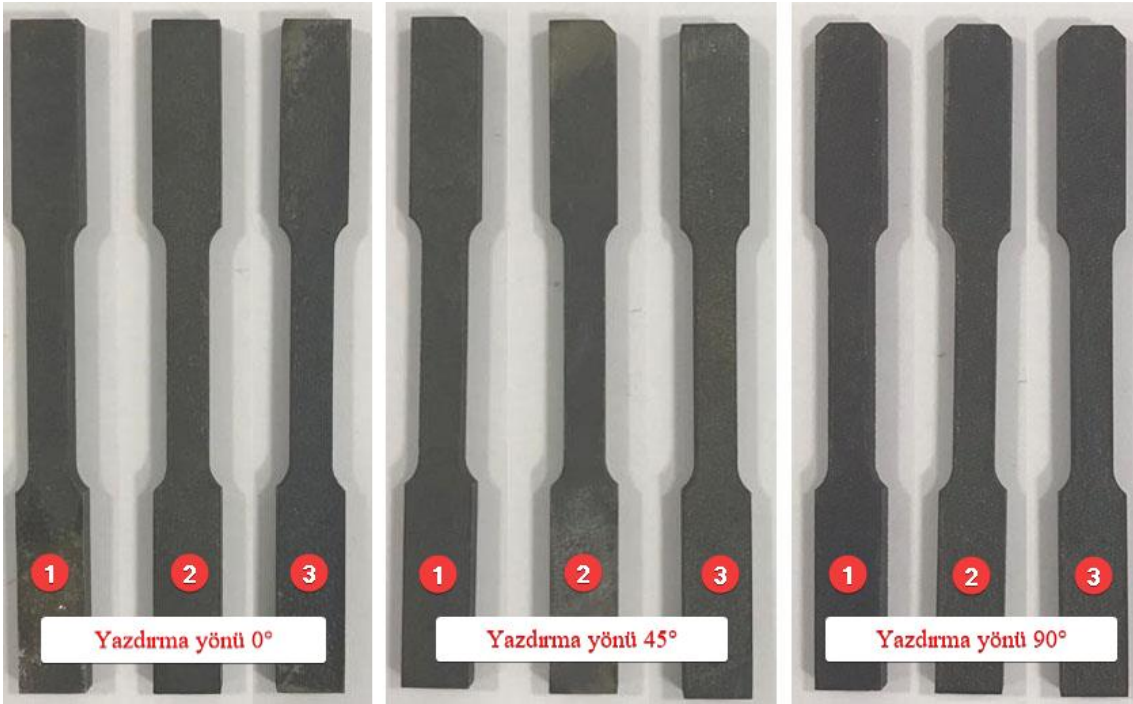
Tablo 3.5. Isıtım prosesi adımları

| Proses No | İşlem | Sıcaklık / Süre |
|-----------|-------------|-----------------|
| 1 | Ön Isıtım | 650 °C / 90 dak |
| 2 | Östenitleme | 820 °C / 60 dak |
| 3 | Temperleme | 490 °C / 6 saat |



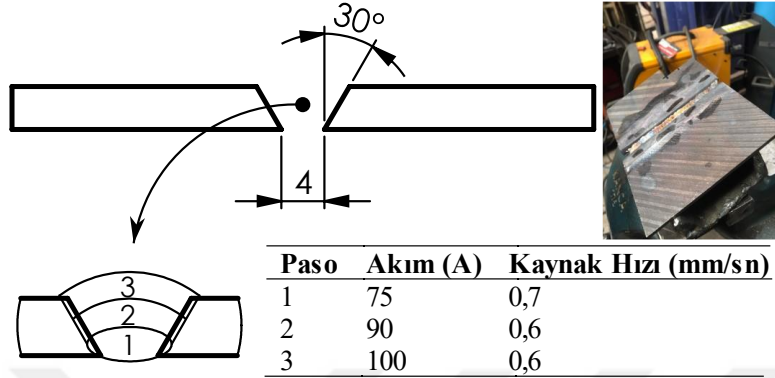
Şekil 3.9. Isıl işlem prosesinin zaman-sıcaklık diyagramı

Yapılan taşlama ve ısıl işlemler sonrası kaynaklız çekme testi numuneleri kullanıma hazır hale gelmiştir (Şekil 3.10). Pah kırılmayan numune 0°, tek pah kırılan numune 45° ve iki pah kırılan numune 90° yazdırma yönünü ifade etmektedir.



Şekil 3.10. Kullanıma hazır hale gelen kaynaklız çekme testi numuneleri

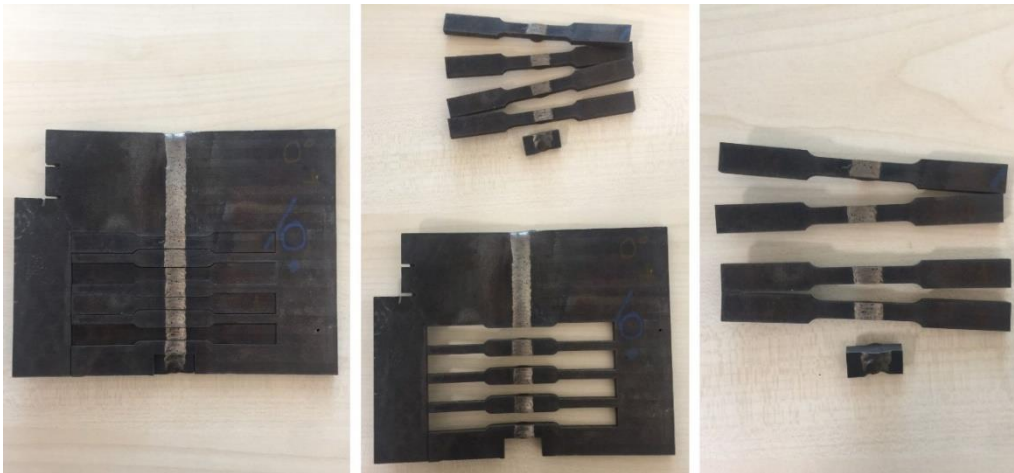
Kaynaklı çekme testi numunelerini elde etmek için 0° - 45° - 90° yönlerinde yazdırılan plakalar yazdırma yönleri dikkate alınarak TIG (tungsten asal gaz) kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. TIG kaynağı parametreleri ve şematik gösterimi

Kaynak esnasında 150°C ön ısıtma yapılmıştır. Pasolar arası sıcaklık $< 150^{\circ}\text{C}$ şeklindedir. Koruyu gaz olarak argon (9 l/dak) kullanılmıştır. İlave metal olarak ERNiCr3 kullanılmıştır.

Plakalar TIG kaynağı ile birleştirildikten sonra ASTM E8 normunda belirtilen ölçülerde tel erezyon ile kesim yapılarak 0° - 45° - 90° yazdırma yönleri için kaynaklı çekme testi numuneleri elde edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kaynaklı çekme testi numuneleri

Kaynaklı birleştirme ve tel erezyon ile kesimden dolayı oluşan artık gerilmeleri gidermek için numuneler üzerinde gerilim giderme işlemi (490° -3 saat) yapılmıştır. Plaka kalınlıklarına son işlemler de göz önüne alınarak 1 mm işleme payı eklenmiştir. Bu

bağlamda numunelerin üzerindeki kaynak çıkıntılarını düzeltmek ve kalınlıklarını 4 mm olarak ayarlamak için frezeleme operasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Kaynaklı çekme testi numuneleri üzerinde frezeleme operasyonu

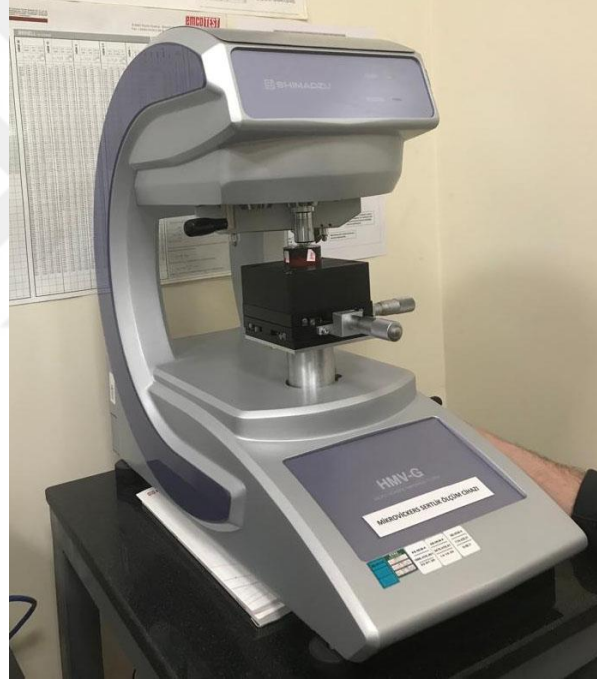
Kaynaklı birleştirme, tel erzyonla kesim, gerilim giderme ve frezeleme işlemlerinden sonra kaynaklı çekme testi numuneleri kullanıma hazır hale gelmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Kullanıma hazır hale gelen kaynaklı çekme testi numuneleri

3.4. Sertlik Ölçümü

Sertlik testi, metallerin özelliklerini değerlendirmek için en yaygın olarak kullanılan malzeme testidir. Bir malzemenin sertliği genellikle plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak kabul edilir. Genel olarak, belirli bir zaman aralığı için belirli bir yük altında test edilecek metalin yüzeyine bir batıcı uç ile yük uygulanır ve oluşan izin boyutu veya derinliği ölçülür. Sertlik testinin temel amacı, bir malzemenin belirli bir uygulama için uygunluğunu belirlemektir (Chandler, 1999). Bu bölümde yazdırma yönünün malzemenin sertlik değerine olan etkisini ve kaynaklı bölgenin haz bölgesinde ve kaynak bölgesindeki sertlikleri incelemek için SHIMADZU marka HMV-G model mikro vickers sertlik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15).



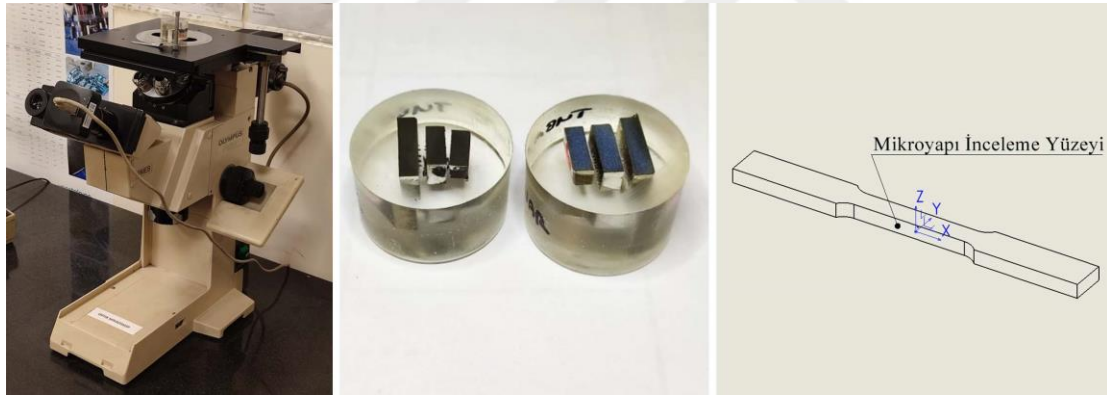
Şekil 3.15. SHIMADZU HMV-G mikro vickers sertlik test cihazı

Kaynaksız parçalardan alınan toplamda 9 adet numune (0° - 45° - 90° yazdırma yönleri için) üzerinde ısıtma işlem öncesi ve ısıtma işlem sonrası durumu görmek amacıyla sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümünde her bir numunenin üzerinde 5 farklı bölgeden ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

TIG kaynağı ile birleştirilen plakalardan kaynak birleşme bölgesinden tel erzyonla kesilerek alınan toplamda 3 adet numune (0° - 45° - 90° yazdırma yönleri için) üzerinde sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir.

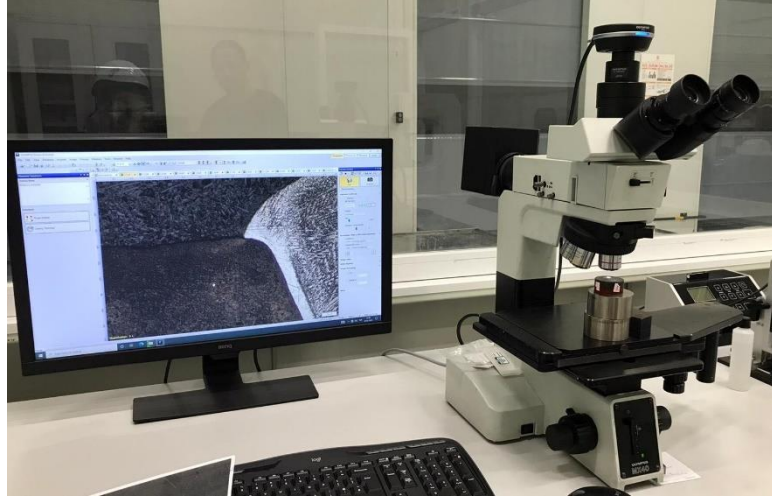
3.5. Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı, hazırlanmış bir malzeme yüzeyinin optik mikroskopla 25 kat üzerinde büyütülmesiyle görülen yapıdır (Voort, 2004). Bir malzemenin mikro yapısı mukavemet, tokluk, süneklik, sertlik, korozyon direnci, yüksek/düşük sıcaklık davranışı veya aşınma direnci gibi fiziksel özellikleri güçlü bir şekilde etkileyebilir. Bu özellikler malzemelerin endüstriyel uygulamada uygulanmasını yönetir. Bu bölümde yazdırma yönünün malzemenin mikroyapısına etkisini incelemek için 0° - 45° - 90° yönlerinde yazdırılan kaynaklı parçalardan ısıtılma işlemi öncesi ve ısıtılma işlemi sonrası mikro yapıyı incelemek için numuneler alınmıştır. Alınan numuneler Z-X düzleminde mikroyapı incelemesi yapılacak şekilde bakalite alındıktan sonra zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Daha sonra %3 nital dağlayıcı ile dağlama yapılmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra Olympus marka PME3 model optik mikroskop ile 500x ($8 \mu\text{m}$) büyütmede mikroyapı incelemesi yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Olympus PME3 optik mikroskop ve bakalite alınmış numuneler

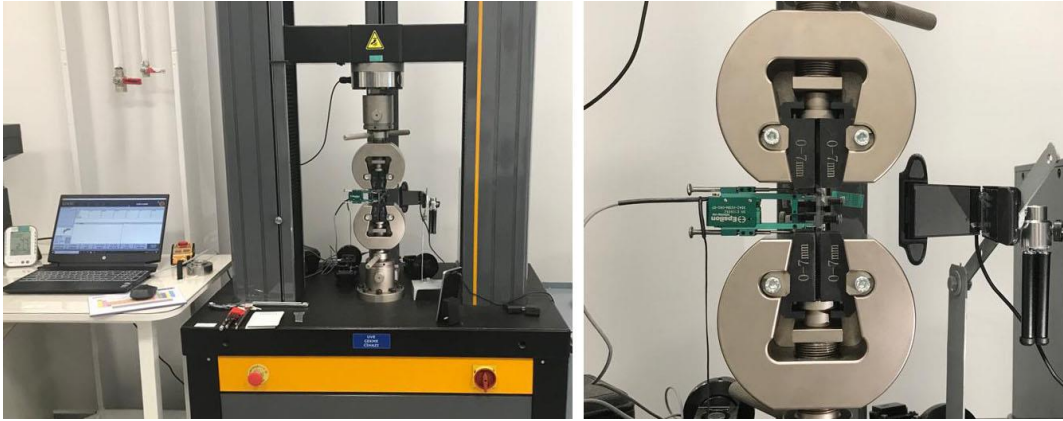
Yazdırma yönü 0° olan TIG kaynağı ile birleştirilen plakaların gerilim giderme yapılmış hali ile kaynak birleşme bölgesinden tel erezyonla kesilerek alınan numuneler bakalite alındıktan sonra zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Kaynak bölgesinden görüntü analizi alabilmek için elektrolitik dağlama (2 amper 12 V elektrolitik dağlama. %15 lik okzalik asit çözeltisi içinde) yapılmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra Olympus marka MX40 model optik mikroskop ile 200x ($20 \mu\text{m}$) büyütmede kaynak bölgesinin mikroyapı incelemesi yapılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Olympus MX40 optik mikroskop ve bakalite alınmış numune

3.6. Çekme Testi

Çekme testi, bir numunenin kopana dek tek eksenle çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı temel bir malzeme testidir. Çekme testi sonuçları genellikle herhangi bir uygulama için malzeme seçiminde, yeni malzemelerin geliştirilmesinde, farklı malzemelerin karşılaştırılmasında ve malzemenin yük altındaki davranışının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılır (Davis, 2004). Bu bölümde yazdırma yönünün ve kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemek için ASTM E8 standardında belirtilen ölçülere göre boyutlandırılan (Şekil 3.3) ve DMLS yöntemiyle imal edilen ve son işlemlerde belirtilen prosesler uygulanarak hazır hale getirilen deney numunelerinin (Şekil 3.10 ve Şekil 3.14) çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde UVE marka MNR 100 model maksimum test yükü 100 kN olan çekme test cihazı ve Epsilon marka 3542 model ekstansometre (uzama ölçer) kullanılmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. UVE MNR 100 çekme test cihazı ve Epsilon 3542 ekstansometre

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları

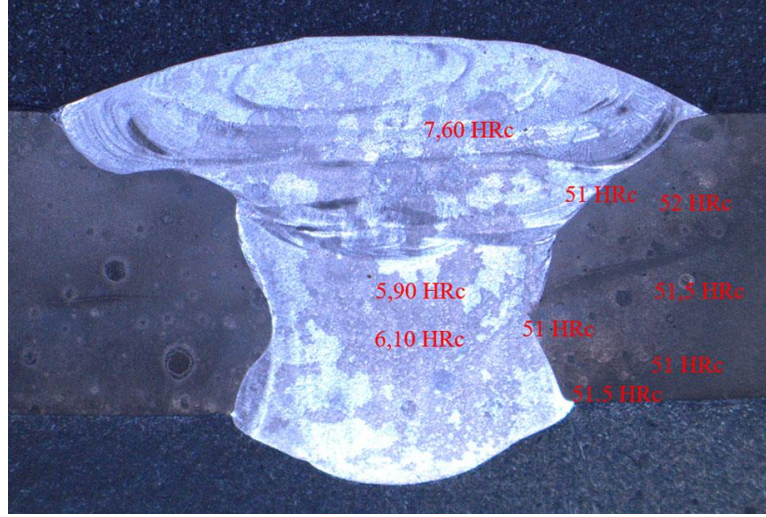
0°-45°-90° yazdırma yönlerine sahip kaynaklız deney numunelerinin ısıt işleml öncesi ve ısıt işleml sonrası ortalama sertlik ölçüm değeri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kaynaklız numuneler için ölçülen ortalama sertlik değeri

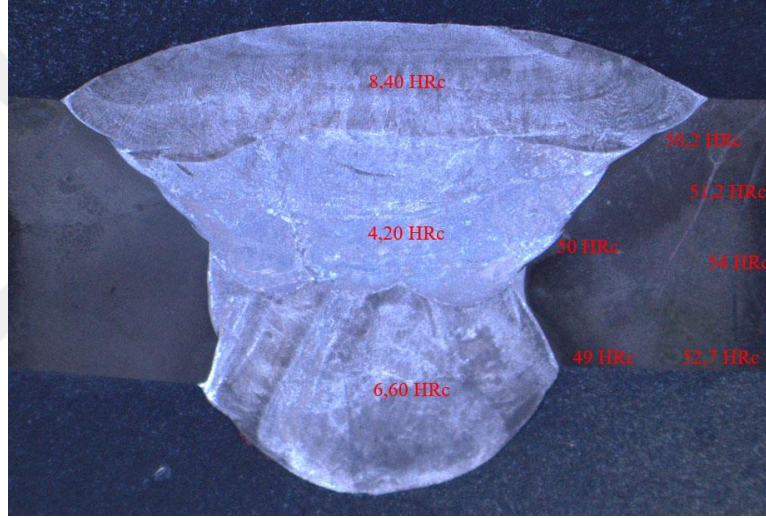
| Numune No – Yazdırma Yönü | Isıl İşleml Öncesi | Isıl İşleml Sonrası |
|---------------------------|--------------------|---------------------|
| Kaynaklız Numune 1 - 0° | 39 HRc | 54 HRc |
| Kaynaklız Numune 2 - 0° | 38 HRc | 55 HRc |
| Kaynaklız Numune 3 - 0° | 38 HRc | 55 HRc |
| Kaynaklız Numune 1 - 45° | 37 HRc | 55 HRc |
| Kaynaklız Numune 2 - 45° | 38 HRc | 53 HRc |
| Kaynaklız Numune 3 - 45° | 39 HRc | 54 HRc |
| Kaynaklız Numune 1 - 90° | 38 HRc | 53 HRc |
| Kaynaklız Numune 2 - 90° | 38 HRc | 53 HRc |
| Kaynaklız Numune 3 - 90° | 37 HRc | 54 HRc |

Isıl işleml sonrası elde edilen sertlik ölçüm değeri 53-55 HRc aralığında değıştiğı gözlemlenmiştir. Bu değeri üretici firmanın DIN 1.2709 toz malzemesi için verdiği 53 ± 2 HRc sertlik değeri (Tablo 3.2) ile örtüştüğü görülmüştür. Bu kapsamda deney numunelerinin yazdırılması esnasında kullanılan parametrelerin ve yapılan ısıt işleml çalışmaları doğruluğı teyit edilmiştir. DMLS yöntemiyle 0°-45°-90° yönlerinde yazdırılan kaynaklız deney numuneleri için elde edilen sertlik ölçüm değeri incelendiğinde yazdırma yönünün malzemenin sertlik değeri etkisi olmadığı görülmüştür.

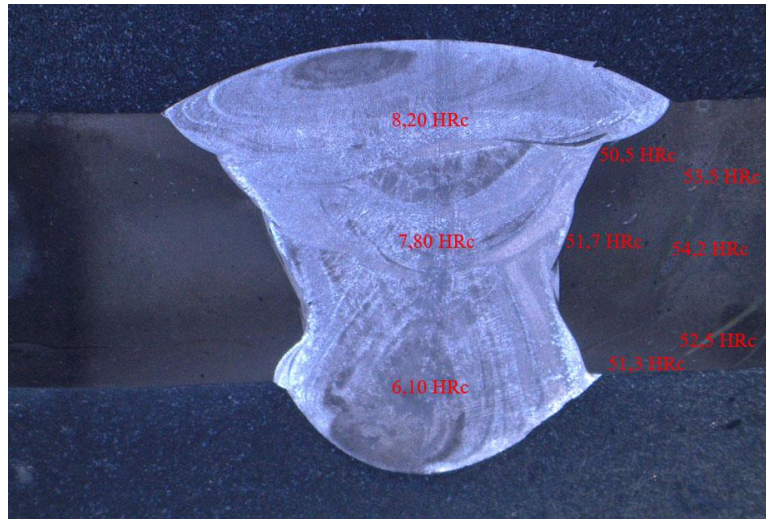
TIG kaynağı ile birleştirilen plakaların birleştirme bölgesinden alınan deney numunelerinin bölgesel sertlik dağılımı 0° yazdırma yönü için Şekil 4.1’de, 45° yazdırma yönü için Şekil 4.2’de ve 90° yazdırma yönü için Şekil 4.3’te verilmiştir. Kaynak bölgelerinden alınan sertlik değeri 4,20 – 8,40 HRc aralığında haz bölgelerinden alınan değeri ise 49-54 HRc aralığında değıştiğı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki sertlik değeri malzeme sertlik değeri göre düşük olduğu görülmüştür. Haz bölgesinde ise kaynak birleştirme esnasında ortaya çıkan ısı kaynaklı etkilerden dolayı maksimum 4 HRc civarında düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1. 0° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı



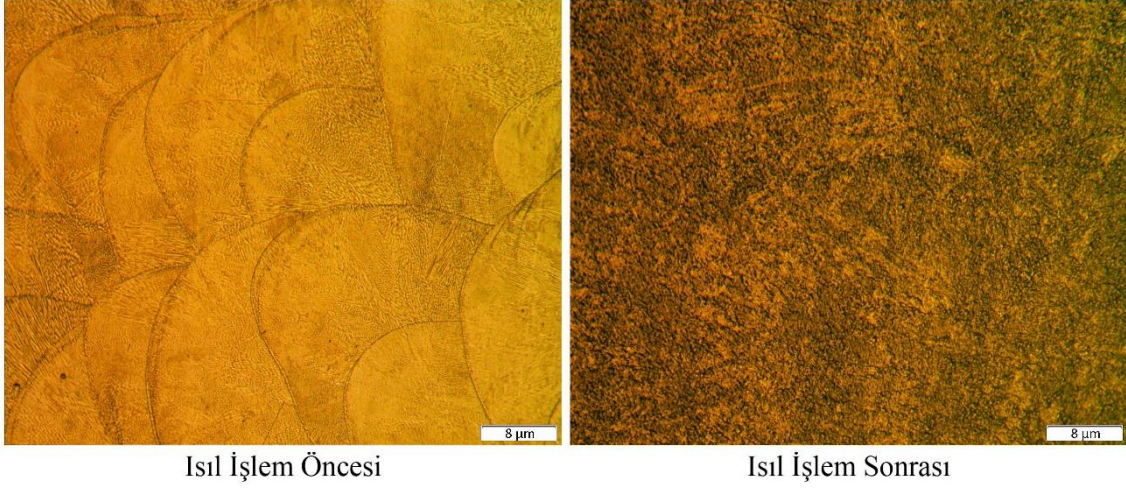
Şekil 4.2. 45° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı



Şekil 4.3. 90° yazdırma yönü için kaynak ve haz bölgesinin sertlik dağılımı

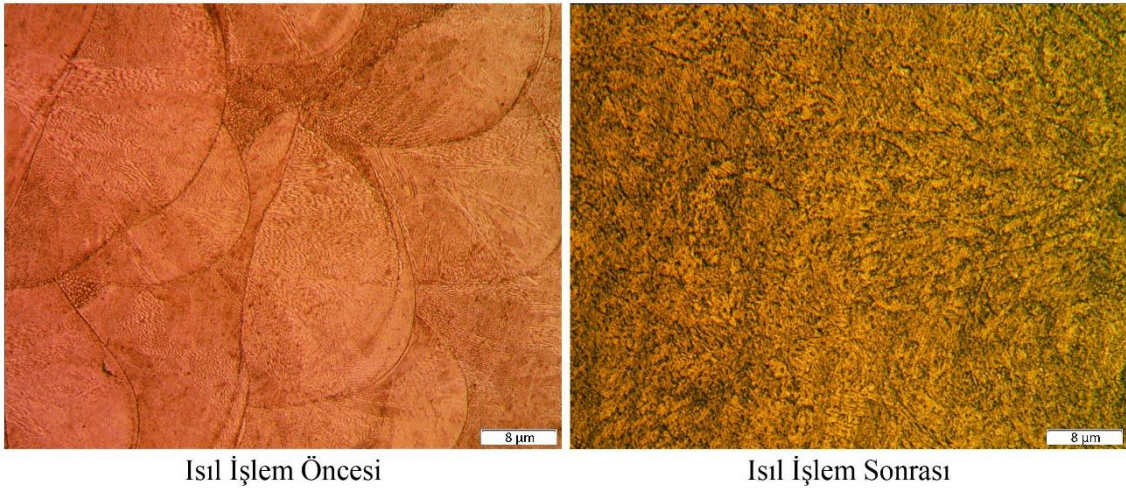
4.2. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları

0° yazdırma yönüne sahip kaynaksız deney numunesinin ısıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası mikroyapı görüntüsü 500x (8 µm) büyütme ile Şekil 4.4’de verilmiştir.



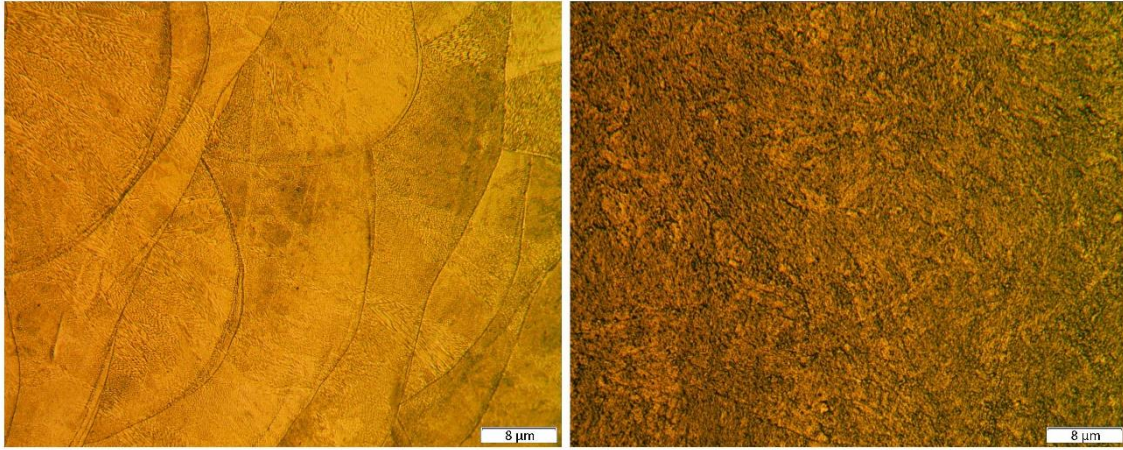
Şekil 4.4. Mikroyapı incelemesi 0° - 500x büyütme

45° yazdırma yönüne sahip kaynaksız deney numunesinin ısıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası mikroyapı görüntüsü 500x (8 µm) büyütme ile Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Mikroyapı incelemesi 45° - 500x büyütme

90° yazdırma yönüne sahip kaynaksız deney numunesinin ısıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası mikroyapı görüntüsü 500x (8 µm) büyütme ile Şekil 4.6’da verilmiştir.



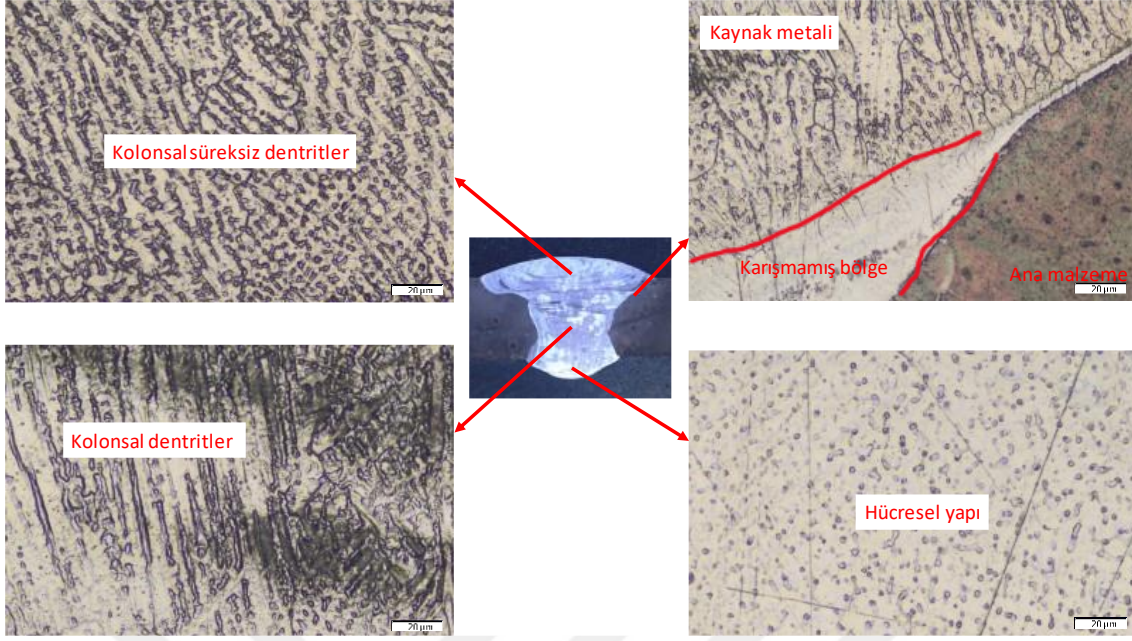
Isıl İşlem Öncesi

Isıl İşlem Sonrası

Şekil 4.6. Mikroyapı incelemesi 90° - 500x büyütme

Kaynaksız deney numunelerinin incelenmesi neticesinde elde edilen mikroyapı görüntülerinden yola çıkılarak, ısıl işlem sonrası yazdırma yönünün katılaşmaya etkisinin olmadığı görülmüştür.

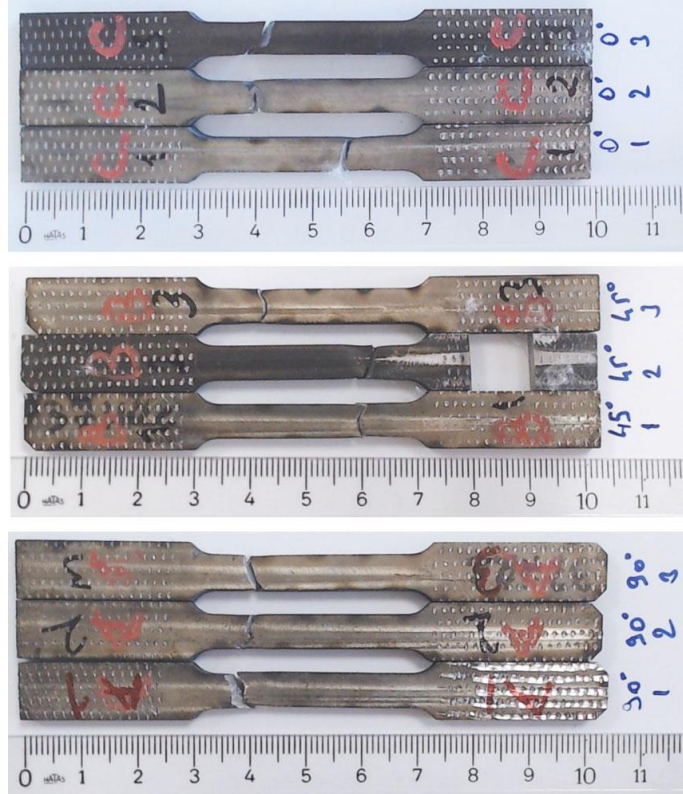
Yazdırma yönü 0° olan numunenin TIG kaynak işlemi sırasında elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 4.7’de 200x (20 µm) büyütme ile verilmiştir. Hem karışmamış bölge hem de kaynak metali içerisinde sıvılaşma veya katılaşma çatlakları tespit edilmemiştir. ERNiCr-3 ilave metal bölgesinde elde edilen mikroyapılar genel olarak birleştirme prosesinin uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu tip çeliklerin nikel alaşımli ilave metaller ile birleştirilmesinde en önemli koşullardan birisi ergime sınırında oluşan karışmamış bölgedeki mikroyapının kontrol altında tutulmasıdır. Ana malzeme ve ilave metal açısından benzer olmayan bu birleştirmede karışmamış bölgenin mikroyapısı genel olarak diğer bölgelerden benzemeyen özelliklere sahiptir. Çünkü DIN 1.2709 çeliği tarafından meydana gelen seyrelme sonucu Co ve Mo ostenitik olan kaynak metaline kolayca difüze olabilmekte ve herhangi bir kontrast vermeyen geçiş bölgesindeki mikroyapının çoğunlukla sertliği yüksek ve kırılgan bir yapının oluşmasına neden olabilmektedir. Kaynak metali mikroyapısı ise tam ostenitik olarak katılaşmıştır. Pasoların birbiri üzerinde yaptığı ısıl işlem sonucu farklı katılaşma cephelerine sahip kolonsal dentritler kök bölgesinde hücresel yapıya dönüşüm göstermiştir.



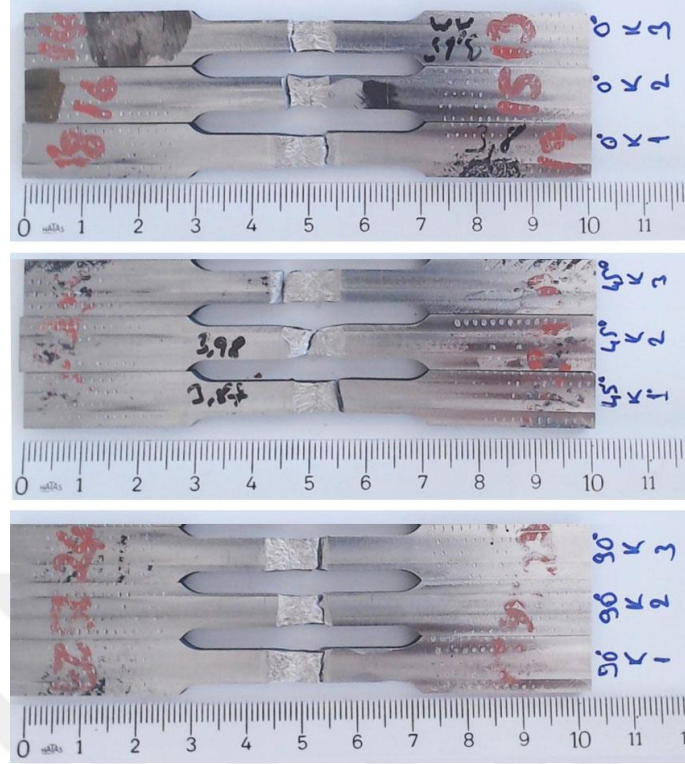
Şekil 4.7. Mikroyapı incelemesi 0° - TIG kaynak bölgesi 200x büyütme

4.3. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonucunda kopan kaynaksız deney numunelerinin görüntüleri Şekil 4.8’de, kaynaklı deney numunelerinin görüntüleri ise Şekil 4.9’da verilmiştir.

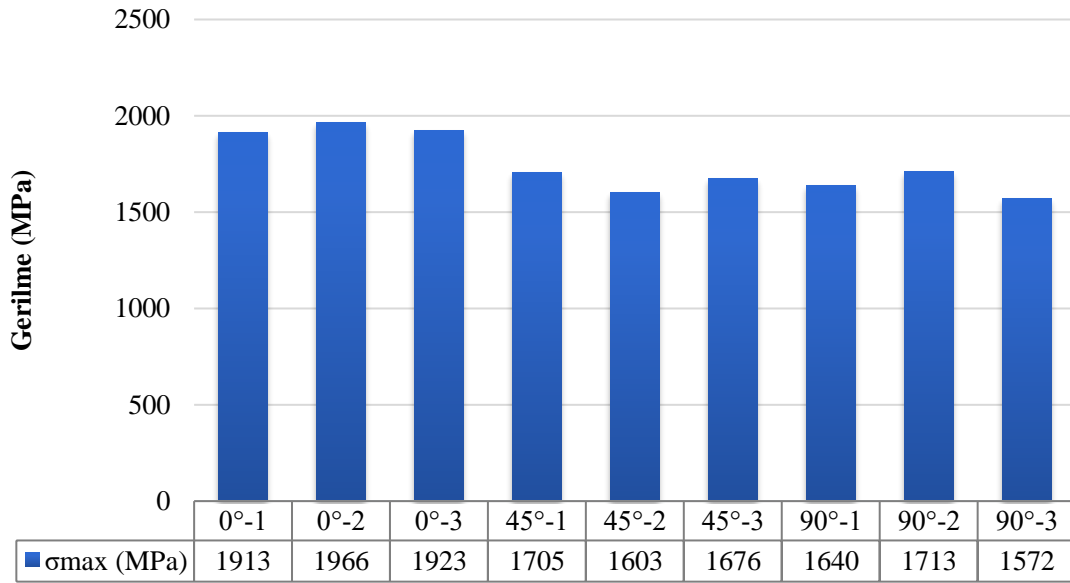


Şekil 4.8. Çekme testinde kopan kaynaksız deney numuneleri

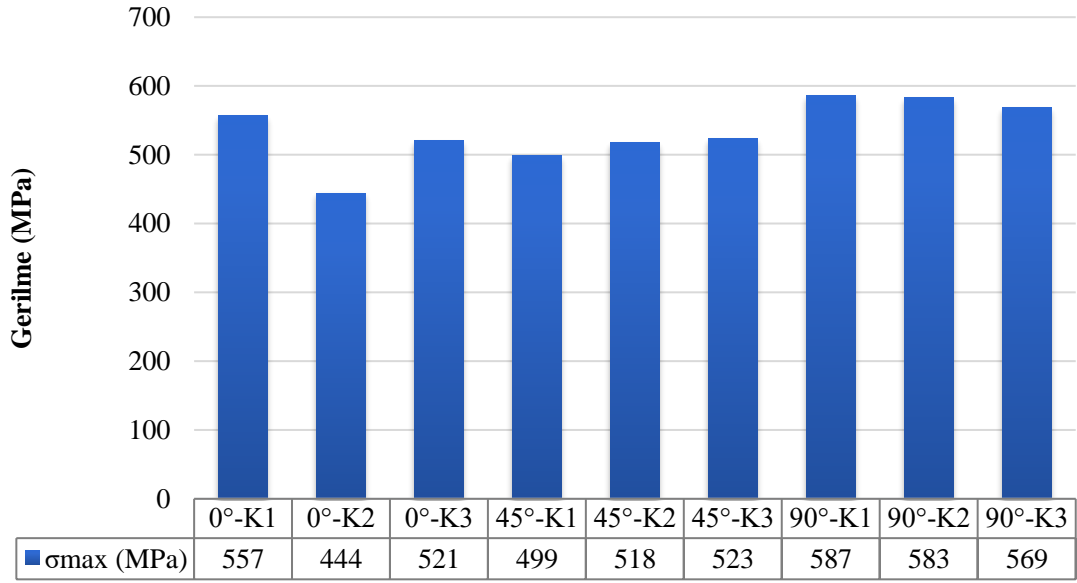


Şekil 4.9. Çekme testinde kopan kaynaklı deney numuneleri

Gerçekleştirilen çekme testleri sonucu elde edilen veriler ile numunelere (kaynaklı ve kaynaklı) ait Gerilme-Gerinme diyagramları oluşturulup her bir numune için maksimum gerilme değeri belirlenmiş ve grafik destekli olarak Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Kaynaklı her bir numune için çekme testi sonuçları



Şekil 4.11. Kaynaklı her bir numune için çekme testi sonuçları

Şekil 4.10' da görüldüğü üzere ısıtıl işlem yapılan kaynaklı numunelerde maksimum gerilme 0° yazdırma yönüne sahip numunelerde elde edilmiştir. 45°-90° yazdırma yönüne sahip numunelerde maksimum gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Yazdırma yönü 0° olan numunelerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri konvansiyonel yöntemlerle üretilen DIN 1.2709 maraging çeliğinin çekme mukavemeti değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Yazdırma yönü 45°-90° olan numunelerde ise maksimumda %15 daha az çekme mukavemeti elde edilmiştir.

Yazdırma yönü 0° olarak imal edilen parçaların mekanik özellikleri blok malzemeden imalatı yapılan parçaların mekanik özelliklerine yakın değerler göstermektedir. Yazdırma yönünden bağımsız imalat yapılması gerekirse çekme mukavemeti değerlerinde %15 emniyet payı hesaba katılmalıdır.

Kaynaklı birleştirme yapılan tüm numunelerde maksimum gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Kaynaklı numunelere göre maksimum gerilme değerlerinin %75 daha düşük olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katmanlı imalat yöntemi ile imal edilmiş metal levhalarda yazdırma yönü ve kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği bu çalışmada elde edilen deneysel bulgular incelendiğinde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Öncelikle hammadde bazında bakıldığında blok malzemede birim maliyet 32 Euro/kg olup katmanlı üretim için kullanılan toz malzemenin birim maliyeti ise 68 Euro/kg'dır. Fiyat konusu ürüne göre değişkenlik göstermektedir. Ancak nihai ürünlerde ürünün geometrisine bağlı olan üretim zorluğu göz önüne alındığında nihai ürün aşamasında katmanlı imalatın üstünlüğü ön plana çıkmaktadır.

Isıl işlemler ve ısıl işlemsiz olarak numunelerin sertlikleri incelendiğinde yazdırma yönlerine bağlı değişimler görülmemiştir, konvansiyonel yollarla üretilen malzemenin standartlarda tanımlı sertlik değerleri ile paralellik göstermiştir.

Yüksek sertlik değerlerine sahip DIN 1.2709 malzemenin birleştirilmesinde çatlak riskinin çok yüksek olması nedeniyle sünek nikel alaşımı ERNiCr-3 dolgu malzemesinin kullanılması ergime sınırı bölgelerinde çatlak oluşumunu engellemiştir. Kaynak bölgesinde bu nedenle meydana gelen sertlik düşüşü mukavemet kaybına neden olduğu düşünülse de birleştirme ihtiyacı duyulan bölgelerde TIG kaynak yöntemi kullanılarak kusursuz birleştirmeler yapılabilir.

Isıl işlemler ve ısıl işlemsiz olarak numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, ısıl işlem öncesi yazdırma yönlerine bağlı mikroyapılarda tane oluşumu görülürken ısıl işlem sonrası yapıda yönlerden bağımsız homojen karbür dağılımı gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası yazdırma yönlerinden bağımsız homojen bir yapı görülmektedir. Kaynaklı numunelerin birleştirme noktalarında ve kaynak bölgelerindeki mikroyapı incelendiğinde birleştirme açısından malzemenin kaynağa uygun olduğu gözlenmiştir.

Çekme testi yapılan ısıl işlemlerli kaynaklı 0° yazılan numunelerde elde edilen sonuçlar 45° ve 90° yazılan numunelere göre daha iyi çıkmıştır. Elde edilen çekme mukavemeti değerleri 0° için konvansiyonel yollarla üretilen üretim değerlerini karşılamaktadır, 45° ve 90° de %85'ini karşılamaktadır. Yazdırma yönünden bağımsız konvansiyonel yöntemlerle üretilen malzemeye göre %15 emniyet payı ile üretim yapılabilir. Isıl işlem

sonrası kaynaklı numunelerde çekme mukavemeti sonuçları, kaynaklı numunelerdeki sonuçlara göre yaklaşık dört kat düşük olduğu görülmüştür. Mekanik hasarlar kaynak bölgesinde oluşmuştur. Mukavemet değerleri açısından değerlendirildiğinde kaynak malzemesinin düşük akma mukavemetinden dolayı seçilmesi uygun değildir ancak endüstrideki çok geniş kullanım nedeni ile bu malzeme çiftinin incelenmesi literatüre katkı sunacaktır.

Bu tarz malzemelerde TIG kaynağı yöntemine alternatif kaynak yöntemi araştırılabilir. DIN 1.2709 malzemesinin yaşlandırma ile sertleşebilen bir malzeme olmasından dolayı farklı büyük parçaların birleştirilmesinde önem arz etmektedir. Dolayısıyla parçaların birleştirilmesinde DIN 1.2709 malzemesinin kullanıldığı yöntemler üzerinde çalışılabilir.



KAYNAKLAR

- ASTM International. (2013). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* (E8/E8M-13a). West Conshohocken, PA
- ASTM International. (2013). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* (F2792-12a). West Conshohocken, PA.
- Burns, M. (1993). *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*. New Jersey: PTR Prentice Hall.
- Chandler, H. (1999). *Hardness Testing* (2nd Edition). Ohio: ASM International
- Davis, J.R. (2004). *Tensile Testing* (Second Edition). Ohio: ASM International
- EOS 2017. Training documentation: EOS M Systems - Laser-sintering system for metal powder. EOS GmbH - Electro Optical Systems. Data preparation EOS M Systems. Article number: 9248-4811. Edition: 04.17.
- Gebhardt , A., Hötter, J.S. (2016). *Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich: Hanser Publications.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (Second Edition). New York: Springer.
- Huang, S.H., Liu, P., Mokedar, A., Hou, L. (2013). Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>.
- ISO/ASTM International. (2021). *Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary* (ISO/ASTM 52900). West Conshohocken, PA.
- Karakoç, F. (2016). Katmanlı İmalat İle Hafif Parça İmal Edebilmek İçin Hüresel Kafes Yapıların Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 456945.
- Kopp, C.A., Riou, A. (2019). *Introduction to Additive Manufacturing Technology* (3rd Edition). Chantilly: European Powder Metallurgy Association (EPMA).
- Kunt, G. (2019). Tarım Makineleri Tasarımı ve İmalatında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanılabilirliği ve Adaptasyonu Üzerine Bir Araştırma: Plastik Malzeme Esaslı Bazı Bağlantı Elemanlarında Hızlı Protatipleme Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 567609.
- Şahin, K., Turan, B.O. (2018). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 97-116.

URL-1: <https://www.moulds.asia/application7-dmls-direct-metal-laser-sintering>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2022).

URL-2: <https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/w722-ampo/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022).

URL-3: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>, (Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022).

Voort, G.F.V. (2004). *ASM Handbook: Metallography And Microstructures* (Vol. 9). Ohio: ASM International



KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Çınar, T., Cengiz, A. (2022). Katmanlı İmalat Yöntemi İle İmal Edilmiş Metal Levhalarda Yazdırma Yönünün Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi, *16. Uluslararası Matematik-Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi*, Mardin, Türkiye, 22-23 Şubat 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun oldu. 2007 – 2013 yılları arasında, Kalkancı Pres Döküm A.Ş.' de İmalat Şefi, Proje Mühendisi, Arge Şefi olarak çalışıp 2 adet TEYDEB 1 adet sanayi Ar-Ge projesi tamamladı.2013 yılından beri voestalpine / BÖHLER A.Ş.' de İş geliştirme Müdürü olarak çalışmaktadır.

