MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE FARKLI CİDAR KALINLIKLARINDA ÜRETİLEN INCONEL 718 ALAŞIM MALZEMESİNE UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YUSUF KARABULUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE FARKLI CİDAR KALINLIKLARINDA ÜRETİLEN INCONEL 718 ALAŞIM MALZEMESİNE UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YUSUF KARABULUT

(523217009)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020

ÖNSÖZ

Yaklaşık üç yıldır birlikte çalışma imkânı bulduğum, İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında TÜBİTAK ve BAPKO projelerinde bana çalışma imkânı veren ve en önemlisi bu süre içerisinde engin tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Doç. Dr. Yusuf Kaynak'a çok teşekkür ederim.

Lisansüstü tez çalışmam süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında birlikte çalıştığım, her konuda yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Emre Taşçıoğlu, Tolga Berkay Şirin ve Emrah Güneşsu'ya çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim süresince desteklerini her zaman hissettiğim aileme, en önemlisi üç yıldır bu yolda benimle birlikte yürüyen, beni bu yolda her daim motive eden hayat arkadaşım, sevgili eşim Emine Elif Hürata Karabulut'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından FEN-C-YLP-130219-0038 Proje Numarası ile desteklenmiştir. Desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Haziran, 2020 **Yusuf KARABULUT**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT v
SEMBOLLER vi
KISALTMALAR vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ x
1. GİRİŞ 1
2. EKLEMELİ İMALAT 5
2.1 Eklemeli İmalat Çeşitleri 6
2.2 Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları 9
2.3 Eklemeli İmalatta İkincil İşlemler 11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER 14
3.1 Inconel 718 Alaşım Malzemesi 14
3.2 SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi 15
3.3 İkincil İşlemler 17
3.3.1 CNC freze tezgâhı ve frezeleme operasyonu 17
3.3.2 Sürüklemeli yüzey işlem operasyonu 18
3.4 Mekanik Testler 19
3.4.1 Çekme testi 19
3.4.2 Çentik darbe testi 20
3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 21
3.6 Metalografik Numune Hazırlama 21
3.7 Sertlik Ölçümü 23
3.8 Optik Mikroskop Analizleri 23
3.9 X Işını Kırınımı (XRD) Analizi 25
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 26
4.1 Yüzey Topoğrafisi 26
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü 32
4.3 Mikroyapı Analizi 35

4.4 XRD Faz Analizi 38
4.5 Mikrosertlik Analizi 41
4.6 Çekme Testi Analizi 43
4.7 Çentik Darbe Testi Analizi 47
5. SONUÇLAR 50
KAYNAKLAR 53

ÖZET

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE FARKLI CİDAR KALINLIKLARINDA ÜRETİLEN INCONEL 718 ALAŞIM MALZEMESİNE UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Eklemeli imalat yöntemi, günümüzde başta havacılık, otomotiv ve biyomedikal olmak üzere farklı endüstrilerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi, diğer imalat yöntemlerine göre daha az malzeme israfının olması ve kompleks parçaların üretiminin daha kolay olması gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu yöntemle üretilen malzemelerin başında yüksek korozyon direncine sahip, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilen, yüksek gerilme, kopma ve kırılma direncine sahip Inconel 718 alaşımı gelmektedir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemelerin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlardan bazıları kötü yüzey kalitesi, ani ısınma ve soğuma sebebiyle oluşan çarpılmalar ve malzeme yapısında oluşan iç gerilmelerdir. Bu dezavantajlar malzemelerin düşük mekanik özelliklere sahip olmasına sebep olmaktadır. Üretilen parçalarda görülen bu kusurlar parçaların uygun koşullarda verimli bir şekilde kullanılabilmesi için giderilmelidir.

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemiyle farklı cidar kalınlıklarında çekme testi ve çentik darbe testi numuneleri formunda üretilen Inconel 718 alaşım malzemesine ikincil işlemlerin etkisi incelenmiştir. İkincil işlem olarak frezeleme ve sürüklemeli yüzey işlem operasyonları uygulanmış ve bu işlemlerden sonra numuneler çekme testi ve çentik darbe testine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin, parçaların yüzey ve mekanik özelliklerine etkisi, cidar kalınlığına bağlı olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkincil işlemler sonrasında parçaların yüzey kalitesinin arttığı ve mekanik özelliklerinde gelişmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Inconel 718, İkincil işlemler, Mekanik özellikler

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF POST-PROCESSING OPERATIONS ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INCONEL 718 WITH VARIOUS WALL THICKNESS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing method is widely used in different industries, especially in aviation, automotive and biomedical. Additive manufacturing method is preferred due to its advantages such as less material wastage and easier production of complex parts compared to other manufacturing methods. The most commonly produced material with this method is the Inconel 718 alloy, which has high tensile strength, breaking, corrosion and fracture resistance and which can maintain mechanical properties at high temperatures.

In addition to the advantages of the materials produced by the additive manufacturing method, there are some disadvantages. Some of these disadvantages are poor surface quality, distortions caused by high heating and cooling rate and residual stresses in the material structure. These disadvantages cause the materials to have low mechanical properties. These defects in the produced parts must be removed in order to use the parts efficiently under suitable conditions.

In this study, the effects of post-processing operations on additively manufactured Inconel 718 alloy produced in the form of tensile test and charpy impact test samples in different wall thicknesses were investigated. As a post-processing operation, milling and drag fnishing operations were applied and samples were subjected to tensile test and charpy impact test after post-processing operations. The effects of these operations on the surface and mechanical properties of the parts were examined in detail depending on the wall thickness. After post-processing operations, it was observed that the surface quality of the parts increased and there were improvements in their mechanical properties.

Keywords: Additive manufacturing, Inconel 718, Post-processes, Mechanical properties

SEMBOLLER

E : Enerji yoğunluğu (J/mm^3)

P : Lazer gücü (W)

V : Lazer tarama hızı (mm/s)

t : Katman kalınlığı (µm)

h : Yana kayma mesafesi (mm)

R_a : Yüzey pürüzlülüğü (µm)

HV : Vickers sertlik değeri

s : Saniye

µm : Mikrometre

J : Joule

N : Newton

kN : Kilonewton

mm : Milimetre

MPa : Megapaskal

KISALTMALAR

Eİ : Eklemeli İmalat

CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım

TYP : Toz Yatağı Prosesi

SLE : Seçici Lazer Ergitme

SLS : Seçici Lazer Sinterleme

EBM : Elektron Işınlı Ergitme

LMD : Lazer Metal Biriktirme

3DP : Direkt Metal Yazdırma

LENS : Lazer İşlemli Net Şekillendirme

SYİ : Sürüklemeli Yüzey İşlem

XRD : X Işını Kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Eklemeli İmalat ile üretilen ürünlerin sektörlere göre yüzdelik dağılımları [3]. 6

Şekil 2.2. Metal Eklemeli İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması. 7

Şekil 2.3. Seçici Lazer Ergitme yönteminin şematik gösterimi [7]. 8

Şekil 2.4. Sürüklemeli Yüzey İşlem operasyonunun şematik gösterimi. 13

Şekil 3.1. SLE yöntemiyle üretilen numunelerin boyutları. 14

Şekil 3.2. Inconel 718 alaşımının üretilmesinde kullanılan metal tozlarının optik mikroskop ile alınmış görüntüsü. 16

Şekil 3.3. Üretimi yapılan numunelerin modeli. 16

Şekil 3.4. EOS M290 SLE cihazı. 16

Şekil 3.5. (a) Destek yapılı numune ve (b) destek yapısı temizlenmiş numune. 17

Şekil 3.6. (a) CNC freze tezgâhı (b) numunelerin frezelenmesine uygun olarak tasarlanan fikstür. 18

Şekil 3.7. Sürüklemeli yüzey işlem cihazı. 19

Şekil 3.8. SYİ operasyonu sırasında kırılan parçanın görüntüsü. 19

Şekil 3.9. Instron 55569 marka çekme test cihazı. 20

Şekil 3.10. JBS 300B marka çentik darbe test cihazı. 20

Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı. 21

Şekil 3.12. Hassas kesme cihazı. 22

Şekil 3.13. Numunelerden alınan kesitlerin detayları. 22

Şekil 3.14. (a) Multipol Advanced Plus zımparalama/parlatma cihazı (b) manyetik zımparalama diskleri ve manyetik parlatma keçesi. 23

Şekil 3.15. Sertlik ölçüm cihazı. 23

Şekil 3.16. Dağlama solüsyonunun hazırlandığı çeker ocak. 24

Şekil 3.17. Keyence VHX-6000 dijital optik mikroskop. 24

Şekil 3.18. X ışını kırınımı (XRD) ölçüm cihazı. 25

Şekil 3.19. Çalışmanın akış şeması. 25

Şekil 4.1. İşlem görmemiş parçanın üretim yönünde (a) 250x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri. 27

Şekil 4.2. İşlem görmemiş parçanın tarama yönünde (a) 250x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri. 28

Şekil 4.3. SYİ operasyonu sonucunda (a) 250 x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmedeki yüzey topoğrafi görüntüleri. 30

Şekil 4.4. Frezeleme operasyonu sonucunda (a) 250 x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmedeki yüzey topoğrafi görüntüleri. 31

Şekil 4.5. İkincil işlemlerden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri (üretim yönü). 33

Şekil 4.6. İkincil işlemlerden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri (üretim yönüne dik). 33

Şekil 4.7 SYİ işleminden sonra malzeme yüzeyinin şematik gösterimi. 34

Şekil 4.8. İkincil işlemlerden sonra numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri. 35

Şekil 4.9. SLE yöntemiyle üretilen Inconel 718 alaşımının üretim yönü ve tarama yönünde farklı büyütmelerde alınan mikroyapı görüntüleri. 36

Şekil 4.10. SYİ operasyonundan sonra yüzey altında meydana gelen mikroyapı değişimi. 37

Şekil 4.11. Frezeleme operasyonundan sonra yüzey altında meydana gelen mikroyapı değişimi. 37

Şekil 4.12. 2 mm kalınlığında (a) işlem görmemiş, (b) sürüklemeli yüzey işlem operasyonuna ve (c) frezeleme operasyonuna maruz kalmış numunelerin XRD profilleri. 39

Şekil 4.13. 4 mm kalınlığında (a) işlem görmemiş, (b) sürüklemeli yüzey işlem operasyonuna ve (c) frezeleme operasyonuna maruz kalmış numunelerin XRD profilleri. 40

Şekil 4.14. Malzemelerin yüzey altı sertlik ölçüm izlerinin görüntüsü. 41

Şekil 4.15. 2 mm kalınlığındaki numunelerin ikincil mikrosertlik değişimleri. 42

Şekil 4.16. 4 mm kalınlığındaki numunelerin mikrosertlik değişimleri. 42

Şekil 4.17. İkincil işlemler sonrasında numunelerin ortalama mikrosertlik değişimleri. 43

Şekil 4.18. 2 mm kalınlığındaki parçaların gerilme-birim şekil değiştirme grafiği. 44

Şekil 4.19. 3 mm kalınlığındaki parçaların gerilme-birim şekil değiştirme grafiği. 45

Şekil 4.20. 3 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonucundaki görüntüleri (a) işlem görmemiş, (b) SYİ ve (b) frezeleme operasyonuna maruz kalmış parçalar. 46

Şekil 4.21. İkincil işlemler sonrasında çentik darbe testi uygulanan numunelerin görüntüleri. 49

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Üretim parametrelerinin malzeme özelliklerine etkisi. 11
Tablo 3.1. İşlem görmeyecek ve ikincil işleme maruz kalacak numunelerin kalınlıkları. 14
Tablo 3.2. Inconel 718 alaşımının kimyasal bileşimi [34]. 15
Tablo 3.3. Inconel 718 alaşımının mekanik özellikleri [34]..... 15
Tablo 4.1. 1 mm ve 4 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonuçları..... 46
Tablo 4.2. 2,5 mm kalınlığındaki numunelerin çentik darbe testi sonuçları. 47
Tablo 4.3. 5 mm kalınlığındaki numunelerin çentik darbe testi sonuçları. 48

1. GİRİŞ

İmalat, bulundukları şekliyle insanların işine yaramayan hammaddelerin veya yarı mamullerin makine ve iş gücü ile işlenerek bir sanayi ürünü, bir mal üretme işlemlerinin bütünüdür. İnsanlar ihtiyaçlarını karşılamak için kullandıkları makinelerin parçalarını imalat yöntemleri ile üretirler. Gelişen teknoloji ve artan insan ihtiyaçları, imalat teknolojisinin gün geçtikçe gelişmesini sağlamaktadır. Kullanılan yöntemler yeni ihtiyaçlar karşısında gelişerek yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Bir sanayi ürününün imal edilebilmesi için günümüzde pek çok imalat teknolojisi kullanılmaktadır. Geleneksel imalat yöntemi olarak adlandırılan bazı yöntemlerde ham madde veya yarı mamulden talaş kaldırma işlemi ile ürünün üretilmesi esasına dayanmaktadır. Günümüzde bu prensibe dayalı birçok imalat yöntemi hali hazırda kullanılmaktadır. Tornalama, frezeleme, taşlama, delik delme vb. operasyonlar geleneksel imalat yöntemleridir. Bu imalat yöntemlerinde malzemeden talaş kaldırma işlemi torna kalemi, freze çakısı gibi kesici takımların yardımıyla yapılır. Kesici takımlar vasıtasıyla mekanik kuvvetler etkisinde malzemede plastik deformasyon yaratarak malzeme üzerinden talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilir ve malzeme şekillendirilir. Kesici takım ve iş malzemesi arasında sürekli olarak birbiri ile temas ve hareket vardır. Bu yöntemler uzun yıllardır kullanıldıkları için oldukça yüksek teknoloji birikimi vardır. Bu yöntemle çalışan tezgâhlar oldukça esnek ve verimlidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu yöntemler de oldukça gelişmiştir. Ancak yine de geleneksel imalat yöntemlerinin kendi içerisinde birçok sınırları ve zayıflıkları vardır. Bu sınırlar ve zayıflıklar şu şekilde sıralanabilir:

- Geleneksel imalat yöntemlerinde kullanılan kesici takımlar, operasyon sırasında yüksek gerilim altında aşınırlar. Mukavemeti yüksek malzemelerin işlenmesinde daha sert ve daha nitelikli takımların kullanılması gerekir. Bu durum kesici takım maliyetlerini önemli ölçüde artırır.
- Malzeme dayanımı ne kadar yüksekse işleme hızı o kadar düşer. Bu durum yeni nesil üstün nitelikli malzemelerin imalatını güçleştirir.
- Geleneksel imalat yöntemlerinde kesici takım ile malzemenin teması sonucunda yüksek sıcaklıklar oluşur. Kesme bölgesinde oluşan bu yüksek sıcaklıklar hem

takım aşınmalarına ve işlenen malzemenin kötü yüzey özelliklerine sahip olmasına sebep olur hem de işleme hızını önemli ölçüde düşürür.

- İmalat yönteminin türüne göre talaş kaldırma işlemi sadece doğrusal ve dairesel olabilir.
- Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takım ve malzemenin temas halinde olmasından dolayı titreşimler meydana gelir. Bu titreşimler nihai ürünün yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkiler.
- Karmaşık geometriye sahip ürünlerin geleneksel imalat yöntemiyle üretimi oldukça güçtür. Birden fazla imalat yönteminin ve kesici takımın kullanılması gerekliliği hem işlem süresini uzatır hem de üretim maliyetlerini artırır.

Geleneksel imalat yöntemlerinin bu kısıtları ve zayıflıkları imalat teknolojisinde yeni yöntemler arayışına neden olmuştur. Üstün niteliklere sahip yeni malzemeler, özellikle havacılık ve uzay sanayisinde kullanım alanı bulmuş ve bu üstün özelliklere sahip malzemeler geleneksel imalat yöntemleri ile işlenememiştir. Bu malzemelerin çok pahalı olması ve gelişen teknoloji ile daha küçük boyutlarda parçaların üretilmesi ihtiyacı geleneksel imalat yöntemleri ile aşılamamıştır. Tüm bu sebeplerden dolayı ileri imalat yöntemleri adı verilen teknolojiler ortaya çıkmıştır. İleri imalat yöntemlerinde geleneksel imalat yöntemlerinin aksine talaş kaldırma işlemleri uygulanmaz. Bu yöntemler genellikle malzemeleri işlemek için kullandıkları enerji çeşidine göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- Mekanik enerji kullanan yöntemler (Ultrasonik işleme, Aşındırıcı su jeti ile işleme, Basınçlı su jeti ile işleme vs.),
- Elektrokimyasal enerji kullanan yöntemler (Elektrokimyasal erozyon taşlama, Elektrokimyasal sıvı jeti, Elektrokimyasal parlatma vb.),
- Kimyasal enerji kullanan yöntemler (Kimyasal parlatma, Isıl kimyasal işleme, Fotokimyasal işleme vb.),
- Isı enerjisi kullanan yöntemler (Elektron ışını ile işleme, Plazma ile işleme, Lazer ışını ile işleme, İyon ışını ile işleme vb.).

İleri imalat yöntemleri de geleneksel imalat yöntemleri gibi teknolojinin gelişmesiyle gelişmeye devam etmektedir. Ancak her iki imalat yöntemi de üstün özelliklere sahip ve oldukça pahalı olan yeni nesil malzemelerin karmaşık şekillerde üretilmesi konusunda

yeterli esnekliği sağlayamamaktadır. Bu durum yeni teknoloji arayışlarının devam etmesine sebep olmuştur. Her iki imalat yönteminin sahip olduğu kısıt ve sınırlara pratik çözümler bulmak için Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi geliştirilmiştir.

Eklemeli imalat yönteminde imal edilmesi istenen parçalar bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile bilgisayar ortamında 3 boyutlu olarak tasarlanır. CAD programları ile tasarlanan parçalar eklemeli imalat cihazları ile metal tozları kullanılarak katman katman üretilir. Eklemeli imalat yöntemi ile diğer imalat yöntemleri kullanılarak üretilmesi oldukça zor ya da mümkün olmayan karmaşık şekilli parçaların imalatı mümkün olmuştur. Bu üstün özellikleri nedeniyle eklemeli imalat teknolojisi özellikle havacılık, uzay, biyomedikal ve otomotiv sektörlerinde yaygın bir kullanım alanına sahip olmuştur.

Eklemeli imalat yöntemi her ne kadar üstün özelliklere sahip olsa da bu yöntemin de bazı zayıf özellikleri vardır. Yöntem metal tozlarının katman katman serilerek ani olarak ısıtılması ve soğutulması esasına dayandığı için imal edilen parçalarda ani çarpılmalar, iç gerilmeler, malzeme içerisinde oluşan boşluklar, kötü yüzey kalitesi gibi sorunlar gözlemlenmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile yöntemin bu zayıf özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Üretim parametrelerinin, üretilmesi istenen ürünün çeşidine ve yapısına göre uygun hale getirilmesi ile daha üstün özelliklere sahip ürünlerin üretilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi adına yapılan çalışmalar ile daha iyi özelliklere sahip ürünler üretilmesine rağmen bu çalışmalar ürünlerin yine de istenilen özelliklerde olmasını sağlayamamıştır. Bu sebeple üretim işleminden sonra ürüne uygulanan ısıl işlem, talaşlı imalat, taşlama, kumlama gibi ikincil işlemler ile ürünlerin daha üstün yüzey ve mekanik özelliklere sahip olmasına yönelik çalışmalar da yürütülmektedir.

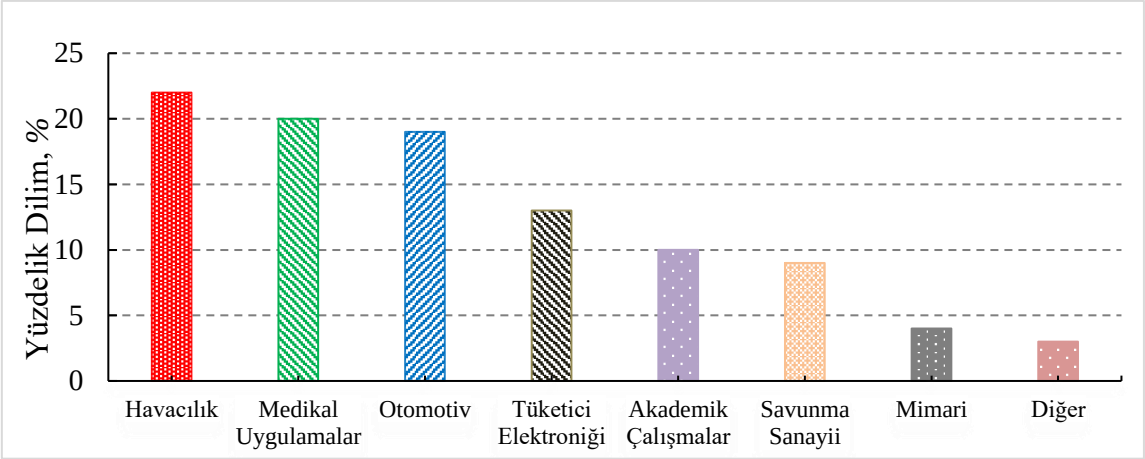
Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemiyle farklı cidar kalınlıklarında çekme numunesi ve çentik darbe numunesi formunda üretilen Inconel 718 alaşım malzemesine ikincil işlem olarak frezeleme ve sürüklemeli yüzey işlem operasyonları uygulanmış ve ikincil işlemlerden sonra numuneler çekme testi ve çentik darbe testine tabi tutulmuştur. İkincil işlemlerin malzemenin yüzey, yüzey altı ve mekanik özelliklerine etkisi detaylı olarak incelenmiş ve işlem görmemiş malzemenin özellikleri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemelere uygulanan frezeleme ve

sürüklemeli yüzey işlem operasyonlarının hangi kalınlığa kadar malzemenin mekanik özelliklerini değiştirebileceği kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu tez çalışması ile ikincil işlemlerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemelerden istenilen yüzey ve mekanik özellikleri sağlayıp sağlayamadığı konusunda önemli bilgiler vermesi hedeflenmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli İmalat (Eİ) 1980'lerden bu yana kullanılan ve gün geçtikçe teknolojisi gelişen bir imalat yöntemidir [1]. İlk kullanım alanı prototip üretimi olduğu için hızlı prototipleme olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem ile kompleks bileşenler kalıplar, döküm yöntemleri veya büyük işleme araçlarına gerek olmadan doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları kullanılarak üretilebilir. Eİ ile parçalar metal tozlarının katmanlar halinde uygun bir enerji kaynağı ile ergitilmesi ve katılaşması sonucu üretilir. Eİ teknolojisinde üretimin metal tozları ile gerçekleştirilmesi sayesinde karmaşık geometrilere sahip, diğer imalat yöntemleri ile üretilmesi oldukça zor ya da mümkün olmayan parçalar bilgisayar ortamında kolaylıkla tasarlanarak insan eli değmeden hızlı bir şekilde ve tam otomasyonla üretilebilir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte Eİ teknolojisi de gelişmiş ve özellikle havacılık, uzay, biyomedikal ve otomotiv gibi birçok sektörde yaygın bir kullanım alanına sahip olmuştur [2]. Şekil 2.1' de Eİ teknolojisi ile sektörlere göre üretilen ürünlerin yüzdelik dağılımları sunulmuştur [3]. Ürünlerin yüzdelik dağılımları incelendiğinde yeni nesil malzemelerin kullanıldığı havacılık, medikal ve otomotiv sektörlerinin Eİ teknolojisinden en fazla yararlanan sanayiler olduğu görülmektedir. Bu sektörlerin Eİ teknolojisini kullanımını artırması Eİ teknolojisinin pazar payını önemli ölçüde artırmış ve 2023 yılında 21 milyar dolar pazar payına sahip olacağı ileri sürülmüştür [4]. Ayrıca bu alanda yapılan akademik çalışmalar da Eİ teknolojisinin gelişmesiyle artmış ve giderek de artmaktadır.



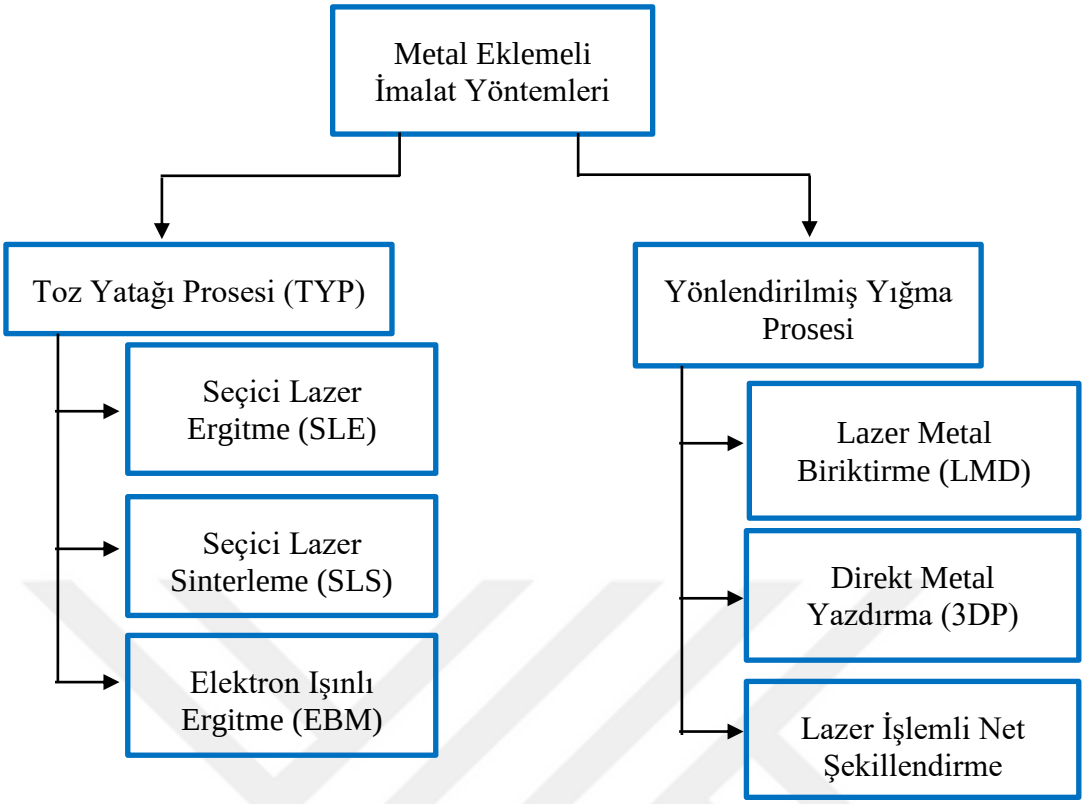
Şekil 2.1. Eklemeli İmalat ile üretilen ürünlerin sektörlere göre yüzdelik dağılımları [3].

Eİ teknolojisinin öne çıktığı önemli alanlardan biri de yedek parça sanayisi olmuştur. Yedek parça ihtiyacı olan sektörler, parçaları ihtiyaca göre Eİ teknolojisi ile üretebilirler. Bu durum hem işçilik maliyetlerini hem de nakliye masraflarını önemli ölçüde düşürebilir. Görüldüğü üzere Eİ teknolojisi birçok sektörün imalat taleplerine karşılık vermiş ve bu durum değişik eklemeli imalat metotlarının gelişmesine neden olmuştur.

2.1 Eklemeli İmalat Çeşitleri

Eİ teknolojisinin son yıllarda önemli gelişmeler göstermesiyle birlikte ASTM tarafından eklemeli imalat teknolojileri araştırma grubu kurularak, Eİ yöntemleri ASTM F42' ye göre sınıflandırılarak standart altına alınmıştır. Bu standarda göre Eİ genel olarak besleme malzemesinin formuna (toz, tel, sac vs.), besleme malzemesine göre (metal, plastik, seramik, kompozit vs.), kullanılan ışının tipine göre (lazer, elektron vs.) ve yapılan işleme göre (ergitmeli, sinterlemeli, yapıştırmalı vs.) sınıflandırılarak yedi temel Eİ yönteminin ve toplam on beş Eİ metodunun mevcut olduğu görülmektedir [5].

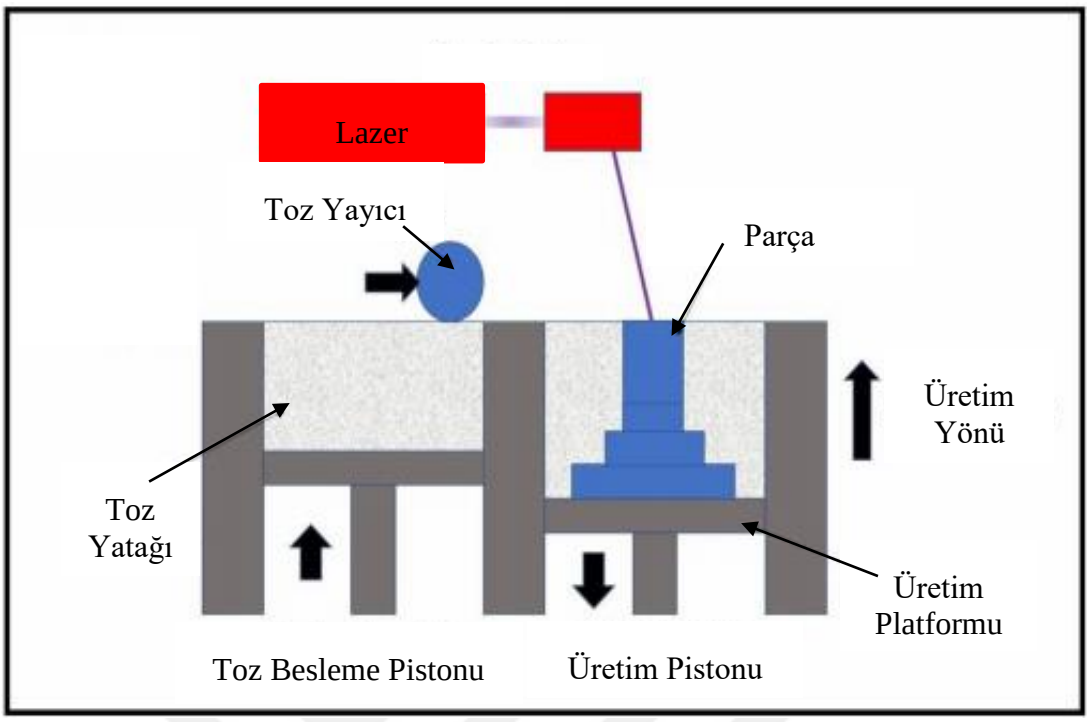
Metal eklemeli imalat yöntemleri arasında en yaygın bilinen sınıflandırma yöntemi, Toz Yatak Prosesi (Powder Bed Fusion) ve Yönlendirilmiş Biriktirme Prosesi (Directed Energy Deposition) şeklindedir. Bu yöntemlerin haricinde Eİ teknolojisinin gelişmesiyle birçok farklı üretim yöntemleri oluşmuştur. Eİ üretim sürecinden sonra parçalara ikincil operasyonların uygulandığı hibrit sistemler de son zamanlarda geliştirilmektedir. Şekil 2.2' de yukarıda belirtilen metal Eİ teknolojileri arasında en çok kullanılan yöntemler sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.2. Metal Eklemeli İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması.

Toz yatağı prosesleri, bu yöntemler arasında en çok bilinen ve yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretildiği prosestir [3]. Bu tez çalışması kapsamında incelenen numuneler toz yatağı prosesi grubunda bulunan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemiyle üretilmiştir.

TYP sistemlerinde toz malzemeleri eritmek veya sinterlemek için lazer ya da elektron ışını kullanılmaktadır. Üretim işlemi oksidasyonu önlemek için azot veya argon gibi inert bir gaz içerisinde ya da elektron ışını ergitme yönteminde olduğu gibi vakum ortamında gerçekleştirilir [6]. 20 ila 80 µm boyutlarında çaplara sahip toz malzemeler imalat platformuna serildikten sonra lazer veya elektron ışınları vasıtasıyla oluşturulan tasarıma göre taranır. Daha sonra üretim platformu katman kalınlığı kadar aşağıya iner, toz serme sistemi parçanın üstüne yine katman kalınlığı kadar yeni tozu serer ve üretim işlemi tamamlanana kadar bu işlem tekrarlanır. Şekil 2.3' te toz yatağı proseslerinden SLE yönteminin şematik gösterimi sunulmaktadır. EBM yönteminde SLE yönteminden farklı olarak metal tozları elektron ışınları tarafından ergitilmektedir.



Şekil 2.3. Seçici Lazer Ergitme yönteminin şematik gösterimi [7].

TYP sistemlerinde üretim süreci belirli üretim parametreleri ile gerçekleştirilir. Üretim parametreleri üretilecek parçanın istenilen kalitede olması için malzeme çeşidine ve yapısına göre belirlenmelidir. Ürünün kimyasal, mikroyapısal, mekanik, yüzey ve tribolojik özelliklerini etkileyen üretim parametrelerinin uygun seçilmesi son derece önemlidir [8]. Bu üretim parametreleri aşağıda sıralanmıştır:

- Lazer gücü,
- Tarama hızı,
- Katman kalınlığı,
- Yana kayma mesafesi,
- Tarama stratejisi,
- Demet çapı, vuruş modu,
- İnşa oryantasyonu.

TYP yöntemlerine ait cihazlar dünya genelinde EOS (Almanya), 3D Systems (Fransa/ABD), Renishaw (İngiltere), Realizer (Almanya) gibi birçok şirket tarafından üretilmektedir. Üretilen cihazlar farklı şekillerde ve isimlerde olsa da TYP yöntemlerinin üretim süreci genel olarak aşağıdaki şekilde gerçekleşir:

- Üretilecek parçaların bilgisayar ortamında CAD programları ile tasarlanması,
- Tasarlanan parçaların STL formatına dönüştürülmesi,
- Parçalar için destek elemanlarının oluşturulması,
- STL formatına dönüştürülen tasarımın cihaza aktarılması,
- İşlem parametrelerinin belirlenmesi,
- Parçaların üretimi,
- Parçaların cihazdan alınıp destek elemanlarının temizlenmesi.

Bu yöntemlerde talaşlı ve talaşsız imalat yöntemlerinde olduğu gibi herhangi bir bağlama elemanına, yüksek insan gücüne veya üretim sonrasında montaj işlemine gerek duyulmadığından ve kompleks parçalar kısa sürede ve daha az maliyetle üretilebildiğinden farklı sektörlerde birçok uygulama alanına sahip olmuştur.

2.2 Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları

TYP yöntemleri hem avantajlara hem de bazı dezavantajlara sahiptir. En önemli avantajı diğer imalat yöntemleri ile üretilmesi oldukça zor ya da mümkün olmayan veya maliyeti çok yüksek olan parçalar için muhteşem bir tasarım özgürlüğü sunmasıdır. Diğer avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Eklemeli imalatın en önemli avantajlarından biri CAD programları tarafından tasarlanan parçaların doğrudan imalatının yapılabilmesidir. Bu sayede envanter, montaj, iş gücü, bakım giderleri olmadığı için üretim maliyetini ciddi şekilde düşürür.
- Eİ makineleri çok karmaşık geometrik şekillere sahip ürünlerin imalatına izin vermekte olup bu sayede yeni ürün tasarımı ve geliştirilmesi için büyük bir özgürlük yaratmaktadır.
- Eklemeli imalatın bir diğer avantajı ise hafif yapılardır. Mekanik özellikleri diğer imalat yöntemleri ile üretilen parçalarla aynı olan mukavemetli ve hafif yapıların üretilmesi mümkün olmaktadır.
- Bazı Eİ makineleri farklı içerikteki toz malzemelerin karışımıyla farklı özellikte malzemelerin üretilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Eİ yöntemleri birçok avantaja sahip olmasına rağmen işlevsel parçaların üretiminin daha geniş kullanımını engelleyen birtakım dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- Eİ makineleri belirli bir üretim hacmine sahiptir. Bu üretim hacmi üretilecek parçaların boyutları konusunda belirli kısıtların oluşmasına neden olmaktadır.
- Parçaların katmanlar şeklinde üretilebilmesi ve üretim tablasından çıkarılabilmesi için destek elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Destek elemanları üretim işleminden sonra belirli işlemlerle parçadan çıkarılır. Destek elemanları fazladan malzeme ve enerji tüketimine neden olmaktadır.
- Eİ yöntemleri genellikle karmaşık ve belirli bir tasarıma ait ürünlerin üretilmesi için kullanılır. Diğer imalat yöntemlerinde olduğu kadar seri üretime uygun değildir.

Bu dezavantajlarının yanı sıra üretilen parçalarda da bazı kusurlar oluşmaktadır. Bu kusurlar aşağıda listelenmiştir:

- Üretim metal tozlarının ani ısıtılması ve soğutulması prensibine dayandığı için parçalarda çarpılmalar meydana gelebilmektedir.
- Parçaların iç yapısında üretim sürecinden kaynaklı boşluklar oluşabilmektedir.
- Üretilen parçaların bazı mekanik ve tribolojik özellikleri istenilen seviyede olmayabilmektedir.
- Parçalarda iç gerilmeler oluşabilmektedir ki bu gerilmeler parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.
- Tüm bunların yanında Eİ yönteminin en önemli dezavantajı üretilen parçaların yüzey özellikleridir. Parçaların yüzey bütünlüğü ve yüzey pürüzlülüğü oldukça zayıf olmaktadır.

Üretilen parçalarda görülen bu kusurlar parçaların uygun koşullarda kullanılabilmesi için giderilmelidir. Parçaların yüzey ve mekanik özelliklerini geliştirmek için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazılarında SLE yönteminin parametrelerini optimize ederek uygun parametrelerin seçilmesi ve bu parametrelerin parçalar üzerindeki etkileri incelenmektedir [9-12]. Yapılan çalışmalarda lazer gücünün artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı [13], malzemelerin iç yapısında gözlenen boşluklu yapıların

azaldığı [14], daha güçlü mekanik özelliklerin elde edildiği [15] ve malzemelerin sertliğinin arttığı [16] görülmüştür. Tarama hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün ve boşluklu yapının arttığı [17, 18] gözlemlenmiştir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi esasına dayanan çalışmalarda genellikle aşağıda denklemi verilen, lazer gücü (P), katman kalınlığı (t), lazer tarama hızı (V) ve yana kayma mesafesi (h) parametreleri ile elde edilen enerji yoğunluğunun (E) parçalar üzerine etkileri incelenmektedir [19]. Enerji yoğunluğuna etki eden bu parametrelerin değişmesi, parçaların mekanik özelliklerinde değişikliklere sebep olmaktadır [10].

$$E = \frac{P}{V.h.t} \tag{1}$$

Tablo 2.1' de literatürden elde edilen bilgiler ışığında [20, 21] bazı üretim parametrelerinin malzemelerin özelliklerine etkisi sunulmuştur.

Tablo 2.1. Üretim parametrelerinin malzeme özelliklerine etkisi.

Üretim Parametresi	Pürüzlülük	Sertlik	Porozite
Lazer Gücü ↑	↓	↑	↓
Tarama Hızı ↑	↑	↓	↑
Katman kalınlığı ↑	↑	↓	↑

Üretim parametrelerinin optimize edilmesi ile parçaların yüzey ve mekanik özelliklerinde belirli gelişmeler olduğu görülmektedir. Ancak parçaların yüzey ve mekanik özellikleri, özellikle yüzey pürüzlülüğü yine de istenilen seviyelere ulaşamamaktadır [22]. Bu durum Eİ üretim sürecinden sonra parçalara uygulanacak ikincil işlemlerin gerekliliğini ortaya koymuştur [23].

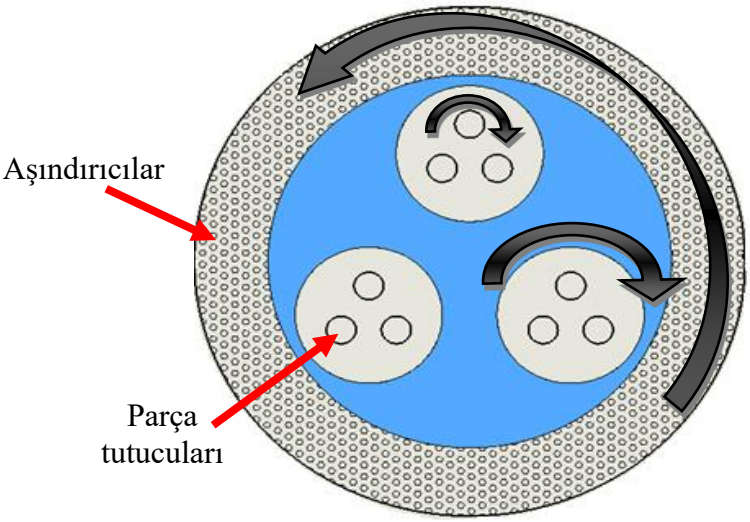
2.3 Eklemeli İmalatta İkincil İşlemler

İkincil işlemler Eİ yöntemi ile üretilen parçalara üretim sürecinden sonra parçaların yüzey, mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uygulanan işlemlerdir. Yeni geliştirilen Eİ makinelerine ikincil işlemler adapte edilerek yeni nesil hibrit makineler de üretilmeye başlanmıştır. Literatür incelendiğinde, ısıl işlem [24], kimyasal yüzey işlem

[25], elektroparlatma [26], tornalama [27], frezeleme [28], taşlama [29] gibi birçok ikincil işlemin parçalar üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İkincil işlem olarak ince tornalama operasyonunun uygulandığı parçaların yüzey pürüzlülüğü işlem görmemiş malzemenin yüzey pürüzlülüğüne göre oldukça azaldığı ve parçaların yüzey sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir [22]. Frezeleme işlemi tornalama işlemi gibi parçaların yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde düşürmüş ve malzemenin yüzey sertliğini arttırmıştır [30]. TYP yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik malzemeye taşlama operasyonu uygulanmış ve taşlama işleminden sonra parçaların yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığı, yüzey sertliğinin arttığı, çekme ve kopma dayanımının ve aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir [31]. Yapılan bir diğer çalışmada ise lazer parlatma yönteminin uygulandığı parçalarda yüzey pürüzlülüğünün 0.1 µm değerinin altına düştüğü, parçaların yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir [32].

Literatür incelendiğinde ikincil işlemlerin parçaların mekanik, yüzey ve tribolojik özelliklerini geliştirdiği görülmektedir. Eİ teknolojisi ile üretilen parçalara uygulanabilecek bir diğer ikincil işlem de Sürüklemeli Yüzey İşlem (SYİ) operasyonudur. SYİ operasyonunda parçalar özel tutucular ile makinenin takım tutucusuna bağlanır. Parçalar içerisinde aşındırıcı taşların bulunduğu dairesel kesitli kazan içerisine daldırılarak dairesel bir hareket ile sürüklenir. Ana iş milinin döndürülmesi ile parçalar kazan içerisindeki aşındırıcı taşlara sürter. Şekil 2.4’ te SYİ cihazının çalışma prensibi şematik olarak sunulmuştur. SYİ operasyonun uygulandığı parçaların yüzey ve mekanik özelliklerinin geliştiği gözlemlenmiştir [22, 33].



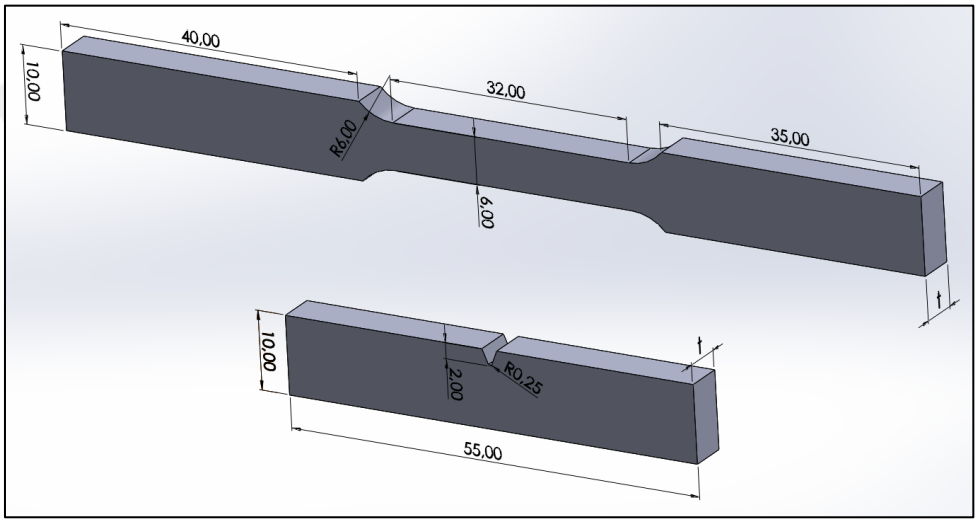
Şekil 2.4. Sürüklemeli Yüzey İşlem operasyonunun şematik gösterimi.

İkincil işlemlerin Eİ teknolojisi için oldukça önemli olduğu görülmektedir. Ancak ikincil işlemler de kendi içerisinde bazı kısıtlara sahiptir. SYİ operasyonunda parçalar takım tutuculara bağlandığı için tasarımın ikincil işleme göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aynı şekilde frezeleme ve tornalama gibi talaş kaldırma operasyonlarının uygulanacağı parçalar tezgâhlara bağlanmaları gerektiği için bazı şekil kısıtlarına sahiptir. Taşlama ve kumlama gibi operasyonlar ise aynı şekilde karmaşık şekilli parçaların iç yüzeylerinde etkili olmayabilmektedir. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak tasarımların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

3.1 Inconel 718 Alaşım Malzemesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme SLE yöntemiyle farklı cidar kalınlıklarında çentik darbe numunesi ve çekme numunesi formunda üretilen Inconel 718 alaşımıdır. Çentik darbe testi numuneleri ISO-148 standardına göre, çekme testi numuneleri ise ASTM-E8 standardına göre üretilmiştir. SLE yöntemiyle üretilen numunelerin boyutsal özellikleri Şekil 3.1' de sunulmuştur.



Şekil 3.1. SLE yöntemiyle üretilen numunelerin boyutları.

Çekme testi ve çentik darbe testi numuneleri uygulanacak ikincil işlemler göz önünde bulundurularak farklı kalınlık ve uzunluklarda üretilmiştir. Tablo 3.1' de işlem görmeyecek ve ikincil işlemlere maruz kalacak numunelerin kalınlık değerleri sunulmuştur. Numuneler ikincil işlemlerin ardından standart numune formuna getirilmiştir.

Tablo 3.1. İşlem görmeyecek ve ikincil işleme maruz kalacak numunelerin kalınlıkları.

	Çentik Darbe Numuneleri	Çekme Numuneleri
İşlem Görmemiş	2.5 ve 5 mm	1, 2, 3 ve 4 mm
Sürüklemeli Y.İ.	2.6 ve 5.1 mm	1.1, 2.1, 3.1 ve 4.1 mm
Frezeleme	3 ve 5.5 mm	1.5, 2.5, 3.5 ve 4.5 mm

Inconel 718 alaşımı korozyona karşı oldukça yüksek dayanıma sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Bu üstün özellikleri nedeniyle otomotiv, uçak ve uzay endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan Inconel 718 alaşımının metal tozunun kimyasal bileşimi ve SLE yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşım malzemesinin mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3.1 ve 3.2' de sunulmuştur [34].

Tablo 3.2. Inconel 718 alaşımının kimyasal bileşimi [34].

Element	**Kompozisyon (% ağırlık)**
Ni	50-55
Cr	17-21
Nb	4,75-5,5
Mo	2,8-3,3
Ti	0,65-1,15
Al	0,2-0,8
Co	≤ 1
Cu	≤ 0,3
C	≤ 0,08
Si, Mn	≤ 0,35
P, S	≤ 0,015
B	≤ 0,006
Fe	Kalan

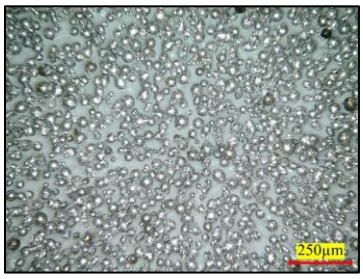
Tablo 3.3. Inconel 718 alaşımının mekanik özellikleri [34].

Mekanik Özellik	**Değerler**
Akma dayanımı	760 ± 50 Mpa
Çekme dayanımı	1060 ± 50 Mpa
Elastiklik modülü	200 ± 10 GPa
Sertlik	300 $HV_{0.5}$

3.2 SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi

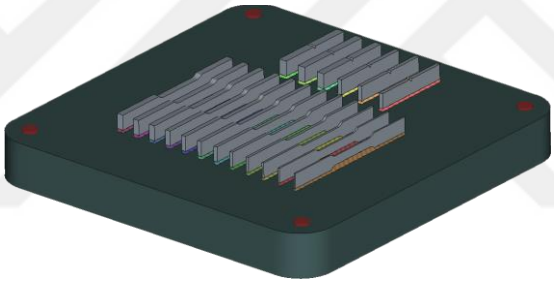
Çalışma kapsamında SLE yöntemiyle üretilen çentik darbe testi ve çekme testi numuneleri Solidworks programında modellenmiştir. Modellenen numuneler STL

formatına dönüştürülerek üretim gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan metal tozlarının optik mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 3.2' de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Inconel 718 alaşımının üretilmesinde kullanılan metal tozlarının optik mikroskop ile alınmış görüntüsü.

Solidworks programı ile tasarlanıp STL formatına dönüştürülen numuneler cihaza aktarılarak üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3' te modellenen numunelerin görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 3.3. Üretimi yapılan numunelerin modeli.

Numuneler 250 mm x 250 mm x 325 mm üretim hacmine ve Yb-fiber laser; 400 W lazer tipine sahip EOS M290 cihazı ile üretilmiştir. Şekil 3.4' te üretim için kullanılan EOS M290 cihazı sunulmuştur.



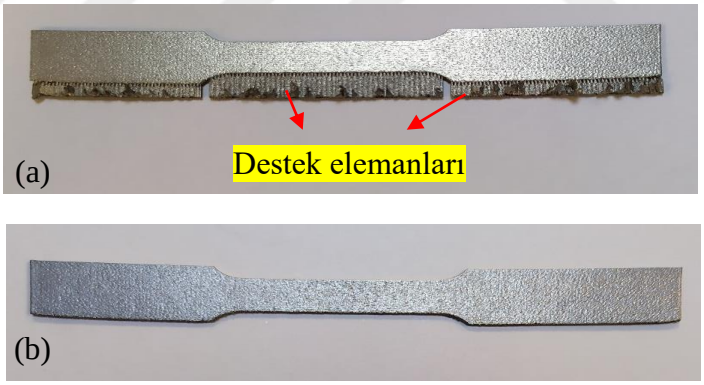
Şekil 3.4. EOS M290 SLE cihazı.

Numunelerin üretimi Argon gazı ortamında gerçekleştirilmiştir. Üretim başlamadan önce üretim tablası 80 °C' ye kadar ısıtılmıştır. Üretim parametrelerinin belirlenmesi aşamasında EOS firmasının önerdiği ve literatürde kullanılan parametreler seçilmeye çalışılmıştır. Tablo 3.3' te numunelerin üretiminde kullanılan üretim parametreleri sunulmuştur.

Tablo 3.3. Numunelerin üretiminde kullanılan üretim parametreleri.

Üretim Parametreleri	**Değerler**
Lazer gücü	180 W
Tarama hızı	600 mm/s
Katman kalınlığı	45 µm
Toz boyutu	15-45 µm
Tarama stratejisi	Katman başına 67°

Tabloda sunulan parametreler ile üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim işleminin ardından destek yapıları temizlenerek numuneler nihai haline gelmiştir. Şekil 3.5' te destek yapılı numune ve destek yapılarının temizlendiği numune sunulmuştur.



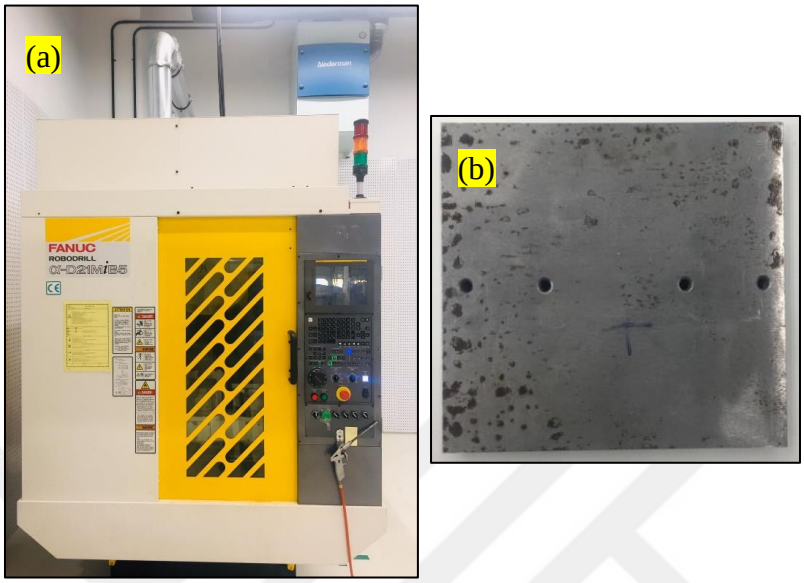
Şekil 3.5. (a) Destek yapılı numune ve (b) destek yapısı temizlenmiş numune.

3.3 İkincil İşlemler

3.3.1 CNC freze tezgâhı ve frezeleme operasyonu

Numunelerin SLE yöntemiyle üretim aşamasından sonra yüzey ve mekanik özelliklerini geliştirmek için ikincil işlemler uygulanmıştır. Frezeleme operasyonu bu ikincil işlemlerden biridir. Frezeleme operasyonu bütün testlerde kuru kesme koşulunda, 60 metre/dakika kesme hızı, 0,1 mm diş başına ilerleme ve 0,25 mm kesme derinliğinde

gerçekleştirilmiştir. Frezeleme operasyonun gerçekleştirilebilmesi için numunelere uygun bir fikstür tasarlanmıştır. Şekil 3.6' da frezeleme operasyonu için kullanılan Fanuc RoboDrill a-D21MiB5 marka CNC tezgâhı ve fikstür sunulmuştur.



Şekil 3.6. (a) CNC freze tezgâhı (b) numunelerin frezelenmesine uygun olarak tasarlanan fikstür.

3.3.2 Sürüklemeli yüzey işlem operasyonu

Numunelere uygulanan diğer ikincil işlem ise sürüklemeli yüzey işlem operasyonudur. SYİ operasyonunda seramik aşındırıcı parçalar kullanılmış ve numuneler 6 saat süre ile aşındırılmıştır. Yüzey işlem operasyonu 45 metre/dakika numune tutucusu (pens) dönme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7' de SYİ operasyonu için kullanılan cihaz sunulmuştur.



Şekil 3.7. Sürüklemeli yüzey işlem cihazı.

SYİ operasyonu gerçekleştirilirken 1,2 mm kalınlığındaki parça kırılmıştır. Aşındırıcı malzemelerin parçaya hızlı bir şekilde çarpması sonucunda pensin parçayı tuttuğu bölgenin hemen altında kırılma gerçekleşmiştir. SYİ operasyonu uygulanmak istenen parçaların operasyon sırasında hasar almaması için 1,2 mm'den daha kalın olması gerekliliği de bu sayede gözlemlenmiştir. Şekil 3.8' de kırılan parçanın görüntüsü sunulmuştur.



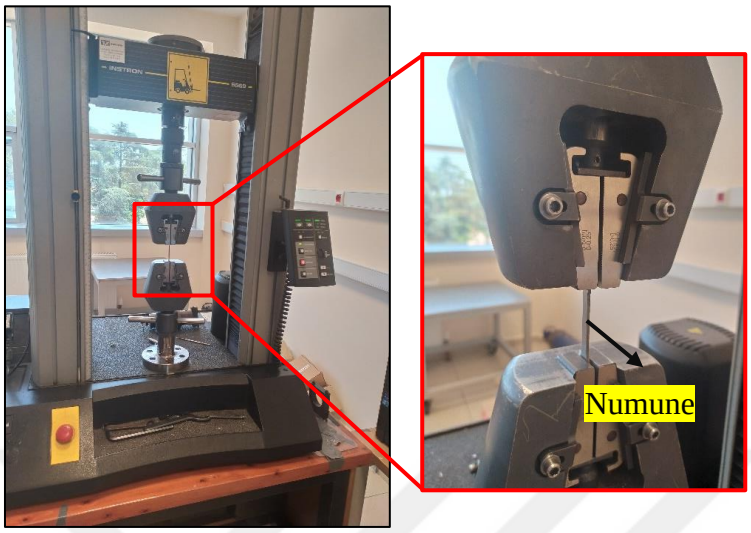
Şekil 3.8. SYİ operasyonu sırasında kırılan parçanın görüntüsü.

3.4 Mekanik Testler

3.4.1 Çekme testi

İşlem görmemiş numunelerin ve ikincil işlem uygulanan numunelerin akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemek için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 50 kN kapasiteli Instron 5569 marka çekme test cihazında, oda sıcaklığında ve 2 mm/dakika birim şekil değiştirme (strain rate) değerinde

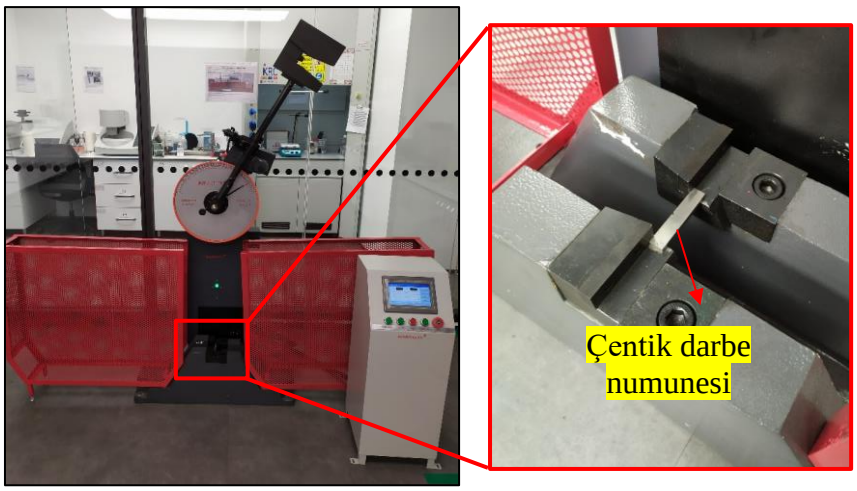
gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9' da çekme testleri için kullanılan çekme test cihazı sunulmuştur.



Şekil 3.9. Instron 55569 marka çekme test cihazı.

3.4.2 Çentik darbe testi

Numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için uygulanan diğer bir test ise çentik darbe testidir. Çentik darbe testi, malzemelerin ani darbelere karşı direncini yani malzemenin tokluğunu belirlemek için gerçekleştirilir. Şekil 3.10' da darbe testleri için kullanılan 150 Joule ilk enerji değerine sahip JBS 300B marka çentik darbe test cihazı sunulmuştur. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. JBS 300B marka çentik darbe test cihazı.

3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

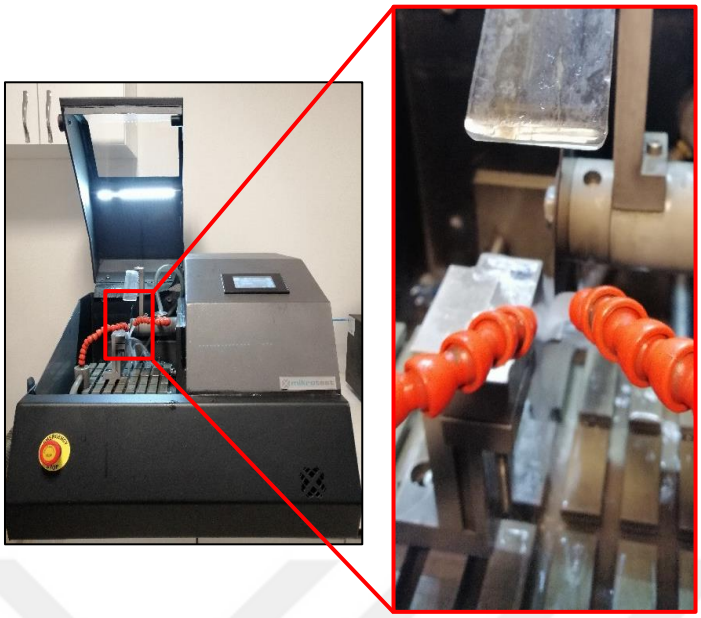
İşlem görmemiş numunelerin ve ikincil işlem uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo marka SJ210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Her numunenin beş farklı bölgesinden ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.11' de yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı sunulmuştur.



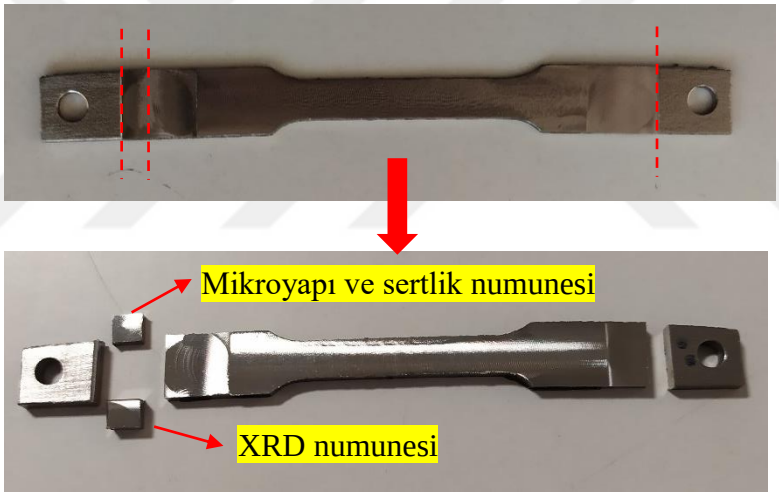
Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

3.6 Metalografik Numune Hazırlama

İkincil işlemlerin numunelerin yüzey ve yüzey altında meydana getirdiği değişimleri incelemek için numuneler hassas kesme cihazı ile kesilmiş olup kesilen numunelerden de farklı analizler için farklı kesitler alınmıştır. Şekil 3.12' de hassas kesme cihazı ve Şekil 3.13' te ise numune üzerinden alınan kesitler sunulmuştur.

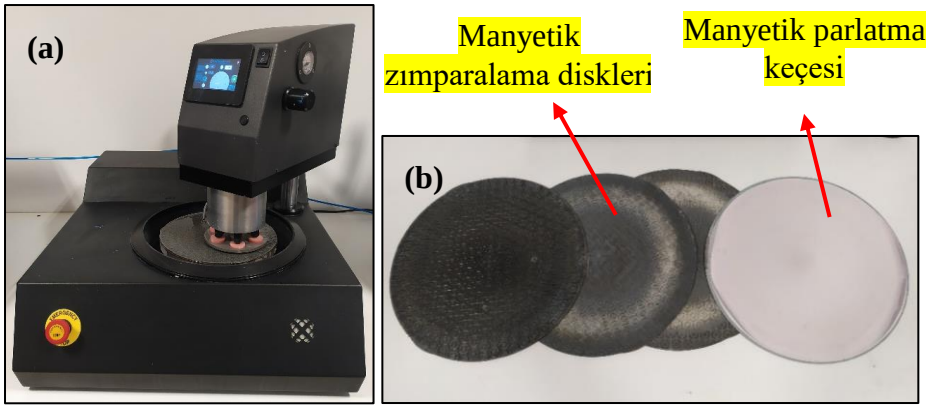


Şekil 3.12. Hassas kesme cihazı.



Şekil 3.13. Numunelerden alınan kesitlerin detayları.

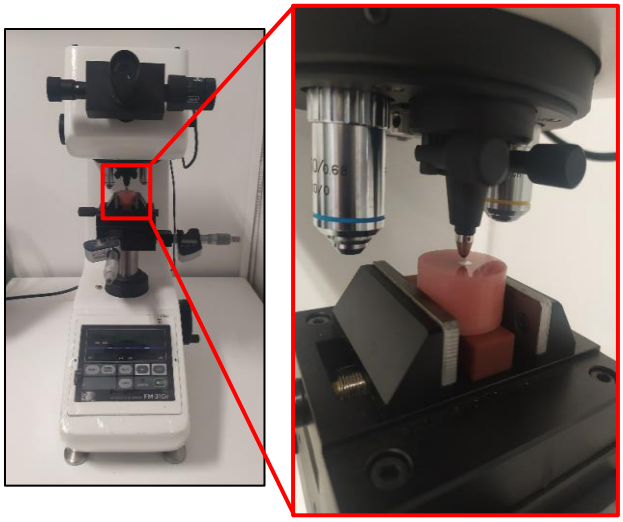
Mikroyapı ve mikrosertlik analizleri için kullanılacak kesitler ilk olarak 2 birim toz ve 1 birim sıvı sertleştirici oranında hazırlanan akrilik çözelti içerisinde soğuk kalıplama yöntemiyle bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler 250 rpm devir hızına sahip ve 300 N yük uygulayabilen zımparalama/parlatma cihazı ile ilk olarak sırasıyla 60, 30 ve 15 µm gritteki manyetik disklerle zımparalanmış ve ardından manyetik parlatma keçesi ile 50 nm boyutunda elmas partiküllü parlatma solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır. Şekil 3.14' te zımparalama/parlatma cihazı ve manyetik zımparalama diskleri ile manyetik parlatma keçesi sunulmuştur.



Şekil 3.14. (a) Multipol Advanced Plus zımparalama/parlatma cihazı (b) manyetik zımparalama diskleri ve manyetik parlatma keçesi.

3.7 Sertlik Ölçümü

Parlatma işleminden sonra numunelerin yüzey ve yüzey altında meydana gelen sertlik değişimlerini incelemek için Future-Tech FM310e marka mikrosertlik cihazı ile numunelerin farklı derinliklerinden 50 *gf* yük uygulanıp beş farklı ölçüm yapılmış ve elde edilen Vickers (HV) sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 3.15' te sertlik ölçüm cihazı sunulmuştur.

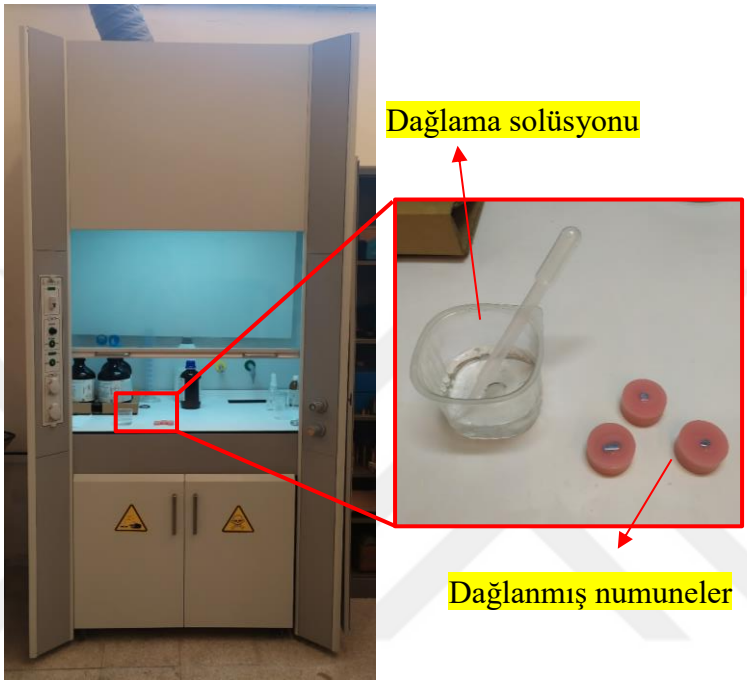


Şekil 3.15. Sertlik ölçüm cihazı.

3.8 Optik Mikroskop Analizleri

Numunelerin ikincil işlemler sonrasında mikroyapı değişimlerini incelemek için Şekil 3.16' da sunulan çeker ocakta 2 ml Gliserin, 3 ml HCl ve 1 ml HNO_3 dağlama solüsyonu

hazırlanmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler hazırlanan dağlama solüsyonunda 2 dakika süre ile dağlanmıştır. Mikroyapı ve yüzey topoğrafi görüntüleri Şekil 3.17' de sunulan 250x-2500x büyütme aralığı, birden çok görüntüyü birleştirme (stitching), 3D görüntü alma, görüntü alma sırasında otomatik odaklanma özelliklerine sahip Keyence VHX-6000 dijital mikroskop ile elde edilmiştir.



Şekil 3.16. Dağlama solüsyonunun hazırlandığı çeker ocak.



Şekil 3.17. Keyence VHX-6000 dijital optik mikroskop.

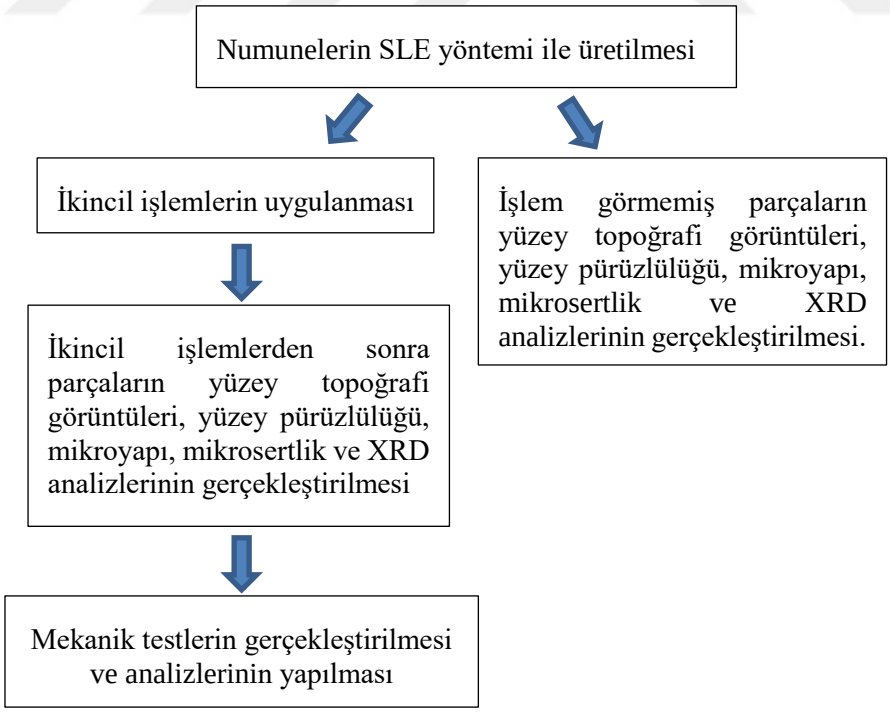
3.9 X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri Şekil 3.18' de sunulan Bruker AXS D2 Phaser cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İkincil işleme maruz kalan yüzeyler üzerindeki fazlar 1,54060 A° dalga boyuna sahip CuKα katot kullanılarak tespit edilmiştir. 2 Theta ölçüm aralığı 30-100° olarak seçilmiştir.



Şekil 3.18. X ışını kırınımı (XRD) ölçüm cihazı.

Şekil 3.19' da tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen işlemler bir akış şeması içerisinde sunulmuştur.



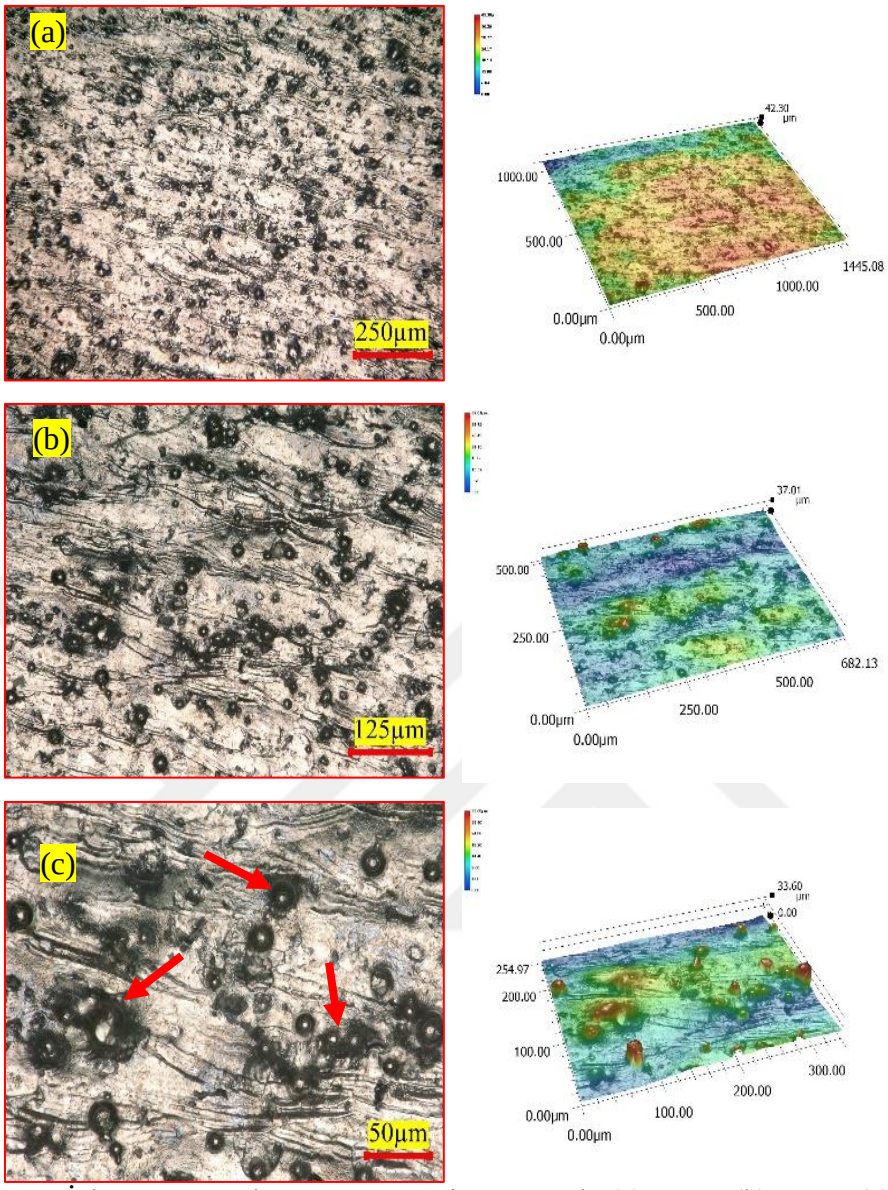
Şekil 3.19. Çalışmanın akış şeması.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yüzey Topoğrafisi

SLE yöntemi ile üretilen metalik malzemelerdeki en önemli kusurların başında kötü yüzey kalitesi gelmektedir. Yöntemin en büyük dezavantajlarından biri olan kötü yüzey kalitesi parçaların kullanım alanını kısıtlamaktadır. Üretilen parçaların yüzey kalitesini artırmak için literatürde pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerini optimize ederek parçaların yüzey kalitesini artırmaya yönelik gerçekleştirilen çalışmaların [8, 13, 35] yanı sıra ikincil işlemler ile yüzey kalitesini artırmaya yönelik çalışmalar da mevcuttur [27, 36, 37]. Parçaların daha verimli kullanılabilmesi için sahip olduğu bu kötü yüzey kalitesinin geliştirilmesi Eİ için hayati öneme sahiptir.

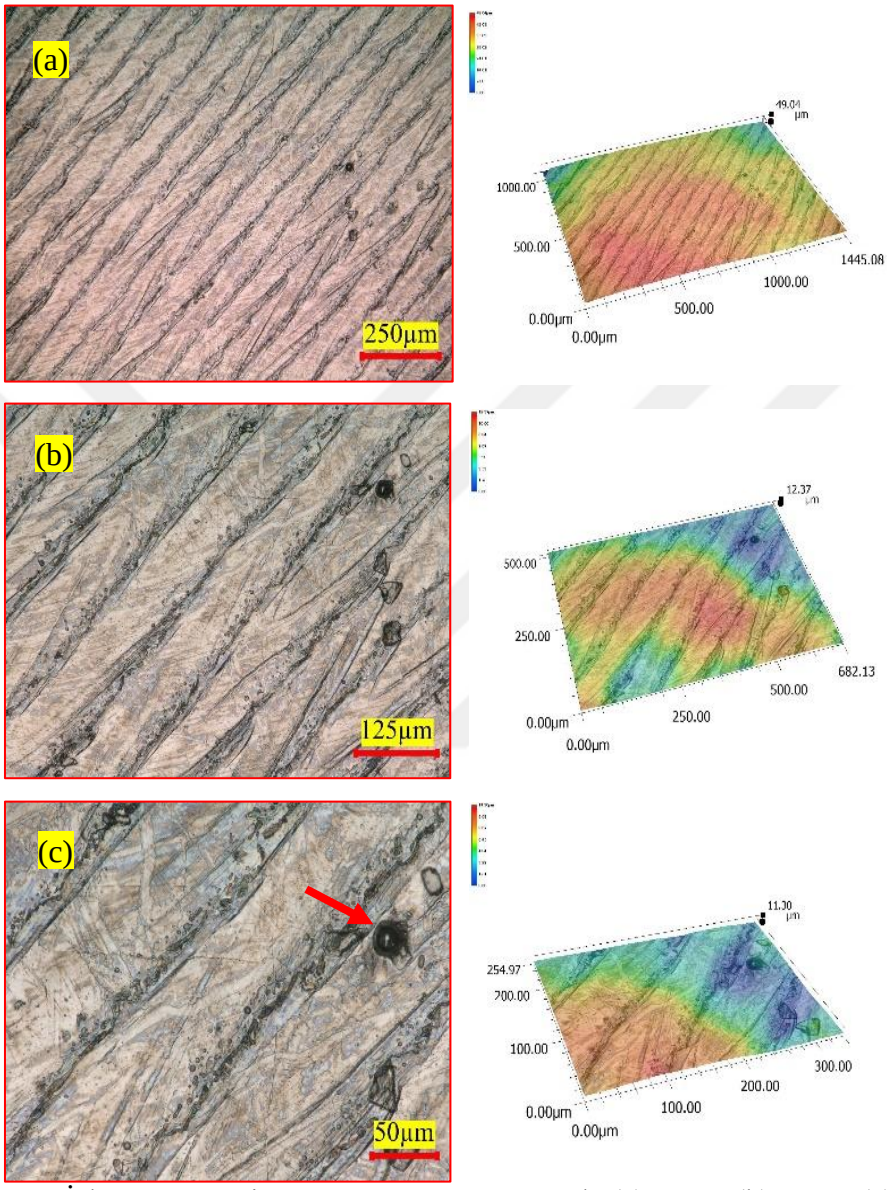
Şekil 4.1' de ikincil işlem görmemiş parçanın üretim yönü boyunca farklı büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri sunulmuştur. Şekilde açıkça görüldüğü gibi parçanın yüzeyi oldukça dalgalı ve pürüzlüdür. Lazer ile metal tozlarının eritilmesi esasına dayanan SLE yöntemi sırasında kısmen ergimiş ya da ergimemiş 20 ila 100 µm arasında çaplara sahip metal tozları parça yüzeyine yapışarak yüzeyin kalitesini oldukça düşürmekte ve yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır. Parçaların kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda kötü yüzey kalitesi ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün önemli bir dezavantaj olduğu görülmektedir. Şekilde parçanın yüzeyine yapışmış metal tozları açıkça görülebilmektedir. Ayrıca metal tozlarının ani ergimesi ve soğuması sırasında ergiyen tozlar belirli yönlere akarak katılaşabilmekte ve bu da parça yüzeyinde tepelerin ve diplerin oluşmasına neden olabilmektedir. Parçaların yüzeylerinde gözlemlenen metal tozlarının ve dalgalı yapının üretim parametrelerini optimize ederek yok edilmesi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen yüzeylerin yine de istenilen düzeyde olmadıkları anlaşılmıştır [22]. Yüzey kalitesini artırmak için ikincil işlemlerin gerekli olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.1. İşlem görmemiş parçanın üretim yönünde (a) 250x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri.

Şekil 4.2' de ikincil işlem görmemiş parçanın tarama yönü boyunca farklı büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri sunulmuştur. Tarama yönünün topoğrafi görüntüleri incelendiğinde üretim yönünde görülen dalgalı ve pürüzlü yüzeyin aksine daha düz ve pürüzsüz bir yüzey olduğu görülmektedir. Yüzeyde tarama izlerinin oluşturduğu girinti ve çıkıntılar görülmektedir. Tarama izlerinden kaynaklanan bu girinti ve çıkıntılar nedeniyle yüzeyin pürüzlü olduğu görülmektedir. Üretim yönünde alınan topoğrafi görüntülerinde çok fazla olduğu görülen ergimemiş ya da kısmen ergimiş metal tozlarının tarama yönünde oldukça az olduğu görülmektedir. Bu durum tarama yönünün üretim

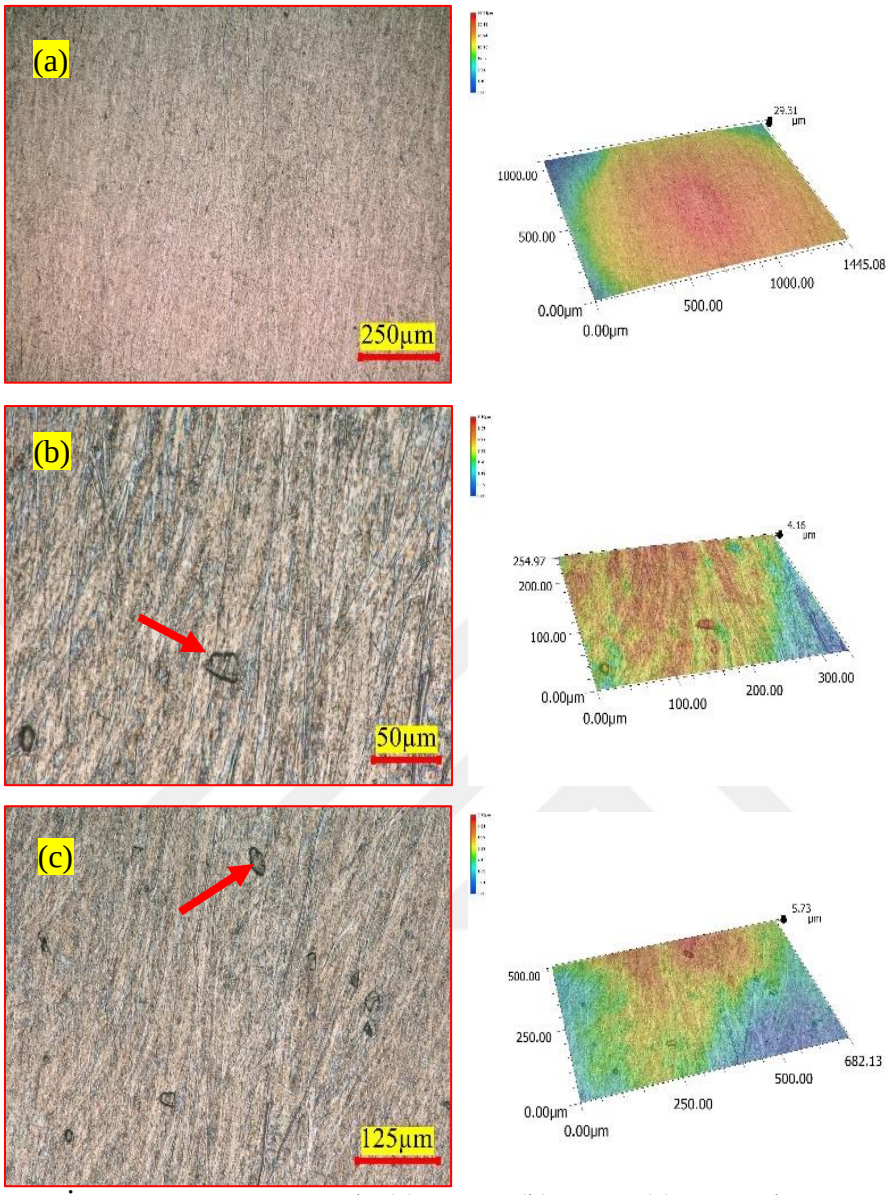
yönüne göre daha pürüzsüz olmasını sağlamaktadır. Ancak tarama yönüne uygulanabilecek ikincil işlemler ile bu yüzeyin de daha kaliteli ve pürüzsüz olması sağlanabilir.



Şekil 4.2. İşlem görmemiş parçanın tarama yönünde (a) 250x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmelerde alınmış yüzey topoğrafi görüntüleri.

Şekil 4.3' te SYİ operasyonu sonucunda farklı büyütmelerde elde edilen yüzey topoğrafi görüntüleri sunulmuştur. Yüzey topoğrafi görüntüleri incelendiğinde yüzey kalitesinin arttığı görülmektedir. İşlem görmemiş parçanın yüzeyinde görülen metal tozlarının, aşındırıcı malzemelerin yüzeye çarpması sonucu yüzeyden uzaklaştırıldığı söylenebilir. 500x ve 1000x büyütmede yüzeyden kopan metal tozlarından kaynaklanan boşluklar

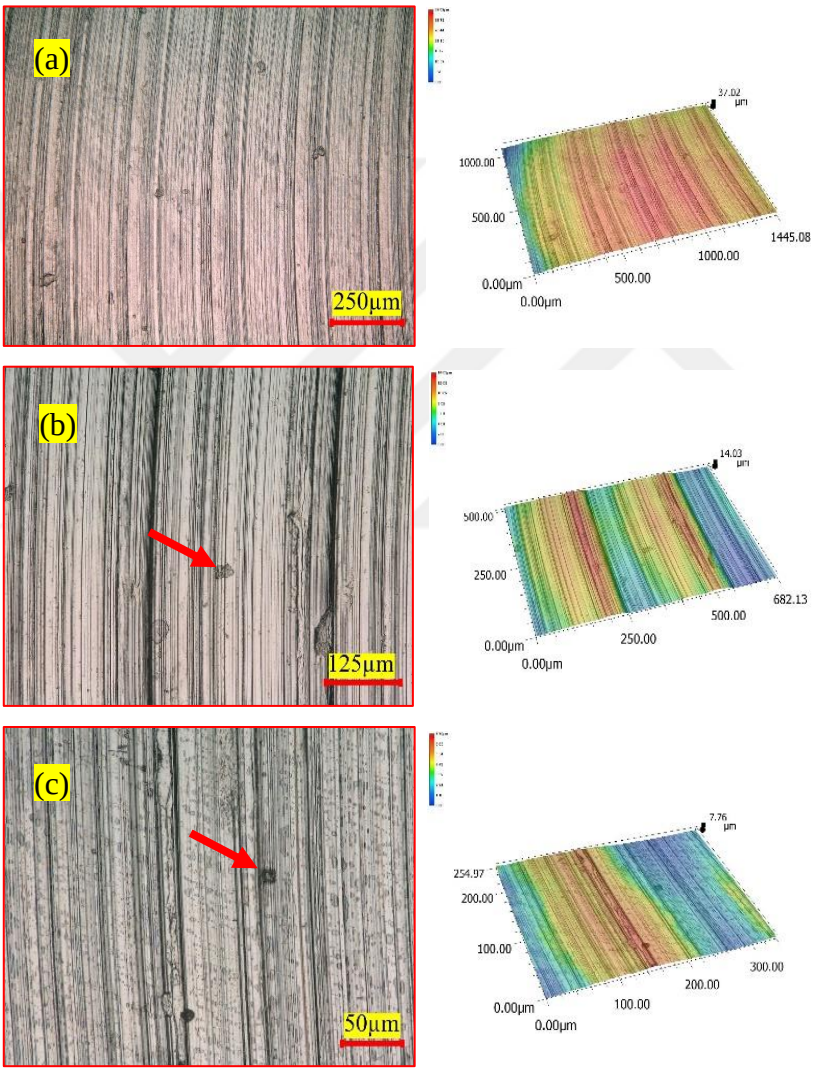
görülmektedir. İşlem görmemiş parçaların yüzeyindeki dalgalı yapı da SYİ operasyonu ile giderilmiştir. Aşındırıcı malzemelerin yüzeye çarpma yönüne göre yüzeyde küçük kanallar oluşmuştur. Bu kanallar yüzey pürüzlülüğü bölümünde incelenen üretim yönü ve üretim yönüne dik yöndeki pürüzlülükler arasındaki farkın oluşmasına neden olmuştur. SYİ operasyonunun uygulanma süresi parçaların yüzey özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yöntemin uygulanma süresi ne kadar fazla ise parçaların yüzey kalitesi o kadar artmaktadır. 2 saat ve 4 saat süre ile uygulanan SYİ operasyonu sonucunda elde edilen yüzey özellikleri incelendiğinde [22, 38], 6 saat süre ile uygulanan parçalarda daha kaliteli yüzeylerin elde edildiği görülmektedir. SYİ operasyonu her ne kadar parçaların yüzey özelliklerini geliştiren bir operasyon olsa da karmaşık şekilli parçaların iç yüzeylerinde, dış yüzeylerdeki kadar etkin olmayacağı düşünülmektedir. Aşındırıcı malzemelerin parçaların iç yüzeylerine nüfuz etmesinin zor olması iç yüzeylerdeki etkinliğinin düşük olmasına sebep olabilir. Ayrıca SYİ operasyonun uygulanabilmesi için parçaların tutucalara bağlanması gerekliliğinden dolayı üretilen parçalar tutuculara bağlanabilecek şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 4.3. SYİ operasyonu sonucunda (a) 250 x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmedeki yüzey topoğrafi görüntüleri.

Şekil 4.4' te frezeleme operasyonu sonucunda farklı büyütmelerde elde edilen yüzey topoğrafi görüntüleri sunulmuştur. Yüzeylerde frezeleme operasyonu sonucunda oluşan ilerleme izleri görülmektedir. İlerleme izlerinin etkisiyle yüzeyde dip ve tepeler oluşmuştur. SYİ operasyonunda olduğu gibi frezeleme operasyonu sonucunda da ergimemiş ya da kısmen ergimiş metal tozlarının yüzeyden kaldırılmasıyla boşlukların oluştuğu görülmektedir. İşlem görmemiş parçanın yüzeyinde gözlemlenen metal tozları ve dalgalı yapı talaş kaldırma işlemi ile yok edilmiştir. Ancak frezeleme operasyonundan kaynaklanan ilerleme izleri yüzeyin kalitesini düşürmektedir. Daha hızlı kesme hızı ve

daha düşük ilerleme hızının seçilmesiyle ilerleme izlerinin etkisi yok edilerek daha pürüzsüz bir yüzey elde edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü bölümünde üretim yönü ve üretim yönüne dik yönde ölçülen pürüzlülük değerlerindeki farklılığın sebebi frezeleme operasyonu sonucunda oluşan ilerleme izlerinden kaynaklanmaktadır. Frezeleme operasyonu parçaların yüzey kalitesini artıran bir diğer ikincil işlem olmuştur. Ancak frezeleme operasyonunda parçaların tezgâha bağlanması konusundaki kısıtlar göz önünde bulundurularak tasarımlar gerçekleştirilmelidir.



Şekil 4.4. Frezeleme operasyonu sonucunda (a) 250 x, (b) 500x, (c) 1000x büyütmedeki yüzey topoğrafi görüntüleri.

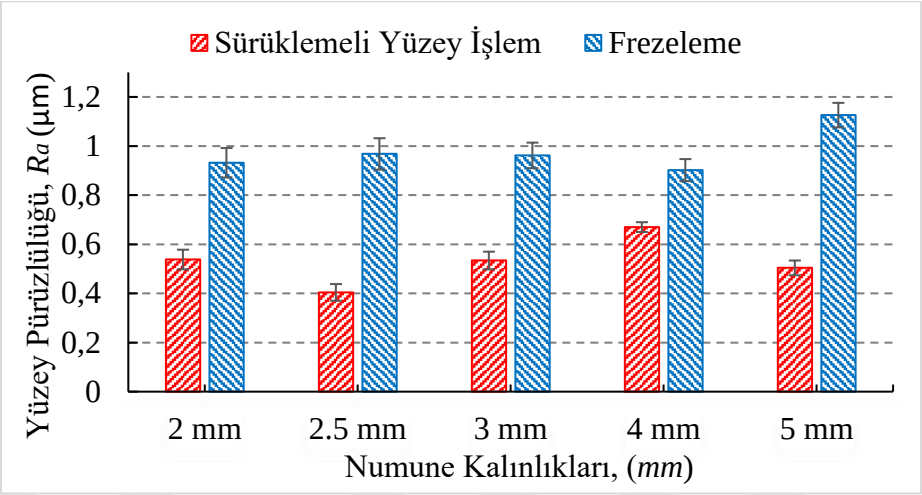
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, birbiri ile temas halinde çalışacak parçaların iyi performans göstermeleri ve yorulma ömürlerinin iyi olması açısından oldukça önemli bir kriterdir. Yüzey pürüzlülüğü yüksek olan parçalar zayıf mekanik, aşınma ve korozyon direncine sahiptir [39, 40]. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların yüksek yüzey pürüzlülük değerleri yöntem için en önemli kısıtlardan biridir ve üretilen parçaların verimli bir şekilde kullanılabilmesi için bu kısıtın bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Şekil 4.5' te SYİ ve frezeleme operasyonlarından sonra farklı kalınlıklardaki parçaların üretim yönü boyunca ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri sunulmuştur. 1 mm kalınlığındaki çekme testi numunesinin SYİ operasyonu sırasında kırılması sebebiyle bu numunenin pürüzlülük değerleri şekillerde sunulmamıştır. 1 mm kalınlığındaki numunenin frezeleme sonucunda üretim yönü boyunca pürüzlülük değeri 0,94 µm olarak ölçülmüştür. İşlem görmemiş parçaların üretim yönü boyunca yüzey pürüzlülüğü ortalama 4,441 µm olarak ölçülmüştür. Şekilde açıkça görüldüğü gibi her iki operasyon sonucunda da yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalmıştır. Frezeleme operasyonu sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinin 4,441 µm dan 0,9 µm a kadar düştüğü görülmüştür. Numune kalınlığının artması ya da azalması sonucunda pürüzlülüklerde belirli bir artma veya azalma eğilimi gözlemlenmemiş, pürüzlülük değerleri nispeten birbiri ile yakın sonuçlar vermiştir. Frezeleme operasyonu sonucunda parçaların yüzeylerine yapışmış halde bulunan kısmen ergimemiş metal tozları, yüzeyden uzaklaştırılarak yüzeydeki dalgalı yapı kısmen yok edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki düşüşün sebebi yüzeye yapışan metal tozlarının frezeleme ile yok edilmesine bağlanabilir.

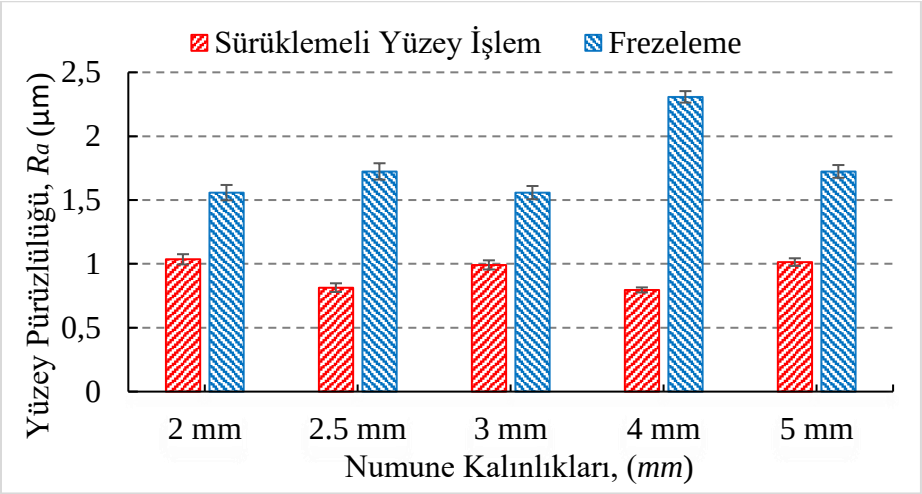
SYİ operasyonu sonucunda parçaların pürüzlülüklerinin oldukça azaldığı görülmüştür. Pürüzlülük değerleri yaklaşık 0,5 µm olarak ölçülmüştür. SYİ operasyonu sonucunda ölçülen pürüzlülük değerleri frezeleme sonucunda ölçülen pürüzlülük değerlerinden yaklaşık %50 oranında daha düşük olmuştur. Yüzey pürüzlülük değerleri operasyonun gerçekleştirilme sürecine bağlı olarak değişmektedir. 2 saat ve 4 saat süre ile gerçekleştirilen SYİ operasyonu sonucunda parçanın yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla yaklaşık 3,2 µm ve 2,8 µm olduğu görülmüştür [22]. Bu çalışmada SYİ operasyonu 6 saat gerçekleştirilmiştir. 6 saat süre sonunda pürüzlülük değerleri işlem görmemiş parçaların pürüzlülüğüne göre %88 oranında azalmıştır. İşlem sırasında aşındırıcı malzemeler

parçaların yüzeyine çarparak yüzeye yapışmış metal tozlarını yüzeyden kaldırmış ve daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir.



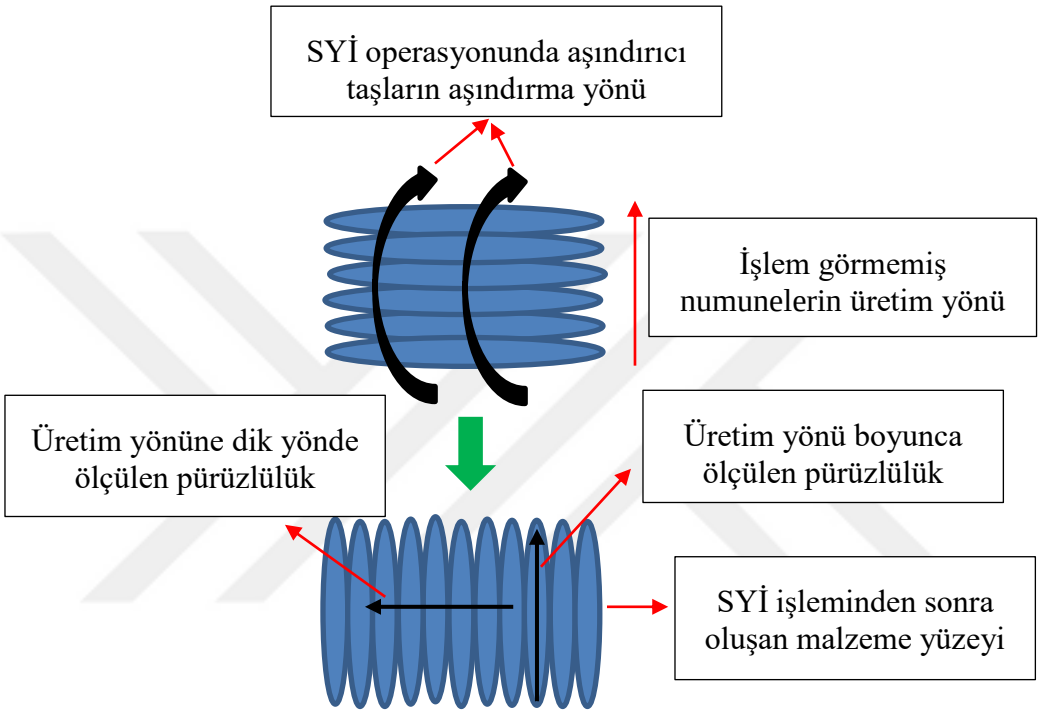
Şekil 4.5. İkincil işlemlerden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri (üretim yönü).

Şekil 4.6' da SYİ ve frezeleme operasyonlarından sonra farklı kalınlıklardaki parçaların üretim yönüne dik yönde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri sunulmuştur. SYİ operasyonundan sonra pürüzlülük değerleri işlem görmemiş parçaların pürüzlülük değerine göre yaklaşık %79 oranında azalmışken frezeleme operasyonu sonucunda bu azalma yaklaşık %64 olmuştur. Üretim yönüne dik yönde ölçülen pürüzlülükler de malzeme kalınlığı ile belirli bir artma ya da azalma eğilimi göstermemiştir.



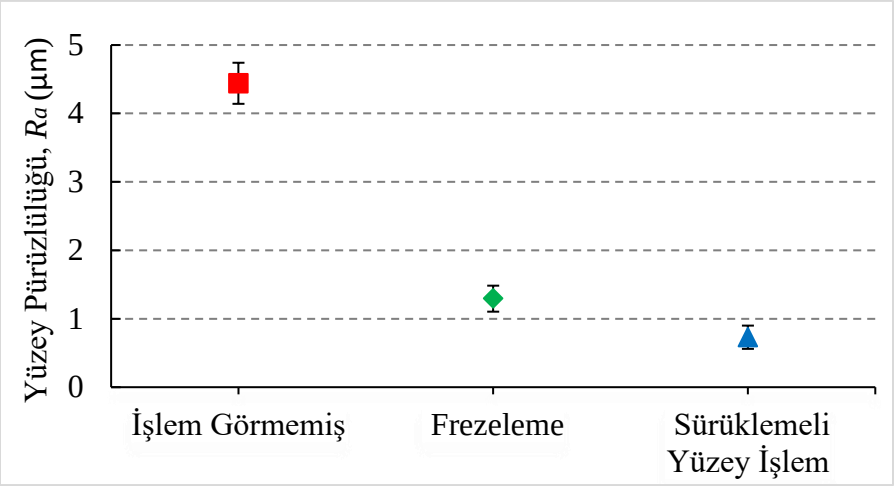
Şekil 4.6. İkincil işlemlerden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri (üretim yönüne dik).

Üretim yönüne dik yönde ölçülen pürüzlülük değerleri üretim yönü boyunca ölçülen pürüzlülük değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun sebebi ikincil işlemlerin uygulanma yönünden kaynaklanmaktadır. SYİ operasyonunun uygulanma yönü işlem görmemiş malzemenin üretim yönüne dik olduğu için üretim yönüne dik yönde ölçülen pürüzlülük değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.7' de SYİ operasyonunda sonra malzeme yüzeyinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 4.7 SYİ işleminden sonra malzeme yüzeyinin şematik gösterimi.

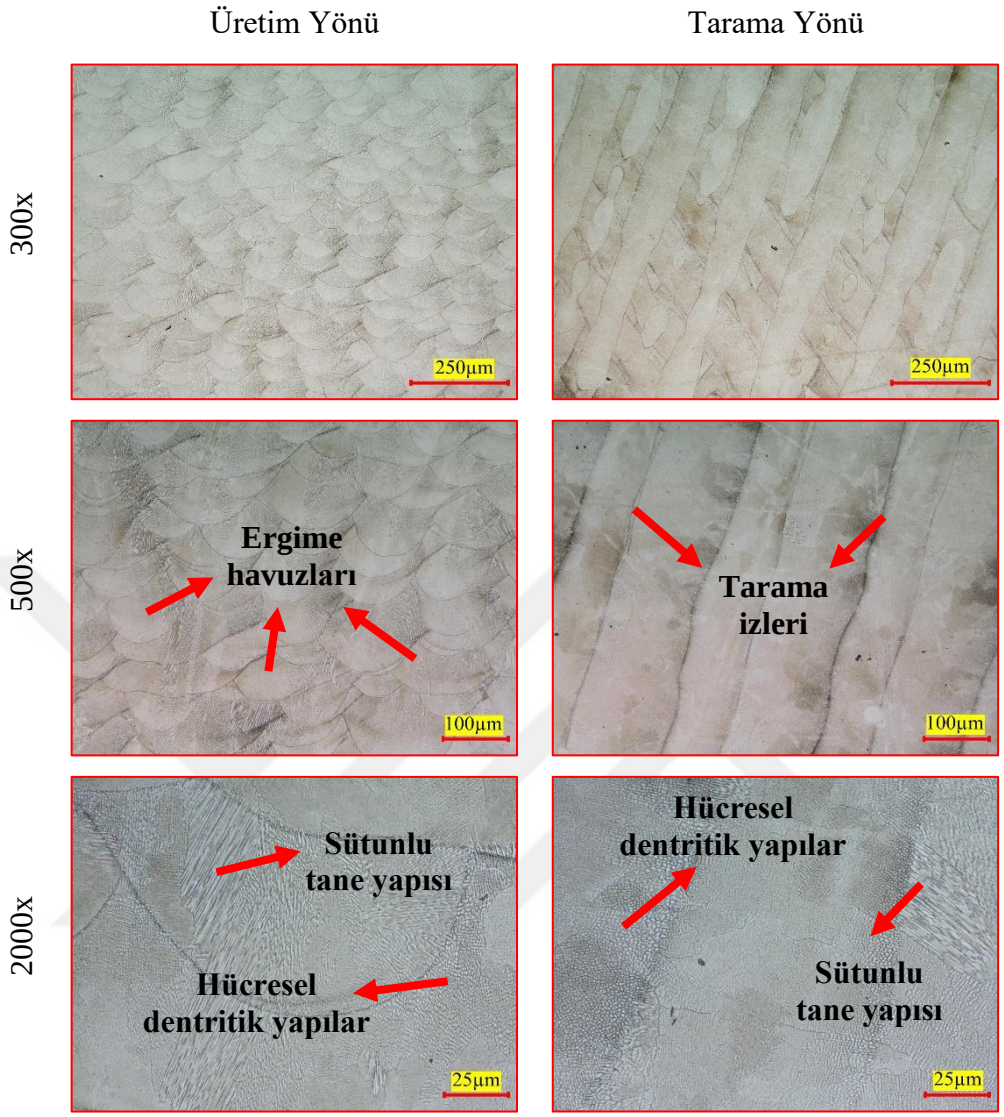
Şekil 4.8' de ikincil işlemlerden sonra bütün numunelerden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri sunulmuştur. İşlem görmemiş numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü 4,441 µm olarak ölçülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda Eİ yöntemiyle üretilen Inconel 718 alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin 6-15 µm arasında ölçüldüğü görülmüştür [39, 41]. Pürüzlülük değerlerindeki bu farklılıklar üretim parametrelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere SYİ ve frezeleme operasyonu pürüzlülük değerlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Frezeleme sonucunda ortalama pürüzlülük değeri 1,3 µm ölçülürken SYİ operasyonu sonucunda ortalama pürüzlülük değeri 0,73 µm olarak ölçülmüştür. Bu çalışma SYİ ve frezeleme operasyonunun Eİ yöntemi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerlerini düşürebilecek ikincil işlemler olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.8. İkincil işlemlerden sonra numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

4.3 Mikroyapı Analizi

İşlem görmemiş parçanın ve ikincil işleme maruz kalmış parçaların dijital optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüleri bu bölümde incelenmiştir. Şekil 4.9' da işlem görmemiş parçanın üretim yönü ve tarama yönünde farklı büyütmelerde alınmış mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. Üretim yönünde alınan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ergime havuzları görülmektedir. 2000x büyütmede alınan görüntü incelendiğinde ergime havuzları içerisinde sütunlu tane yapıları ve hücresel dentritik yapıların oluştuğu görülmektedir. Hücresel dentritik yapılar bal peteği formunda oluşan yapılar olup bu isimle de adlandırılabilir. Üretim yönünde alınan mikroyapı görüntülerindeki ergime havuzları, sütunlu tane yapıları ve hücresel dentritik yapılar SLE yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşımının standart mikroyapısıdır ve literatürde yapılan çalışmalar ile de uyumludur [42].

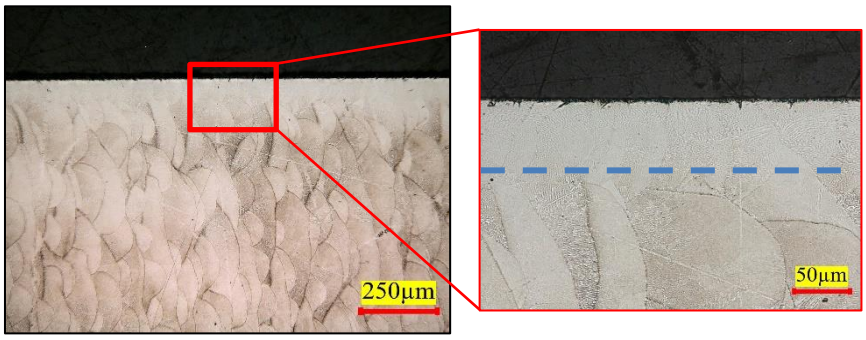


Şekil 4.9. SLE yöntemiyle üretilen Inconel 718 alaşımının üretim yönü ve tarama yönünde farklı büyütmelerde alınan mikroyapı görüntüleri.

Tarama yönünde alınan mikroyapı görüntülerinde ise tarama izleri mikroyapı içerisinde açıkça görülmektedir. 300x büyütmedeki mikroyapı görüntüsü incelendiğinde tarama stratejisinden kaynaklı tarama izlerinin farklı yönlerde olduğu görülmektedir. 2000x büyütmede alınan mikroyapı görüntüsünde üretim yönünde olduğu gibi sütunlu tane yapıları ve hücresel dentritik yapılar mikroyapı içerisinde dağılmış şekilde görülmektedir.

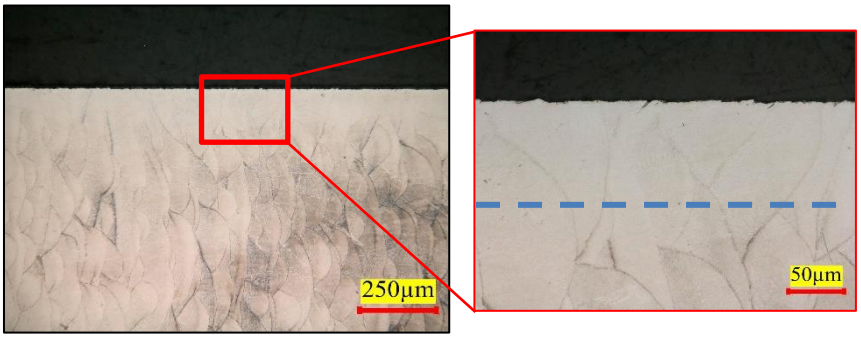
Şekil 4.10' da SYİ operasyonu sonucunda parçanın yüzey altı mikroyapısında meydana gelen değişimler sunulmuştur. SYİ operasyonu sırasında aşındırıcı taşların yüzeye çarpmasıyla oluşan deformasyonlar neticesinde parçanın yüzey altı mikroyapısında kısmi

değişimler meydana gelmiştir. Ergime havuzu izleri kısmen yok olmuş, sütunlu tane yapılarının ve hücresel dentritik yapıların belirli yönlere doğru kaydığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. SYİ operasyonundan sonra yüzey altında meydana gelen mikroyapı değişimi.

Şekil 4.11' de frezeleme operasyonu sonucunda parçanın yüzey altı mikroyapısında meydana gelen değişimler sunulmuştur. Frezeleme operasyonu sırasında parça yüzeyi yüksek sıcaklıklardan kaynaklanana termal etkilere ve mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Bu termal ve mekanik etkiler neticesinde parça yüzeyi ve yüzey altında deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekilde parçanın yüzey altında deformasyonlar sonucunda ergime havuzu izlerinin silikleştiği görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda delme işlemi ve frezeleme işlemi sonucunda parçaların yüzey altında meydana gelen değişimler incelendiğinde benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür [29, 43]. Frezeleme operasyonu sonucunda yüzey altında meydana gelen değişimin kalınlığı, SYİ operasyonunda meydana gelen değişim kalınlığına göre nispeten daha çoktur. Bu durum sertlik bölümünde incelenen, parçaların yüzey altında meydana gelen sertlik artışlarını destekler niteliktedir.

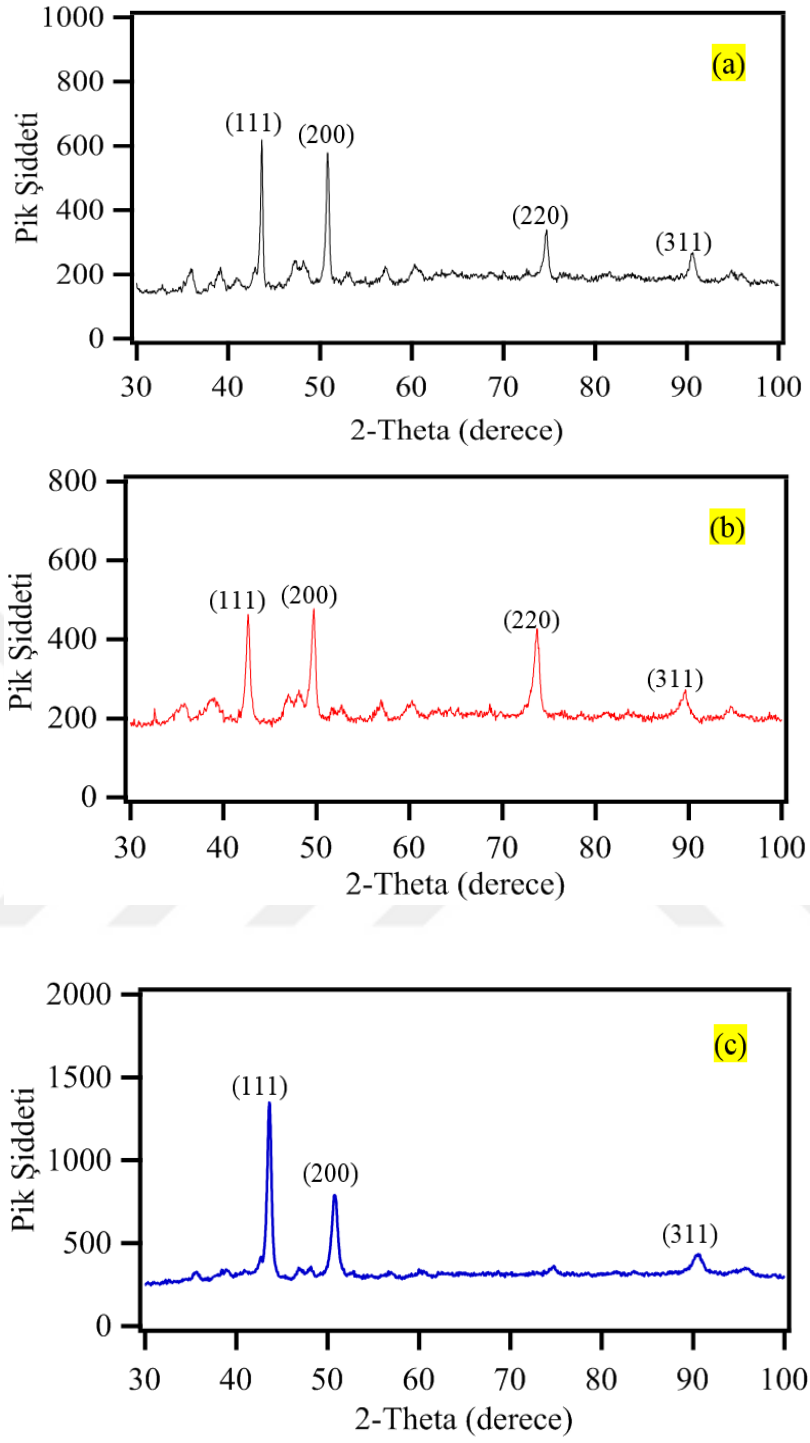


Şekil 4.11. Frezeleme operasyonundan sonra yüzey altında meydana gelen mikroyapı değişimi.

4.4 XRD Faz Analizi

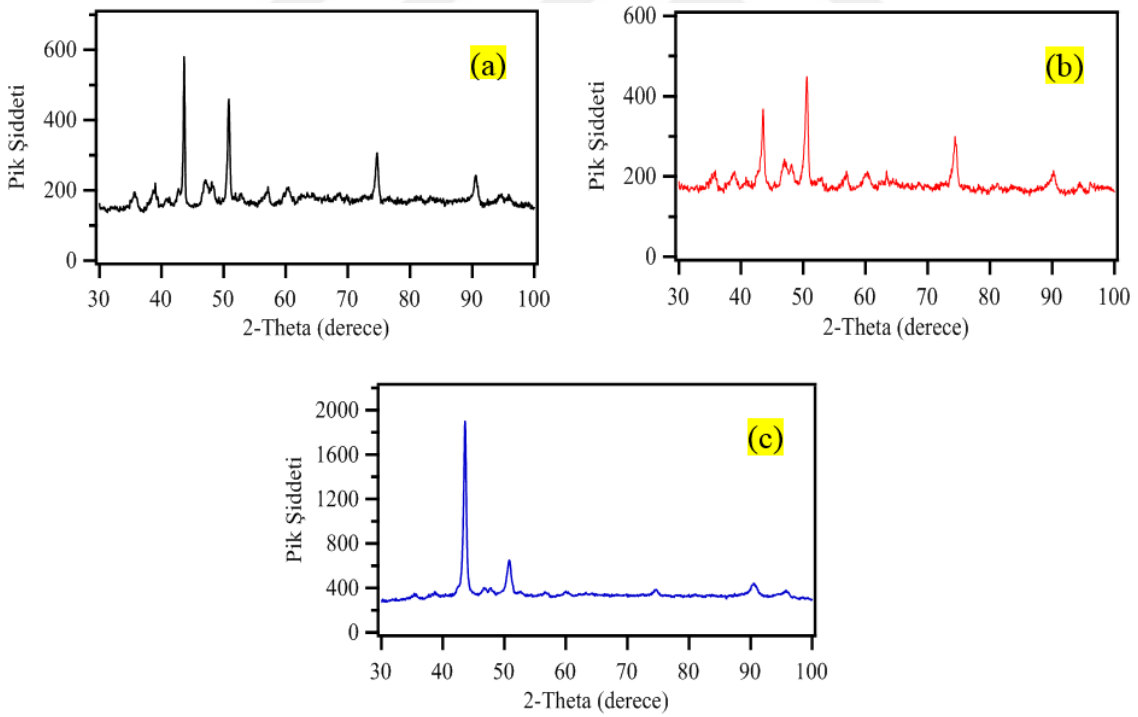
XRD analizi malzemelerin mikroyapısında meydana gelen tane küçülmesi olaylarını ve işlem görmüş yüzeylerin mikrosertlik değişimlerinin yorumlanmasında ve ayrıca işlem görmüş yüzeylerde meydana gelebilecek olası faz dönüşümlerinin analiz edilmesinde kullanılan etkin bir yöntemdir. Şekil 4.12' de 2 mm kalınlığındaki işlem görmemiş, frezeleme operasyonuna ve SYİ operasyonuna maruz kalmış parçaların XRD profilleri sunulmuştur. İşlem görmemiş parçanın XRD profili incelendiğinde (111) ve (200) olmak üzere iki ana pikin etkin olduğu görülmüştür. Bu piklerin yanı sıra (220) ve (311) pikleri de gözlemlenmektedir. Literatürde işlem görmemiş Inconel 718 alaşımına ait benzer XRD profilleri elde edilmiştir [41, 44]. İşlem görmemiş parçada gözlemlenen (111) ve (200) pikleri yüzey merkezli kübik kristal yapıdaki γ (Ni-Cr-Fe) ve γ' Ni_3 (Al, Ti) fazlarıdır [16]. SYİ operasyonu sonucunda (111) ve (200) pikleri işlem görmemiş parçaya benzer şekilde ana pikler olmuş ancak (220) pikinin şiddetinde artış olduğu gözlemlenmiştir. SYİ operasyonu sonucunda XRD profilinde (111), (200) ve (220) olmak üzere üç ana pikin olduğu görülmektedir.

Frezeleme operasyonu sonucunda parçanın XRD profilinin, işlem görmemiş parçanın XRD profiline göre oldukça değiştiği görülmektedir. (111) ve (200) piklerinin şiddeti artmış, pik açılarında kaymalar meydana gelmiş ve genişlemeler olmuştur. Frezeleme operasyonu sonucunda parçanın yüzeyi termal ve mekanik etkiler altında kalmış, bu termal ve mekanik etkiler plastik deformasyonlar oluşturmuştur. Parça yüzeyinde oluşan plastik deformasyonlar XRD profilindeki pik şiddetlerinin artmasına ve genişlemesine neden olmuştur. SYİ operasyonunda parçanın yüzeyi frezeleme operasyonunda olduğu gibi yüksek termal ve mekanik etkilere maruz kalmadığı için XRD profili işlem görmemiş parçanın XRD profiline benzer olmuştur. Pik şiddetindeki ve genişliğindeki artışın kristal yapıda tane küçülmelerine işaret olduğu yorumlanmıştır [16]. Bu durum mikrosertlik bölümünde incelendiği üzere parçaların yüzey ve yüzey altı sertliklerindeki artış ile de uyumludur.



Şekil 4.12. 2 mm kalınlığında (a) işlem görmemiş, (b) sürüklemeli yüzey işlem operasyonuna ve (c) frezeleme operasyonuna maruz kalmış numunelerin XRD profilleri.

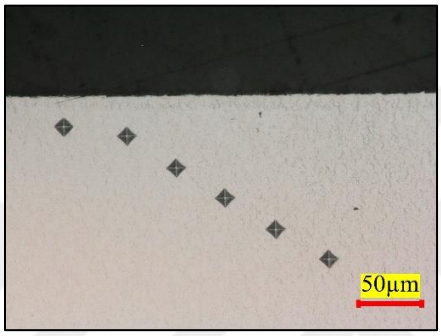
Şekil 4.13’ te 4 mm kalınlığındaki işlem görmemiş, SYİ ve frezele operasyonlarına maruz kalmış parçaların XRD profilleri sunulmuştur. İşlem görmemiş numunenin XRD profili incelendiğinde 2 mm kalınlığında gözlemlenen sonuçlar burada gözlemlenmiştir. Ana piklerin (111) ve (200) pikleri olduğu görülmüştür. SYİ operasyonu sonucunda (111) ve (200) piklerinin şiddetlerinde 2 mm kalınlığındaki parçaya göre azalma olduğu görülmüştür ancak azalma miktarı göz önüne alındığında pik şiddetlerindeki azalmanın büyük bir farklılık yaratmayacağı düşünülmektedir. Frezeleme operasyonu sonucunda (111) pikinin şiddetinin 2 mm kalınlığındaki numuneye göre daha fazla arttığı ve (200) pikinin şiddetinde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Bu durum frezeleme operasyonu sırasında parçanın yüzeyinde farklı bölgelerde farklı dislokasyon yoğunluğunun oluşmasından kaynaklanabilir. Ancak pik şiddetlerindeki artış ve azalış miktarı incelendiğinde çok farklı sonuçların elde edilmediği anlaşılmaktadır. Bu durum da parça kalınlıklarının ikincil işlemler sonucunda elde edilen XRD profillerinde etkin bir rol oynamadığını göstermektedir.



Şekil 4.13. 4 mm kalınlığında (a) işlem görmemiş, (b) sürüklemeli yüzey işlem operasyonuna ve (c) frezeleme operasyonuna maruz kalmış numunelerin XRD profilleri.

4.5 Mikrosertlik Analizi

Metalik malzemelerde malzemelerin yüzey ve yüzey altı sertliği malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [42]. Çalışma kapsamında ikincil işlemler sonrasında parçaların yüzey ve yüzey altı sertliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 4.14' te parçaların yüzey altı sertlik ölçüm izlerinin görüntüsü sunulmuştur. İkincil işlemlerin parçaların yüzey altında meydana getirdiği sertlik değişimler belirli aralıklarla ölçülerek sertlik değişiminin yüzeyden ne kadar derinliğe kadar olduğu incelenmiştir.

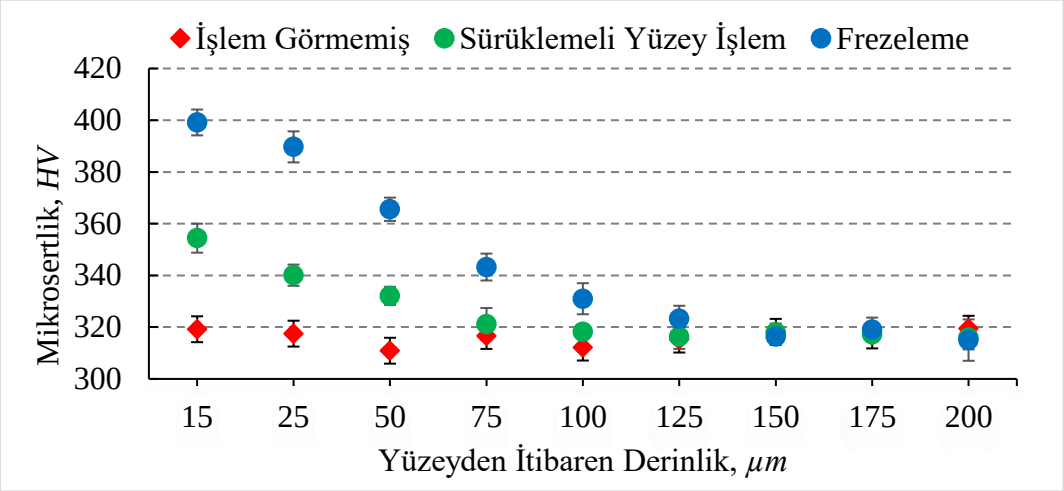


Şekil 4.14. Malzemelerin yüzey altı sertlik ölçüm izlerinin görüntüsü.

Şekil 4.15' te 2 mm kalınlığındaki parçaların ikincil işlemler sonrasında mikrosertlik değişimleri sunulmuştur. İşlem görmemiş parçanın sertliği 310-320 Vickers (HV) olarak ölçülmüştür. Frezeleme operasyonu sonucunda parçanın yüzey sertliği yaklaşık %30 artarak 408 HV olarak ölçülmüştür. Sertlik değişiminin yüzeyden itibaren yaklaşık 125 µm derinliğe kadar olduğu görülmüştür. Talaş kaldırma operasyonları sonucunda parçaların yüzeyinde termal ve mekanik etkiler neticesinde plastik deformasyonlar meydana gelmektedir [45]. Plastik deformasyon sonucunda oluşan dislokasyonlar ve pekleşme, parçaların yüzeyinde sertliğin artmasına sebep olmaktadır. Talaş kaldırma operasyonlarında kesme bölgelerinde oluşan kesme sıcaklıkları da parçaların pekleşme oranı üzerinde doğrudan etki edebilmektedir [46]. Ayrıca kesme bölgesinde sıcaklığın artmasıyla takım-parça arasında yapışma ve kayma durumu meydana gelmekte, bu da yüzey sertliğinin artmasına neden olmaktadır [47].

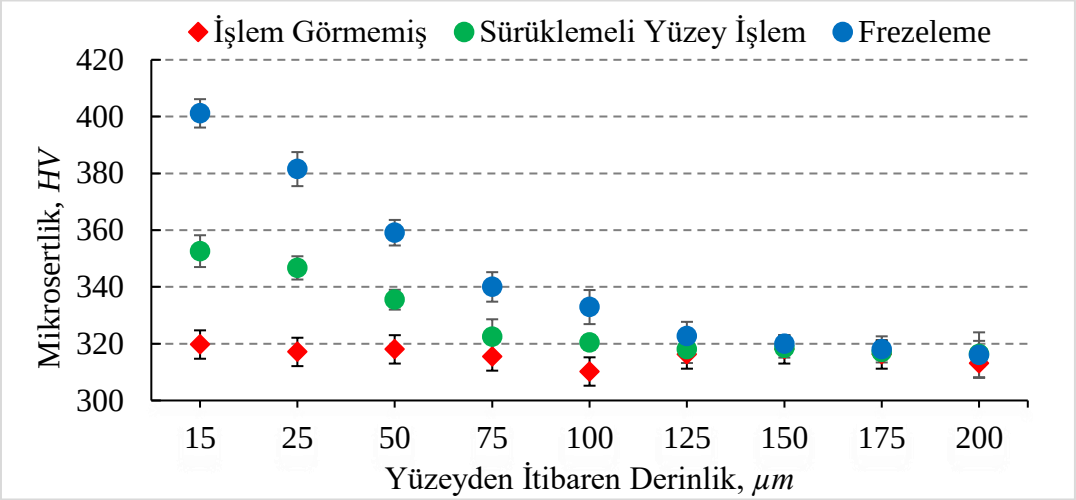
SYİ operasyonu sonucunda 2 mm kalınlığındaki parçanın yüzey sertliği yaklaşık 360 HV olarak ölçülmüştür. Sertlik değişimi yüzeyden itibaren yaklaşık 75 µm derinliğe kadar gözlemlenmiştir. SYİ operasyonu sonucunda frezeleme operasyonu kadar olmasa da parçaların yüzeyinde aşındırıcı malzemeler vasıtasıyla deformasyonlar meydana

gelmektedir. Aşındırıcı malzemelerin yüzeye sürekli olarak çarpması sonucunda parça yüzeyinde sertleşmenin olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde ikincil işlem olarak bilyalı dövme [31], lazer parlatma [32], taşlama [48] gibi ikincil işlemlerin de parçaların yüzey ve yüzey altı sertlik değerlerinde artışlara neden olduğu görülmüştür.



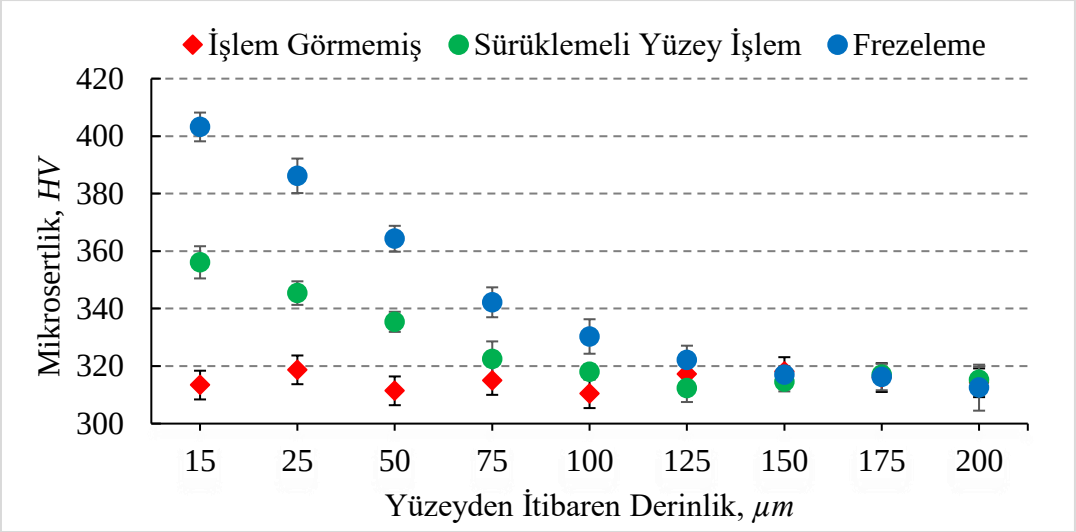
Şekil 4.15. 2 mm kalınlığındaki numunelerin ikincil mikrosertlik değişimleri.

Şekil 4.16' da 4 mm kalınlığındaki parçaların ikincil işlemler sonucunda yüzey ve yüzey altında meydana gelen mikrosertlik değişimleri sunulmuştur. 2 mm kalınlığındaki parçalara benzer sonuçlar elde edilmiş, frezeleme ve SYİ operasyonları sonucunda yüzey sertlikleri sırasıyla 410 HV ve 356 HV olarak ölçülmüştür. Malzeme kalınlığının değişmesi ile ikincil işlemler sonucunda sertlik değişimlerinde önemli farklılıklar gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.16. 4 mm kalınlığındaki numunelerin mikrosertlik değişimleri.

Şekil 4.17’ de ikincil işlemler sonrasında bütün parçalardan ölçülen ortalama mikrosertlik değişimleri sunulmuştur. Parçaların ikincil işlemlerden sonra sertlik değerleri yüzey altına inildikçe azalmaktadır. Bu durumun sebebi termal ve mekanik etkilerin yüzey altına indikçe azalmasıdır. Frezeleme operasyonu sonucunda parçaların yüzey sertliği yaklaşık %31 artarak 413 HV olarak ölçülmüştür. SYİ operasyonu sonucunda ise %15 artış ile 362 HV olarak ölçülmüştür. Bu değerler yüzey altına indikçe azalmış ve frezeleme operasyonu sonucunda yaklaşık 125 µm, SYİ operasyonu sonucunda ise yaklaşık 75 µm derinliğe kadar etkilenmiş alan olduğu gözlemlenmiştir. Frezeleme ve SYİ operasyonlarının parçaların yüzey ve yüzey altı sertliğini arttıran ikincil işlemler olduğu görülmektedir.

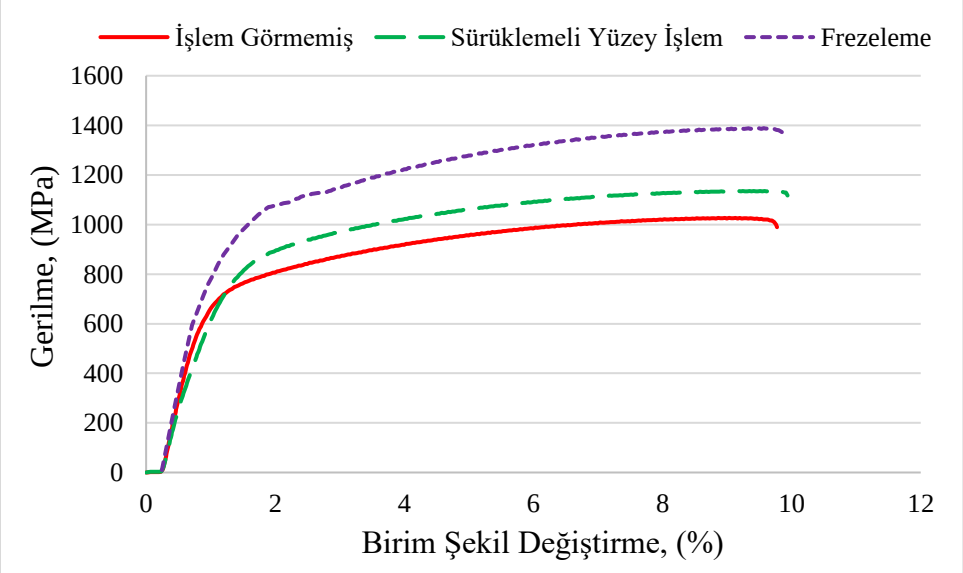


Şekil 4.17. İkincil işlemler sonrasında numunelerin ortalama mikrosertlik değişimleri.

4.6 Çekme Testi Analizi

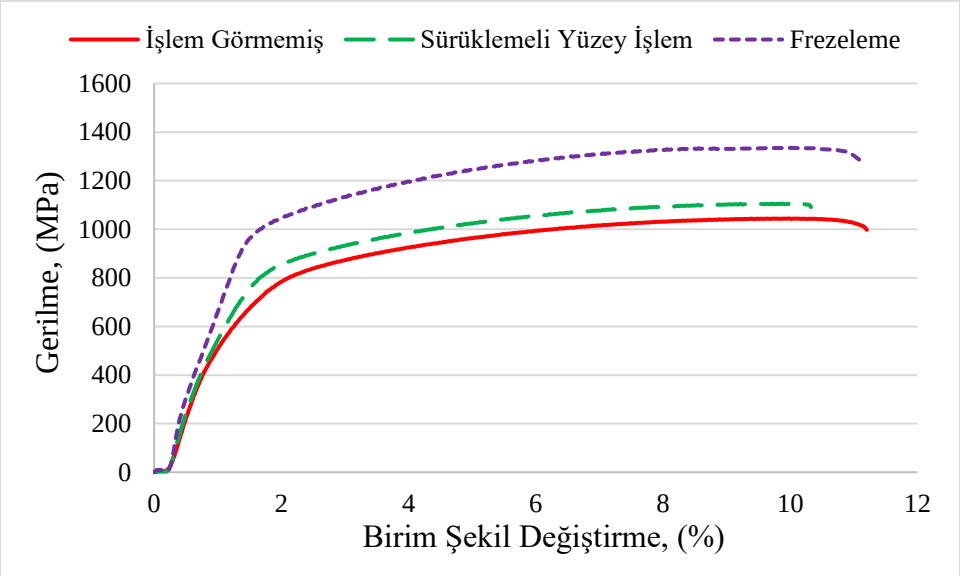
Metalik malzemeler kuvvet altında deforme olup şekil ve boyut değişiklikleri gösterebilirler. Malzemelerin statik yük altında elastik ve plastik davranışlarını incelemek için çekme deneyleri gerçekleştirilir. Çekme deneyi malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın test yöntemlerinden biridir. Çekme deneyinde bir malzemenin statik ve yavaş uygulanan bir yüke karşı dayanımı ölçülür. Belirli standartlara göre hazırlanan numuneler çekme testi cihazına bağlanarak çeneler yardımıyla koparılana kadar çekilerek dayanımları ölçülür. Çekme testi sonucunda malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve yüzde uzama miktarı gibi özellikleri tespit edilir.

Şekil 4.18’ de 2 mm kalınlığındaki işlem görmemiş ve ikincil işlem görmüş parçaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme birim şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. Şekilde açıkça görüldüğü gibi her iki ikincil işlem sonucunda da parçaların dayanımı artmıştır. İşlem görmemiş parçanın akma dayanımı yaklaşık 700 MPa iken kopma dayanımının 1000 MPa’ ın üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. SYİ operasyonundan sonra parçanın hem akma dayanımında hem de kopma dayanımında artışlar olduğu görülmüştür. Parçanın akma dayanımının yaklaşık 835 MPa, kopma dayanımının ise 1100 MPa’ ın üzerinde olduğu görülmektedir. Frezeleme operasyonu sonucunda SYİ operasyonunda olduğu gibi parçanın mekanik özelliklerinde gelişmeler olmuştur. Hem akma dayanımı hem de kopma dayanımı işlem görmemiş parçaya göre oldukça artmıştır. Parçaların uzama değerlerinde ikincil işlemler sonucunda büyük bir farklılık oluşmamıştır. Uzama değerlerinin yaklaşık %10 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. 2 mm kalınlığındaki parçaların gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Şekil 4.19’ da 3 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme birim şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. 2 mm kalınlığındaki numunelerden elde edilen sonuçlara benzer şekilde ikincil işlemlerden sonra parçaların akma dayanımı ve kopma dayanımının arttığı görülmektedir. Ancak akma ve kopma dayanımındaki artış 2 mm kalınlığındaki parçalara göre nispeten daha az olmuştur.



Şekil 4.19. 3 mm kalınlığındaki parçaların gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

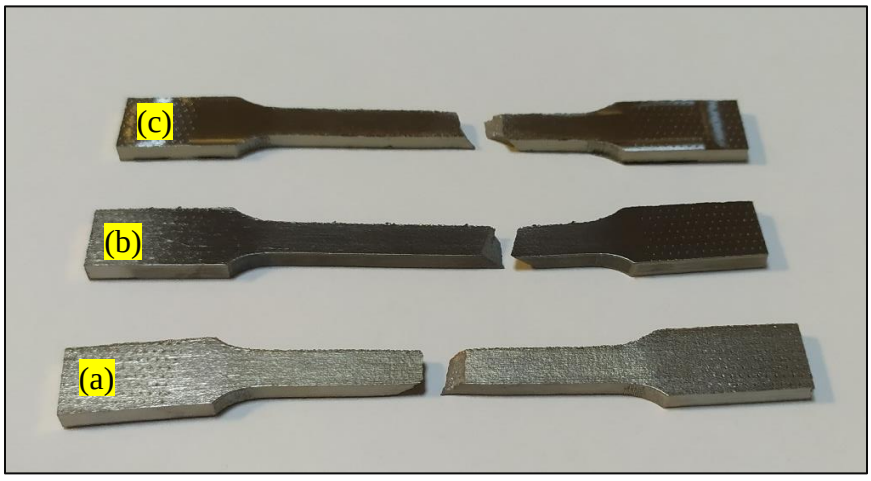
Tablo 4.1' de 1 mm ve 4 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı, kopma dayanımı ve yüzde uzama miktarları sunulmuştur. SYİ operasyonu sırasında 1 mm kalınlığındaki numunenin kırılması sebebiyle test gerçekleştirilememiştir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde parça kalınlıklarının artması ile ikincil işlemlerin etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. 1 mm kalınlığındaki parçalar ele alındığında işlem görmemiş parçanın akma dayanımı ve kopma dayanımının sırasıyla 694 ve 965 MPa olduğu, frezeleme operasyonu sonucunda ise akma dayanımının %69 artarak 1177 MPa, kopma dayanımının ise %54 artarak 1490 MPa olduğu görülmüştür. Kalınlığın 1 mm'den 4 mm'ye artması ile işlem görmemiş parça ile frezeleme arasındaki fark akma dayanımında %19, kopma dayanımında ise %9 olmuştur. Aynı trend SYİ operasyonunda da gözlemlenmiştir. İkincil işlemler sonucunda parçaların akma ve kopma dayanımında gözlemlenen artışın sebebi parçaların yüzey ve yüzey altında meydana gelen deformasyonlar sonucunda sertlik değerlerindeki artışlar olduğu düşünülmektedir. Parçaların yüzey ve yüzey altında sertleşen bölgelerin parça kalınlığına oranı, parça kalınlığı arttıkça azaldığı için, parça kalınlıklarının artması ile çekme testi sonuçlarında daha yakın değerler elde edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki parçada frezeleme operasyonu sonucunda etkilenen alan yaklaşık 220 µm, yani parça kalınlığına oranla %22 olmuştur. 4 mm kalınlığındaki parçada ise etkilenmiş alan parça kalınlığına oranla %5,5 olmuştur. SYİ işlem operasyonunda ise etkilenmiş alan yaklaşık 75 µm olmuştur. SYİ operasyonunda hem etkilenmiş alanın hem de parçanın yüzey ve yüzey altı sertliğindeki

artışın daha düşük olması sonucunda akma ve kopma dayanımı frezeleme operasyonuna göre daha düşük çıkmıştır. Parçaların mekanik özelliklerinin gelişmesinde ikincil işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğündeki azalmanın da etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1. 1 mm ve 4 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonuçları.

	İşlem Görmemiş		Sürüklemeli Yüzey İşlem		Frezeleme	
Kalınlık	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm
Akma Dayanımı, MPa	694	711	-	801	1177	852
Kopma Dayanımı, MPa	965	1033	-	1072	1490	1124
% Uzama	8,03	11,29	-	11,14	8,33	11,59

Şekil 4.20' de 3 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonrasındaki görüntüleri sunulmuştur. Kırılma bölgeleri incelendiğinde parçaların sünek kırılma davranışı gösterdiği söylenebilir. Gerilme birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde yüzde uzama değerlerinin oldukça yüksek çıkması parçaların sünek kırılma davranışı gösterdiğini desteklemektedir. Ayrıca parça kalınlıkları arttıkça parçaların yüzde uzama değerlerinde artış olmuştur. Bu artış çentik darbe testinde parça kalınlığının artması ile absorbe edilen enerji değerindeki artışları desteklemektedir.



Şekil 4.20. 3 mm kalınlığındaki parçaların çekme testi sonucundaki görüntüleri (a) işlem görmemiş, (b) SYİ ve (b) frezeleme operasyonuna maruz kalmış parçalar.

4.7 Çentik Darbe Testi Analizi

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan metalik parçalar, üzerine uygulanan yüklere bağlı olarak hasara uğrarlar. Endüstride kullanılacak malzemelerin seçimi yapılırken malzemenin sünek mi gevrek mi olduğu, kırılırken ne kadarlık bir enerji absorbe edeceği veya kırılma enerji miktarının ne kadar olabileceği hakkında bilgiler önem taşımaktadır. Bu bilgilere ulaşmak amacıyla malzemelerin dinamik yüklere karşı ne kadarlık bir kırılma enerjisine sahip olduğunu belirlemek, ani darbe sonucunda parçanın absorbe ettiği enerji miktarını ölçmek ve parçaların süneklik-gevreklik özelliğini belirlemek amacıyla çentik darbe testi yapılır. Bu testi uygulamak için belirli bir yükseklikten bırakılan ağır bir sarkaç salınım hareketiyle parçaya çarparak kırar ve belirli bir yüksekliğe erişir. Sarkacın başlangıçtaki ve sondaki yükseklikleri bilindiği için potansiyel enerji farkı hesaplanır. Bu fark parçanın kırılması sırasında absorbe edilen darbe enerjisini verir. Parçaların ani darbelere karşı dayanımı malzemenin tokluğu ile ilişkilidir.

Tablo 4.2' de 2,5 mm kalınlığındaki işlem görmemiş ve ikincil işleme maruz kalmış parçaların çentik darbe testi sonuçları sunulmuştur. İşlem görmemiş parçanın test sonucunda absorbe ettiği enerji miktarı 17,9 Joule (J) olmuştur. İkincil işlemlerin parçanın absorbe ettiği enerji miktarına etkisi oldukça az olmuştur. SYİ operasyonu sonucunda absorbe edilen enerji miktarı 19,06 J iken frezeleme operasyonu sonucunda bu değer 19,14 J olmuştur. İkincil işlemlerin etkisinin bu kadar az olmasının sebebi parça kalınlığının oldukça düşük olmasından kaynaklanabilir.

Tablo 4.2. 2,5 mm kalınlığındaki numunelerin çentik darbe testi sonuçları.

İkincil İşlem	**Absorbe Edilen Enerji *(J)***
İşlem Görmemiş	17,9
Sürüklemeli Yüzey İşlem	19,06
Frezeleme	19,14

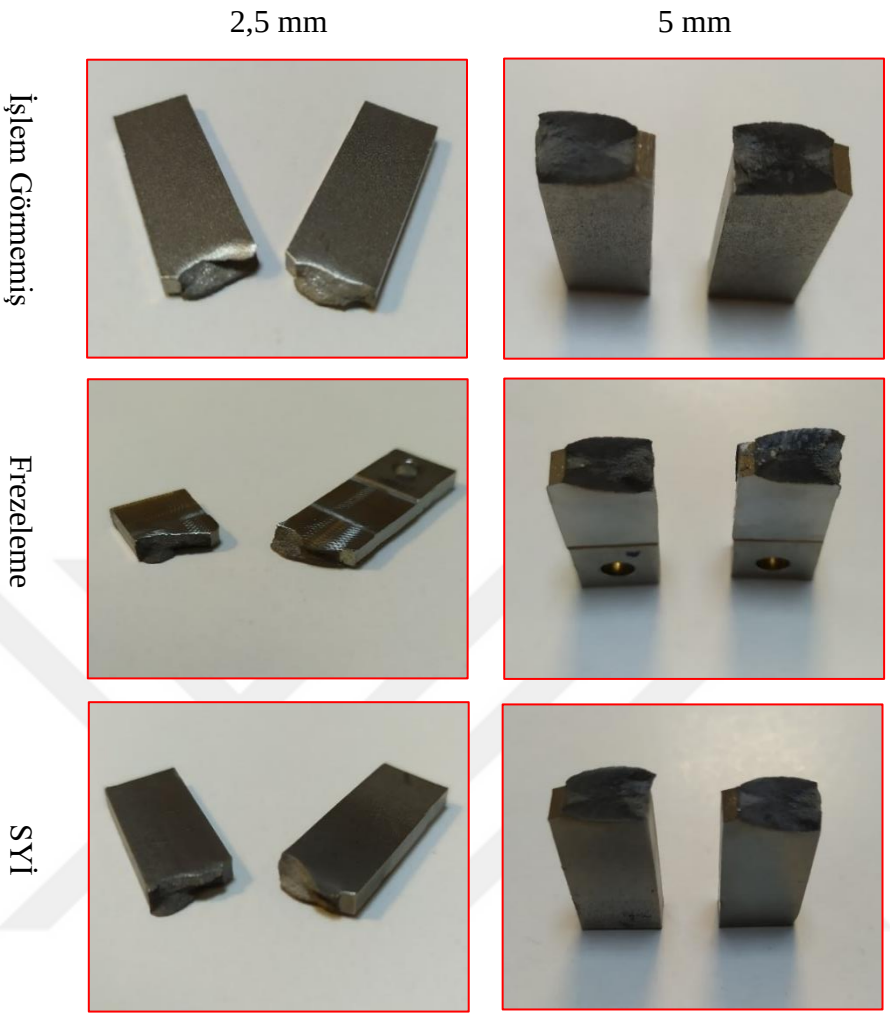
Tablo 4.3' te 5 mm kalınlığındaki parçaların çentik darbe testi sonuçları sunulmuştur. İşlem görmemiş parçanın test sonucunda absorbe ettiği enerji miktarı 44,15 J olmuştur. 5 mm kalınlığındaki parçalarda ikincil işlemlerin absorbe edilen enerji miktarına etkisi 2,5 mm kalınlığındaki parçalara kıyasla daha fazla olmuştur. SYİ operasyonu sonucunda parçanın absorbe ettiği enerji miktarı 46,65 J olmuştur. Frezeleme operasyonu sonucunda absorbe edilen enerji miktarı, işlem görmemiş parçanın absorbe ettiği enerji miktarına

göre %14,3 artarak 50,53 J olmuştur. İkincil işlemler sonucunda oluşan bu farkın sebebi parça kalınlıklarının daha fazla olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca çekme testi sonucunda parça kalınlığının artması ile yüzde uzama değerlerinin artması absorbe edilen enerji miktarındaki artışı desteklemektedir.

Tablo 4.3. 5 mm kalınlığındaki numunelerin çentik darbe testi sonuçları.

İkincil İşlem	**Absorbe Edilen Enerji *(J)***
İşlem Görmemiş	44,15
Sürüklemeli Yüzey İşlem	46,65
Frezeleme	50,53

Şekil 4.21' de çentik darbe testi uygulanan parçaların görüntüleri sunulmuştur. Kırılma bölgeleri incelendiğinde parçaların sünek kırılma davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. İkincil işlemlerden sonra parça yüzeyinde ve yüzey altında meydana gelen sertlik artışının, absorbe edilen enerji değerlerinde artışa sebep olduğu anlaşılmaktadır. Parçaların kalınlığının artması ile ikincil işlemlerden sonra absorbe edilen enerji miktarlarında da artışlar olmuştur. Çekme testi sonuçlarında olduğu gibi absorbe edilen enerji değerlerindeki artışta ikincil işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğünün azalmasının da etkisi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.21. İkincil işlemler sonrasında çentik darbe testi uygulanan numunelerin görüntüleri.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, geleneksel yöntemlere göre oldukça avantajlı bir imalat yöntemi olan SLE yöntemi ile özellikle havacılık, uzay, otomotiv ve biyomedikal sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılan Inconel 718 alaşım malzemesinin ikincil işlemler sonrasında yüzey ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Numuneler farklı cidar kalınlıklarında üretilmiş ve ikincil işlemlerden sonra numuneler çekme testi ve çentik darbe testine tabi tutulmuştur. İkincil işlemlerin parçaların yüzey, yüzey altı ve mekanik özelliklerine etkisi detaylı olarak incelenmiş ve işlem görmemiş parçanın özellikleri ile kıyaslanmıştır.

İkincil işlemlerden sonra parçaların yüzey topoğrafilerinde, yüzey pürüzlülüğünde, mikrosertliğinde ve mikroyapısında meydana gelen değişimler incelenmiş ve XRD analizleri yapılmıştır. Çekme testi ve çentik darbe testi sonuçları ile ikincil işlemlerin parçaların mekanik özelliklerine etkisi, cidar kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- ✓ İşlem görmemiş parçanın yüzey topoğrafi görüntülerinde SLE ile üretim sırasında kısmen ergimiş veya ergimemiş metal tozlarının parça yüzeyine yapışmış olduğu görülmüştür. Tarama yönünde, üretim yönüne göre kısmen daha düzgün bir yüzey elde edilmiş ve metal tozlarının tarama yönünde daha az olduğu görülmüştür. İkincil işlemler ile parçanın yüzeyine yapışmış metal tozları yüzeyden kaldırılarak daha kaliteli bir yüzey elde edilmiştir.
- ✓ İşlem görmemiş parçaların ortalama yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 4,441 µm olarak ölçülmüştür. İkincil işlemler sonucunda yüzey pürüzlülüğü önemli oranda azalmıştır. SYİ ve frezeleme operasyonları sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 0,73 ve 1,29 µm olarak ölçülmüştür.
- ✓ İşlem görmemiş parçaların üretim yönünde alınan mikroyapı görüntülerinde, ergime havuzları ve ergime havuzlarının içerisinde sütunlu tane yapıları ve hücresel dentritik yapılar görülmüştür. Tarama yönünde ise tarama izleri ve aynı şekilde hücresel dentritik yapılar ve sütunlu tane yapıları görülmüştür. İkincil işlemlerden sonra parçaların yüzey altı mikroyapılarında deformasyonlar sonucunda değişimler meydana gelmiş, ergime havuzu izlerinin silikleştiği görülmüştür. Frezeleme operasyonu sırasında SYİ operasyonuna göre parça

yüzeyi daha fazla termal ve mekanik etkiler altında kaldığı için mikroyapı değişimi daha fazla olmuştur.

- ✓ XRD sonuçlarında işlem görmemiş parçada (111), (200), (220) ve (311) olmak üzere dört pikin olduğu görülmüştür. SYİ operasyonu sonucunda XRD profillerinde nispeten değişimler olmuş, (200) pik şiddetinde artış gözlemlenmiştir. Frezeleme operasyonu sonucunda XRD profili oldukça değişmiş, (111) ve (200) piklerinin şiddeti artmış, (220) pikinin yok olduğu görülmüştür. Parça kalınlığının değişmesiyle XRD profillerinde önemli değişiklikler olmamıştır.
- ✓ İşlem görmemiş parçaların mikrosertliği 310 – 320 HV arasında ölçülmüştür. İkincil işlemlerden sonra parçaların yüzey ve yüzey altı mikrosertliklerinde artışlar olmuştur. SYİ operasyonu sonucunda yüzey sertliği ortalama 362 HV olarak ölçülmüş ve etkilenmiş tabakanın yaklaşık 75 µm olduğu görülmüştür. Frezeleme operasyonu sonucunda ise yüzey sertliği işlem görmemiş parçanın sertliğine göre %31 artarak 413 HV olarak ölçülmüştür. Frezeleme operasyonu sonucunda ise etkilenmiş tabaka yaklaşık 125 µm olarak ölçülmüştür.
- ✓ Çekme testi sonuçlarına göre işlem görmemiş parçaların akma dayanımı yaklaşık 700 MPa, kopma dayanımı ise yaklaşık 1000 MPa olarak ölçülmüştür. İkincil işlemler sonucunda parçaların akma dayanımı ve kopma dayanımı artmıştır. Frezeleme operasyonu sonucunda 1 mm kalınlığındaki parçanın akma dayanımı 1177 MPa, kopma dayanımı ise 1490 MPa olarak ölçülmüştür. SYİ operasyonu sırasında 1 mm kalınlığındaki parça kırıldığı için çekme testi yapılamamıştır. SYİ operasyonu uygulanan parçalarda da çekme testi sonucunda akma ve kopma dayanımında artışlar olmuş ancak frezeleme operasyonuna göre daha düşük artışlar olmuştur. Parça kalınlığının artması ile yüzde uzama miktarları artmış, ancak akma ve kopma dayanımındaki artış miktarı azalmıştır.
- ✓ Parça kalınlıklarının artması ile sertleşen bölgelerin parça kesitine oranı azaldığı için ikincil işlemlerin akma ve kopma dayanımına etkisi azalmıştır. 4 mm kalınlığındaki parçaların sonuçları incelendiğinde ikincil işlemlerin akma ve kopma dayanımına etkisi oldukça düşük olmuştur. Cidar kalınlığı 4 mm' den fazla olan parçalarda frezeleme ve SYİ operasyonlarının akma, çekme ve kopma dayanımına etkisinin olmayacağı düşünülmektedir.

- ✓ İşlem görmemiş parçalara uygulanan çentik darbe testi sonucunda 2,5 mm ve 5 mm kalınlığındaki parçaların absorbe ettiği enerji değerleri sırasıyla 17,9 ve 44,15 Joule olarak ölçülmüştür. SYİ operasyonu sonucunda 2,5 mm kalınlığındaki parçanın absorbe ettiği enerji değeri 1,07 Joule artarak 19,06 Joule, 5 mm kalınlığındaki parçanın enerji değeri ise 2,4 Joule artarak 46,65 Joule olarak ölçülmüştür. Frezeleme operasyonu sonucunda benzer şekilde 2,5 mm kalınlığındaki parçanın absorbe ettiği enerji değeri 1,24 Joule artmıştır. 5 mm kalınlığındaki parçada ise artış miktarı 6,38 Joule olmuştur. İkincil işlemlerin absorbe edilen enerjiye etkisi parça kalınlığı arttıkça daha fazla olmuştur.

KAYNAKLAR

1. Hull, C., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US 4575330 A, Google Patents. 1986.
2. Guo, N. and M.C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013. 8(3): p. 215-243.
3. Beyer, C., Strategic implications of current trends in additive manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014. 136(6).
4. YALÇIN, B. and B. Ergene, ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ. SDU International Journal of Technological Science, 2017. 9(3).
5. Yalçın, B., U. Karakılınç, and B. Ergene, Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri. Politeknik Dergisi, 2019. 22(4): p. 801-810.
6. Edgar, J. and S. Tint, Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Johnson Matthey Technology Review, 2015. 59(3): p. 193-198.
7. Jiao, L., et al., Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. Nanomaterials, 2018. 8(8): p. 601.
8. Song, B., et al., Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. Materials & Design, 2012. 35: p. 120-125.
9. Li, R., et al., 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010. 19(5): p. 666-671.
10. Thijs, L., et al., A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. Acta materialia, 2010. 58(9): p. 3303-3312.
11. Spierings, A.B. and G. Levy. Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. in Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2009. Austin, TX.
12. Choi, J.-P., et al., Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. Powder Technology, 2017. 310: p. 60-66.
13. Koutiri, I., et al., Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. Journal of Materials Processing Technology, 2018. 255: p. 536-546.
14. Attar, H., et al., Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. Materials Science and Engineering: A, 2014. 593: p. 170-177.

15. Takaichi, A., et al., Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2013. 21: p. 67-76.

16. Jia, Q. and D. Gu, Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. Journal of Alloys and Compounds, 2014. 585: p. 713-721.

17. Qiu, C., et al., On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. Acta Materialia, 2015. 96: p. 72-79.

18. Aboulkhair, N.T., et al., Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. Additive Manufacturing, 2014. 1: p. 77-86.

19. Liu, A., C.K. Chua, and K.F. Leong. Properties of test coupons fabricated by selective laser melting. in Key Engineering Materials. 2010. Trans Tech Publ.

20. Louvis, E., P. Fox, and C.J. Sutcliffe, Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology, 2011. 211(2): p. 275-284.

21. Sing, S.L., F.E. Wiria, and W.Y. Yeong, Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: effect of laser process parameters on part quality. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018. 77: p. 120-127.

22. Kaynak, Y. and O. Kitay, The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. Additive Manufacturing, 2019. 26: p. 84-93.

23. Bourell, D., et al., Materials for additive manufacturing. CIRP Annals, 2017. 66(2): p. 659-681.

24. Vilaro, T., C. Colin, and J.-D. Bartout, As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. Metallurgical and materials transactions A, 2011. 42(10): p. 3190-3199.

25. Scherillo, F., Chemical surface finishing of AlSi10Mg components made by additive manufacturing. Manufacturing letters, 2019. 19: p. 5-9.

26. Urlea, V. and V. Brailovski, Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components. Journal of Materials Processing Technology, 2017. 242: p. 1-11.

27. Yu, H., et al., Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments. International Journal of Fatigue, 2019. 120: p. 175-183.

28. Fortunato, A., et al., Milling of maraging steel components produced by selective laser melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 94(5-8): p. 1895-1902.

29. Guo, J., et al., On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy. Materials & Design, 2018. 153: p. 211-220.

30. Brown, D., et al., Surface integrity of Inconel 718 by hybrid selective laser melting and milling. Virtual and Physical Prototyping, 2018. 13(1): p. 26-31.

31. AlMangour, B. and J.-M. Yang, Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing. Materials & Design, 2016. 110: p. 914-924.

32. Zhihao, F., et al., Laser polishing of additive manufactured Superalloy. Procedia CIRP, 2018. 71: p. 150-154.

33. Jamal, M. and M. Morgan, Design Process Control for Improved Surface Finish of Metal Additive Manufactured Parts of Complex Build Geometry. Inventions, 2017. 2(4): p. 36.

34. EOS, EOS IN718 9011-0020 powder for additive manufacturing. 2014: p. p. 1-4.

35. Gu, D., et al., Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. Acta Materialia, 2012. 60(9): p. 3849-3860.

36. Atzeni, E., et al., Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by direct metal laser sintering (DMLS). Additive Manufacturing, 2016. 10: p. 15-23.

37. Yasa, E. and J.-P. Kruth, Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. Procedia Engineering, 2011. 19: p. 389-395.

38. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing, 2019: p. 1-14.

39. Konečná, R., et al., Microstructure and directional fatigue behavior of Inconel 718 produced by selective laser melting. Procedia Structural Integrity, 2016. 2: p. 2381-2388.

40. Leon, A. and E. Aghion, Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM). Materials Characterization, 2017. 131: p. 188-194.

41. Baicheng, Z., et al., Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. Materials & Design, 2017. 116: p. 531-537.

42. Karabulut, Y., E. Tascioglu, and Y. Kaynak, Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing. Optik, 2019: p. 163907.

43. Karabulut, Y. and Y. Kaynak, Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing. Procedia CIRP, 2020. 87: p. 355-359.

44. Jia, Q. and D. Gu, Selective laser melting additive manufactured Inconel 718 superalloy parts: high-temperature oxidation property and its mechanisms. Optics & Laser Technology, 2014. 62: p. 161-171.

45. Li, W., et al., Effect tool wear during end milling on the surface integrity and fatigue life of Inconel 718. Procedia Cirp, 2014. 14: p. 546-551.

46. Quan, Y. and B. Ye, The effect of machining on the surface properties of SiC/Al composites. Journal of Materials Processing Technology, 2003. 138(1-3): p. 464-467.

47. El-Khabeery, M., S. Saleh, and M. Ramadan, Some observations of surface integrity of deep drilling holes. Wear, 1991. 142(2): p. 331-349.

48. Tian, C., et al., Study on Grindability of Inconel 718 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting (SLM). Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2018. 64(5): p. 319-328.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf KARABULUT

Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara / 25.12.1993

İletişim : ysfkarabulut4@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2017-2020)

Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2012-2017)

PROJELER

"Şekil Hafızalı NiTiHf Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkisinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 116M346

"Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Cidar Kalınlıklarında Üretilen Inconel 718 Alaşım Malzemesine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: FEN-C-YLP-130219-0038

YAYINLAR

- Karabulut, Y. and Y. Kaynak, (2020) Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing. Procedia CIRP, 2020. 87: p. 355-359.
- Tascioglu, E., Y. Karabulut, and Y. Kaynak, (2020) Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020: p. 1-10.
- Karabulut, Y., E. Tascioglu, and Y. Kaynak, (2019) Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing. Optik, 2019: p. 163907.
- Karabulut, Y., Tascioglu, E., and Kaynak, Y., (2019). Şekil hafızalı NiTiHf alaşım malzemesinden talaş kaldırma sürecinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek simülasyonu ve deneysel verilerle doğrulanması, 10th INTERNATIONAL CONGRESS ON MACHINING (pp.1-10). Antalya, Turkey

ÇALIŞTIĞI KURUM / KURUMLAR

- Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi (2020-….)
- Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Sistemler Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi (2018-2020)