MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN INCONEL 718 PARÇALARININ EZEREK PARLATMA YÖNTEMİYLE YÜZEY İYİLEŞTİRME SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

MERT KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN INCONEL 718 PARÇALARININ EZEREK PARLATMA YÖNTEMİYLE YÜZEY İYİLEŞTİRME SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

MERT KAYA

(523219019)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021

ÖNSÖZ

İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında lisansüstü eğitimim TÜBİTAK projesinde bana çalışma imkânı veren ve en önemlisi bu süre içerisinde engin tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ediyorum.

Lisansüstü tez çalışmam süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında birlikte çalıştığım, her konuda yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Nedim Sunay, Tolga Berkay Şirin ve Nihal Yaman'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başlamam hususunda beni teşvik eden ve eğitimim süresince her zaman desteklerini hissettiren aileme en içten dileklerimle teşekkür ediyorum.

Bu çalışma, 118R039 numaralı TÜBİTAK ARDEB Projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK ARDEB'e desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Ağustos, 2021 **Mert KAYA**

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması 5

2.1.1. Lazerle Toz yatağında Füzyon Yöntemi 7

2.1.2. Inconel 718 Alaşımı ve Üretimi 9

2.2. Eklemeli İmalat Sonrası Kullanılan İkincil İşlemler 12

2.2.1. Isıl İşlem 14

2.2.1.1. Yaşlandırma 14

2.2.2. Ezerek Parlatma 15

2.3. Yöntemlerin Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel Doğrulama 19

2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Eİ 19

2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle LTYF 23

2.3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Ezerek Parlatma 24

3. GEREÇ VE YÖNTEM 27

3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler 27

3.2. Sonlu Elemanlar Yazılımları ve İkincil İşlem Süreçlerinin Modellenmesi 32

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 35

4.1. Ezerek Parlatma Operasyonu ile Yüzey İyileştirme Testleri 35

4.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi ve Topografik Analiz 37

4.1.2. Mikrosertlik 43

4.1.3. Boyutsal Doğruluk Analizi 48

4.1.4. Mikroyapı ve SEM Analizi 49

4.1.5. XRD Analizi 54

4.1.6. Aşınma Analizi 56

4.1.7. Ampirik Yaklaşım ile Kalıntı Gerilme Ölçümü 60

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Ezerek Parlatma Simülasyonu 67

4.2.1. Kalıntı Gerilme ve Kalıcı Deformasyon Analizi 67

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ve Ampirik Yaklaşımla Analiz Edilen Kalıntı Gerilmelerin Karşılaştırılması 77

5. SONUÇLAR 81

ÖZET

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN INCONEL 718 PARÇALARININ EZEREK PARLATMA YÖNTEMİYLE YÜZEY İYİLEŞTİRME SÜRECİNİN MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

Inconel 718 gibi süper alaşım malzemeler, yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları, ısı iletim katsayılarının düşük olması, pekleşme kabiliyetlerinin olması gibi sebeplerden dolayı geleneksel yöntemlerle imalat süreçleri zor ve maliyetli olan malzemelerdir. Ayrıca, havacılık endüstrisinde özellikle uçak motorlarında kullanılan parçaların karmaşık geometrili ve bazı durumlarda ince olmaları bu paçaların geleneksel yöntemlerle üretimini daha da zorlaştırmakta ve üretim maliyetlerinin arttırmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında, Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi diğer birçok endüstride olduğu gibi havacılık endüstrisinde de geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında önemli üstünlüklere sahip ve tercih edilebilir bir yöntem olmaktadır. Günümüzde birçok Eİ yöntemi mevcut olmasına karşın Lazerle Toz Yatağında Füzyon (LTYF) yöntemi diğer Eİ yöntemlerine kıyasla çok daha yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak LTYF yöntemi ile metalik parçaların imalatında karşılaşılan en önemli sorunların başında ısıl gerilmeler, çarpılmalar ve üretilen parçaların çok yüksek yüzey pürüzlülükleri gelmektedir.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminde LTYF ile üretilen Inconel 718 alaşım malzemesine ısıl işlemin, ezerek parlatmanın ve ısıl işlem görmüş haline ezerek parlatmanın etkisi ortaya konmuştur. Bu ikincil işlemlerin deneysel doğrulaması yapılmış. İkincil işlemlerden sonra, parçaların yüzey kalitesinin arttığı ve mekanik özelliklerinde gelişmelerin olduğu gözlemlenmiştir. İkincil işlemlerden sonra sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilme değerleri karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyuştuğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazerle Toz Yatağında Ergitme, Inconel 718, Yüzey İyileştirme Operasyonları, Ezerek Parlatma

ABSTRACT

MODELLING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE SURFACE IMPROVEMENT PROCESS BY ROLLER BURNISHING METHOD OF INCONEL 718 PARTS PRODUCED WITH ADDITIVE MANUFACTURING

Super-alloy materials such as Inconel 718 are materials that are difficult and costly to manufacture with traditional methods for reasons such as maintaining their strength at high temperatures, low heat transfer coefficients and hardening capabilities. In addition, the fact that the parts used in the aviation industry, especially in aircraft engines, have a complex geometry and in some cases, makes it difficult to manufacture these trophies by traditional methods and increases production costs. Considering all these, additive manufacturing technology is considered as a preferred method in the aviation industry, as in many other industries that has significant advantages over traditional methods. Although there are many additive manufacturing methods available today, Laser Powder Bed Fusion (LTYF) method is a much more widely used method compared to other additive manufacturing methods. However, the most important problems encountered with the manufacturing of metallic parts with LTYF method are thermal stresses, distortions and very high surface roughness of the produced parts.

In this study, the effects of heat treatment, roller burnishing and roller burnishing in the heat treated state on Inconel 718 alloy material produced with LTYF in the finite element method were revealed. Experimental validation of these post-processesing has been done. After post-processing, it was observed that the surface quality of the parts increased and there were improvements in their mechanical properties. After the post-processing, the residual stress values analyzed with the finite element method and the empirical approach were compared and it was concluded that the results agree with each other.

Keywords: Laser Powder Bed Fusion, Inconel 718, Surface Treatment Operations, Post Processing, Ball Burnishing, Roller Burnishing

SEMBOLLER

E: Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)

Ra: Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)

µm: Mikrometre

N: Newton

dev: Devir

P: Lazer Gücü (W)

V: Lazer Tarama Hızı (mm/s)

h: Tarama Aralığı (µm)

t: Katman Kalınlığı (µm)

°C: Santigrat Derece

nm: Nanometre

K: Kelvin

W: Watt

J: Joule

Kg: Kilogram

%: Yüzde

GPa: Gigapascal

MPa: Megapascal

s: Saniye

mm: Milimetre

KISALTMALAR

Eİ: Eklemeli İmalat

LTYF: Lazerle Toz Yatağında Füzyon

RPM: Dakikadaki Devir Sayısı

CMM: Koordinat Ölçüm Makinesi

ASTM: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

XRD: X-Işını Kristalografisi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Lazerle toz yatağında füzyon yönteminin şematik olarak gösterimi [5]..... 7

Şekil 2.2. LTYF yöntemi ile üretilen türbin kanadı ve pervane [6]. 8

Şekil 2.3. Çeşitli lazer parametre kombinasyonlarına karşılık gelen parlatılmış yüzeylerin ikincil elektron mikrografları (Kırmızı daire içine alınmış yanmış gözenekler, mavi daire içine alınmış füzyon gözeneklerinin eksikliği (kısmen erimiş parçacıklarla) ve yeşille daire içine alınmış neredeyse küresel gözenekler) [7]..... 8

Şekil 2.4. Süper alaşımlar için örnek bir kristal yapı, γ" (Ni_3Nb) (Yüzey Merkezli Tetragonal) [11]. 9

Şekil 2.5. Nikel bazlı süper alaşımlarda alaşım elementlerinin sınıflandırılması [12]. . 10

Şekil 2.6. Uçak motorları için Inconel 718 malzemesinden üretilen bileşenler sırasıyla; Sürgü, Şaft, Yanma muhafazası, Türbin diski [24]. 11

Şekil 2.7. Eİ sonrası kullanılan ikincil işlemlerin sınıflandırılması. 13

Şekil 2.8. Ezerek parlatma operasyonunun farklı şekillerde şematik gösterimi [51, 52]. 16

Şekil 2.9. Paslanmaz çelik parçalarının ezerek parlatma operasyonu öncesi ve sonrası görüntüsü [53]. 16

Şekil 2.10. Silindirik parçaların ezerek parlatma işleminden önce ve sonra [55]..... 17

Şekil 2.11. LTYF yöntemiyle üretilen AlSi10Mg parçalarının işlem görmemiş hali, tornalama ve ezerek parlatma sonrası görüntüsü [57]. 18

Şekil 2.12. LTYF yöntemi ile üretilen AlSi10Mg parçalarının üretildiği hali, tornalama ve parlatma sonrası görüntüsü [57]. 18

Şekil 2.13. Farklı tutucu konumlarının kalıntı gerilmelere etkileri (a) tutucu konumu 1; (b) tutucu konumu 2; (c) tutucu konumu 3; (d) tutucu konumu 4 [65]. 20

Şekil 2.14. Üretim sürecinin sonunda sıcaklık kontur dolgusunun kalan numune işareti ile (gözlenen oksidasyon) karşılaştırılması [66]. 21

Şekil 2.15. (a) Üretim sırasında t = 450 s'de alınan kızılötesi görüntü, (b) t = 450 s'de simülasyon sıcaklık dağılımı [67]. 21

Şekil 2.16. Bir Eİ kaynak dikişinin (a) Simüle edilmiş ve (b) deneysel kesitler [68]. ... 22

Şekil 2.17. Simülasyondaki bozulmanın deneysel sonuçla karşılaştırılması [69]..... 22

Şekil 2.18. Farklı sonlu elemanlar yazılımında üretim simülasyonu (A-Sunata, B-Amphyon ve C-Simufact) [72]. 23

Şekil 2.19. (a) Tek silindir ile ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi (b) plastik yığılmanın analizi, silindirin hareketinin basitleştirilmesi [77]... 24

Şekil 2.20. Çeşitli bilye penetrasyon derinliklerinde bilyeli perdahlamadan sonra iş parçası içindeki artık gerilmeler [78]..... 25

Şekil 2.21. Sürtünme katsayısı arttıkça parlatma yönüne (σ_z) dik derin kalıntı gerilme (MPa) [79]. 25

Şekil 2.22. Herhangi bir işlem uygulamadan ve farklı dönme kuvvetlerinde uygulanan ezerek parlatma sürecinde (a) Numunelerin deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan mikroskop altı görüntüleri (b) numunelerin simülasyon sonuçları [80]. 26

Şekil 3.1. Isıl işlem süreci. 28

Şekil 3.2. Tez kapsamında numune üretimi, ısıl işlem ve numunelerin karakterizasyon süreçlerinin özeti..... 29

Şekil 3.3. Metalografik numune hazırlama ve numunelerin karakterizasyon süreçlerinin özeti. 32

Şekil 3.4. Simufact Additive 2020 Sonlu Elemanlar Programı ve Proses Zinciri [84].. 32

Şekil 3.5. Simufact Forming 15.0 Sonlu Elemanlar Programı ve Modülleri [85]. 33

Şekil 3.6. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle analizinde kullanılan silindirik parçaya ait "adaptive mesh" uygulaması. 34

Şekil 4.1. Inconel 718 süper alaşım malzemesine uygulanan ezerek parlatma operasyonu (a) üretim sonucu ortaya çıkan yüzey ve (b) operasyon sonrası yüzey. 36

Şekil 4.2. Ezerek ısıl işlem görmüş silindir parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu öncesi ve sonrası görüntüleri (750 N - 350 RPM-0,1mm/dev). 36

Şekil 4.3. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş yüzeylerin topografi görüntüleri. 38

Şekil 4.4. Ezerek parlatma operasyonu sonucu devire bağlı olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri. 38

Şekil 4.5. 350 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri. 40

Şekil 4.6. 700 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri. 40

Şekil 4.7. 1050 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri. 41

Şekil 4.8. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 250 N - 1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750 N - 350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri. 41

Şekil 4.9. Isıl işlem uygulanmış parçaların 250N-1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750N-350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri..... 43

Şekil 4.10. 350 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri. 44

Şekil 4.11. 700 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri. 45

Şekil 4.12. 1050 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri. 46

Şekil 4.13. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM). 47

Şekil 4.14. Farklı ön yük ve devirlerde uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu parçaların çaplarında meydana gelen boyutsal sapmalar. 48

Şekil 4.15. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 250 N-1050 RPM, (mikrosertliği en düşük) ve 750 N-350 RPM, (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle

yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen boyutsal sapma değerleri. 49

Şekil 4.16. İşlem görmemiş Inconel 718 parçasının mikroyapı görüntüleri. 50

Şekil 4.17. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 750 N ön yük, 350 RPM devir (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri. 51

Şekil 4.18. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrası Inconel718 parçalarında oluşan yüzey altı SEM görüntüleri (5000x). ... 53

Şekil 4.19. İşlem görmemiş ve ısıl işlem yapılmış parçalara uygulanan ezerek parlatma sonrası Inconel 718 parçalarının XRD analizleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM). 55

Şekil 4.20. 250 N - 1050 RPM parametresinde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin 2 boyutlu aşınma izleri ve topografi görüntüleri. 57

Şekil 4.21. 750 N – 350 RPM parametresinde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin 2 boyutlu aşınma izleri ve topografi görüntüleri. 58

Şekil 4.22. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu iyileştirilen yüzeylerin aşınma profilleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM). 59

Şekil 4.23. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara 250 N – 1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750 N – 350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametrelerinde uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu iyileştirilen yüzeylerin aşınma oranları. 60

Şekil 4.24. (a) Vickers sertlik cihazındaki uç geometrisi [106] ve (b) Nominal öngörülen temas alanı A_{nom}' un ve numunenin gerçek temas alanı A_{real}'ın şeması. 61

Şekil 4.25. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (350 RPM). 65

Şekil 4.26. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (700 RPM). 66

Şekil 4.27. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (1050 RPM). 66

Şekil 4.28. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun ampirik yaklaşımla kalıntı gerilme tahmini (E.P.(1) - 250 N – 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N – 350 RPM). 67

Şekil 4.29. Ezerek parlatma simülasyonu öncesi kesiti alınan işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş silindirik parçaların yüzeyinde ve katman derinliğindeki kalıntı gerilmeler..... 68

Şekil 4.30. Ezerek parlatma simülasyonu öncesi kesiti alınan işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş silindirik parçacının kalıcı deformasyonu. 69

Şekil 4.31. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (250 N). 70

Şekil 4.32. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (500 N). 71

Şekil 4.33. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (750 N). 72

Şekil 4.34. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (350 RPM). 74

Şekil 4.35. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (700 RPM). 74

Şekil 4.36. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (1050 RPM). 75

Şekil 4.37. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) Isıl işlem + E.P. (250 N - 1050 RPM) (b) Isıl işlem + E.P. (750 N - 350 RPM). 76

Şekil 4.38. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu (E.P.(1) - 250 N - 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N - 350 RPM). 77

Şekil 4.39. Ezerek parlatma sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (350 RPM). 78

Şekil 4.40. Ezerek parlatma sonrsı sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (700 RPM). 79

Şekil 4.41. Ezerek parlatma sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (1050 RPM). 79

Şekil 4.42. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu ile ampirik yaklaşımla hesaplanan kalıntı gerilmeleri ve karşılaştırılması (E.P.(1) - 250 N – 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N – 350 RPM). 80

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. ASTM Kategorisine göre Eİ teknolojilerinin gruplandırılması [3]. 6

Tablo 3.1. Inconel 718 süper alaşımın toz malzemesinin kimyasal bileşimi, AP&C GE Additive tarafından sağlanan veriler [81]. 27

Tablo 3.2. Parçaların LTYF yöntemiyle üretiminde kullanılan parametre seti. 28

Tablo 3.3. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler (9 test). 30

Tablo 3.4. Isıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler (2 test). 30

Tablo 3.5. Ezerek parlatma operasyonlarının deneysel uygulamasında kullanılan devir parametresinin yazılımdaki modellemeye uygun dönüşümü. 34

Tablo 4.1. Ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler. 35

Tablo 4.2. Ezerek parlatma operasyonu sonucu devire bağlı olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri. 39

Tablo 4.3. Ezerek parlatma operasyonu sonucu ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri. 42

Tablo 4.4. Ezerek parlatma operasyonu sonucu mikrosertliği en düşük (250 N - 1050 RPM) ve en yüksek sertliğe (750 N – 350 RPM) sahip parametre değerleri ile işlem görmemiş numunenin kalıntı gerilme ölçümleri ve alınan tipik girinti profilleri. 64

Tablo 4.5. Farklı parametrelerde gerçekleştirilen ezerek parlatma simülasyon sonuçları. 73

1. GİRİŞ

İmalat, doğada bulundukları haliyle işlevsel olmayan hammaddelerin işlenerek insanların kullanabileceği bir ürüne dönüştürülmesini sağlayan sürecin tamamıdır. İnsanoğlunun varoluş hikâyesi içerisinde birçok farklı imalat yöntemi kullanılmış olup ve ihtiyaç çerçevesinde bu yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde imalat yöntemleri alışılmış imalat yöntemleri ve alışılmamış imalat yöntemleri olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Alışılmış (Geleneksel) imalat yöntemleri ise talaşlı ve talaşsız imalat yöntemi olarak iki gruba ayrılmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri olarak frezeleme, tornalama, delme, vargel/planyalama, testere ile kesme ve taşlama gibi yöntemleri sayabiliriz. Talaşlı imalat yöntemlerinde; kesici takımlar ile iş parçasından talaş kaldırılarak yeni yüzeyler açığa çıkartılır ve planlanan parça şekli elde edilir. Bu işlem sırasında kesici takım ile iş parçası arasında oluşan kuvvetler, takım aşınması veya yorulma problemleri doğurur. Uzun zamandır kullanıldığı için, teknolojik bilgi birikimi çok fazla olmasına karşın, takımdaki aşınmalar, titreşimler, malzeme israfının fazla olması ve işlemlerin sadece doğrusal ve dairesel olması bu yöntemin dezavantajlarındandır. Bu gibi dezavantajlar yüzünden talaşsız imalat yöntemleri seçilebilmektedir. Döküm, dövme, toz metalürjisi gibi yöntemler ise talaşsız imalat yöntemleridir. Talaşsız imalat yöntemlerinde sıcaklık değişimlerden kaynaklana iç gerilmelerin malzeme üzerindeki olumsuz etkileri ve ürün toleransının çok iyi olmaması gibi durumlar söz konusudur. Geleneksel imalattaki bu gibi sınırlamalar ve zayıflıklarla birlikte işlenmesi zor yeni geliştirilmiş malzemelerin şekillendirilme ihtiyacı, karmaşık geometrili parçaya duyulan ihtiyacın artması ve her geçen gün özel ihtiyaçlara yönelik ürün ihtiyacının artması insanları yeni imalat arayışlarına itmiştir. Özellikle 2. dünya savaşı sırasında ve sonrası ki yıllarda bu konu üzerine yoğun çaba harcanarak alışılmamış imalat yöntemleri hızla geliştirilmiştir. Alışılmamış (İleri) imalat yöntemleri, işleme mekanizması olarak geleneksel imalat yöntemlerinden tamamen farklı özelliklere sahip, çeşitli enerji türlerinde veya bunların kombinasyonlarından yararlanarak imalat yapmaktadır. Veri aktarım kolaylığı, karmaşık geometrili, küçük boyutlu ve yüksek hassasiyetli parça üretimi sağlaması ileri imalat yöntemlerinin üstün özellikleri olarak sıralanabilir.

Eİ, alışılmamış imalat yöntemleri arasında en popüler olan ve en hızlı gelişim gösteren yöntem olarak dikkat çekmektedir. Eİ yöntemleri geleneksel imalat yöntemlerine nazaran özellikle karmaşık geometrili parçaların imalatı, birden çok parçanın tek bir komponent olarak üretilebilmesi ve bunun sonucunda montaj sürecini ortadan kaldırması gibi önemli üstünlüklere sahiptir. Seri imalatta henüz kullanımı olmamakla birlikte, özellikle havacılık ve biyomedikal gibi az sayıda ürünlerin üretildiği alanlarda oldukça önemli kazanımlar sağlama potansiyeli vardır. Bu sebeple de havacılık, savunma ve biyomedikal gibi endüstriler bu imalat yöntemindeki gelişmeleri yakından takip etmekte ve uygulanabilirliğini görmek istemektedir.

Eİ yöntemleri birden fazla olmakla birlikte, endüstriyel uygulanabilirliği ve sahip olduğu avantajlardan dolayı en yaygın kullanılan Eİ yöntemlerinin başında LTYF yöntemi gelmektedir. Literatür incelendiğinde LTYF yöntemi kullanılarak havacılıkta ve biyomedikal sektöründe kullanımı yaygın olan Ni ve Ti esaslı alaşımlarla paslanmaz çeliklerin yoğun şekilde üretildiği ve bu konuda araştırmaların özellikle son birkaç yılda oldukça fazla arttığı görülmektedir.

Inconel 718, Ni-Fe-Cr östenit malzemesi, yüksek akma ve çekme gerilmesine sahip, sürünme direnci yüksek, korozyona karşı yüksek direnç gösteren, yüksek sıcaklıklarda dahi korozyon direncini koruyan bir malzemedir. Ayrıca 700° C sıcaklıklara ulaşan çalışma koşullarına sahip, gaz türbinleri, roketler, nükleer reaktör ve uçak motor komponentleri gibi kritik kullanım alanlarına sahip süper alaşım malzemelerdir. Bu malzemeler günümüzde yoğun şekilde geleneksel yöntemler kullanılmak suretiyle ürüne dönüştürülmektedir. Geleneksel yöntem olarak en yoğun kullanılan yöntemlerin başında talaşlı imalat ile şekillendirme gelmektedir. Ancak bu malzemelerin talaşlı imalat ile şekillendirilme sürecinde önemli zorluklar mevcuttur. Bu durum, Eİ yöntemleri kullanılarak bu malzemelerden ürün elde edilmesini gündeme getirmiştir ve bu konudaki çalışmaların sayısı son yıllarda oldukça artmıştır.

Hem havacılık endüstrisinde hem de dünya literatüründe özellikle LTYF ile üretilen Inconel 718 parçaların mekanik ve termal özelliklerini araştıran çalışmalar hızla artmaktadır. Ancak yüzey özelliklerinin araştırılması konusunda çalışmalar ise oldukça sınırlı olup yetersiz sayılabilir. Farklı metalik malzemelerin (Ti ve Ni esaslı ve paslanmaz çelikler vb.) LTYF ile üretildikten sonra ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin oldukça

yüksek ve kabul edilemez değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sorunun çözümü için üretim parametrelerinde değişiklik yapılarak üretim tekrarlanabilir. Ancak bu durum sorunu tamamen ortadan kaldırmamakla birlikte nispeten azaltmaktadır. Dolayısı ile üretilen parçalara ikincil bir işlem, diğer bir ifade ile yüzey iyileştirme işlemleri uygulanarak sorun tamamen giderilebilir.

Ezerek parlatma özellikle hem yüzey kalitesinin iyileştirilmesi hem de basma kalıntı gerilmelerin oluşması açısından literatürde geleneksel yöntemlerle üretilen havacılık malzemelerine uygulanan bir yöntemdir. Dolayısı ile bu yöntemin LTYF ile üretilen parçaların yüzey kalitesini, yüzey altı özellikleri ve yüzey / yüzey altı katmanlardaki kalıntı gerilmeleri etkileme potansiyelinin oldukça güçlü olduğu değerlendirilmektedir.

Inconel 718 alaşımı uçak motorlarındaki birçok komponent imalatında kullanılan süper alaşım malzemesidir ve dolayısıyla LTYF yöntemiyle üretilen parçaların sahip olacakları yüzey / yüzey altı özelliklerin araştırılması ve iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar ülkemiz havacılık endüstrisi başta olmak üzere dünyadaki bu konu üzerine yapılan araştırmalara da katkı sağlayacaktır. Bu konuda yapılacak sistematik çalışma ile elde edilecek olan faydalı bilgi ve bunun endüstriyel uygulaması ve yayılımı bu tezin amacı ve hedefidir.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eİ teknolojisi, günümüzde başta havacılık, biyomedikal ve otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılmakta olup her geçen gün kullanım alanı artmaktadır. Bu durum Eİ teknolojisine ait bilgi ihtiyacı doğurmaktadır. Bu bölümde Eİ yöntemleri, Eİ yöntemlerinden olan LTYF yöntemi, LTYF yöntemi ile üretilen Inconel 718 malzemesi ve üretilen Inconel 718 malzemesine uygulanan ikincil işlem olan ezerek parlatma operasyonu ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması

Eİ teknolojisi, eksiltmeli üretim metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman olmak üzere 3 boyutlu model verilerinden ürün oluşturmak için malzemelerin birleştirme süreci olarak tanımlanabilir [1]. Eİ teknolojisi diğer birçok endüstride olduğu gibi havacılık endüstrisinde de geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında önemli üstünlüklere sahip ve tercih edilebilir bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Havacılık endüstrisinde üretilen parçaların üretim miktarlarının düşük olması ve parçaların kompleks geometrilere sahip olmaları nedeniyle yakın gelecekte Eİ yöntemlerinin en yaygın kullanımının bu endüstride olacağı öngörülmektedir. Havacılık endüstrisinde şekillendirilmesi en zor olan alaşımların başında nikel esaslı Inconel 718 malzemesinden yapılan komponentler gelmektedir ve birden çok parçanın da tek bir komponent olarak üretilebilmesi montaj sürecini ortadan kaldırmaktadır. Seri imalatta henüz kullanım imkanı sınırlı olmakla birlikte, özellikle havacılık ve biyomedikal gibi seri imalat olarak değerlendirilemeyecek sayıda ürünlerin üretildiği alanlarda potansiyeli oldukça önemli bir yaklaşım olarak öngörülmektedir [2]. Bu sebeple havacılık, savunma ve biyomedikal gibi endüstriler, bu imalat yöntemindeki gelişmeleri yakından takip etmekte, uygulanabilirlik ölçütünü araştırmakta ve hatta kendi bünyesinde testlerini gerçekleştirerek proses geliştirme arayışlarını sürdürmektedir.

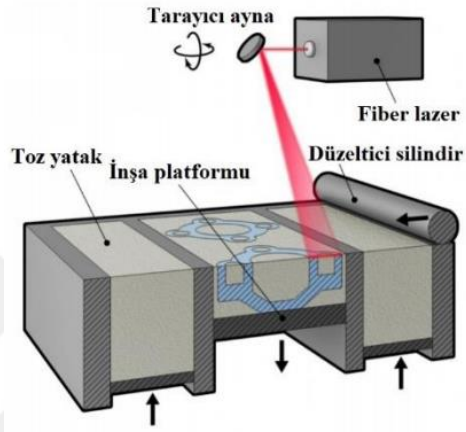
Eİ teknolojileri, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ing. ASTM International) tarafından ASTM F2792-12a standardına göre 7 temel gruba ayrılmıştır [3]. Tablo 2.1‘ de bu temel gruplar ve alt grupları ayrıca her bir temel grubun, çalışma prensibi, hangi malzeme çeşitlerinde üretim yapabildikleri, avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 2.1. ASTM Kategorisine göre Eİ teknolojilerinin gruplandırılması [3].

ASTM Kategorisi	Çalışma prensibi	Malzeme	Avantajları	Dezavantajları
Yapıştırıcı Püskürtme • 3B mürekkep püskürtme (inkjet) teknolojisi	Parçacıklar birbirine yapıştırılarak katman katman inşa edilir.	• Polimerler • Seramikler • Kompozitler • Metaller • Hibrit malzemeler	• Destek/altlık içermez, • Tasarım özgürlüğü sağlar, • Yüksek baskı hızı vardır, • Nispeten düşük maliyetlidir.	• Sınırlı mekanik özelliklere sahip kırılgan parçalar üretilir, • Son işlem gerektirebilir.
Direk Enerji Biriktirme • Lazer Biriktirme • Lazer Şekillendirme • Elektron Işını, • Plazma Ark Ergitme.	Odaklanmış ısı enerjisi biriktirme esnasında malzemeleri eritir.	• Metaller • Hibrit malzemeler	• Tane yapısının yüksek derecede kontrolü mümkündür, • Yüksek kaliteli parçalar üretilebilir	• Yüzey kalitesi düşüktür, • Metaller/metal tabanlı hibrit malzemelerle sınırlıdır.
Malzeme Ekstrüzyonu • Ergiyik Yığma Modelleme, • Ergiyik Filamen Fabrikasyonu, • Ergiyik Katman Modelleme.	Malzeme, seçici olarak bir nozül veya orifisten (ağız) dışarı itilir.	• Polimerler • Kompozitler	• Yaygın kullanımlıdır, • Ucuzdur, • Tamamen işlevsel parçalar oluşturabilir.	• Basamaklı yüzey oluşturur, • Ayrıntılar için uygun değildir.
Malzeme Püskürtme • 3B inkjet teknolojisi, • Direkt Mürekkep Yazdırma.	İnşa malzemesinin damlacıkları biriktirilir.	• Polimerler • Seramikler • Kompozitler • Hibrit malzemeler • Biyolojik malzemeler	• Yüksek damlacık biriktirme doğruluğu vardır, • Düşük atık oluşturur, • Çoklu malzeme parçaları üretilebilir, • Çok renkli parçalar üretilebilir.	• Destek malzemesi gereklidir, • Fotopolimerler ve termoset reçineler gereklidir.
Toz Yataklı Füzyon • Elektron Işın Ergitme, • Direkt Metal Lazer Sinterleme, • Seçici Lazer Sinterleme • Lazerle Toz Yatağında Füzyon	Isı enerjisi, toz yatağındaki inşa malzemesinin küçük bir bölgesini birleştirir.	• Polimerler • Seramikler • Kompozitler • Metaller • Hibrit malzemeler	• Nispeten ucuz bir teknolojidir, • Geniş malzeme seçenekleri mevcuttur.	• Nispeten yavaştır, • Yapısal bütünlük eksikliği vardır, • Boyut sınırlamaları mevcuttur, • Yüksek güç gereklidir
Plaka Tabakalaştırma • Tabakalı Malzeme Üretimi, • Ultrason Birleştirme/Ultrason Eklemeli Üretim.	Malzemelerin sac/folyoları yapıştırılmıştır.	• Polimerler • Seramikler • Metaller • Hibrit malzemeler	• Hızı yüksektir, • Düşük maliyetlidir, • Malzeme taşıma kolaylığı vardır.	• İşlem sonrası son işlemler gerekebilir, • Sınırlı malzeme kullanılabilir.
Havuz Fotopolimerizasyonu • SLA, • Dijital Işık İşleme.	Bir havuzdaki sıvı polimer ışıkla sertleştirilir.	• Polimerler • Seramikler	• Büyük boyutlu parçalar üretilebilir, • Mükemmel boyutsal hassasiyet sağlar, • Mükemmel yüzey ve detaylar sağlar.	• Sadece fotopolimerlerle sınırlıdır, • İnşa işlemi yavaştır, • Pahalı bir yöntemdir. • Fotopolimerlerin düşük mekanik özellikleri vardır

2.1.1. Lazerle Toz yatağında Füzyon Yöntemi

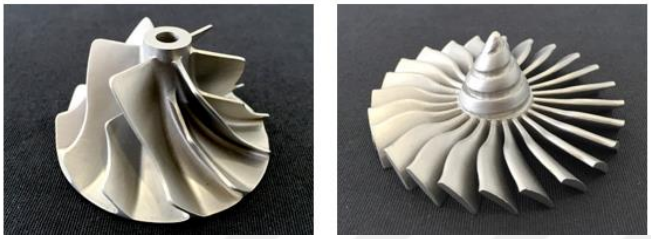
Eİ yöntemleri birden fazla olmakla birlikte, endüstriyel seviyede uygulanabilirliği yüksek ve sahip olduğu avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılan Eİ yöntemlerinin başında LTYF yöntemi gelmektedir [1]. LTYF yönteminde, haznenin içine toz halde konulan malzeme, lazer ışını yardımıyla, önceden belirlenmiş bir geometrinin katman katman ergitilerek üretilmesidir. İşlem sırasında toz tam ergitilerek imalat gerçekleşir [4]. Şekil 2.1' de, LTYF yönteminin uygulanma süreci şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Lazerle toz yatağında füzyon yönteminin şematik olarak gösterimi [5].

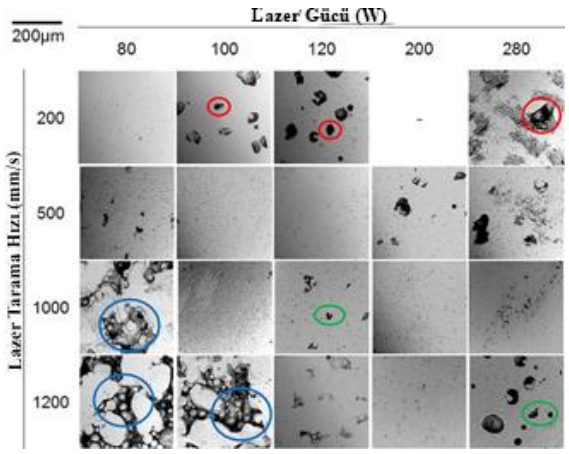
Literatür araştırması yapıldığında LTYF yönteminin diğer metal Eİ yöntemlerine göre üzerine yapılan çalışma sayısının daha fazla olması bu durumu kanıtlar niteliktedir. Bununla birlikte LTYF yöntemi kullanılarak havacılıkta ve biyomedikal sektörde yaygın olarak kullanılan Ni ve Ti alaşımlarıyla paslanmaz çeliklerin üretiminin yoğun olduğu ve bu konuda araştırmaların özellikle son birkaç yılda oldukça fazla arttığı görülmektedir. LTYF yöntemi havacılık, otomotiv, tıp gibi farklı endüstrilerde, üretilen parçaların yorulma ömrünün uzatılması ve yüzey sorunlarının giderilmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. LTYF yönteminde kompleks geometrik özelliklere sahip parçalar üretebildiği gibi hem işlevsel prototiplerin üretiminde, hem de son kullanım parçaları olarak iyi çalışan, güçlü ve dayanıklı parçaların da üretilmesinde kullanılmaktadır. Ancak metal parça imalatında çok yeni olan bu teknoloji ile üretilen komponentlerin sahip oldukları mekanik, termal ve yüzey özellikleri konusunda henüz yeterli araştırma olmaması ve bu konuda bilgi birikimi ve deneyiminin yetersiz olması bu teknolojinin geleneksel imalat yöntemlerinin yerini alması sürecini yavaşlatmaktadır. Özellikle havacılık endüstrisinde ve uçak motorları parçaları gibi çok kritik fonksiyona sahip

parçaların imalat süreçleri ve yüzey özellikleri şüphesiz bu parçaların kullanımında performanslarını ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla Eİ yöntemiyle üretilen parçaların sahip oldukları mekanik, termal ve yüzey özellikleri ile geleneksel yöntemlerle üretilen parçaların özelliklerinin kıyaslanması konusunda ciddi ve sistematik araştırmalara ihtiyaç olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 2.2' de, LTYF yöntemi ile üretilen türbin kanadı ve pervane gösterilmektedir.



Şekil 2.2. LTYF yöntemi ile üretilen türbin kanadı ve pervane [6].

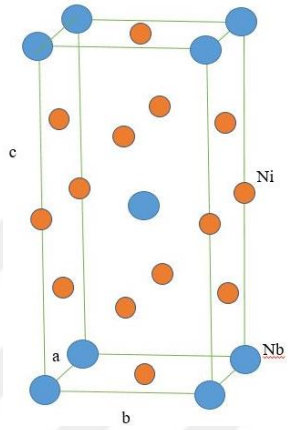
Şekil 2.3'de Majumdar ve diğ.[7]'nin LTYF yöntemi ile farklı lazer güçleri ve lazer hızlarının kombinasyonlarını kullanarak ürettiği numunelere ait mikroyapı/içyapı incelemeleri gösterilmektedir. Lazer tarama hızındaki ve lazer gücündeki değişiklikler eriyik havuzu oluşumunu etkilediğini ayrıca artan lazer tarama hızı, artan Plateau-Rayleigh kararsızlıkları ve daha yüksek toplanma olasılığı olan uzun eriyik havuzları üretir. Artan lazer gücü, eriyik havuzunu derinleştirir ve her katmanda gerçekleşen yeniden eritme/yeniden soğutma döngülerinin sayısını arttırdığını bildirdiler.



Şekil 2.3. Çeşitli lazer parametre kombinasyonlarına karşılık gelen parlatılmış yüzeylerin ikincil elektron mikrografları (Kırmızı daire içine alınmış yanmış gözenekler, mavi daire içine alınmış füzyon gözeneklerinin eksikliği (kısmen erimiş parçacıklarla) ve yeşille daire içine alınmış neredeyse küresel gözenekler) [7].

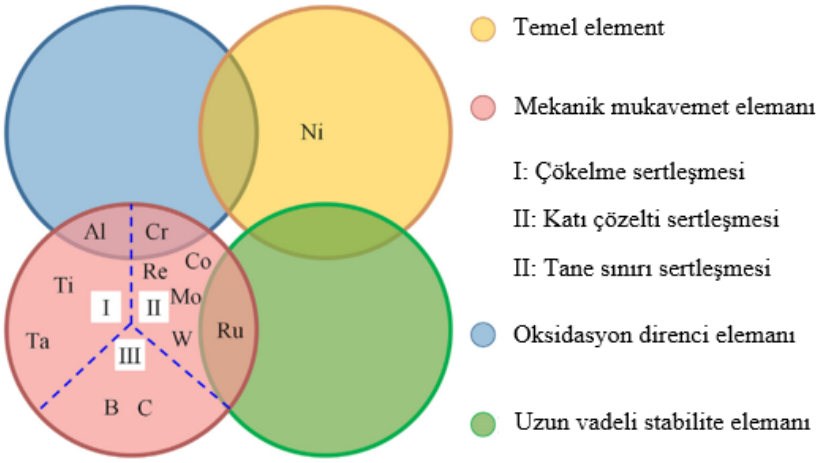
2.1.2. Inconel 718 Alaşımı ve Üretimi

Süper alaşımlar, diğer adıyla yüksek performans alaşımları, termal sürünme, deformasyonuna karşı gösterdiği direnç, kararlı yüzey stabilitesi, korozyon ve oksidasyona karşı gösterdiği direnç özellikleriyle bilinmektedir [8, 9]. Süper alaşımların en belirleyici özelliği, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesidir [10]. Tipik kristal yapısı yüzey merkezli kübik östenit olan bu alaşımlar, Hastelloy, Inconel, Rene alaşımları gibi alaşım gruplarını oluşturmaktadır (Şekil 2.4).



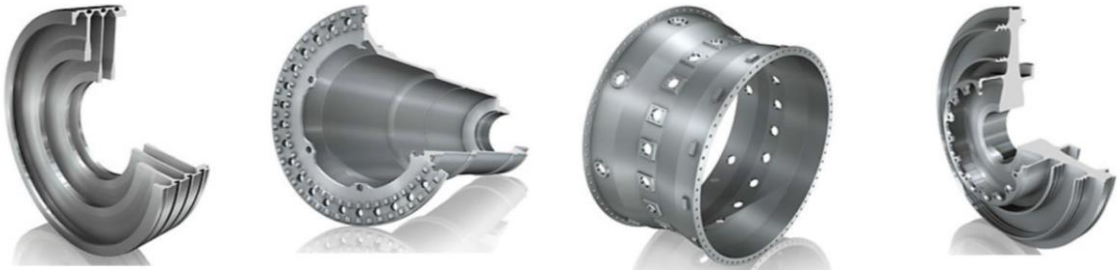
Şekil 2.4. Süper alaşımlar için örnek bir kristal yapı, γ" (Ni_3Nb) (Yüzey Merkezli Tetragonal) [11].

Nikel bazlı tek kristalli süper alaşımlardaki alaşım elementleri, alaşımlara yaptıkları temel katkılara göre dört tipte sınıflandırılabilir, (i) temel elementler (yani Ni bazlı süper alaşımlar için Ni), (ii) mekanik olarak güçlendirme elemanları, (iii) uzun vadeli stabilite elemanları ve (iv) oksidasyon karşı direnç elemanları. Bu sınıflandırma şematik olarak Şekil 2.5'de verilmiştir [12]. Inconel, nikel-krom tabanlı süper alaşımlar ailesinde bulanan, yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip, yüksek sürünme direnci, yüksek oksidasyon ve korozyon direnci sebebiyle yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalan son derece zorlu koşullara karşı iyi davranış gösteren bir süper alaşım malzeme grubudur [13-15]. Sıcaklığa karşı stabil bir duruş sergileyen bu alaşım ve oluşturduğu pasif film tabakası ile yüzeye zarar verecek etkenlere karşı da iyi dayanım göstermektedir. Geniş sıcaklık aralığında mekanik özelliklerini muhafaza etme davranışı sergileyerek yüksek sıcaklık uygulamaları için bir ortam oluşturmaktadır. Ayrıca katı çözelti sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi gibi ısıl işlemlerin uygulanması ile yüksek sıcaklık özellikleri geliştirilebilmektedir [16].



Şekil 2.5. Nikel bazlı süper alaşımlarda alaşım elementlerinin sınıflandırılması [12].

Inconel 718 gibi süper alaşım malzemeleri uzay ve havacılık [17], otomotiv, enerji gibi sektörlerde kullanılan kritik komponentlerin üretiminde; türbin kanatları [18], sızdırmazlık ve bağlantı elemanları, motor milleri, basınç tankları ve nükleer reaktör çekirdek elemanları [19] gibi zor koşullarda altında çalışan spesifik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler günümüzde yoğun şekilde geleneksel yöntemler kullanılarak ürüne dönüştürülmektedirler. Geleneksel yöntem olarak en yoğun kullanılan yöntemlerin başında talaşlı imalat ile şekillendirme gelmektedir. Ancak bu malzemelerin talaşlı imalat ile şekillendirme sürecinde önemli zorluklar mevcuttur [20]. Yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları, ısı iletim katsayısının düşük olması, pekleşme kabiliyetlerinin olması gibi sebeplerden dolayı geleneksel yöntemlerle imalat süreçlerini zor ve maliyetli hale getirmiştir[21]. Ayrıca bu özelliklerinden dolayı işlem sırasında aşırı derecede takım aşınması, yüksek kesme kuvvetleri, talaşın kırılmaması, boyutsal doğruluğunun sağlanamaması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır [22]. Bilhassa havacılık endüstrisinde, jet ve gaz türbin motorları gibi karmaşık geometrili ve bazı durumlarda ince cidarlı komponentlerin üretiminde yoğun bir şekilde kullanılması bu parçaların üretimini daha da zorlaştırmakta ve üretim maliyetlerini ciddi bir şekilde arttırmaktadır[23]. Bu durum, Inconel 718 alaşım malzemesi ile üretilen parçaların talaşlı imalat, dövme, döküm gibi geleneksel yöntemlerin aksine Eİ yöntemleri kullanılarak bu malzemelerin üretilmesinin önünü açmakta ve konudaki çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 2.6'da uçak motorlarında kullanılan Inconel 718 alaşım malzemesinden yapılmış karmaşık geometriye sahip ince cidarlı bileşenler gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Uçak motorları için Inconel 718 malzemesinden üretilen bileşenler sırasıyla; Sürgü, Şaft, Yanma muhafazası, Türbin diski [24].

Hem havacılık endüstrisinde hem de dünya literatüründe özellikle LTYF ile üretilen Inconel 718 parçaların mekanik ve termal özellikleri araştırılmaya devam etmektedir. Mevcut literatür, Inconel 718 alaşımından üretilen komponentlerin LTYF işlemi ile üretilmesinin geleneksel yöntemler kullanarak imal edilen komponentlere göre mekanik özelliklerinin [25], yorulma dayanımlarının ve sürünme direncinin daha başarılı olduğunu göstermiştir. Sağladığı bu avantajlar ile birlikte üretim sonrası meydana gelen bazı olumsuzlukların aşılmasıyla Eİ geleneksel yöntemlere alternatif bir tercih olarak yerini alacaktır. Eİ ile metalik parçaların imalatında karşılaşılan en önemli sorunların başında ergitme ve katılaşmadan kaynaklı artık gerilmeler, çarpılmalar ve üretilen parçalarda oluşan yüksek yüzey pürüzlülükleri gelmektedir [26]. Bu sorunlar literatürdeki birçok çalışmada ortaya konulmuş olmasına rağmen, bu sorunların çözümüne katkı sunacak çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Hâlbuki havacılıkta ve özellikle de uçak motorlarında yaygın bir şekilde kullanılan Inconel 718 alaşımından üretilen komponentler, yüksek sıcaklıklar altında çalışmakta ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu durum malzemelerin yüzey ve yüzey altı özellikleri (yüzey bütünlüğü) açısından önem arz etmekte, performanslarını ve yorulma ömürlerini önemli derecede etkilemektedirler. Üretilen parçalarda meydana gelen, kabul edilemeyecek ve doğrudan kullanılamayacak derecede kararsız ve kötü yüzey topografisi ve yüksek yüzey pürüzlülük değerleri malzemenin doğrudan kullanılmasını sınırlamaktadır. Bu durum, optimum parametre seçimi ile bir nebze geliştirilebilmektedir. Fakat bu sorun tamamen ortadan kaldırılmamakla birlikte nispeten azaltılabilmektedir. Dolayısıyla üretilen parçalara ikincil bir işlemler uygulanarak sorun tamamen giderilebilmektedir. Ancak bu yüzey iyileştirme operasyonlarının bazıları malzemenin yüzeyiyle birlikte yüzey altı özelliklerini etkilediği için ve ikincil işlemden sonra aşınma, korozyon, artık gerilme,

yorulma gibi yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etkisinin de belirlenmesi gerekmektedir.

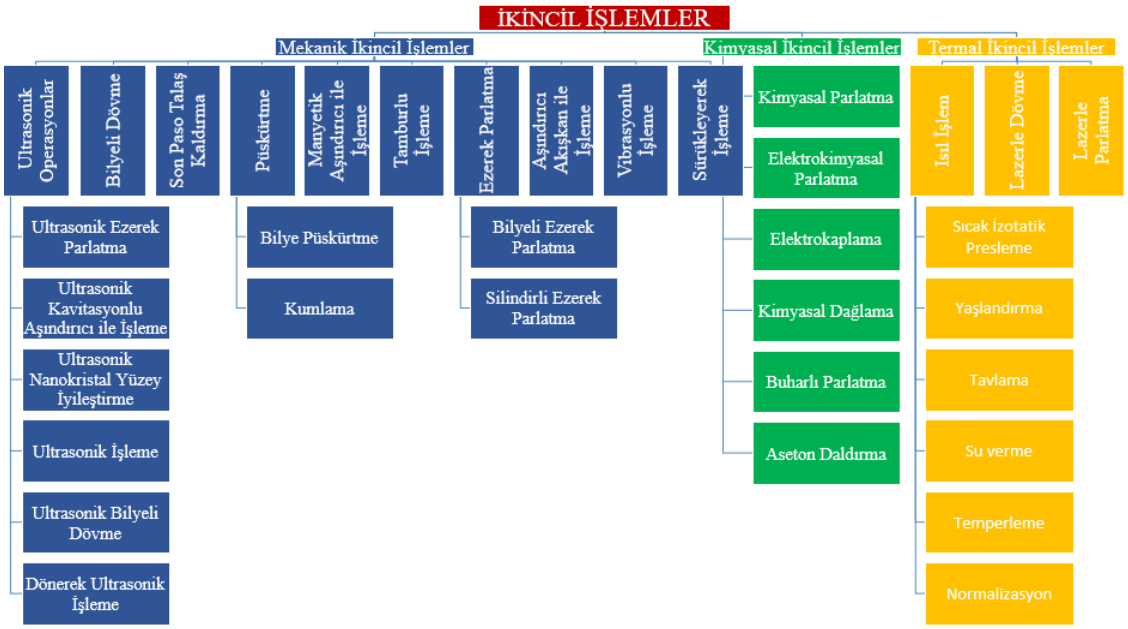
LTYF yöntemi kullanılarak Inconel 718 tozdan parça üretiminde özellikle lazer gücü, lazer tarama hızı, tarama stratejileri ve toz tabaka kalınlığı, lazer odak çapı (spot boyutu), üretilen parçanın farklı katmanlarının özellikleri gibi farklı parametrelerinin ürün özelliklerine etkisi konusunda literatürde çalışmalar bulunmaktadır [27, 28]. LTYF yöntemiyle Inconel 718 parçaların üretilmesinde süreç parametrelerinde, Inconel 718 toz boyutu hariç, özellikle lazer gücü, lazer tarama hızı ve lazer spot büyüklüğünde kayda değer farklılıklar oluştuğu görülmektedir. Bu parametrelerden özellikle lazer tarama hızının üretilen Inconel 718 parçaların yüzey topografisini özellikle gözeneklerin oluşması ve dolayısıyla yüzey kalitesini etkilediği literatürde yapılan deneysel çalışmalar ile ortaya konmuştur [29, 30]. Aynı şekilde lazer enerji yoğunluğunun, lazer tarama hızının ve lazer gücünün yüzey topografisini ve kalitesini önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir [31]. Ayrıca başka bir çalışmada [30] artan lazer yoğunluğunun yüzey pürüzlülük değerlerini arttırdığı da gözlemlenmiştir. LYTF yönteminde kullanılan enerji yoğunluğu denklem (1) ile ifade edilir [32]:

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

burada E, (J/mm^3) enerji yoğunluğu, P (W) lazer gücü, v (mm/s) tarama hızı, h (mm) lazer tarama aralığı ve t (mm) katman kalınlığıdır.

2.2. Eklemeli İmalat Sonrası Kullanılan İkincil İşlemler

LTYF yönteminde kullanılan parametrelerin, oluşan yüzey kaliteleri açısından kesin bir davranış göstermemesi, yüzey kalite problemlerinin malzemelere uygulanacak ikincil işlemler ile çözülmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca ince katmanların hızlı şekilde katılaştırılması sonucunda yönelimsel tane büyümeleri ve faz sorunları meydana gelmektedir. Bundan dolayı ve özellikle de artık gerilmeleri azaltmak amacıyla ikincil işlemlere duyulan ihtiyacı gözler önüne sermektedir. Şekil 2.7'de Eİ sonrası kullanılan ikincil işlemlerin sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Eİ sonrası kullanılan ikincil işlemlerin sınıflandırılması.

Bir çalışmada elektrokimyasal parlatma yönteminin LTYF ile üretilen Inconel 718 parçaların yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi incelenmiştir [33]. Bu çalışmada, yüzey topografisi, yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı ve mikrosertlik incelenmiştir ve elektrokimyasal parlatma yönteminin LTYF ile üretilen parçalardaki yüzey bütünlüğü özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Yapılan bir diğer çalışmada uygulanan farklı ikincil işlemlerin yüzey kalitelerini etkileri birbirlerine göre karşılaştırılmıştır [17]. Vibrasyonlu yüzey işlem ve sürüklemeli yüzey işlem yöntemlerinin, yüzey kalitelerini iyileştirmesi açısından talaşlı imalata göre etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür. Ayrıca LTYF ile üretilen Inconel 718 parçalarının yüzey bütünlüğü özellikleri frezeleme operasyonuyla da iyileştirilmeye çalışılmıştır [34]. Bu araştırma sonunda girdi değişkenleri kesme koşulları (kuru ve kesme sıvısı) ve farklı tarama yönüyle üretilmiş parçalar olmuştur. Son paso talaş kaldırma sürecinden sonra ise işlenen parçanın yüzey topografisi, pürüzlülüğü, mikrosertliği ve mikroyapısı incelenmiştir. Son paso talaş kaldırma işleminin parçanın yüzey kalitesinin, işlem uygulanmamış parçanın yüzey kalitesine göre önemli ölçüde geliştirildiği gözlemlenmiştir.

Literatürden de anlaşılacağı üzere her bir ikincil işlem farklı mekanik özellikler kazandırmaktadır. Tez kapsamında kullanılan ikincil işlemler ise ısıl işlem ve ezerek parlatma operasyonlarıdır.

2.2.1. Isıl İşlem

Isıl işlem katı haldeki metal veya alaşımlarına belirli mekanik özellikler kazandırmak amacıyla uygulanan ısıtma veya soğutma işleri olarak tanımlanabilir. Isıl işlem malzemenin işlenebilme özelliğini iyileştirme, mukavemetini arttırmak veya azaltmak, homojenleştirme, iç gerilmeleri azaltmak vb. nedenlerle uzun yıllardır geleneksel yöntemlerle üretilen parçaların özellikleri geliştirmek için kullanılmaktadır [35]. Isıl işlemin kazandırdığı özellikler göz önüne alındığında, Eİ ile üretilen parçaların özellikle yetersiz erimeden kaynaklı gözenekli yapısını iyileştirmek ve çekme kalıntı gerilmeleri gidermek için kullanılabilecek en etkili ikincil işlem olduğu görülmektedir.

Süper alaşımların özellikleri, Eİ ile üretimden sonra ısıl işlem ile geliştirilebilir. Isıtma ve soğutma işlemleri ile elementlerin çözünürlüklerindeki değişime bağlı olarak optimum malzeme performansı elde etmek için ısıl işlem uygulanır. Bu işlemlerin, alaşım elementlerinin ayrılması ve tane büyümesi dâhil olmak üzere Inconel 718 alaşımının mikro yapısını etkilediği bilinmektedir [36, 37].

Literatür araştırmasında, Xiao ve ark. [38] Inconel 718 alaşımının tane sınırları Laves ve δ fazlarının oluşumunun ve alaşım elementlerinin ayrılmasının 1066ºC'de ısıl işlemle azaldığını bildirdiler. Tucho ve ark.[39] yüksek çözelti sıcaklığının LTYF yöntemiyle üretilen Inconel 718 alaşımlarının mikroyapısına etkisini incelemek için 1100 ºC ve 1250 ºC'de farklı ıslatma süreleri için bir çözelti işlemi gerçekleştirmiştir. Hem 1100 ºC hem de 1250 ºC sıcaklıklar için ıslatma süresinin artmasının matris içindeki tanelerin ve karbürlerin büyümesiyle sonuçlandığını bulmuşlardır. Ek olarak, yaklaşık 100 nm büyüklüğündeki Laves fazı, 1250 ºC'de bile matris içinde çözünmemiş halde kalmıştır.

2.2.1.1.Yaşlandırma

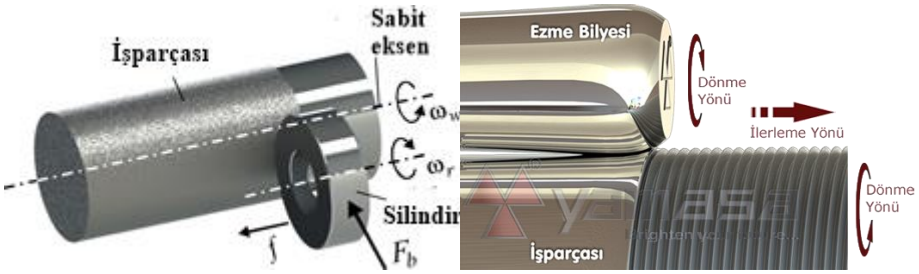
Yaşlandırma, güçlendirme fazlarının çökelmesine izin vermek için çeşitli ıslatma süreleriyle normalde 425-870 ºC aralığında bir ara sıcaklıkta gerçekleşen bir işlemdir. Yaşlandırma işlemi sonrasında mukavemetin artması için yapılan bir işlemdir. Yaşlandırma sonrası oluşan fazlar, dislokasyon kaymasını engelleyerek parçanın mukavemetinin artmasını sağlar [40]. Literatürde bazı araştırmacılar, bu fazlaların kısa ıslatma süreleri için 700 ile 900 ºC arasında oluştuğunu belirtirken, bazıları ise daha düşük sıcaklıklarda 550 ile 660 ºC arasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bazı yazarlar, γ"

fazının genellikle daha yüksek sıcaklıklarda (720 ºC) oluştuğunu, γ' fazının ise daha düşük sıcaklıklarda (620 ºC) oluştuğunu açıklamışlardır [41]. Literatürde yapılan çalışmalarda, S. Raghavan ve ark. [42] LTYF ile üretilen Inconel 718 alaşımlarında nano boyutlu γ' ve γ' fazlarının ve iğne şeklindeki δ fazının yanı sıra büyük miktarda karbür oluşumuna neden olduğunu bildirdiler. Ayrıca alaşımın mekanik özelliklerinin, güçlendirme fazlarının mevcudiyeti nedeniyle üretilen alaşıma kıyasla önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir. W. Huang ve ark. [43] farklı yaşlandırma sıcaklıklarının LTYF ile üretilen Inconel 718 alaşımının mekanik davranışı üzerindeki etkisini inceledi. Mikrosertlik sonuçları, 680 ila 720 ºC arasında yaşlandırma işlemi yapıldığında güçlendirme fazlarının tam çökelmesinin elde edildiğini göstermiştir.

2.2.2. Ezerek Parlatma

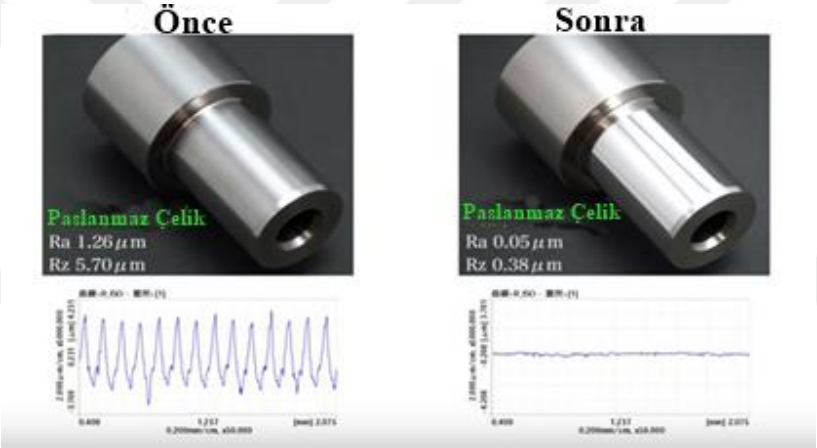
Ezerek parlatma teknolojisi, genellikle mekanik parçaların yüzey bütünlüğünü iyileştirmek için talaş kaldırmadan gerçekleştirilen ve ön üretimden geçmiş iş parçalarını pürüzsüz ve sert hale getiren kullanımı kolay, hızlı, uygun maliyetli yüzey iyileştirme işlemidir [44, 45]. Böylece, ezerek parlatma teknolojisi, lepleme, bileme, taşlama veya cilalama gibi diğer yüzey iyileştirme işlemlerinin yerini alabilir [46]. Ezerek parlatma operasyonu özellikle hem yüzey kalitesinin iyileştirilmesi hem de basma kalıntı gerilmelerini oluşturmasından dolayı literatürde geleneksel yöntemlerle üretilen havacılık malzemelerine uygulanan bir yöntemdir [47]. Ayrıca, bu yöntemin Eİ ile üretilen parçalardaki yüzey pürüzlülüğünü ve gözenekleri önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir [48]. Ezerek parlatma yüzey işlemi için kullanılan takımlar ile yaklaşık 60 Rockwell sertlik değerlerine kadar olan her türlü metalik materyali işlemek mümkündür [49, 50]. Bu operasyon, metal ve kompozit parçaların yanı sıra silindirik iş parçaların hem dış hem de iç yüzeylerine de uygulanabilir.

Ezerek parlatma işlemi, CNC tezgâhlara bağlanan ezerek parlatma takımına bağlı olan silindirik bilyelerin istenen yüzey pürüzlülüğüne göre belirlenen kuvvet, ilerleme, devir parametrelerine bağlı olarak iş parçası yüzeyine baskı uygulanarak yüzeydeki çıkıntıları yok etmesi ve yüzey altındaki boşlukları doldurması işlemidir. Şekil 2.8'de bu tanım görsel olarak sunularak desteklenmektedir.



Şekil 2.8. Ezerek parlatma operasyonunun farklı şekillerde şematik gösterimi [51, 52].

Ezerek parlatma operasyonu özellikle hem yüzey kalitesinin iyileştirilmesi hem de basma kalıntı gerilmelerini oluşturmasından dolayı geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara uygulanan bir yöntemdir. Literatürde ezerek parlatma operasyonunun geleneksel yöntemlerle üretilen parçalar üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan biri Şekil 2.9'da sunulmaktadır [53].



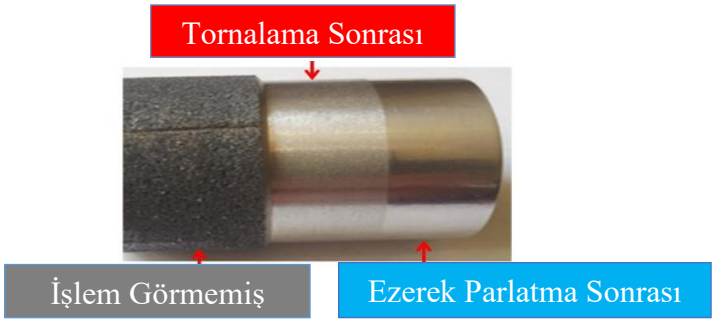
Şekil 2.9. Paslanmaz çelik parçalarının ezerek parlatma operasyonu öncesi ve sonrası görüntüsü [53].

L. N. López de Lacalle ve diğ. [54], Inconel 718 parçalarının yüzeylerinin nihai kalitesini iyileştirmek için ezerek parlatma işleminin kullanımını incelemişlerdir. Çeliklerde 20 MPa basınç yüzey kalitesinin iyileştirmesini sağlar, ancak Inconel sınıfı malzeme için 20 MPa basınçta istenen kaliteye ulaşılamamıştır. Yapılan çalışmada, Inconel 718 parçaları için en iyi sonuçlar, 10 ila 15 MPa arasındaki basınçlarda elde edilmiştir. Akkurt ve diğ. [55], saf bakırdan yapılmış silindirik ve delikli numunelere farklı yüzey bitirme işlemleri uygulanmıştır. Yapılan tüm ölçümler ve değerlendirmeler sonucunda, ezerek parlatma yönteminin malzemenin mekanik, metalurjik özellikleri ve delik yüzey kalitesi açısından en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir. Şekil 2.10'da bu ezerek parlatma yönteminin yüzey kalitesinde sağladığı iyileştirme görülmektedir.

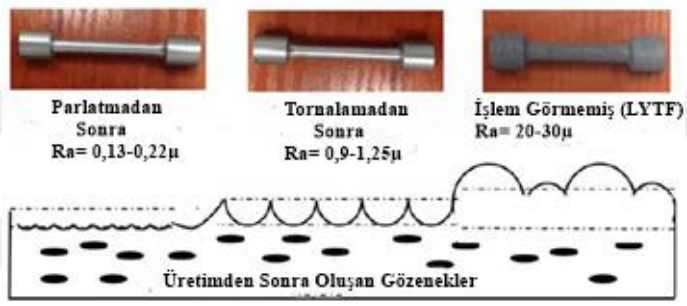


Şekil 2.10. Silindirik parçaların ezerek parlatma işleminden önce ve sonra [55].

Eİ ile üretilen parçalar, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara kıyasla yüksek gözeneklilik içerdiğinden ezerek parlatma operasyonu, gözeneklerin verimli bir şekilde kapatılmasını sağlar ve bu da iyileştirilmiş bir pürüzlülük oluşturur. Literatürde, ezerek parlatma operasyonunun Eİ ile üretilen parçalarda yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklere etkisinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Giovanna Rotella [56] ve arkadaşları, Eİ ile üretilen paslanmaz çeliğe ezerek parlatma işlemi uygulamışlardır. Bu çalışmada 3 farklı kuvvet, 3 farklı parlatma hızı ve 2 farklı ilerleme hızı uygulanmıştır. Parlatma kuvveti, parlatma hızı ve ilerleme hızındaki artış, yüzey pürüzlülüğünün azalmasını, sertlik değerlerinin artmasını sağlamıştır. Sonuçlar, kalıntı gerilmelere neden olan en etkili parametrenin parlatma kuvveti olduğunu vurgulamaktadır, parlatma kuvvetlerinin artması, maksimum basma kalıntı gerilmesini arttırmıştır. Parlatma işlemi, numunelerin yüzey kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olarak pürüzlülüğü düşürmüş, yüzey sertliğini arttırmış ve gözenekleri en aza indirmiştir. Andrzej Stwora [57] ve arkadaşları LTYF ile üretilen AlSi10Mg parçalarına tornalama ve ezerek parlatma işlemi uygulamış, parçalar üzerinde değişen mekanik özelliklerini incelemiştir. Tornalama ve parlatma işleminin uygulanması, test edilen numunelerin mekanik mukavemetindeki artışı doğrudan etkileyen gözenekleri önemli ölçüde azaltmış ve pürüzlülük değerlerini en aza indirmiştir. Şekil 2.11 ve 2.12'de bu operasyonların yüzey kalitesine etkisi sunulmaktadır.



Şekil 2.11. LTYF yöntemiyle üretilen AlSi10Mg parçalarının işlem görmemiş hali, tornalama ve ezerek parlatma sonrası görüntüsü [57].



Şekil 2.12. LTYF yöntemi ile üretilen AlSi10Mg parçalarının üretildiği hali, tornalama ve parlatma sonrası görüntüsü [57].

A. Sova [58] ve arkadaşları, tornalama ve ezerek parlatma operasyonunun Eİ ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik parçalarına etkisi deneysel bir çalışma ile sunulmaktadır. Bu çalışmada tornalama işlemi uygulanan parçaların yüzey pürüzlülüklerinin, ezerek parlatma işlemi uygulanan parçalara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Her iki işlemde de gözenekler en aza indirilmiştir ve çekme kalıntı gerilmesi basma kalıntı gerilmesine dönüştürülmüştür. Bu teknoloji ile pürüzlülük değerlerini, plastik deformasyon sonucu Ra= 0,07 µm değerine kadar düşürülebildiği ve yüzey topografilerinde gözenek, talaş parçaları birikintileri gibi problemleri ortadan kaldırılarak topografik açıdan en az kusura sahip parçaların elde edilebildiği literatürde farklı kaynaklarda sunulmuştur [47, 59, 60]. Ezerek parlatma operasyonu parçaların yüzey altı özelliklerini de kayda değer oranda etkilemekte ve değiştirebilmektedir [61]. Literatürde yapılan çalışmalarda, uygulanan kuvvet, ilerleme ve devir parametrelerinin parçaların mikro yapılarının yanında mekanik etki altında olmasından dolayı mikro sertlik ve kalıntı gerilme değerlerini oldukça fazla etkilemektedir [54, 62]. Bu parametrelerdeki değişim de malzemenin korozyon, aşınma ve diğer davranışlarını etkileyebilmektedir.

2.3. Yöntemlerin Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel Doğrulama

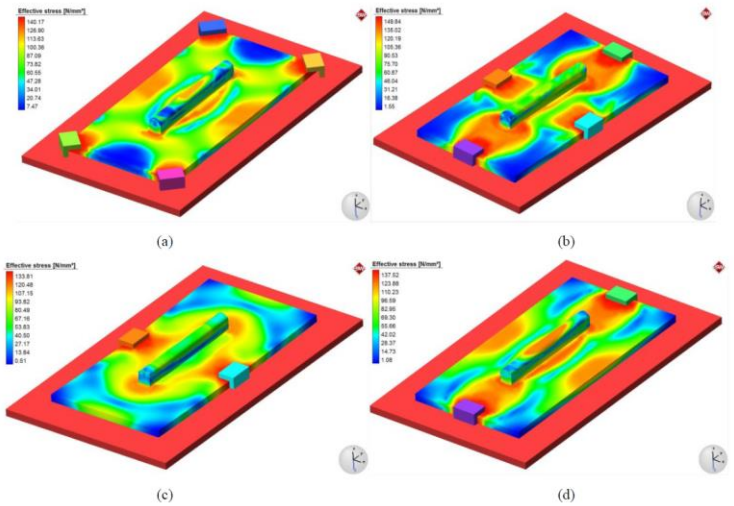
2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Eİ

Eİ ve buna bağlı teknolojilerin gelişmesi, yıllardır hem araştırma hem de üretim yapılan bu alanda bir sıçrama yaratmış, günden güne akademik bazlı ve sanayi odaklı çalışmaların da hızla artmasıyla sonuçlanmıştır. Bu sıçrayış özellikle zamansal ve mali açıdan büyük ilerleme imkânı oluşturacak olan metal Eİ aşamalarının sonlu elemanlar yöntemleriyle simüle edilebilmesi ile başlamıştır. Parametrelerin optimize edilerek bütün parça özelliklerinin (iyi yüzey pürüzlülüğü, kusursuz parça, iyi mekanik özellikler, bozulmaya ve çarpılmaya uğramamış parça vb.) istenilen şekilde ortaya çıkarılması aşamasında, birçok değişkenin birbirlerine göre en iyi değere sahip olması gerekirken, bu durum bahsedilen sürecin binlerce parçanın üretimini içermesine yol açmaktadır. Literatürde yıllardır araştırılmakta olan bu alan sayesinde sayısız parça üretilmiş ve bu parçaların birçok özelliği belirli seviyelerde incelenmiştir. Fakat geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesi zor olan bu malzemeler ile üretilen parçaların aynı zamanda diğer malzemelere göre nispeten pahalı olması yapılan çalışma sayısını sınırlamaktadır. Bu şekilde doğal olarak her bir akademik çalışmada diğer çalışmalara göre ayrı donanımlar ve ayrı parametreler ile üretim yapılmış ve üretilen parçalar farklı yönleri ile incelenmiştir. Şöyle ki, bu durum aynı malzeme ve parametreler ile üretilen parçalarda aynı özelliklerin farklı sonuçlanmasına bile yol açmaktadır. Schneider ve diğ. ile Lu ve diğ., yapmış oldukları çalışmalarda kullandıkları aynı malzeme, aynı lazer gücü/hızı ve nispeten benzer diğer parametrelere rağmen mekanik özelliklerde parça mukavemetini önemli ölçüde etkileyecek değişim ortaya çıkmıştır [63, 64]. Literatürde bu gibi birçok diğer çalışmalarda da ortaya çıkan bu durum aynı zamanda tez çalışması kapsamında da gözlenmiştir. Karşılaşılan durumun, her üretim sisteminde meydana gelebilen olan ortam şartlarındaki farklılıklar, iş dosyalarındaki hatalar, anlık oluşan istenmeyen durumlar vb. gibi değişiklik oluşturacak birçok parametre ile oluşabileceği düşünülmektedir. Fakat bu gibi hataların minimal derecede olduğu düşünüldüğünde büyük sorunun asıl üretimin yapıldığı makine ve ekipmanlarda olduğu varsayılabilir. Kısacası, özellikle parçayı oluşturan makinenin ve ekipmanlarının kullandığı girdilerin iyi analiz edilmesi, yaşanan tekrarlanabilirlik ve buna bağlı doğruluk sorunlarının üstesinden gelecektir. Yöntem ise kullanılacak sonlu elemanlar yöntemi ile üretim kalibrasyonunun ve simülasyonunun

uygulanmasıdır. Bu şekilde kalibrasyon parçalarının üretimi yapılarak kalibrasyon işlemi tamamlanacak ve üretimin parametre optimizasyonunu sağlayacak simülasyon aşaması sayesinde de tekrarlanabilirlik ve doğruluk sağlanacaktır.

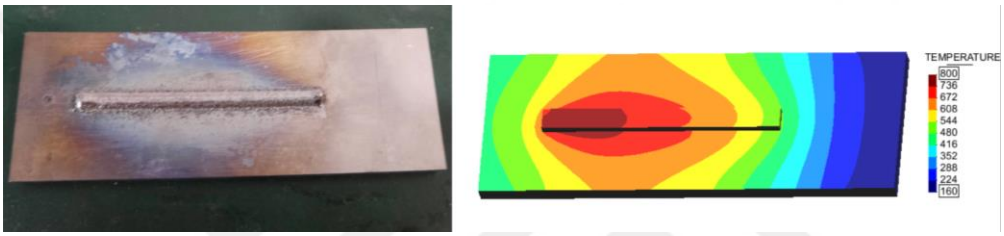
Metal Eİ incelemeleri ve analizleri, fen bilimleri başlığı altında listelenen birçok bilim dalının (matematik, fizik, kimya vb. temel bilimler) yanı sıra, bununla birlikte, bu bilim dallarının akademik disiplin gruplarının altında yer alan ögeleri de (termodinamik, malzeme bilimi, optik, cebir, geometri, vb. alt dalları) içermektedir. Deneysel olarak gerçekleştirilen üretim verileriyle oluşturulan Eİ simülasyon yazılımları, bahsedilen parametre optimizasyonunu mali açıdan olumlu şekle sokarak istenilen sayıda parçanın üretilmesini sağlamıştır. Aynı zamanda mevcut üretim donanımlarının da yazılım ile kalibre edilebilmesi sayesinde, üretim ile iç içe çalışan bir ortam yaratılmış ve hedeflenen parça özelliklerine ulaşılmasını da epey kolay hale getirmiştir. Özet olarak bu yazılımlar kullanılarak üretilecek parça sayındaki azalma ile birlikte sıklıkla bahsedilen mali ve zamansal açıdan tasarruf; hedeflenen parça kalitesinde iyileşme, parça doğruluğu ve tekrarlanabilirlik; satış tarafında ise müşteri memnuniyeti ve güven sağlanmıştır.

Literatür incelendiğinde, Xiaolong Wang ve Aimin Wang, tel beslemeli Eİ yönteminde [65] taban plaka tutucularının yerlerinin farklı konumlandırılmasının kalıntı gerilmelere etkisi incelemiştir. Farklı konumlandırılan taban plaka tutucuları, kalıntı gerilmenin azalmasında etkin bir rol oynamıştır (Şekil 2.13).



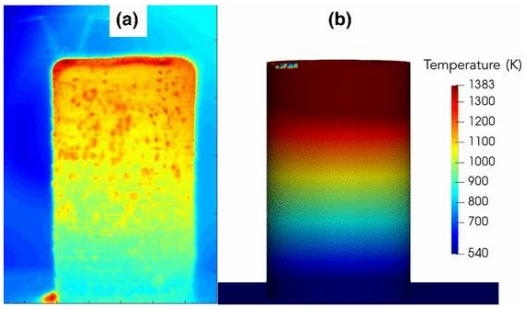
Şekil 2.13. Farklı tutucu konumlarının kalıntı gerilmelere etkileri (a) tutucu konumu 1; (b) tutucu konumu 2; (c) tutucu konumu 3; (d) tutucu konumu 4 [65].

Literatürde Eİ ile deneysel doğrulama ve karşılaştırma yapılan birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Bu araştırmalar kalıntı gerilme, çarpılma, nispi yoğunluk, mekanik özellikler gibi birçok farklı özelliğin incelenmesini içerirken, parametre optimizasyonunu içeren çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda parçalar farklı parametreler ile üretilirken, parçanın araştırma konusu olan özellikleri kısmi olarak incelenmiştir. Örneğin, Chiumenti ve diğ. [66] Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin üretimini ve sonlu elemanlar yöntemiyle bu sürecin simülasyonunu karşılaştırmışlardır. Sayısal modelin kalibrasyonu hem biriktirme işlemi sırasında hem de sonraki soğutma aşamasında oda sıcaklığına kadar olan deneysel kanıtlarla Şekil 2.14'deki gibi dikkate değer bir uyum göstermiştir.



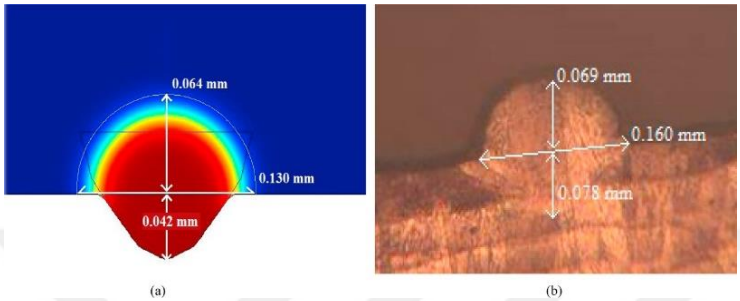
Şekil 2.14. Üretim sürecinin sonunda sıcaklık kontur dolgusunun kalan numune işareti ile (gözlenen oksidasyon) karşılaştırılması [66].

Johnson ve diğ. [67] "Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekillendirme (LENS)" işlemi kullanılarak üretilen bir 304L paslanmaz çelik silindirin termal geçmişi, sonlu eleman analizi (FEA) kullanılarak simüle edilmiştir. Ortaya çıkan termal geçmiş, kalıntı gerilmeyi tahmin etmek için katı mekanik sonlu elemanlar analizi simülasyonuna ve üç boyutlu tane yapısı gelişimini tahmin etmek için kinetik bir Monte Carlo modeline bağlanmıştır. Tane yapısının deneysel EBSD ölçümleri ve işlem içi kızılötesi termal veriler, tahminlerle Şekil 2.15'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır.



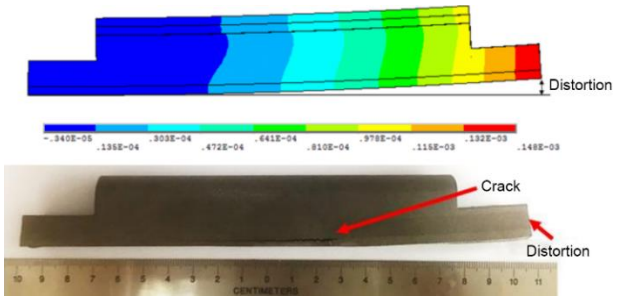
Şekil 2.15. (a) Üretim sırasında t = 450 s'de alınan kızılötesi görüntü, (b) t = 450 s'de simülasyon sıcaklık dağılımı [67].

Bir başka çalışmada Andreaotta ve diğ. [68] Inconel 718 süper alaşım tozunun sıcaklığa bağlı termal iletkenliğinin analizini, tek kaynak dikişinin modellenmesini, yüzey gerilimini, dikiş boyutlarını ve geometrisini incelemiş, ayrıca farklı parametreler ile oluşturulan eriyik havuz boyutlarının sonlu elemanlar analizi yöntemi ve deneysel yöntemle karşılaştırarak, ortalama %14 hata ile çok yakın tahminini yapmıştır. Şekil 2.16'da bu durumun karşılaştırılmalı olarak sunulduğu görsel yer almaktadır.



Şekil 2.16. Bir Eİ kaynak dikişinin (a) Simüle edilmiş ve (b) deneysel kesitler [68].

Zhang ve diğ. [69], Şekil 2.17'de sunulan ve önceki birçok çalışmada kullanılan Eİ yönteminin sonlu elemanlar metodu ile analizinde nadiren bahsedilen stres oluşumu, deformasyon ve destek katı sınırında çatlak oluşumu gibi kritik problemleri araştırmışlardır. Kalıntı gerilmeler ve diğer birçok faktörün ortaya çıkardığı çarpılmayı gerçekte oluşacak çarpılmaya benzer şekilde tahmin etmiş ve bunların yanında parçanın tabanında meydana gelen çatlağın gözenekli destek yapısından dolayı oluştuğunu ortaya koyarak çatlama konumunu da başarıyla tahmin etmişlerdir.

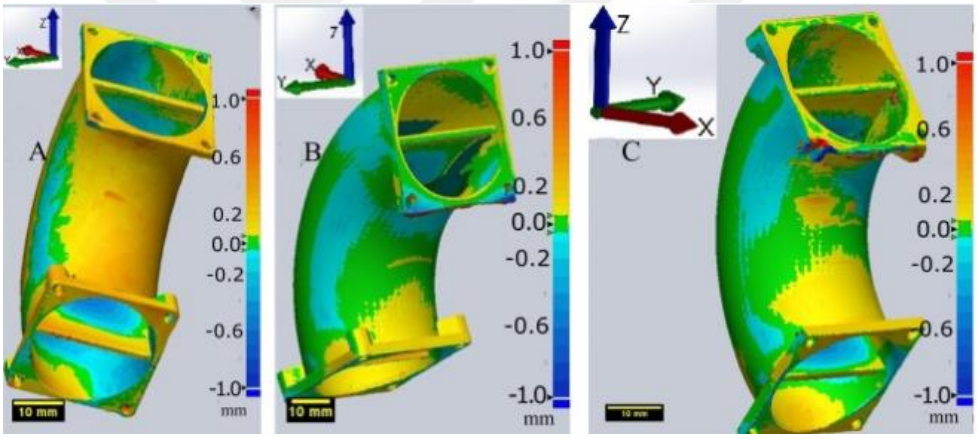


Şekil 2.17. Simülasyondaki bozulmanın deneysel sonuçla karşılaştırılması [69].

Yapılan literatür araştırmasında görüldüğü gibi, Eİ işlemlerine dair sonlu elemanlar yöntemli analizleri içeren ve farklı özelliklerin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır.

2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle LTYF

LTYF ile üretim sürecinin modellenmesi ve simülasyonunda lazer gücü, lazer tarama hızı, tarama stratejileri, toz tabaka kalınlığı, ışın çapı gibi parametreler malzemede oluşan artık gerilme, çarpılma ve yüzey kalitesi gibi faktörleri etkilemektedir [70]. Bu faktörlerin temel nedeni ısı transferi (akışı) ile malzemenin eritilip birleştirilme sırasındaki ısıtma ve soğutma süreçleri arasındaki zaman farklarından kaynaklanmaktadır [71]. Sonlu elemanlar yöntemiyle üretim parametrelerinin etkilerini deneysel üretimden önce analiz etmek üretimden önce yaşanabilecek problemlerin önüne geçmek mümkündür. Noha Peter ve ark. [72] çalışmalarında kalıntı gerilmelerin neden olduğu çarpılmayı, farklı destek yapılarında üretimin etkilerini farklı sonlu elemanlar yazılım programlarında simüle ederek ortaya koymuşlardır. Şekil 2.18'de farklı sonlu elemanlar yazılımında üretilmiş parça görüntüleri gösterilmektedir.



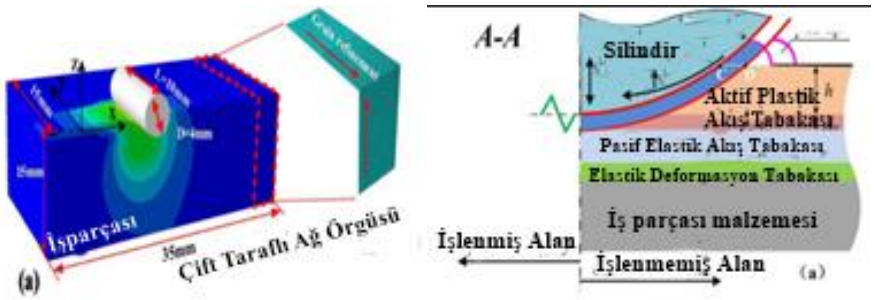
Şekil 2.18. Farklı sonlu elemanlar yazılımında üretim simülasyonu (A-Sunata, B-Amphyon ve C-Simufact) [72].

Bo Cheng ve ark. [73] farklı tarama stratejilerinin gerilme ve deformasyona etkisini incelemişlerdir. Farklı tarama stratejilerinin gerilme ve deformasyon değerlerini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. T. DebRoy ve ark. [74] farklı lazer gücü, tarama hızının ve katman kalınlığının artık gerilme ve çarpılmaya etkisini araştırmıştır. Lazer gücü ve tarama hızının artmasıyla, katman kalınlığının ise azalmasıyla artık gerilmenin azaldığını ortaya koymuşlardır. Başka bir çalışmada Noel M. Harrison ve ark.[71] katman kalınlığı, ağ boyutu gibi çözünürlük parametrelerinin, katman başına ısıtma ve soğutma süreleri gibi zaman parametrelerinin, güç yoğunluğu ve toplam işlem süresi gibi enerji parametrelerinin sıcaklık ve gerilim faktörlerindeki değişimleri üzerine çalışmalar

yapmışlardır. Bir diğer çalışmada ise Zhang ve diğ. [75] LTYF ile Ti-6Al-4V alaşım malzemesi ile üretilen pentamode parçalarının elastiklik modüllerini ve akma mukavemetlerini incelemiş, sonlu elemanlar yöntemli simülasyon ile kıyaslamıştır. Parçaların incelenen özellikleri ile simülasyon sonuçları arasında büyük bir sapma göstermiştir. Fakat farklı lazer gücü, lazer hızı, katman kalınlığı, tarama aralığı ve tarama stratejilerinin hem deneysel hem de analitik yöntemlerle geniş perspektifte incelendiği bir optimizasyon çalışmasına rastlanmamıştır.

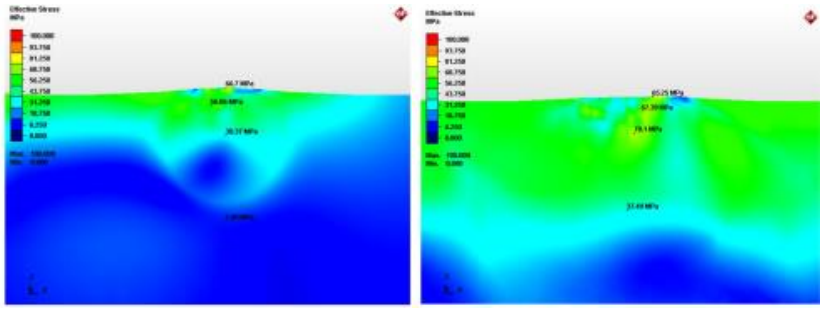
2.3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Ezerek Parlatma

Literatürde ikincil bir işlem olan ezerek parlatma simülasyonu yapılan birkaç çalışma mevcuttur. W.J. Deng ve diğerleri [76], ezerek parlatma simülasyonunda farklı yüklerin ve operasyon tekrarlama sayısının kalıntı gerilmesi üzerine etkilerini incelenmiştir. Parlatma kuvvetinin ve tekrarlama sayısının artması ile basma kalıntı gerilmesi arttığını bildirmişlerdir. Jian Zhao ve Zhanqiang Liu [77], ezerek parlatma simülasyonu sonu oluşan plastik deformasyon alanındaki iş parçası malzemesinin plastik akışını analiz etmişlerdir. Şekil 2.19'da bu durumun analitik olarak sunulduğu görsel yer almaktadır.



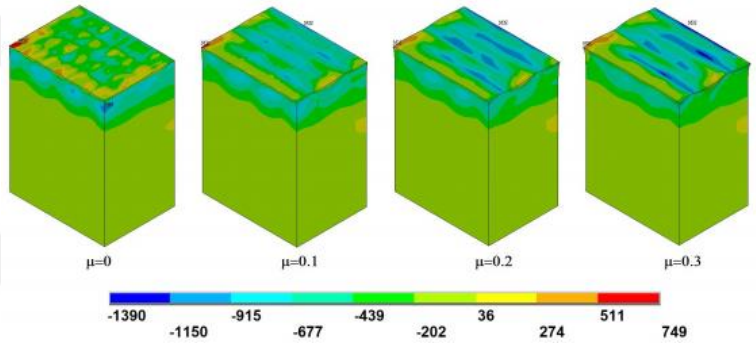
Şekil 2.19. (a) Tek silindir ile ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi (b) plastik yığılmanın analizi, silindirin hareketinin basitleştirilmesi [77].

Sasa Randjelovic ve diğerleri [78] ezerek parlatma simülasyonu ile çeşitli bilye penetrasyon derinliklerinde ezerek parlatma sonrası iş parçası içinde oluşan kalıntı gerilmeleri incelemişlerdir. İncelemeler sonucu farklı operasyonel parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini Şekil 2.20'de görüldüğü gibi sunmuşlardır.



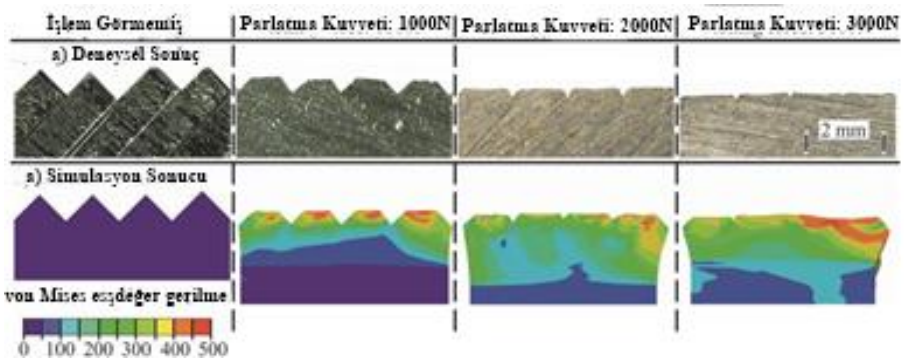
Şekil 2.20. Çeşitli bilye penetrasyon derinliklerinde bilyeli perdahlamadan sonra iş parçası içindeki artık gerilmeler [78].

Cyrus Amini ve diğerleri [79] ise, ezerek parlatma simülasyonunda farklı sürtünme katsayılarında oluşan kalıntı gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 2.21'de meydana gelen kalıntı gerilmeler gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Sürtünme katsayısı arttıkça parlatma yönüne (σ_z) dik derin kalıntı gerilme (MPa) [79].

Literatürde Eİ ile üretilen parçaların ikincil bir işlem olan ezerek parlatma ile simülasyon çalışmaları sınırlı sayıdadır. Lars Hiegemann ve diğerleri [80], Eİ yöntemiyle üretilen parçaların ezerek parlatma simülasyonu ile farklı yüklerin parça üzerindeki pürüzlülük ve sertlik değerleri incelenmiştir. Parlatma kuvvetinin artması ile parçaların sertliğinin arttığını ve yüzey kalitesinin arttığını bildirmişlerdir. Şekil 2.22'de bu durumun karşılaştırılmalı olarak sunulduğu görsel bulunmaktadır.



Şekil 2.22. Herhangi bir işlem uygulamadan ve farklı dönme kuvvetlerinde uygulanan ezerek parlatma sürecinde (a) Numunelerin deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan mikroskop altı görüntüleri (b) numunelerin simülasyon sonuçları [80].

Yapılan literatür araştırması sonucu ezerek parlatma operasyonunun LTYF ile üretilen Inconel 718 alaşım malzemesinin yüzey karakteristiğine etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca Eİ sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üretilen parçaların üzerinde kalan gerilme, kalıcı plastik şekil değişimi vb. özellikleri içeren parçaların ve ısıl işlem görmüş parçaların başka bir sonlu elemanlar yöntemine aktarılarak ezerek parlatma operasyonunun uygulandığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, ezerek parlatma operasyonu kullanılarak LTYF ile üretilen Inconel 718 parçalarının yüzey kalitelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için ayrıca ezerek parlatma öncesi ısıl işlem uygulayarak farklı ikincil işlemler birlikte kullanılmış, bunun sonucunda tercih edilen bu koşulların da yüzey kalitesine etkisi detaylıca incelenmiştir. Bunun yanı sıra ezerek parlatma operasyonu sonrası oluşan kalıntı gerilmeler ampirik yaklaşım ve sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilerek iki farklı yöntemin karşılaştırılması yapılmıştır. Dolayısıyla bu çalışma ezerek parlatma operasyonunun LTYF ile üretilen Inconel 718 parçalarına etkisini hem deneysel hem sonlu elamanlar yöntemiyle ortaya koyarak literatüre katkı sunacağı düşünülmektedir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler

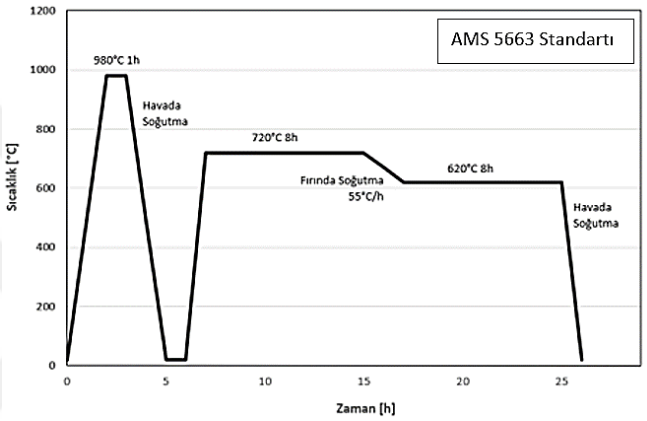
Tez kapsamında üretilen Inconel 718 alaşım tozları AP&C firmasından tedarik edilmiş olup, kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1'de sunulmuştur. İlgili tozun parçacık boyutu dağılımı 15-45 μm ve SEM görüntüsü Şekil 3.2'de görülmektedir. Literatür araştırması ve üretici firmanın sanayi tecrübesinden yararlanılarak Tablo 3.2'deki üretim parametresinde, bu tozlar kullanılarak ENAVISION 250 3D Eklemeli İmalat Makinesinde Ø20 x 80 mm boyutlarındaki içi dolu silindirik çubuk parçalar üretilmiştir. Numunelerden bir kısmına ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem AMS 5663 Standardına uygun olarak, (980 °C'de 1 saat çözeltiye alma ısıl işlemi/havada soğutma, 720°C'de 8 saat, 55°C/h soğutma hızıyla fırında 620°C' ye soğutma, 620°C'de 8 saat yaşlandırma ısıl işlemi/havada soğutma) Şekil 3.1'de grafik olarak sunulduğu şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili ısıl işlemde kullanılan HT5-1200 tip yüksek sıcaklık sanayi fırını görüntüsü Şekil 3.2'de sunulmuştur. Isıl işlem görmüş ve işlem görmemiş numune fotoğrafları Şekil 3.2'de sunulmuştur. Isıl işleme tabi tutulan ve ısıl işleme tabi tutulmayan numuneler ezerek parlatma ikincil işlemine tabi tutulmuştur. Bu süreçte Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. İşlem görmemiş numunelere uygulanan işlem parametreleri Tablo 3.3'de ve ısıl işlem görmüş numunelere uygulanan işlem parametreleri Tablo 3.4'de verilmiştir. İlgili deney düzeneği Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Inconel 718 süper alaşımın toz malzemesinin kimyasal bileşimi, AP&C GE Additive tarafından sağlanan veriler [81].

Element	Gösterge Değeri (% ağırlıkça)	Element	Gösterge Değeri (% ağırlıkça)
Ni	50.0-55.0	Cu	0-0.30
Cr	17.0-21.0	C	0-0.08
Nb+Ta	4.75-5.50	Si	0-0.35
Mo	2.80-3.30	Mn	0-0.35
Ti	0.65-1.15	P	0-0.015
Al	0.20-0.80	S	0-0.015
Co	0-1.00	B	0-0.006
Fe	Denge	UNS N07718'e göre AP&C Ni718 CL'nin (toz) kimyasal bileşimi	

Tablo 3.2. Parçaların LTYF yöntemiyle üretiminde kullanılan parametre seti.

Lazer odak çapı, d (µm)	85
Lazer tarama hızı, v (mm/s)	700
Lazer gücü, P (W)	190
Tarama çizgileri aralığı, h (µm)	70
Toz katman kalınlığı, t_{layer} (µm)	20
Yeniden toz serilme süresi, (s)	11
Tarama Stratejisi	Satranç Tablası Tarama Stratejisi (Chessboard) 5x5 mm Boyutlarında Katman Başına 67° Döndürme
Taban Plakası Malzemesi	S316L

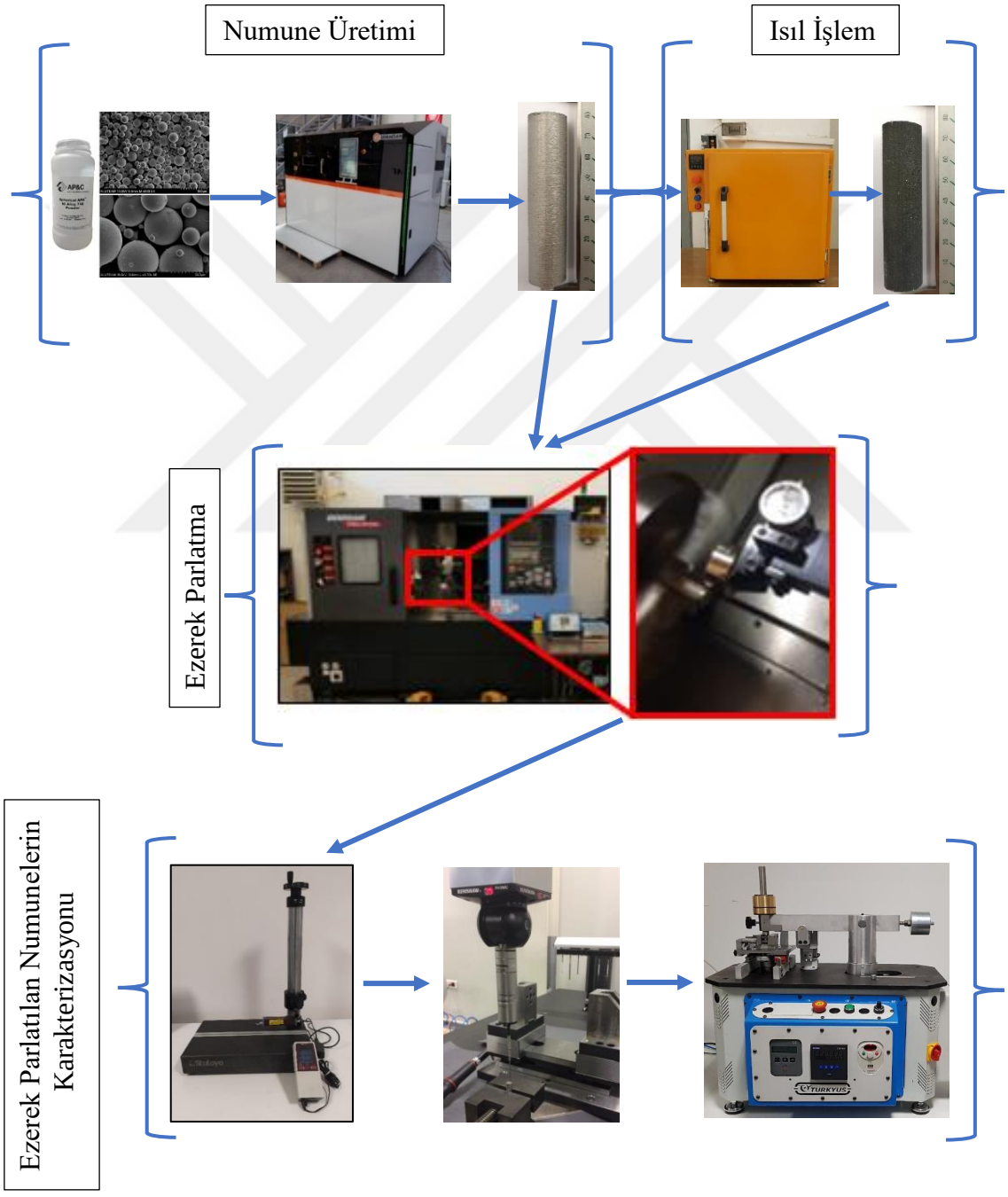


Şekil 3.1. Isıl işlem süreci.

İşlem görmemiş ve işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçülmesinde Şekil 3.2'de sunulan Mitutoyo SJ210 cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde ISO 1997 standartları esas alınmıştır. Ölçümlerde parçaların "Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü", Ra ve "Maksimum Pürüzlülük Derinliği", Rz dikkate alınmıştır. Her bir numunenin yüzey pürüzlülüğü Eİ ile üretilen parçalardaki düzensiz yüzey yapısı nedeniyle tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla on kez tekrarlanarak ölçülmüştür.

Boyutsal doğruluğu ölçmek için Şekil 3.2'de sunulan RENİSHAW PH10MQ model 3 boyutlu koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılmıştır. Ezerek parlatma operasyonları sonucu elde edilen parçaların nominal çaplarından sapmaları ölçülmüştür. Böylece seçilen operasyon parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen parçanın boyutsal doğruluğu analiz edilmiştir. Her bir çaptan 3 noktadan değer alınmış ve böylece o bölgedeki çap ölçülmüştür. Bir numune üzerinde üç farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak, her bir numune için nominal çaptan ortalama sapma değeri tayin edilmiştir.

Aşınma dayanım testleri için Şekil 3.2'de sunulan TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı kullanılmıştır. Aşınma parametrelerinin belirlenmesinde ASTM G133 aşınma testi standardından yararlanılmıştır. Numuneler, optimum oda sıcaklığında ve nem düzeyinde, 5N yük altında, 6 mm sürtünme mesafesinde ve 40 dakika süreyle aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşındırıcı malzeme olarak ise 6 mm çapında tungsten karbür bilye (WC %94, CO %6) kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Tez kapsamında numune üretimi, ısıl işlem ve numunelerin karakterizasyon süreçlerinin özeti.

Tablo 3.3. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler (9 test).

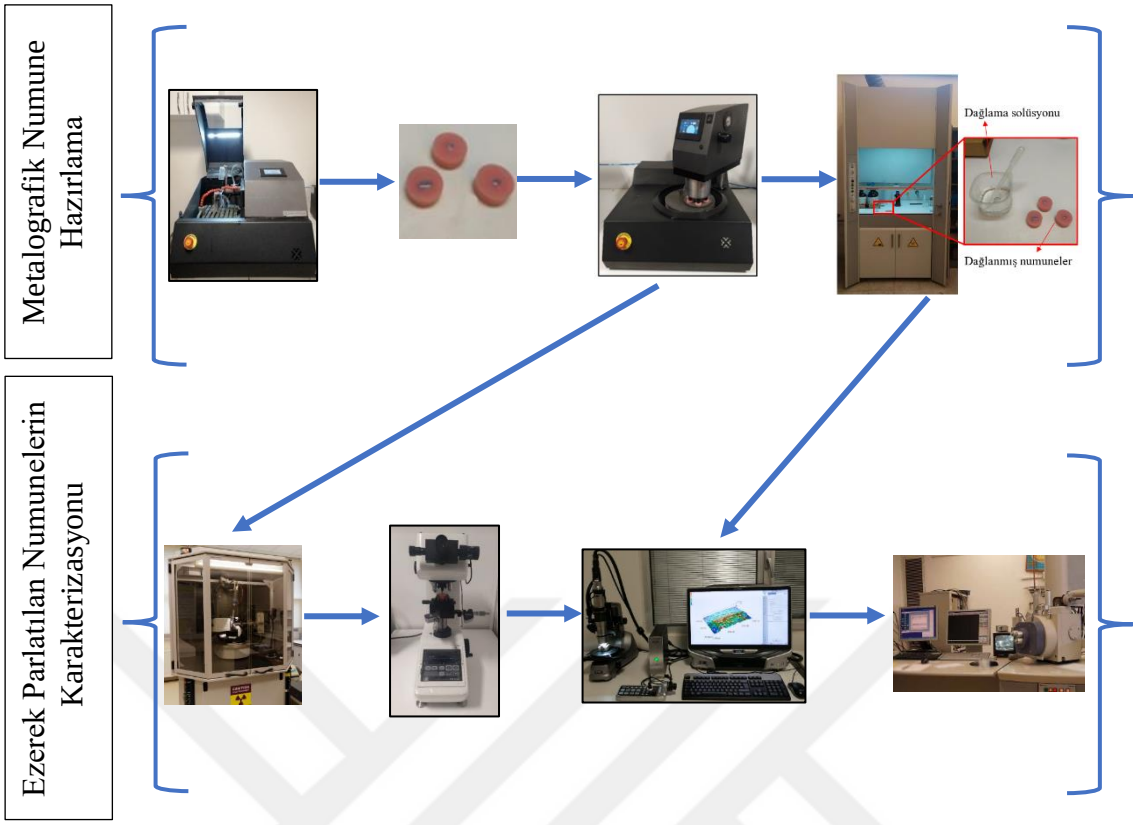
Ön Yük (Newton)	Kesme Koşulları	İlerleme (mm/dev)	Devir (RPM)
250	Kuru	0,1	350
500			700
750			1050

Tablo 3.4. Isıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler (2 test).

Ön Yük (Newton)	Kesme Koşulları	İlerleme (mm/dev)	Devir (RPM)
250	Kuru	0,1	1050
750			350

Yüzey işlemleri uygulanmış numuneler Mikrotest Multicut Sense Hassas Kesme Cihazı kullanılarak metalografik işlemlerine hazırlanmıştır. İlgili cihazların fotoğrafları Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Hassas kesme cihazı kullanılarak elde edilen numuneler, soğuk bakalitleme metodu kullanılarak metalografik işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Kesilen ve bakalite alınan numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 3.3'de sunulan Multipol Advanced Plus Tam Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazında yapılmıştır. Numunelerin parlatma aşamasında öncelikle elmas zımpara kullanılırken, parlatma aşamasında ise 15, 30 ve 60 μm hassasiyetli manyetik zımparalama diskleri kullanılmış ve son olarak manyetik parlatma keçesinde parlatılmıştır. Parlatılan numuneler öncelikle X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri için Şekil 3.3'de sunulan Bruker Smart Apex II Quazar X-Işını Tek Kristal Kırınım Cihazı kullanılmıştır. Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54 A dalga boyuna sahip Cu Kα katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 40mA ve 40Kv olarak seçilmiştir. 2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak 20-90° seçilmiştir [82]. Ölçümler işlenmiş parçaların işlenen yüzeylerinden yapılmıştır. Sonra parlatılan numunelerin yüzey ve yüzey altı sertlikleri Şekil 3.3'de sunulan Future-Tech FM-310e model mikrosertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mikrosertlik testleri ISO 6507-2 standartlarına uygun şekilde uygulanmış ve analiz edilmiştir. Vickers yöntemiyle yapılan ölçümlerde 50g (maksimum 2000 gf) yük 15 saniye uygulama süresi tercih edilmiştir. Bir numune üzerinde 6 kere sertlik ölçümü yapılmış ve ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Ayrıca ampirik yaklaşımla kalıntı gerilme hesabı için Vickers girinti testleri yapılmıştır. Vickers girinti testleri, işlem görmüş yüzeye yakın konumda ve her bir numune için 6 girinti oluşturularak ölçüm

yapılmıştır. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazında testler için uygulanan kuvvet 100 gf' dir ve ayrıca girinti oluşturma esnasında L_1 ve L_2 değerleri ilk olarak bu işlem sırasında kayıt altına alınmıştır. Daha sonra oluşan girintilerin alanları (A_{real}) Şekil 3.3'de sunulan Keyence VHX-6000 dijital mikroskop altında ölçülmüştür ve girinti oluşturma esnasında kayıt edilen L_1 ve L_2 değerleri digital mikroskop altında teyit edilerek ondalık olarak daha hassas ölçümü gerçekleştirilerek hata oranının minimize etmek hedeflenmiştir. Elde edilen ölçümler Denklem 15' deki formülde yerine konularak her bir numune için 6 farklı kalıntı gerilme değeri elde edilmiştir ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır ve standart sapması hesaplanmıştır. Daha sonra parlatılan numunelerin ikincil işlemler öncesi ve sonrasında yüzey ve yüzey altı özelliklerini incelemek için Şekil 3.3'deki çeker ocakta %15 HNO_3 + %60 HCl + %25 $C_3H_80_3$ oranlı dağlayıcı çözelti kullanılmıştır [83]. Hazırlanan dağlama solüsyonunda 30 sn - 1 dk süre ile dağlanmıştır. Mikroyapı ve yüzey topoğrafi görüntüleri dijital mikroskop ile elde edilmiştir. Dağlanan numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaların Şekil 3.3'de sunulan FEI (PHILIPS) XL30 SFEG SEM cihazı kullanılmıştır. Mikroyapı incelenmesi kapsamında gerçekleştirilen SEM analizleri Field Emission Gun elektron kaynaklı, 0.2kV-30Kv hızlandırma gerilimi altında çalışılmıştır. Ölçümler işlem görmüş parçanın alt yüzey kesitinden yapılmıştır.



Şekil 3.3. Metalografik numune hazırlama ve numunelerin karakterizasyon süreçlerinin özeti.

3.2. Sonlu Elemanlar Yazılımları ve İkincil İşlem Süreçlerinin Modellenmesi

Inconel 718 süper alaşımının LTYF ile üretim sürecinin simülasyon aşamasında Şekil 3.4'de proses zinciri sunulan Simufact Additive 2020 yazılımı kullanılmıştır. Tablo 3.2'de verilen üretim parametreleri Simufact Additive 2020 yazılımına entegre edilerek Ø20 x 80 mm boyutlarındaki içi dolu silindirik çubuk üretilmiştir. Daha sonra aynı yazlımda Şekil 3.1'deki ısıl işlem sürecinde silindir çubuğa ısıl işlem uygulanmıştır.



Şekil 3.4. Simufact Additive 2020 Sonlu Elemanlar Programı ve Proses Zinciri [84].

Simufact Additive 2020 sonlu elemanlar paket programı ile üretilen silindir parça üretim boyunca kazandığı bütün özellikler (gerinim, basma gerilim, çekme gerilim vb.) parçalar üzerinde kalması durumunda sadece ".unv" uzantılı olarak kaydedilebilmektedir. Ezerek

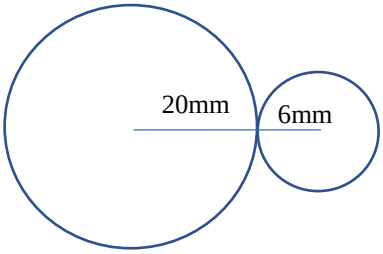
parlatma simülasyonunu gerçekleştirmek için ".unv" uzantılı dosyayı açabilen Şekil 3.3'de sunulan Simufact Forming 15.0 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Simülasyon çalışmaları için oluşturulan parlatma takım geometrisi ve boyutsal özellikleri deneysel çalışmada kullanılan parlatma takım dikkate alınarak belirlenmiştir. Parlatma takımında herhangi bir aşınmanın olmadığı kabul edilmiş olup rijit malzeme olarak tanımlanmıştır. Parlatma takımının çapı 6 mm, uzunluğu 10 mm ve uç radyüsü 1 mm olan içi dolu silindir olarak tanımlanmıştır.



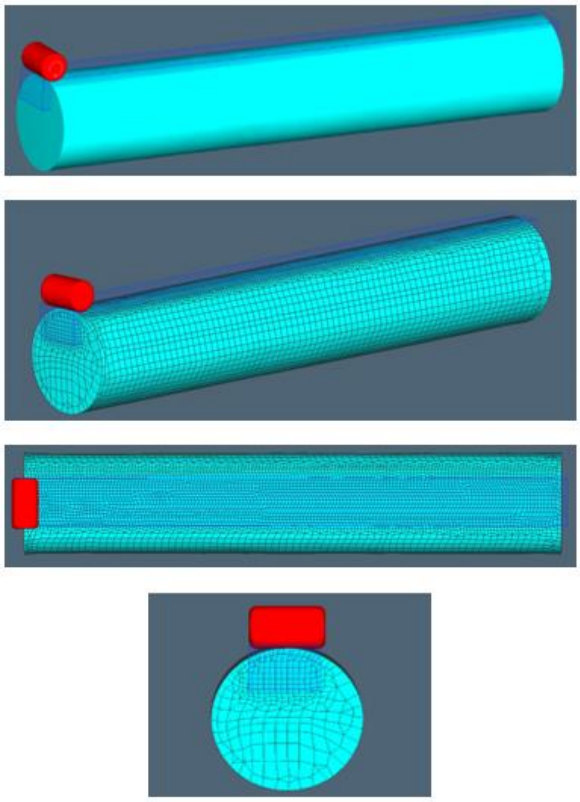
Şekil 3.5. Simufact Forming 15.0 Sonlu Elemanlar Programı ve Modülleri [85].

Sonlu elemanlar yöntemiyle ezerek parlatma operasyonu deneysel uygulamaya benzer olacak şekilde ortam sıcaklığı 20° C olarak belirlenmiştir. Ayrıca ezerek parlatma operasyonlarının deneysel kısmında olduğu gibi üç farklı ön yük, üç farkı devir ve ilerleme değerleri ezerek parlatma simülasyonlarına entegre edilmiştir. Ancak ezerek parlatma sonucu yüzey ve yüzey altında oluşan basma kalıntı gerilmesinin etkilediği katman kalınlığının daha doğru analizi için sadece parçanın üst kısmına ezerek parlatma uygulanmıştır. Bunun için Şekil 3.6'da gösterilen silindirin iş parçası üzerinde ilerleyeceği bölgelere yakın daha sıkı mesh (adaptive mesh) oluşturularak daha doğru sonuçlar elde etmek hedeflenmiştir. Ezerek parlatma operasyonu deneysel uygulamasında tornaya bağlı parça döndürülerek parlatma takımını döndürmektedir. Ezerek parlatma operasyonu deneysel uygulamasından farkı olarak ezerek parlatma simülasyonunda parça hareketsiz olarak sınırlandırılmıştır. Parlatma takımı ise şekilde görüldüğü gibi kendi ekseni etrafında döndürülerek ve -y yönlü kuvvet uygulayacak şekilde sadece +x yönlü ilerlemesine izin verilmiştir. Ezerek parlatma operasyonu deneysel uygulaması için belirlenen devir parametresi tornaya bağlı dönen parça içindir. Ezerek parlatma simülasyonunda parça sabit parlatma takımı döndüğü için uygulamada belirlenen devir simülasyondaki parlatma takımı için aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Tablo 3.5. Ezerek parlatma operasyonlarının deneysel uygulamasında kullanılan devir parametresinin yazılımdaki modellemeye uygun dönüşümü.

Ezerek Parlatma Deneysel (devir)		Ezerek Parlatma Simülasyon (devir)
N = 350 RPM		N= 350.20 / 6 = 1167 RPM
N = 700 RPM		N= 700.20 / 6 = 2333 RPM
N = 1050 RPM		N= 1050.20 / 6 = 3500 RPM
	$N_1.d_1 = N_2.d_2$	

Ezerek parlatma simülasyon testleri sonrasında ise basma kalıntı gerilmesi, çekme kalıntı gerilmesi ve kalıcı deformasyon analiz edilmiştir.



Şekil 3.6. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle analizinde kullanılan silindirik parçaya ait "adaptive mesh" uygulaması.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Ezerek Parlatma Operasyonu ile Yüzey İyileştirme Testleri

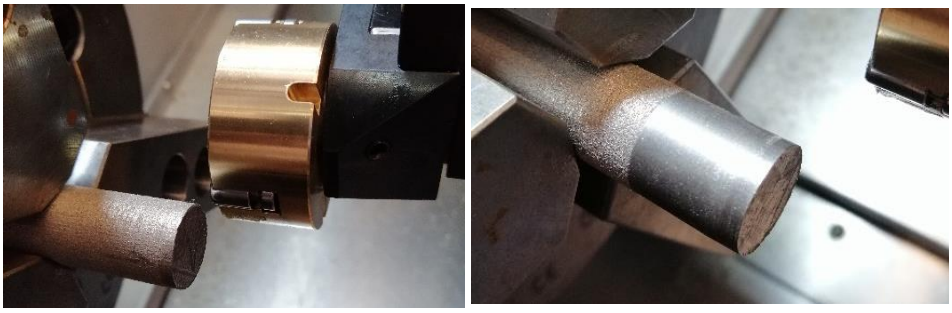
Ezerek parlatma yönteminde, LTYF ile üretilen silindirik parçalar ezerek parlatma takımının CNC torna tezgâhına bağlanması suretiyle ezerek parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu yüzey iyileştirme işleminin parçaların yüzey kalitesini, yüzey altı özelliklerini ve yüzey/yüzey altı katmanlarındaki kalıntı gerilmeleri etkileme potansiyeli çok yüksek olduğu bilindiği için bu operasyon ile yüzey bütünlüğü karakteristiklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ezerek parlatma testleri için belirlenen parametreler doğrultusunda deneysel tasarım oluşturulmuş ve testler optimum şartlar altında yapılmıştır.

Tez kapsamında ezerek parlatma operasyonunda değişen parametreler 3 farklı ön yük ve 3 farklı devir olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin ve uygun ezerek parlatma takımının seçimi, LTYF ile üretilmiş Inconel 718 malzemelerin ezerek parlatılması konusunda henüz herhangi bir çalışma olmadığı için geleneksel yöntemlerle üretilen Inconel 718 alaşımlarının yüzeylerinin iyileştirilmesinde, literatürde mevcut olan bilgilerden [47, 54] ve ezerek parlatma takımı üreticisi firmaların tecrübelerinden yararlanılarak optimum olarak belirlenen kuvvet ve devir referans alınmış, bununla birlikte bu kuvvet ve devrin üstünde ve altında değerler seçilmiştir. Tablo 4.1’ de ezerek parlatma operasyonlarında uygulanan parametreler verilmiştir.

Tablo 4.1. Ezerek parlatma operasyonunda kullanılan parametreler.

Ön Yük (N)	Kesme Koşulları	İlerleme (mm/dev)	Devir (RPM)
250			350
500	Kuru	0,1	700
750			1050

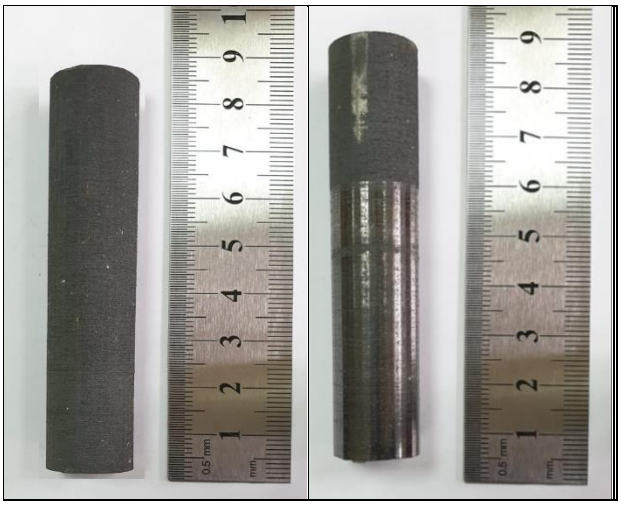
Şekil 4.1 işlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyondan önceki ve sonraki yüzey kalitesini görsel olarak daha net bir şekilde ortaya koymaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.1. Inconel 718 süper alaşım malzemesine uygulanan ezerek parlatma operasyonu (a) üretim sonucu ortaya çıkan yüzey ve (b) operasyon sonrası yüzey.

Gerçekleştirilen testlerde kullanılan parçalar işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş halleriyle kullanılmıştır. Bütün parametrelerde gerçekleşen ezerek parlatma sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey altı mikro sertlik değerleri ölçülmüş, boyutsal doğruluk ölçümleri ve topografik analizleri yapılmıştır. Parçaların yüzey kalitesi ve yüzey altı özellikleri incelenmiştir. Ezerek parlatma işlemi sonrasında mikrosertliğin en yüksek çıktığı parametre 750 N ön yük ve 350 RPM devir, mikrosertliğin en düşük çıktığı parametre ise 250 N ön yük ve 1050 RPM devir olarak bulunmuştur. Her iki operasyonun ortak parametresi 0,1 mm/dev‘ dir. Seçilen bu parametrelerde ısıl işlem uygulanmış parça ezerek parlatma operasyonu yapılmıştır. Şekil 4.2’de ısıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrasındaki görüntüleri verilmiştir.

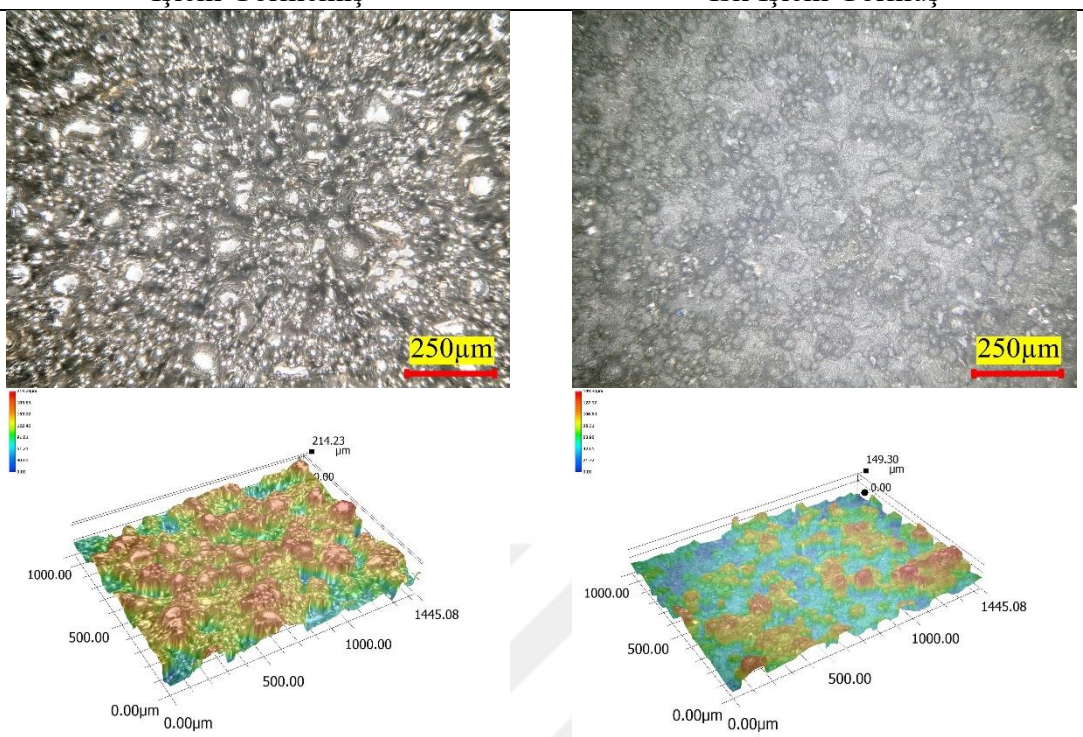


Şekil 4.2. Ezerek ısıl işlem görmüş silindir parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu öncesi ve sonrası görüntüleri (750 N - 350 RPM-0,1mm/dev).

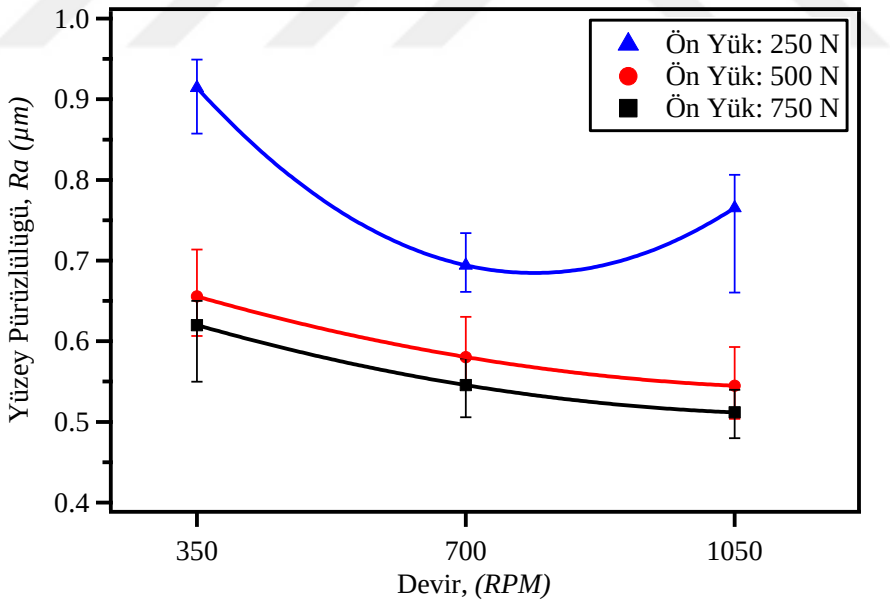
4.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi ve Topografik Analiz

İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş silindir numunelerin topografileri Şekil 4.3'te verilmiştir. Isıl işlem sonrası tozların birbirlerine yapıştığı görülmüştür. İşlem görmemiş numunelere 3 farklı ön yük (250 N, 500 N, 750N), 3 farklı devir (350 RPM, 700 RPM, 1050 RPM) ve ilerleme sabit tutularak (0,1 mm/dev) ezerek parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4 ve Tablo 4.2'de yüzey pürüzlülük değerlerinin bu parametrelere göre değişimi gösterilmiştir. Yapılan ölçümlerde parlatma kuvvetinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmüştür. Uygulanan en yüksek ön yük değeri olan 750 N' da ve en yüksek devir olan 1050 rpm' de pürüzlülük değerleri işlem görmemiş numunelerin pürüzlülük değerleri (Ra) 15 μm'den 0,5 μm' ye kadar düşürülmüştür. Devirin artmasıyla penetrasyon derinliği artacağından dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmüştür [86]. Ancak 250 N ön yük uygulanan çalışmada, devir 700 rpm' e kadar arttırıldığında yüzey pürüzlülük değeri düşer sonrasında devirin 1050 rpm' e çıkarılması pürüzlülük değerini arttırmıştır. Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de parçaların mikroskop altında incelenerek elde edilen topoloji görüntülerinde de bu durum bariz bir şekilde görülmektedir. Bu durumun nedeni, düşük kuvvetlerde takıma yüksek devir verilmesinin parça ile ezerek parlatma takımı arasındaki temas süresini azaltmasıdır [87]. İş parçası ile ezerek parlatma bilyesi arasındaki temas yeterli zamanı bulamayacağından etkisini kaybetmiş ve sürtünme sonucu ısı artarak yüzey pürüzlülüğü artmaya başlamıştır [88]. Ayrıca bu durum farklı çalışmalarda ezerek parlatma takımının rijitliğini kaybederek oluşan titreşim sonucu yüzeyi çizmesi ile açıklanmıştır [89, 90]. 250 N için optimum devir olan 700 RPM kullanıldığında 350 RPM kullanılan çalışmaya göre yüzey pürüzlülüğünde (Ra) yaklaşık %30'a varan iyileştirme yapılarak 0,68 μm değeri elde edilmiştir. 500 N ve 700 N kuvvetlerinde devirin 1050 RPM' e kadar arttırılması bir sorun teşkil etmemiş aksine pürüzlülük değerlerini daha da düşürmüştür. Ayrıca yüksek kuvvetlerde devirin yüksek olması yüksek deformasyon ile düzenli plastik akış sağlayacağından dolayı parçanın pürüzlülük değerlerini oldukça düşürdüğü düşünülmektedir [90].

İşlem Görmemiş	Isıl İşlem Görmüş



Şekil 4.3. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş yüzeylerin topografi görüntüleri.



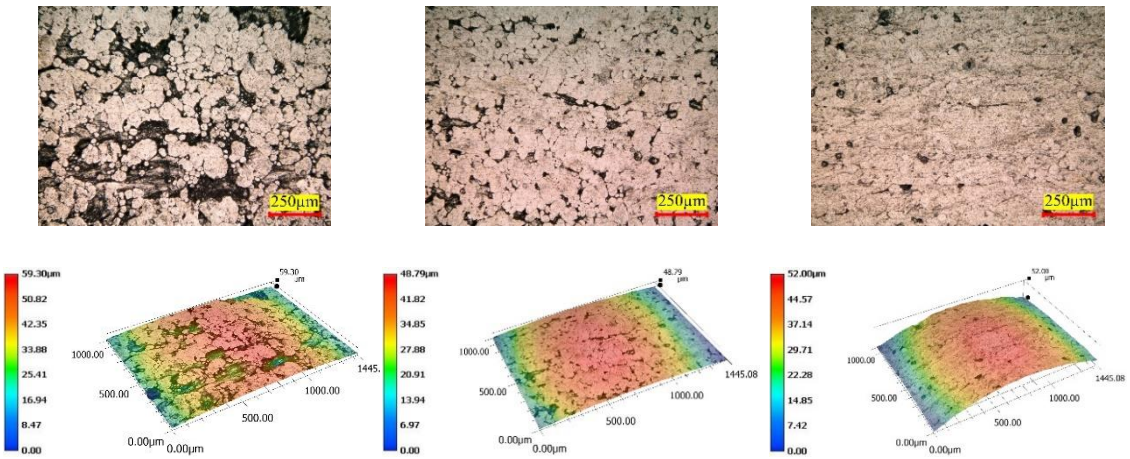
Şekil 4.4. Ezerek parlatma operasyonu sonucu devire bağlı olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri.

Tablo 4.2. Ezerek parlatma operasyonu sonucu devire bağlı olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri.

Ön Yük (N)	Devir (RPM)	Rz (µm)	± Sapma (µm)
250	350	10,859	2,39
	700	10,758	3,17
	1050	10,298	3,52
500	350	10,612	5,01
	700	8,789	4,01
	1050	6,694	1,82
750	350	7,563	3,58
	700	7,752	2,20
	1050	7,586	2,68

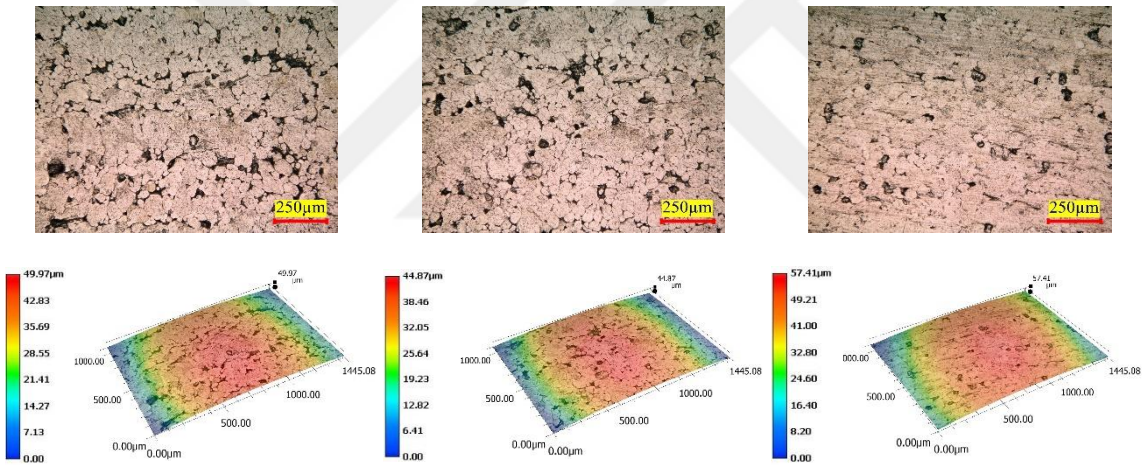
Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de parçaların mikroskop altında incelenerek elde edilen topoloji görüntüleri gösterilmiştir. Ezerek parlatma işlemi, ezerek parlatma takımı ile iş parçası yüzeyi arasında oluşan basınç ve etkileşim sonucu tepeleri plastik deformasyona uğratarak çukurlara doğru yöneltmiştir ve bunun sonucunda oluşan yüzeyde tepeler ile çukurlar arası fark azalarak yüzeydeki pürüzlülük değerleri iyileşmiş ve parlak bir yüzey oluşmuştur. 250 N ön yük uygulanmış parçanın topografisinde görülen çukurlar ve gözenekler 500 N ve 750 N ön yük uygulanan parçalarda sırasıyla azaldığı görülmektedir. Bu çukur ve gözeneklerin azalması pürüzlülük değerlerinde de bariz bir şekilde azalmasına neden olduğu görülmüştür. Öte yandan 500 N ve 750 N ön yük uygulanan çalışmalarda devirin artmasıyla çukur ve gözenekler oldukça azalırken 250 N' da uygulanan devir değerinin 700 RPM' e kadar çukur ve gözenekleri azalttığı fakat yukarıda da bahsedilen sebeplerden dolayı devirin 1050 RPM' e çıkarılmasıyla tekrardan arttığı görülmektedir.

250 N	500 N	750 N



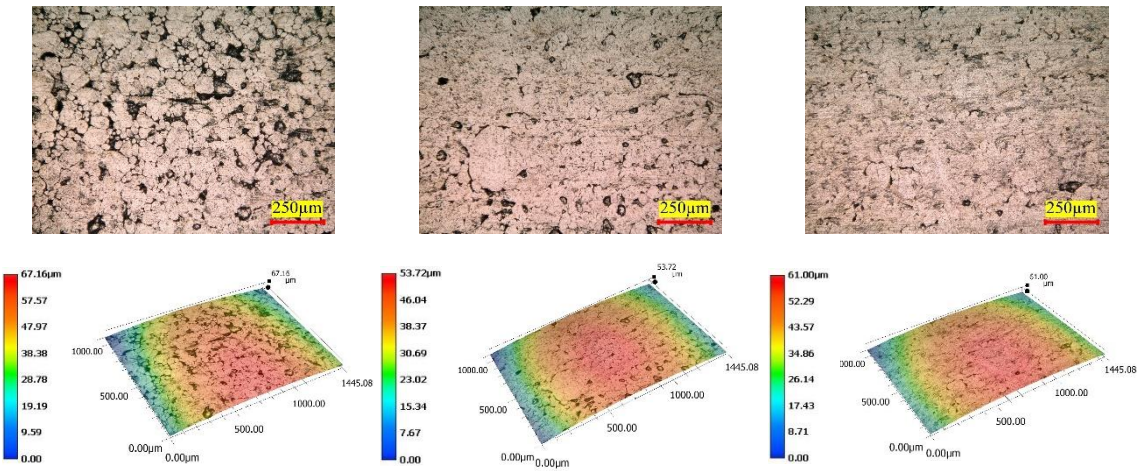
Şekil 4.5. 350 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri.

250 N	500 N	750 N



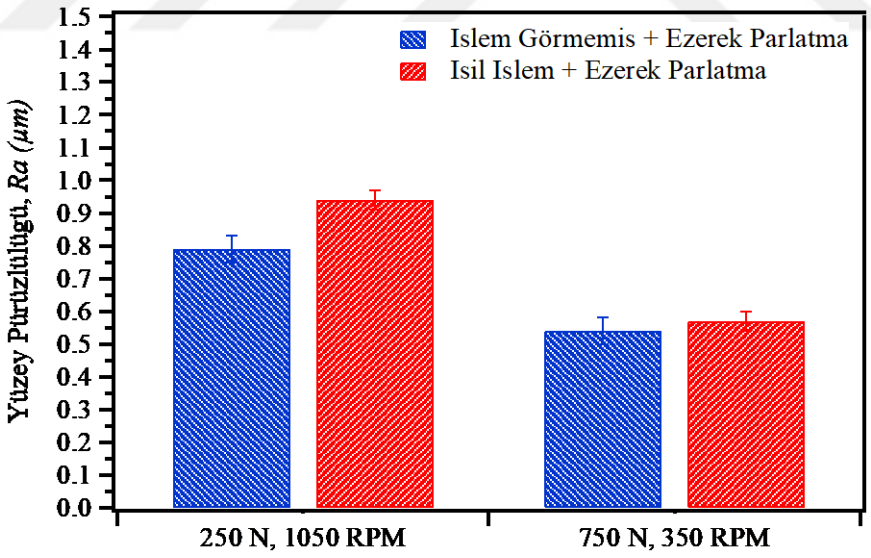
Şekil 4.6. 700 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri.

250 N	500 N	750 N



Şekil 4.7. 1050 RPM devirde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri.

2 farklı ön yük (250 N, 750 N), 2 farklı devir (350 RPM, 1050 RPM) ve ilerleme sabit tutularak (0,1 mm/dev) ezerek parlatma işlemi gerçekleştirilmiş, Şekil 4.8'de ve Tablo 4.3'de yüzey pürüzlülük değerlerinin bu parametrelere göre değişim grafiği gösterilmiştir.



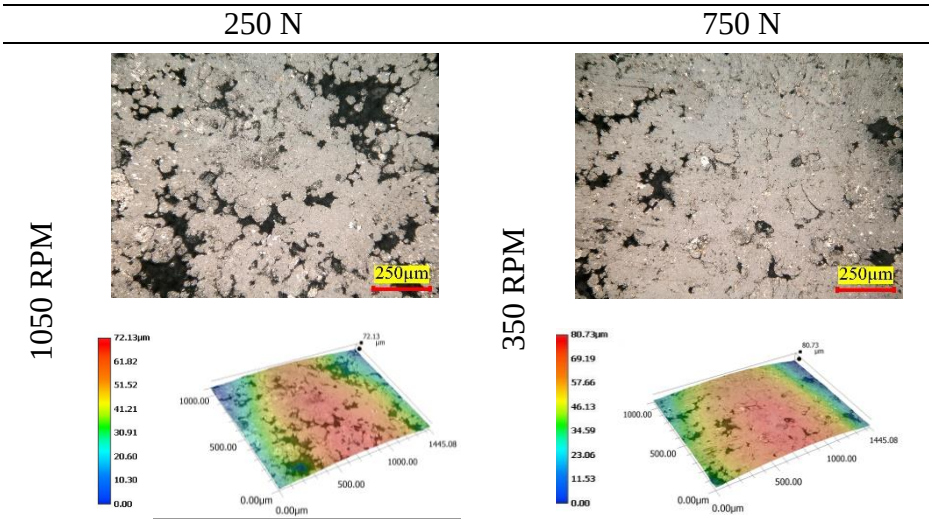
Şekil 4.8. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 250 N - 1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750 N - 350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri.

Yapılan ölçümlerde parlatma kuvvetinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmüştür. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan en yüksek ön yük değeri olan 750 N ve en düşük devir olan 350 RPM, parametreleriyle pürüzlülük değerleri işlem görmemiş numunenin pürüzlülük değeri (Ra) olan 15 μm'den 0,57 μm' ye kadar düşürülmüştür. Uygulanan en düşük ön yük değeri olan 250 N ve en yüksek devir olan 1050 RPM, parametreleriyle ise 0,94 μm' ye kadar düşürülmüştür.

Tablo 4.3. Ezerek parlatma operasyonu sonucu ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri.

Ön Yük (N)	Devir (RPM)	Rz (μm)	± Sapma (μm)
250	1050	7,623	2,12
750	350	6,098	3,59

Isıl işlem görmüş parçalarda işlem görmemiş parçalarda da olduğu gibi yüksek ön yük ve düşük devir parametresinde, düşük ön yük ve yüksek devirde yapılan işleme nazaran daha düşük pürüzlülük değerleriyle sonuçlanmıştır. Bunun nedeninin işlem görmemiş numunelerde uygulanan ezerek parlatma işleminde de olduğu gibi düşük kuvvet yüksek devirde parça ile ezerek parlatma takımı arasındaki temas süresinin az olmasından kaynaklı iş parçası ile ezerek parlatma bilyesi arasındaki temas yeterli zamanı bulamayacağından etkisini kaybetmiş ve sürtünme sonucu ısı artarak yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ayrıca yüksek kuvvetlerde devirin düşük olması yüksek deformasyon ile düzenli plastik akış sağladığından dolayı parçanın pürüzlülük değerlerini oldukça düşmüştür. Şekil 4.9'da ısıl işlem görmüş numunelere, 250 N - 1050 RPM ve 750 N – 350 RPM parametrelerinde ezerek parlatma operasyonu yapılmış, yapılan bu yüzey iyileştirme işleminin sonucunda yüzey topografi değerleri sunulmuştur. Şekillerde görüldüğü üzere öncesinde işlem görmüş numunenin farklı parametre şartlarında yapılan ezerek parlatma işlemi sonucunda yüzeyinde iyileşme meydana gelmiştir. Şekiller incelendiğinde, ısıl işlem işleminden sonra yapılan ezerek parlatma operasyonunda kuvvetin artması ve devirin azalması numune yüzeyinde iyileşme göstermiştir. Parçalara uygulanan ısıl işlem parçanın yüzey altında etkili olduğu ve yüzey pürüzlülük değerlerine hiç etki etmediği görülmektedir. Aynı zamanda ısıl işlemden sonra tozların birbirine yapışarak daha mukavim bir yapı oluşturması ezerek parlatmanın etkisini bir nebze düşürmüştür. Aynı ezerek parlatma parametresinde işlem görmemiş parçaların ısıl işlem görmüş parçalara göre ezerek parlatmadan sonra yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olması bu durumu kanıtlar niteliktedir.

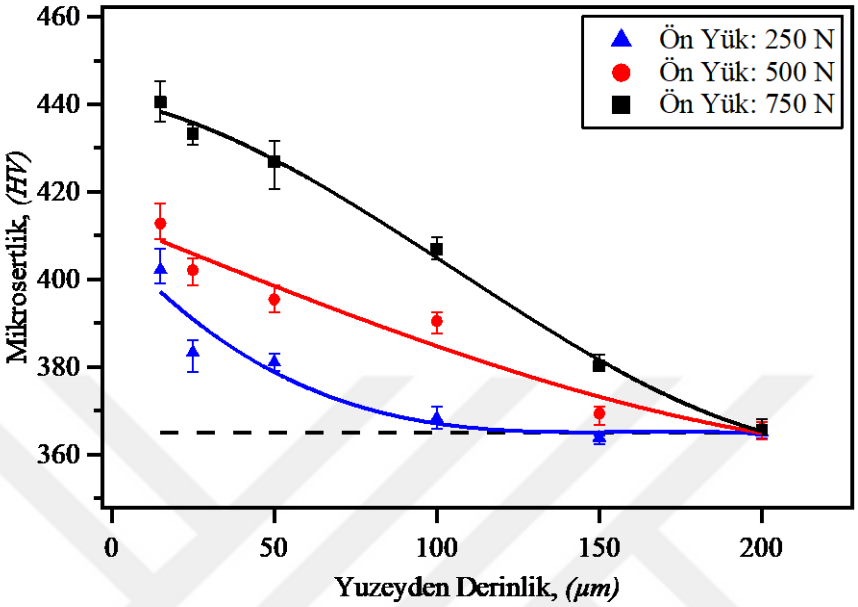


Şekil 4.9. Isıl işlem uygulanmış parçaların 250N-1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750N-350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin topografi görüntüleri.

4.1.2. Mikrosertlik

Ezerek parlatma işleminden sonra parçaların sertlik değerleri kayda değer bir şekilde artmıştır. Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de sertlik değerlerinin 3 farklı ön yük ve 3 farklı devir parametrelerine göre değişimi gösterilmiştir. Yüzeyin hemen altından (15µm) itibaren ölçülmeye başlanılan sertlik değerleri 200µm derinliğe kadar ölçülmüştür. Her bir kesme koşulu için sertlik ölçümleri 6'er kez yapılmış olup ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Literatürde ezerek parlatma işleminin Eİ ile üretilen parçalara uygulandığı çalışmalar mevcut olup bu malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgelerde sertleşme eğilimi gösterdiği görülmektedir [58, 91]. Şekillerde görüldüğü üzere işlenmiş yüzeyin hemen altından itibaren sertlik artışı meydana gelmiştir. Üretim sonrası 365 HV sertliğe sahip olan Inconel 718 parçaları ezerek parlatma işlemi sonrası sertlik değerleri yüzeye yakın kısımlarda ortalama 45 Vickers artmış, yüzeyden derine doğru inildikçe ise ezerek parlatma işleminin etkisinin azalmasından dolayı sertlik değerleri düşmektedir. Yapılan sertlik testleri sonucunda ezerek parlatma işleminin yaklaşık 150 µm'ye kadar etki ettiği görülmüştür. Şekil 4.10'da 350 RPM devirde ve farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri sunulmuştur. Kuvvetin yüksek (750 N) ve devirin düşük (350 RPM) olduğu uygulamada ezerek parlatma takımı ve parçanın yüzeyi arasındaki temas süresinin daha fazla olmasından

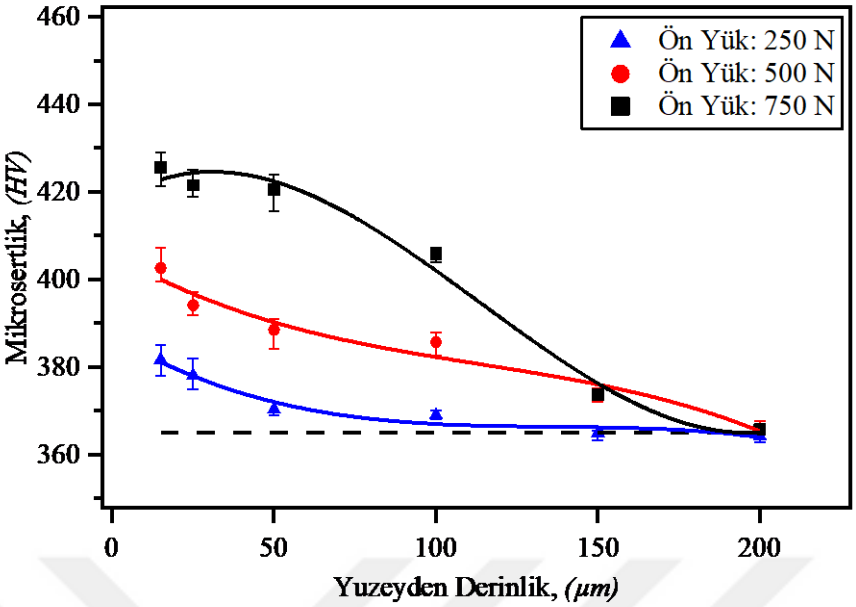
dolayı sertlik değerinin diğer parametrelere göre daha fazla arttığı ve 440 HV değerine kadar ulaştığı görülmüştür. Bu değerler malzemenin işlem görmemiş mikrosertliğinden yaklaşık olarak %23 oranında daha fazla olmuştur.



Şekil 4.10. 350 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri.

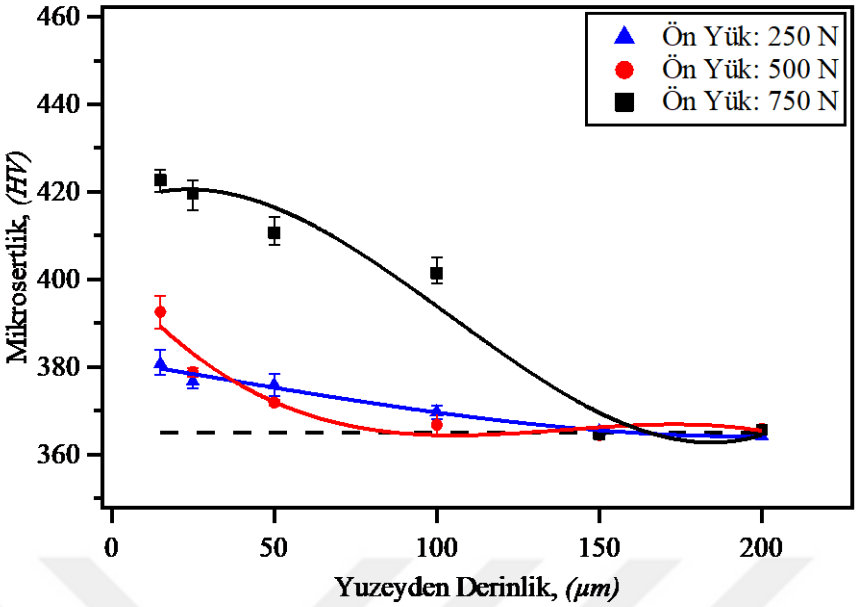
700 RPM devirde uygulanan ezerek parlatma işleminin ön yüklere bağlı olarak yüzeyaltı sertlikleri grafiğe dönüştürülmüş ve Şekil 4.11'de sunulmuştur.

350 RPM devirde yapılan deneylerde olduğu gibi işlenmiş yüzeyin altında pekleşme meydana gelmiştir. Bu pekleşme tüm koşullar için malzemenin işlenmiş yüzeyinden yaklaşık olarak 100 µm derinliğe kadar devam etmiştir. 100 µm derinlikten sonra malzemenin işlem görmemiş sertlik değerine ulaşmış ve sonrasında 200 µm derinliğe kadar kararlı bir mikrosertlik değerleri oluşmuştur. İşlenmiş yüzeyin hemen altından alınan sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değeri 426 HV'dir. Bu değer malzemenin işlem görmemiş sertliği ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %18 daha fazladır. En düşük mikrosertlik değeri 382 HV ve işlem görmemiş sertlik değerinden %5 daha fazla olmuştur.



Şekil 4.11. 700 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri.

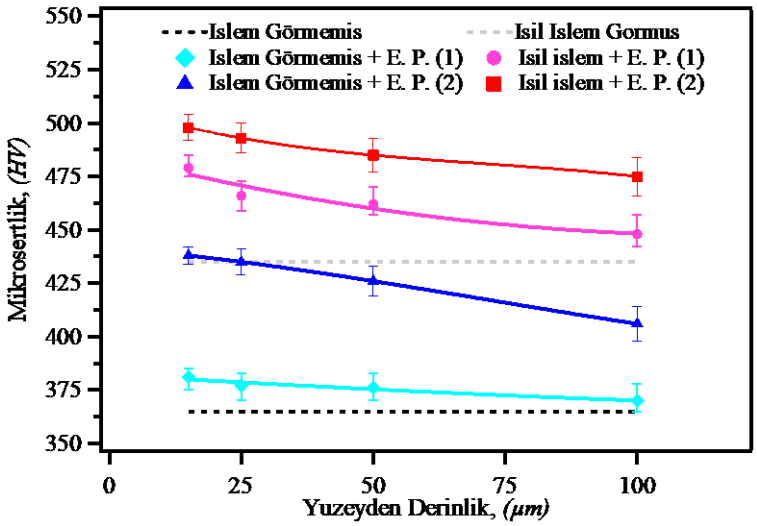
Çalışma kapsamında yapılan deneylerde en yüksek devir olan 1050 RPM ve farklı ön yükler altında yüzey altı mikrosertlik değerleri Şekil 4.12'de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde diğer devirlerde de olduğu gibi işlenmiş yüzeyin altında pekleşme meydana gelmiştir. Yüzeyin hemen altından alınan sertlik değerlerindeki en yüksek mikrosertlik değeri 423 HV ve bu sertlik değeri malzemenin işlem görmemiş sertlik değerinden yaklaşık olarak %16 daha fazla olmuştur. En düşük sertlik değeri ise kuvvetin düşük (250 N) ve devirin yüksek (1050 RPM) olduğu uygulamada, sertlik değeri 15 HV gibi az bir artış sağlayarak 380 HV değerine ulaşmıştır. Bu değer malzemenin işlem görmemiş mikrosertliğinden yaklaşık olarak %5 oranında daha fazla olmuştur.



Şekil 4.12. 1050 RPM devirde farklı ön yükler altında ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri.

Başlangıç sertlik değerlerine göre ön yükün artmasıyla sertlik değerleri artmıştır fakat uygulanan devirin artmasıyla sertlik değerlerinde daha az bir artış görülmüştür. Sertlikteki artışın nedeni kuvvetteki artışın penetrasyonu arttırması ve bundan dolayı plastik deformasyonun artmasıdır [86]. Artan devir ile ilişkili azalan yüzey sertliği, sürtünmenin artışıyla işlem bölgesindeki sıcaklık değerinin artışıyla birlikte iş parçasında termal yumuşama mekanizmasının oluşmasıyla açıklanmaktadır [92]. Ayrıca ezerek parlatma işlemi yüzeyde basma kalıntı gerilme alanı oluşturarak yorulma dayanımını ve sertliği arttırır [87]. Isıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma işleminden sonra parçaların sertlik değerleri kayda değer bir şekilde artmıştır. Şekil 4.13'de sertlik değerlerinin önceki çalışmalarda seçilen mikrosertliği en yüksek (750 N ön yük, 350 RPM devir) ve en düşük (250 N ön yük, 1050 RPM devir) çıkaran parametrelere göre değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere işlenmiş yüzeyin hemen altından itibaren sertlik artışı meydana gelmiştir. Önceki çalışmada üretim sonrası ortalama 365 HV sertliğe sahip olan Inconel 718 parçalarının sertlikleri ezerek parlatma işlemi sonrası sertlik değerleri yüzeye yakın kısımlarda ortalama 45 Vickers arttığı görülmüştü. Isıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrası oluşan mikrosertlik artışları incelenmiş ve işlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma işlemine göre ısıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan işlem sonrasında sertlik değerlerinin daha

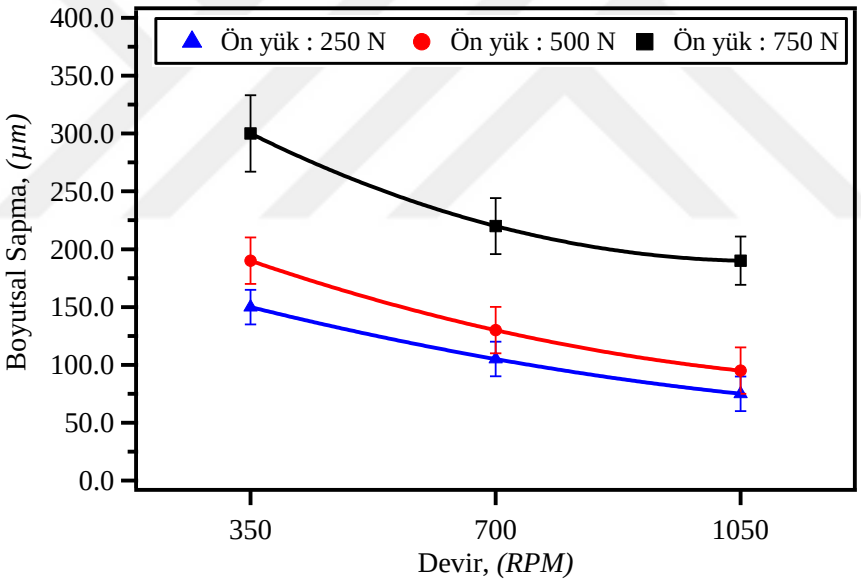
da arttığı görülmüştür. Kuvvetin düşük (250 N) ve devirin yüksek (1050 RPM) olduğu uygulamada ezerek parlatma takımı ve parçanın yüzeyi arasındaki temas süresinin daha az olmasından dolayı sertlik değerinin diğer parametrelere göre daha düşük çıktığı gözlenmiştir. Artan devir ile yüzey sertliğinin azalması, sürtünmenin artışıyla işlem bölgesindeki sıcaklık değerinin artması iş parçasındaki termal yumuşama neden olmasıyla açıklanmaktadır. Ezerek parlatma öncesinde ise parçanın ısıl işlem görmesi parçanın sertliğini önemli miktarda arttırmıştır ve üzerine yapılan ezerek parlatma işlemi parçanın sertliğini yaklaşık %26,59 arttırmıştır. Kuvvetin yüksek (750 N) ve devirin düşük (350 RPM) olduğu uygulamada ezerek parlatma takımı ve parçanın yüzeyi arasındaki temas süresinin daha fazla olmasından dolayı sertlik değerinin diğer parametrelere göre daha fazla arttığı görülmüştür. Diğer parametrelerde de olduğu gibi ezerek parlatma işlemi yüzeyin altında pekleşme meydana getirmiştir. Bu parametrelerle yapılan çalışmanın sonuçlarına da bakıldığında işlem görmemiş parçaya yapılan işlem sonucunda oluşan ve yüzeye yakın yerlerde ölçülen sertlik değeri 440 HV'dir. Yine görülmektedir ki derinlere inildikçe bu aradaki fark kapanmaktadır. Isıl işlem görmüş parçada ise yüzeye yakın yerlerde 498 HV değerine çıkarak yaklaşık %14'lük bir artış sağlayarak en yüksek sertlik değerini oluşturmuştur. Sertlikteki bu artışın diğer bir nedeni ise yüksek kuvvet değerinin penetrasyonu arttırmasıdır. Ayrıca sertlikteki bu artış ile birlikte basma kalıntı gerilmesi de artmıştır.



Şekil 4.13. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM).

4.1.3.Boyutsal Doğruluk Analizi

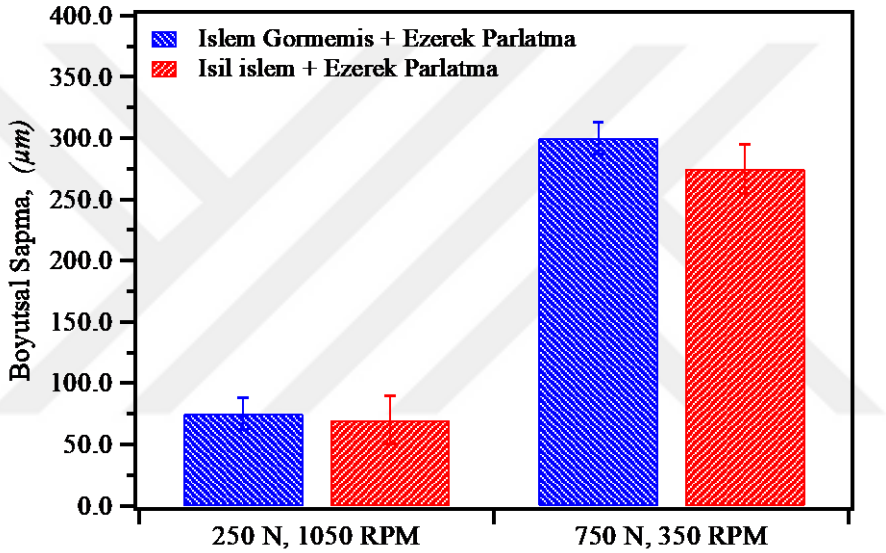
Boyutsal doğruluk imalat sonrası parçaların kullanıma uygunluğunu belirleyen bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Boyutsal doğruluk istenilen değer ile elde edilen değer arasında fark olarak tanımlanabilir. Boyutsal doğruluk ölçümleri için gerekli hassasiyeti sağlayan CMM cihazı kullanılmıştır. Elde edilen veriler Şekil 4.14'de boyutsal sapma olarak sunulmuştur. LTYF ile üretilen işlem görmemiş parçalar CMM ölçümleri sonucu çap değeri 20,16 ± 0,052 mm olarak ölçülmüştür. Şekil incelendiğinde yüksek ön yük uygulanması sonucu işlem görmemiş malzemenin çap değeri gerçek değerden daha küçük bir çap ortaya çıkarmıştır. Fakat bu durum düşük ve orta ön yükte nispeten gerçek çap değerine daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte devir yükseldikçe temas süresi azaldığından ezerek parlatma sonucu parçanın çaptaki boyutsal sapması daha düşüktür.



Şekil 4.14. Farklı ön yük ve devirlerde uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu parçaların çaplarında meydana gelen boyutsal sapmalar.

Isıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan ezerek parlatma işleminden sonra boyutsal doğruluk ölçümleri için gerekli hassasiyeti sağlayan CMM cihazı kullanılmıştır. Elde edilen veriler Şekil 4.15'de boyutsal sapma olarak sunulmuştur. İşlem görmemiş parçaya yapılan ezerek parlatma işlemine göre boyutsal sapmada ısıl işlem görmüş parçalara yapılan işlem sonrası boyutsal sapma değerleri ile yaklaşık olarak benzendir. Isıl işlem görmüş parçalar genleşerek başlangıç boyutlarına göre 50 µm sapmaya uğramıştır. Isıl

işlem sonrasında yapılan ezerek parlatma işleminde 250 N ön yük, 1050 RPM devir, parametreleriyle yapılan işlemde 750 N ön yük, 350 RPM devir, parametreleriyle yapılan işleme göre daha düşük sapma sergilemiştir. Bunun nedeni düşük yük ve yüksek devirde yapılan işlemde ısıl genleşmenin fazla olmasıdır. Parçanın ezerek parlatma öncesi ısıl işlem görmesi parçanın genleştiği ve ardından yapılan işlem sonrasında parçanın başlangıç boyutlarından diğer işlemlere nazaran daha düşük sapma gösterdiği anlaşılmıştır. 250 N, 1050 RPM, parametreleriyle yapılan işlem sonrasında 68,3 µm sapma ve 750 N, 350 RPM, parametreleriyle yapılan işlem sonrasında 276,3 µm sapma göstermiştir.

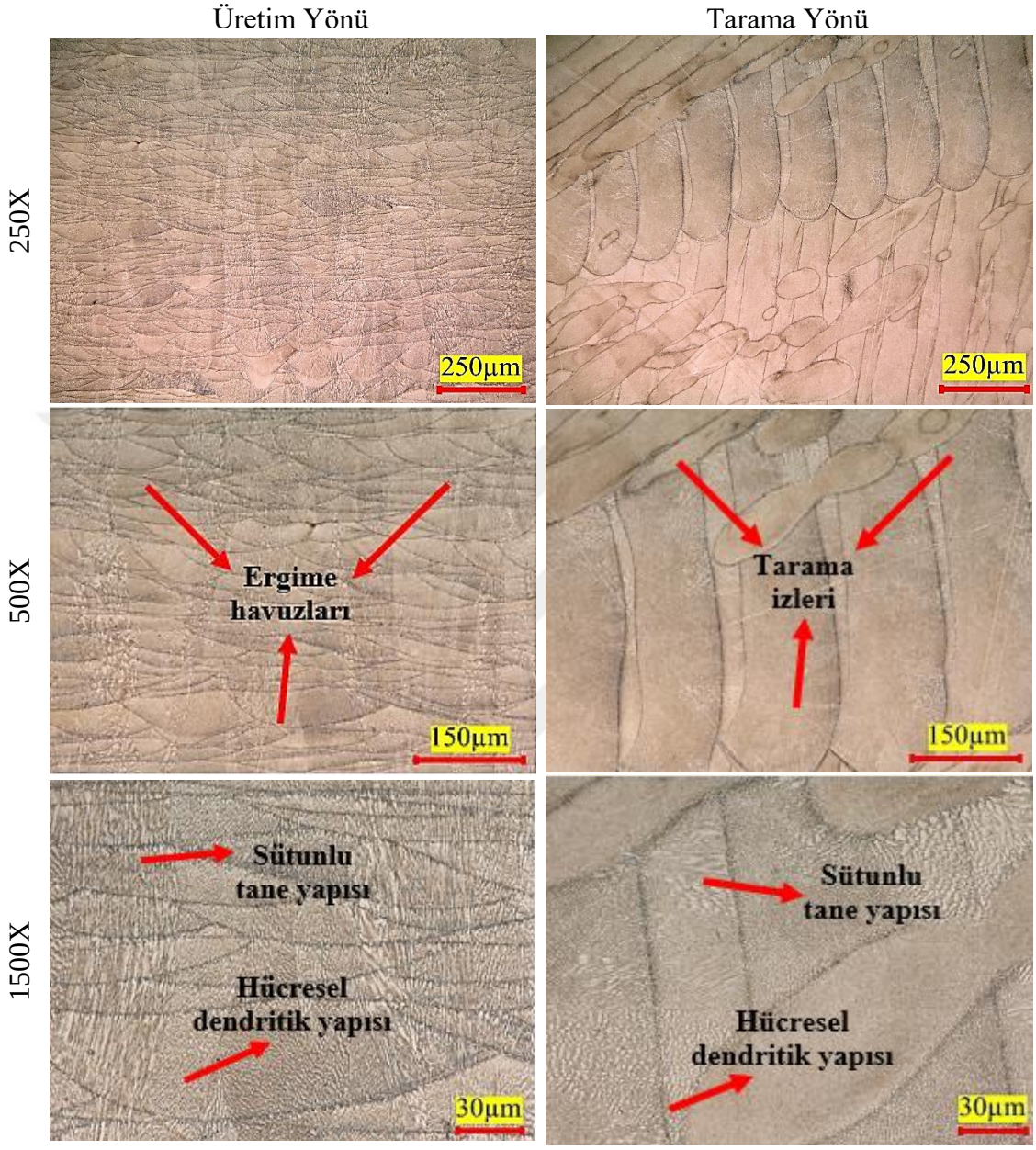


Şekil 4.15. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 250 N-1050 RPM, (mikrosertliği en düşük) ve 750 N-350 RPM, (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen boyutsal sapma değerleri.

4.1.4.Mikroyapı ve SEM Analizi

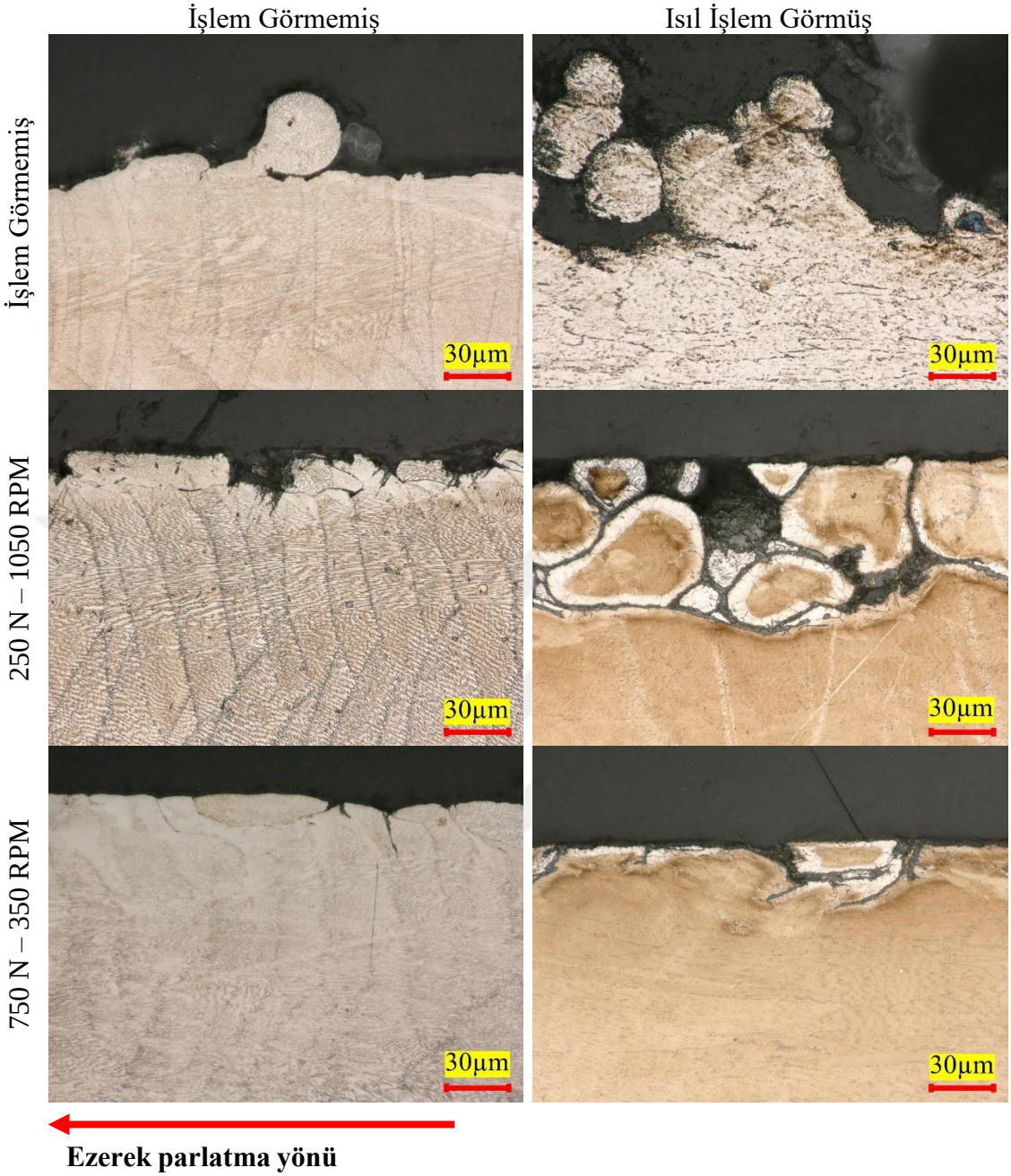
İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara farklı parametrelerde (250 N - 1050 RPM, 750 N - 350 RPM) uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrası bakalite alınan ve dağlama işlemleri gerçekleştirilen parçaların dijital optik mikroskop altında alınan mikroyapı görüntüleri bu başlık altında incelenmiştir. LTYF işlemi ile üretilen Inconel 718'in üretim yönündeki ve tarama yönündeki mikroyapısı, hücresel dendritik (cellular dendrites) yapılardan ve sütunlu tane (columnar dendrites) yapılarından oluşur [93]. Hücresel

dendritik yapılar ve sütunlu tane yapıları, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, işlem görmemiş Inconel 718 numunesinin mikro yapısında görülmektedir.



Şekil 4.16. İşlem görmemiş Inconel 718 parçasının mikroyapı görüntüleri.

Ezerek parlatma operasyonunda meydana gelen mekanik ve termal etkilerden dolayı silindirik iş parçasının yüzeyinden itibaren oluşturduğu mikroyapısal değişimleri gözlemlemek için parçalar optik mikroskop altında 1500x büyütmede incelenmiştir (Şekil 4.17). Bu incelemeler ezerek parlatma bilyesinin parçaya paralel bir şekilde ilerlemesinden dolayı parçanın yüzey altındaki mikroyapısal değişimlerini daha net görmek amacıyla parçaların inşa yönünden yapılmıştır.

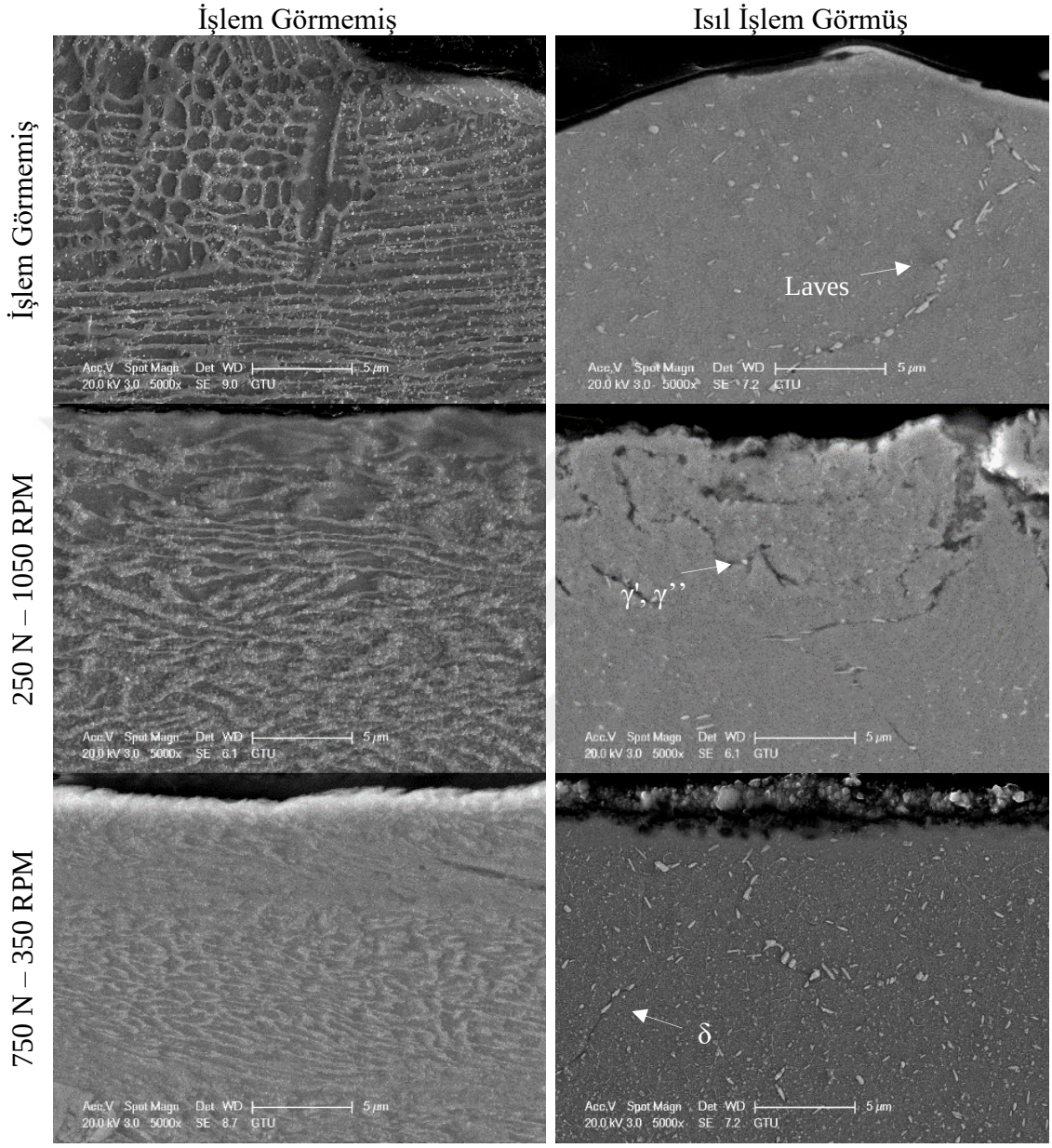


Şekil 4.17. İşlem görmemiş ve ısıl işlem uygulanmış parçaların 750 N ön yük, 350 RPM devir (mikrosertliği en yüksek) parametreleriyle yapılan ezerek parlatma operasyonları sonucu meydana gelen yüzey altı mikrosertlik değerleri.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde işlem görmemiş Inconel 718 malzemesinin ezerek parlatma sonrasında tane yapısının daha küçük olduğu görülmüştür. Tane yapısı ve sertlik artışı birlikte düşünüldüğünde küçük tane yapısı daha yüksek yüzey sertliğinin elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Yapılan işlem sonrasında malzemenin ergime havuz sınırlarının birbirine daha yakınlaştığı ve sıklaştığı belirlenmiştir. Buna ek olarak ezerek

parlatma işlemleri sonrasında ergime havuzlarının ezerek parlatma bilyesinin ilerleme yönüne doğru az da olsa bir yönelim gösterdiğini söylemek mümkündür. Ayrıca işlem görmemiş parçada yüzey üstünde tam ergimemiş olan toz partikülleri ezerek parlatma işlemiyle takım ile iş parçası yüzeyi arasında oluşan basınç ve etkileşim sonucu tepeleri plastik deformasyona uğratarak çukurlara doğru yöneltmiştir ve bunun sonucunda oluşan yüzeyde tepeler ile çukurlar arası fark azalarak yüzey kalitesi iyileşmiştir. 250 N - 1050 RPM parametreleriyle yapılan operasyonda iş parçası ile ezerek parlatma bilyesi arasındaki temas yeterli zaman bulamayacağından etkisini kaybetmiş ve sürtünme sonucu ısı artmıştır ve sertlik değerleri 750 N - 350 RPM parametreleriyle yapılan operasyon sonrası kadar artmamıştır. 750 N - 350 RPM parametreleriyle yapılan operasyonda ise iş parçası ile ezerek parlatma bilyesi arası temas süresi diğer parametreye göre daha fazladır. Dolayısıyla mikroyapı görüntülerinde de görüldüğü üzere yüzeyin daha düzgün olduğu görülmektedir. Isıl işlem görmüş parçaların mikroyapısı incelendiğinde ise parçanın yapısı üzerinde derin bir etkiye sahip olduğu ve parçaların mikro yapısında bulunan ergime havuzları, hücresel dendritik yapılar ve sütunlu tane yapıları yerini, taneler ve tane sınırlarına bırakmıştır. Literatürde, bu tip modifikasyonun nedeni, tane sınırı hareketinde sınırlamaya yol açabilecek, matris içinde dağılmış birincil karbürlerin ve ikincil fazların varlığına bağlanmıştır [94]. Yüzeyde ezerek parlatma işlemi sonrası bir plastik deformasyon etkisi sonrası tane yapısında değişiklik görülmüştür. Yüzeyde işlemden etkilenen yapı iç kısımla kıyaslandığında daha çok basılmış ve yapının homojenliği bozulmuştur. İçyapıda görülen farklı renklerde dikkat çeken dağılımların birbirleri içine geçtiği ve ayırt edici yapıların ortadan kaybolmaya başladığı dikkat çekmiştir. Aynı zamanda ezerek parlatma işleminin etkisinin arttırılmasıyla deforme olmuş bölgenin kalınlığında artış meydana gelmiştir. Şekil 4.18'de işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara farklı parametrelerde (250 N - 1050 RPM, 750 N - 350 RPM) uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrası mikroyapısal değişimleri gözlemlemek için parçaların SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde işlem görmemiş numunelerde 1000x'te alınan mikroyapı görüntülerinde de görüldüğü gibi daha detaylı olarak hücresel dendritik (cellular dendrites) yapılardan ve sütunlu tane (columnar dendrites) yapıları görmek mümkündür. Ayrıca bu parçalarda, LTYF işlemi sırasında hızlı katılaşma bazı elementlerin (Nb, Mo ve Ti) ayrılması nedeniyle Laves fazı gibi dengesiz fazların oluştuğu görülmektedir. Laves fazının alaşımın mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği

genel olarak kabul edilmektedir [95]. Bu faz, mikro boşlukların oluşumunun yanı sıra çatlak başlangıcı ve ilerlemesine neden olabilir.



Şekil 4.18. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma işlemi sonrası Inconel718 parçalarında oluşan yüzey altı SEM görüntüleri (5000x).

Isıl işlem görmüş parçaların SEM görüntüleri incelendiğinde Laves partiküllerinin tane içlerinde ve tane sınırları boyunca dağıldığı gözlemlendi. Laves fazının Nb, Mo ve Ti elementleri açısından zengin olduğunu, dendritik bölgelerin ise gösterildiği gibi Ni, Fe ve Cr elementleri açısından zengin olduğunu bilinmektedir [96]. Isıl işlem prosesleri ile Laves fazının çözünmesinin, alaşım matrisinde γ'' fazının oluşumunu destekleyen Nb

elementini serbest bırakmak için önemli bir husus olduğuna dikkat edilmelidir. Literatürde elde edilen sonuçlara benzer şekilde, bu çalışmada tüm ısıl işlem koşullarının ardından büyük miktarda çözünmemiş Laves partikülleri gözlenmiştir [94, 97]. Isıl işlem görmüş Inconel 718 alaşımı için, nano boyutta γ', γ'' fazlarının ve iğne şeklindeki δ fazının oluştuğu görülmektedir. Literatürde bazı araştırmacılar [98], bu fazların kısa ısıtma süreleri için 700 ile 900 ºC arasında çöktürüldüğünü belirtirken, bazıları [42] ise daha uzun yaşlanma süreleri için nispeten daha düşük sıcaklıklarda yani 550 ile 660 ºC arasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bazı araştırmacılar, γ'' fazının genellikle daha yüksek sıcaklıklarda (720 ºC) oluştuğunu, γ' fazının ise daha düşük sıcaklıklarda (620 ºC) oluştuğunu açıklamışlardır [41]. Oluşan bu fazlar, dislokasyon hareketini bloke ederek Inconel 718 alaşımının mekanik özelliklerinde bir artış sağlar [43].

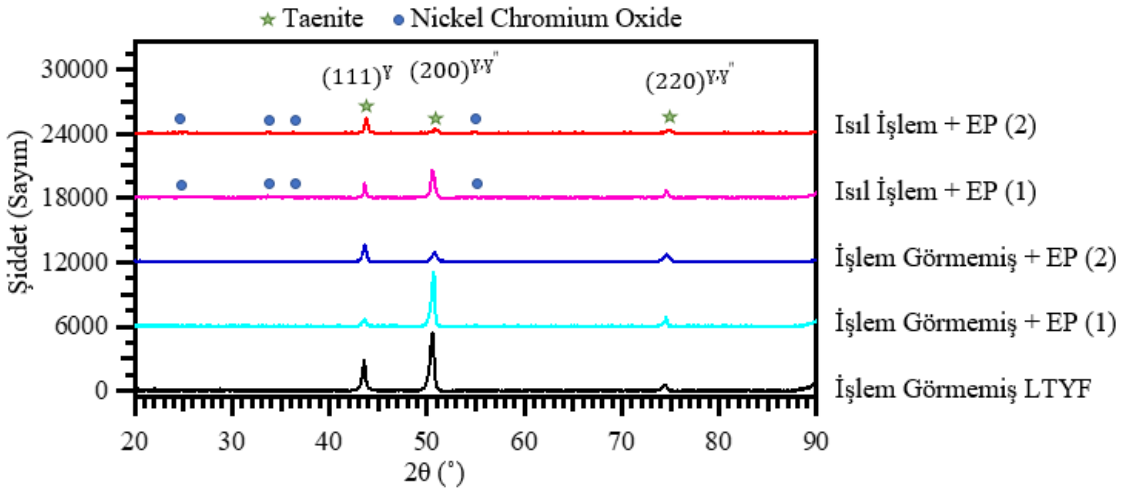
SEM analizinde genel olarak ezerek parlatma işleminden sonra deforme olmuş yapı yönlenmiş olarak içyapıdan ayırt edilmiştir. Ezerek parlatma işleminde ön yükün artıp devirin azalmasıyla deformasyondan etkilenen tabaka kalınlıklarının artması SEM görüntülerinde de görülmüştür ve mekanik özelliklere olumlu etki oluşturabileceği düşünülmüştür. Ezerek parlatma işlemi sonrası yüzeyde yapılan detaylı karakterizasyon sonucu beyaz renkli ince bir tabaka varlığını göstermiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda bu yapının deforme olmuş ultra-ince taneli veya nanokristalli yapı olduğu ortaya konulmuştur [99]. Görüldüğü üzere çok ince bir tabakada nanokristalli yapı elde edilmiştir. Ezerek parlatma işleminin etkisinin sadece yüzeyde olması dolayısıyla alt kısımda herhangi bir deformasyondan etkilenme görülmemektedir.

4.1.5. XRD Analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri sonrasında elde edilen datalardan yola çıkarak, işlenmiş yüzeylerdeki mikro sertlik değerlerindeki değişimlerin, işlenmiş yüzey altında meydana gelen tane küçülmeleri ve ezerek parlatma operasyonundan kaynaklanan olası faz dönüşümü analizlerinin yorumlanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. XRD analizlerinden elde edilen değerler grafiklere dönüştürülür ve oluşan şekillerde piklerin şiddetine ve genişliğine bağlı olarak meydana gelen değişim yorumlanır [24]. LTYF ile üretilen, iki farklı parametreyle yüzey iyileştirmeye tabi tutulan parçalara uygulanan XRD ölçümleri için Bruker D-8 Advance X-Işını Tek Kristal Kırınım Cihazı kullanılmıştır. Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54 *A* dalga

boyuna sahip Cu Kα katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 40 mA ve 40 Kv olarak seçilmiştir. 2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak 20-90° seçilmiştir [82]. Ölçümler parçaların işlenen yüzeylerinden yapılmıştır.

Ezerek parlatma; işlem görmemiş ve ısıl işlem yapılmış parçalara uygulanmıştır. Bu işlemlerin faz dönüşümlerine etkisi XRD analizleriyle yapılmıştır. XRD sonuçları Şekil 4.19'da gösterilmiştir. İşlem görmemiş parçalara uygulanmış ezerek parlatma operasyonu yeni bir faz oluşumuna sebep olmamakla beraber (111), (200) ve (220) düzlemlerindeki piklerin genişliklerinde ve şiddetlerinde değişime sebep olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca pik açılarında kaymalar gözlenmiştir.



Şekil 4.19. İşlem görmemiş ve ısıl işlem yapılmış parçalara uygulanan ezerek parlatma sonrası Inconel 718 parçalarının XRD analizleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM).

Şekil 4.19'daki XRD analizlerinden öncelikle LTYF ile üretilen silindir Inconel 718 parçasının XRD analizi incelenmiştir. 1. pik $(111)^{\gamma}$, 2. pik $(200)^{\gamma-\gamma''}$ ve 3. pik ise $(220)^{\gamma-\gamma''}$ düzlemlerini temsil eder [24]. Parçada Taenite (Fe, Ni) fazından farklı bir faz yakalanmamıştır. 750 N - 350 RPM parametresinde ve 250 N - 1050 RPM parametresinde ezerek parlatma işlemi uygulanmış işlem görmemiş parçaların XRD sonuçları kıyaslandığında; 750 N - 350 RPM parametresinde parçanın (200) düzlemindeki pik genişliği 250 N - 1050 RPM parametresinde olana göre daha fazla ve pik şiddeti daha azdır. Pik genişliğindeki artışın sebebi kuvvetin yüksek, devrin düşük olduğu durumda ezerek parlatma takımı ile parçanın yüzeyi arasındaki temas süresinin artışına bağlı olarak gerçekleşen tane küçülmesidir [100]. Tane küçülmesi ise

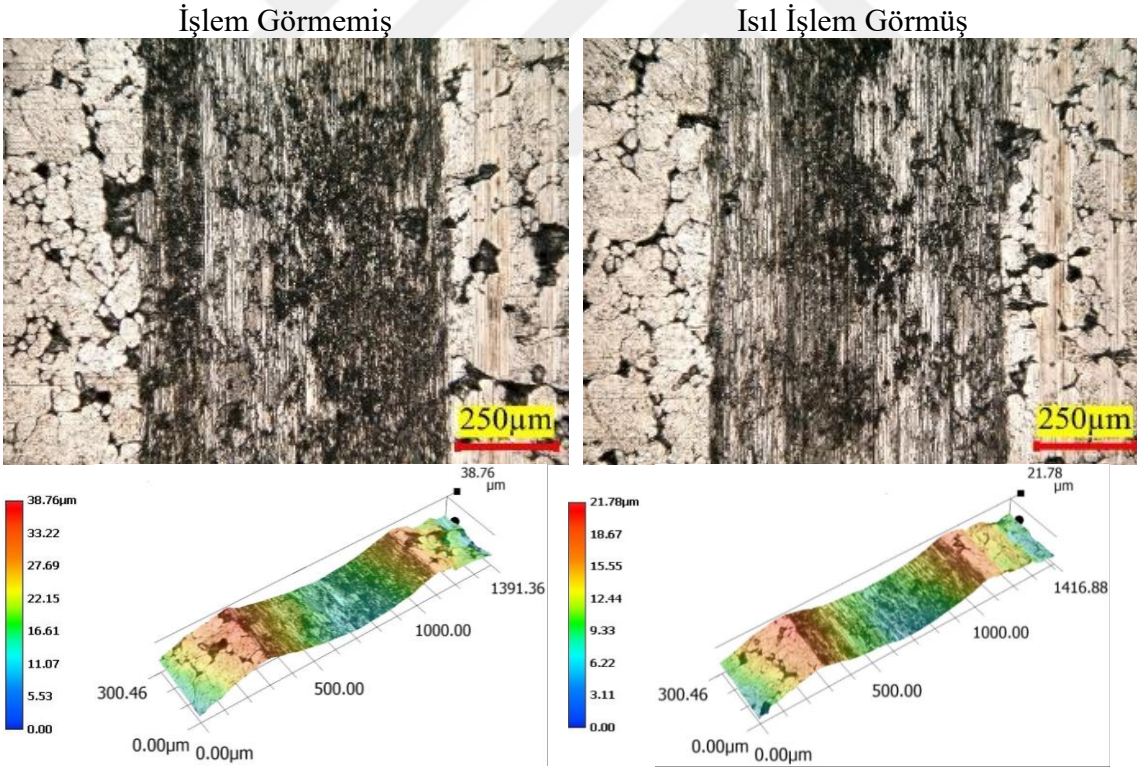
mikrosertlikle ilişkilendirilmektedir. Aynı şekilde 250 N - 1050 RPM parametrenin (200) düzlemindeki piki, 750 N - 350 RPM parametresinde (200) düzlemindeki pikinden daha dar olması, yüksek devirde ezerek parlatma takımı ile iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışına bağlı olarak gerçekleşen yumuşamadan dolayıdır [101]. Ezerek parlatma işleminin etkilerini anlayabilmek için yapılan bu XRD analizlerinde Taenite' den farklı bir faza rastlanmamıştır. Ancak ısıl işlem uygulanmış parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası yapılan analizlerde Taenite fazına ek olarak Nikel Krom Oksit ($NiCrO_3$) fazına rastlanmıştır. Bunun sebebi ısıl işlemin hava ortamında yapılmasından dolayı Nikel Krom Oksit ($NiCrO_3$) fazının oluştuğu düşünülmektedir.

İkincil işlemlerden sonra (111), (200) ve (220) piklerinin açılarında kaymalar meydana gelmiştir. İkincil işlemler sonrası parçanın yüzeyi termal ve mekanik etkiler altında kalmış, bu termal ve mekanik etkiler plastik deformasyonlar oluşturmuştur. Plastik deformasyonlar ise dislokasyon yoğunluğunu artırmaktadır. Dislokasyon yoğunluğunda ki artış mikrosertlik ile ilişkilendirilmektedir. Pik açılarındaki bu kaymalar dislokasyon yoğunluğuna bağlanabilir. Bu durum mikrosertlik bölümünde incelendiği üzere parçaların yüzey ve yüzey altı sertliklerindeki artış ile de uyumludur.

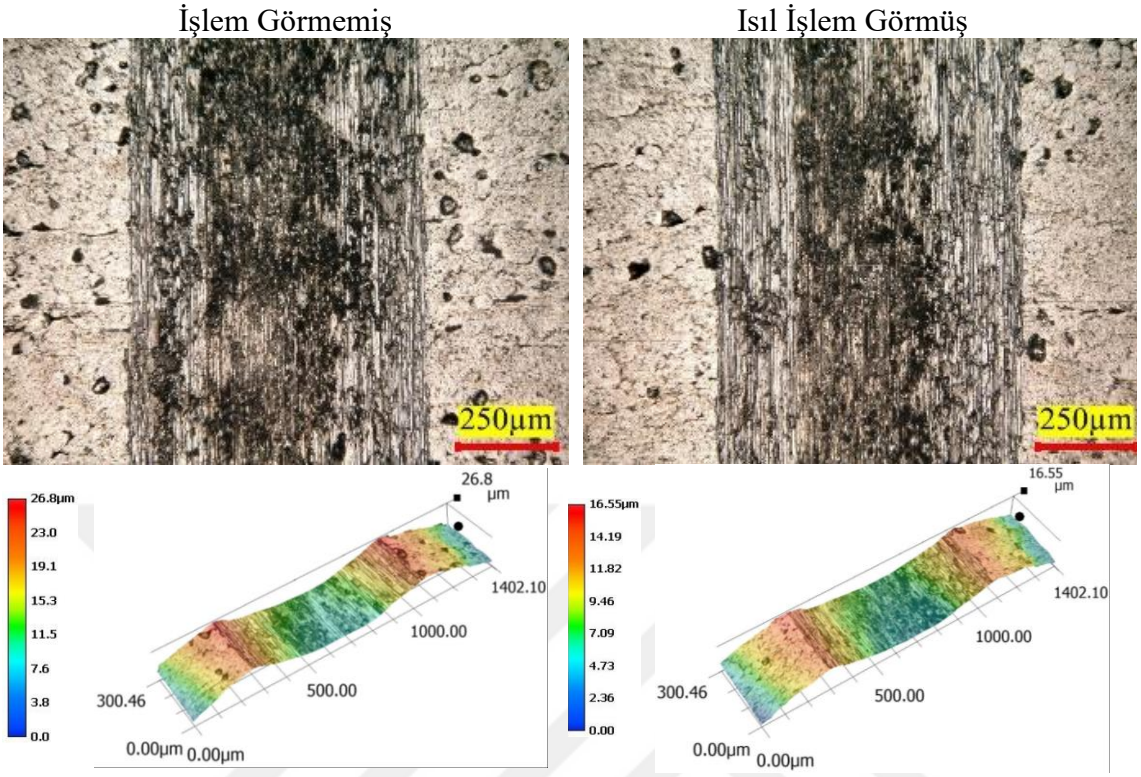
4.1.6. Aşınma Analizi

Ezerek parlatma operasyonu sonucu numunelerin aşınma dayanımları bu bölümde incelenmiştir. Alaşım 718 türbin kanatları, enerji endüstrisi ve havacılık uygulamaları gibi ortamlarda ağır koşullar altında kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları dikkate alındığında aşınma davranışı büyük önem arz etmektedir. Tez önerisinde de belirtildiği gibi yapılan ikincil işlemlerle LTYF yöntemiyle üretilmiş parçaların aşınma davranışının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Aşınma testleri ASTM G133 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri incelenmiştir. Ayrıca bu aşınma izleri dijital mikroskop ile görüntülenerek topografileri oluşturulmuş, aşınma genişlikleri ve derinlikleri analiz edilerek aşınma oranı hesaplanmıştır. Ezerek parlatma uygulanan Inconel 718 alaşımının 2 boyutlu aşınma görüntüleri ve topografileri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 de verilmiştir. Görseller aşınma mekanizması açısından incelendiğinde malzemede adhesif ve abrasif aşınmanın aynı anda oluştuğu gözlenmektedir. Abrazif aşınma, aşınma testi sırasında, malzeme

yüzeyinin kendisinden daha sert parçacıklarla basınç altında etkileşip, sert parçacığın malzemenin yüzeyinden talaş kaldırmasıyla oluşur. Tungsten karbür bilyenin Inconel 718 alaşım malzemesine göre çok daha sert malzeme olması, teğetsel bir hareket uygulandığında, daha yumuşak olan tarafın oluklar ve çizikler oluşturacak şekilde aşınmasına ve böylece abrasif aşınma mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olur. Ayrıca bu mekanizma türünde mikro-yarık veya mikro-oluk gibi aşınma kalıntılarının oluşması da söz konusudur. Adhesif aşınma ise iki temas yüzeyinin birbirine göre bağıl hareketi sırasında yumuşak olan yüzeyden malzemenin yırtılması ve bu kopan parçanın sert malzeme üzerinde kaymasıyla oluşur. Taşınan parça sıcaklık, sürtünme ve basıncın etkisiyle sert malzeme üzerine yapışır. Malzemeden parçacıkların kopmasıyla oluşan oluklar ve çizikler malzemenin üretim şekli, üretim parametreleri, mekanik özellikleri, uygulanan ikincil işlemler gibi birçok parametreye bağlıdır [24]. Bu parametrelere bağlı olarak malzeme mikrosertlik değeri arttıkça oluk ve çiziklerin sayıları ve derinlikleri azalmakta, aşınma direnci ise artmaktadır.



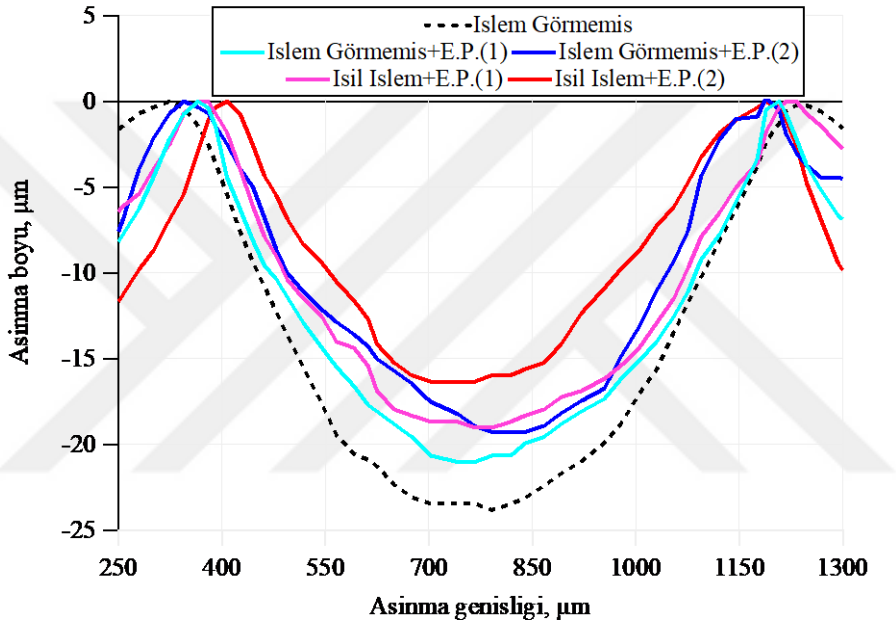
Şekil 4.20. 250 N - 1050 RPM parametresinde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin 2 boyutlu aşınma izleri ve topografi görüntüleri.



Şekil 4.21. 750 N – 350 RPM parametresinde yürütülen ezerek parlatma operasyonları sonucu iyileştirilen yüzeylerin 2 boyutlu aşınma izleri ve topografi görüntüleri.

Şekil 4.20 ve 4.21'de sırasıyla işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş İnconel 718 alaşımının farklı devir ve kuvvetlerde ezerek parlatma operasyonu sonrası 2 boyutlu aşınma görüntüleri ve topografileri gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde devrin azalıp, parlatma kuvvetinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde, malzemedeki çukur ve gözenek miktarında azalma olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda malzemeye uygulanan ısıl işlem daha iyi aşınma direnciyle sonuçlanmıştır. Aşınma davranışları açısından incelendiğinde ise bütün parametrelerde oluklar ve çizikler görülmüş ancak oluk ve çiziklerin sayısı ve derinliği farklılık göstermiştir.Aşınma testleri sonucu oluşan aşınma izlerinin deneysel ve analitik olarak hesaplanması aşınma oranı formülleriyle olmaktadır. Bu hesapların yapılabilmesi için malzemelerde oluşan aşınma profillerinin genişlik ve derinlik verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Topografi görüntülerinden kesitler alınarak aşınma genişlikleri ve derinlikleri hesaplanmakta ve böylece malzemelerin aşınma oranları hesaplanarak aşınma dayanımları karşılaştırılmaktadır. Şekil 4.22'de Inconel 718 alaşımına yapılan aşınma testi sonucunda oluşan aşınma

profilleri gösterilmiştir. Profiller aşınma derinliği ve genişliği açısından incelendiğinde ezerek parlatma operasyonunun malzemenin aşınma direnci üzerinde iyileştirici etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Ezerek parlatma operasyonları arasında en iyi aşınma direnci yani en az aşınma derinliği ısıl işlem görmüş, 750 N – 350 RPM parametrelerinde işlenmiş malzemede gözlemlenmiştir. Aşınma direncinde gözlemlenen bu artışın nedeni malzemede meydana gelen mikrosertlik değişimidir. Parlatma kuvvetindeki artış ve devirdeki azalma yüzey sertliğini de hızla arttırmıştır [110]. Aynı zamanda uygulanan ısıl işlemde malzemenin sertliğini %20 kadar arttırmıştır.



Şekil 4.22. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu iyileştirilen yüzeylerin aşınma profilleri (E.P.(1)- 250 N – 1050 RPM, E.P.(2)- 750 N – 350 RPM).

Aşınma hacmi, aşağıdaki gibi tanımlanmış olan 16 denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [102]: burada V mm^3 cinsinden aşınma hacmi, L mm cinsinden topun bir turda aldığı yol (strok uzunluğu), w mm cinsinden aşınma izi genişliği ve r mm cinsinden karbür bilyenin yarıçapıdır.

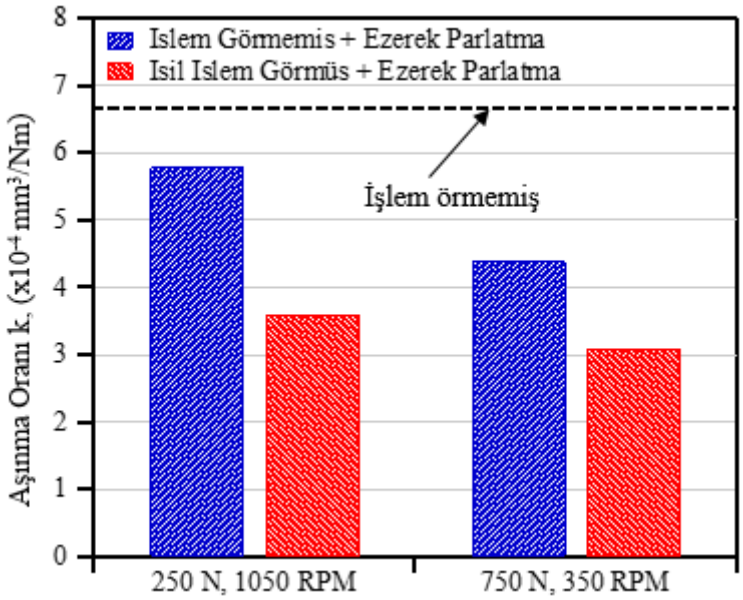
$$V = L\left[r^2 sin^{-1}\left(\frac{w}{2r}\right) - \frac{w}{2}\left(r^2 - \frac{w^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}\right] + \frac{\pi}{3}\left[2r^3 - 2r^2\left(r^2 - \frac{w^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{w^2}{4}\left(r^2 - \frac{w^2}{4}\right)^{1/2}\right] \quad (16)$$

Aşınma oranı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$k = \frac{V}{Fxs} \tag{17}$$

Burada k, mm^3/Nm cinsinden aşınma oranı, F ise N cinsinden uygulanan normal kuvvet ve s, m cinsinden toplam kayma mesafesidir.

Şekil 4.23'de farklı yüzeylere uygulanan farklı parametrelerde ezerek parlatma operasyonunun aşınma oranları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde uygulanan ezerek parlatmanın aşınma direncini arttırdığı açıkça gözükmektedir. Bunun nedeni ezerek parlatma operasyonunun parça yüzeyinde plastik deformasyon oluşturarak yüzey sertliğini arttırmasıdır. Ayrıca işlem görmemiş malzemeye uygulanan ısıl işlem ve ezerek parlatma operasyonlarının malzemenin mikrosertlik değerlerini arttırmasıdır. Artan mikrosertlik değerlerine bağlı olarak aşınma oranlarında düşüş yaşanmıştır.



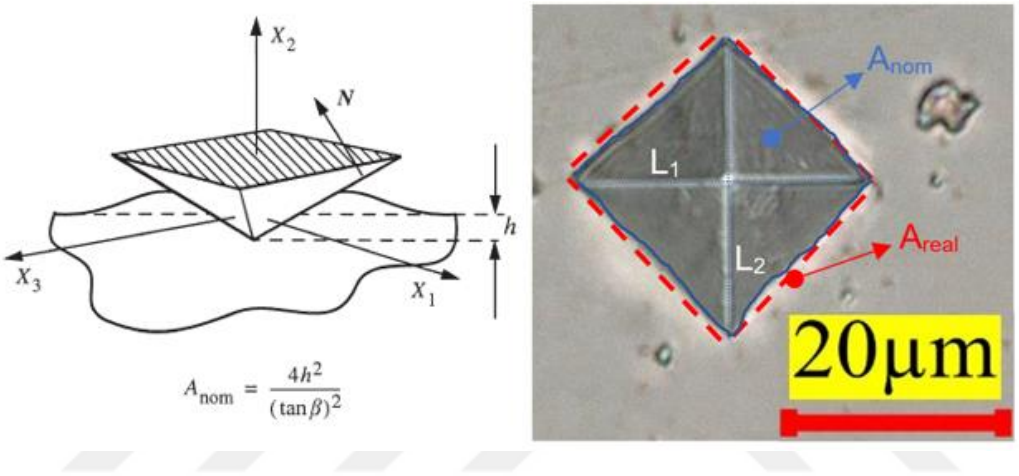
Şekil 4.23. İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçalara 250 N – 1050 RPM (mikrosertliği en düşük) ve 750 N – 350 RPM (mikrosertliği en yüksek) parametrelerinde uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonucu iyileştirilen yüzeylerin aşınma oranları.

4.1.7.Ampirik Yaklaşım ile Kalıntı Gerilme Ölçümü

LTYF ile üretim sırasında erimiş malzemenin hızlı ısıtılması ve soğutulmasıyla oluşan büyük termal gradyanlar nedeniyle üretilen parçada çekme kalıntı gerilmeleri oluşur [103]. Bu kalıntı gerilmeler üretilen parçanın mekanik özelliklerine ve yorulma ömrüne

zarar verebilir bu nedenle büyüklüklerini bilmek çok önemlidir [104]. Maliyetli olan bu ölçüme alternatif olan ampirik yaklaşımla tahmin edilmiştir.

Ampirik yaklaşımlarla kalıntı gerilmesinin tahmini için literatürde kullanılan aşağıda sunulmuş olan yöntemle kalıntı gerilmeler tahmin edilmiştir. Literatürde daha önce yapılan analitik ve nümerik çalışmalar kalıntı gerilmelerin mikrosertlik ile ilişkilendirilerek hesaplanabileceğini göstermiştir [105-109]. Şekil 4.24'de vickers sertlik cihazındaki uç geometrisi ve sertlik ölçümünden sonra Inconel 718 iş parçasında oluşan batıcı ucun oluşturdu geometri görülmektedir.



Şekil 4.24. (a) Vickers sertlik cihazındaki uç geometrisi [106] ve (b) Nominal öngörülen temas alanı A_{nom}' un ve numunenin gerçek temas alanı A_{real}'ın şeması.

Sertlik aşağıdaki verilen formülle ifade edilmiştir.

$$H = C\sigma_Y \tag{2}$$

Burada C değeri sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç geometrisine bağlı sabit olarak alınmaktadır. σ_Y ise akma gerilmesidir. Pekleşen malzemelerde ise σ_Y yerine σ_{repr} kullanılmakta olup, plastik birim şekil değişimine (ε_{repr}) karşılık gelen akış gerilmesini (flow stress) ifade etmektedir.

$$H = C\ \sigma_Y(\varepsilon_{repr}) \tag{3}$$

Kalıntı plastik birim şekil değişimden kaynaklı sertlik değişiminin doğru şekilde tahmin edebilmek için Denklem 3' deki ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$H = C\,\sigma_Y\left(\varepsilon_{repr} + \varepsilon_{res}\right) \quad (4)$$

H değeri ölçümü yapılan yerin mikro sertliğini ifade etmekte olup, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$H = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Burada P yük ve A ise alanı ifade etmektedir, ancak mikrosertlikte, aşağıdaki şekilde ifade edilmekte olup, A_{surf} batıcı ucun alanı şeklinde verilmektedir.

$$HV = \frac{P}{A_{surf}} \quad (6)$$

Eş eksenli kalıntı gerilme/gerinim alanları ile temas alanı/mikrosertlik arasında bir korelasyon oluşturarak artık gerilimi hesaplamak için modellerine yeni bir parametre (c^2) eklenmiştir,

$$c^2 = \frac{A_{real}}{A_{nom}} \quad (7)$$

burada A_{real}, batma veya yığılma gösteren bir numunenin gerçek temas alanını temsil eder, A_{nom} ifadesi ise temas sınırı boyunca batma veya yığılma dikkate alınmadan doğrudan girinti derinliğinden (h_{max}) hesaplanan nominal temas alanıdır,

$$A_{nom} = \left(\frac{2h_{max}}{tan22^o}\right)^2 = 24.5h_{max}^2 \quad (8)$$

Carlsson ve ark.'nın çalışmasında kalıntı gerilme aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [106, 107],

$$c^2 = c_0^2 - 0.32 \ln\left(1 + \frac{\sigma_{res}}{\sigma\,(\varepsilon_{res})}\right) \quad (9)$$

burada ε_{res} Tabor denklemine[110, 111] göre sertlik değişiklerinden çıkarılabilen kalıntı plastik deformasyondur. $\sigma\,(\varepsilon_{res})$ plastik birim şekil değişimine(ε_{res}) eşit olduğunda akış gerilimidir. c^2 ve c_0^2, sırasıyla hem artık gerilmelerin hem de artık gerinimlerin ve orjinal malzemenin bulunduğu durum için alan oranıdır. L_1 ve L_2 batıcı ucun oluşturduğu izin uzunluklarını ifade etmektedir.

$$A_{nom} = \frac{1}{2}\left(\frac{(L_1+L_2)}{2}\right)^2 \quad (10)$$

Liu ve ark.[112] tarafından elde edilen gerilme-gerinim eğrisi bu çalışmada kullanılmıştır ve çekme testi sonuçları yaklaşık bir güç fonksiyonu yaklaşımıyla,

$$\sigma\,(\varepsilon_{res}) = \sigma_0\,\varepsilon_{res}^{n} = 1181.21\,\varepsilon_{res}^{0.1754} \quad (11)$$

Böylece aşağıdaki formüllerle,

$$\varepsilon_{res} = \left(\frac{P}{C\sigma_0 * A_{nom}}\right)^{\frac{1}{n}} - \epsilon_{repr} \quad (12)$$

$$\sigma_{res} = \sigma(\varepsilon_{res}) * \left[e^{\left(\frac{c_0^2 - c^2}{0.32}\right)} - 1\right] \quad (13)$$

kalıntı gerilmeler Denklem 14'deki formül ile hesaplanabilir.

$$\sigma_{res} = \sigma_0 \left\{\left[\frac{8*P}{C\sigma_0*(L_1+L_2)^2}\right]^{\frac{1}{n}} - \epsilon_{repr}\right\}^{n} * \left\{e^{\left[\frac{c_0^2 - \frac{8*A_{real}}{(L_1+L_2)^2}}{0.32}\right]} - 1\right\} \quad (14)$$

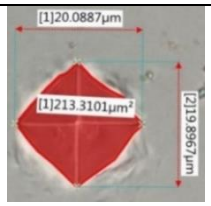
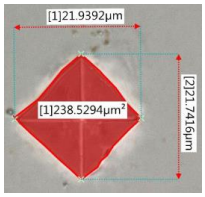
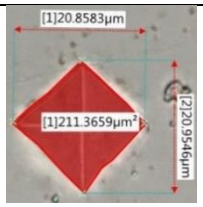
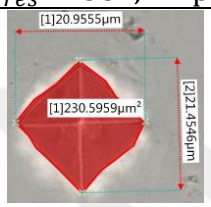
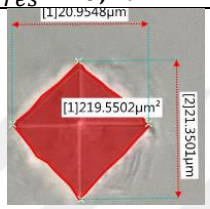
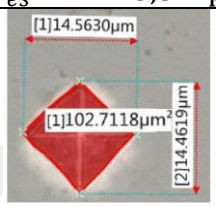
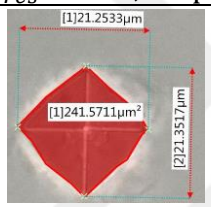
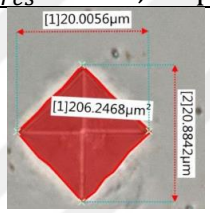
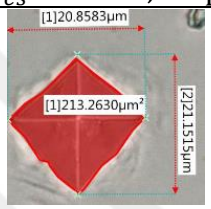
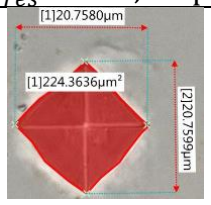
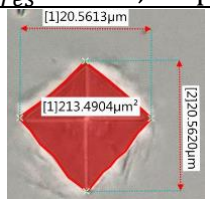
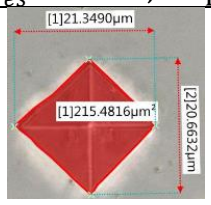
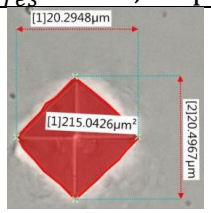
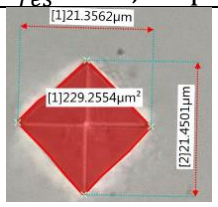
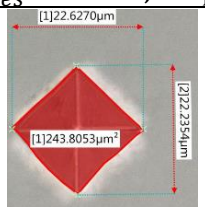
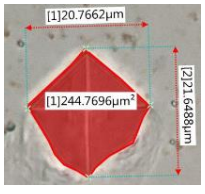
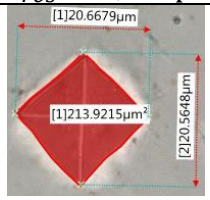
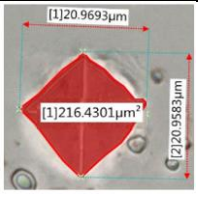
Bir Vickers uç kullanıldığında, C=3, ε_{repr}=0.08 ve c_0^2=1 değerleri kullanılabilir [105, 107].

$$\sigma_{res} = 1181.21 \left\{\left[\frac{8*P}{3*1181.21*(L_1+L_2)^2}\right]^{\frac{1}{0.1754}} - 0.08\right\}^{0.1754} * \left\{e^{\left[\frac{1 - \frac{8*A_{real}}{(L_1+L_2)^2}}{0.32}\right]} - 1\right\} \quad (15)$$

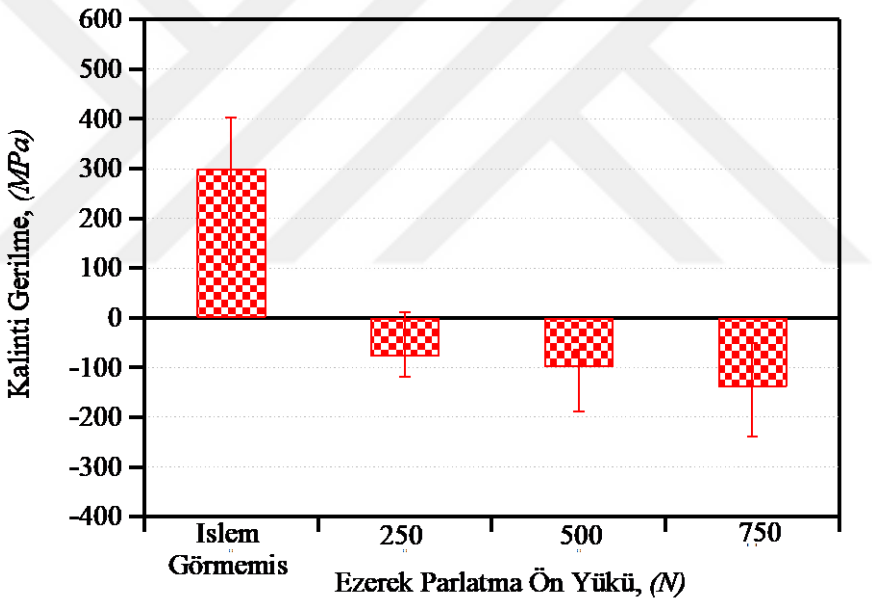
Sonuç olarak kalıntı gerilmeler yukarıda geliştirilen formül ile belirlenebilir.

Örnek teşkil etmesi için ezerek parlatma operasyonu sonucu mikrosertliği en düşük (250 N - 1050 RPM) ve en yüksek sertliğe (750 N - 350 RPM) sahip parametre değerlerini işlem görmemiş numune ile karşılaştırmak için kalıntı gerilme ölçümleri ve alınan tipik girinti profilleri Tablo 4.4'de gösterilmiştir. Her bir ikinci işlem Tablo 4.5'da görülen şekilde hesaplanarak Şekil 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28' deki grafikler hazırlanmıştır.

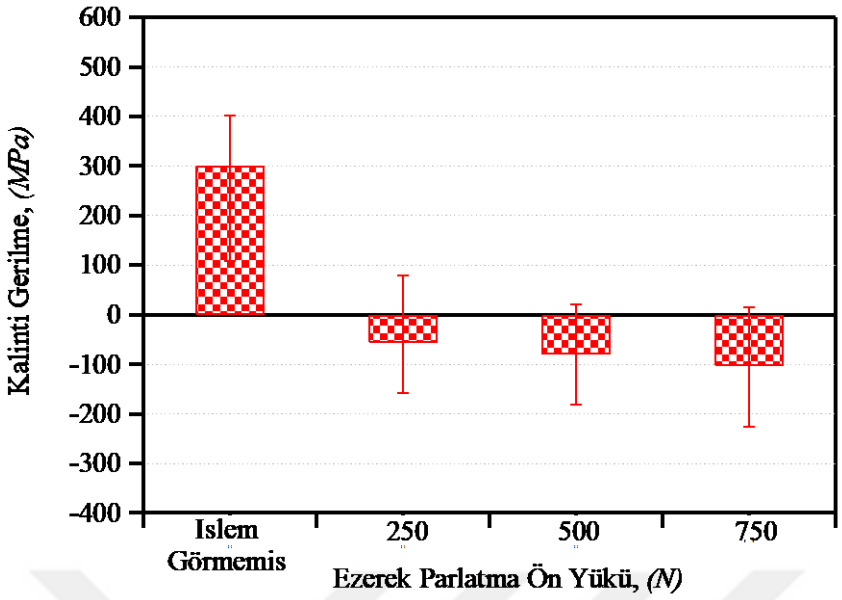
Tablo 4.4. Ezerek parlatma operasyonu sonucu mikrosertliği en düşük (250 N - 1050 RPM) ve en yüksek sertliğe (750 N – 350 RPM) sahip parametre değerleri ile işlem görmemiş numunenin kalıntı gerilme ölçümleri ve alınan tipik girinti profilleri.

İşlem Görmemiş	Ezerek Parlatma (250 N - 1050 RPM)	Ezerek Parlatma (750 N – 350 RPM)
		
$\sigma_{res} = 382{,}2$ Mpa	$\sigma_{res} = 0{,}497$ MPa	$\sigma_{res} = -145{,}3$ Mpa
		
$\sigma_{res} = 120{,}9$ Mpa	$\sigma_{res} = -82{,}2$ Mpa	$\sigma_{res} = -229{,}9$ Mpa
		
$\sigma_{res} = 321{,}2$ Mpa	$\sigma_{res} = -62{,}8$ Mpa	$\sigma_{res} = -172{,}5$ Mpa
		
$\sigma_{res} = 208{,}2$ Mpa	$\sigma_{res} = 48{,}6$ Mpa	$\sigma_{res} = -103{,}8$ Mpa
		
$\sigma_{res} = 312{,}1$ Mpa	$\sigma_{res} = 4{,}1$ Mpa	$\sigma_{res} = -118{,}6$ Mpa
		
$\sigma_{res} = 460{,}8$ Mpa	$\sigma_{res} = 31{,}9$ Mpa	$\sigma_{res} = -63{,}4$ Mpa
Ort. $(\sigma_{res}) = 300{,}8$ Mpa	Ort. $(\sigma_{res}) = -9{,}9$ Mpa	Ort. $(\sigma_{res}) = -138,$ Mpa
ERR+ = 159,2 Mpa	ERR+ = 58,6 Mpa	ERR+ = 75,5 Mpa
ERR- = 179,9 Mpa	ERR- = 72,2 Mpa	ERR- = 90,9 Mpa

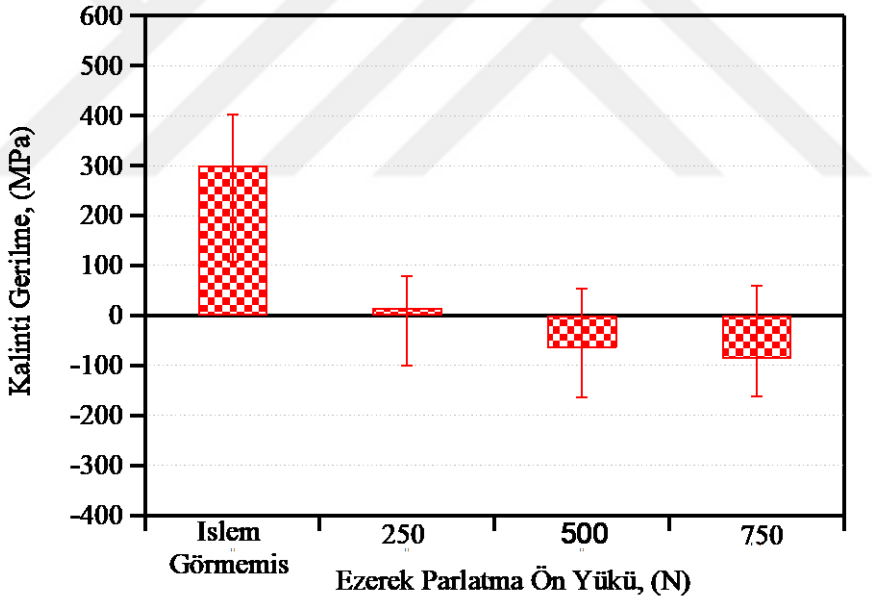
Yukarıdaki tablodan da görüldüğü üzere kalıntı gerilmesin Liu ve ark. [112] ve Cao ve ark.[113] tarafından da aynı zamanda bahsedildiği gibi büyük bir standart sapması vardır. Bunun nedeni üretilen parçaların mikroyapı özelliklerinin homojen olmamasından dolayı noktadan noktaya gerçek kalıntı gerilme değerlerinin değişiminden kaynaklanmaktadır [113]. Ayrıca Sebastiani ve ark. [114] yaptıkları çalışmada hesaplanan kalıntı gerilmesinin 0.85 GPa gibi büyük standart sapma olduğu görülmektedir. Standart sapmanın büyük olmasının bir nedeni de A_{real} ,L_1 ve L_2 değerlerinin ölçülmesinde manuel ölçümün getirdiği bazı hatalar da vardır. Bunun yanı sıra işlem görmüş numunelerde standart sapmasının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni muhtemelen mikroyapı özelliklerinin homojenlik durumunun artmasına bağlanabilir. İşlem görmemiş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım kalıntı gerilme sonuçları Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27'de yer almaktadır.



Şekil 4.25. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (350 RPM).



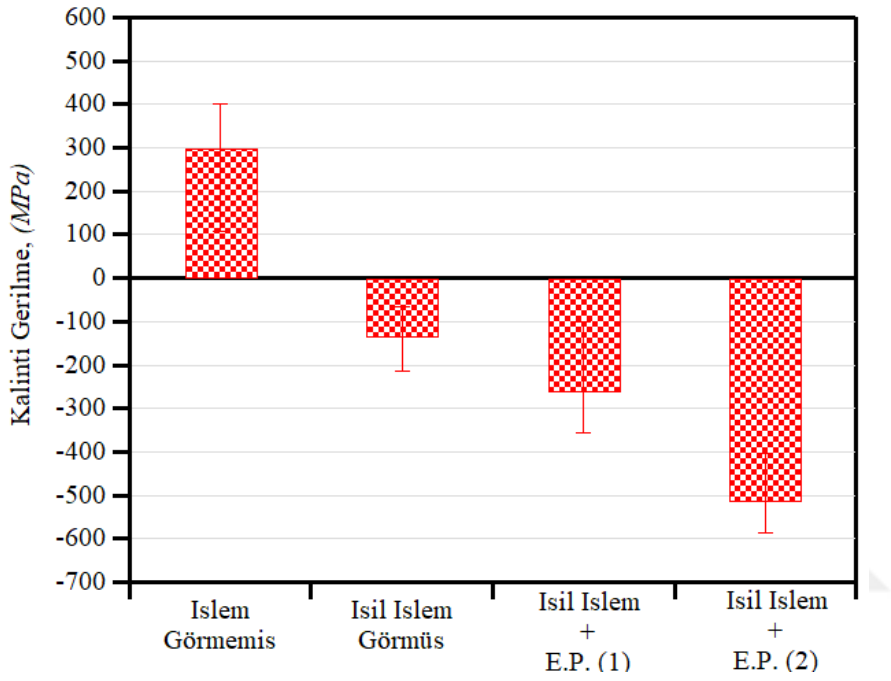
Şekil 4.26. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (700 RPM).



Şekil 4.27. İşlem görmemiş parçalara uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşım ile kalıntı gerilme tahmini (1050 RPM).

Bu bölümde belirtilen parametrelerle gerçekleşen ezerek parlatma operasyonu sonrası numunelere Bölüm 4.2.4'te belirtilen Denklem 15' deki ampirik yaklaşımla kalıntı gerilmeleri hesaplanmıştır. Isıl işlem ise malzemenin mikroyapısını homojenleştirerek çekme kalıntı gerilmeleri giderir ve parça sertliğini artırır [97]. Isıl işlem sonrası parça

yüzeyi sertleştirirken aynı zamanda yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluşturmuştur. İşlem görmemiş numunelerin yüzeyinde ampirik yaklaşımla hesaplanan ortalama kalıntı gerilme değeri 300,8 MPa iken ısıl işlem görmüş numunelerin yüzeyinde ampirik yaklaşımla hesaplanan ortalama kalıntı gerilme değeri -133,8 MPa‘ dır. Şekil 4.27’de ısıl işlem görmüş parçaya belirtilen parametrelerle uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ampirik yaklaşımla hesaplanan kalıntı gerilme sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.28. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun ampirik yaklaşımla kalıntı gerilme tahmini (E.P.(1) - 250 N – 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N – 350 RPM).

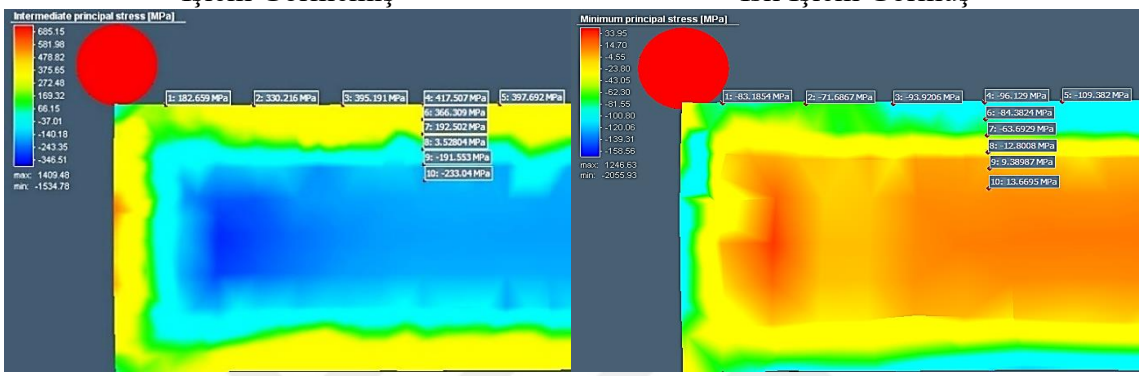
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Ezerek Parlatma Simülasyonu

4.2.1. Kalıntı Gerilme ve Kalıcı Deformasyon Analizi

Sonlu elemanlar yönteminde Inconel 718 alaşım malzemesiyle üretilen silindirik parçalar mekanik özellikleri başka bir sonlu elemanlar yöntemine aktarılarak yapılan ezerek parlatma operasyonundaki değişimi üç farklı devir ve üç farklı parlatma kuvveti altında incelenmiştir. Şekil 4.29’da Inconel 718 alaşım malzemesinin üretimi sonucu oluşan çekme kalıntı gerilmesinin 685.15 MPa, basma kalıntı gerilmesinin ise -346.51 MPa olduğu görülmektedir. Yüzeyde oluşan çekme kalıntı gerilmesi Şekil 4.29‘da gösterilen

5 noktanın ortalaması olan 344.65 MPa alınmıştır. Ayrıca basma kalıntı gerilmesinin parçanın iç bölgesinde oluştuğu çekme kalıntı gerilmesinin ise parçanın dış kısımlarında oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni Eİ yönteminin üretim sürecinde parçaların katman katman inşa edilmesi, bir sonraki ergime katmanının, alt katmanları tekrar eritmesi veya tekrar ısıtması sırasında parçanın iç kısmı ile dış kısmı arasındaki oluşan sıcaklık farkından dolayı oluştuğu düşünülmektedir [115].

İşlem Görmemiş Isıl İşlem Görmüş

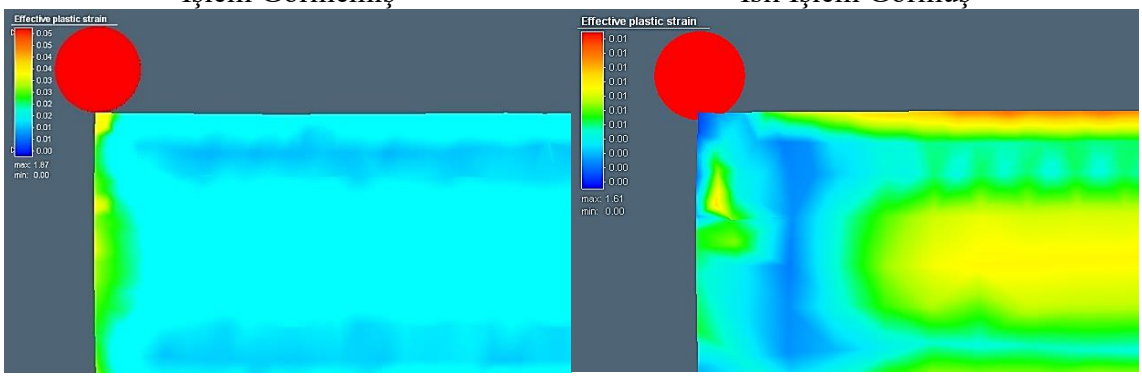


Şekil 4.29. Ezerek parlatma simülasyonu öncesi kesiti alınan işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş silindirik parçaların yüzeyinde ve katman derinliğindeki kalıntı gerilmeler.

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere ısıl işlem operasyonunun sonlu elemanlar yöntemi sonucu oluşan çekme kalıntı gerilmesinin (+33,95 MPa), basma kalıntı gerilmesinin ise (-158,56 MPa) olduğu görülmektedir. Yüzeyde oluşan basma kalıntı gerilmesi Şekil 4.29'da gösterilen 5 noktanın ortalaması olan (-90,86 MPa) alınmıştır. Ayrıca işlem görmemiş parçanın aksine basma kalıntı gerilmesinin parçanın dış bölgesinde oluştuğu çekme kalıntı gerilmesinin ise parçanın iç kısımlarında oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni üretim sırasında çökelmesi baskılanan güçlendirme fazlarının (γ'-$Ni_3(Al,Ti)$ ve γ''-Ni_3Nb) ısıl işlem sonrası çökelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [93, 116, 117].

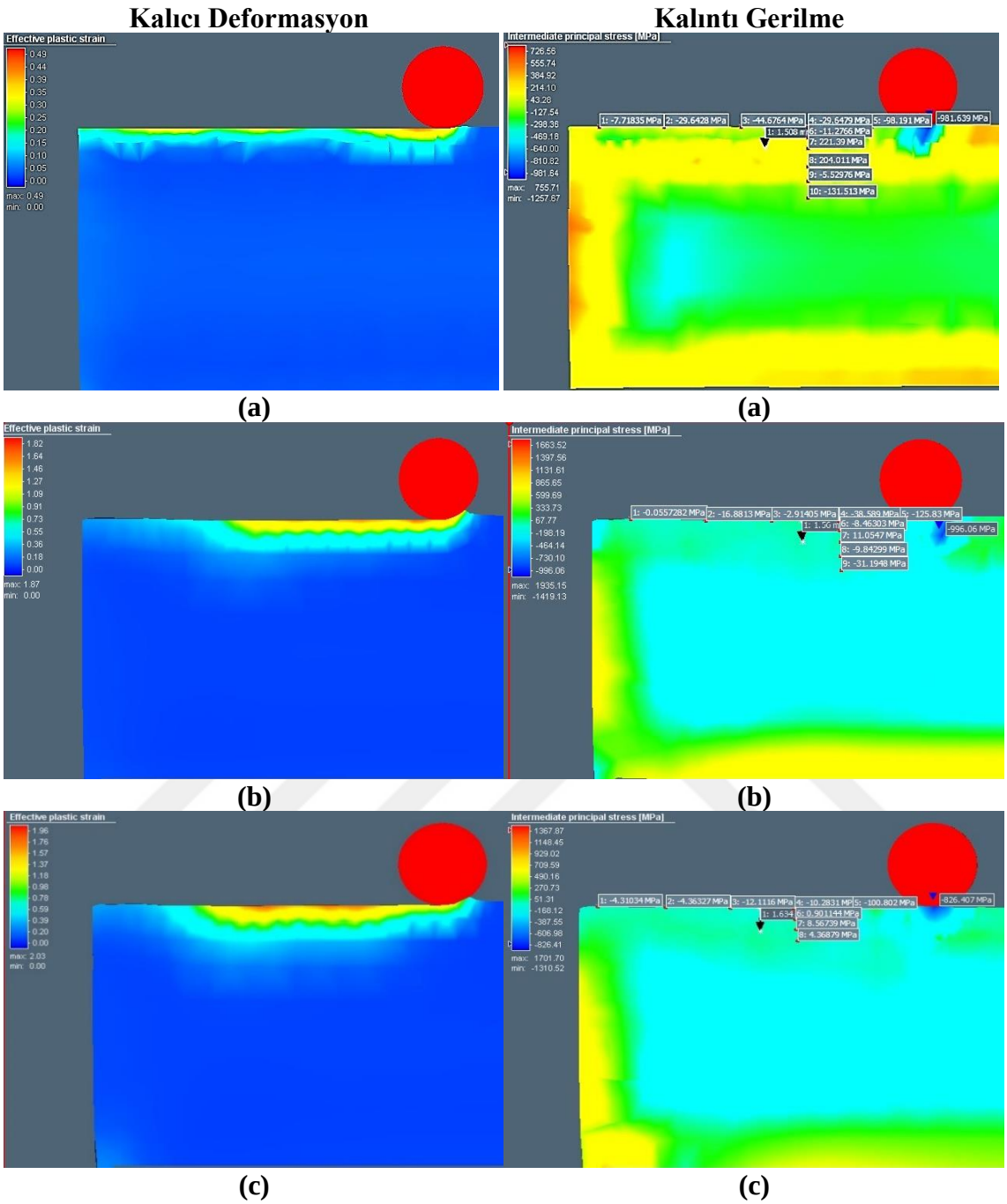
Silindirik parçalar üretim sonu tabladan daha kolay ayrılması, tablaya temas eden kısımlarda kalıcı şekil değişiminin daha fazla olması ve tablaya daha fazla parça sığması gibi durumlar göz önüne alınarak tablaya dik bir şekilde üretilmiştir. Bunun sonucu olarak tablaya temas eden kısımlarda kalıcı şekil değişimi oluşmuştur. Şekil 4.30'da Simufact Additive yazılımında Lazerle Toz Yatağında Füzyon yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşım malzemesinin üretim sonucu oluşan kalıcı şekil değişimi görülmektedir.

İşlem Görmemiş Isıl İşlem Görmüş



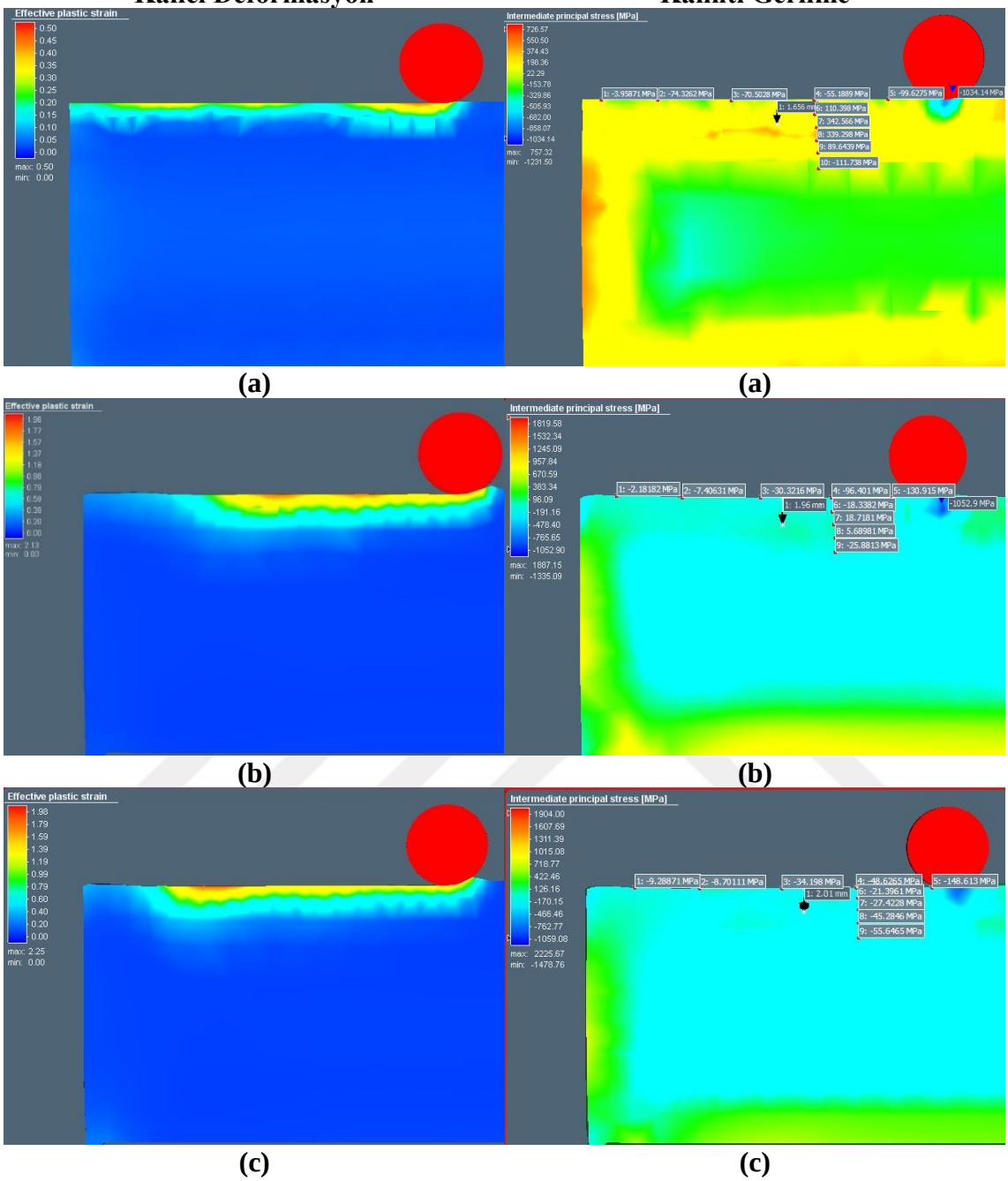
Şekil 4.30. Ezerek parlatma simülasyonu öncesi kesiti alınan işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş silindirik parçacının kalıcı deformasyonu.

Ezerek parlatma parametreleri literatür taraması, takım firmalarının görüşleri dikkate alınarak; parlatma kuvvetleri sırasıyla 250 N, 500 N, 750 N; devirler sırasıyla 350 RPM, 700 RPM, 1050 RPM; ilerleme ise 0,1 mm/dev olarak belirlenmiştir. Bu parametreler Simufact Forming'de sonlu elemanlar yöntemine entegre edilmiştir. Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de ezerek parlatma sonucu parçada oluşan kalıcı deformasyon ve kalıntı gerilmenin simülasyon görüntüleri verilmiştir.



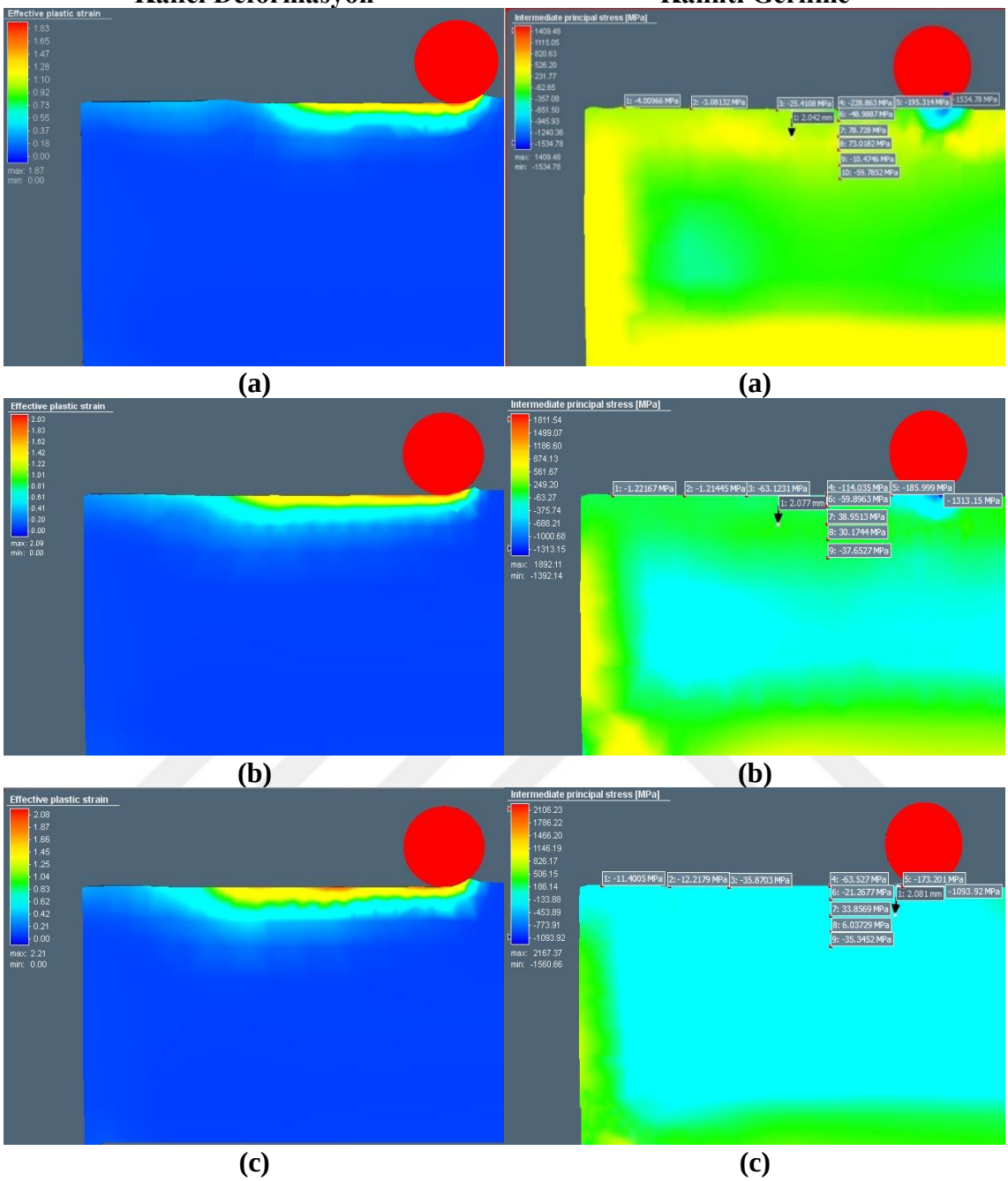
Şekil 4.31. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (250 N).

Kalıcı Deformasyon **Kalıntı Gerilme**



Şekil 4.32. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (500 N).

Kalıcı Deformasyon **Kalıntı Gerilme**



Şekil 4.33. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) 350 RPM (b) 700 RPM (c) 1050 RPM (750 N).

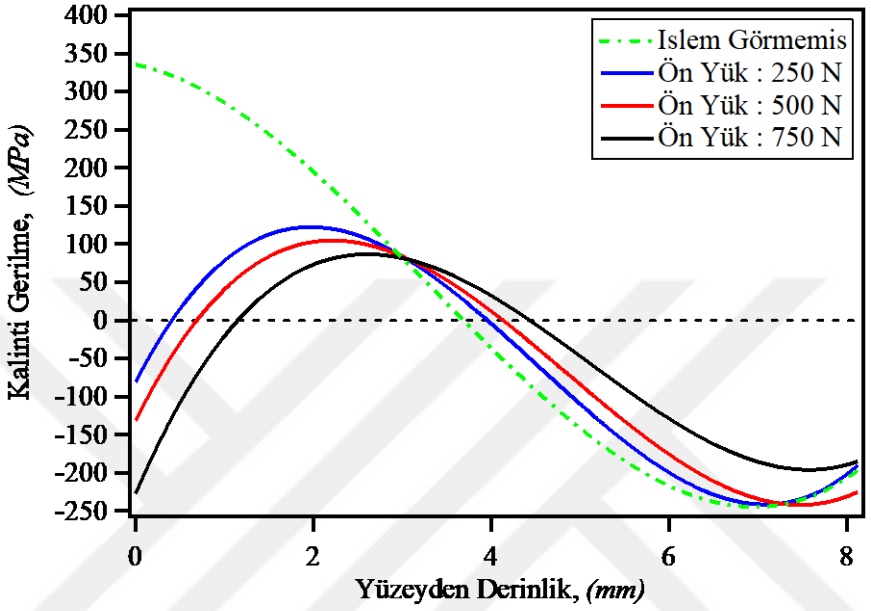
Ezerek parlatma simülasyonunda sabit devirlerde kuvvet artışının yüzeyde hem kalıcı şekil değişimini arttırdığı hem de yüzeyde en yüksek basma gerilmelerine ulaştığı görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak oluşan basma kalıntı gerilmelerinin derinliği ve maksimum değerlerinin 750 N kuvvet değerinde diğer kuvvet değerlerinden daha fazla

olduğunu söyleyebiliriz. Bunun nedeni aynı ilerlemeye sahip parlatma takımın aynı devirde döndürülen parçaya temas alanı aynı olacağı için kuvvet artışı daha büyük plastik deformasyon oluşturur ve daha derinlere kadar basma kalıntı gerilmesine neden olur [118]. Sabit kuvvetlerde devir artışı incelendiğinde ise devir artışının kalıcı deformasyonu arttırdığı bunun bir sonucu olarak etkili olduğu katman derinliğinin arttığı ancak yüzeyde oluşan basma kalıntı gerilme değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni düşük devir, daha düşük bir hızda daha küçük bir alanda plastik deformasyon oluşturur ve sığ bir derinlikte oldukça daha büyük basma kalıntı gerilmesine neden olur [119]. Literatürde ezerek parlatma simülasyonu yapılan çalışmalar incelendiğinde ezerek parlatma operasyonu öncesi parçaların herhangi bir kalıntı gerilmeye sahip olmadığı bu yüzden ezerek parlatma takımının geçtiği yüzeyde basma kalıntı gerilmesi oluştuğu ve yüzey altına doğru basma kalıntı gerilmesinin azalarak etkisini kaybettiği görülmektedir. Ancak bu tezde ezerek parlatma simülasyonu uygulanan parça yukarıda bahsedildiği gibi LTYF yöntemi ile simülasyonu gerçekleştirilerek üretildiği için üretim süreci sonunda üzerinde kalıntı gerilmeler içermektedir. Ayrıca parçanın yüzeyinde yani ezerek parlatma yapılan yüzeyde çekme kalıntı gerilme değerleri maksimumken parçanın merkezinde basma kalıntı gerilme değerleri maksimumdur. Bu sebeple ezerek parlatma simülasyonu sonunda literatüre benzer şekilde yüzeyden merkeze doğru basma kalıntı gerilmesinin bir noktaya kadar azalsa da bir noktadan sonra literatürden farklı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından bu değişim noktası tespit edilerek ezerek parlatmanın etkilediği katman derinliğine ulaşılabileceği düşünülmektedir. Tablo 4.5'de simülasyonlar sonucu oluşan bu durum kantitatif olarak sunulmaktadır.

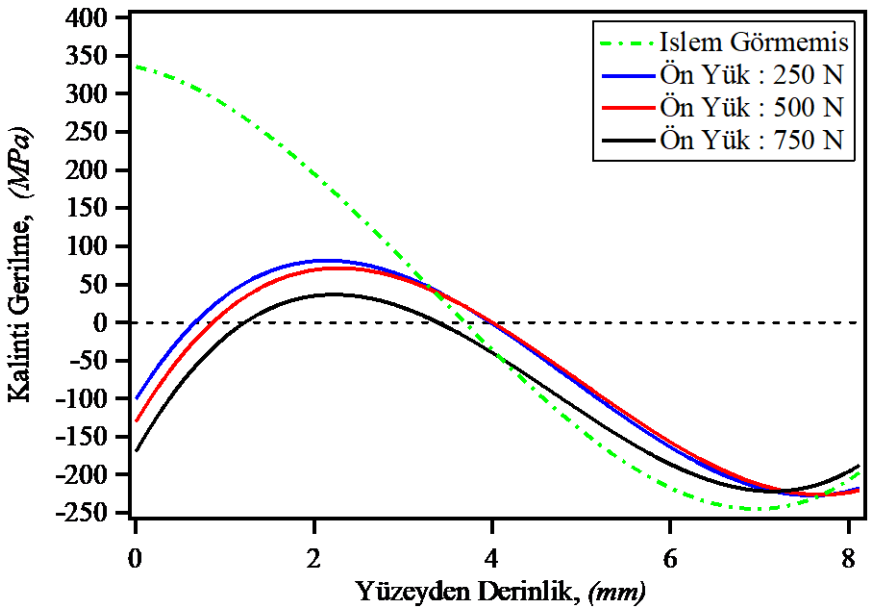
Tablo 4.5. Farklı parametrelerde gerçekleştirilen ezerek parlatma simülasyon sonuçları.

Ön Yük	Devir (RPM)	En Yüksek Basma Gerilmesi (MPa)	Etkili Olduğu Katman Derinliği (mm)	Kalıcı Birim Şekil Değişimi
250N	350	-981,639	1,508	0,49
	700	-996,06	1,56	1,82
	1050	-826,407	1,634	1,96
500N	350	-1034,14	1,656	0,5
	700	-1052,9	1,96	1,96
	1050	-1059,9	2,01	1,98
750N	350	-1534,78	2,042	1,83
	700	-1313,15	2,077	2,03
	1050	-1093,92	2,081	2,08

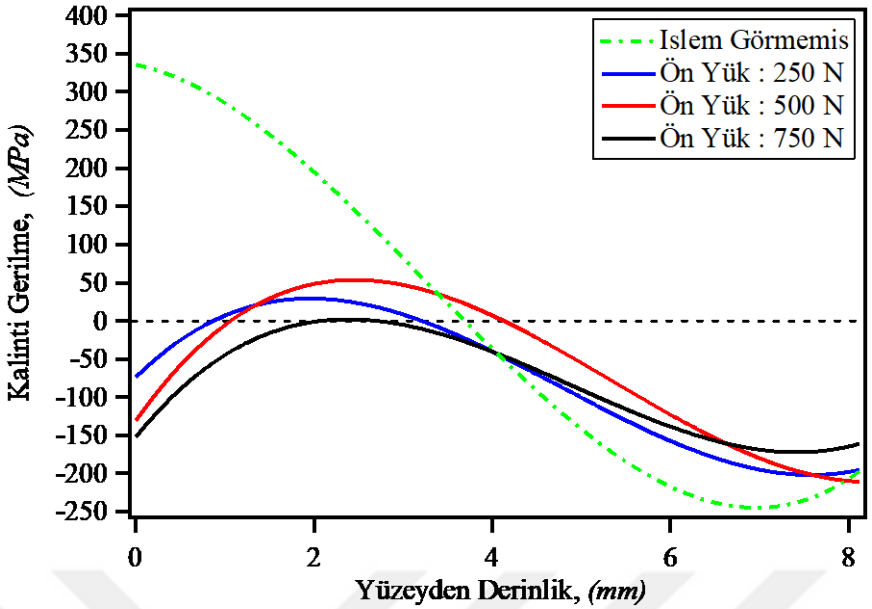
Yüzeyde en yüksek basma kalıntı gerilmesi 750 N kuvvet altında ve 350 RPM devir değerlerinde elde edilmiştir. Ancak yüzey altı en çok etkili olduğu katman derinliğini ise 750 N kuvvet ve 1050 RPM devir parametre değerlerinde elde edilmiştir. Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da işlem görmemiş parçaya uygulanan ezerek parlatma simülasyonuna ait sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.34. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (350 RPM).

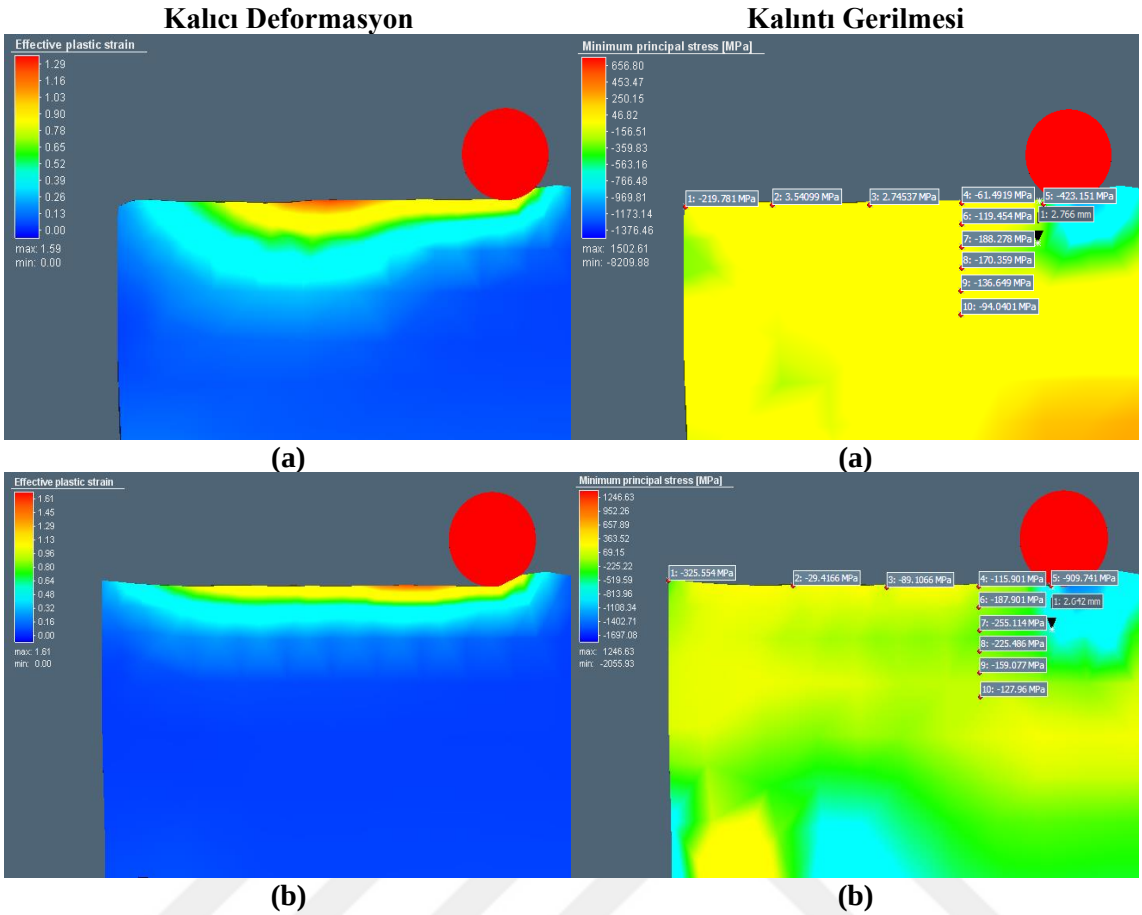


Şekil 4.35. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (700 RPM).



Şekil 4.36. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde meydana gelen değişim (1050 RPM).

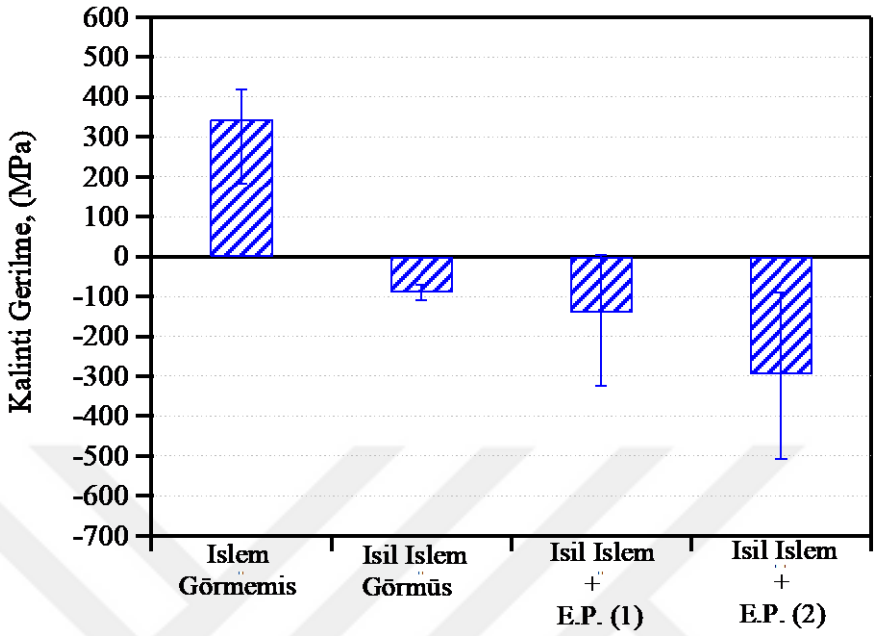
Şekil 4.37'de ısıl işlem görmüş silindir parça ve yukarıda bahsedilen iki farklı parametrede uygulanan ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmeleri ve kalıcı deformasyonu verilmiştir.



Şekil 4.37. Ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu kalıntı gerilmelerde ve kalıcı deformasyonda meydana gelen değişim (a) Isıl işlem + E.P. (250 N - 1050 RPM) (b) Isıl işlem + E.P. (750 N - 350 RPM).

Isıl işlem görmüş parçaya 250 N - 1050 RPM parametresinde uygulanan ezerek parlatma sonrası parça yüzeyinden 5 noktadan ölçülen basma kalıntı gerilmelerin ortalaması yaklaşık -140 MPa'dır. İşlem görmemiş parçaya aynı parametrede uygulanan simülasyon sonucu yüzeyde oluşan ortalama kalıntı gerilme değerinden yaklaşık 5 kat büyüktür. 750 N kuvvet altında 350 RPM devirde uygulanan ezerek parlatma sonrası parça yüzeyinden 5 noktadan ölçülen basma kalıntı gerilme ölçümü sonucu ortalama yaklaşık -295 MPa'dır. Bu değer ise işlem görmemiş parçaya aynı parametrede uygulanan ezerek parlatma sonrası parça yüzeyinde oluşan ortalama kalıntı gerilme değerinden yaklaşık 2,5 kat büyüktür. Bu durum Eİ ile üretilen parçalarının üretimden sonra mekanik özelliklerini arttırmak için istenilen mekanik özelliklere göre birden fazla ikincil işlem uygulamasının önemini göstermektedir. Bunun yanı sıra bazı durumlarda tek bir ikincil işlemin yetersiz kalabileceği durumlarda birbiriyle uyumlu ve sıralamasına dikkat edilerek uygulanan

ikincil işlemlerle parçaya birçok mekanik özellik kazandırılabilir. Şekil 4.38'de ısıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma simülasyonuna ait sonuçlar yer almaktadır.

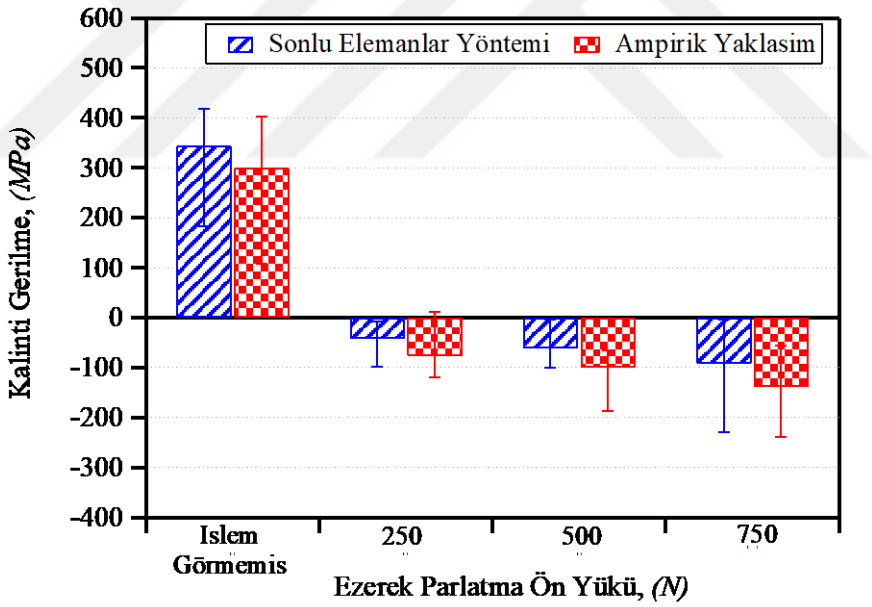


Şekil 4.38. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu (E.P.(1) - 250 N - 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N - 350 RPM).

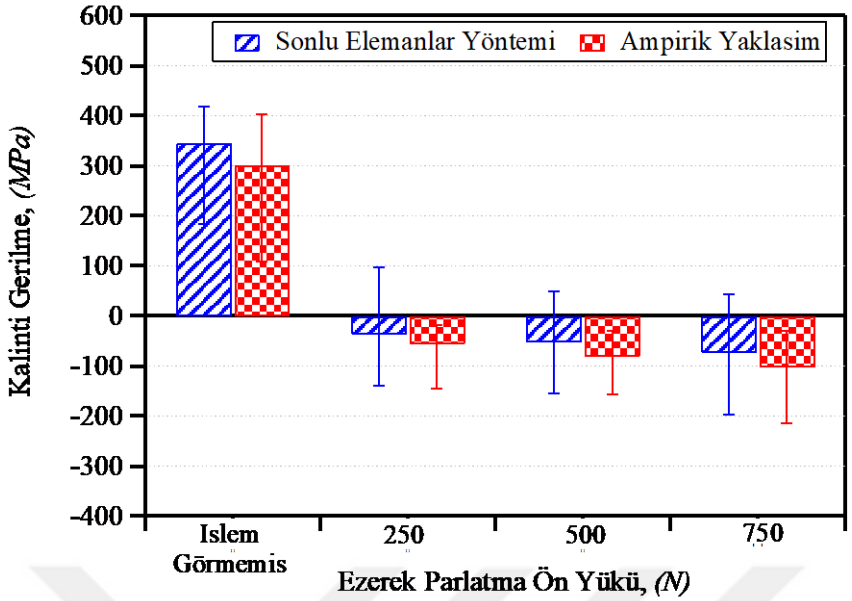
4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ve Ampirik Yaklaşımla Analiz Edilen Kalıntı Gerilmelerin Karşılaştırılması

İşlem görmemiş numunelere parlatma kuvvetleri sırasıyla 250 N, 500 N, 750 N; parlatma devirleri sırasıyla 350 RPM, 700 RPM, 1050 RPM; ilerleme ise 0,1 mm/dev olarak belirlenen parametrelerle gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarıyla aynı parametrelerle gerçekleştirilen deneysel testlerin sonucu elde edilen numunelere Bölüm 4.1.7'de bahsedilen yöntemle elde edilen değerler Denklem 15'deki formülde yerine konularak ampirik hesaplanmıştır. Ampirik yaklaşım sonucu, simülasyon sonuca benzer şekilde parlatma kuvveti artışıyla basma kalıntı gerilmenin arttığı ancak parlatma deviri artışıyla basma kalıntı gerilme değerinin bir miktar azaldığı gözlenmiştir. İki yöntem sonucunu karşılaştırdığımızda her iki yöntemin işlem görmemiş numunelerinde oluşan çekme kalıntı gerilme değerlerinin standart sapması işlem görmüş numunede oluşan basma kalıntı gerilme değerlerinin standart sapmasına göre fazla çıktığı görülüyor. Bu bize üretim sırasında oluşan çekme kalıntı gerilmelerin noktadan noktaya değişiminin fazla

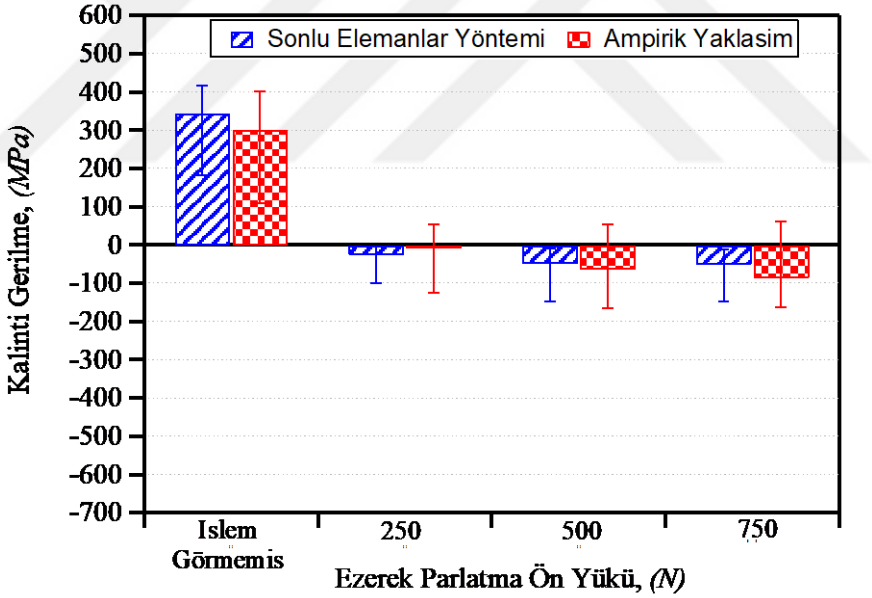
olduğunu göstermektedir. Ezerek parlatma simülasyonu sonucunda yüzeyde oluşan en yüksek basma kalıntı gerilme değeri yüksek parlatma kuvveti olan yani 750 N ve düşük devir 350 RPM de gerçekleşmişti. Aynı şekilde ampirik yaklaşımla da yüzeyde oluşan en yüksek basma kalıntı gerilme değerleri aynı parametre değerlerinde çıkmıştır. Ama ampirik yaklaşımla hesaplanan bütün ortalama basma kalıntı gerilme değerleri simülasyonla gerçekleştirilen bütün analizlerde ölçülen ortalama basma kalıntı gerilme değerlerinden yaklaşık olarak ortalama %35 daha fazla çıkmıştır. Ancak bu ortalama kalıntı gerilme değerlerindeki artış sonlu yöntemiyle analiz edilen kalıntı gerilme değerlerinin standart sapması aralığında olduğundan sonuçların birbiriyle örtüştüğünü söyleyebiliriz. Ayrıca sadece parlatma kuvveti 250 N parlatma deviri 1050 RPM olan simülasyon test sonucu olan ortalama basma kalıntı gerilme değeri ampirik yaklaşım ile hesaplanan ortalama basma kalıntı gerilme değerinden daha fazla çıkmıştır. Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41'de ezerek parlatma sonrası ampirik yaklaşımla ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan kalıntı gerilme sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.39. Ezerek parlatma sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (350 RPM).



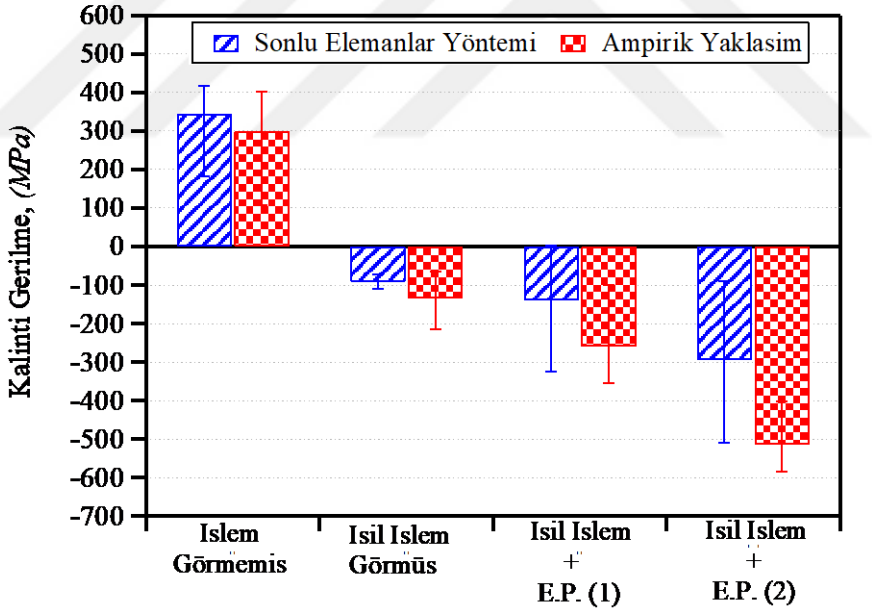
Şekil 4.40. Ezerek parlatma sonrsı sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (700 RPM).



Şekil 4.41. Ezerek parlatma sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle ve ampirik yaklaşımla analiz edilen kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması (1050 RPM).

Isıl işlem görmüş numunelere iki farklı parametrede gerçekleştirilen ezerek parlatma simülasyon sonuçlarıyla aynı parametrelerle gerçekleştirilen deneysel testlerin sonucu elde edilen numunelere Bölüm 4.1.7'de bahsedilen yöntemle elde edilen değerler Denklem 15'deki formülde yerine konularak ampirik hesaplanmıştır. Her iki yöntemle

analiz edilen kalıntı gerilme sonucu en yüksek basma kalıntı gerilme değerleri ısıl işlem görmüş parçaya uygulanan 750 N – 350 RPM parametresinde gerçekleşmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle ölçülen kalıntı gerilmelerin standart sapması ampirik yaklaşım ile hesaplanan kalıntı gerilmelerin standart sapmasından daha fazla olduğu görülmektedir. Ampirik yaklaşımla hesaplanan bütün ısıl işlem görmüş parçaların ortalama basma kalıntı gerilme değerleri simülasyonla gerçekleştirilen bütün analizlerde ölçülen ortalama basma kalıntı gerilme değerlerinden yaklaşık olarak % 40 daha fazla çıkmıştır. Ancak standart sapmaları göz önüne alırsak sonuçların birbiriyle uyuştuğunu söyleyebiliriz. Her iki yöntemle ölçülen kalıntı gerilmeleri arasında en düşük standart sapma ısıl işlem görmüş parçalarda hesaplanmıştır. Bunun nedeninin ısıl işlem sonrası mikroyapının homojenleşmesi sonrası gerilmelerin giderilerek noktadan noktaya farkın azalmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir [113]. Şekil 4.42'de ısıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma simülasyonu ve ampirik yaklaşımla hesaplanan kalıntı gerilmelerine ait sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.42. Isıl işlem görmüş parçaya uygulanan ezerek parlatma operasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu sonucu ile ampirik yaklaşımla hesaplanan kalıntı gerilmeleri ve karşılaştırılması (E.P.(1) - 250 N – 1050 RPM, E.P.(2) - 750 N – 350 RPM).

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi zor olan Inconel 718 alaşım malzemesinin LTYF yöntemiyle üretilmesinden sonra uygulanan ikincil işlemlerin etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel olarak LTYF ile üretilen işlem görmemiş parçalara ısıl işlem ve ezerek parlatma operasyonları uygulanmıştır. Bunlara ek olarak ısıl işlem görmüş parçalara mikrosertliği en yüksek ve en düşük sonuç veren parametrelerde ezerek parlatma uygulanmıştır. Deneysel olarak yapılan ikincil işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğü, yüzey topoğrafisi, mikrosertlik, mikroyapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir. SEM, XRD ve ampirik yaklaşımla hesaplanan kalıntı gerilme analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle üretilen işlem görmemiş parçalara ısıl işlem ve ezerek parlatma simülasyonu yapılmıştır. Bunlara ek olarak ısıl işlem görmüş parçalara mikrosertliği en yüksek ve en düşük sonuç veren parametrelerde ezerek parlatma simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonu yapılan parçaların kalıntı gerilmesi ve kalıcı deformasyonu analiz edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- Deneysel yöntemle üretilmiş işlem görmemiş parçanın yüzey pürüzlülük değerleri 15 µm ve mikrosertliği 365 HV olarak ölçülmüştür. Farklı parametrelerde uygulanan ezerek parlatma operasyonlarından sonra en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,5 µm ve en yüksek mikrosertlik değeri 440 HV olarak 750 N – 350 RPM parametresinde ölçülmüştür.
- Deneysel yöntemle üretilmiş işlem görmemiş parçaya uygulanan ısıl işlemden sonra yüzey pürüzlülük değeri 15 µm, mikrosertlik değeri ise 438 HV olarak ölçülmüştür. Farklı parametrelerde uygulanan ezerek parlatma operasyonlarından sonra en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,57 µm ve en yüksek mikrosertlik değeri yaklaşık 498 HV olarak 750 N – 350 RPM parametresinde ölçülmüştür.
- Deneysel yöntemle üretilen işlem görmemiş parçaların üretim yönünde alınan mikroyapı görüntülerinde, ergime havuzlarının oluştuğu ve oluşan ergime havuzlarının içerisinde hücresel dendritik yapılar ve sütunlu tane yapıları bir arada görülmüştür. Tarama yönünde alınan mikroyapı görüntülerinde ise tarama izlerinin görüldüğü ve üretim yönüne benzer şekilde hücresel dendritik yapılar ve sütunlu tane

yapıları bir arada görülmüştür. İşlem görmemiş parçaya uygulanan ezerek parlatma sonrası alınan SEM görüntülerinde, yüzey altı mikroyapılarında deformasyonlar sonucunda değişimler meydana gelmiş, plastik deformasyona uğrayan kısımlarda ise ince bir tabakada yönelim oluşturmuştur. Isıl işlem görmüş parçaların mikroyapısı incelendiğinde ergime havuzları, tarama izleri, hücresel dendritik yapılar ve sütunlu tane yapılarının kaybolduğu gözlemlenmiştir. Aynı parçanın SEM analizleri incelendiğinde ise ısıl işlem sonrası oluşan Laves, δ, γ' ve γ'' fazları gözlemlenmiştir. Isıl işlem görmüş parçalara uygulanan ezerek parlatma sonrası parçaların SEM analizleri incelendiğinde, yüzey altı mikroyapılarında deformasyon kaynaklı tane küçülmeleri meydana geldiği ayrıca yüzeyde beyaz renkli ince bir tabaka oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu tabakanın ultra-ince taneli veya nanokristalli yapı olduğu ortaya konulmuştur.

- XRD sonuçlarında işlem görmemiş parçada (111), (200) ve (220) olmak üzere üç pikte Taenite (Fe, Ni) fazı görülmüştür. Yapılan ikincil işlemler sonrasında yalnızca ısıl işlem görmüş parçalarda farklı bir faz olan Nikel Krom Oksit ($NiCrO_3$) rastlanmıştır. İkincil işlemlerden sonra piklerin genişliklerinde değişimler parçaların mikrosertlik değerlerindeki değişimlerle uyumlu olmuştur.
- Yapılan aşınma testleri sonucunda parçalara yapılan bütün ikincil işlemlerin malzemenin aşınma direnci arttırdığı gözlenmiştir. En düşük aşınma oranı ise ısıl işlem görmüş parçaya uygulanan 750 N – 350 RPM parametresinde gerçekleşen ezerek parlatma operasyonu sonrası elde edilmiştir.
- Boyutsal doğruluk ölçümleri sonucu en yüksek boyutsal sapma işlem görmemiş parçaya 750 N – 350 RPM parametresinde uygulanan ezerek parlatma sonrası elde edilmiştir.
- İşlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş parçaların yüzeyinde ampirik yaklaşımla hesaplanan ortalama kalıntı gerilme değerleri sırasıyla 300,8 MPa ve -133,8 MPa'dır. Bu parçalara uygulanan ezerek parlatma işlemleri sonrası işlem görmemiş parçanın yüzeyinde oluşan ortalama basma kalıntı gerilme değeri en fazla 750 N – 350 RPM parametresinde gerçekleşen ezerek parlatma sonrası -130,2 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı parametre gerçekleşen ezerek parlatma sonrası ısıl işlem görmüş parçanın yüzeyinde oluşan ortalama en yüksek basma kalıntı gerilme -513,19 Mpa olarak elde edilmiştir.

- Sonlu elemanlar yöntemiyle üretilen işlem görmemiş parçanın yüzeyde oluşan çekme kalıntı gerilme değeri 344,65 MPa'dır. Bu parçaya farklı parametrelerde uygulanan ezerek parlatma simülasyonlarında yüzeyde ortalama en yüksek basma kalıntı gerilmesi 750 N – 350 RPM parametresinde -91,34 MPa olarak bulunmuştur. Ancak ezerek parlatmanın etkin olduğu katman derinliği 750 N – 1050 RPM parametresinde 2,081 mm olarak ölçülmüştür. Bu parametre aynı zamanda kalıcı birim şekil değişiminin en fazla olduğu parametredir.
- Sonlu elemanlar yöntemiyle üretilen ısıl işlem görmüş parçanın yüzeyde oluşan basma kalıntı gerilme değeri -90,86 MPa'dır. Bu parçaya iki farklı parametrede uygulanan ezerek parlatma simülasyonlarında yüzeyde ortalama en yüksek basma kalıntı gerilmesi 750 N – 350 RPM parametresinde -293,94 MPa olarak bulunmuştur.
- Ampirik yaklaşımla ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen kalıntı gerilmesi değerleri kıyaslandığında; ampirik yaklaşımla hesaplanan ortalama basma kalıntı gerilme değerlerinin 250 N – 1050 RPM parametresinde uygulanan ezerek parlatma operasyonu sonrası ölçülen değer hariç, tümünde sonlu elemanlar yönteminde analiz edilen ortalama kalıntı gerilme değerlerinden yaklaşık ortalama % 35 daha fazla olduğu saptanmıştır. Ancak bu ampirik yaklaşımla ölçülen ortalama kalıntı gerilmesi değerleri sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen ortalama kalıntı gerilmesi değerlerinin standart sapması dahilinde olduğu için, her iki yöntemle analiz edilen ortalama kalıntı gerilmesi değerlerinin örtüştüğünü söylenebilir.

KAYNAKÇA

1. Frazier, W.E., *Metal additive manufacturing: a review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2014. **23**(6): p. 1917-1928.
2. Francois, M.M., et al., *Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2017. **21**(LA-UR-16-24513; SAND-2017-6832J).
3. Tofail, S.A., et al., *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.* Materials today, 2018. **21**(1): p. 22-37.
4. Strano, G., et al., *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting.* Journal of Materials Processing Technology, 2013. **213**(4): p. 589-597.
5. Gökhan, Ö., *Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme.* Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2020. **9**(1): p. 606-621.
6. 3dmizar. 2016; Available from: https://www.3dmizar.com/img/material-info/mat-inconel-2.jpg.
7. Majumdar, T., et al., *Understanding the effects of PBF process parameter interplay on Ti-6Al-4V surface properties.* 2019. **14**(8): p. e0221198.
8. Cevik, S., *Superalloys for Industry Applications*. 2018: IntechOpen.
9. Choudhury, I. and M. El-Baradie, *Machining nickel base superalloys: Inconel 718.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1998. **212**(3): p. 195-206.
10. Sims, C.T., *A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists.* Superalloys, 1984. **1984**: p. 399-419.
11. Wikipedia. 17.04.2020; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Superalloy#/media/File:Ni3Nb_Body_Centered_Tetragonal.JPG.
12. Long, H., et al., *Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys—a review.* Journal of Alloys and Compounds, 2018. **743**: p. 203-220.
13. Anderson, M., et al., *δ Phase precipitation in Inconel 718 and associated mechanical properties.* Materials Science and Engineering: A, 2017. **679**: p. 48-55.
14. Slama, C. and M. Abdellaoui, *Structural characterization of the aged Inconel 718.* Journal of alloys and compounds, 2000. **306**(1-2): p. 277-284.
15. Li, R., et al., *Isolation and determination for δ, γ' and γ "phases in Inconel 718 alloy.* Scripta Materialia, 2002. **46**(9): p. 635-638.
16. Mouritz, A.P., *Introduction to aerospace materials*. 2012: Elsevier.

17. 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.

18. Carter, T.J., *Common failures in gas turbine blades.* Engineering Failure Analysis, 2005. **12**(2): p. 237-247.

19. SpecialMetals, *Inconel 625 Literature Handbook*. 2019, Special Metals: https://www.specialmetals.com. p. 1.

20. Zhou, J., et al., *Study of surface quality in high speed turning of Inconel 718 with uncoated and coated CBN tools.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. **58**(1-4): p. 141-151.

21. Li, L., et al., *Machining characteristics of Inconel 718 by sinking-EDM and wire-EDM.* Materials and Manufacturing Processes, 2015. **30**(8): p. 968-973.

22. Dudzinski, D., et al., *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(4): p. 439-456.

23. Arunachalam, R., M. Mannan, and A. Spowage, *Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(9): p. 879-887.

24. 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, 2020. **5**(2): p. 221-234.

25. Trosch, T., et al., *Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting.* Materials letters, 2016. **164**: p. 428-431.

26. Kumar, L.J., P.M. Pandey, and D.I. Wimpenny, *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. 2018: Springer Singapore.

27. Liverani, E., et al., *Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel.* Journal of Materials Processing Technology, 2017. **249**: p. 255-263.

28. Khorasani, A., et al., *The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V.* Additive Manufacturing, 2019. **25**: p. 176-186.

29. 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.

30. Shi, Q., et al., *Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites.* Optics & Laser Technology, 2016. **84**: p. 9-22.

31. 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.

32. Peng, T. and C. Chen, *Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting.* International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018. **5**(1): p. 55-62.

33. 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.

34. 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.

35. Kim, H., et al., *Effect of heat treatment on apatite-forming ability of Ti metal induced by alkali treatment.* Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1997. **8**(6): p. 341-347.

36. Chlebus, E., et al., *Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting.* Materials Science and Engineering: A, 2015. **639**: p. 647-655.

37. Qi, H., M. Azer, and A. Ritter, *Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718.* Metallurgical and Materials Transactions A, 2009. **40**(10): p. 2410-2422.

38. Huang, X., M. Chaturvedi, and N. Richards, *Effect of homogenization heat treatment on the microstructure and heat-affected zone microfissuring in welded cast alloy 718.* Metallurgical and materials Transactions A, 1996. **27**(3): p. 785-790.

39. Tucho, W.M., et al., *Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment.* Materials Science and Engineering: A, 2017. **689**: p. 220-232.

40. Shan, D. and L. Zhen, *Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys*, in *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. 2012, Elsevier. p. 267-297.

41. Thomas, A., et al., *High temperature deformation of Inconel 718.* Journal of materials processing technology, 2006. **177**(1-3): p. 469-472.

42. Raghavan, S., et al., *Effect of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties in selective laser melted INCONEL 718 alloy.* Materials and Manufacturing Processes, 2017. **32**(14): p. 1588-1595.

43. Huang, W., et al., *Heat treatment of Inconel 718 produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties.* Materials Science and Engineering: A, 2019. **750**: p. 98-107.

44. Başak, H., S. Özkan, and A. Taşkesen, *Application of burnishing process on friction stir welding and investigation of the effect of burnishing process on the surface roughness, hardness and strength.* Experimental Techniques, 2011. **35**(1): p. 8.

45. Bounouara, A., H. Hamadache, and A. Amirat, *Investigation on the effect of ball burnishing on fracture toughness in spiral API X70 pipeline steel.* The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(9-12): p. 4543-4551.

46. Rodríguez, A., et al., *Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique.* Surface and Coatings Technology, 2012. **206**(11-12): p. 2817-2824.

47. Sequera, A., et al., *Surface integrity of inconel 718 by ball burnishing.* Journal of materials engineering and performance, 2014. **23**(9): p. 3347-3353.

48. STWORA, A. and G. SKRABALAK, *Improvement of mechanical properties of parts produced from AlSi10Mg powder with use of SLS/SLM technology by densification of the product surface layer.*

49. El-Tayeb, N., K. Low, and P. Brevern, *Enhancement of surface quality and tribological properties using ball burnishing process.* Machining Science and Technology, 2008. **12**(2): p. 234-248.

50. Dzionk, S., B. Scibiorski, and W. Przybylski, *Surface texture analysis of hardened shafts after ceramic ball burnishing.* Materials, 2019. **12**(2): p. 204.

51. Maximov, J., et al., *Slide burnishing—review and prospects.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **104**(1-4): p. 785-801.

52. yamasa.com. *EZEREK PARLATMA Nedir?* . 26.08.2020; Available from: https://yamasa.com.tr/141/1/4/yamasa/ezerekparlatma.aspx#:~:text=Teknoloji-,EZEREK%20PARLATMA%20Nedir%3F,kadar%20superfinish%20y%C3%BCzeyler%20elde%20edilebilir.

53. *What is Burnishing and what is it used for?* 2020; Available from: https://www.engineeringclicks.com/burnishing-process/.

54. De Lacalle, L.L., et al., *The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. **32**(9-10): p. 958-968.

55. Akkurt, A., et al., *Comparison of Hole Surface Finishing Processes with Roller Burnishing Method Applied in Copper Materials.* Gazi University Journal of Science, 2014. **27**(1).

56. Rotella, G., L. Filice, and F. Micari, *Improving surface integrity of additively manufactured GP1 stainless steel by roller burnishing.* CIRP Annals, 2020.

57. Stwora, A., G. Skrabalak, and J. Maszybrocka, *To enhance mechanical properties of parts produced from AlSi10Mg powder with use of SLS/SLM methods by densification of the product surface layer.* Mechanik, 2017. **90**(5-6): p. 426-431.

58. Sova, A., et al., *Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits.* Journal of Thermal Spray Technology, 2017. **26**(8): p. 1922-1934.

59. Borkar, A.P., P.S. Kamble, and C.Y. Seemikeri, *Surface integrity enhancement of Inconel 718 by using roller burnishing process.* Parameters, 2014. **1**(2): p. 3.

60. Chen, C. and F.-J. Shiou, *Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003. **21**(3): p. 177-185.

61. Sadat, A.B., M.Y. Reddy, and B. Wang, *Plastic deformation analysis in machining of Inconel-718 nickel-base superalloy using both experimental and numerical methods.* International journal of mechanical sciences, 1991. **33**(10): p. 829-842.

62. Chomienne, V., et al., *Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016. **13**: p. 90-96.

63. Schneider, J., B. Lund, and M.J.A.M. Fullen, *Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens.* 2018. **21**: p. 248-254.

64. Lu, Y., et al., *Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy.* 2015. **75**: p. 197-206.

65. Wang, X. and A. Wang. *Three-dimensional finite element analysis with clamping in wire and arc additive manufacturing*. in *2016 European Modelling Symposium (EMS)*. 2016. IEEE.

66. Chiumenti, M., et al., *Numerical simulation and experimental calibration of Additive Manufacturing by blown powder technology. Part I: thermal analysis.* 2017.

67. Johnson, K.L., et al., *Simulation and experimental comparison of the thermo-mechanical history and 3D microstructure evolution of 304L stainless steel tubes manufactured using LENS.* 2018. **61**(5): p. 559-574.

68. Andreotta, R., et al., *Finite element simulation of laser additive melting and solidification of Inconel 718 with experimentally tested thermal properties.* 2017. **135**: p. 36-43.

69. Zhang, Y. and J. Zhang, *Finite element simulation and experimental validation of distortion and cracking failure phenomena in direct metal laser sintering fabricated component.* Additive Manufacturing, 2017. **16**: p. 49-57.

70. Mercelis, P. and J.-P. Kruth, *Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting.* Rapid prototyping journal, 2006. **12**(5): p. 254-265.

71. Zhang, W., M. Tong, and N.M. Harrison, *Resolution, energy and time dependency on layer scaling in finite element modelling of laser beam powder bed fusion additive manufacturing.* Additive Manufacturing, 2019.

72. Peter, N., et al., *Benchmarking build simulation software for laser powder bed fusion of metals.* Additive Manufacturing, 2020. **36**: p. 101531.

73. Cheng, B., S. Shrestha, and K. Chou, *Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting.* Additive Manufacturing, 2016. **12**: p. 240-251.

74. Mukherjee, T., W. Zhang, and T. DebRoy, *An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing.* Computational Materials Science, 2017. **126**: p. 360-372.

75. Zhang, L., et al., *Study on mechanical properties of honeycomb pentamode structures fabricated by laser additive manufacturing: Numerical simulation and experimental verification.* 2019. **226**: p. 111199.

76. Deng, W.J., et al. *Finite element analysis of effects of ball burnishing parameters on residual stresses*. in *Materials Science Forum*. 2004. Trans Tech Publ.

77. Zhao, J. and Z. Liu, *Plastic flow behavior for machined surface material Ti-6Al-4V with rotary ultrasonic burnishing.* Journal of Materials Research and Technology, 2020.

78. Randjelovic, S., et al., *Modelling of the ball burnishing process with a high-stiffness tool.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. **81**(9-12): p. 1509-1518.

79. Amini, C., et al., *Finite element analysis of ball burnishing on ball-end milled surfaces considering their original topology and residual stress.* Metals, 2020. **10**(5): p. 638.

80. Hiegemann, L., et al. *Reducing the stair step effect of layer manufactured surfaces by ball burnishing*. in *AIP Conference Proceedings*. 2016. AIP Publishing LLC.

81. ge.com/additive, *Ni 718*. 2020: ge.com/additive. p. 3.

82. Zhang, D., et al., *Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy*. Materials Science and Engineering: A, 2015. **644**: p. 32-40.

83. Feng, K.-y., et al., *Microstructure and phase transformation on the surface of Inconel 718 alloys fabricated by SLM under 1050° C solid solution+ double ageing.* Vacuum, 2017. **145**: p. 112-115.

84. Additive, S. *Simufact Additive*. 2020; Available from: https://www.mscsoftware.com/Simufact-Additive/Introduction.

85. Forming, S. *Simufact Forming*. 2020 [cited 2020; Available from: https://www.simufact.com/previous-version-SF.html.

86. Hassan, A.M.J.J.o.m.p.t., *The effects of ball-and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals.* 1997. **72**(3): p. 385-391.

87. El-Tayeb, N., K. Low, and P.J.J.o.m.p.t. Brevern, *Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061.* 2007. **186**(1-3): p. 272-278.

88. Revankar, G.D., et al., *Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy.* 2014. **58**: p. 256-268.

89. El-Axir, M.J.I.J.o.M.T. and Manufacture, *An investigation into roller burnishing.* 2000. **40**(11): p. 1603-1617.

90. El-Tayeb, N., K. Low, and P.J.P.o.t.i.o.m.e. Brevern, part j: journal of engineering tribology, *The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces.* 2008. **222**(7): p. 947-955.

91. Courbon, C., et al., *Near surface transformations of stainless steel cold spray and laser cladding deposits after turning and ball-burnishing.* Surface and Coatings Technology, 2019. **371**: p. 235-244.

92. Hassan, A.M. and A.S.J.W. Al-Bsharat, *Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals.* 1996. **199**(1): p. 1-8.

93. Amato, K., et al., *Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting.* Acta Materialia, 2012. **60**(5): p. 2229-2239.

94. Komarasamy, M., et al., *Microstructure, fatigue, and impact toughness properties of additively manufactured nickel alloy 718.* Additive Manufacturing, 2019. **28**: p. 661-675.

95. Artaza, T., et al., *Influence of heat input on the formation of laves phases and hot cracking in plasma arc welding (PAW) additive manufacturing of inconel 718.* Metals, 2020. **10**(6): p. 771.

96. Zhou, L., et al., *Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused inconel 718 before and after heat treatment.* Journal of Materials Science & Technology, 2019. **35**(6): p. 1153-1164.

97. Wang, X. and K. Chou, *The effects of stress relieving heat treatment on the microstructure and residual stress of Inconel 718 fabricated by laser metal powder bed fusion additive manufacturing process.* Journal of Manufacturing Processes, 2019. **48**: p. 154-163.

98. Popovich, V., et al., *Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting.* Materials & Design, 2017. **131**: p. 12-22.

99. Olugbade, T.O. and J. Lu, *Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT).* Nano Materials Science, 2020. **2**(1): p. 3-31.

100. Varin, R.A., T. Czujko, and Z.S. Wronski, *Nanomaterials for solid state hydrogen storage*. 2009: Springer Science & Business Media.

101. Hassan, A.M. and A.S. Al-Bsharat, *Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals.* Wear, 1996. **199**(1): p. 1-8.

102. Sharma, S., S. Sangal, and K. Mondal, *On the optical microscopic method for the determination of ball-on-flat surface linearly reciprocating sliding wear volume.* Wear, 2013. **300**(1-2): p. 82-89.

103. Lesyk, D., et al., *Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress.* Surface and Coatings Technology, 2020. **381**: p. 125136.

104. Barros, R., et al., *Laser powder bed fusion of Inconel 718: Residual stress analysis before and after heat treatment.* Metals, 2019. **9**(12): p. 1290.

105. Wang, X. and Y.K. Chou. *A method to estimate residual stress in metal parts made by Selective Laser Melting*. in *ASME 2015 international mechanical engineering congress and exposition*. 2015. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

106. Carlsson, S. and P.-L. Larsson, *On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part I: theoretical and numerical analysis.* Acta materialia, 2001. **49**(12): p. 2179-2191.

107. Carlsson, S. and P.-L. Larsson, *On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: experimental investigation.* Acta Materialia, 2001. **49**(12): p. 2193-2203.

108. Lu, Y., et al., *Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy.* Optics & Laser Technology, 2015. **75**: p. 197-206.

109. Song, B., et al., *Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior.* Materials & Design (1980-2015), 2014. **54**: p. 727-733.

110. Takakuwa, O., Y. Kawaragi, and H. Soyama, *Estimation of the yield stress of stainless steel from the Vickers hardness taking account of the residual stress.* Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2013. **3**(04): p. 262.

111. D.Tabor, *The Hardness of Metal*. 1951, Oxford University Press.

112. Liu, F., et al., *Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy.* Optics & laser technology, 2011. **43**(1): p. 208-213.

113. Cao, J., et al., *Effect of overlap rate on recrystallization behaviors of Laser Solid Formed Inconel 718 superalloy.* Optics & Laser Technology, 2013. **45**: p. 228-235.

114. Sebastiani, M., et al., *Effects of residual stress on nano-mechanical behavior of thin films*, in *Nanomechanical Analysis of High Performance Materials*. 2014, Springer. p. 263-284.

115. Ahmad, B., et al., *Residual stress evaluation in selective-laser-melting additively manufactured titanium (Ti-6Al-4V) and inconel 718 using the contour method and numerical simulation.* Additive Manufacturing, 2018. **22**: p. 571-582.

116. Vrancken, B., et al., *Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting.* Scripta Materialia, 2014. **87**: p. 29-32.

117. Li, X., et al., *Improved plasticity of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting through a novel heat treatment process.* Materials & Design, 2019. **180**: p. 107915.

118. Revankar, G.D., et al., *Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti–6Al–4V) by ball burnishing process.* Journal of Materials Research and Technology, 2017. **6**(1): p. 13-32.

119. Uddin, M.S., et al., *Finite element analysis of surface integrity in deep ball-burnishing of a biodegradable AZ31B Mg alloy*. Metals, 2018. **8**(2): p. 136.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Mert KAYA

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2019-2021)

Lisans: Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2014-2018)

Lisans: Anadolu Üniversitesi, İktisat Fakültesi, Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri Bölümü (2015-2020)

Lisans: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü (2008-2013)

PROJELER

" Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Inconel 718 Alaşımından Üretilen Parçaların Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi ve İyileştirilmesi", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 118R039

YAYINLAR ve BİLDİRİLER

- SUNAY, N., M. KAYA, and Y. KAYNAK, *CHEMICAL POST-PROCESSING METHODS FOR ENHANCING SURFACE PROPERTIES OF PARTS FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING: A REVIEW.* Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2020. **38**(4).