

Seçici Lazer Ergitme Prosesinde Inconel 718 Aşınma Davranışı

Bora ARF

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2024

Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

Bora ARF

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

April 2024

Seçici Lazer Ergitme Prosesinde Inconel 718 Aşınma Davranışı

Bora ARF

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı Uyarınca

Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı

Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Nisan 2024

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans öğrencisi Bora ARF'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Seçici Lazer Ergitme Prosesinde Inconel 718 Aşınma Davranışı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Koray KILIÇAY

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Esad KAYA

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Üye:

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Koray KILIÇAY danışmanlığında hazırlamış olduğum “Seçici Lazer Ergitme Prosesinde Inconel 718 Aşınma Davranışı” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 29/04/2024

Bora ARF

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada, nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718'in Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretimi ve uygulanan farklı ısıt işlemlerin mikroyapı, sertlik ve aşınma performansına etkisi incelenmektedir. Katmanlı imalat ile üretilen numunelere farklı sıcaklıklarda ve sürelerde vakum fırınında solüsyon ısıt işlemi uygulanmıştır. Tüm numuneler solüsyon ısıt işlemleri sonrası vakum fırınında havada soğutmaya bırakılmıştır.

Numunelerin mikroyapısı optik ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiş ve EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) analizleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri 100gf yük ve 10sn bekleme süresinde ölçülmüş ve ortalama mikrosertlik değerleri hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri kuru şartlar altında gerçekleştirilmiş, aşınma oranları hesaplanmış ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için aşınma kanalları SEM ve EDS analizi ile incelenmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde, SLE ile üretilen numunede ergime havuzları ve parabolik yay şeklinde mikroyapı belirlenmiştir. Uygulanan ısıt işlemlerin etkisi ile parabolik yay şeklindeki mikroyapının kaybolmaya başladığı ve daha homojen bir mikroyapı elde edildiği tespit edilmiştir. SEM incelemelerine göre, tüm numunelerde  $\delta$  (Delta) ve  $\gamma$  (Gamma) fazları belirlenmiş ve uygulanan ısıt işlemin fazların dağılımına etki ettiği tespit edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri ısıt işlem uygulanmamış numunede tespit edilmiştir. Solüsyona alma ve vakum fırınında havada soğutma işlemi sonrası numunelerin mikrosertlik ve aşınma direnci değerlerinde azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin aşınma kanalı SEM ve EDS analizi incelemeleri ile abrasif ve oksidatif aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** SLE, Inconel 718, Isıt İşlem, Aşınma.

## SUMMARY

In this study, the fabrication of Inconel 718, a nickel-based superalloy, by the Selective Laser Melting (SLM) method and the effects of different heat treatments on the microstructure, hardness, and wear performance are investigated. Solution heat treatment was applied to the samples produced by additive manufacturing in a vacuum oven at different temperatures and times. All samples were air-cooled after solution heat treatment in a vacuum oven.

The microstructure of the samples was examined by the optic, SEM(Scanning Electron Microscope), and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analyses were performed. Wear tests were carried out under dry conditions. The wear rates were calculated and wear channels were examined by SEM and EDS analysis to determine wear mechanisms.

In microstructural examinations, melting pools and parabolic arc-shaped microstructure were determined in the sample produced by SLM. It was determined that with the effect of the applied heat treatments, the parabolic arc-shaped microstructure began to disappear and a more homogeneous microstructure was obtained. According to SEM examinations,  $\delta$  (Delta) and  $\gamma$  (Gamma) phases were determined in all samples and it was determined that the applied heat treatment affected the distribution of the phases. The highest microhardness values were measured in the sample without heat treatment. It was determined that the microhardness and wear resistance values of the samples decreased after solution heat treatment and air cooling in the vacuum oven. Abrasive and oxidative wear mechanisms were determined by SEM and EDS analysis of the wear channels of the samples.

**Keywords:** SLM, Inconel 718, Heat Treatment, Wear.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince yardımlarını ve değerli bilgilerini benden esirgemeyen, çalışma azmini ve hırsını örnek aldığım, değerli hocam, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Koray KILIÇAY 'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tüm öğrenim hayatım süresince olduğu gibi lisansüstü öğrenimim süresince de maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                             |             |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                           | <b>vi</b>   |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                        | <b>vii</b>  |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>                                                        | <b>viii</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                                     | <b>ix</b>   |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                                                 | <b>xi</b>   |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>                                               | <b>xiv</b>  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>                                  | <b>xv</b>   |
| <b>1. GİRİŞ VE AMAÇ .....</b>                                               | <b>1</b>    |
| <b>2. TEORİK BİLGİ.....</b>                                                 | <b>3</b>    |
| 2.1. Seçici Lazer Ergitme (SLE).....                                        | 4           |
| 2.1.1. Seçici lazer ergitmenin (SLE) ortaya çıkışı.....                     | 4           |
| 2.1.2. SLE teknolojisinin temelleri.....                                    | 5           |
| 2.1.3. Mikroyapısal evrim .....                                             | 8           |
| 2.1.4. SLE parametrelerinin bileşen mikroyapısı üzerindeki etkisi.....      | 9           |
| 2.1.5. Alaşım ve toz özellikleri.....                                       | 10          |
| 2.2. Inconel 718 Alaşımı .....                                              | 11          |
| 2.2.1. Bileşim ve metalurjik özellikler .....                               | 11          |
| 2.2.1. Nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718’de fazlar .....            | 14          |
| 2.2.1.1. <u>Gamma (<math>\gamma</math>) fazı</u> .....                      | 15          |
| 2.2.1.2. <u>Geometrik olarak sıkı istifli fazlar</u> .....                  | 16          |
| 2.2.1.3 <u>Gamma üssü (<math>\gamma'</math>) fazı</u> .....                 | 17          |
| 2.2.1.4. <u>Gamma iki üssü (<math>\gamma''</math>) fazı</u> .....           | 18          |
| 2.2.1.5. <u>Delta (<math>\delta</math>) fazı</u> .....                      | 20          |
| 2.2.1.6. <u>Karbürler ve bürürler</u> .....                                 | 21          |
| 2.2.2. Inconel 718 yaygın kullanıldığı alanlar .....                        | 23          |
| 2.3. Inconel 718’in Isıl İşlemi.....                                        | 25          |
| 2.3.1. Eklemeli imalat üretimi sonrası kullanılan ikincil işlemler.....     | 25          |
| 2.3.2. Solüsyon sertleştirilmesi .....                                      | 26          |
| 2.3.3. Yaşlandırma ve çökelme sertleştirilmesi .....                        | 28          |
| 2.3.4. Isıl işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi.....  | 30          |
| 2.3.5. Sıcaklık ve zaman profillerinin ısıtıl işlem üzerindeki etkisi ..... | 31          |

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                  | Sayfa     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4. Metallerin ve Alaşımların Aşınma Davranışı .....                            | 32        |
| 2.4.1. Başlıca aşınma türleri .....                                              | 32        |
| 2.4.2. Aşınma direncini etkileyen faktörler .....                                | 33        |
| <b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>                                            | <b>35</b> |
| 3.1. Mevcut Araştırmanın Karşılaştırmalı Analizi .....                           | 35        |
| <b>4. MATEYAL VE YÖNTEM .....</b>                                                | <b>41</b> |
| 4.1. Deneysel Çalışma ve Düzenek Şeması .....                                    | 41        |
| 4.2. Isıl İşlem – Sıcaklık ve Zaman Profili .....                                | 43        |
| 4.3. Numune Hazırlığı .....                                                      | 43        |
| 4.4. Zımpara ve Parlatma .....                                                   | 44        |
| 4.5. Dağlama İşlemi .....                                                        | 45        |
| 4.6. Mikroskop Görüntüleme .....                                                 | 46        |
| 4.7. SEM Görüntüleme .....                                                       | 47        |
| 4.8. Sertlik Testi .....                                                         | 48        |
| 4.9. Aşınma Testi .....                                                          | 49        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                             | <b>51</b> |
| 5.1 Mikroyapı Analizi .....                                                      | 51        |
| 5.1.1 Optik mikroskop görüntü analizi .....                                      | 51        |
| 5.1.2. SEM görüntüleri ve EDS analizleri .....                                   | 56        |
| 5.2. Mikrosertlik .....                                                          | 64        |
| 5.3. Aşınma Analizi (Aşınma Profili, Aşınma Katsayısı, Sürtünme Katsayısı) ..... | 65        |
| 5.3.1. Sürtünme katsayısı .....                                                  | 65        |
| 5.3.2. Aşınma Profili .....                                                      | 66        |
| 5.3.3. Aşınma Katsayısı .....                                                    | 68        |
| 5.3.4. Aşınma kanalları SEM görüntüleri ve EDS analizleri .....                  | 69        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                | <b>78</b> |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>                                                    | <b>80</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>                                                                                                                                                                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi.....                                                                                                                                                                                                           | 5            |
| 2.2. a) Tek bir montajda yerleşik iç özellikler b) Bugatti firmasına ait bütünleşmiş su soğutmalı motor parçası SLE ve Inconel 718 .....                                                                                                         | 6            |
| 2.3. Seçici lazer ergitme yöntemi ile rotor kanatlarının prototiplemesi .....                                                                                                                                                                    | 7            |
| 2.4. Inconel 718' e ait Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramı (Sahu vd., 2021).....                                                                                                                                                             | 15           |
| 2.5. SLE yöntemi ve Inconel 718 ile üretilmiş ısıtma işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü, (a) Tane sınırları ve matristeki çökeltiler, and (b) $\gamma''$ ve $\gamma'$ fazlar.....                                                              | 17           |
| 2.6. Farklı ısıtma işlemleri Inconel 718 süper alaşımında $\gamma''$ fazının morfolojisi değişiklikleri. (a) $\delta$ Yaşlandırma (b) (a)'nın bir bölümünün büyütülmesi (c) $\delta$ yaşlanma+çözelti (d) (c)'nin bir bölümünün büyütülmesi..... | 20           |
| 2.7. (a) Isıtma işlem sonrası çökeltileri gösteren SEM görüntüsü ve (b) (a)'daki $\delta$ fazının iğnemi morfolojisini gösteren büyütülmüş TEM parlak alanı.....                                                                                 | 21           |
| 2.8 Monolitik roket motoru (enjektör ve itme odası) bütünleşmiş tasarımı .....                                                                                                                                                                   | 23           |
| 2.9. eklemeli imalat üretim yönteminde üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerinin artırmasında kullanılan ikincil işleme teknikleri (Sunay, 2022).....                                                                                         | 26           |
| 2.10. Sektörde AMS 5663 ticari adı ile bilinen bir ısıtma işlem prosedürü (Sunay vd. 2023). 29                                                                                                                                                   |              |
| 4.1. Struers Discotom 5 kesme cihazı.....                                                                                                                                                                                                        | 44           |
| 4.2. Struers TegraPol 21 metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı. ....                                                                                                                                                                | 44           |
| 4.3. Dağlama sırasında kullanılan aparatlar ve Inconel 718 numunesi .....                                                                                                                                                                        | 45           |
| 4.4. Nikon Eclipse L150 Optik Mikroskop ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi. ....                                                                                                                                                                   | 46           |
| 4.5. Hitachi Regulus 8230 marka SEM cihazı.....                                                                                                                                                                                                  | 47           |
| 4.6. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı .....                                                                                                                                                                                                | 48           |
| 4.7. CSM Tribometre aşınma test cihazı .....                                                                                                                                                                                                     | 49           |
| 4.8. Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı .....                                                                                                                                                                                             | 50           |
| 5.1. HT-0 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X.....                                                                                                                                                                              | 52           |
| 5.2. HT-1 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X.....                                                                                                                                                                              | 52           |
| 5.3. HT-2 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X.....                                                                                                                                                                              | 53           |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4. HT-3 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X.....                                                                     | 53 |
| 5.5. HT-1, HT-2 ve HT-3 numuneleri için ZSD diyagramı gösterimi (Mostafa vd., 2017).<br>.....                                           | 55 |
| 5.6. HT-0 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X.....                                                           | 56 |
| 5.7. HT-1 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X.....                                                           | 57 |
| 5.8. HT-2 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X.....                                                           | 57 |
| 5.9. HT-3 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X.....                                                           | 58 |
| 5.10. HT-0 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir<br>.....                                        | 60 |
| 5.11. HT-1 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir<br>.....                                        | 61 |
| 5.12. HT-2 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir<br>.....                                        | 62 |
| 5.13. HT-3 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir<br>.....                                        | 63 |
| 5.14 Aşınma deneyi sırasında anlık olarak HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelere ait<br>sürtünme katsayısı değerleri ve ortalama değeri..... | 66 |
| 5.15. HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelerine ait aşınma profili genişliği .....                                                            | 67 |
| 5.16. HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelerine ait aşınma oranı ve ortalama sürtünme<br>katsayısı.....                                       | 68 |
| 5.17. HT-0 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C:<br>500X.....                                           | 69 |
| 5.18. HT-1 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C:<br>500X.....                                           | 70 |
| 5.19. HT-2 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C:<br>500X.....                                           | 71 |
| 5.20. HT-3 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C:<br>500X.....                                           | 72 |
| 5.21. HT-0 SEM 100 $\mu$ m aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum<br>element analizi sonucu .....                     | 73 |
| 5.22. HT-1 SEM 100 $\mu$ m aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum<br>element analizi sonucu .....                     | 74 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.23. HT-2 SEM 100 $\mu$ m aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum<br>element analizi sonucu ..... | 75 |
| 5.24. HT-3 SEM 100 $\mu$ m aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum<br>element analizi sonucu ..... | 76 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <b><u>Cizelge</u></b>                                                                                                      | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1. İnconel 718 alaşımı elementi yaygın olarak kullanılan element oranı .....                                             | 12                  |
| 2.2. Nikel bazlı süper alaşımlarda alaşım elementi etkilerinin rolü oranı .....                                            | 13                  |
| 2.3. İnconel 718’de yaygın olarak görünen fazlar. ....                                                                     | 14                  |
| 4.1 Tez kapsamında parçaların üretimi, uygulanan ısıt işlemleri ve parçaların karakterizasyon süreçlerinin gösterimi. .... | 42                  |
| 4.2 Tez kapsamında parçaların üretimi, uygulanan ısıt işlemleri ve parçaların karakterizasyon süreçlerinin gösterimi. .... | 43                  |
| 5.1 Ölçülen Ortalama Sertlik Değerleri .....                                                                               | 64                  |
| 5.2 Ölçülen Aşınma Alanı Değerleri .....                                                                                   | 67                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler</u></b> | <b><u>Acıklama</u></b>                    |
|------------------------|-------------------------------------------|
| <b>E</b>               | Enerji Yoğunluğu (J/mm <sup>3</sup> )     |
| <b>Ra</b>              | Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm) |
| <b>μm</b>              | Mikrometre                                |
| <b>N</b>               | Newton                                    |
| <b>dev</b>             | Devir                                     |
| <b>P</b>               | Lazer Gücü (W)                            |
| <b>V</b>               | Lazer Tarama Hızı (mm/sn)                 |
| <b>h</b>               | Tarama Aralığı (μm)                       |
| <b>t</b>               | Katman Kalınlığı (μm)                     |
| <b>°C</b>              | Santigrat Derece                          |
| <b>W</b>               | Watt                                      |
| <b>K</b>               | Kelvin                                    |
| <b>J</b>               | Joule                                     |
| <b>nm</b>              | Nanometre                                 |
| <b>Kg</b>              | Kilogram                                  |
| <b>%</b>               | Yüzde                                     |
| <b>GPa</b>             | Giga paskal                               |
| <b>MPa</b>             | Mega paskal                               |
| <b>mm</b>              | Milimetre                                 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Kısaltmalar</u></b> | <b><u>Açıklama</u></b>          |
|---------------------------|---------------------------------|
| <b>SLE</b>                | Seçici Lazer Ergitme            |
| <b>Eİ</b>                 | Eklemeli İmalat                 |
| <b>TEM</b>                | Taramalı Elektron Mikroskobu    |
| <b>SEM</b>                | Taramalı Elektron Mikroskobu    |
| <b>YMK</b>                | Yüzey Merkezli Kübik            |
| <b>HMT</b>                | Hacim Merkezli Tetragonal       |
| <b>HMK</b>                | Hacim Merkezli Kübik            |
| <b>HSP</b>                | Hegzagonal Sıkı Paket           |
| <b>TTT</b>                | Time-Temperature-Transformation |
| <b>ZSD</b>                | Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm          |

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Malzeme bilimi ve mühendisliğin dinamik ortamında, eklemeli imalatın (Eİ) ortaya çıkışı, geleneksel malzeme tasarımı ve üretimi paradigmalarını yeniden tanımlayan devrimci bir güç olarak ortaya çıkmıştır. Bu dönüştürücü teknolojinin ön saflarında, toz haline getirilmiş malzemeleri katman katman seçici olarak kaynaştırmak için hassas lazer ışınlarından yararlanan ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip karmaşık yapıların oluşturulmasını sağlayan bir işlem olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yer almaktadır. Bu tez, SLE yöntemi ve zorlu endüstriyel uygulamalarda son derece önemli bir nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718'in aşınma davranışını incelemektedir.

Günümüz malzeme mühendisliği alanında, yüksek mukavemetli nikel bazlı süper alaşımlar, özellikle havacılık, enerji ve otomotiv endüstrilerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, korozyon direnci ve mekanik dayanıklılık gibi üstün özellikleri ile öne çıkmaktadır. Inconel 718, bu özelliklere sahip önemli bir süper alaşım örneğidir ve genellikle motor parçaları, gaz türbinleri ve nükleer reaktörler gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır (Das vd., 2003). Bu malzemenin üretim süreçleri ve özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma, Inconel 718 süper alaşımının seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi ile üretimi ve bu malzemenin ısıtılma işlemi sonrasındaki özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesine odaklanmaktadır. SLE, metal katmanlarını hassas bir şekilde birleştiren ve kompleks geometrili parçaların üretilmesine imkân tanıyan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, malzeme tasarımında esneklik sağlayarak endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, Inconel 718 süper alaşımının SLE ile üretilen numunelerinin farklı ısıtılma rejimlerine tabi tutulması, malzemenin mikroyapısı, mekanik dayanıklılığı ve aşınma direnci üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, endüstriyel uygulamalar için kritik bir öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, Inconel 718 süper alaşımının SLE yöntemi ile üretilen numunelerinin farklı ısıtılma rejimlerinin mikroyapı, mekanik özellikler ve aşınma

davranışları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu temel amaç doğrultusunda alt başlıklı amaçlar belirlenmiştir:

- a. Inconel 718 süper alaşımının SLE yöntemi ile üretilmiş numunelerinin ısıtıl işlem öncesi mikroyapısının belirlenmesi.
- b. Farklı ısıtıl işlem rejimlerine tabi tutulan numunelerin mikroyapısal değişimlerinin incelenmesi.
- c. Isıtıl işlemin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin sertlik testleri ile değerlendirilmesi.
- d. Aşınma testleri ile numunelerin aşınma direncinin belirlenmesi ve farklı ısıtıl işlem parametrelerinin aşınma davranışlarına olan etkilerinin değerlendirilmesi.
- e. Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizleri ile numunelerin kimyasal bileşimi ve elementel dağılımının belirlenmesi.

Bu amaçlar doğrultusunda elde edilecek bilgiler, Inconel 718 süper alaşımının SLE yöntemi ile üretimi ve ısıtıl işlem sonrasındaki performansının anlaşılmasına ve endüstriyel uygulamalarda daha verimli kullanımına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu tez, günümüz mühendislik alanında önemli bir konuyu ele alarak bilimsel literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, tezin genel çerçevesini çizerek temel bilgileri ve çalışmanın ana amacını sunmaktadır. İkinci bölüm, Seçici Lazer Ergitme (SLE) üretim yöntemine, Inconel 718 malzemesine, ısıtıl işlem sürecine ve aşınma konularına ilişkin genel bilgileri detaylandırmaktadır. Üçüncü bölümde, mevcut literatürde benzer çalışmaların kıyaslanması ve analizine, araştırmanın bağlamı daha geniş bir perspektiften ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde, deneysel çalışmaların temelini oluşturan kullanılan materyaller ve uygulanan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Beşinci bölümde elde edilen bulgulara dayanarak yapılan analizler ve bu bulguların tartışılması sunulmaktadır. Altıncı bölüm ise araştırmanın sonuçlarına dayanarak çıkarılan sonuçları özetlerken, ileriye yönelik önerileri içermektedir.

## 2. TEORİK BİLGİ

Eklemeli imalat (Eİ), genellikle 3B baskı olarak adlandırılan bu yenilikçi üretim süreci, geleneksel üretim metotlarını kökten değiştirerek karmaşık geometrilere ve özelleştirilmiş bileşenlere yönelik çözümler sunmaktadır. Eİ teknolojileri, nesneleri katman katman oluşturarak, çeşitli endüstrilerde benzersiz tasarım esnekliği ve etkili malzeme kullanımı sağlayarak üretim süreçlerine yeni bir bakış açısı getirmiştir (Tofail vd., 2018).

Çeşitli eklemeli imalat ortamı, farklı endüstri ihtiyaçlarını karşılayan birkaç temel tekniği kapsamaktadır. En eski 3B baskı teknolojilerinden biri olan sterolitografi, katmanlar oluşturmak için foto polimerizasyonu kullanır, bu da onu özellikle hızlı prototipleme ve karmaşık model üretimi için uygun hale getirir (Lakkala, 2023). Birleştirilmiş biriktirme modellemesi (FDM) ise, hızlı prototipleme ve düşük hacimli üretim için uygun maliyetli bir çözüm sağlayarak, termoplastik malzemeleri katman katman ekstrüde eder (Gonzalez, 2017).

Bir diğer önemli teknik, seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici lazer ergitme (SLE) içeren bir kategori olan toz yatağı füzyonudur. SLS, toz haline getirilmiş malzemeleri kaynaştırmak için bir lazer kullanırken, SLE, tamamen yoğun metal bileşenlerin üretimine izin veren metal tozlarına odaklanarak benzer bir yaklaşım kullanmaktadır (Suryakumar vd., 2013).

Bu eklemeli imalat teknikleri, çeşitli endüstrilerde uygulamalar bulmuştur. Havacılık ve otomotiv sektörleri, karmaşık geometrilere sahip hafif yapılar oluşturma, performansı ve yakıt verimliliğini artırma yeteneğinden yararlanmaktadır (Alami vd., 2023). Tıp alanında Eİ, bireysel hasta gereksinimlerine göre uyarlanmış özelleştirilmiş implant ve protez üretiminde devrim yaratmıştır (Davoodi vd., 2018).

Eİ teknolojilerinin sürekli gelişimi, hassasiyet, hız ve malzeme uyumluluğunu iyileştirmeyi amaçlayan önemli araştırma ve geliştirme çabalarını teşvik etmiştir. Sonuç olarak, eklemeli imalat ortamı, modern üretimdeki rolünü şekillendiren devam eden gelişmelerle dinamikliğini korumaktadır.

## 2.1. Seçici Lazer Ergitme (SLE)

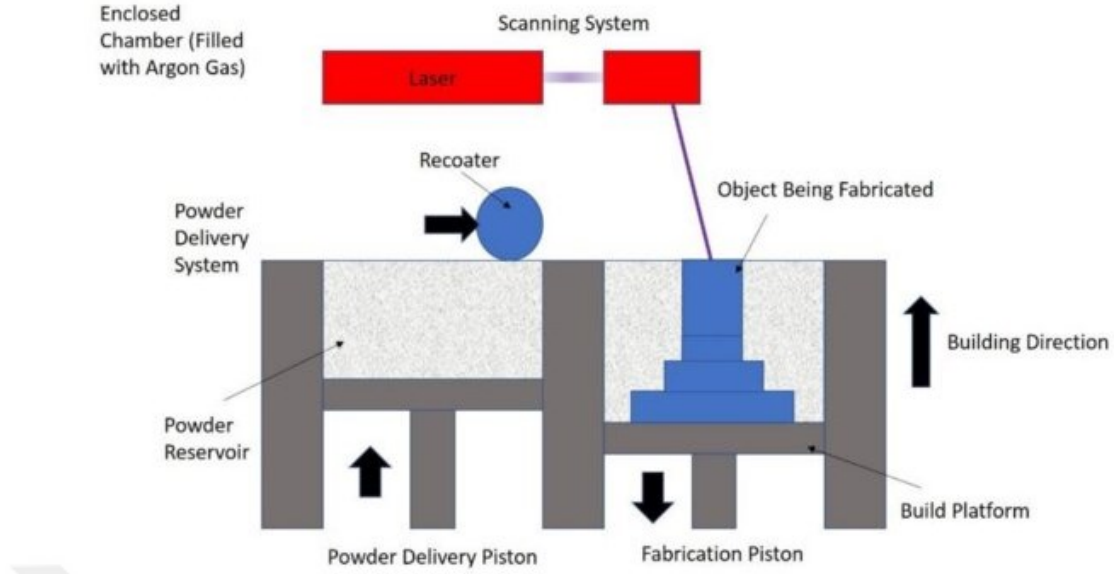
### 2.1.1. Seçici lazer ergitmenin (SLE) ortaya çıkışı

Seçici Lazer Ergitmenin (SLE), özellikle metalik bileşen üretimi alanında, eklemeli üretimde önemli bir gelişmeye işaret etmektedir. SLE, ardışık metal tozu katmanlarını seçici olarak ergitmek ve kaynaştırmak için yüksek güçlü bir lazer kullanan, tamamen yoğun ve karmaşık ayrıntılı bileşenler üreten bir toz yatağı füzyon teknolojisidir (Childs vd., 2005).

SLE'nin tarihçesi, ilk olarak 1980'lerin başında Dr. Carl Deckard ve Dr. Joseph Beaman tarafından geliştirilen Seçici Lazer Sinterleme (SLS) adlı süreçle başlar. Bu süreç, polimer tozlarının bir lazer ışını tarafından seçilmiş bölgelerde sinterlenerek katman katman birleştirilmesini içermektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, daha sonra metal ve seramik malzemeleri üzerinde de uygulanarak SLE 'nin evrimini hızlandırmıştır (Jandyal vd., 2022).

SLE'nin kökenleri, 1990'larda eklemeli üretimde mevcut olan hassasiyet ve malzeme seçeneklerini geliştirme çabalarına kadar izlenebilir. Başlangıçta hızlı prototipleme için geliştirilen, havacılık ve tıbbi uygulamalar gibi endüstrilerde yüksek performanslı bileşenlere olan talebi ele alarak, birincil olarak metal malzemelere odaklanan sofistike bir tekniğe dönüşmüştür (Frazier, 2014).

SLE'nin metallerle kullanımı, bu teknolojiyi endüstriyel üretimde daha çeşitli ve karmaşık uygulamalara taşımıştır. Bu dönemde, metal tozlarının seçici lazerle ergitilmesi ile parçaların üretilmesi, metal endüstrisinde önemli bir dönüm noktasıdır.



Şekil 2.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi. (Jiao vd., 2018)

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi süreç, yapı platformunun üzerine ince bir metal toz tabakasının yayılmasını ve ardından tozu tasarım özelliklerine göre seçici olarak eriten ve katılaştıran bir lazerin hassas bir şekilde uygulanmasını içerir. Bu katman katman yaklaşım, yüksek çözünürlüklü ve minimum atık içeren karmaşık yapıların oluşturulmasına izin verir (Yasa, 2021).

SLE, geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilenlerle karşılaştırılabilir mekanik özelliklere sahip metal parçalar üretme kabiliyeti nedeniyle önem kazanmıştır. Teknik, tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme ve diğer üretim teknikleriyle zor veya imkânsız olabilecek karmaşık geometrilere sahip bileşenler oluşturma yeteneği açısından avantajlar sunmaktadır (Yasa, 2021).

### 2.1.2. SLE teknolojisinin temelleri

SLE, özünde, geleneksel üretim yaklaşımlarından devrimci bir sapma olan eklemeli imalat paradigmasının bir tezahürüdür. Malzemenin daha büyük bir bloktan çıkarılmasını içeren çıkarıcı yöntemlerin aksine, eklemeli imalat karmaşık yapıları katman katman oluşturur. Bu daha fazla verimlilik ve daha az malzeme israfı ile karmaşık geometrilerin oluşturulmasına izin vererek benzeri görülmemiş bir tasarım özgürlüğü sunar.

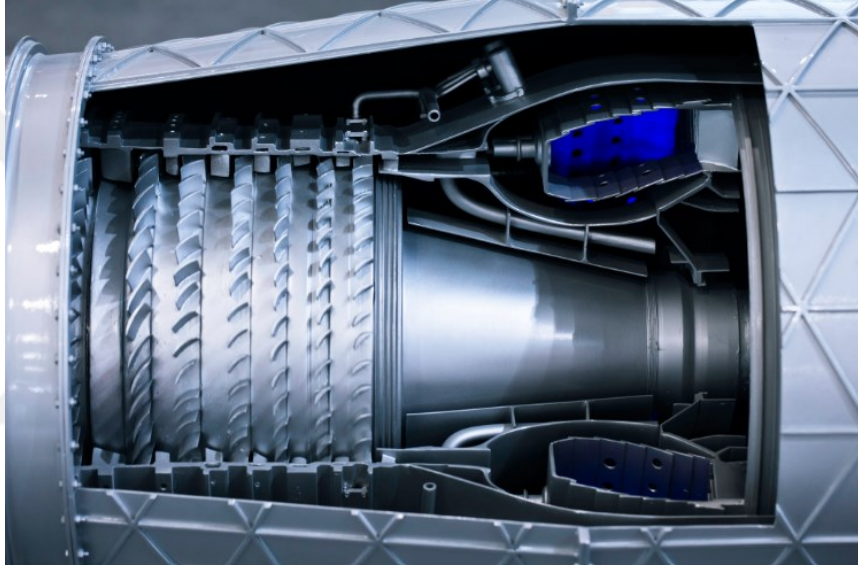
Eklemeli imalat paradigmasının belirgin özelliklerinden biri, sağladığı eşi benzeri görülmemiş tasarım özgürlüğüdür. Tasarımcılar, artık geleneksel üretim yöntemlerinin sunduğu sınırlamalarla bağlı kalmaksızın, oldukça karmaşık ve detaylı geometrileri başarılı bir şekilde oluşturabilirler. Bu ayrılma, geleneksel kısıtlamalardan uzaklaşmayı mümkün kılar ve bileşenlerin optimizasyonunu sağlar, böylece bunları belirli işlevlere ve uygulamalara uygun hale getirebilirler. Şekil 2.2’de geleneksel yöntemler ile üretilmeyecek Inconel 718 ve SLE yöntemi ile üretilmiş olan iki parça örneği sunulmaktadır.



Şekil 2.2. a) Tek bir montajda yerleşik iç özellikler b) Bugatti firmasına ait bütünleşmiş su soğutmalı motor parçası SLE ve Inconel 718 (SLM-solutions, 2024)

Eklemeli üretim, verimlilik ve malzeme korumada üstündür. Önemli miktarda malzeme israfına neden olan geleneksel çıkarıcı yöntemlerin aksine, Eİ süreçleri malzemeyi yalnızca gerektiğinde biriktirir. Bu verimlilik, çevresel etkinin ve kaynak kullanımının azaltılmasına katkıda bulunarak sürdürülebilir üretim uygulamalarıyla uyumludur.

Eklemeli üretim, özellikle özelleştirme ve hızlı prototipleme için çok uygundur. Dijital tasarım dosyaları kolayca değiştirilebilir ve kapsamlı yeniden işleme veya kurulum değişikliklerine gerek kalmadan benzersiz, türünün tek örneği bileşenlerin üretilmesine olanak tanır. Tasarım ve üretimdeki bu çeviklik, özellikle özelleştirme ve hızlı yinelemenin çok önemli olduğu sektörlerde önemli bir avantajdır. Şekil 2.3.'de görüldüğü üzere seçici lazer ergitme, rotor kanatlarının prototiplemesinde faydalar sağlayarak farklı tasarım çözümlerinin hızlı ve ekonomik olarak uygulanabilir şekilde test edilmesine olanak tanır.



Şekil 2.3. Seçici lazer ergitme yöntemi ile rotor kanatlarının prototiplemesi (SLM Solutions, 2024)

Katmanlı üretim olgunlaşmaya devam ettikçe, dönüştürücü etkisi endüstriler arasında yayılır. Havacılık, sağlık, otomotiv ve diğer çeşitli sektörler, bileşenlerin ve ürünlerin nasıl kavramsallaştırıldığı ve üretildiği konusunda bir paradigma değişikliği yaşamaktadır. Eklemeli imalat paradigması sadece teknolojik bir ilerlemeyi değil, aynı zamanda tüm ürün geliştirme ve üretim ortamının yeniden ve temelden tekrar gözden geçirilmesini temsil eder.

### 2.1.3. Mikroyapısal evrim

SLE'nin doğal bir yönü, mikroyapısal evrim üzerindeki etkisidir. Prosese özgü hızlı katılaşma, benzersiz özelliklere sahip ince taneli yapılarla sonuçlanır. Lazer parametreleri ve mikroyapısal sonuçlar arasındaki etkileşimi anlamak, nihai bileşenin mekanik ve termal özelliklerini tahmin etmede çok önemlidir.

SLE'nin doğasında bulunan hızlı katılaşma, fabrikasyon malzeme içinde ince taneli yapıların oluşmasına neden olur. Küçük tane boyutu, artan sertlik ve gelişmiş çekme mukavemeti gibi gelişmiş mekanik özelliklere katkıda bulunur. Bu ince taneli yapılar, katmanlı imalat sürecinde malzemenin yaşadığı hızlı soğuma hızlarının bir sonucudur.

Katılaşma sırasındaki soğutma hızları, SLE ile üretilen bileşenlerin mikro yapısının şekillendirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Hızlı soğuma hızları daha ince tanelerin oluşumuna katkıda bulunurken, daha yavaş hızlar daha iri mikro yapıların gelişmesine yol açabilir. Lazer parametrelerinin ve proses koşullarının kontrol edilmesi, mikro yapısal özelliklerin belirli performans kriterlerini karşılayacak şekilde uyarlanmasını sağlar.

Mikroyapısal evrim, SLE tarafından üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. İnce taneli yapılar, mukavemet, sertlik ve yorulma direncinin artmasına katkıda bulunur. Bununla birlikte, aşırı hızlı katılaşma, artan artık gerilimler ve potansiyel kusurlar gibi zorlukları da beraberinde getirebileceğinden, bir denge sağlamak esastır. Mikroyapı ve mekanik davranış arasındaki etkileşimi anlamak, farklı uygulama süreçlerini optimize etmek için çok önemlidir.

Mikroyapı ve performans arasındaki karmaşık ilişki, süreçleri optimize etmenin temelini oluşturur. Araştırmacılar ve uygulayıcılar, lazer parametrelerindeki ve soğutma hızlarındaki varyasyonların mikroyapısal özellikleri nasıl etkilediğini sistematik olarak anlayarak, istenen malzeme özelliklerini elde etmek için imalat sürecinde ince ayar yapabilirler. Bu bilgi, SLE bileşenlerini çeşitli mekanik gereksinimlere sahip belirli uygulamalar için uyarlamak için kullanışlıdır.

#### 2.1.4. SLE parametrelerinin bileşen mikroyapısı üzerindeki etkisi

Seçici Lazer Ergitme (SLE) oldukça dinamik bir işlemdir ve üretilen alaşım özellikleri, imalat sırasında kullanılan spesifik parametrelere karmaşık bir şekilde bağlıdır. SLE parametrelerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi, alaşımın mikroyapısının ve makroskobik özelliklerinin uyarlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır.

Lazer gücü, füzyon işlemi sırasında enerji girişini doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Lazer gücünün ayarlanması, verimli malzeme erimesi ile aşırı termal gerilimlerin önlenmesi arasında hassas bir denge sağlar. Bu denge de alaşımın mikro yapısını etkiler. Daha yüksek lazer gücü, mekanik özellikleri etkileyerek daha iri tanelere neden olabilirken, daha düşük güç seviyeleri eksik erimeye yol açabilir (Liang vd., 2023).

Tarama hızı, lazerin toz yatağını geçme hızını belirleyerek soğutma hızını ve dolayısıyla mikroyapıyı etkiler. Daha yüksek tarama hızları, daha hızlı katılaşmaya katkıda bulunur ve potansiyel olarak daha ince tanelere yol açar. Tersine, daha düşük tarama hızları daha kapsamlı erime ve daha iri tanelere izin verebilir. İstenen malzeme özelliklerini elde etmek için optimum tarama hızını bulmak çok önemlidir (Liang vd., 2023).

Katman kalınlığı, nihai bileşenin çözünürlüğünü etkileyen bir parametredir. Daha küçük katman kalınlıkları hassasiyeti artırır, ancak üretim süresini uzatabilir. Daha büyük katman kalınlıkları işlemi hızlandırır, ancak yüzey kaplamasını tehlikeye atabilir. Katman kalınlığının seçimi, tasarım karmaşıklıklarının elde edilmesi ile imalat sürecinde verimliliğin korunması arasında bir dengedir (Sufiarov vd., 2017).

SLE sırasında genellikle inert gazlarla kontrol edilen gaz atmosferi, malzeme saflığını ve nihai bileşen özelliklerini etkiler. Kontrollü bir atmosfer, oksidasyonu ve kontaminasyonu önleyerek alaşımın istenen özelliklerini korumasını sağlar. Bölmedeki oksijen ve azot seviyeleri, imal edilen alaşımın mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkileyebilir (Ferrar vd., 2012).

SLE’de kullanılan metalik tozun özellikleri bileşen yapı homojenliğini önemli ölçüde etkiler. Toz partikül boyutu, dağılımı ve bileşimi, erime davranışını ve nihai alaşım özelliklerini etkiler. Fabrikasyon alaşımında tutarlı malzeme özellikleri elde etmek için yüksek kaliteli, homojen tozun sağlanması esastır (Balbaa vd., 2021).

SLE'de optimum malzeme özelliklerinin elde edilmesi, lazer parametreleri üzerinde titiz bir kontrol gerektirdiği açık bir şekilde görünmektedir. Lazer gücü, tarama hızı ve katman kalınlığı, nihai bileşenin kalitesini etkileyen kritik değişkenlerdir. Bu parametrelerin kontrol edilmesinin karmaşıklığı, hızlı katılaşma ihtiyacının termal gerilmelerden ve istenmeyen mikroyapısal özelliklerden kaçınma ile dengelenmesinde yatmaktadır. Parametre kontrolünde hassasiyet, özel özelliklere sahip Inconel 718 bileşenlerini üretmek için SLE'nin tüm potansiyelinden yararlanmak için gereklidir (Kaya vd., 2023).

### 2.1.5. Alaşım ve toz özellikleri

SLE'de malzeme seçimi çok önemlidir ve nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718, uygunluğu ile öne çıkmaktadır. Olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve metalurjik stabilitesi ile tanınan Inconel 718, havacılık, otomotiv ve endüstriyel uygulamaların zorlu gereksinimlerine uygundur. Alaşımın ince toz formu, SLE işleminde kullanılabilirliğini artırarak tek tip erime sağlar ve karmaşık ve yapısal olarak sağlam bileşenlerin oluşumunu teşvik eder.

Malzeme seçimi, Seçici Lazer Ergitme (SLE) gibi eklemeli imalat süreçlerinin başarısında çok önemli bir rol oynamaktadır ve Inconel 718 bu bağlamda kilit bir oyuncu olarak ortaya çıkmaktadır. Inconel 718, olağanüstü özellikleriyle tanınan nikel bazlı bir süper alaşımdır ve havacılık, otomotiv ve diğer zorlu endüstrilerdeki uygulamalar için tercih edilen bir seçenektir.

Inconel 718, özellikle bileşenlerin aşırı termal koşullara maruz kaldığı uygulamalar için uygun hale getiren olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımıyla bilinmektedir. Alaşımın yüksek sıcaklıklar altında yapısal bütünlüğü koruma yeteneği, onu havacılık bileşenleri, gaz türbini motor parçaları ve diğer yüksek performanslı uygulamalar için ideal bir aday olarak konumlandırmaktadır. Ek olarak, Inconel 718, zorlu ortamlarda çok yönlülüğüne katkıda bulunarak olağanüstü korozyon direnci sergiler. Korozyona karşı bu direnç, kimyasallar veya aşındırıcı gazlar gibi aşındırıcı maddelere maruz kalmanın endişe verici olduğu uygulamalarda çok önemli bir faktördür.

Inconel 718'in metalürjik stabilitesi, SLE gibi eklemeli imalat süreçleri için uygunluğuna katkıda bulunan ayırt edici bir özelliktir. Alaşım, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bile mekanik özelliklerini koruyarak, SLE sürecinin doğasında bulunan karmaşık ve kontrollü ısıtma ve soğutma döngülerinde tutarlı performans sağlar.

SLE bağlamında, Inconel 718'in ince toz formu özellikle avantajlıdır. Tozun tek tip partikül boyutu, SLE işlemi sırasında katman katman hassas birikimi kolaylaştırarak kontrollü mikro yapılara ve özel mekanik özelliklere sahip bileşenlerin oluşturulmasına katkıda bulunur. Inconel 718'in SLE sürecine uyarlanabilirliği, karmaşık ve yapısal olarak sağlam bileşenlerin yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak tanır.

Inconel 718'in eklemeli imalat için seçilmesi, özellikle zorlu ortamlarda tarihsel performansına dayanmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve mükemmel mekanik özelliklerin sağlam bir kombinasyonu ile Inconel 718, havacılık, otomotiv ve enerji endüstrilerinde temel bir malzeme olmuştur. Alaşımın zorlu koşullar altında yapısal bütünlüğü koruma kabiliyeti, bu sektörlerdeki uygulamaların talepleriyle uyumludur (Zhang vd., 2020).

Inconel 718, özellikle bileşim olmak üzere eklemeli imalat süreçleriyle uyumluluk göstermiştir. Nikel, krom ve molibden dahil olmak üzere alaşımın bileşimi, lazer bazlı toz yatağı füzyon teknolojilerine uygunluğuna katkıda bulunur. SLE işleminde hızlı soğutma sırasında katılma özellikleri, arzu edilen mikro yapılarla sonuçlanır ve nihai basılı bileşenlerde üstün mekanik özellikler elde etmek için bir temel sağlar (Svetlizky vd., 2021).

## **2.2. Inconel 718 Alaşımı**

### **2.2.1. Bileşim ve metalürjik özellikler**

Nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718, malzeme mühendisliğinin inceliklerinin bir kanıtıdır ve yüksek performanslı uygulamalarda onu vazgeçilmez kılan benzersiz bir bileşim ve metalürjik özellik kombinasyonu sunar.

Inconel 718'in bileşimi, alaşıma olağanüstü özellikler kazandıran özenle hazırlanmış bir element karışımıdır. Özünde nikel, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı

sağlayan temeli oluşturur. Krom ilavesi, alaşımın yüksek sıcaklıklarda korozyona ve oksidasyona karşı direncini artırır. Demir ve kobalt, termal ve mekanik gerilmeler altında alaşımın mukavemetine ve stabilitesine katkıda bulunur. Niyobyum ve molibden, katı çözeltilerin güçlendirilmesinde çok önemli bir rol oynar, yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme deformasyonuna karşı direnç sağlar. Titanyum, alüminyum ve tantal dahil edilmesi, alaşımın genel mukavemetini ve dayanıklılığını daha da artırarak çökeltme sertleşmesini kolaylaştırır (Smith vd., 2005).

Inconel 718 alaşımının bileşenleri genellikle yüzdelerle ifade edilir. Bu oranlar, alaşımın özelliklerini belirler ve spesifik uygulamalara uygunluğunu sağlar. Ancak, tam kesin yüzdelere özel bir formülasyon yoktur ve üreticiye göre bu oranlar kısmen değişebilir. Genellikle alt kısımda çizelge 2.1’de belirlenen bileşen oranları kullanılmaktadır:

Çizelge 2.1. Inconel 718 alaşımı elementi yaygın olarak kullanılan element oranı (Davis, 2001).

| Element | Kimyasal Oran (wt%) |
|---------|---------------------|
| Ni      | 50.00 – 55.00       |
| Cr      | 17.00 – 21.00       |
| Nb      | 4.75 - 5.50         |
| Mo      | 2.80 - 3.30         |
| Ti      | 0.65 - 1.15         |
| Al      | 0.20 - 0.80         |
| Co      | 1.00 maks           |
| C       | 0.08 maks           |
| Mg      | 0.35 maks           |
| Si      | 0.35 maks           |
| P       | 0.015 maks          |
| Si      | 0.015 maks          |
| B       | 0.006 maks          |
| Cu      | 0.30 maks           |
| Fe      | uygun oranda        |

Bu alaşımların hedeflenen mikroyapısal ve mekanik özellikleri, matris içine gömülü olan alaşım elementlerinin bileşimleri, morfolojileri, boyutları ve hacim dağılımları üzerinde

önemli ölçüde etkilidir (Davis, 1997). Bu elementler, optimum alaşım özelliklerinin elde edilmesinde önemli rol oynadıkları için belirli bir aralıkta modifiye edilmelidir. Çizelge 2.2 nikel bazlı süper alaşımlarda yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerini ve bunların özellikleri üzerindeki etkilerini özetlemektedir.

Çizelge 2.2. Nikel bazlı süper alaşımlarda alaşım elementi etkilerinin rolü oranı (Davis, 2001).

| Etki                                          | Element                           |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Çözelti güçlendiricileri                      | Cr, Fe, Mo, Co, W, Ta, Al, Ti, Re |
| Yüksek sıcaklık dayanımı                      | Ni, Nb, C, Co, Mo, W              |
| Karbür oluşumu                                | W, Ta, Ti, Mo, Nb, Hf             |
| MC                                            | W, Ta, Ti, Mo, Nb, Hf             |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>                | Cr, Mo, W                         |
| M <sub>6</sub> C                              | Mo, W, Nb, Ta                     |
| $\gamma'$ çökeltme                            | Al, Ti                            |
| $\gamma''$ çökeltme                           | Nb                                |
| Solvus sıcaklığını yükseltir                  | Co                                |
| Çökelti ve/veya intermetalikler sertleştirici | Al, Ti, Nb, Ta                    |
| Oksidasyon direnci                            | Al, Cr, Y, La, Ce                 |
| Sıcak korozyon direncini artırır              | La, Th                            |
| Sülfürasyon direnci                           | Cr, Co, Si                        |
| Kopma mukavemetini artırır                    | B                                 |
| Tane sınırı rafinerileri                      | B, C, Zr, Hf                      |
| Sertleşmeyi geciktirir                        | Re                                |

### 2.2.1. Nikel bazlı süper alaşım olan İnconel 718’de fazlar

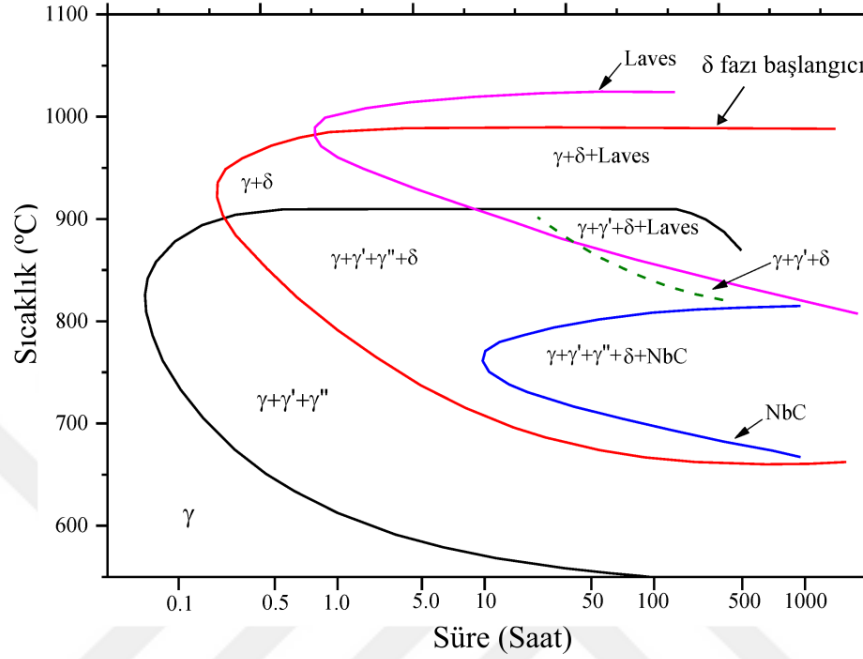
Bu alaşımların mikroyapısı genellikle Gama ( $\gamma$ ) matris fazıyla birlikte diğer ikincil fazları içerir. Bu ikincil fazlar, gamma üstü ( $\gamma'$ ) ve Gama iki üstü ( $\gamma''$ ) fazları, intermetalik bileşikler, metal karbürler veya borürler gibi çeşitli bileşenlerden oluşabilir (Davis, 2001) Nikel bazlı süper alaşımlarda mevcut olan her bir fazın kısa bir tanımı, aşağıdaki başlıklarda sunulmuştur. Bu tanımlar, alaşımların mikroyapısının anlaşılmasına ve özellikle belirli fazların mekanik davranışları üzerindeki etkilerin değerlendirilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca çizelge 2.4’te bu fazların kristal yapı ve bileşimi özet olarak tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 2.3. İnconel 718’de yaygın olarak görünen fazlar (Deng, 2018)

| Faz        | Kristal Yapı              | Kimyasal Bileşim                   |
|------------|---------------------------|------------------------------------|
| $\gamma$   | YMK                       | Ni                                 |
| $\gamma''$ | HMK (D022)                | Ni <sub>3</sub> Nb                 |
| $\gamma'$  | YMK (L12)                 | Ni <sub>3</sub> (Al,Ti)            |
| $\delta$   | Ortorombik (D0 $\alpha$ ) | Ni <sub>3</sub> Nb                 |
| MC         | Kübik B1                  | (Nb,Ti)C                           |
| Laves      | Hexagonal C14             | (Ni,Fe,Cr) <sub>2</sub> (Nb,Mo,Ti) |

Ayrıca Şekil 2.4’te bu fazların süre ve sıcaklığı bağlı olarak dönüşüm grafiği verilmiştir. İnconel 718 için ZSD diyagramı, malzemenin çeşitli sıcaklık ve deformasyon hızları altında nasıl davrandığını gösteren bir grafiktir. Bu diyagram, genellikle yüksek sıcaklıkta yapılan şekillendirme işlemleri için kullanılır çünkü bu gibi koşullarda malzemenin akış davranışı önemlidir. ZSD diyagramı, belirli bir sıcaklıkta ve deformasyon hızında malzemenin akma davranışını gösteren izoterm eğrileri veya konturlar içerir. Bu eğriler, malzemenin akma özelliklerini, kristal yapıdaki değişimleri ve olası faz dönüşümlerini anlamak için önemlidir. İnconel 718 gibi yüksek sıcaklık alaşımlarında, ZSD diyagramı malzemenin işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini ve mikroyapısını anlamak için kullanılır ve uygun işleme parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olur. Bu şekilde,

malzemenin istenilen performansı ve dayanıklılığı sağlamak için optimal işleme koşulları belirlenebilir.



Şekil 2.4. Inconel 718' e ait Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramı (Sahu vd., 2021)

### 2.2.1.1. Gamma ( $\gamma$ ) fazı

Nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718, yüksek sıcaklıkların ve gerilimlerin birleştiği zorlu uygulamalarda üstünlük sağlar. Olağanüstü gücü, sürünmeye ve korozyona karşı direnci, mikroyapındaki önemli rol oynayan Gama ( $\gamma$ ) ile metalurjik elemanların titizlikle dizilişinden kaynaklanmaktadır.  $\gamma$  fazını, nikel ve krom açısından zengin olan bu yüzey merkezli kübik (YMK) kafes, alaşıma doğal nitelikler kazandırır.

Gama ( $\gamma$ ) fazındaki güçlü metalik bağlar hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık için sağlam bir temel oluşturmaktadır (Reed vd., 2000). Ayrıca Gama'nın doğal sünekliği, karmaşık bileşen imalatı için hayati önem taşıyan bütünlüğünden ödün vermeden alaşımanın bükülmesine ve şekillendirilmesine olanak tanır (Azar, 2020).

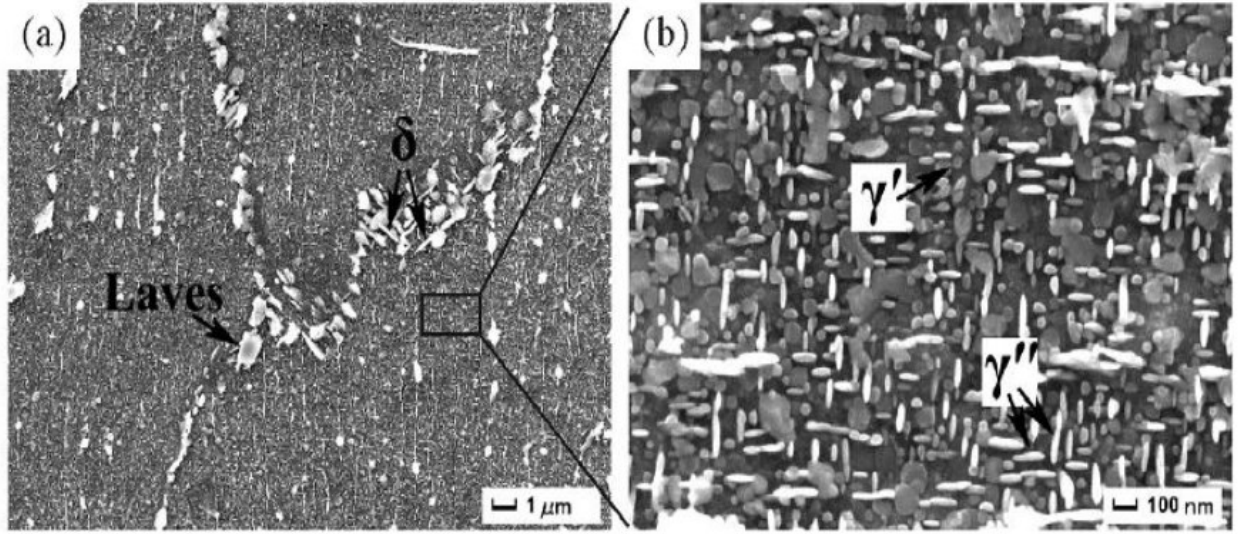
Gama ( $\gamma$ ) fazı aşaması zemini hazırlarken, Inconel 718'in gerçek büyü, çökeltilerin stratejik olarak eklenmesiyle ortaya çıkar. Yaşlandırma ısı işlemleriyle titizlikle hazırlanmış

bu mikroskobik intermetalik fazlar, güçlü takviyeler görevi görerek mikro yapıyı metalurjik kontrol sanatının bir kanıtına dönüştürür (Ghosh vd., 2015).

Yüksek sıcaklıkta bir işlemin ardından daha düşük sıcaklıkta bir işlemde oluşan iki aşamalı bir yaşlandırma süreci, roket basınçlı kaplar gibi hem güç hem de şekillendirilebilirlik gerektiren uygulamalar için çökelti tipini optimize eder (Nagaraj vd., 2021). Paralel olarak lazer ergitme ve katmanlı üretim gibi gelişmiş teknikler, çökelti boyutunu, morfolojisini ve dağılımını benzeri görülmemiş bir doğrulukla manipüle etmek için yollar sunar (Ghosh vd., 2015). Çeşitli sıcaklıklar ve sürelerle daha karmaşık yaşlanma dizilerini keşfetmek, yeni çökelti popülasyonlarının kilidini açmak ve ulaşılabilir özellik kapsamını genişletmek için umut vaat etmektedir (Nagaraj vd., 2021).

#### **2.2.1.2. Geometrik olarak sıkı istifli fazlar**

Geometrik sıkı paket fazları intermetaliktir. Bu güçlendirme fazları  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) ve  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$  - HMT) ve  $\eta$  ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) ve  $\delta$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) fazlarından oluşurlar. Inconel 718 gibi Nikel bazlı süper alaşımların güçlendirme mekanizmaları çoğunlukla  $\gamma'$  fazının oluşumuna bağlıdır. Aynı zamanda gerekli durumlarda ise malzemenin güçlendirilmesi Inconel 718 gibi  $\gamma''$  fazının çökertilmesiyle de sağlanabilir (Geddes vd., 2010). Şekil 2.5'te ısıtıl işlem görmüş Inconel 718 malzemesinden bir parçanın SEM görüntüleri altında fazları görüntülenmektedir.



Şekil 2.5. SLE yöntemi ve Inconel 718 ile üretilmiş ısıtılmış numunenin SEM görüntüsü, (a) Tane sınırları ve matristeki çökeltiler, and (b)  $\gamma''$  ve  $\gamma'$  fazlar (Li, 2018).

### **2.2.1.3 Gamma üssü ( $\gamma'$ ) fazı**

$\gamma'$  fazı, zorlu havacılık ve enerji uygulamalarında yaygın olarak kullanılan nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718'in yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme direncinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar (Reed, 2006). Yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip bu intermetalik bileşik, öncelikle  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ 'den oluşur (Pfaffenberger vd., 2013).  $\gamma$  matrisi içindeki tutarlı çökeltme, kafes uyumsuzluğu sertleşmesi, dağılım güçlendirilmesi ve arayüzey dislokasyon etkileşimleri dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalar aracılığıyla malzemeyi güçlendirir (Gong ve Liu, 2015).

$\gamma'$  çökeltilerinin boyutu, hacim ve morfolojisi, Inconel 718'in mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Tipik olarak, optimal özellikler, yaklaşık 50-100 nm çapında, ince bir şekilde dağılmış, küresel  $\gamma'$  çökeltileriyle elde edilir (Cury vd., 2014). Bu çökeltiler, alaşımın daha yüksek bir sıcaklıkta (yaklaşık 1000°C) çözündürüldükten sonra yüksek bir sıcaklıkta (700-900°C civarında) tutulduğu, yaşlanma olarak bilinen spesifik bir ısıtılmış işlem süreci sırasında oluşur (Walker ve Murphy, 2013). Yaşlanma sırasında, alüminyum ve titanyum atomları  $\gamma$  matrisinden yayılır ve tercihen  $\gamma'$  çökeltilerini çekirdeklendirir ve büyütür, bu güçlendirici elementlerin çevreleyen matrisini tüketir.

$\gamma'$  fazı, üstün yüksek sıcaklık performansına çeşitli şekillerde katkıda bulunur:

Kafes uyumsuzluğu sertleşmesi:  $\gamma$  matrisine kıyasla daha küçük olan  $\gamma'$  kafes parametresi, arayüzde elastik bir gerinim alanı oluşturarak dislokasyon hareketini engeller ve malzemenin akma mukavemetini artırır (Pfaffenberger vd., 2013).

Dispersiyonun güçlendirilmesi: İnce, dağınık  $\gamma'$  çökeltileri dislokasyon hareketi için engel görevi görür, dislokasyonların etraflarına tırmanmasını veya eğilmesini gerektirir, bu da malzemenin gücünü daha da artırır (Gong ve Liu, 2015).

Arayüzey dislokasyon etkileşimleri: Dislokasyonlar,  $\gamma'/\gamma$  arayüzü ile etkileşime girebilir, bu da dislokasyonun sabitlenmesine ve yok olmasına yol açarak gücü ve sürünme direncini daha da artırır (Walker ve Murphy, 2013).

$\gamma'$  fazı, Inconel 718'in olağanüstü yüksek sıcaklık özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir mikroyapısal bileşendir.  $\gamma'$  çökmesinin oluşumunu, özelliklerini ve mekanizmalarını anlamak, zorlu uygulamalar için malzemenin performansını optimize etmek açısından önemlidir.

#### **2.2.1.4. Gamma iki üssü ( $\gamma''$ ) fazı**

Inconel 718'in olağanüstü yüksek sıcaklık yeteneklerine ilişkin tartışmalarda  $\gamma'$  fazı ana ilgi odağı olsa da, daha az ünlü ancak etkili  $\gamma''$  fazı bu süper alaşımın başarısında önemli bir rol oynamaktadır.

Tipik olarak dörtgen kristal yapısına sahip  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  ile temsil edilen  $\gamma''$  fazı, Inconel 718'de daha incelikli bir gerçeklik sergiler. Çalışmalar, Ti ve Al gibi ek elementlerin kafesine dahil edildiğini ortaya çıkararak daha doğru bir  $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Al})$  formülüne yol açar (Song vd., 2015). Saf  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  bileşiminden oluşan bu ince sapma, küresel  $\gamma'$  ile karşılaştırıldığında genellikle disk şeklinde veya plaka benzeri çökeltiler olarak gözlemlenen  $\gamma''$  fazının morfolojisini etkiler (Kear vd., 2017).

$\gamma''$  oluşumu sıklıkla  $\gamma'$  çökmesiyle çakışır ve hatta onunla iç içe geçebilir. Yaşlanma sırasında her iki faz da mevcut Ti, Nb ve Al için rekabet ederek boyutlarını, hacim oranlarını ve mekânsal dağılımlarını etkiler (Walker ve Murphy, 2013). Optimum yüksek sıcaklık

özellikleri, bu fazlar arasında hassas bir denge gerektirir ve yaşlanma parametreleri üzerinde hassas kontrol gerektirir (Cury vd., 2014).

$\gamma''$  çeşitli güçlendirme mekanizmaları yoluyla Inconel 718'in güçlü performansına katkıda bulunur:

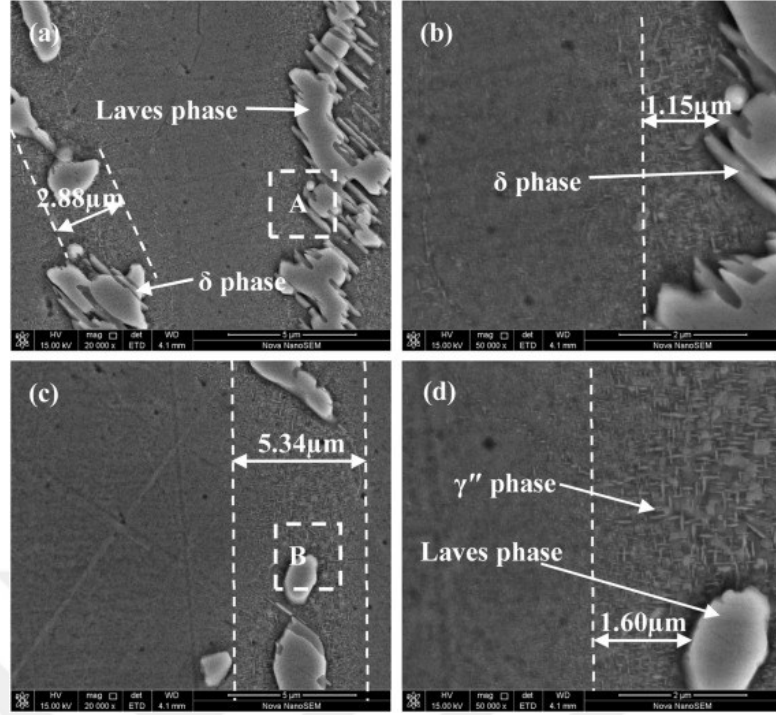
Orowan güçlendirmesi:  $\gamma''$  fazının disk şeklindeki morfolojisi, dislokasyon hareketine önemli engeller oluşturarak onları çökeltilerin etrafında eğilmeye zorlayarak malzemenin akma mukavemetini artırır (Gong ve Liu, 2015).

Zener sabitleme:  $\gamma''/\gamma$  arayüzü, bir sabitleme etkisi yoluyla dislokasyonun kaymasını engelleyebilir, hareketliliklerini daha da kısıtlayabilir ve sürünme direncini artırabilir (Pfaffenberger vd., 2013).

Hall-Petch güçlendirmesi:  $\gamma''$  fazının ince boyutu ve yüksek hacimli fraksiyonu, Hall-Petch mekanizması yoluyla ortalama tane boyutunu azaltarak ve akma mukavemetini daha da artırarak tane incelmeye katkıda bulunur (Walker ve Murphy, 2013).

$\gamma''$  fazı,  $\gamma'$  ile karmaşık şekillerde etkileşime girerek onun boyutunu ve morfolojisini etkiler. Son araştırmalar, bu fazlar arasında birlikte çökme ve rekabetçi büyüme dinamiklerinin mevcut olduğunu ve  $\gamma'$  varlığının  $\gamma''$  çekirdeklenmesini ve dağılımını etkilediğini ileri sürmektedir (Kusabiraki vd., 1992). Inconel 718'in mikro yapısını ve mekanik özelliklerini optimize etmek, bu karmaşık etkileşimin ve yaşlanma parametrelerinin istenen dengeyi sağlayacak şekilde nasıl uyarlanabileceğinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir.

$\gamma''$ ,  $\gamma'$  fazından daha az çalışılmış olsa da Inconel 718'in olağanüstü yüksek sıcaklık performansını şekillendirmede hayati bir rol oynar. Eşsiz morfolojisi, birlikte çökeltme dinamikleri ve çok yönlü güçlendirme mekanizmaları, onu malzemenin yapısal özelliklerine önemli bir katkıda bulunur. Üstün güç, sürünme direnci ve genel güvenilirlik  $\gamma''$  ve  $\gamma'$  fazları arasındaki karmaşık etkileşimin tanınması, bu kritik süper alaşımın mikro yapısının ve performansının zorlu uygulamalara göre uyarlanmasında daha fazla ilerlemenin yolunu açar (Caliari vd., 2011). Şekil 2.6'da farklı ısı işlemlere tabi tutulmuş Inconel 718 numune parçalarının faz detayları gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Farklı ısıt işlemlerle Inconel 718 süper alaşımında  $\gamma''$  fazının morfolojisi değişiklikleri. (a)  $\delta$  Yaşlandırma (b) (a)'nın bir bölümünün büyütülmesi (c)  $\delta$  yaşlanma+çözelti (d) (c)'nin bir bölümünün büyütülmüşü. (Frenchang vd, 2020)

#### **2.2.1.5. Delta ( $\delta$ ) fazı**

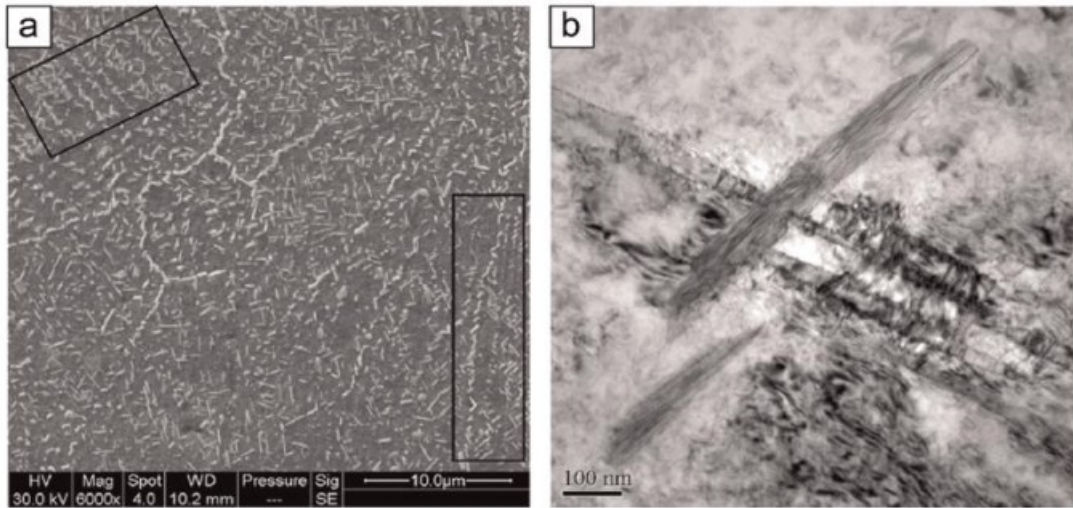
Inconel 718'in yüksek sıcaklık yeteneğine ilişkin tartışmalarda  $\gamma'$  ve  $\gamma''$  aşamaları merkezde yer alırken, genellikle destekleyici bir rol üstlenen  $\delta$  aşaması, bu süper alaşımın mikro yapısının karmaşık ve potansiyel olarak etkili bir yönünü sunar.

Öncelikle altıgen kristal yapısına sahip  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  olarak tanımlanan  $\delta$  fazı, Inconel 718'de bazı ilgi çekici sapmalar sergiler.  $\gamma''$  fazına benzer şekilde, çalışmalar  $\delta$  fazının Ti ve Al gibi ek elementlerin kafesine dahil edildiğini ortaya çıkarır ve bu da daha doğru bir kristal yapıya yol açar  $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Al})$  (Song vd., 2015). Bu bileşim, tipik olarak bloklu veya plaka benzeri çökeltiler olarak gözlemlenen  $\delta$  fazının morfolojisi, genellikle  $\gamma'$  ve  $\gamma''$  ile karşılaştırıldığında daha büyük ve daha seyrek dağılır (Kear vd., 2017).

$\delta$  fazı öncelikle yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık  $1000^\circ\text{C}$ ) çözelti haline getirme sırasında çökelir ve potansiyel olarak tane sınırlarında çekirdeklenir (Cury vd., 2014). Bu oluşum, mevcut Nb, Ti ve Al için  $\gamma''$  fazı ile rekabet ederek malzemenin son mikro yapısını ve özelliklerini etkileyen hassas bir denge yaratır (Walker ve Murphy, 2013). Çözelti

oluşturma parametrelerinin hassas kontrolü,  $\delta$  fazı içeriğini optimize etmek ve potansiyel zararlı etkileri en aza indirmek için çok önemlidir.

$\delta$  fazının Inconel 718'in özellikleri üzerindeki etkisi devam eden bir tartışma konusu olmayı sürdürüyor. Bazı çalışmalar, Nb için bir geçiş bölgesi olarak işlev göreceğini, kuvvet ve sürtünme direnci üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu ve potansiyel olarak  $\gamma''$  ve  $\gamma'$  oluşumu için kullanılabilirliğini azalttığını ileri sürmektedir (Gong ve Liu, 2015). Diğer çalışmalar,  $\delta$  fazının tane sınırının güçlendirilmesine katkıda bulunabileceğini ve yüksek sıcaklıkta yorulma direncini artırabileceğini öne sürüyor (Pfaffenberger vd., 2013). Son araştırmalar,  $\delta$  fazının etkisinin, boyutuna, morfolojisine ve mikro yapı içindeki dağılımına bağlı olarak daha incelikli olabileceğini öne sürüyor (Kear ve Babu, 2017). Şekil 2.7'de ısıtılmış işlem görmüş Inconel 718 parçasının SEM ve TEM görüntüleri paylaşılmaktadır.



Şekil 2.7. (a) Isıl işlem sonrası çökeltileri gösteren SEM görüntüsü ve (b) (a)'daki  $\delta$  fazının iğnemi morfolojisini gösteren büyütülmüş TEM parlak alanı (Zhang vd, 2015).

#### **2.2.1.6. Karbürler ve bürürler**

Inconel 718'in olağanüstü yüksek sıcaklık performansı tartışmalarında  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  ve  $\delta$  fazları merkezde yer alırken, daha az tanınan karbürler ve borürler bu süper alaşımın özelliklerinin şekillendirilmesinde ince de olsa çok önemli bir rol oynuyor. Inconel 718'de karbon ve boron varlığı, kasıtlı olsa da değişen bileşimlere ve kristal yapılara sahip çok çeşitli karbür ve borür fazları ortaya çıkarır. Yaygın karbürler arasında  $M_{23}C_6$  ( $M = Nb, Ta, Ti, Cr$ ) ve  $MC$  ( $M = Nb, Ti$ ) bulunurken borürler tipik olarak  $M_3B_2$  ( $M = Nb, Ti$ ) olarak

görünür (Song ve Liu, 2016). Bu fazların oluşumu element konsantrasyonlarının, soğuma hızlarının ve termal karmaşık etkileşimi ile yönetilir (Gong ve Liu, 2015). Bu faktörler üzerinde hassas kontrol, nihai mikro yapıda bulunan karbürlerin ve borürlerin boyutunu, dağılımını ve tipini optimize etmek için çok önemlidir.

Karbürler ve borürler tipik olarak ince, iğne benzeri çökeltilerden kaba, bloklu tanelere kadar değişen çeşitli morfolojiler sergiler. Bunların mikro yapı içindeki dağılımları da farklılık gösterir, bazıları tane sınırları boyunca,  $\gamma$  tanecikleri içinde bulunur ve hatta  $\gamma''$  gibi diğer fazlarla karışır (Cury vd., 2014). Bu faktörler, karbür veya borürün spesifik türü ve bileşimi ile birlikte malzemenin özellikleri üzerindeki etkilerini önemli ölçüde etkiler.

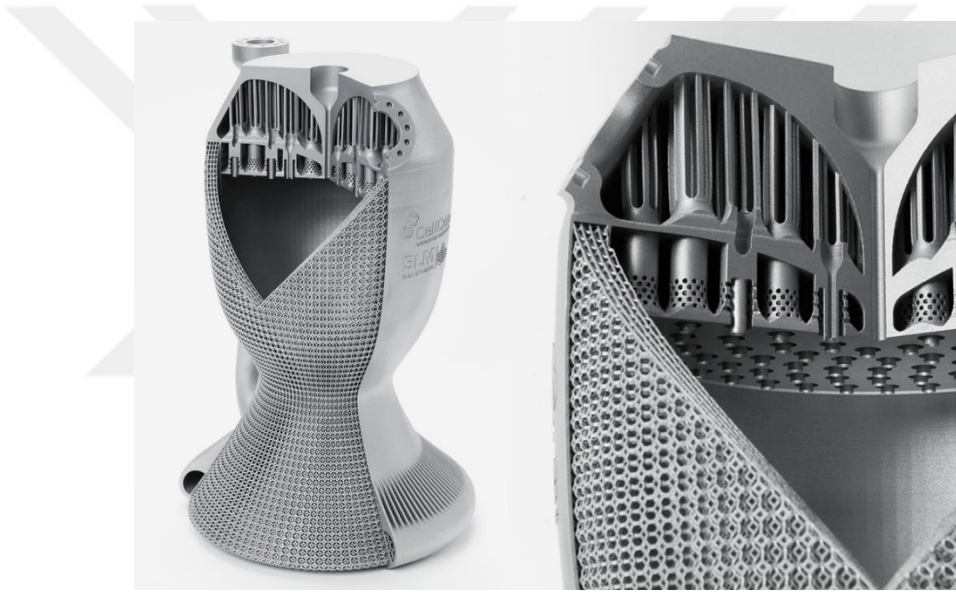
Karbürlerin ve borürler varlığının Inconel 718 üzerinde hem faydalı hem de zararlı etkileri olabilir. Olumlu tarafı, bu fazlar aşağıdakilere katkıda bulunabilir: İnce, dağınık karbürler ve borürler dislokasyon hareketine engel teşkil ederek akma dayanımının ve sürünme direncinin artmasına neden olabilir (Pfaffenberger vd., 2013). Tane sınırları boyunca yer alan karbürler ve borürler, tane sınırının kaymasını engelleyerek sürünme direncini daha da artırabilir (Cury vd., 2014).

Ancak aşırı veya yanlış dağıtılmış karbürler ve borürler de zararlı etkilere neden olabilir: Büyük, kaba veya kümelenmiş karbürler ve borürler, stres yoğunlaşma noktaları olarak hareket edebilir, çatlak başlangıcını ve yayılmasını teşvik edebilir, böylece kırılma tokluğunu azaltabilir (Gong ve Liu, 2015). Tane sınırları boyunca karbürlerin veya borürler varlığı bu bölgeleri zayıflatabilir ve belirli yükleme koşulları altında potansiyel olarak taneler arası çatlamaya yol açabilir (Walker ve Murphy, 2013).

Karbürler ve borürler arasındaki karmaşık etkileşimi, bunların oluşumunu, morfolojisini, dağılımını ve özellikler üzerindeki etkisini anlamak, Inconel 718'in mikro yapısını ve performansını optimize etmek için çok önemlidir. Gelişmiş karakterizasyon teknikleriyle birlikte işleme parametreleri üzerinde hassas kontrol, boyutun özel olarak ayarlanmasına olanak tanır. Potansiyel gevrekleşme risklerini en aza indirirken faydalı güçlendirme etkilerini en üst düzeye çıkarmak için bu aşamaların tipi, türü ve dağıtımında ince ayar yapılmalıdır.

## 2.2.2. İnconel 718 yaygın kullanıldığı alanlar

Inconel 718'in çok yönlülüğü, zorlu ortamlarda uyarlanabilirliğini ve güvenilirliğini sergileyerek çeşitli kritik endüstrilerde yaygın olarak benimsenmesine yol açmıştır. Havacılık uygulamalarında Inconel 718, uçakların güvenilirliğini ve performansını sağlamada çok önemli bir rol oynamaktadır. Alaşım, türbin diskleri, motor gövdeleri ve roket motor bileşenleri gibi kritik bileşenlerde kullanılır. Yüksek mekanik yüklere ve aşırı sıcaklıklara dayanma kabiliyeti, havacılık endüstrisindeki gelişmelere katkıda bulunarak onu havacılık endüstrisi için vazgeçilmez kılmaktadır (Ghiban vd., 2018). Şekil 2.8'de İnconel 718 ve katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiş roket motoru itme odası görseli paylaşılmıştır.



Şekil 2.8 Monolitik roket motoru (enjektör ve itme odası) bütünleşmiş tasarımı  
(Cellcore3d, 2024)

Inconel 718'in korozyon direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığı, kimyasal işleme endüstrilerinde önemli uygulamalar bulmaktadır. Alaşım, reaktör bileşenlerinin, boru sistemlerinin ve agresif kimyasal ortamlara maruz kalan çeşitli kritik ekipmanların yapımında kullanılır. Sağlam özellikleri, kimyasal işleme tesislerinin güvenliğine ve uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur.

Petrol ve gaz sektöründe, Inconel 718 zorlu koşullara dayanma kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Kuyu içi aletler ve kuyu başı ekipmanı gibi bileşenler, alaşımın yüksek basınçlara, aşındırıcı elementlere ve aşırı sıcaklıklara dayanma kapasitesinden yararlanır. Güvenilirliği, ekstraksiyon ve işleme operasyonlarında kullanılan ekipmanın verimliliğine

ve dayanıklılığına katkıda bulunarak onu petrol ve gaz endüstrisinde değerli bir varlık haline getirmektedir (Ghiban vd., 2018).

Inconel 718'in uyarlanabilirliği, modern üretim yöntemlerine, özellikle de seçici lazer ergitme gibi eklemeli imalat tekniklerine kadar uzanmaktadır. Bu yöntemler, karmaşık ve özelleştirilmiş bileşenleri hassas bir şekilde üretmek için alaşımın benzersiz metalurjik özelliklerinden yararlanır. Inconel 718'in gelişmiş üretimdeki rolü, karmaşık geometriler ve özelleştirilmiş tasarımlar için yeni olanaklar sunarak onu malzeme mühendisliğinde inovasyonun ön saflarında konumlandırmaktadır (Yang vd., 2017).

Devam eden araştırmalar, Inconel 718'in özelliklerini geliştirmenin ve yeni uygulamaları keşfetmenin yollarını keşfetmeye devam ediyor. İşleme tekniklerindeki, özellikle eklemeli üretimdeki yenilikler, yeni olasılıkların kilidini açmaktadır. Karmaşık geometrileri ve özelleştirilmiş bileşenleri benzeri görülmemiş bir hassasiyetle oluşturma yeteneği, Inconel 718'in çeşitli endüstrilerde nasıl kullanıldığını yeniden tanımlamaktadır (Yang vd., 2017).

Inconel 718'in geleceği, devam eden araştırma ve geliştirme çabalarına yakından bağlıdır. Bilim adamları ve mühendisler, özelliklerini belirli uygulamalar için daha da optimize etmenin yollarını araştırmaya devam etmektedir. Bu, alaşımın mikro yapısına, mekanik davranışına ve farklı üretim süreçlerine verilen tepkileri daha ayrıntılı bir şekilde incelemeyi içermektedir.

Sürdürülebilirlik malzeme biliminde merkezi bir odak noktası haline geldikçe, Inconel 718'in üretiminde ve kullanımında çevre dostu uygulamaları keşfetmek için araştırmalar yapılmaktadır. Alaşımın üstün özelliklerini korurken çevresel etkiyi en aza indirmek için çaba gösterilmektedir.

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, Inconel 718 için yeni uygulamalar ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji, uzay araştırmaları ve gelişmekte olan teknolojiler gibi sektörlerdeki potansiyeli araştırılmaktadır. Endüstriler geliştikçe, Inconel 718'in teknolojiyi şekillendirmede çok önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

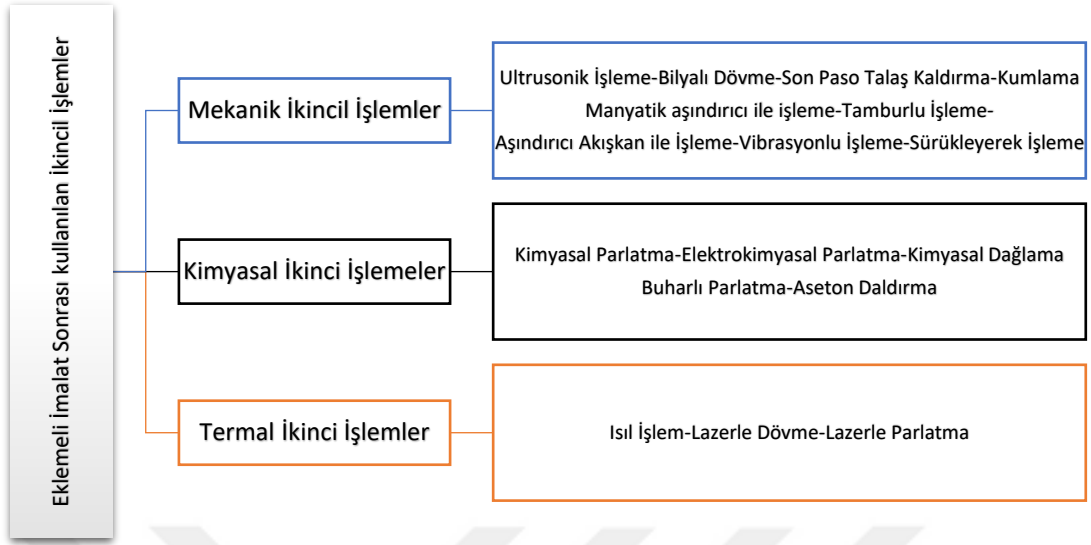
Inconel 718'in tarihsel gelişimi ve çeşitli uygulamaları, gelişen teknolojiye önemli rolünün altını çizmektedir. Havacılık ve gaz türbini endüstrilerinin zorluklarına bir çözüm olarak başlangıcından modern üretimdeki rolüne kadar, Inconel 718 yüksek performanslı uygulamalarda temel bir malzeme olmaya devam etmektedir (Sanusi vd, 2016).

### **2.3. Inconel 718'in Isıl İşlemi**

Olağanüstü mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı direnci ile tanınan nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718, performansını daha da artırmak için bir ısıtma işlem sürecinden geçmelidir. Bu işlemin merkezinde, alaşımın matrisi içinde çökeltilerin kontrollü oluşumunu içeren çok önemli bir adım olan çökeltilme sertleştirme mekanizması yatmaktadır. Alt başlıklarda Inconel 718'in ısıtma işleminde kullanılan sertleştirme proses detayları incelenmiştir.

#### **2.3.1. Eklemeli imalat üretimi sonrası kullanılan ikincil işlemler**

Şekil 2.9 listesinde verilen çeşitli ikincil işlem teknikleri, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerini artırmasında kullanılan yöntemler olarak listelenmektedir. Belirli bir tekniğin seçimi malzemeye, baskı teknolojisine ve son parçanın istenen özelliklerine bağlıdır. Eklemeli imalat üretim yönteminde üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerinin artırmasında kullanılan ikincil işlem teknikleri bu şekilde listelenebilir:



Şekil 2.9. eklemeli imalat üretim yönteminde üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerinin artırmasında kullanılan ikincil işlem teknikleri (Sunay, 2022)

Bu ikincil teknikler, katmanlı olarak üretilen bileşenlerin genel performansının, dayanıklılığının ve işlevselliğinin geliştirilmesine katkıda bulunarak onları geniş bir uygulama yelpazesi için daha uygun hale getirir.

### 2.3.2. Solüsyon sertleştirme

Inconel 718, olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımı, sürünme direnci ve korozyon dayanıklılığı nedeniyle zorlu uygulamalarda yaygın olarak kullanılan nikel bazlı bir süper alaşımdır (Shahwaz vd., 2000). Mekanik özelliklerinin optimize edilmesi genellikle bu malzemenin işlenmesinde ve imalatında çok önemli bir adım olan solüsyona alma ısı işlemine bağlıdır. Bu tez çalışması, bu ısıl işlemin Inconel 718'in mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir.

Solüsyon sertleştirme, malzemeyi solvus sıcaklığı olarak bilinen belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtarak mikro yapıda bulunan çökeltileri ve intermetalik fazları çözmeyi amaçlamaktadır. Inconel 718 için hedeflenen birincil fazlar, mukavemeti, sünekliği ve tane boyutunu etkileyen gamma prime ( $\gamma'$ ) ve Laves fazlarıdır (Sui vd., 2019).

Her biri nihai mikro yapıyı ve özellikleri etkileyen çeşitli solüsyon sertleştirme parametreleri mevcuttur:

Sıcaklık: Inconel 718 için tipik solüsyon sertleştirme sıcaklıkları 980°C ile 1150°C arasında değişir; daha yüksek sıcaklıklar daha tam çözünmeyi teşvik eder ancak tane boyutunu artırmaktadır (Tucho vd., 2019).

Tutma süresi: solüsyon sertleştirme sıcaklığındaki süre, tipik olarak 30 dakika ila 2 saat arasında değişen bu süre elementlerin yeterli difüzyonuna izin verir (Tucho vd., 2019).

Soğutma hızı: çoğunlukla su veya hava söndürmeyi kullanan hızlı soğutma, soğutma sırasında çökmeyi en aza indirerek aşırı doymuş bir katı çözelti durumunu teşvik eder (Tucho vd., 2017).

Solüsyon sertleştirme, çözülmüş çökeltilerle tek fazlı, östenitik bir matrise yol açar. Daha yüksek sıcaklıklar ve daha uzun bekleme süreleri nedeniyle tane boyutu artabilir. Ayrıca solüsyon sertleştirme tipik olarak sünekliği, şekillendirilebilirliği ve kaynaklanabilirliği geliştirirken, güçlendirme çökeltilerinin eksikliğinden dolayı mukavemeti ve sertliği azaltır. İstenilen özelliklerin dengelenmesi, solüsyon sertleştirme parametrelerinin uyarlanması gerektirir. Örneğin, mukavemetin maksimuma çıkarılması, daha fazla çökelti çözünmesi için daha yüksek bir solüsyon sertleştirme sıcaklığı ve ardından çökelti sertleşmesini tetiklemek için yaşlandırma içerebilir.

Ayrıca bu prosesin zorluklarını değerlendirmek istersek, kalın kesitler boyunca tekdüze solüsyon sertleştirme sağlanması dikkatli proses kontrolü gerektirir. Optimize edilmiş termal döngüler ve alaşım ilaveleri yoluyla tane boyutunun kontrol edilmesi bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir. Eklemeli olarak üretilen Inconel 718 için solüsyon sertleştirme uyarlanması, farklı mikro yapısı ve hızlı katılaşma özellikleri nedeniyle benzersiz zorluklar ortaya çıkarır (Hosseini vd., 2019).

### 2.3.3. Yaşlandırma ve çökelme sertleştirme

Solüsyona alma ısı işleminin ardından yaşlandırma, östenitik matris içinde stratejik olarak kontrol edilen çökelmeyi yeniden sağlar. Hassas bir şekilde düzenlenmiş bu  $\gamma'$   $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$  ve  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  intermetalik fazlar, güçlü iç engelleyici görevi görür, dislokasyon hareketini etkili bir şekilde engeller ve sertliği ve sürünme direncini önemli ölçüde artırır (He vd., 2022).

621°C ila 982°C arasında değişen çökelme sıcaklığı, orkestra şefinin sopası gibi davranarak çökelti boyutunu ve yoğunluğunu belirler. Daha yüksek sıcaklıklar daha büyük çökeltilerin oluşmasını teşvik eder, malzeme yapısını güçlendirir ancak sünekliği potansiyel olarak yumuşatır (Ghosh vd., 2015).

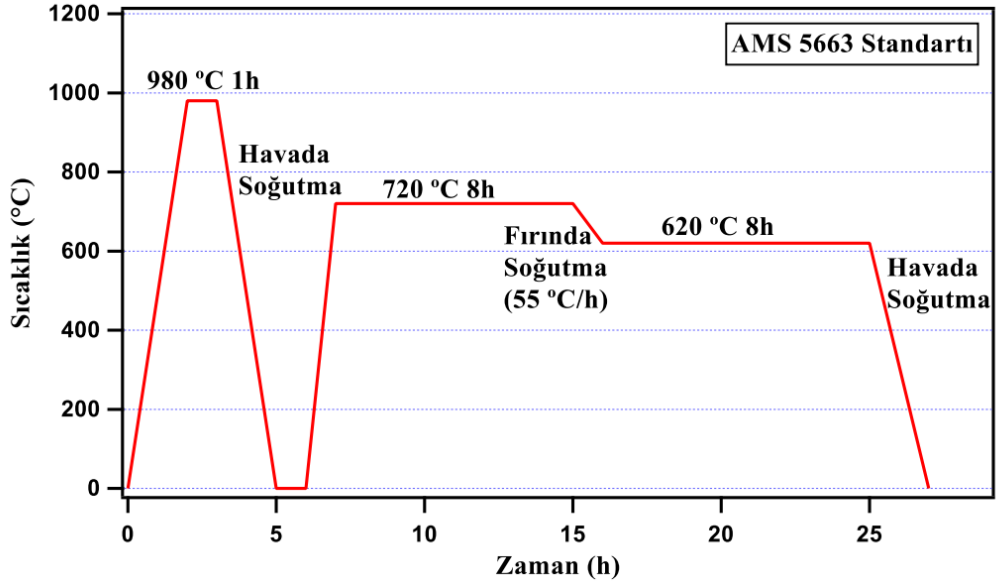
Seçilen sıcaklıkta harcanan zaman, bu iç barikatların yayılmasını ve büyümesini yönetir, daha uzun süreler, daha iri çökelti oluşumunu sağlar ve sertliğin daha da artırılmasını sebebiyet verir (Li vd., 2018).

Soğuma hızı mikro yapının nihai karakterini şekillendirir. Kontrollü soğutma, sağlam çökelti oluşmasını teşvik eder ve maksimum dayanımla sonuçlanır; hızlı söndürme (hava/su ile) ise daha ince çökelti teşvik ederek potansiyel olarak sünekliği ve yorulma direncini artırır (Huang vd., 2020).

Yaşlandırma, stratejik olarak yerleştirilmiş  $\gamma'$  ve  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  çökeltilerini, bunların boyutları, morfolojileri ve spesifik yaşlandırma tarifi tarafından belirlenen olguları yaratır. Yaşlanma, çökelti sertleşmesinin güçlü mekanizması yoluyla mukavemeti, sertliği ve sürünme direncini önemli ölçüde artıran yüksek oranda performans artışına neden olur. Bununla birlikte, çökeltilerin daha kaba veya daha yüksek hacimli fraksiyonları, sünekliğin ve dayanıklılığın azalmasına neden olabilir (You vd., 2017).

İstenilen mekanik çıktıyı elde etmek için çökelme parametrelerini uyarlamak, derinlemesine bilgi ve titiz kontrol gerektiren bir sanattır. Örneğin, mukavemeti en üst düzeye çıkarmak, sağlam çökelti için yüksek sıcaklıkta bir yaşlandırma işlemini ve ardından daha iyi süneklik için daha ince, daha eşit şekilde dağıtılmış çökelti optimize

etmek için düşük sıcaklıkta bir işlemi içerebilir. Şekil 2.10'da AMS 5663 standardı olarak bilinen Inconel 718 için uyarlanmış bir ısıtma işlem prosesi sıcaklık ve süre parametre değerleri paylaşılmıştır.



Şekil 2.10. Sektörde AMS 5663 ticari adı ile bilinen bir ısıtma işlem prosedürü (Sunay vd. 2023).

Çökelti boyutunun, morfolojisinin ve dağılımının hassas kontrolü, karmaşık difüzyon kinetiği ve karmaşık elementel etkileşimlerin daha derinlemesine anlaşılmasını gerektiren bir zorluk olmaya devam etmektedir. Çeşitli sıcaklıklar ve sürelerle çok adımlı yaşlandırma stratejilerini keşfetmek, spesifik çökelti popülasyonlarının mühendisliği ve ulaşılabilir özelliklerin spektrumunun genişletilmesi için ilgi çekici yollar sunar.

Metalurjik araştırmalardaki son gelişmeler, Inconel 718 için çökeltme sertleştirme sürecini rafine etmeye ve optimize etmeye odaklanmaktadır. Kontrollü atmosfer işlemleri ve yeni soğutma stratejileri gibi ısıtma işlem tekniklerindeki yenilikler, mikro yapıyı daha da iyileştirmeyi ve sonuç olarak mekanik özellikleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ek olarak, hesaplamalı modelleme ve simülasyon araçları, farklı ısıtma işlem senaryolarına dayalı olarak mikro yapıların evrimini tahmin etmede ayrılmaz hale gelmektedir. Bu yaklaşım, özel ısıtma işlem protokollerinin geliştirilmesini hızlandırarak kapsamlı deneysel denemelere olan ihtiyacı azaltır (Furrer vd., 2014).

#### 2.3.4. Isıl işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi

Inconel 718'in ısıtıl işlemi, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde derin bir etkiye sahiptir ve alaşımların belirli yüksek performanslı uygulamalar için uyarlanmasıyla çok önemli bir rol oynar. Bu bölüm, ısıtıl işlem sırasında meydana gelen karmaşık değişiklikleri araştırmakta ve bu dönüşümlerin alaşımların mikroyapısını ve mekanik davranışını nasıl etkilediğini vurgulamaktadır.

Inconel 718'in ısıtıl işlem süreci tipik olarak, alaşımlar içindeki çökeltileri çözmek üzere tasarlanmış bir aşama olan çözelti tavlama ile başlar. Bu aşamada, alaşımlar yüksek sıcaklıklara ısıtılır ve nikel matrisinin homojen bir katı çözeltiye ulaşması sağlanır. Çözelti tavlama, sonraki çökeltilme sertleştirme işlemi için alaşımları hazırlayarak mikro yapıyı sıfırlayan kritik bir adımdır.

Solüsyon tavlama sonrası kontrollü soğutma ile çöktürme sertleştirme işlemi başlatılır. Bu faz, nikel matrisi içinde  $Ni_3Nb$ 'den oluşan tutarlı bir çökelti olan Gama asal ( $\gamma'$ ) fazının oluşumunu içerir. Gama asal fazı, alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir güçlendirici madde görevi görür.

Çökeltilme sertleşmesinin Inconel 718'in mikroyapısı üzerindeki etkisi elektron mikroskobu ile görülebilir, bu da Gama asal çökeltilerinin dağılımını ve morfolojisini ortaya koymaktadır. Bu çökeltilerin tutarlı doğası, kristal kafeste bozulmalara neden olmadan etkili güçlendirme sağladığı için çok önemlidir. Bu kontrollü mikroyapısal evrim, alaşımların yüksek sıcaklıklarda genel stabilitesini ve performansını artırır (Cao vd, 2018).

Isıl işlemin Inconel 718 üzerindeki en belirgin etkisi, mukavemetinin ve sertliğinin artırılmasıdır. Tutarlı Gama çökeltiler, kristal kafes içindeki dislokasyon hareketine engeller olarak hareket eder. Bu engel, alaşımları önemli ölçüde güçlendirerek deformasyonu önler ve plastik akışına karşı direncini artırır. Çökeltilme sertleşmesi sırasında Gama asal fazının kontrollü oluşumu, havacılık ve gaz türbini uygulamalarında bileşenler için kritik bir gereklilik olan alaşımların yüksek gerilme mukavemetine katkıda bulunur.

Inconel 718 genellikle deformasyonunun endişe verici olduğu yüksek sıcaklık ortamlarına maruz kalır. Sürünme direnci, bir malzemenin yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldığında deformasyona dayanma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Isıl işlem sırasında kullanılan çökeltme sertleştirme mekanizmaları, alaşımın sürünme deformasyonuna karşı direncini etkili bir şekilde geliştirir. Alaşım, zorlu termal koşullarda uzun süreler boyunca yapısal bütünlüğünü koruyabilir hale gelir (Wang vd, 2022).

Isıl işlemin getirdiği kontrollü mikroyapısal değişiklikler de Inconel 718’de yorulma direncinin artmasına katkıda bulunur. Döner türbin kanatları gibi dinamik koşullarda çalışan bileşenler, alaşımın yorulma arızasına uğramadan döngüsel yüke dayanma yeteneğinden yararlanır. Bu özellik, havacılık ve diğer yüksek performanslı uygulamalarda kritik bileşenlerin uzun vadeli güvenilirliğini sağlamak için hayati önem taşımaktadır.

Teknoloji ve malzeme bilimi ilerlemeye devam ettikçe, devam eden araştırmalar Inconel 718’in ısııl işlem sürecini daha da optimize etmeyi amaçlamaktadır. Araştırmacılar, mikroyapı ve mekanik özelliklere ince ayar yapmak için yeni ısııl işlem tekniklerini, alaşım modifikasyonlarını ve hesaplamalı modellemeyi araştırıyor. Amaç, alaşımın performansının sınırlarını zorlamak, onu daha da esnek, dayanıklı ve gelişen endüstriyel ihtiyaçlar için uygun hale getirmektir (Volpato vd., 2022)

### **2.3.5. Sıcaklık ve zaman profillerinin ısııl işlem üzerindeki etkisi**

Isıl işlem sırasında sıcaklık profilinin kontrol edilmesi, Inconel 718’deki faz dönüşümlerini önemli ölçüde etkileyen incelikli bir işlemdir. Hassas sıcaklık kontrolü,  $\gamma$  ve  $\gamma'$  fazları arasında istenen dengeyi sağlamak için gereklidir. Tutarlı  $\gamma'$  çökeltilerinin oluşumu, üstün mekanik özellikler sağlayarak belirli sıcaklık aralıklarında optimize edilir. Sıcaklık profillerinin inceliklerini anlamak, ısııl işlem sürecinin alaşımın performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde uyarlanmasını sağlar (McClouth vd., 2020).

Yaşlanma sürecinin süresi, Inconel 718’deki çökeltme kinetiğini derinden etkiler. Optimum sertliğe ulaşma ihtiyacını aşırı yaşlanma riskini en aza indirgemekle dengelemek kritik bir husustur. Yaşlanma sürelerinin uzaması, çökeltilerin kabalaşmasına ve mekanik

özelliklerin azalmasına neden olabilir. Zaman profillerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi, Inconel 718’de istenen mikroyapının ve mekanik performansın elde edilmesini sağlar (Li vd., 2018).

Seçici Lazer Ergitme sonrası Inconel 718 için ısıtım işlem prosedürleri, söndürme ve yaşlandırma tekniklerinin hassas bir dengesinin yanı sıra sıcaklık ve zaman profillerinin titiz bir şekilde kontrol edilmesini içerir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, mikroyapı ve mekanik özelliklerin uyarlanması için çok önemlidir ve Inconel 718’in yüksek performanslı uygulamalar için tam potansiyeline ulaşmasını sağlar (Li vd., 2018).

## **2.4. Metallerin ve Alaşımların Aşınma Davranışı**

Sürtünme veya sürtünme anlamına gelen Yunanca "tribos" kelimesinden türetilen triboloji, yüzeylerin göreceli hareketteki etkileşimini inceleyen multidisipliner bir alandır. Mekanik etkileşimlere maruz kalan malzemelerin tasarımında ve performansında önemli bir rol oynayan sürtünme, aşınma ve yağlama bilimini ve teknolojisini kapsar. Tribolojik etkileşimler, her biri malzeme bozulmasını farklı şekilde etkileyen çeşitli aşınma mekanizmalarına yol açar (Holmberg ve Erdemir, 2017).

### **2.4.1. Başlıca aşınma türleri**

Aşınma, malzeme yüzeyinin zamanla deformasyon, kayıp veya zarar görmesi sürecidir ve bu süreç, genellikle çeşitli mekanizmalarla gerçekleşir. Malzeme yüzeyine etki eden dış etkenlerin ve ortam koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkan aşınma, malzeme performansını ve dayanıklılığını etkileyebilir, bu nedenle mühendislik uygulamalarında ve tasarımlarında önemli bir faktördür. Aşınma genellikle farklı türlerde gerçekleşir ve bu türler, aşınma mekanizmalarına ve ortam koşullarına bağlı olarak değişir (Erdem, 2024).

Abrasyon aşınması, malzeme yüzeyinin yabancı partiküller veya diğer malzemelerle teması sonucu meydana gelir ve genellikle sürtünme veya çiziklenme gibi mekanizmalarla ortaya çıkabilir. Adhezyon aşınması ise iki yüzeyin birbirine temas etmesi ve malzeme transferi sonucu oluşur; bu tür aşınma genellikle metal-metal, metal-polimer gibi farklı

malzemeler arasındaki sürtünme ve yapışma nedeniyle gerçekleşebilir. Yorulma aşınması da önemli bir aşınma türüdür; bu, malzeme yüzeyindeki tekrarlayan yüklemelerin neden olduğu mikro çatlakların genişlemesi sonucu meydana gelir. Özellikle döner parçalarda ve rulmanlarda görülen bu tür aşınma, malzemenin mekanik dayanıklılığını ciddi şekilde etkileyebilir (Smith ve Brown, 2019).

Aşınma türleri arasında kavitasyon aşınması da bulunur; bu, sıvı içindeki hava kabarcıklarının malzeme yüzeyine etkimesi sonucu ortaya çıkar ve genellikle pompa ve pervane gibi hidrolik uygulamalarda görülür. Kimyasal aşınma (korozyon aşınması) ise kimyasal etkileşimlerin malzeme yüzeyine zarar vermesiyle gerçekleşir ve özellikle metal malzemelerde sıvılar veya gazlar ile temas etme durumunda görülebilir. Erozyon aşınması ise hava, su veya sıvı akışkanların neden olduğu parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması sonucu meydana gelir. Her bir aşınma türü, malzemenin özelliklerine, uygulama koşullarına ve kullanım şartlarına bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabilir ve mühendislik açısından önemli bir değerlendirme gerektirir (Johnson ve Smith, 2022).

#### **2.4.2. Aşınma direncini etkileyen faktörler**

İçsel malzeme özellikleri aşınma direncini doğrudan etkiler. Sertlik, tokluk ve mukavemet, malzemelerin tribolojik streslere nasıl tepki verdiğini etkileyen kritik faktörlerdir. Sert malzemeler genellikle abrasif aşınmaya karşı daha dayanıklıdır, tokluk ise darbeye dayanmak ve çatlağın yayılmasını önlemek için çok önemlidir.

Tane boyutu ve faz bileşimi de dahil olmak üzere metallerin ve alaşımların mikro yapısı, aşınma davranışını önemli ölçüde etkiler. İnce taneli yapılar, gelişmiş sertlik ve mukavemet nedeniyle genellikle gelişmiş aşınma direnci sergiler. Çökeltiler veya alaşım elementleri gibi spesifik fazların varlığı, aşınmayı azaltan koruyucu yüzey katmanlarının oluşumuna katkıda bulunabilir.

Isıl işlem, kaplama veya yüzey mühendisliği gibi yüzey işlemleri, aşınma direncini arttırmak için kullanılmaktadır. Isıl işlemler, aşınma direnci için malzeme özelliklerini

optimize ederek mikro yapıyı değiştirebilir. Nitrürleme veya sert krom kaplama gibi kaplamalar, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan koruyucu bir tabaka sağlar.

Çevresel ve operasyonel koşullar aşınma davranışında çok önemli bir rol oynamaktadır. Sıcaklık, nem ve kirleticilerin varlığı gibi faktörler aşınma mekanizmalarını etkileyebilir. Yüksek sıcaklıktaki ortamlar oksidasyonu ve termal aşınmayı teşvik edebilirken, aşındırıcı kirleticiler aşındırıcı aşınmayı hızlandırabilir.

Uygulanan yüklerin büyüklüğü ve temas yüzeylerinin geometrisi aşınma davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Daha yüksek yükler, temas gerilmelerinin artmasına ve aşınmaya neden olabilir. Kayma veya yuvarlanma teması da dahil olmak üzere temas geometrisi, kuvvetlerin ve aşınma desenlerinin dağılımını etkiler. Yük dağılımını ve yüzey temasını optimize etmek aşınma direncini artırabilir.

Katı, sıvı veya gaz yağlayıcılar aracılığıyla yağlamanın etkinliği, aşınma direncini etkiler. Uygun yağlama sürtünmeyi azaltır ve aşınmayı en aza indirerek doğrudan metal - metal temasını önler. Yağlama rejiminin seçimi, hız, sıcaklık ve yük gibi faktörleri göz önünde bulundurarak özel uygulamaya bağlıdır (Liu vd., 2020).

Metallerin ve alaşımların aşınma davranışı, tribolojik kavramların ve sayısız etkileyen faktörün karmaşık bir etkileşimidir. Bu kavramların ve faktörlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, sürtünme, aşınma ve kayar temasın yarattığı zorluklara dayanabilecek malzemelerin tasarlanması için çok önemlidir. Mühendisler, malzeme özelliklerini, mikro yapıyı, yüzey işlemlerini, çalışma koşullarını ve yağlamayı göz önünde bulundurarak, malzemeleri çeşitli uygulamalarda optimum aşınma direnci gösterecek şekilde uyarlayabilirler.

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 3.1. Mevcut Araştırmanın Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölüm, tez konusuna ilişkin mevcut araştırmaların karşılaştırmalı bir incelemesini sunmakta, çeşitli yöntemlere, ana temalara ve bu alandaki gelişen trendlere vurgu yapmaktadır.

Tucho vd. (2017), tarafından yapılan çalışmada, seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak üretilen Inconel 718'in solüsyon ısıtıl işleminden önce ve sonra mikroyapısal ve sertlik özelliklerini araştırılmaktadır. Araştırma, geleneksel olarak üretilen malzemeye kıyasla SLE ile üretilen Inconel 718'in farklı mikro yapısına vurgu yapmaktadır. SLE'nin doğasında bulunan hızlı katılaşma süreci, iyi tanımlanmış sütunlu/hücreli alt tanelere sahip ve ayrıca sütunlu olmayan taneler gibi benzersiz özelliklere yol açar. Çalışma, geleneksel Inconel 718 için kullanılan standart ısıtıl işlem sıcaklıklarının ( $<1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), SLE ile üretilen malzemedeki Laves ve diğer mikro ayrılmış fazları çözmek için yetersiz olduğunu vurgulamaktadır. Sonuç olarak, araştırmacılar farklı süreler için  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de çözelti ısıtıl işlemlerini araştırmışlardır.

Seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak üretilen Inconel 718 ile ilgili çalışmanın temel bulguları, solüsyon ısıtıl işlemlerinin neden olduğu farklı mikroyapısal özellikler ve sertlik değişimleri etrafında toplanmıştır. SLE ile üretilmiş Inconel 718, yüksek yoğunluklu ve tane sınırları boyunca ayrılmış parçacıklar ile karakterize edilen, sütunlu olmayan taneler ve iyi tanımlanmış sütunlu/hücreli alt tanelerden oluşan bir mikro yapı sergiler. Geleneksel olarak üretilen Inconel 718 için kullanılan standart ısıtıl işlem sıcaklıkları ( $<1100^{\circ}\text{C}$ ), SLE ile üretilen malzemedeki mikro ayrıştırılmış fazların çözünmesi için yetersizdir. Çalışma,  $1100^{\circ}\text{C}$  ve  $1250^{\circ}\text{C}$ 'de solüsyon ısıtıl işlemlerinin mikroyapıyı önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir.  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, bazı sütunlu/hücreli yapılar kalırken, uzun süreli ısıtıl işlem yeniden kristalleşmeyi ve tane büyümesini teşvik eder.  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, yeniden kristalleşme tamamlanır, bu da daha iri taneler ve Laves fazlarının etkili bir şekilde çözünmesi ile sonuçlanır. Vickers sertlik testleri sonucunda, ısıtıl işlem görmemiş numuneler güçlendirme fazlarının ( $\gamma'$  ve  $\gamma''$ ) çözünmesine ve ısıtıl işlem sırasında iç gerilmelerin giderilmesine

atfedilen ısıt işlem görmüş numunelere kıyasla daha yüksek sertliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalar için SLE ile üretilmiş Inconel 718'in mekanik özelliklerini geliştirmek için optimize edilmiş ısıt işlem stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çalışmada numuneler ait ölçülmüş Vickers sertlik değerleri alt tablo olarak sunulmuştur:

| Isıt İşlem T(°C)/Süre      | HV Yük (kg) | Sertlik (HV) |
|----------------------------|-------------|--------------|
| <b>Isıt işlem görmemiş</b> | 10          | 304 ± 9      |
| <b>1100 °C/1 h</b>         | 10          | 258 ± 8      |
| <b>1100 °C/7 h</b>         | 5           | 217 ± 4      |
| <b>1250 °C/1 h</b>         | 5           | 210 ± 7      |
| <b>1250 °C/7 h</b>         | 5           | 207 ± 7      |

Liu vd. (2019) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak üretilen ve çeşitli ısıt işlemlere tabi tutulan Inconel 718 alaşımlarının mikro yapısını, sertliğini ve faz dönüşümünü araştırmaktadır. Araştırma üç ısıt işlem sürecini incelemektedir: doğrudan çift yaşlandırma, 950 °C solüsyon ısıt işlemi artı çift yaşlandırma ve 1050 °C solüsyon ısıt işlemi artı çift yaşlandırma. Amaç, farklı ısıt işlemlerin alaşımın mikroyapısal evrimini ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini anlamaktır.

Mikroyapısal değişiklikler açısından alınan Inconel 718 alaşımları, kolonsal kristaller ve ince dendritler ile homojen olmayan bir yapı sergiler. Isıt işlem, mikroyapıda önemli değişikliklere yol açar. Doğrudan çift yaşlandırma, mevcut yapıyı değiştirerek yapıyı dökme kristaller gibi bir yapıya dönüştürür. Daha yüksek sıcaklıkta solüsyon ısıt işlemi kolon kristallerini ve dendritleri azaltarak mikro yapıyı daha da rafine eder.

Çökelti oluşumu ve faz dönüşümü bakımından çalışma, farklı ısıt işlemler altında oluşan çeşitli fazları ve çökeltileri tanımlamaktadır. Doğrudan çift yaşlandırma, taneler içinde iğne benzeri  $\gamma'$  fazının ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$ ) çökmesini teşvik eder, mukavemeti ve termal stabiliteyi artırır. Daha yüksek sıcaklık işlemleri, intermetalik bileşiklerin çözünmesine ve tane sınırlarında  $\delta$  fazının ( $\text{NbNi}_3$ ) oluşumuna yol açar, bu da tane sayısı artırımına yardımcı olur.

Çalışma sonucu sertlik değişimleri analizi ile alaşımların yüzey sertliği ısıtılma işlemi prosesine göre değişmektedir. Doğrudan çift yaşlandırma, en yüksek sertlik (490 -540 HV), ardından 950 °C solüsyon ısıtılma işlemi (476 -500 HV) ile sonuçlanır. 1050°C'lik işlem, tane arıtımına rağmen sertliği 400-450 HV yakın seviyelere düşürür. Sertlikteki azalma, güçlendirme fazlarının çözünmesine ve Nb gibi elementlerin yeniden dağılımına atfedilir.

Popovich vd. (2017), Inconel 718'in, özel mikro yapılarla seçici lazer ergitme (SLE) yöntemini kullanılarak işlenen numunelerde mekanik ve mikroyapısal davranışını araştırmışlardır. Çalışma, işlem parametrelerini ve homojenizasyon, yaşlandırma ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi işlem sonrası ısıtılma işlemleri uygulayarak Inconel 718'in mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamıştır.

İşlenen numuneler, Laves fazları ve karbür parçacıkları ile yönlü bir sütunlu tane mikroyapısı sergilemiştir. Farklı lazer gücü (250 W ve 950 W) ve tarama stratejileri ile özel mikro yapılar elde edilmiş ve bu da belirgin ince ve kaba tane bölgelerine yol açmıştır. Isıl işlem, amaçlanan tane morfolojisini ve dokusunu koruyarak yeniden kristalleşmeye yol açmamıştır. Isıl işlem, istenmeyen Laves ve  $\delta$  - fazlarını ve kapalı gözenekleri etkili bir şekilde çözerek mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmiştir. Isıl işlem (HIP + H/T), artan karbür boyutu ve yoğunluğu ve  $\delta$  - faz nedeniyle akma mukavemetinde ve sertlikte önemli artışlara neden olmuştur.

SLE ile üretilen Inconel 718, döküm Inconel 718'ye kıyasla üstün mekanik özellikler göstermiş, ancak çekme dışında dövme Inconel 718'ye göre genelde daha düşük performans sergilemiştir. Çekme, SLM örneklerinde daha iyi olmuştur. Özelleştirilmiş mikroyapı, belirli performans özellikleri gerektiren uygulamalar için faydalı olan yerel mekanik özellik farklılıklarına imkân sağlamıştır. 650°C'de yapılan yüksek sıcaklık çekme testleri, HIP + H/T örneklerinin hem dövme hem de döküm Inconel 718'ye kıyasla daha üstün süneklik sergilediğini ortaya koymuştur.

Isıl işlem görmüş numunelerin kırılma yüzeyleri, özellikle Nb ile zenginleştirilmiş alanlarda gevrek kırılma belirtileri göstermiştir, bu da çözülmemiş Laves fazlarını çatlak başlangıç noktaları olarak göstermektedir. HIP + H/T numuneleri, yüksek mukavemetleri ile

ilişkili olarak ince gözenekli kırılma yüzeyleri sergilemiştir, ancak malzemede bulunan oksit fazları sünekliği azaltmıştır.

Çalışma, uygun ısıl işlemlerle birleştirilen seçici lazer ergitmenin, mekanik özellikler açısından geleneksel olarak işlenmiş malzemelerden daha iyi performans gösteren özel mikro yapılara sahip Inconel 718 üretmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, yüksek sıcaklık uygulamaları için karmaşık bileşenlerin üretilmesinde potansiyelini ortaya koymaktadır, ancak proses parametrelerini optimize etmek ve mikroyapısal tasarımın faydalarını tam olarak keşfetmek için daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

Bir diğer çalışmada Chlebus vd. (2015), ısıl işlemin seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak üretilen Inconel 718'in mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma, malzeme özelliklerinin ve işleme koşullarının metalurjik mekanizmaları ve ortaya çıkan özellikleri nasıl etkilediğini açıklığa kavuşturmayı ve alaşım elementlerinin mikro ayrışmasına ve artık gerilmelere odaklanarak, ısıl işlem sonrası parametreleri hızlı katılaşmış mikro yapıya uyarlamayı amaçlamıştır.

Isıl işlem görmemiş Inconel 718 örnekleri, Nb ve Mo'nun iç mikro-segregasyonu ile kolonlu bir tane yapısı sergilemiş ve bu da interdendritik bölgelerde Laves ötektik veya onun ayrışmış formunun oluşumuna neden olmuştur. Bu heterojen mikro yapı, doğrudan işlem sonrası yaşlandırma için uygun değildir ve alaşımı homojenleştirme sıcaklıklarına hızlı ısıtma sırasında sıvılaşmasına duyarlı hale getirir. Araştırma sonucu olarak alaşımı homojenleştirmek ve mekanik özelliklerini geliştirmek için solüsyona alma ve yaşlandırma dahil olmak üzere ısıl işlem gerekli görülmüştür. Mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için farklı solüsyona alma ısıl işlem sıcaklıkları (980 °C, 1040 °C ve 1100 °C) ve ardından yaşlandırma kullanılmıştır.

Çalışma, 1 saat boyunca 1100 °C'de solüsyona alma ve ardından yaşlanmanın, homojenize mikroyapı ve mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonu ile sonuçlandığını ve akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlikte nihai duruma göre önemli artışlar olduğunu bulmuştur. Tane sınırları, ısıl işlem sırasında tane büyümesini engelleyen MC karbürleri ile süslenmiştir. Isıl işleme rağmen, mekanik özelliklerde bazı zayıf anizotropi devam etmiş olup, bu da nihai durumdan kolonsal tane yapısına atfedilmiştir.

Huang vd. (2019), seçici lazer ergitme (SLE) ile üretilen Inconel 718'in mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine çeşitli ısıtım işlem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, SLE işlemine özgü hızlı katılma ve yüksek sıcaklık gradyanları nedeniyle döküm ve dövme formlardan önemli ölçüde farklı olan SLE ile üretilmiş Inconel 718'in benzersiz mikro yapısı için uyarlanmış optimal bir ısıtım işlem rejimi geliştirmeyi amaçlamıştır.

SLE ile üretilmiş Inconel 718, döküm ve dövme malzemelerden farklı olarak, alt tanecik sınırlarında çökelen Laves fazı ile ince hücresel dendritler sergilemiştir. Çalışma, sıcaklık ve süre dahil olmak üzere çözelti işleme parametrelerinin, Laves fazının çözülmesinde ve mikro segregasyonun azaltılmasında kritik rol oynadığını bulmuştur. Önemli bir bulgu, minimum solüsyona alma süresi ile solüsyona alma sıcaklığı arasındaki ilişki olmuş ve ısıtım işlem parametrelerinin seçilmesi için bir temel sağlamıştır. Solüsyona alma işlemi sırasında soğutma hızının azaltılması, güçlendirme fazları  $\gamma'$  ve  $\gamma''$  nın çökmesini kolaylaştırmıştır.

Araştırma,  $\gamma'$  ve  $\gamma''$  çökme sıcaklıklarının hem SLE'de hem de dövülmüş Inconel 718 için benzer olduğunu, ancak SLE örneklerinin daha hızlı bir yaşlanma tepkisi gösterdiğini ortaya koymuştur. En yüksek uzama (%39,1), daha sonra yaşlandırma olmadan su söndürme ile solüsyona alma işleminden sonra elde edilirken, en yüksek akma ve çekme mukavemetleri (sırasıyla 1374 MPa ve 1545 MPa) doğrudan yaşlandırma işleminden sonra elde edilmiştir. Mekanik özellikler, çözelti işleminin soğutma hızı ve yaşlanma süresi ile kontrol edilebilen güçlendirme fazlarının miktarını ayarlayarak uyarlanabilir.

Çalışma, solüsyona alma sıcaklıklarının (980 °C ila 1280 °C arasında değişen) ve sürelerin mikroyapısal evrimi ve mekanik performansı nasıl etkilediğini sistematik olarak değerlendirmiştir. Yeniden kristalleşmenin daha yüksek çözelti sıcaklıklarında meydana geldiği ve işlenmiş Inconel 718'e benzer daha iri, eşit eksenli tanelere yol açtığı bulunmuştur. Solüsyon sertleştirme 1080°C'de 1 saat optimal, dengeleyici mikroyapısal homojenlik ve mekanik dayanım olarak belirlenmiştir.

Özetle, Huang ve arkadaşları SLE’de Inconel 718’in mekanik özelliklerinin uygun ısıt işlemlerle etkili bir şekilde ayarlanabileceğini ve belirli uygulamalar için dövme malzemelerin performansının eşleştirilmesini veya aşılmasını mümkün kıldığını göstermiştir.

Mohanty vd. (2023), tarafından yürütölen çalışmada, farklı ısıt işlemlerin seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak üretilen Inconel 718 alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Araştırma üç farklı ısıt işlem sürecine odaklanmaktadır: standart ısıt işlem, homojenizasyon ve yaşlandırma. Amaç, hazırlanan SLE numunelerinin mikroyapı, sertlik ve basınç dayanımını bu ısıt işlemlere tabi tutulanlarla karşılaştırmaktır.

Seçici lazer ergitme (SLE) kullanılarak imal edilen Inconel 718 alaşımları üzerine yapılan çalışmanın temel bulguları, standart ısıt işlem, homojenizasyon ve yaşlanma dahil olmak üzere farklı ısıt işlemlerden kaynaklanan önemli mikroyapısal dönüşümleri ve mekanik özellik varyasyonlarını ortaya koymaktadır. Hazırlanan numuneleri ısıt işlemin ardından önemli ölçüde tipik kolonsal ve dendritik yapılar sergiler. Standart ısıt işlem, mikron altı tanelerde sonuç verir, homojenizasyon 30  $\mu\text{m}$ 'ye kadar tane büyümesine yol açar ve yaşlanma,  $\gamma'$  ve  $\gamma''$  fazlarının ince çökeltileri ile daha ince taneler üretir. X - ışını kırınım analizi, ısıt işlem görmemiş numunelerin öncelikle  $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$  fazını içerdiğini, ısıt işlem görmüş numunelerin ise  $\text{CrNb}$ ,  $\text{Ni}_3\text{AlC}$ ,  $\text{AlCr}$  ve  $\text{NiTi}$  gibi ek çökeltiler geliştirdiğini göstermektedir. Isıt işlem görmüş tüm numunelerin sertliği, ısıt işlem görmemiş duruma göre azalır ve en yüksek sertlik (549 HV) ısıt işlem görmemiş numunelerde gözlenir. Buna karşılık, basınç dayanımı, kütle deformasyonunu etkileyen ancak mikro sertlik testlerinde tespit edilmeyen nano ölçekli çökeltilerin oluşumuna ve dağılımına atfedilen standart ısıt işleme tabi tutulan numunelerde en yüksektir.

Çalışma, ısıt işlemlerin SLE ile üretilen Inconel 718'in sertliğini azaltırken, güçlendirme çökeltilerinin oluşumu ve dağılımı nedeniyle basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmıştır.

## 4. MATEYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Deneyisel Çalışma ve Düzenek Şeması

Bu çalışmada İnconel 718 malzemesi ve SLE yöntemi ile üretilmiş numunelerin ısıtma işlem sonrası aşınma davranışı incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında alt özet başlıktaki süreçler yürütülmüştür:

- Çalışma kapsamında 2 grup olacak şekilde 4'er adet 10x8x8mm<sup>3</sup> ölçülerinde numuneler kullanılmıştır.
- Birinci grup sertlik aşınma ve SEM görüntüleri amacı kullanılmış olup, İkinci grup optik ve SEM görüntüleme amacı ile kullanılmıştır.
- Numunelere çizelge 4.2'de verilen ısıtma işlemleri uygulanmıştır.
- Tüm numunelere zımpara ve parlatma işlemleri uygulanmıştır.
- Mikroyapısal özellikler optik mikroskop ve SEM görüntüleme yöntemleri kullanarak elde edilmiştir.
- Sertlik dağılımları Vickers mikrosertlik test yöntemi ile belirlenmiştir.
- Aşınma analizi için pim disk yöntemi seçilmiş olup ASTM G99 standartlarında uygulanmıştır.
- Sürtünme katsayısı ve mesafe diyagramları anlık olarak kaydedilmiştir.
- Aşınma mekanizmaları, SEM görüntüleme yöntemi kullanılarak aşınma kanalları analiziyle tespit edilmiştir.
- Genel numune ve test süreci alt kısımda belirtilen çizelge 4.1'de belirtilen sıralamayı takip ederek uygulanmıştır.

Çizelge 4.1 Tez kapsamında parçaların üretimi, uygulanan ısıl işlem ve parçaların karakterizasyon süreçlerinin gösterimi.



## 4.2. Isıl İşlem – Sıcaklık ve Zaman Profili

Çalışmada kullanılan numuneler, ayırt edici ve açıklanabilir olması amacıyla HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 olarak adlandırılmıştır. Bu numuneler, Inconel 718 alaşımının farklı ısı işlem detaylarına tabi tutulmuş örnekleridir. Çizelge 4.2'de, bu numunelerin ısı işlem detaylarıyla birlikte açıklanması sağlanmıştır.

HT-0 numunesi için herhangi bir ısı işlem uygulanmamıştır. HT-1 numunesi, 954°C'de 2 saat boyunca solüsyona alma işlemine tabi tutulmuş ve ardından vakum fırında soğutulmuştur. HT-2 numunesi ise aynı solüsyona alma işlemine tabi tutulmuş, ancak sıcaklık süresinde bir azaltma yapılarak 954°C'de 1 saat boyunca işlem uygulanmış ve vakum fırında soğutulmuştur. HT-3 numunesi ise daha yüksek bir sıcaklıkta, 1000°C'de 2 saat solüsyon alma işlemine tabi tutulmuş ve aynı şekilde vakum fırında soğutulmuştur.

Çizelge 4.2 Tez kapsamında parçaların üretimi, uygulanan ısı işlem ve parçaların karakterizasyon süreçlerinin gösterimi.

| <b>İnconel 718 Numuneleri</b> | <b>Isıl işlem detayı</b>                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| HT-0                          | Isıl işlem görmemiş.                                 |
| HT-1                          | 954°C 2 saat solüsyon alma ve vakum fırında soğutma  |
| HT-2                          | 954°C 1 saat solüsyon alma ve vakum fırında soğutma  |
| HT-3                          | 1000°C 2 saat solüsyon alma ve vakum fırında soğutma |

## 4.3. Numune Hazırlığı

Numuneler daha büyük parçalar halinde SLE yöntemi ve Inconel 718 malzemesi ve optimize edilmiş parametreler ile üretildikten sonra şekil 4.1 görseli verilmiş olan Struers Discotom 5 makinesi kullanarak uygun boyutlarda kesilmiştir. 2 grup olacak şekilde 4'er adet 10x8x8 mm<sup>3</sup> ölçülerinde hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Struers Discotom 5 kesme cihazı

#### 4.4. Zımpara ve Parlatma

Numuneler, kesme cihazında uygun boyutlara getirildikten sonra, Struers TegraPol 21 marka numune zımparalama ve parlatma cihazında (Şekil 4.2) standart metalografik numune hazırlama yöntemlerine göre dik kesitleri oluşturulmuştur. İlk aşamada, 320 mesh kâğıt zımpara ve sulu ortam kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemleri ise sırasıyla 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 0,2  $\mu\text{m}$  solüsyonlar kullanılarak özel seçilmiş parlatma çuhalarıyla tamamlanmıştır. Sertlik ölçümleri ve aşınma testleri için belirlenen numuneler de benzer şekilde zımparalama ve parlatma işleminden geçirilerek hazırlanmıştır.

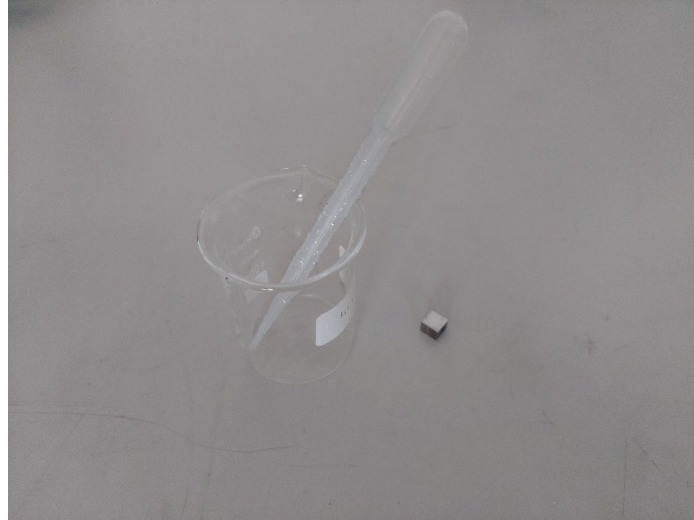


Şekil 4.2. Struers TegraPol 21 metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.

#### 4.5. Dağlama İşlemi

Dağlama işlemi için  $\text{CuCl}_2$  5g, HCl 100ml,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  100ml içerikli Kalling's dağlama solüsyonu kullanılmıştır. Kalling's Ni-Cu, nikel bazlı süper alaşımlarda, ferritik ve martensitik aşındırılması için metalografik bir dağlayıcıdır. Bu aşındırıcı martenziti koyulaştırıp, ferrite saldırıp ve östeniti hafifçe aşındırmaktadır. Karbürlere etki etmemektedir. Bu dağlayıcı ASTM standardı E 407'de 94 numaralı "Kalling's" formül numarasıyla listelenmiştir.

Dağlama işlemi öncesi numune yüzeyi parlatılmıştır. Metal yüzeyi parlatıldıktan hemen sonra dağlama işlemi yapılmış olup, işlem sonrası temizlenip ve gecikmeden kurutulmuştur. 20sn – 85sn süreleri arasında dağlayarak mikro yapısal görüntü elde etmek için numune yüzeyleri hazırlanmıştır. Şekil 4.3'te dağlama için kullanılan aparatları ve numune verilmiştir.



Şekil 4.3. Dağlama sırasında kullanılan aparatlar ve İnconel 718 numunesi

#### 4.6. Mikroskop Görüntüleme

Numunelerin parlatılmasının ardından optik mikroskop görüntü alma süreci, metalografik incelemelerin ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak adına kritik bir adımdır. İlk olarak, parlatma işlemi sayesinde numunelerin yüzeyindeki çeşitli çizikler, ezikler ve diğer yüzey kusurları giderilir. Bu, optik mikroskop altında inceleme yapılacak bölgelerin daha net ve detaylı bir şekilde görüntülenmesini sağlar. Parlatma sonrasında, optik mikroskop görüntü alma süreci, mikroyapısal özellikleri ve malzemenin homojenliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Optik mikroskop kullanılarak görüntü alma sürecinde, numunenin farklı bölgeleri incelenir ve özellikle tane sınırları, faz yapıları ve diğer mikroyapısal özellikler gözlemlenir. Bu incelemenin amacı, malzemenin yapısal özelliklerini anlamak, potansiyel kusurları belirlemek ve malzemenin performansı hakkında önemli bilgiler elde etmektir. Numune yüzeyleri hazırlandıktan sonra ve dağlama sonrası Nikon markalı optik mikroskop kullanılarak tüm numunelerde 50X, 100X ve 200X görüntüleri alınmıştır. Görüntü alma sırasına tüm yüzeylerde faz ve detayların belirgin olması ve yüzey detaylarına fikir verecek şekilde görüntü alınmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.4. Nikon Eclipse L150 Optik Mikroskop ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi.

#### 4.7. SEM Görüntüleme

Deneysel çalışma kapsamında, numunelerin optik görüntüleme sonrasında daha detaylı bir analiz için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskoplar belirli bir büyütme düzeyine kadar detaylı görüntüler sağlayabilir, ancak SEM, elektromanyetik odaklama ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme özellikleri sayesinde nanometre seviyesinde ayrıntılara odaklanabilmektedir.

SEM görüntüleme süreci, numunenin yüzey topografisinin yanı sıra EDS analizi ile kimyasal bileşimini belirleme yeteneği sağlar. Elektron demeti ile numunenin yüzeyine odaklanarak, yüksek enerjili elektronlar numunenin yüzeyinden yansıyarak detaylı görüntüler elde edilmektedir. Bu sayede, malzemenin mikro yapıları, tane sınırları ve yüzey morfolojisi gibi özellikler deneysel olarak incelenmektedir. Deneysel çalışma kapsamında, numunelerin optik görüntüleme sonrasında daha detaylı bir analiz için Hitachi Regulus 8230 marka taramalı elektron mikroskobu (FESEM) cihazı kullanılarak görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Hitachi Regulus 8230 marka SEM cihazı.

#### 4.8. Sertlik Testi

Deneysel çalışmanın devamında, Future-Tech FM-700 (şekil 4.6) mikrosertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilen Vickers mikrosertlik testi dört farklı numune üzerinde uygulanmıştır. Her bir numune için, 100 gf (gram kuvvet) yük ve 10 s bekleme süresi kullanılarak 250  $\mu$ m aralıklarla her numune için 15 farklı noktada mikrosertlik ölçümleri alınmıştır.

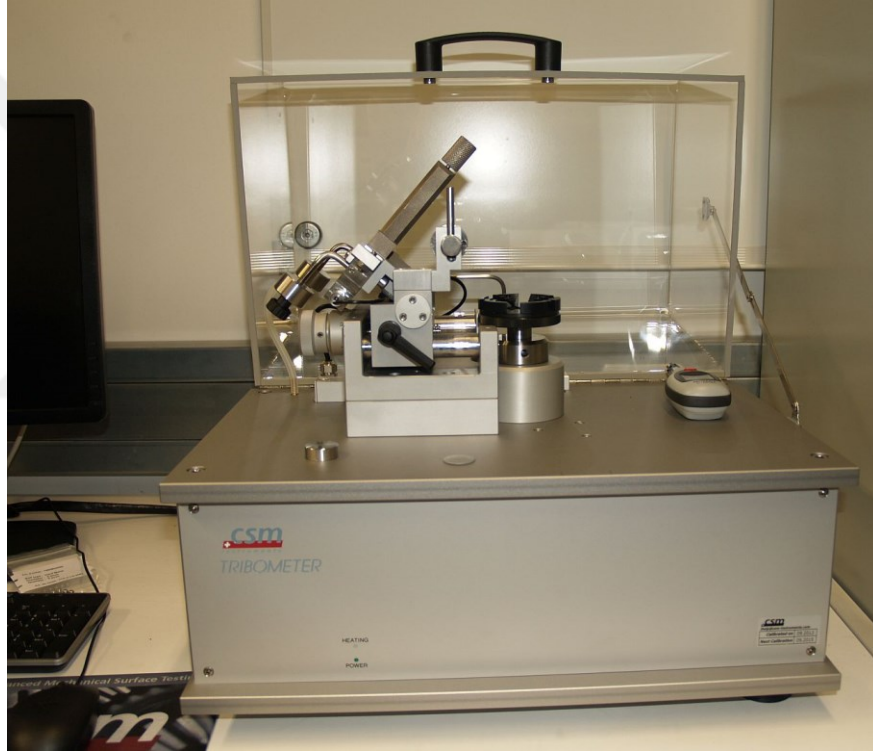
Her bir numune için yapılan 15 farklı mikrosertlik ölçümünün ardından, elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunenin genel mikrosertlik özellikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, her bir numunenin sertlik profili ve mikro yapısal özellikleri hakkında kapsamlı bir değerlendirme sağlamıştır. Sonuç olarak, dört farklı numune üzerinde gerçekleştirilen Vickers mikrosertlik testi, her bir numunenin sertlik profili üzerindeki mikro yapısal değişimleri belirlemek ve malzemenin genel mekanik özelliklerini anlamak için etkili bir yöntem olmuştur.



Şekil 4.6. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı

#### 4.9. Aşınma Testi

Deneysel çalışmanın devamında, Future-Tech FM-700 (Şekil 4.7) mikrosertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilen Vickers mikrosertlik testi sonuçlarını desteklemek adına aşınma testleri CSM Tribometre aşınma cihazı ile detaylı bir şekilde yapılmıştır. Her bir numune üzerinde 2 Newton (2 N) yük, 3 mm çapında Wolfram karbür (WC) aşındırıcı küre, 190 devir/dakika dönüş hızı, 100 metre aşınma mesafesi, 20 derece ortam sıcaklığı ve anlık sürtünme katsayısı kaydı gibi belirlenen parametrelerle aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. CSM Tribometre aşınma test cihazı

Aşınma testi sırasında, her bir numune için 4 farklı noktada kanalların yüzey profilleri Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı (şekil 4.8) kullanılarak detaylı bir şekilde ölçülmüştür. Bu noktasal ölçümler, malzemenin aşınma direnci ve yüzey profilindeki değişiklikleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

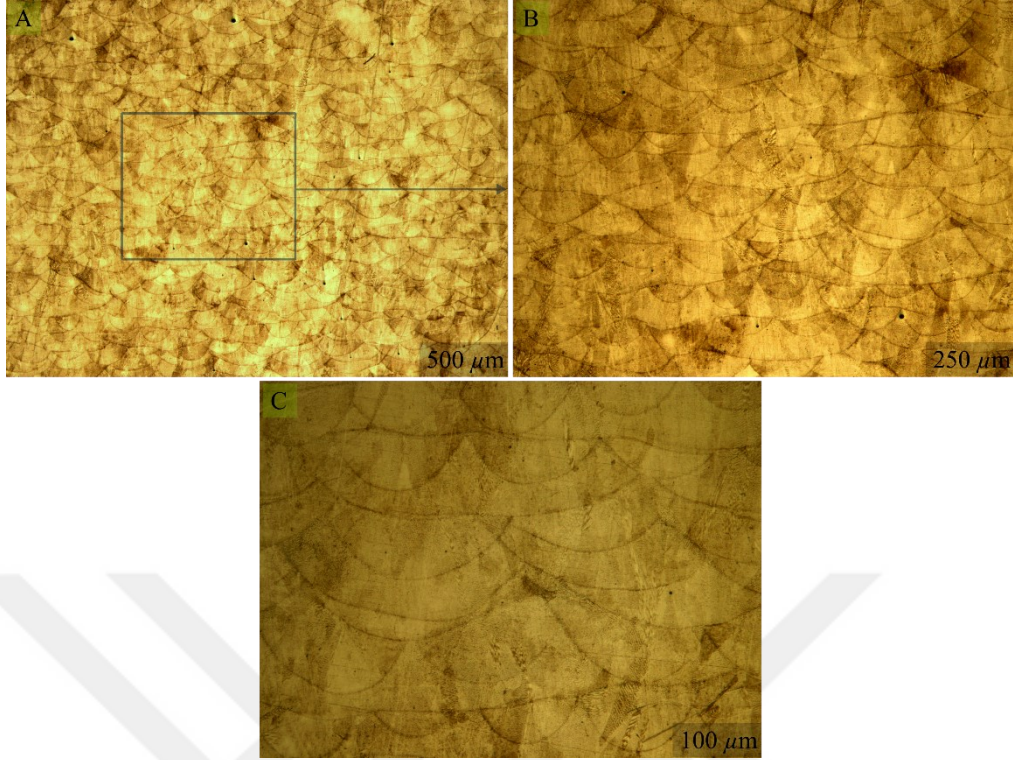
Tezin bu bölümü çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ayrıntılı sonuçlarını içermektedir. Optik mikroskop, SEM (taramalı elektron mikroskobu), EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analiz yöntemleriyle elde edilen veriler, numunelerin aşınma mekanizmaları, mikroyapısal değişiklikleri ve yüzey karakteristiklerini ele almaktadır. Bulgular, malzemenin maruz kaldığı çeşitli testlerin sonuçlarına dayanarak elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen verilerin istatistiksel analizleri ve grafiklerle desteklenerek, malzemenin aşınma direnci, sürtünme özellikleri ve yüzey topografisi üzerindeki etkileri anlatılmıştır.

### 5.1 Mikroyapı Analizi

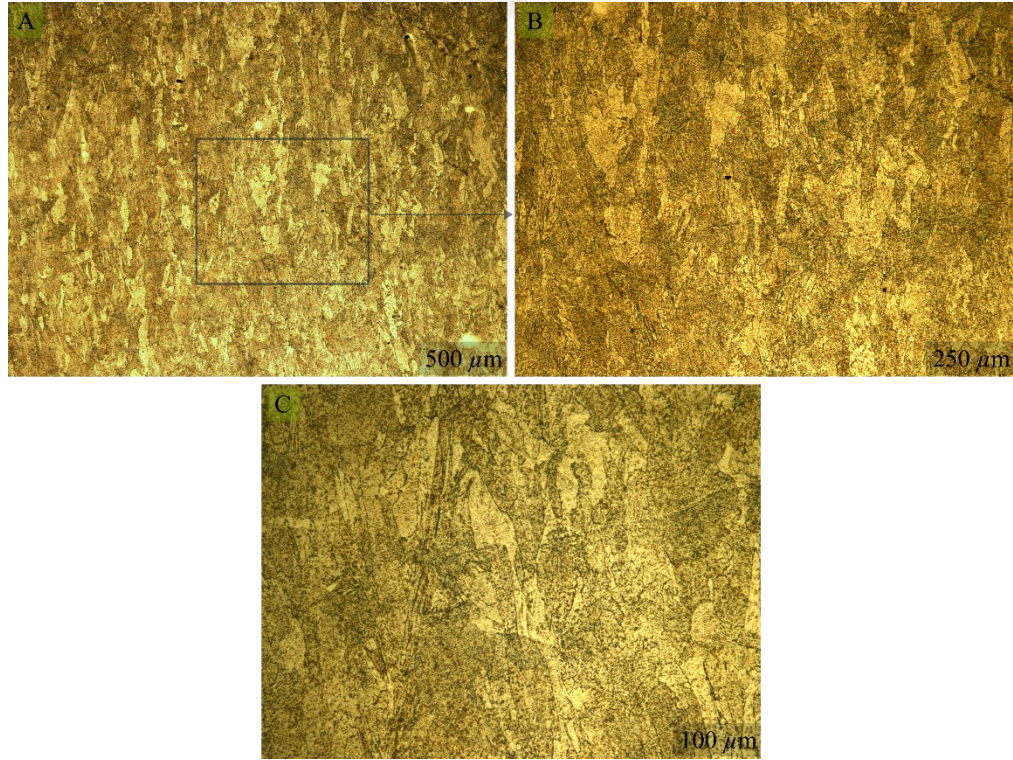
#### 5.1.1 Optik mikroskop görüntü analizi

Bu kısımda, optik mikroskop kullanılarak elde edilen mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntüler, numunelerin iç yapısını detaylı bir şekilde göstermekte olup, malzemenin mikroyapısal özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Her bir görüntü, malzemenin kristal yapıları, tane sınırları ve olası kusurları hakkında bilgiler içermektedir.

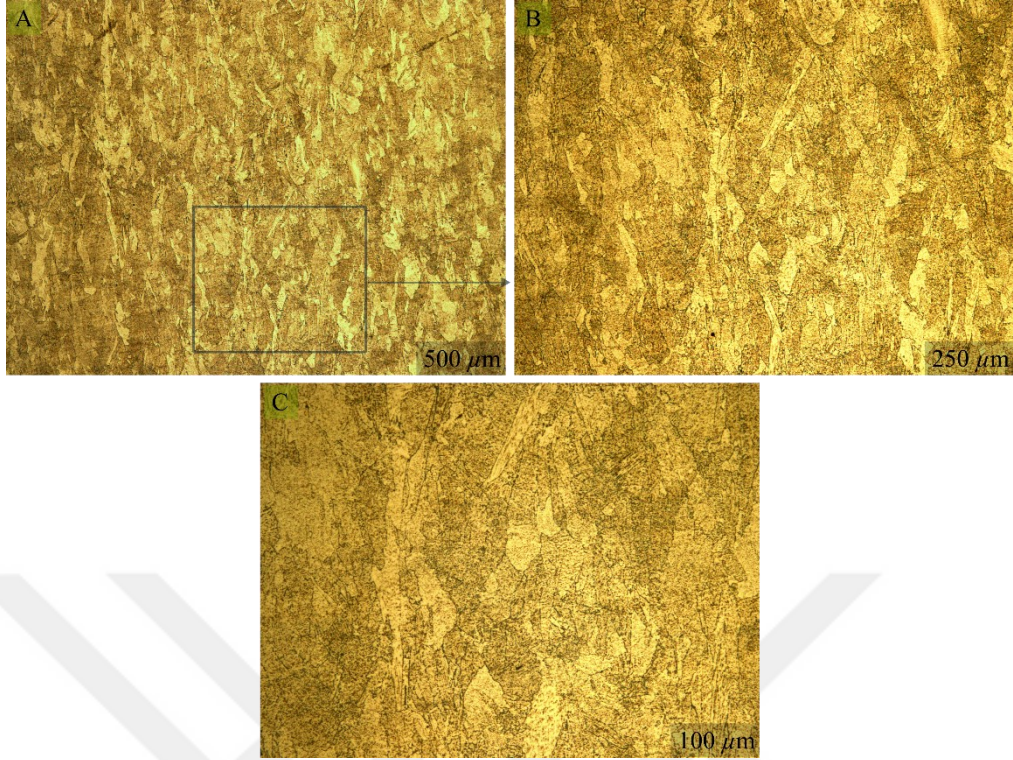
Numunelerin yüzey hazırlıkları tamamlandıktan sonra, dağlama işlemine tabi tutularak ardından her bir numunedeki yüzey morfolojisi 50X, 100X ve 200X büyütme oranlarında optik mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve Şekil 5.4, numunelerinin bu farklı büyütme oranlarında elde edilen optik mikroskop görüntülerini göstermektedir.



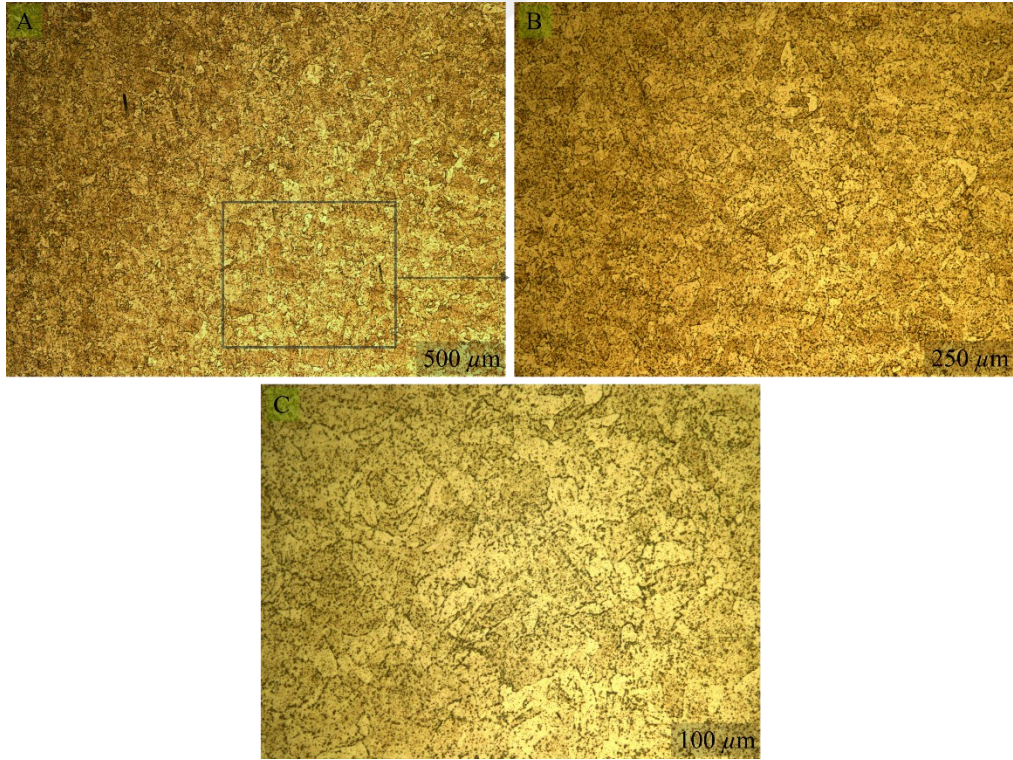
Şekil 5.1. HT-0 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X



Şekil 5.2. HT-1 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X



Şekil 5.3. HT-2 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X



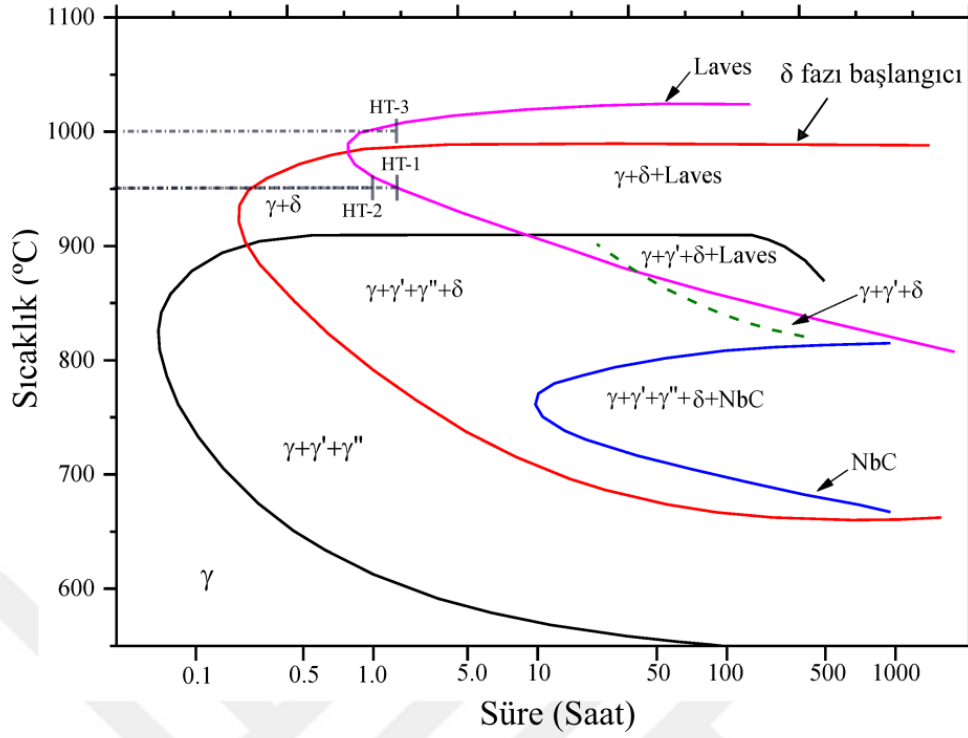
Şekil 5.4. HT-3 Optik mikroyapı görüntüleri A: 50X, B: 100X, C: 200X

Şekil 5.1'de gözlemlendiği gibi, ısıtım işlem görmemiş numunenin seçici lazer ergitme (SLE) üretim yöntemi sonucunda elde edilen optik mikroskop görüntüsünde, katmanlı parabolik yapı ve ergime havuzları açık ve belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu optik görüntü aynı zamanda, SLE yöntemi doğasından kaynaklanan bir özellik olan katmanlar arasında üst üste örtüşmenin (Overlapping) varlığını göstermekte ve literatür ile doğrulanmaktadır (Mostafa vd., 2017).

Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te yer alan ısıtım işlem görmüş numunelerin optik görüntülerinin incelenmesi, ısıtım işlem kaynaklı parabolik yapıların ve ergime havuzlarının kaybolduğunu göstermektedir. Optik görüntülerde, özellikle Şekil 5.4'teki HT-3 numunesinin optik görüntüsünde, katmanlı yapının diğer numunelere kıyasla daha fazla azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun ısıtım işlem süre ve sıcaklığın diğer numunelere göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

HT-2 ve HT-3 numuneleri eşit sıcaklıkta (954°C) ve farklı sürelerde ısıtım işlem görmüş numuneleri kıyaslandığında Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'u dikkate alarak tane boyutu daha uzun süre işleme tabi tutulan HT-2 numunesinde daha büyük taneciklere sahip olduğunu görünmektedir. HT-3 ve HT-4 numunelerinde ise aynı eşit süreler (1 saat) ve farklı sıcaklıklarda ısıtım işlem görmüş numuneleri kıyasladığımızda ise Şekil 5.3 ve 5.4'u dikkate alarak tane boyutları daha yüksek sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numune daha büyük tane boyutlarına sahip olduğu açıkça görünmektedir. Isıtım işlem görmüş bu numunelerdeki sıcaklık ve süre değerlerini dikkate aldığımızı ve alınan optik görüntüler ile birlikte ısıtım işlem sırasında alınan ısı miktarı arttığı durumda tane boyutu bu oranda artmaktadır sonucu yorumlanabilir.

Ayrıca Şekil 5.5'te Inconel 718 için ZSD diyagramı ve numuneler için zaman, sıcaklık ve faz dönüşüm diyagramı üzerinde teorik olarak beklenen fazlar gösterilmiştir.



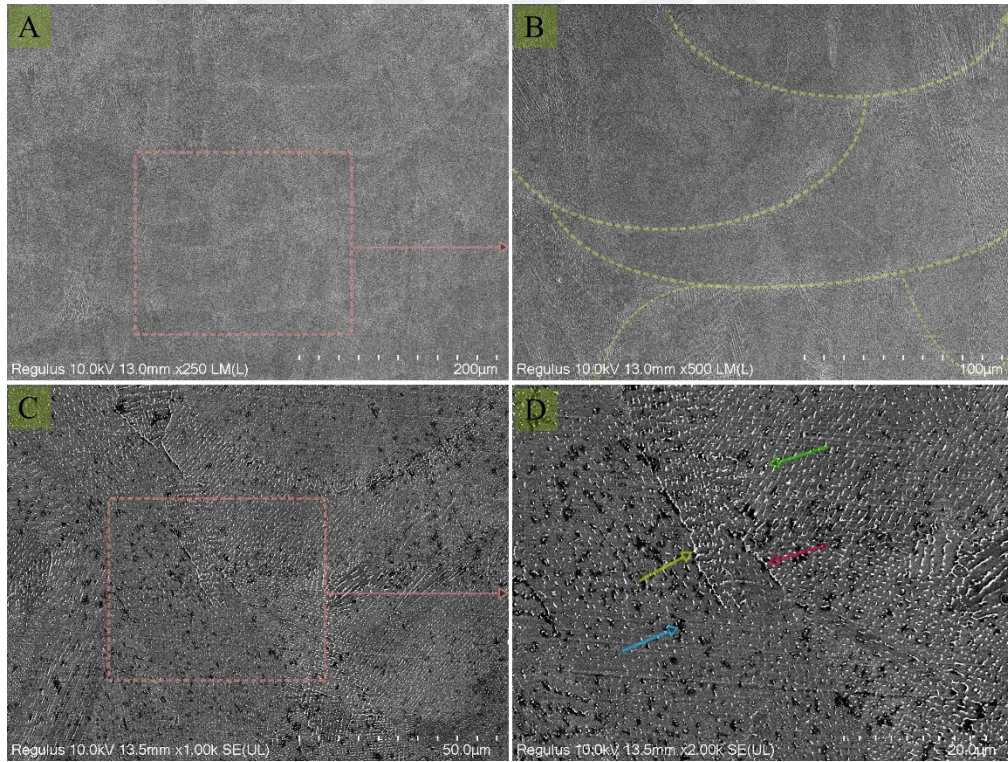
Şekil 5.5. HT-1, HT-2 ve HT-3 numuneleri için ZSD diyagramı gösterimi (Mostafa vd., 2017).

ZSD diyagramı incelemesinde HT-1 numunesi 954°C ve 2 saatlik ısıtıl işlemde, Inconel 718'in mikro yapısında Gama ( $\gamma$ ) fazı hâkim olması teorik olarak beklenmektedir. Gama fazı, nikel bazlı süper alaşımların temel fazıdır ve yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlar. ZSD diyagramında, Gama fazı geniş bir sıcaklık aralığında kararlıdır ve bu da Inconel 718'i geniş bir uygulama yelpazesine uygun hale getirir (Sahu ve Bag, 2021). HT-2 954°C ve 1 saatlik ısıtıl işlemde Gama fazının yanı sıra Delta ( $\delta$ ) fazı da görülmesi teorik olarak beklenmektedir (Şekil 5.5 HT-2 ZSD diyagramı). HT-3 1000°C ve 2 saatlik ısıtıl işlemde ise, Gama fazı ile birlikte Laves ve Delta fazı da görülmesi beklenmektedir. Bu durum Inconel 718'in sünekliğini ve işlenebilirliğini artırır. Fakat aynı zamanda, mukavemetini ve korozyon direncini de azaltabilir. Bu nedenle, 1000 derecelik ısıtıl işlem daha yüksek süneklik ve işlenebilirlik sunarken, 954 derecelik ısıtıl işleme göre daha düşük mukavemet ve korozyon direncine sahip olabilir.

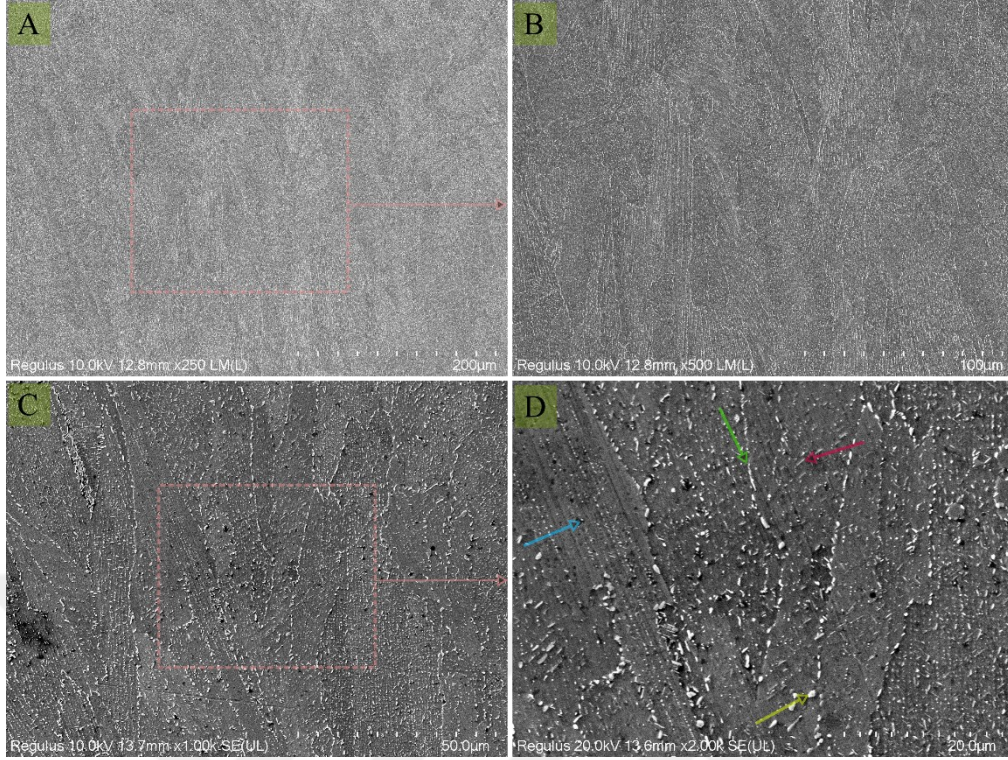
### 5.1.2. SEM görüntüleri ve EDS analizleri

SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) görüntüleri, numunelerin yüzey özelliklerini ve morfolojisini incelemek amacıyla elde edilmiştir. Görüntüler, yüksek çözünürlüklü FESEM cihazı olan Hitachi Regulus 8230 kullanılarak elde edilmiştir. SEM görüntüleri üzerinde ayrıca EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi yapılarak, numunelerin kimyasal bileşimi ve elementel dağılımı incelenmiştir. SEM görüntüleri ve analizleri, numunelerin yüzey özellikleri, mikroyapısal detayları ve aşınma mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir.

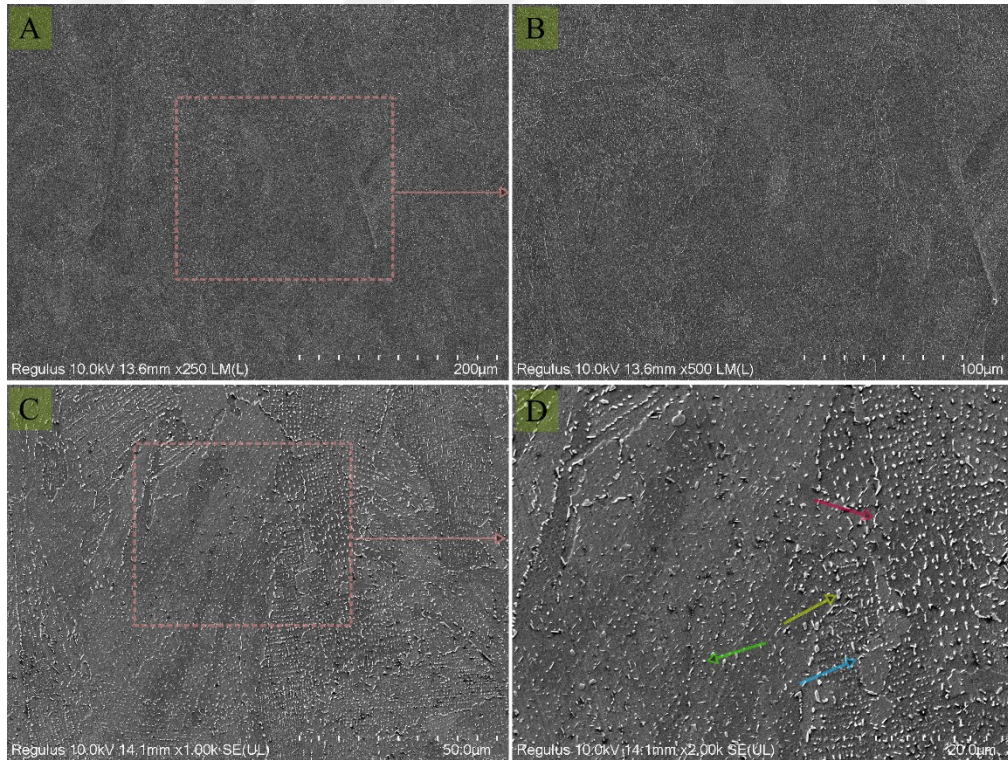
Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9, her bir numunenin 250X, 500X, 1000X ve 2000X büyütme oranlarında SEM görüntülerini sunmaktadır.



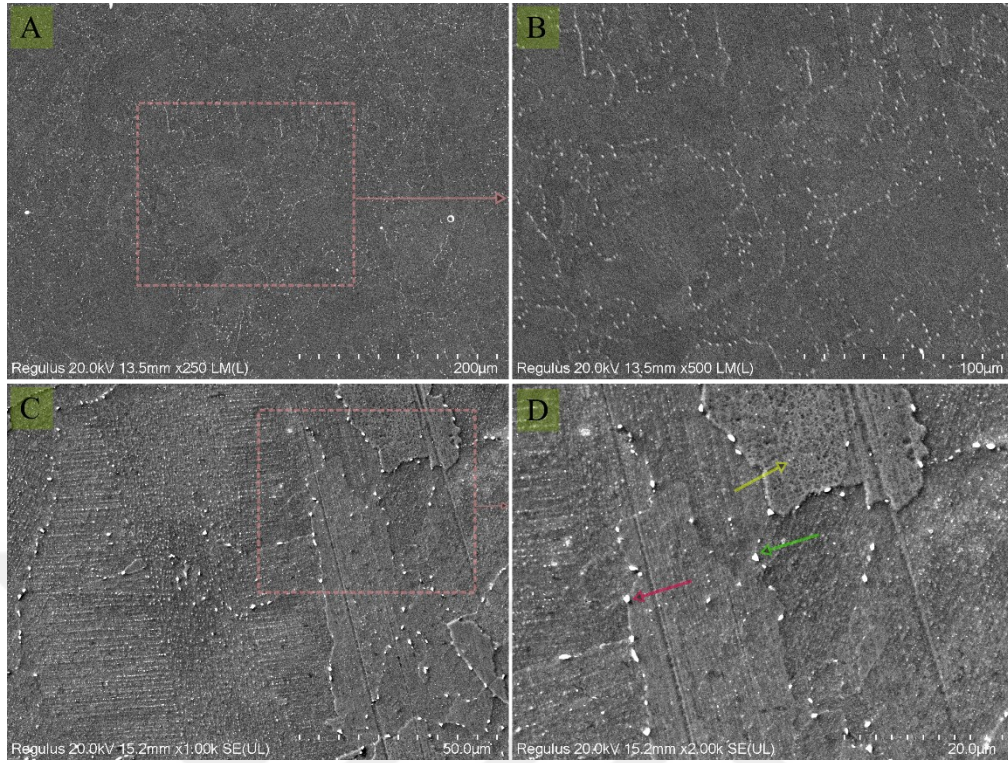
Şekil 5.6. HT-0 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X



Şekil 5.7. HT-1 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X



Şekil 5.8. HT-2 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X



Şekil 5.9. HT-3 SEM mikroyapı görüntüleri A: 250X, B: 500X, C: 1000X, D: 2000X

Şekil 5.6 HT-0 ısıtıl işlem görmemiş numunenin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsünü sunmaktadır. Optik mikroskop altında gözlemlenen parabolik yapı ve ergime havuzları, bu görüntüde (B görseli) açık ve belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Şekilde 5.6 D görselinde faz detayları incelendiğinde Şekil 5.5 Inconel 718 ZSD diyagramını HT-1 numunesi için dikkate aldığımızda Gama fazı parça yüzeyi genelinde bulunmaktadır ve yeşil olarak işaretlenmiştir. SLE üretim yönteminden kaynaklı üretim süresince katmanlı üretimden kaynaklı sıcaklık artışı ve tekrar soğuması ile üretim süresince alt tabaklar doğal bir şekilde ısıtıl işleme tabi tutulmuş olmaktadır (Tucho vd. 2017) bu nedenle bu numunede Laves fazı oluşmaktadır, kırmızı ve sarı olarak işaretlenmekte, tane sınırlarında ve genel parça yüzeyinde görüldüğü söylenebilir.

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 görüntülerinin incelenmesi ile bu numunelerde optik mikroskop verilerine paralel olarak gözlemlenen havuzlu ve parabolik yapının kaybolduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.7 HT-1 SEM görüntüsü incelendiğinde Gama fazı (sarı), Laves sınır bölgesi ve parça genelinde (kırmızı ve yeşil) ve tane boyutu ve yapısı EDS analizine dayanarak karbürler olarak gözlemlenen tüm parça yüzeyinde (Mavi) olarak

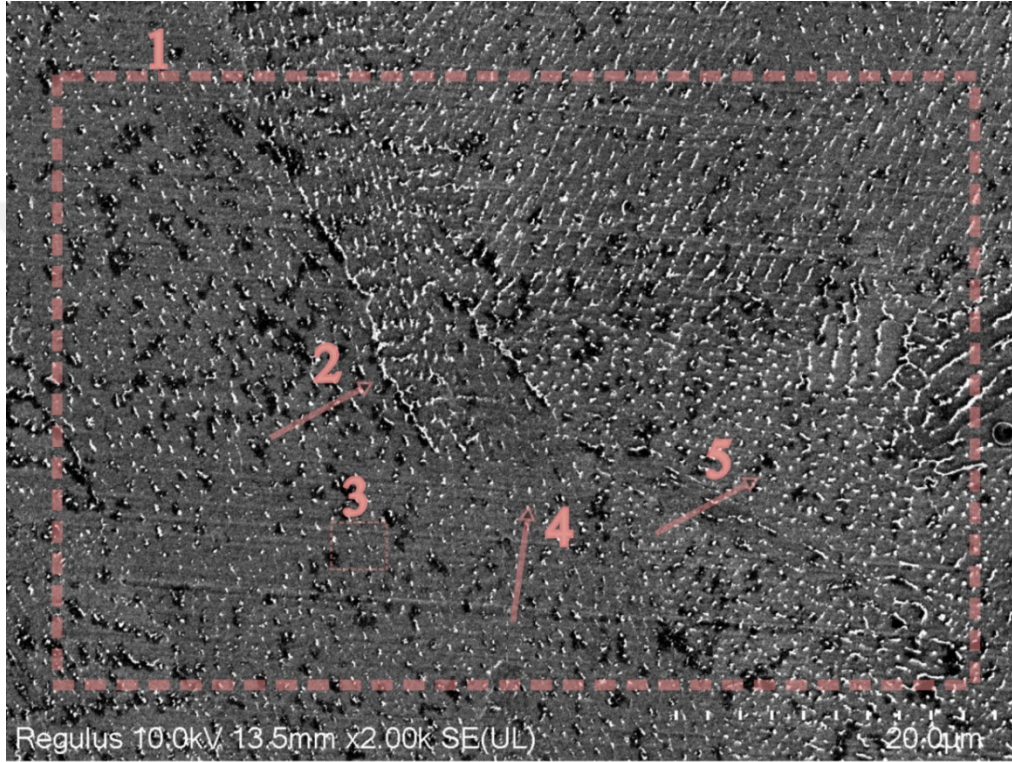
fazlar görüldüğü söylenebilir. Şekil 5.8 HT-2 SEM görüntüsü incelendiğinde Gama fazı (sarı), Laves sınır bölgesi ve parça genelinde (kırmızı ve mavi) ve tane boyutu ve yapısı EDS analizine dayanarak karbürler olarak gözlemlenen tüm parça yüzeyinde (yeşil) fazlar görülmektedir. Şekil 5.9 HT-3 numunesi SEM görüntülerinde incelediğinde ise yeşil ve kırmızı ile işaretlenmiş fazların şekil 5.13 EDS analizleri 4 ve 5 spektrumlarını dikkate alarak Ni ve Nb element oranlarını diğer spektrumlar ile oranlarını kıyaslayarak Delta fazı oluşumu söylenebilir. Delta fazı parçanın genel yüzeyinde oluşumu görünmektedir. Ayrıca sarı ile işaretlenmiş fazın şekil boyut ve EDS analizi oranı ile karbür fazı olduğu ve parçanın genel yüzeyinde yayıldığını söylenebilir.

Eşit sıcaklık ve farklı sürelerde ısıtılma işlem görmüş numunelerin (HT-1 ve HT-2) SEM görüntüleri kıyaslandığında, daha uzun süre ısıtılma işlem görmüş olan HT-1 yüzeyinde tane sınırları HT-2 numunesine kıyasla daha belirgin ve boyut olarak daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca eşit süre ve farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlem görmüş olan HT-1 ve HT-3 numunelerini incelendiğinde ise daha yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlem görmüş olan HT-3 numunesi HT-1 numunesine kıyasla daha büyük tane yapısına ulaştığını söylenebilir. ısıtılma işlem görmüş numuneleri kıyasladığımızda HT-3 numunesi en büyük tane yapısına ulaştığını ve sırası ile HT-1 ve HT-2 tane büyüklüğü yapılarına ulaşmıştır. SEM görüntülerinde  $\gamma''$  ve  $\gamma'$  faz detayları ipuçlarına ulaşılmadığından bu görüntülerde bu fazlar ile ilgili yorum yapılamamış olup, TEM görüntüleri ile bu fazlar ile ilgili yorum yapılabilmektedir.

Tüm numuneler için EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi kullanılarak, numunelerin kimyasal bileşimi ve elementel dağılımı incelenmiştir. Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 görüntülerinde sırasıyla HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numuneleri için SEM görüntüleri ile yapılan EDS analiz sonuçları, spektrumlar ve element oranlarıyla birlikte sunulmuştur. Bu analizler, numunelerin içsel kimyasal bileşimini anlamamıza ve elementlerin dağılımındaki farklılıkları değerlendirmemize olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, numuneler arasındaki kimyasal farklılıkları belirleyerek malzeme özelliklerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

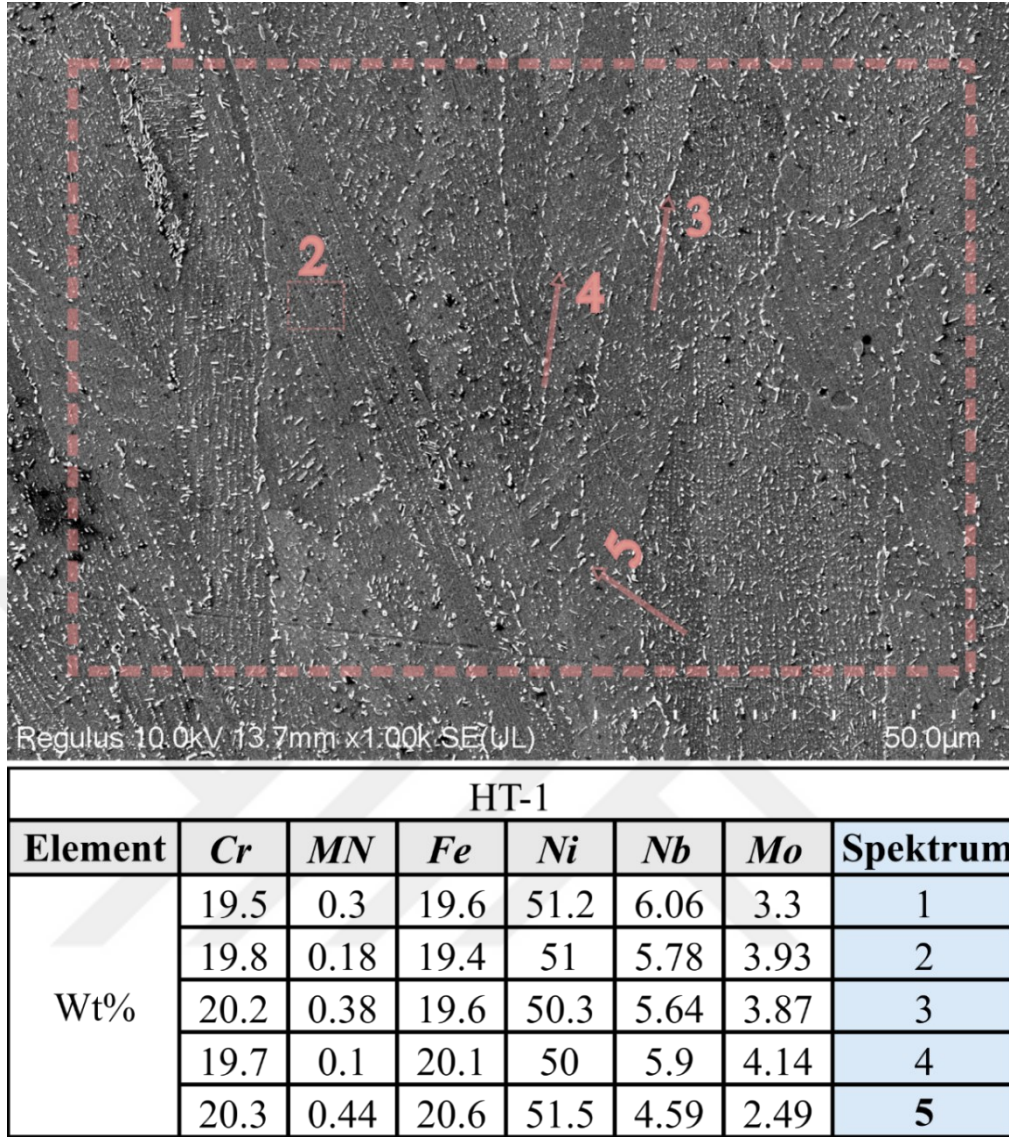
Tüm numunelerin EDS analizlerinde seçilen ilk spektrum parçanın geniş alanını kapsamakta ve malzemenin genel elementel dağılımı hakkında bilgi vermektedir.

Numunelere ait ilk spektrum değerleri kıyaslandığında ise numuneler arası bariz bir fark görülmemiş olup genel elementel dağılım farklı süre ve sıcaklıklarda ısıtılma işlem görmüş numuneler ve ısıtılma işlem görmemiş numune de homojen ve farksızdır. EDS analizleri sonucu kıyaslandığında HT-3 numunesinde dört ve beşinci spektrumları diğer spektrum ve diğer numune örneklemelerine kıyasla en yüksek Ni ve Nb oranlarına sahip olduğu görülmüştür.

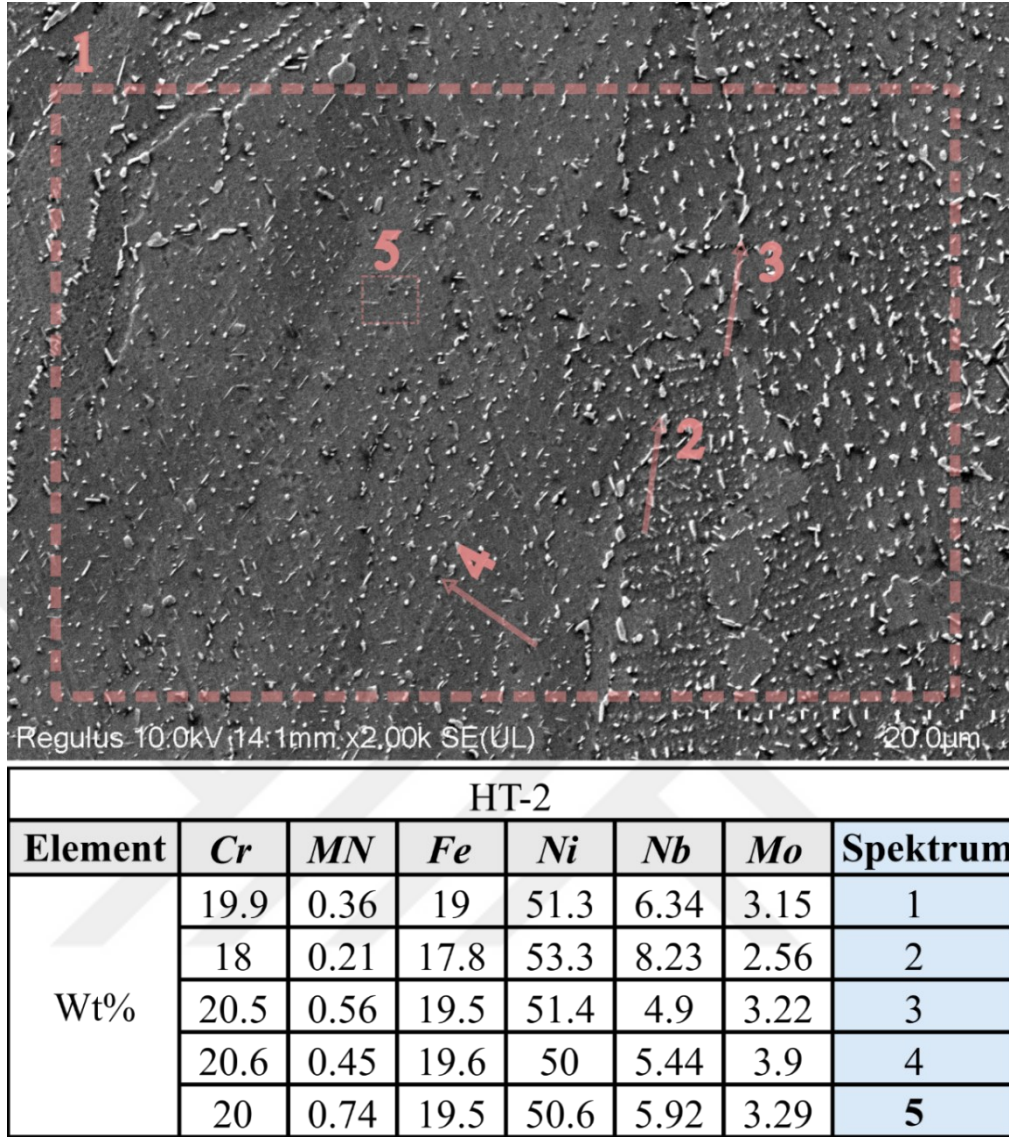


| HT-0    |      |      |      |      |      |      |          |
|---------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Element | Cr   | MN   | Fe   | Ni   | Nb   | Mo   | Spektrum |
| Wt%     | 20.6 | -    | 19   | 51.6 | 5.83 | 2.99 | 1        |
|         | 19.6 | 0.56 | 19.3 | 50.7 | 6    | 3.89 | 2        |
|         | 19.7 | 0.09 | 19.8 | 51.5 | 5.76 | 3.09 | 3        |
|         | 20.2 | 0.15 | 20   | 50.5 | 6.13 | 2.95 | 4        |
|         | 19.7 | 0.37 | 19.2 | 51.9 | 5.46 | 3.31 | 5        |

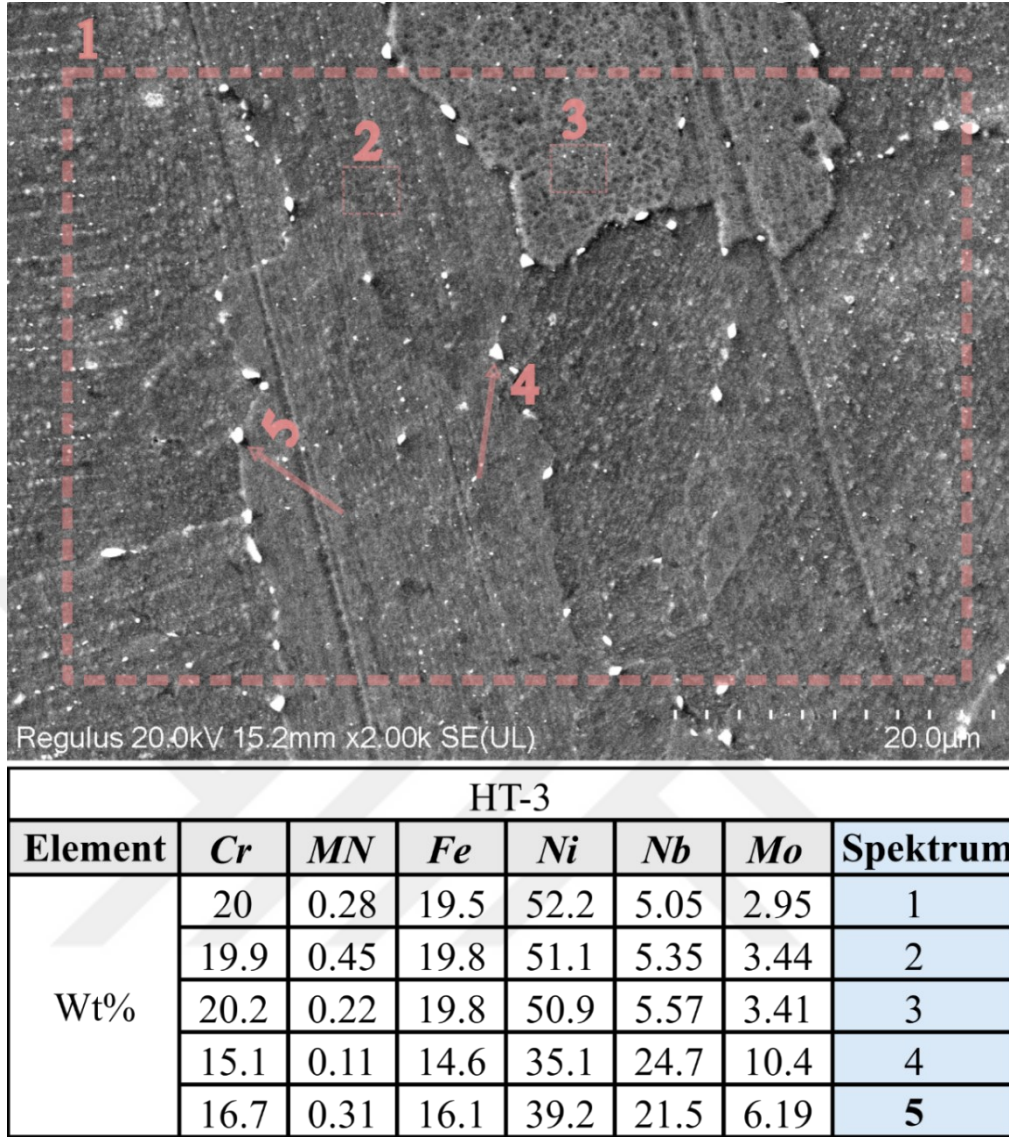
Şekil 5.10. HT-0 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir



Şekil 5.11. HT-1 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir



Şekil 5.12. HT-2 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir



Şekil 5.13. HT-3 için SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu beş farklı spektrum ile verilmiştir

## 5.2. Mikrosertlik

Sertlik analizi, Vickers sertlik testi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dört farklı numune üzerinde 250  $\mu\text{m}$  aralıklarla toplamda kırk beş ölçüm alınmış olup, bu ölçümlerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numunelerin ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Bu yöntem, malzemenin genel mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Sertlik ortalama ölçüm sonuçları 5.1 çizelgesinde ortalama sapma değerleri ile verilmiştir.

Çizelge 5.1 Ölçülen Ortalama Sertlik Değerleri

| Numune | Ortalama Sertlik Değeri (HV <sub>01</sub> ) |
|--------|---------------------------------------------|
| HT-0   | 336,3±16,3                                  |
| HT-1   | 318,8±17,8                                  |
| HT-2   | 288,4±15,2                                  |
| HT-3   | 278,0±21,0                                  |

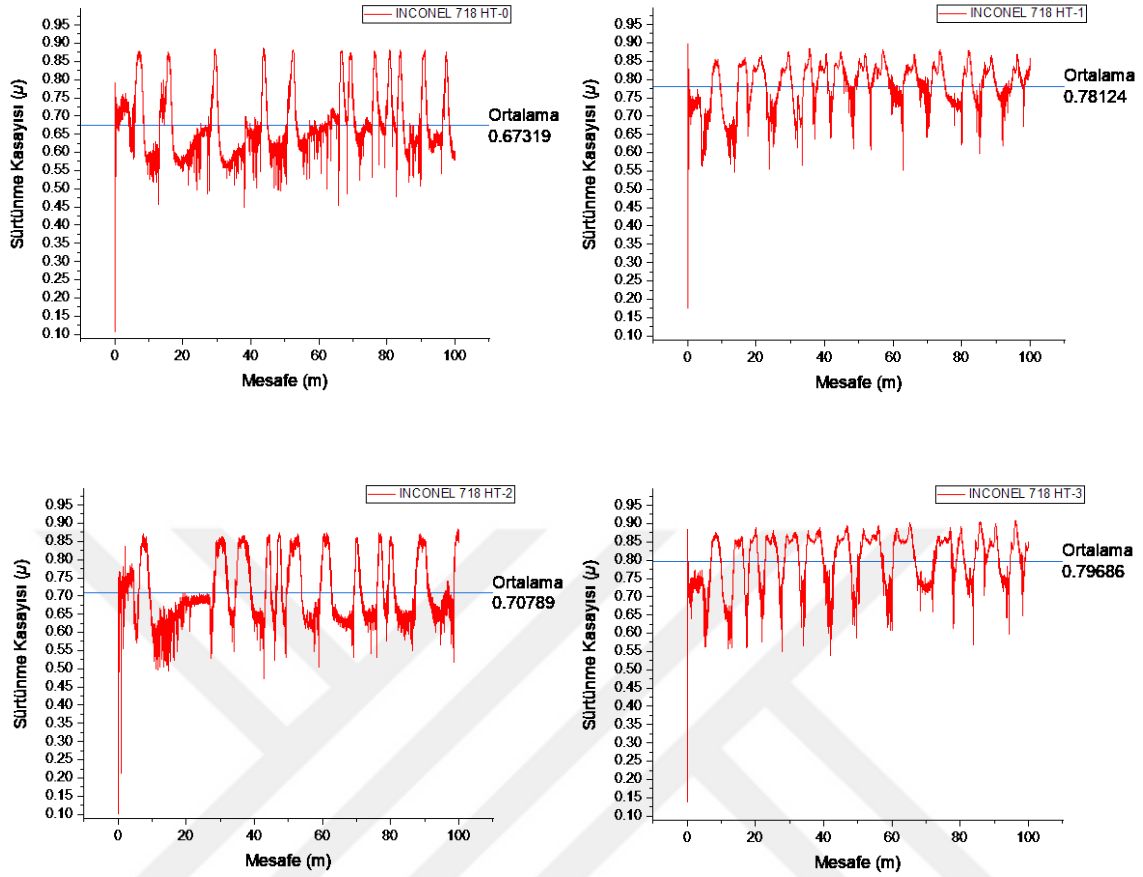
Çizelge 5.1’de numunelerin ölçülen ortalama sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik verileri üzerinden yorumlandığında 1000°C ve 2 saat ısıtılma işlemi görmüş olan HT-3 numunesi en düşük sertlik değeri ve ısıtılma işlemi tabi tutulmamış olan HT-0 numunesi en yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Veriler ışığında SLE üretilmiş ve solüsyona alma ısıtılma işlemine tabi tutulan bu numune (HT-3) 1000°C ve 2 saat ısıtılma işleminin ardından yüzde 17,31 sertlik değeri kaybına uğramıştır. Eşit süre ve farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi görmüş numuneler olan HT-1 ve HT-3 numuneleri (2 saat süre ve 954 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında) kıyaslandığında ise daha yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş olan HT-3 numunesi yüzde 12,78 sertlik değeri kaybına uğramıştır. Ayrıca eşit sıcaklık ve farklı süreler ısıtılma işlemine tabi tutulan numunelerde ise (954 °C, 1 ve 2 saat süreler) daha uzun süre ısıtılma işlemine tabi tutulan numune olan HT-1 numunesi yüzde 10,53 değerinde sertlik artışı gözlemlenmiştir. Tüm bu sertlik değerleri ışığında SLE ile üretilmiş bir parçanın solüsyona alma ısıtılma işlemine tabi tutulması ile sertlik değerinde azalma olacağını bu değerler referansında varılabilmektedir.

### 5.3. Aşınma Analizi (Aşınma Profili, Aşınma Katsayısı, Sürtünme Katsayısı)

Aşınma analizi, numunelerin aşınma direncini ve aşınma mekanizmalarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 2 Newton yük, 100 metre aşınma mesafesi ve 190 devir/dakika dönüş hızı ile 3 mm çapında karbür küre endentör ve 20 derece ortam sıcaklığında aşınma test parametrelerine tabi tutulmuştur.

#### 5.3.1. Sürtünme katsayısı

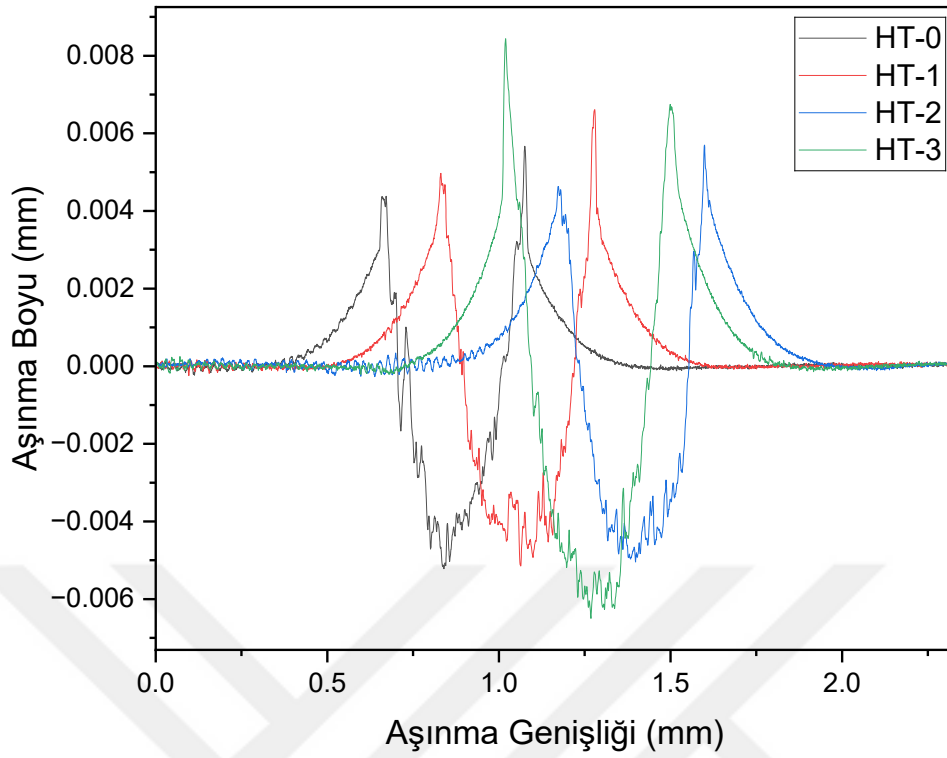
Aşınma testleri esnasında sürtünme katsayısı, aşınma mesafesine bağlı ve anlık olarak ölçülmüş ve test sonucunda ortalama sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı, numune yüzeyindeki 100 metrelik mesafede anlık olarak kaydedilmiş olup, bu mesafede sürtünme katsayısı verilerinin istikrarlı bir duruma gelmediği gözlemlenmiştir. Şekil 5.14'te numunelere ait sürtünme katsayısı grafiklerini paylaşılmaktadır. Çalışma sonucu olarak HT-0 numunesi 0,67 ortalama sürtünme katsayısı, HT-1 numunesi ortalama 0,78, HT-2 numunesi ortalama 0,71 ve HT-3 numunesi ortalama 0,80 ortalama sürtünme katsayısında ölçülmüştür. HT-0 numunesi en düşük ortalama sürtünme katsayısı ve HT-3 en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ölçülmüştür. En yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip olan HT-3 numunesi ve en düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip olan ve ısıtılmış işlem görmemiş olan HT-0 numunesi arasında yüzde 17,9 artış gözlemlenmiştir ve bu değer ısıtılmış işlemin bu numunede ortalama maksimum etki ettiği değerdir. Eşit sıcaklık ve farkı sürelerde ısıtılmış işlem görmüş olan numunelerde (HT-1 ve HT-2 numunelerinde) daha uzun süre ısıtılmış işleme tabi olan HT-1 numunesi daha yüksek ortalama sürtünme katsayısında ölçülmüştür. Aynı kıyaslama eşit süre ve farklı sıcaklıklarda ısıtılmış işlem görmüş olan HT-1 ve HT-3 numuneleri kıyaslandığında ise daha yüksek sıcaklıkta ısıtılmış işlem görmüş olan HT-3 numunesi yüzde 1,28 daha yüksek ortalama sürtünme katsayısında ölçülmüştür.



Şekil 5.14 Aşınma deneyi sırasında anlık olarak HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri ve ortalama değeri

### 5.3.2. Aşınma Profili

Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı kullanılarak, numunelerin aşınma sonucunda oluşan yüzey profilleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizde dört farklı noktadan ölçülen kanal profilleri, ISO R97 standardına uygun bir biçimde incelenmiştir. Şekil 5.15'te sunulan sonuçlara göre, aşınma genişliği ve aşınma boyu verileri dört farklı noktadan ölçülen numune değerlerinin ortalaması olarak verilmiştir. Değerlendirme sonucu HT-03 numunesi en derin aşınma alanına sahipken, HT-0 numunesi en kısa aşınma alanına sahiptir.



Şekil 5.15. HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelerine ait aşınma profili genişliği

Ayrıca aşınma profili analizlerini kullanarak numuneler için aşınma alanları Origin Pro 2024 versiyonu veri analizi ve bilimsel grafik uygulaması kullanarak grafik üzerinden hesaplanmıştır. Numunelere ait ortalama aşınma alanı çizelge 5.2 olarak verilmiştir. Bu profil analizi aşınma oranını hesaplamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

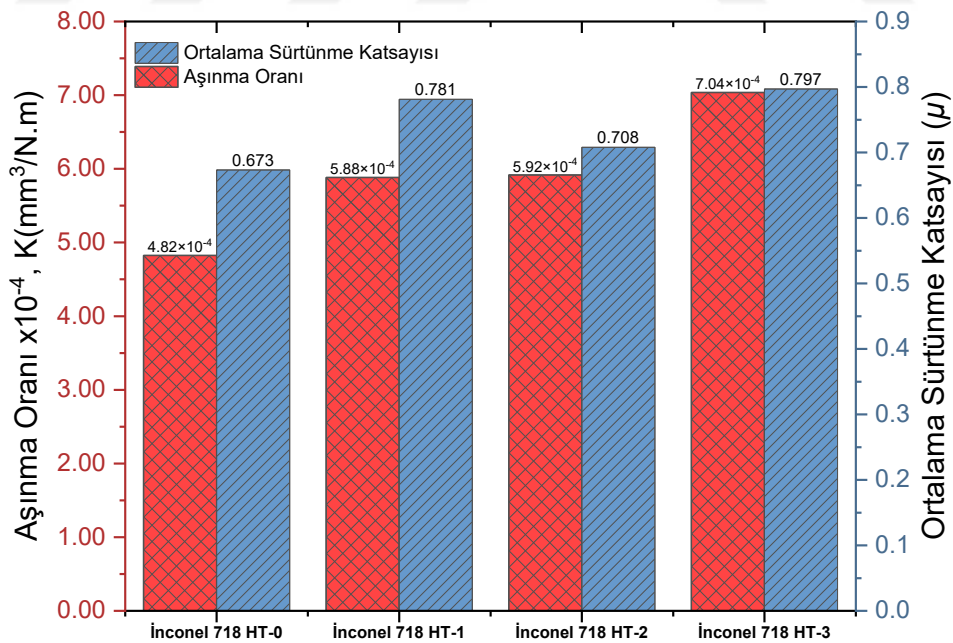
Çizelge 5.2 Ölçülen Aşınma Alanı Değerleri

| Numune | Ortalama Aşınma Alanı (mm <sup>2</sup> x10 <sup>-3</sup> ) |
|--------|------------------------------------------------------------|
| HT-0   | 0,85                                                       |
| HT-1   | 1,04                                                       |
| HT-2   | 1,05                                                       |
| HT-3   | 1,25                                                       |

### 5.3.3. Aşınma Katsayısı

Aşınma kanal profil analizleri neticesinde, elde edilen verileri kullanarak numuneler için aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 5.16’da numunelere ait aşınma oranı sonuçları ve ortalama sürtünme katsayıları sütunlu çizelge halinde sonuçları ile verilmiştir.

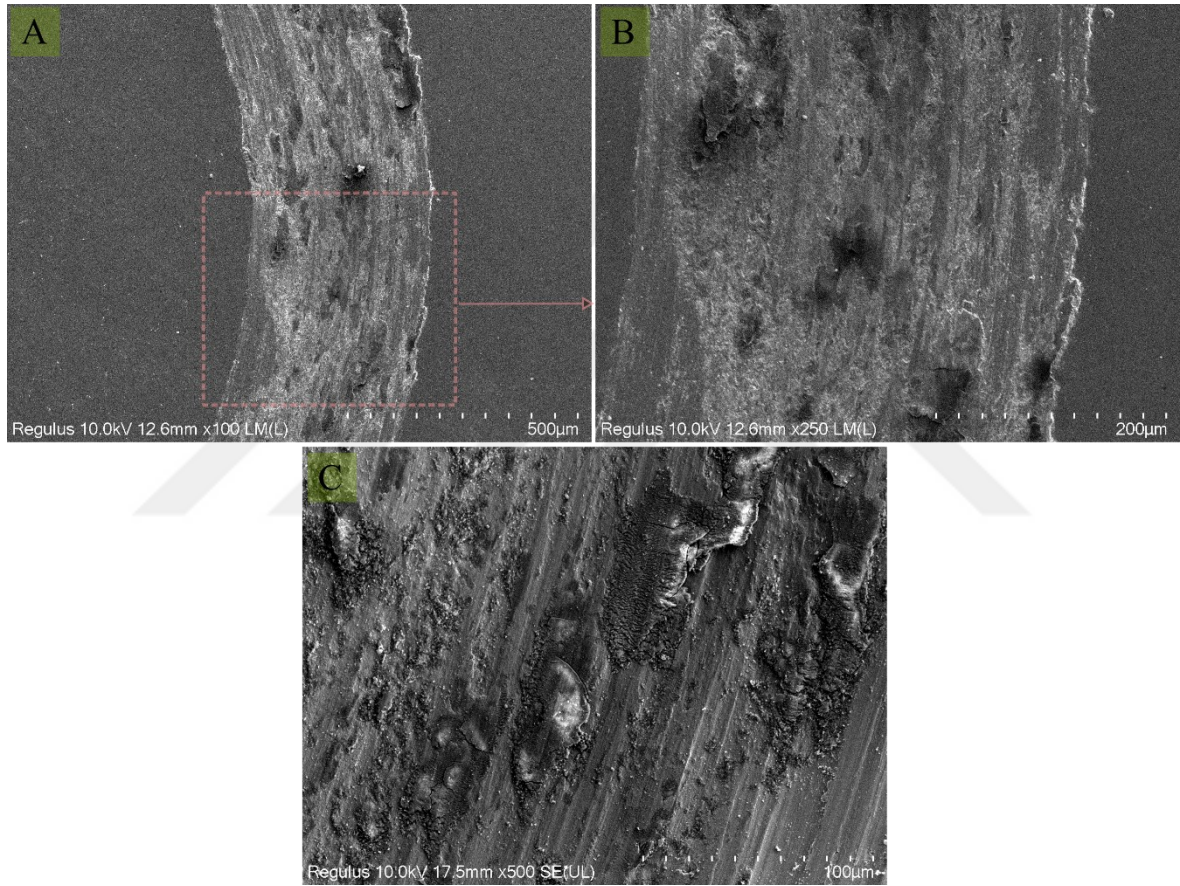
Şekil 5.16 incelendiğinde, HT-0 numunesi  $4,82 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  aşınma oranı değeri ile en düşük aşınma oranına sahip olduğu, buna karşılık HT-3 numunesi  $7,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  en yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Eşit sıcaklıkta ısıtılma işlem gören HT-1 ve HT-2 numuneleri  $0,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  aşınma oranı farkı ile eşit aşınma oranına sahip olduğu varsayılabilir. Eşit sürelerde ısıtılma işlem görmüş olan HT-3 ve HT-1 numunelerinde ise HT-3 numunesi yüzde 19,7 daha yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca her bir numune için ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri kıyaslama amacı ile aynı grafik üzerinde verilmiştir. Bileşenlerde ortalama sürtünme katsayısı en yüksek olan HT-3 numunesi aynı zamanda en yüksek aşınma oranına sahip olduğu ve en küçük ortalama sürtünme katsayısına sahip olan HT-0 numunesi en düşük aşınma oranına sahip. HT-1 ve HT-2 numuneleri ise aynı durumda olduğunu grafik üzerinden söylenebilir.



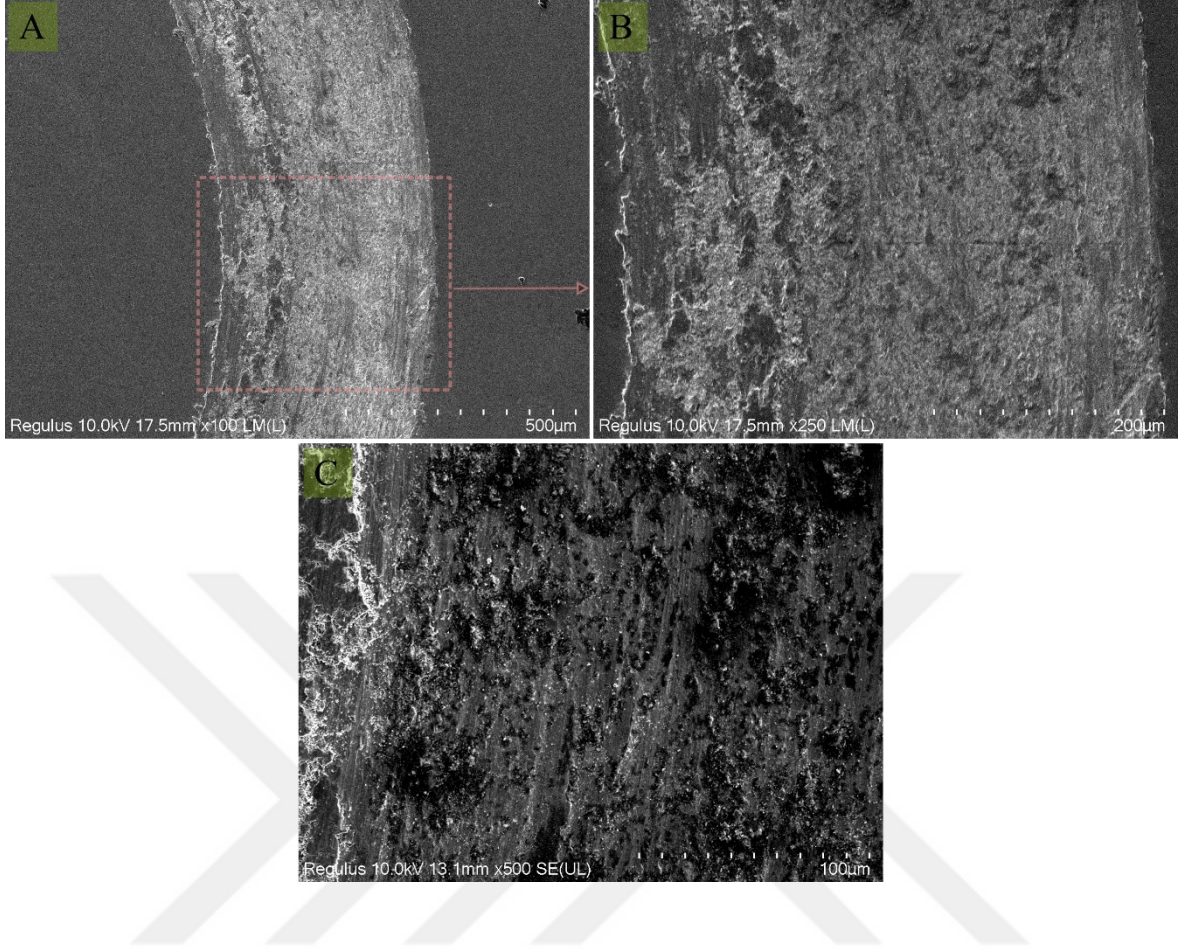
Şekil 5.16. HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numunelerine ait aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayısı

### 5.3.4. Aşınma kanalları SEM görüntüleri ve EDS analizleri

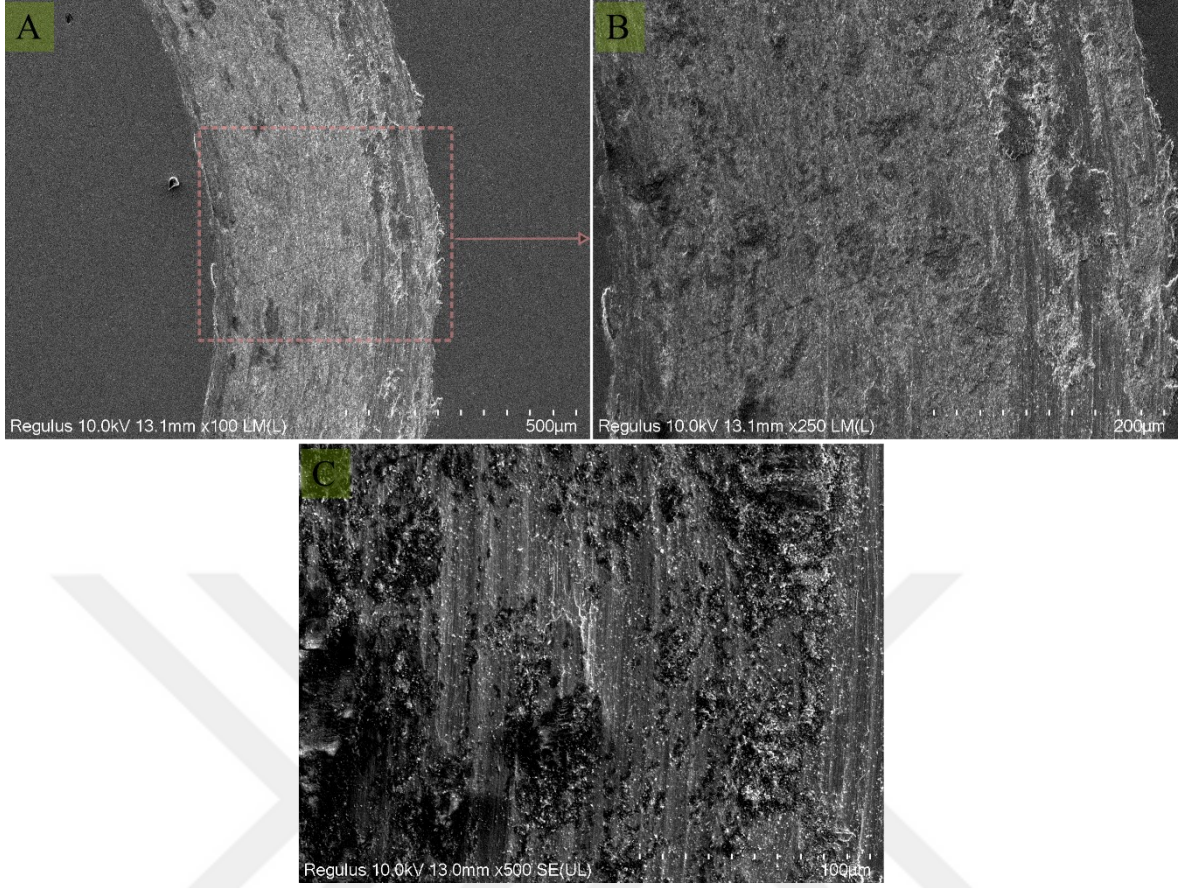
CSM Tribometre aşınma cihazı kullanılarak elde edilen aşınma kanalları FESEM görüntüleme yöntemi ve EDS analizleri ile incelenmiştir. Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 görüntülerinde sırasıyla HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numuneleri için SEM görüntüleri verilmiştir.



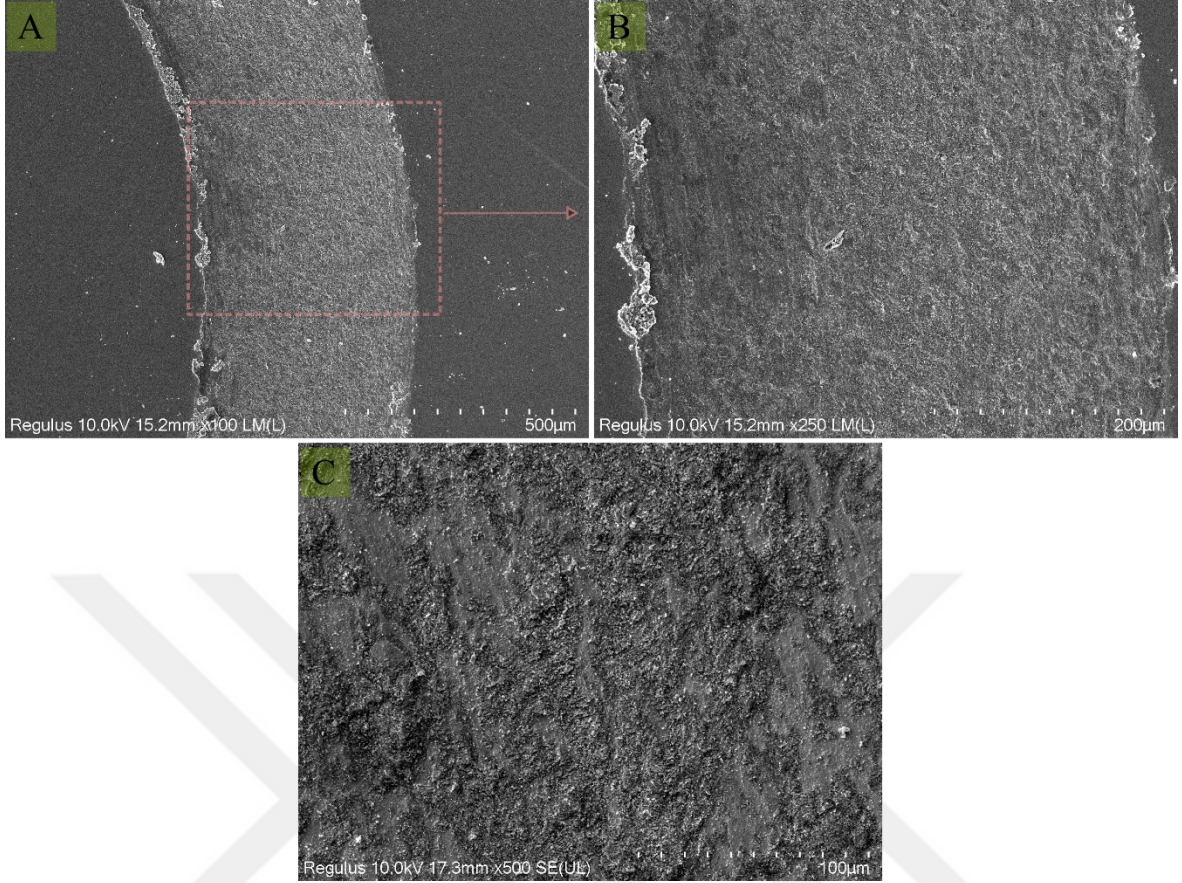
Şekil 5.17. HT-0 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C: 500X.



Şekil 5.18. HT-1 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C: 500X.

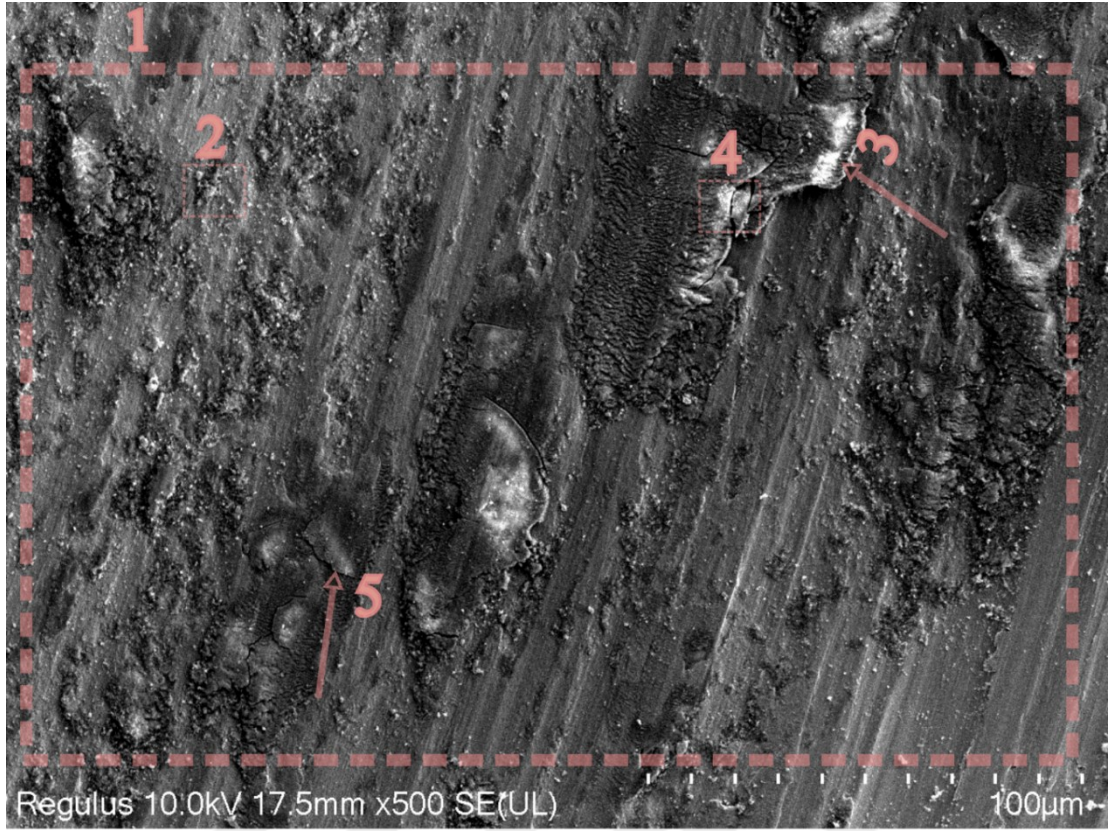


Şekil 5.19. HT-2 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C: 500X.



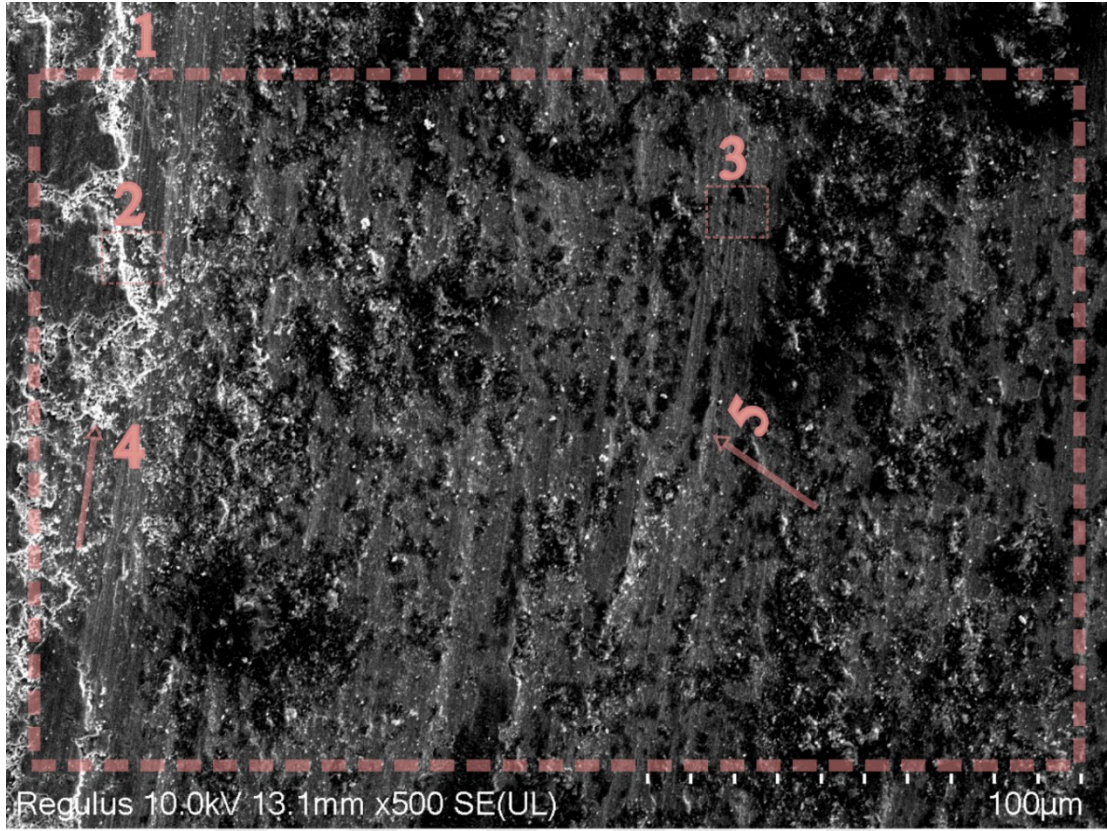
Şekil 5.20. HT-3 numunesi Aşınma kanalı SEM mikroyapı görüntüleri A: 100X, B: 250X, C: 500X.

Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma mekanizmalarını belirlemek amacıyla aşınma kanalları üzerinde EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24 görüntülerinde sırasıyla HT-0, HT-1, HT-2, HT-3 numuneleri için oluşan aşınma kanalları üzerinde yapılan EDS analiz sonuçları sunulmuştur. Elde edilen bu veriler, numuneler arasındaki farklı aşınma mekanizmalarını ve bu mekanizmaların tetikleyici faktörlerini anlamamıza olanak sağlamaktadır.



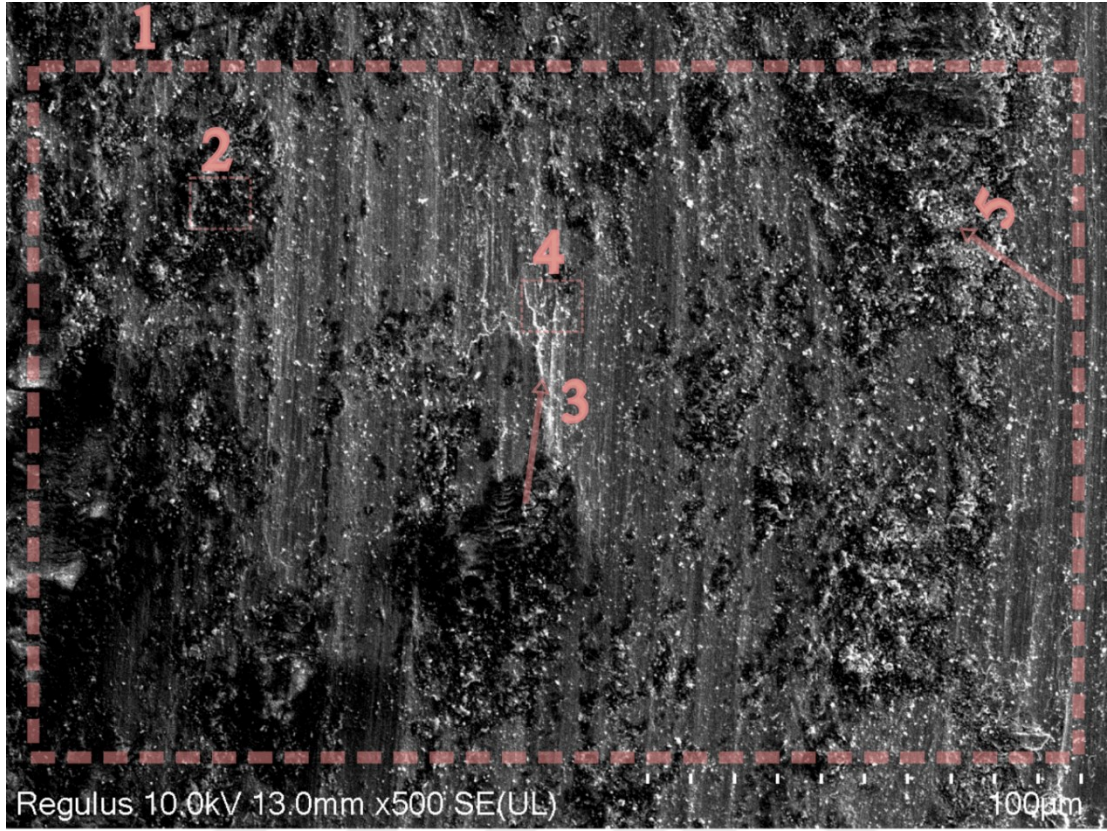
| HT-0    |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |
|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Element | <i>C</i> | <i>O</i> | <i>Cr</i> | <i>Mn</i> | <i>Fe</i> | <i>Ni</i> | <i>Nb</i> | <i>Mo</i> | <i>W</i> | Spektrum |
| Wt%     | 3.75     | 13.1     | 9.32      | 2.36      | 11.2      | 54.7      | 2.85      | 2.7       | 0        | 1        |
|         | 3.35     | 15.6     | 25.5      | 0         | 12.4      | 38.1      | 3.97      | 0         | 1.2      | 2        |
|         | 6.13     | 35.8     | 14.9      | 5.06      | 6.4       | 24.5      | 3.94      | 2.7       | 0.7      | 3        |
|         | 7.73     | 34.8     | 15        | 0         | 10.7      | 29.4      | 1.31      | 1.1       | 0        | 4        |
|         | 4.53     | 17.9     | 10.4      | 0         | 10.9      | 48.2      | 4.81      | 2.4       | 1        | 5        |

Şekil 5.21. HT-0 SEM 100µm aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum element analizi sonucu



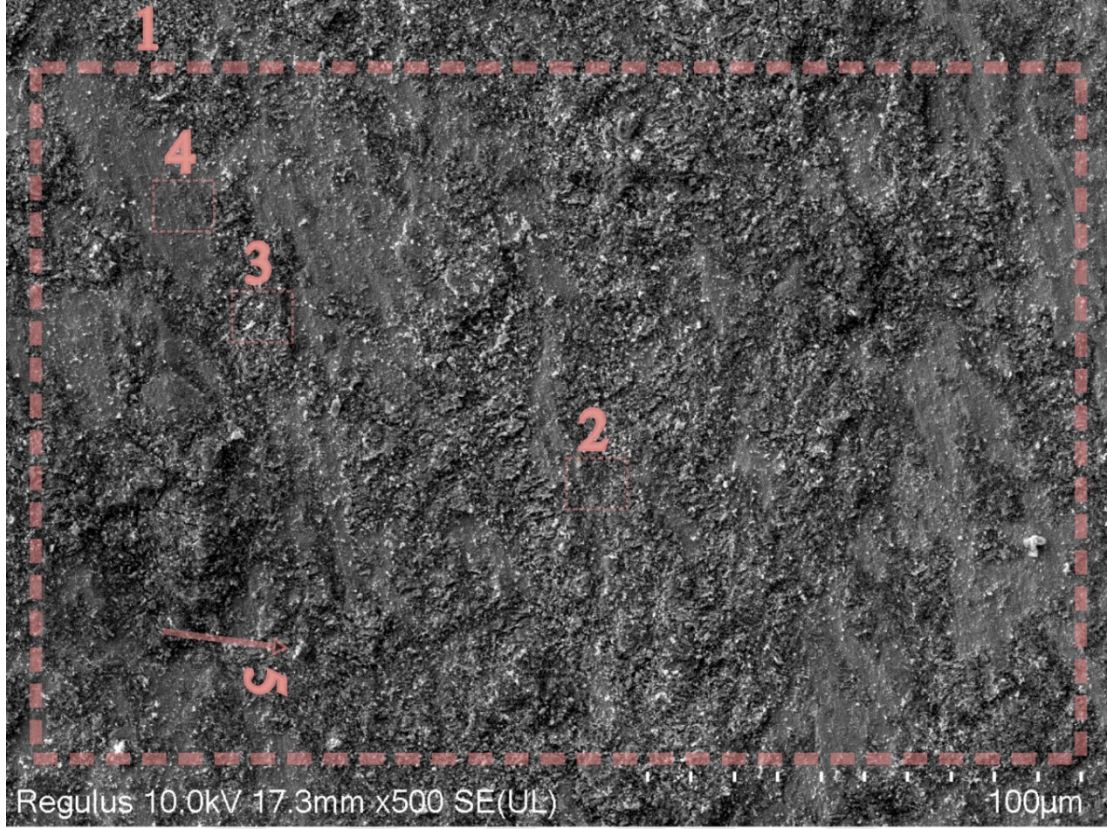
| HT-1    |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |
|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Element | <i>C</i> | <i>O</i> | <i>Cr</i> | <i>Mn</i> | <i>Fe</i> | <i>Ni</i> | <i>Nb</i> | <i>Mo</i> | <i>W</i> | Spektrum |
| Wt%     | 5.29     | 16.1     | 14.6      | 5.3       | 17.8      | 32.7      | 5.46      | 2.7       | 0.1      | 1        |
|         | 4.17     | 12.4     | 12.6      | 0         | 17.4      | 45.8      | 4.01      | 2.2       | 1.3      | 2        |
|         | 3.22     | 5.64     | 15.2      | 5.55      | 17.5      | 45.2      | 4.74      | 3.1       | 0        | 3        |
|         | 2.71     | 11.9     | 12.9      | 3.05      | 15.6      | 47.2      | 4.13      | 2         | 0.6      | 4        |
|         | 9.53     | 22.8     | 9.17      | 2.05      | 12.8      | 39.5      | 3.11      | 1.1       | 0        | 5        |

Şekil 5.22. HT-1 SEM 100μm aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum element analizi sonucu



| HT-2    |      |      |      |      |      |      |      |     |     |          |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|----------|
| Element | C    | O    | Cr   | Mn   | Fe   | Ni   | Nb   | Mo  | W   | Spektrum |
| Wt%     | 3.88 | 12.5 | 14.9 | 0.96 | 9.36 | 52.1 | 3.61 | 2.3 | 0.5 | 1        |
|         | 5.88 | 19.9 | 12.8 | 0    | 11.8 | 42.5 | 3.56 | 2.5 | 1.1 | 2        |
|         | 3.24 | 7.3  | 16.9 | 0    | 14.2 | 53.7 | 3.69 | 1.1 | 0   | 3        |
|         | 2.79 | 2.59 | 13.8 | 0.85 | 17.9 | 55.6 | 3.72 | 2.2 | 0.5 | 4        |
|         | 2.37 | 18.7 | 14   | 0    | 13.9 | 45.1 | 3.54 | 1.8 | 0.6 | 5        |

Şekil 5.23. HT-2 SEM 100μm aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum element analizi sonucu



| HT-3    |      |      |      |      |      |      |      |     |     |          |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|----------|
| Element | C    | O    | Cr   | Mn   | Fe   | Ni   | Nb   | Mo  | W   | Spektrum |
| Wt%     | 3.38 | 19.2 | 10.6 | 3.54 | 13.6 | 43.2 | 3.28 | 2.6 | 0.7 | 1        |
|         | 4.33 | 26.6 | 12.1 | 1.18 | 13.1 | 36   | 3.1  | 2.6 | 1.1 | 2        |
|         | 4.07 | 25.6 | 8.38 | 2.76 | 11.2 | 43.9 | 1.48 | 2.6 | 0   | 3        |
|         | 3.8  | 12.7 | 18.1 | 3.24 | 14.7 | 37.1 | 5.19 | 3.1 | 2.1 | 4        |
|         | 8.98 | 44.8 | 9.5  | 0    | 12.9 | 16   | 4.81 | 2.9 | 0   | 5        |

Şekil 5.24. HT-3 SEM 100µm aşınma kanalı mikroyapı görüntüsü ve beş farklı spektrum element analizi sonucu

Aşınma kanalı SEM görüntüleri, Şekil 5.17 ile Şekil 5.20'ye kadar olan görseller incelendiğinde, aşınma yönünde oluşan izlerin tüm numunelerde gözlemlendiği görülmektedir. Bu izlere dayanarak, numunelerin abrasif aşınmaya maruz kaldığını belirtmek mümkündür. HT-3 numunesi 5.20 B SEM görselinde işlem kaynaklı talaş görselde görülmektedir. Bu numunede görünen talaş boyut ve oran olarak diğer numunelerde görülmemektedir. Ayrıca, Şekil 5.21, 5.22, 5.23 ve 5.24 EDS analizlerine dayanarak, tüm numunelerde belirgin bir oksijen element içeriğinin bulunduğu gözlemlenmektedir. Bu bilgiler ışığında, numunelerde oksidatif aşınmanın meydana geldiği söylenebilir. Bu verilere

dayanarak, tüm numunelerde abrazif ve oksidatif aşınma mekanizmalarının etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretilen yüksek mukavemetli nikel bazlı süper alaşım Inconel 718'in ısıtıl işlem sonrası mikroyapı, mekanik özellikler ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen bulguları alt başlıklar halinde özetlenmiştir:

- **Mikroyapısal Analizler ve Isıl İşlemin Etkisi:** Bu çalışmanın ilk aşamasında, SLE yöntemi ile üretilen Inconel 718 numunelerinin farklı ısıtıl işlemleri altındaki mikroyapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleme, numunelerin katmanlı yapıdaki evrimini ortaya koymuştur. Özellikle, ısıtıl işlemin katmanlı yapı üzerindeki etkileri belirlenmiş ve farklı ısıtıl işlem parametrelerinin mikroyapısal değişimlere olan etkileri açıkça görülmüştür. Sonuç olarak ısıtıl işlem görmemiş numunedeki optik mikroskop ve SEM görüntülerinde görünen ergime havuzları ve parabolik yay ısıtıl işlem görmüş numunelerde kaybolmaya başladığı görülmektedir. Ayrıca SEM incelemelerine göre, tüm numunelerde Laves,  $\delta$  (Delta) ve  $\gamma$  (Gamma) fazları belirlenmiş ve uygulanan ısıtıl işlemin fazların dağılımına etki ettiği tespit edilmiştir.
- **Mekanik Özellikler ve Sertlik Değerleri:** Çalışmanın ikinci aşamasında, farklı ısıtıl işlem rejimlerine tabi tutulan numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sertlik testleri, numunelerin sertlik profillerini belirlemiş ve ısıtıl işlem görmemiş numunenin en yüksek sertliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur (HT-0). Isıtıl işlem görmüş olan HT-3 numune ise en düşük sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Diğer ısıtıl işlem görmüş numunelerin sertlik değerlerindeki düşüş, ısıtıl işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisini göstermiştir. Bu bilgiler ışığında solüsyona alma ısıtıl işlemi sonucu SLE ile üretilmiş olan parçalarda sertlik değeri düşmekte olduğu sonucuna varılabilmektedir.
- **Aşınma Davranışları ve Sürtünme Analizleri:** Araştırmanın üçüncü aşamasında, numunelerin aşınma davranışları ve sürtünme özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucu olarak HT-0 numunesi 0,67 ortalama sürtünme katsayısı, HT-1 numunesi ortalama 0,78, HT-2 numunesi ortalama 0,71 ve HT-3 numunesi ortalama 0,80 ortalama sürtünme katsayısında ölçülmüştür. HT-0 numunesi en düşük ortalama

sürtünme katsayısı ve HT-3 en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ölçülmüştür. Aşınma alanı hesabı sonucu olarak ise HT-3 numunesi en büyük ve HT-1 numunesi is en küçük aşınma alanında ölçülmüştür. Bu bilgiler ışığında HT-0 numunesi  $4,82 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  aşınma oranı değeri ile en düşük aşınma oranına sahip olduğu, buna karşılık HT-3 numunesi  $7,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  en yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Tüm bu ölçüm sonuçları ve hesaplamalar ışığında solüsyona alma ısıtma işlemi sonucu sertlik değeri düşüşüne paralel olarak aşınma oranı yükselmektedir.

- Kimyasal Analizler ve Elementel Dağılım: Son olarak, numunelerin kimyasal bileşimi ve elementel dağılımı Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizleri ile belirlenmiştir. Aşınma kanalları üzerinde gerçekleştirilen EDS analizleri, abrazif ve oksidatif aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu ve aşınma yönündeki iz ve oksijen içeriğinin belirgin olarak saptandığını göstermiştir.
- Gelecekteki çalışmalarda: Faz analizleri aşamasında oluşan fazlar hakkında detaylı yorum yapılabilmesi için TEM ve XRD analizleri sonucu faydalı olabilecektir. Ayrıca numune analizlerine ek olarak aşınma analizi sırasında kullanılan aşındırıcı elemanın SEM ve EDS analizleri tamamlayıcı olacaktır. SLE üretim yöntemi sonucu doğal bir ısıtma işlem söz konusu olmakla birlikte parçanın farklı yüzeylerinde ve farklı üretim yönlerinde farklı mekanik özellikler gösterecek olanağının farkında olarak test ve deneyler yapılması araştırma doğruluğu ve sonucunu güçlendirecektir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- SLM Solutions., 2024, Metal additive manufacturing for tooling. Retrieved June 10, 2024, from <https://www.slm-solutions.com/industries/tooling/>
- Alami, A. H., Olabi, A. G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A., 2023, Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal/Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102516.
- Azar, P., 2020, Heat treatment of nickel-based superalloys. *ASM International*, 22-35.
- Balbaa, M., Ghasemi, A., Fereiduni, E., Elbestawi, M., Jadhav, S. D., & Kruth, J., 2021, Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10mg alloy. *Additive Manufacturing*, 37, 101630.
- Sahu, A. K., & Bag, S., 2021, Design of a double aging treatment for the improvement of mechanical and microstructural properties of pulse micro-plasma arc welded alloy 718. *Journal of Materials Science*.
- Caliari, F.R., Candioto, K.C.G., Reis, D.A.P., Couto, A.A., Moura Neto, C. De, 2011, Study of the mechanical behavior of an inconel 718 aged superalloy submitted to hot tensile tests *SAE Tech. Pap.*, SAE International
- Cao, G., Sun, T., Wang, C., Li, X., Liu, M., Zhang, Z., Hu, P., Russell, A., Schneider, R., Gerthsen, D., Zhou, Z., Li, C., & Chen, G., 2018, Investigations of  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  and  $\delta$  precipitates in heat-treated Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Characterization*, 136, 398–406.
- Cellcore3d, Monolithic 3D-Printed Rocket Engine, 24.01.2024, <https://cellcore3d.com/en/#1545332928086-ebe2b831-0360>.
- Childs, T., & Hauser, C., 2005, Raster scan selective laser melting of the surface layer of a tool steel powder bed. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 219(4), 379–384.
- Chlebus, E., Gruber, K., Kuźnicka, B., Kurzac, J., & Kurzynowski, T., 2015, Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Materials Science & Engineering A*, 639, 647-655.
- Cury, P. R., Kasatkin, A. V., Pöhl, E. R., 2014, Influence of the aging temperature on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718, 599, 354-362.
- Das, S. K., Lasalle, J., Goldenberg, J., & Lu, J. 2003, Development Of Advanced Materials by Aqueous Metal Injection Molding. In *Elsevier eBooks* (pp. 69–78).

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Davis, J. R., 1997, ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials. ASM International, 256-723.
- Davis, J. R., 2001, ASM specialty handbook: nickel, cobalt, and their alloys. ASM International, 342-527.
- Davoodi, E., Montazerian, H., Mirhakimi, A. S., Zhianmanesh, M., Ibadode, O., Shahabad, S. I., Esmaeilizadeh, R., Sarikhani, E., Toorandaz, S., Sarabi, S. A., Nasiri, R., Zhu, Y., Kadkhodapour, J., Li, B., Khademhosseini, A., & Toyserkani, E., 2022, Additively manufactured metallic biomaterials. *Bioactive Materials*, 15, 214–249.
- Deng, D., 2018, Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties, Linköping University, 99-312.
- Erdem, A., 2024, Aşınma: Malzeme Yüzeyinin Zamanla Deformasyon Süreci. *Malzeme Mühendisliği Araştırmaları Dergisi*, 10(2), 45-56.
- Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E. S., Stamp, R., & Sutcliffe, C., 2012, Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 355–364.
- Frazier, W. E., 2014, Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
- Furrer, D., Venkatesh, V., Zhang, F., Gynther, D., Asare, T., Novikov, D., & Burlatsky, S., 2014, Computational modeling and simulation of alloy 718. In 8th International Symposium on Superalloy (Vol. 718, pp. 81-94).
- Geddes, B., Leon, H., Huang, X., 2010, Superalloys: Alloying and Performance. ASM International.
- Ghiban, B., Elefterie, C. F., Guragata, C., & Bran, D., 2018, Requirements of Inconel 718 alloy for aeronautical applications. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1932, No. 1). AIP Publishing.
- Ghosh, S., Singh, V., Murty, K. S., 2015, Influence of aging temperature on the microstructure and Mechanical properties of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 638, 296-306.
- Ghosh, S., Singh, V., Murty, K. S., 2015, Influence of aging temperature on the microstructure and Mechanical properties of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 638, 296-306.
- Ghosh, S., Singh, V., Murty, K. S., 2015, Influence of solution annealing temperature on the hot deformation behavior of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 622, 81-90.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Gong, R., Liu, C. T., 2015, Strengthening mechanisms of superalloy Inconel 718 at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering*, 640, 52-62.
- Gonzalez-Macia, L., & Killard, A. J., 2017, Screen printing and other scalable point of care (POC) biosensor processing technologies. In Elsevier eBooks (pp. 69–98).
- He, J., Li, N., Makineni, S. K., Zhao, Y., Liu, W., Wang, L., Song, M., 2022, Effects of minor Nb alloying on the thermal stability and mechanical responses of a  $\gamma/\gamma'$  type high-entropy alloy with high Fe content. *Materials Science and Engineering: A*, 851, 143610.
- Holmberg, K., Erdemir, A., 2017, Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions, *Friction*, 5(3), 263-284.
- Hosseini, E., & Popovich, V. A., 2019, A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 30, 100877.
- Huang, L., Cao, Y., Li, G., & Wang, Y., 2020, Microstructure characteristics and mechanical behaviour of a selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology/Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2440–2454.
- Huang, W., Yang, J., Yang, H., Jing, G., Wang, Z., & Zeng, X., 2019), Heat Treatment of Inconel 718 Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Properties, *Materials Science & Engineering A*, 750, 98-107.
- Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Haq, M. I. U., 2022, 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 33–42.
- Jiao, L., Chua, Z. Y., Moon, S. K., Song, J., Bi, G., & Zheng, H., 2018, Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. *Nanomaterials*, 8(8), 601.
- Johnson, R. K., Smith, T. L., 2022, Cavitation wear in hydraulic systems: Mechanisms and mitigation strategies. *Tribology International*, 40(5), 212-225.
- Kaya, G., Yıldız, F., Korkmaz, İ. H., Kaymaz, İ., Yetim, A., Ergüder, T. O., & Şen, Ç., 2023, Effects of process parameters on selective laser melting of Ti6Al4V-ELI alloy and parameter optimization via response surface method. *Materials Science and Engineering*, 885, 145581.
- Kear, G., Babu, J. V., 2017, Gamma precipitate size and spacing dependence of elevated temperature stress-rupture life in Inconel 718, 695, 195-202.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kusabiraki, K., Takasawa, Y., Ooka, T., 1992, The growth of  $\gamma'$  and  $\gamma''$  precipitates in nickel-base superalloys. *Tetsu-to-Hagane*, 78(12), 1854-1861.
- Lakkala, P., Munnangi, S. R., Bandari, S., & Repka, M. A., 2023, Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutics*. X, 5, 100159.
- Li, X., Shi, J. J., Wang, C. H., Cao, G. H., Russell, A. M., Zhou, Z. J., ... & Chen, G. F., 2018, Effect of heat treatment on microstructure evolution of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 639-649.
- Li, X., Shi, J., Wang, C., Cao, G., Russell, A., Zhou, Z., Li, C., & Chen, G., 2018, Effect of heat treatment on microstructure evolution of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 639–649.
- Liang, H., Wang, W., Zeng, J., Song, M., Chang, S., & Zhu, C., 2023, Effect of scanning speed and laser power on formability, microstructure, and quality of 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*/Journal of Materials Research and Technology, 25, 3189–3199.
- Liu, H., Liu, H., Zhu, C., & Parker, R. G., 2020, Effects of lubrication on gear performance: A review. *Mechanism and Machine Theory*, 145, 103701.
- Liu, P., Hu, J., Sun, S., Feng, K., Zhang, Y., & Cao, M., 2019, Microstructural evolution and phase transformation of Inconel 718 alloys fabricated by selective laser melting under different heat treatment. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 226–232.
- Liu, X., Wang, Q., Li, S., Li, D., 2018, Molecular Dynamics Simulation of Wear Behavior in Inconel 718, 398–399, 157–163.
- McLouth, T. D. (2020). Microstructural control and elevated temperature mechanical properties of inconel 718 manufactured by selective laser melting. University of California, Los Angeles.
- Mohanty, S., Maurya, H. S., & Prashanth, K. G., 2023, Selective laser melting of Inconel 718: Effect of thermal treatment on mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*.
- Mostafa, A., Rubio, I. P., Brailovski, V., Jahazi, M., Medraj, M., 2017, Structure, texture and phases in 3D printed IN718 alloy subjected to homogenization and HIP treatments. *Metals*, 7(6), 1-23.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Nagaraj, C., Singh, A. K., Murthy, G. S., Kumar, K. M., 2021, The effect of aging temperature on the mechanical properties of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 1209-1218.
- Nagaraj, C., Singh, A. K., Murthy, G. S., Kumar, K. M., 2021, The effect of solution annealing temperature on creep behavior of Inconel 718 superalloy. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 150, 107
- Pfaffenberger, N., Bülte, C. A., Güther, K., 2013, Modeling  $\gamma/\gamma'$  precipitation kinetics in a superalloy using the phase-field method. *Computational Materials Science*, 81, 382-390.
- Popovich, V.A., Borisov, E.V., Popovich, A.A., Sufiiarov, V.Sh., Masaylo, D.V., & Alzina, L., 2017, Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting. *Materials & Design*, 131, 12-22.
- Rao, G. A., Srinivas, M., & Sarma, D. S., 2004, Effect of solution treatment temperature on microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel\* 718. *Materials science and technology*, 20(9), 1161-1170.
- Reed, R. C., 2006, *The superalloys Fundamentals and processing*-Cambridge University Press 500-612.
- Reed, R. C., Warnes, W. H., Evans, M. G., 2000, *Superalloys Past, present, and future*. *Materials Science and Engineering*, 289, 187-202.
- Sahu, A. K., Bag, S. 2021, Design of a double aging treatment for the improvement of mechanical and microstructural properties of pulse micro-plasma arc welded alloy 718. *Journal of Materials Science*.
- Sanusi, A. , Adeoye, I., Opeyemi, O., Ademola, J., & Oshenye, S., 2016, *Nickel Based Super Alloys For Gas turbine Applications*. PhD Thesis Univ. Ottawa, no. November.
- Shahwaz, M., Nath, P., & Sen, I., 2022, A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based superalloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 907, 164530.
- Smith, G. D., & Patel, S. J., 2005, The role of niobium in wrought precipitation-hardened nickel-base alloys. *Superalloys*, 718, 625-706.
- Smith, J. D., Brown, A. B., 2019 Understanding wear mechanisms for material design: A review. *Materials Design*, 35(1), 124-137.
- Smith, M., Bichler, L., Yannacopoulos, S., Wanjara, P., 2022, Advancements in Inconel 718 for Aerospace Applications: A Comprehensive Review, 54, 297-302.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Song, H., He, X., Zhao, W., Sun, W., 2015, Effects of aging temperature on  $\gamma''$  and  $\delta$  precipitates in Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 622, 129-135.
- Song, H., Liu, W., 2016, Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 658, 171-177.
- Sreekanth, S., Hurtig, K., Joshi, S. V., Andersson, J., 2022, Effect of process parameters and heat treatments on Delta-phase precipitation in directed energy deposited alloy 718. *Welding in the World*, 66(5), 863–877.
- Sufiiarov, V., Popovich, A., Борисов, Е. В., Polozov, I., Masaylo, D., & Orlov, A., 2017, The effect of layer thickness at selective laser melting. *Procedia Engineering*, 174, 126–134.
- Sui, S., Tan, H., Chen, J., Zhong, C., Li, Z., Fan, W., ... & Huang, W., 2019, The influence of Laves phases on the room temperature tensile properties of Inconel 718 fabricated by powder feeding laser additive manufacturing. *Acta Materialia*, 164, 413-427.
- Sunay, N., 2022, Analysis and Experimental Verification of the Production Processes of Inconel 718 Parts Produced by Selective Laser Melting Method using Finite Element Method, 14.
- Sunay, N., Kaya, M., Yılmaz, M., S., Kaynak, Y., 2023, Effects of heat treatment on Surface integrity and wear performance of Inconel 718 alloy fabricated by laser powder bed fusion process additive manufacturing under different laser power and scanning speed parameters, 4.
- Suryakumar, S., & Somashekara, M. A., 2013, Manufacturing of functionally gradient materials by using weld-deposition. In Elsevier eBooks (pp. 505–508).
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Eliaz, N., 2021, Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271–295.
- Tofail, S. a. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. M., & Charitidis, C. A., 2018, Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37.
- Tucho, W. M., & Hansen, V., 2019, Characterization of SLM-fabricated Inconel 718 after solid solution and precipitation hardening heat treatments. *Journal of materials science*, 54, 823-839.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Tucho, W. M., Cuvillier, P., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V., 2017, Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. *Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing/Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 689, 220–232.
- Tucho, W. M., Cuvillier, P., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V., 2017, Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 689, 220-232.
- Volpato, G. M., Tetzlaff, U., & Fredel, M. C., 2022, A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys. *Additive Manufacturing*, 55, 102871.
- Walker, P. G., Murphy, W. M., 2013, Nickel-based superalloys. *Materials Science and Technology*, 17(8), 951-9.
- Wang, W., Chen, Z., Lu, W., Meng, F., & Zhao, T., 2022, Heat treatment for selective laser melting of Inconel 718 alloy with simultaneously enhanced tensile strength and fatigue properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 913, 165171.
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S., 2017, Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production.
- Yasa, E., 2021, Selective laser melting. In Elsevier eBooks (pp. 77–120).
- You, X., Tan, Y., Shi, S., Yang, J., Wang, Y., Li, J., & You, Q., 2017, Effect of solution heat treatment on the precipitation behavior and strengthening mechanisms of electron beam smelted Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering*, 689, 257–268.
- Zhang, D., Niu, W., Cao, X., Liu, Z., 2015, Effect of Standard Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melting Manufactured Inconel 718 Superalloy, 644, 32-40.
- Zhang, Q., Zhang, J., Zhuang, Y., Lu, J., & Yao, J. 2020, Hot corrosion and mechanical performance of repaired Inconel 718 components via laser additive manufacturing. *Materials*, 13(9), 2128.