

Bilyalı Dövme ve Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımının  
Aşınma Davranışının İncelenmesi

Övünç Çeliker

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2018

Investigation of Wear Behavior of Inconel 718 With  
Shot Peening and Cryogenic Treatment

Övünç Çeliker

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

August 2018

Bilyalı Dövme ve Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma  
Davranışının İncelenmesi

Övünç Çeliker

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Ulutan

Ağustos 2018

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Övünç ÇELİKER'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Bilyalı Dövme ve Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

**İkinci Danışman** : -

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ümit ER

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKBAYIR

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

## **ETİK BEYAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Mustafa ULUTAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bilyalı Dövme ve Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik 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. 27/08/2018

Övünç ÇELİKER

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada, Inconel 718 havacılık malzemesinin farklı parametrelerde bilyalı dövme ve kriyojenik işlem sonrasında sertlik, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. 10 farklı numuneden 1 tanesi işlem görmemiş, geriye kalan 9 adet üçerli gruplar halinde 3 farklı parametrede bilya ile dövülmüştür. Her bir parametre seti içerisindeki birer adet numuneye derin ve sıg kriyojenik işlem uygulanmıştır. Yüzey işlemi gören numunelerde kalıntı gerilmeler XRD yardımıyla ölçülmüştür. Bilyalı dövme sonrasında kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sertlik ve sürtünme katsayısı açısından kısmi değişiklikler elde edilmiştir. Deneyler sonucunda 12 Almen değerinde bilyalı dövme ve sıg kriyojenik işlem uygulanmış numune aşınma direnci açısından en iyi sonucu vermiştir. Çalışma sonucunda kalıntı gerilme ile aşınma arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Inconel 718, Bilyalı Dövme, Kriyojenik İşlem, Aşınma, Kalıntı Gerilme

## SUMMARY

In this study, hardness, surface roughness, residual stress and wear behavior of Inconel 718 aerospace material with different surface treatment by shot peening and cryogenic process have been evaluated. There are 10 samples in the study, 1 without any treatment and rest is divided into 3 groups for 3 sets of shot peening. In every shot peening parameter set, one sample remained the same while the other two have further process on DCT and SCT. Residual stresses were measured by XRD. Friction coefficient and hardness values of the samples, which have cryogenic treatment after shot peening, were changed slightly. Results of the study show that shot peening with 12 Almen and shallow cryogenic combination gave the best result for wear resistance. Results also show that there is a linear relation with residual stresses and wear resistance.

**Keywords:** Inconel 718, Shot Peening, Cryogenic Process, Wear, Residual Stress

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatım süresince, gerek tez çalışmam dahilinde ve gerekse tez çalışmam haricinde her türlü yardımlarını ve değerli bilgilerini esirgemeyen, çok değerli hocam, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa ULUTAN 'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deney numunelerinin hazırlanması, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve sertlik ölçümlerinde desteklerini esirgemeyen GKN Driveline Eskişehir ailesine teşekkür ederim.

Ham malzeme temini konusunda desteğini esirgemeyen, yaklaşık 6 yıl süresince görev yaptığım eski işyerim TEI ailesine ve Sayın Pınar GÜNAYDIN'a teşekkür ederim.

Bilyalı dövme işlemi için desteğini esirgemeyen Sigma Shot Peening ailesine ve sayın Şükrü İĞDECI'ye teşekkür ederim.

Kalıntı Gerilim Ölçümü konusunda gösterdikleri çaba ve verdikleri destek için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme ve Mükemmelliyet Merkezi'ne (ATÜMEK) ve Lisans eğitimimde tez danışmanlığımı yapan değerli hocam Besim BARANOĞLU'na teşekkür ederim.

Kriyojenik İşlem konusunda verdiği destekten dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Hakan GAŞAN 'a teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım süresince olduğu gibi lisansüstü öğrenimim süresince de maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme, aramıza katılmasıyla hayatımı daha da anlamlandıran oğlum Kerem'e teşekkürlerimi sunarım.

Övünç ÇELİKER



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2.BİLYALI DÖVME YÖNTEMİ</b> .....	3
2.1. Parçacık Püskürtme İle Dövme Teknolojisi .....	3
2.2. Bilyalı Dövme Yöntemi.....	3
2.3. Bilyalı Dövme Parametreleri ve Özellikleri.....	8
2.3.1. Bilya Çapı ve Malzemesi.....	9
2.3.2. Püskürtme Debisi .....	10
2.3.3. Püskürtme Basıncı.....	10
2.3.4. Püskürtme Mesafesi .....	11
2.3.5. Püskürtme Açısı .....	11
2.3.6. Test Şeridi .....	11
<b>3. KRİYOJENİK İŞLEM</b> .....	12
<b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	14
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	20
5.1. Çalışmanın Kapsamı .....	20
5.2. Çalışmada Kullanılan Materyal .....	20
5.3. Bilyalı Dövme Cihazı .....	23

**İÇİNDEKİLER ( devam )**

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.4. Kriyojenik İşlem Cihazı .....	24
5.5. Deney Parametreleri .....	24
5.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü .....	25
5.7. Sertlik Ölçümü .....	26
5.8. Kalıntı Gerilme Ölçümü .....	27
5.9. Aşınma Testleri .....	30
5.10. EDS ve SEM Analizleri .....	31
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>33</b>
6.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları .....	33
6.2. Yüzey Sertliği Ölçüm Sonuçları .....	34
6.3. Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	34
6.4. Aşınma Deneyi Sonuçları .....	38
6.5. SEM ve EDS Analiz Sonuçları .....	38
6.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi .....	44
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>51</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tornalanmış Yüzey ve Bilya ile Dövülmüş Yüzey .....	3
2.2. Bilyalı Dövme İşlemi .....	4
2.3. Almen Şerit Ölçüleri .....	5
2.4. Almen Şerit Tutucu .....	6
2.5. Almen Testi Sonrası Almen Şeridinde Oluşan Deformasyon .....	6
2.6 Almen Yoğunluk Ölçüm Cihazı .....	7
2.7. Kapsama Oranı ve Almen Yoğunluğu'nun süre ile ilişkisi .....	8
2.8. Bilyalı Dövme Prosesi .....	9
2.9. Standart Bilya Çapları .....	10
3.1. Derin ve Sığ Kriyojenik İşlemlere Ait Örnek Çevrim Süreleri .....	13
5.1. Bilyalı Dövme Cihazı .....	23
5.2. Kriyojenik İşlem Cihazı .....	24
5.3. Mitutoyo SJ-210 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı .....	26
5.4. Sertlik Ölçüm Cihazı .....	26
5.5. Sertlik Ölçüm Cihazı .....	26
5.6. XRD Ölçüm Cihazı (Dış Görünüm) .....	28
5.7. Deney Numunelerinin XRD Cihazı İçinde Yerleşimi .....	29
5.8. XRD Ölçüm Cihazı (İç Görünüm) .....	29
5.9. XRD Cihazına ait Temel Ekipmanlar ve Eksenler .....	30
5.10. CSM Tribometer Aşınma Test Cihazı .....	31
5.11. JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu .....	32
6.1. Bilyalı Dövme Öncesi Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü .....	33
6.2. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü .....	33
6.3. 2 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	35

## ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.4. 3 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	36
6.5. 4 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	36
6.6. 5 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	36
6.7. 6 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	36
6.8. 7 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	37
6.9. 8 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	37
6.10. 9 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	37
6.11. 10 No'lu Numuneye Ait Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	37
6.12. İşlem yapılmamış 1 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	39
6.13. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 2 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	39
6.14. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış 3 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	40
6.15. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş, kriyojenik işlem uygulanmamış 4 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	40
6.16. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 5 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	41
6.17. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış 6 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	41

**ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.18. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş, kriyojenik işlem uygulanmamış 7 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	42
6.19. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 8 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	42
6.20. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış 9 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	43
6.21. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş, kriyojenik işlem uygulanmamış 10 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi .....	43
6.22. Numunelerin Kalıntı Gerilme Değerleri .....	45
6.23. Numunelerin Aşınma Oranları .....	46

## ÇİZELGELGER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.1. Inconel 718 malzemenin kimyasal bileşimi .....	22
5.2. Inconel 718'in Fiziksel ve Mekanik Özellikleri .....	22
5.3. Deney Matrisi .....	24
6.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları .....	33
6.2. Yüzey Sertliği Ölçüm Sonuçları .....	34
6.3. Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları .....	34
6.4. Aşınma testi sonuçları .....	38
6.5. Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Tüm Ölçüm ve Test Sonuçları .....	44

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
Al	Alüminyum
B	Bor
C	Karbon
Cr	Krom
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
Cu	Bakır
Fe	Demir
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N <sub>2</sub>	Azot
Ni	Nikel
Nb	Niobyum
O	Oksijen
P	Fosfor
S	Kükürt
Si	Silisyum
Ta	Talyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ( devam )**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
°C	Santigrat
K	Kelvin
A	Almen
AISI	American Iron and Steel Institute
AMS	Aerospace Material Standards
CW	Cut Wire
DCT	Derin Kriyojenik İşlem
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
HV	Vickers Sertliği
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
NOCT	Kriyojenik İşlem Görmemiş
SCT	Sığ Kriyojenik İşlem
SEM	Scanning Electron Microscope
SP1	Bilyalı Dövme 1. Parametre Seti
SP2	Bilyalı Dövme 2. Parametre Seti
SP3	Bilyalı Dövme 3. Parametre Seti
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rz	Ortalama Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü
XRD	X-Ray Diffraction



## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Gelişen teknoloji ve artan müşteri istekleri nedeniyle yeni malzemeler ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesi işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılan malzemelerden ve süreçlerden beklenti, artan talebin karşılanması ve maliyetlerin düşürülmesine yöneliktir. Kara ve hava araçlarında enerji tasarrufu ve faydalı yükün artırılabilmesi için gelişen malzeme teknolojisinin yardımıyla ağırlık azaltma çalışmaları da hız kazanmıştır (Hutmann, 2002). Metal malzemelerde yeni alaşımların bulunmasının yanı sıra, malzemenin mekanik özelliklerini arttırıcı ısıtma işlemi, kaplama, bilya ile dövme, kriyojenik işlemler gibi bir çok yöntem ile maliyet, ağırlık azaltma ve ömrün maksimum hale getirilmesi yaygın yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak malzemelerin mukavemet, yüksek çevrim yorulma dayanımı, düşük çevrim yorulma dayanımı, aşınma direnci gibi birçok mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Özellikle havacılık sektöründe imalat sonrasında yüzey işlemleri kullanılarak parçaların uzun ömürlü olması için alternatif araştırmalar devam etmektedir (Konig, 2002).

Bilyalı dövme yöntemi (shot peening) malzemenin sert bilyalar ile yüzeyin mikro seviyede deforme edilerek, yüzeyde kontrol edilebilir bir gerilme oluşturulmasıyla malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi işlemidir (Wallis, 1991). Bu yöntem bir çok metal alaşımına uygulanabilmektedir. Parametreleri belirlendikten sonra işlem oldukça hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bilyalı dövme işleminde anılan temel parametre işlem yoğunluğu ve kapsama oranıdır. Dövme yoğunluğuna etkiyen alt parametreler, bilya çapı, püskürtme hızı, püskürtme mesafesi, püskürtme basıncı, kapsama oranına etkiyen alt parametre ise dövme süresi olarak karşımıza çıkmaktadır (Renaud, 2002) .

Kriyojenik işlem çok düşük sıcaklıklarda yapılan, malzemelerdeki kalıntı gerilmeleri azaltmak, aşınma direncini yükseltmek gibi amaçlarla uygulanan bir işlemdir. 1960'lı yılların sonlarına doğru uygulanmaya başlanmıştır. Temel olarak kriyojenik işlem derin (DCT – Deep Cryogenic Treatment) ve sığ (SCT – Shallow Cryogenic Treatment) olarak 2 farklı yöntem ile yapılır. Temel fark, SCT'nin etkisi daha çok parça yüzeyinde iken, DCT'nin çekirdeğe doğru da etkimesidir. Temel mantık aynı olmakla birlikte proses

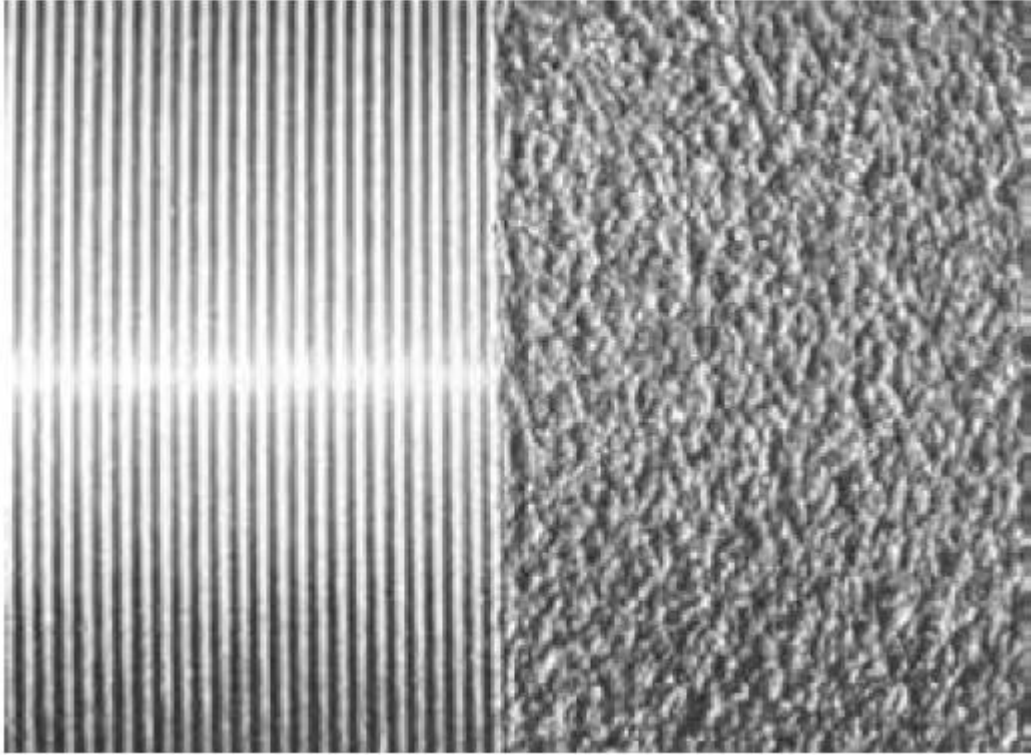
parametreleri çoğunlukla DCT’de parçanın daha uzun süre ve daha düşük sıcaklıkta, SCT’de ise daha kısa süre ve daha yüksek sıcaklıkta durması ile birbirinden ayrılır. SCT’de sıcaklık daha düşük tutularakta proses farklılaştırılabilir. DCT yaklaşık olarak -200 °C sıcaklıklara inilirken, SCT’de -80 ila -160 °C mertebelerinde yapılabilmektedir. Bu işlem, yüksek ömür istenen parçalarda, parça ömrünü arttırır ve takım, kalıp maliyetlerini düşürür (Strano vd., 2015).

Bu çalışmada havacılık sektöründe yaygın kullanımı olan Inconel 718 malzemesine uygulanan 3 farklı parametrede bilyalı dövme ve 2 farklı sıcaklıkta kriyojenik işlem sonrasında sertlik ve aşınma direncine olan etkisi incelenmiştir. Çalışmanın giriş bölümünde, tez çalışmasına konu olan teknolojiler ile ilgili özet bilgi verilmektedir. İkinci bölümde bilyalı dövme, üçüncü bölümde ve kriyojenik işleme ait teknik bilgi verilmiş, dördüncü bölümde literatür araştırması, beşinci bölümde materyal ve yöntem, altıncı bölümde bulgular ve tartışma, yedinci bölümde ise sonuç ve öneriler ele alınmıştır.

## 2. BİLYALI DÖVME YÖNTEMİ

### 2.1. Parçacık Püskürtme İle Dövme Teknolojisi

Malzemelerin yüzeylerine yüksek hızda kontrollü bir şekilde tanecik püskürterek malzeme yüzeylerinde mekanik özelliklerin geliştirilmesi, son yıllarda yoğun olarak kullanılmaya başlanan bir prosestir. İşlemin temel mantığı yüzeylerin mikro seviyede deforme edilerek çevrelerinde bası gerilmesi oluşturması ve bu mikro deformasyonun tüm yüzeyde yapılmasıdır (Şekil 2.1). Havacılık, enerji, otomotiv gibi birçok alanda bu teknoloji sayesinde parçalar ve sistemler daha yüksek limitlerde çalışabilmekte ya da daha uzun süreli hizmet verebilmektedirler (James, 2010).



Şekil 2.1. Tornalanmış Yüzey ve Bilya ile Dövülmüş Yüzey (OSK-Kiefer GmbH, 2018)

### 2.2. Bilyalı Dövme Yöntemi

Bilyalı dövme, parçacık püskürtme ile dövme teknolojisinin en yoğun kullanılan yöntemidir. Bu yöntemde püskürtülen parçacıklar küre şeklindedir. Doğrudan küre olarak

üretileen ya da telden kesim yapılarak yuvarlatılmış parçacıklar bu işlem için sıklıkla kullanılmaktadır. İşlemede kullanılan bilyanın çapı, bilya malzemesi, dövme yoğunluğu, bilyaların püskürtülme mesafesi, püskürtülme debisi gibi parametrelerle proseste çeşitlilik yaratılabilmektedir. Şekil 2.2’de bilyalı dövme cihazında işlem gören bir gaz türbini parçası görülmektedir. Çalışmalar, ısıl işlem sertleştirilmesinde görülen parça ömründeki değişimin bilyalı dövme ile sağlanabildiğini göstermektedir (Kubit vd. 2016).



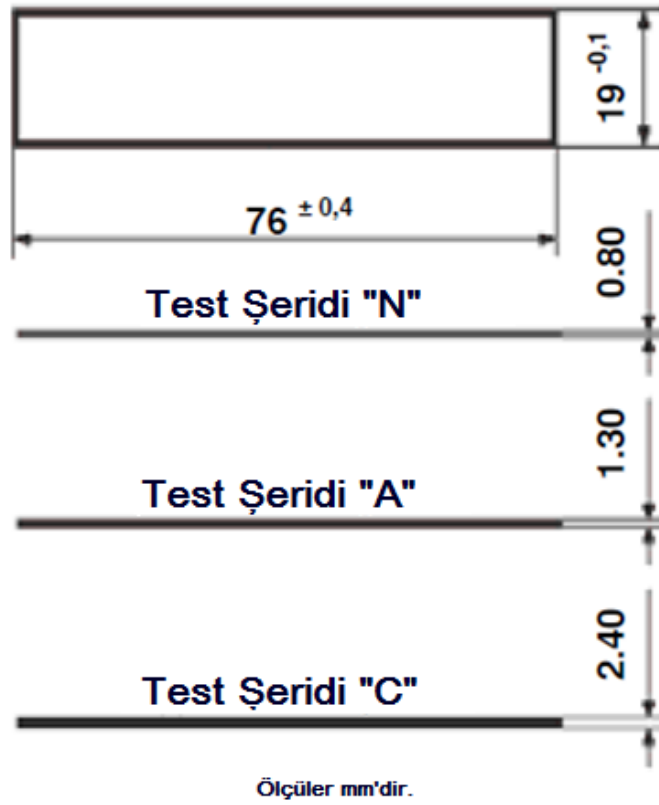
Şekil 2.2. Bilyalı Dövme İşlemi (Hanson, 2015)

Bilyalı dövme yönteminde kullanılan bilyalar belirli standartlara göre anılmaktadır. Bilyanın seçilmesi, iş parçasının malzemesi, dövülecek bölgenin geometrisi istenen kalıntı gerilme miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

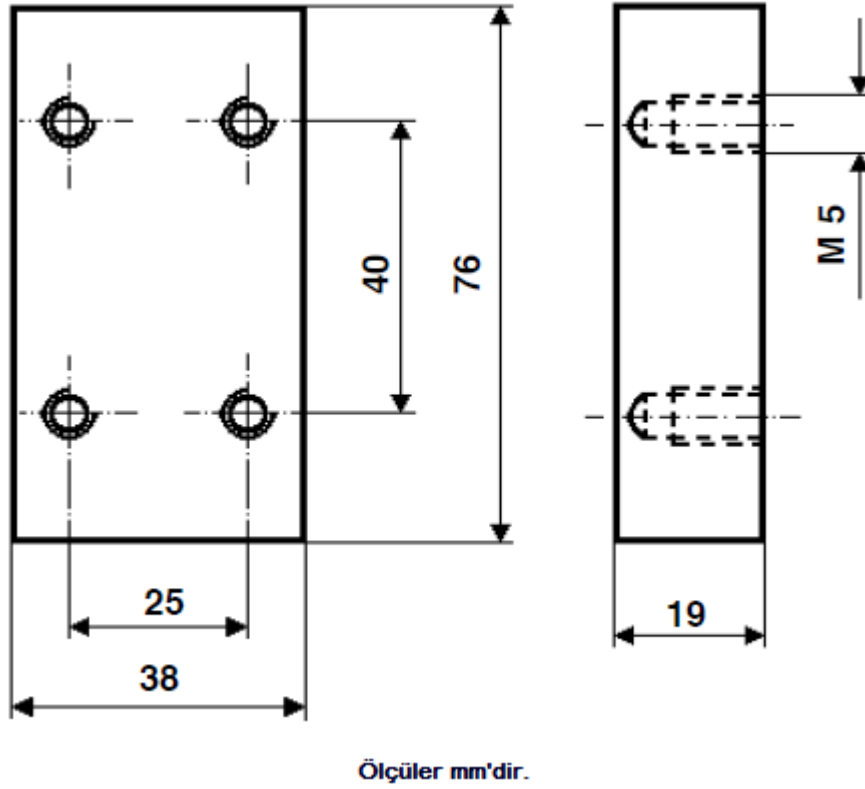
Dövme yoğunluğu Almen Şeridi (Almen Strip) ile belirlenir. Bu yöntem John O. Almen tarafından geliştirilmiş ve patentlenmiştir. Almen şerit testi, bilyalı dövme operasyonunda iş parçasına aktarılan enerjinin kıyaslanabilir olarak ölçülmesi için yapılmaktadır. Eğer ince bir şerit tek bir yüzeyden belirli parametre setinde bilyalı dövme

operasyonuna tabii tutulursa, yüzeyde oluşan gerilim sebebiyle düzlemsel yerine eğrisel bir şekil alır. Bu eğrilik, Almen ölçüm cihazı ile ölçülerek dövme yoğunluğu bulunur (Almen, 1942).

Almen şeritleri, şerit kalınlığına göre A, C ve N olarak anılmaktadır. SAE 1070 malzemedan imal edilip 44-50 HRC yüzey sertliğinde ve 0,04 mm düzlemselliğe sahip olmalıdır. Bu malzeme özelliklerine sahip olan ve Şekil 2.3'te verilen ölçülere sahip olan şeritler Şekil 2.4'te gösterilen şerit tutucuya 4 noktadan sabitlenir. Sonrasında deney şeridi bilyayla dövülerek tek yüzeyde gerilim oluşturulması sağlanır.

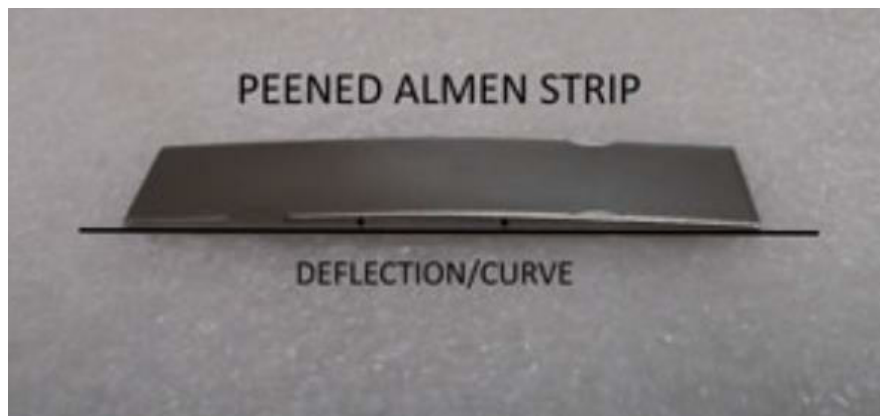


Şekil 2.3 Almen Şerit Ölçüleri (OSK-Kiefer GmbH, 2018)



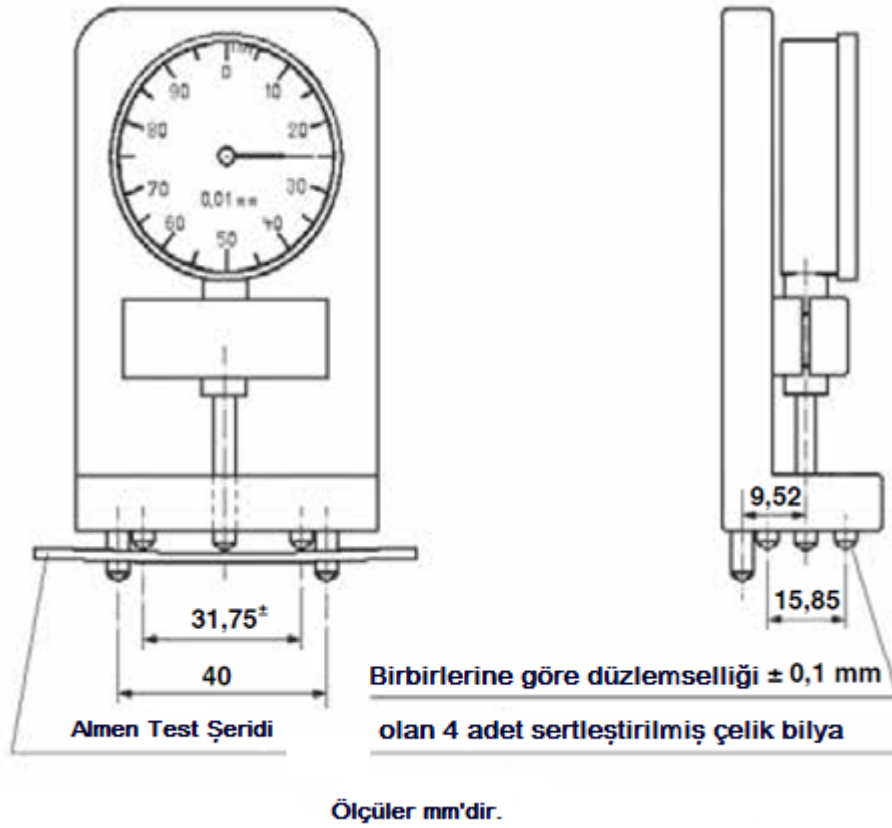
Şekil 2.4. Almen Şerit Tutucu (OSK-Kiefer GmbH, 2018)

Bilya ile dövülen şerit yüzeyinde, nozuldan püskürtülen bilyaların oluşturduğu toplam enerjinin yarattığı kalıntı gerilmelerin sonucu olarak plastik deformasyona bağlı şekil değişikliği meydana gelir. Şerit, iki ekseninde de simetrik olmasından dolayı ve yüzeyin her yerinin aynı parametre ile dövülmüş olmasından kaynaklı olarak şeritte oluşan deformasyonda sabit çaplı bir yay şeklinde oluşur. Şekil 2.5.'te bilyayla dövülmüş bir almen şeridinde oluşan deformasyon göz ile görülebilmektedir.



Şekil 2.5. Almen Testi Sonrası Almen Şeridinde Oluşan Deformasyon (Brooks, 2016)

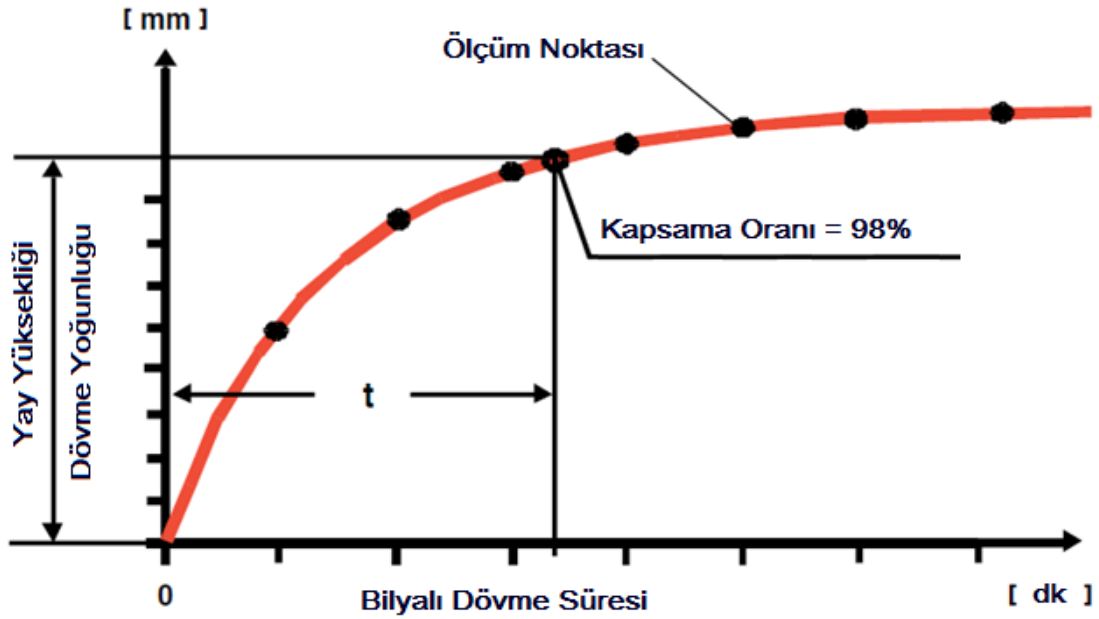
Almen şeridinde oluşan deformasyon Şekil 2.6’da gösterilen Almen Ölçüm Cihazı adı verilen hassas bir indikatör ile ölçülerek bilyalı dövmenin yoğunluğu tespit edilir.



Şekil 2.6. Almen Yoğunluk Ölçüm Cihazı (OSK-Kiefer GmbH, 2018)

Bilyalı dövme işleminin önemli bir diğer parametresi prosesin kapsama oranıdır. Bilya ile dövme işleminin başarılı sonuç verebilmesi için bu oranın minimum %98 seviyesinde olması gerekmektedir. %100 değeri ise teorik bir değer olup gözlemlenebilir bir değer değildir. Yapılan araştırmalarda ise kapsama oranlarının %100 üzerinde seçildiği görülmüştür. Bunun sebebi deneysel çalışmalarda her yüzeyin eşit ve istenen dövme yoğunluğunda dövülmüş olmasından emin olunması açısından dövme süresinin uzun tutulmasından kaynaklanmaktadır. %100 kapsama oranı ile daha üzeri kapsama oranı arasında oluşan kalıntı gerilme ihmal edilebilir boyutlarda olmaktadır (Mattias vd. 2014).

Pratikte %98 seviyesi olması gereken minimum proses süresine karşılık gelmektedir. Şekil 2.7’de proses kapsama oranının dövme yoğunluğu ile olan ilişkisi grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Kapsama Oranı ve Almen Yoğunluğu'nun süre ile ilişkisi  
(OSK-Kiefer GmbH, 2018)

### 2.3. Bilyalı Dövme Parametreleri ve Özellikleri

Bilyalı dövme işleminin (Şekil 2.8) karakteristiğini belirleyen birden fazla parametre vardır. Bu parametreler dövme medyası, dövme maruziyeti ve test şerit tipine bağlı birçok kombinasyonu içermektedir (Champaigne, 1992). Tüm parametreler toplamda dövme yoğunluğunu ve işlem sonucu ortaya çıkan yüzey özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olur. Diğer bir deyişle bilyalı dövmenin ana parametresi dövme yoğunluğudur. Diğer parametreler, dövme yoğunluğunun sağlanabilmesi için kontrol edilebilen alt parametrelerdir. Bazı çalışmalarda sadece dövme yoğunluğu verilmektedir.



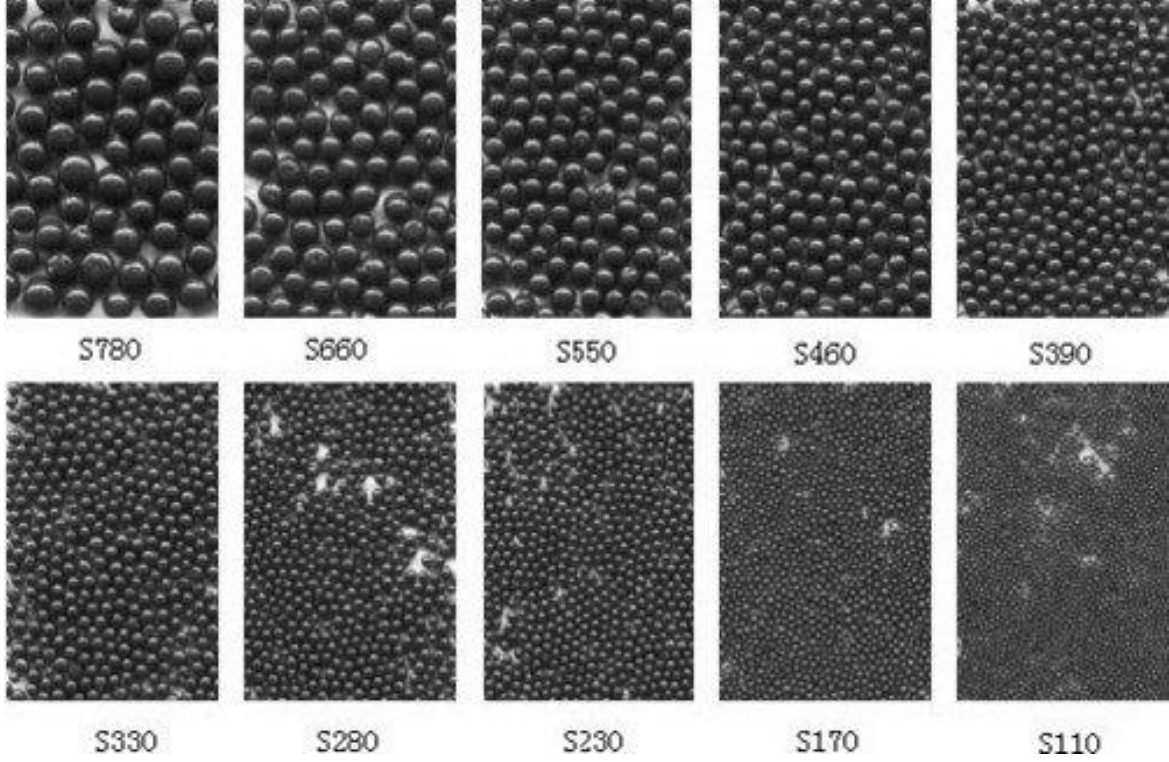


Şekil 2.8. Bilyalı Dövme Prosesi (ABSS, 2018)

### 2.3.1. Bilya Çapı ve Malzemesi

Bilya çapı ve malzemesi uygulamaya göre ilk karar verilmesi gereken parametrelerden biridir. İstenen yüzey pürüzlülüğü ve dövülecek bölgenin geometrisi bilya çapı ile doğrudan etkilidir. Bir gaz türbini parçası için daha büyük bilya çapı seçilebilecek iken bir otomobil şaftında yer alan diş profili için daha küçük bilya seçilmesi gerekecektir. Bilya ile dövme, parça üzerine yapılacak son işlem olmalıdır. Dolayısı ile ısıtılmış bir yüzey ile ısıtılmamış bir yüzeye yapılacak dövme işleminde seçilecek bilya sertliği farklı olacaktır. Bilya çapları standart olarak SXXX olarak anılır. Şekil 2.9’da standart bilya çapları gösterilmektedir.

Bilya malzemeleri genellikle yüksek sertlik değerlerine sahip çelik malzemelerdir. En yaygın olarak kullanılan AMS 2431 standardına uygun bilyalardır. Dökme çelik, seramik, haddelenmiş çelik gibi malzemelerden üretilirler.



Şekil 2.9. Standart Bilya Çapları (Shandong Kaitai, 2018)

### 2.3.2. Püskürtme Debisi

Parça üzerine püskürtülecek parçacıkların belirli sabit bir debide püskürtülmesi gerekmektedir. Ancak bu sayede yüzeyde eşit fiziksel özelliklerini yakalamak mümkün olacaktır. Debi, kapsama oranının tutturulabilmesi için önemli bir parametredir.

### 2.3.3. Püskürtme Basıncı

Bilyaların nozuldan çıkış basıncı, bilyaların yüzeyi dövme enerjisini doğrudan etkileyen bir parametredir. Seçilen bilya malzemesi, çapı ve iş parçasının fiziksel özelliklerine göre uygun püskürtme basıncı seçilmelidir.

#### **2.3.4. Püskürtme Mesafesi**

Almen testinin amacının dövme işleminde malzemeye aktarılan toplam enerji ile ilgilidir. Belirli bir hızda püskürtülen tanelerin taşıdıkları maksimum enerji ile yüzeye çarpması ve yüzeyden sektikten sonra tekrar püskürtme için bilya havuzuna düşmesi gerekmektedir. Bunun için bilya çapı ve debi ile orantılı olarak bir püskürtme mesafesi seçilmelidir.

#### **2.3.5. Püskürtme Açısı**

Püskürtme açısı parça yüzeyi ile yüzey normali arasında kalan bölgede nozulun konumlanmış olduğu açıdır. İdealde enerjinin tamamının aktarılabilmesi için dik püskürtülmesi gerekse de bilyanın yüzeyden geri sekmesi, birbirleriyle minimum temas gibi kısıtlardan dolayı 80 – 85 derece civarı, dike yakın açılarda seçilir. Karmaşık geometriye sahip yüzeylerde daha farklı açı değerleri seçilebilmektedir.

#### **2.3.6. Test Şeriti**

Test şeritleri istenen dövme yoğunluğuna göre seçilir. C tipi düşük (6A altı) dövme yoğunluğunun belirlenmesi, A tipi orta dövme yoğunluğu (6A – 24A) belirlenmesi, N tipi ise yüksek (24A ve üstü) dövme yoğunluğunun belirlenmesi için kullanılır (Jain, 2001).

### 3. KRİYOJENİK İŞLEM

Kriyojenik işlem oda sıcaklığından çok daha düşük sıcaklıklarda malzemelerin belirli sürelerde bırakılmasıyla parçanın mekanik özelliklerinin iyileştirildiği bir yüzey işlemidir. Kriyojenik işlem için çoğunlukla CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> kullanılır. CO<sub>2</sub>, -56 °C altında katı durumdadır. N<sub>2</sub> ise -210 °C'de katılaştırken, -190 °C mertebelerinde kaynamaya başlar. Kriyo akışkanları olarak bilinen bu ikili, kriyojenik işlemin yanı sıra metal işlemede soğutma amaçlı olarakta kullanılmaktadır.

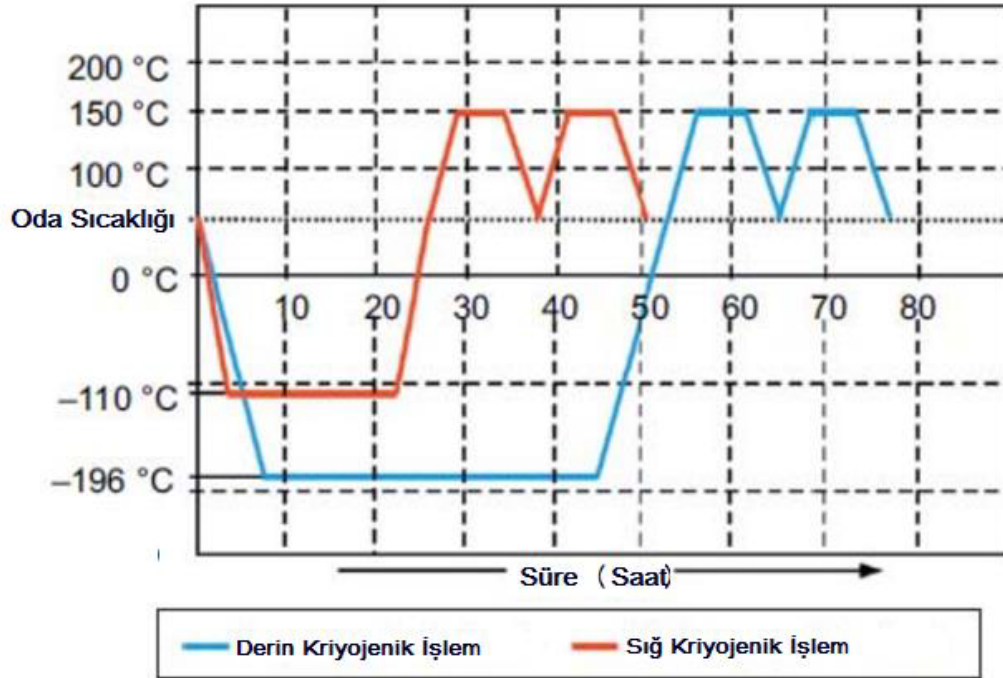
Kriyojenik yüzey işleminin iş parçasının mekanik özelliklerini nasıl arttırdığına yönelik bir kaç teori mevcuttur. Bunlardan birincisi çeliklerde soğuma sırasında arda kalan östenitin, martenzit fazına kriyojenik işlem ile dönüştüğüdür. Bu teori, XRD ölçümleri ile doğrulanmış bir teoridir. Diğer bir teori ise malzemenin içinde yer alan mikroskopla dahi zor görülecek boyuttaki karbürlerin kriyojenik işlem ile çökelerek dayanımı arttırdığıdır. Malzemede mikro boyuttaki kırılma potansiyeline sahip taneciklerin azalmasının kalıntı gerilmeleri de azaltmasına sebep olmaktadır. Bir başka teoriye göreyse de malzemenin kristal yapısı üzerindeki soğuk işlem etkisidir. Kristal yapıdaki nokta hatalar sıcaklığa bağlıdır. Kristal sıcaklığın düşürülmesi nokta hata sayısını belirli bir oranda düşürür. Başka bir teoriye göre ise kristal yapıdaki atomlar arasında mesafeler değişkenlik göstermektedir. Atomlar arası mesafe ne kadar eşitse bağ kuvveti de eşit ve dengeli olacak, bu sayede aşınma direnci yüksek olacaktır. Sıcaklığın yavaş bir şekilde düşürülmesi sayesinde metalik bağ oluşturulan atomlar arası enerji de düşmektedir. Bu sayede değişken mesafe durumu da ortadan kalkmaktadır. Sonrasında malzeme yavaş ve kontrollü bir şekilde ısıtılarak atomlar arası mesafenin dengeli kalması sağlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen tüm teorilerin aslında kriyojenik işleme etkisi olduğu düşünülmektedir. Ancak hangi teorinin ne kadar etki ettiğine yönelik çalışmalar halen sürmektedir. Deneysel olarak yapılan çalışmalar sonucunda aşınma ve mukavemetin kriyojenik işlemde olumlu etkilendiği görülmektedir (Diekman, 2013).

Kriyojenik yüzey işlemi, uygulama yöntemine bağlı olarak derin ve sığ kriyojenik olarak 2 farklı yöntemle yapılır.

Derin kriyojenik işleminde öncelikle iş parçası  $-196\text{ C}$  sıcaklığa kadar soğutulur. Bu soğutma prosesi, 4 – 10 saat arası sürebilmektedir. Sonrasında iş parçası 6-40 saat arasında  $-196\text{ C}$  sıcaklıkta sabit tutulur. İşlemin son adımında iş parçası 4-10 saat arasında oda sıcaklığına erişmesi sağlanır. Tüm bu süreçte sıcaklık çok hassas bir şekilde kontrol edilmektedir (Kaya ve Ulutan, 2016).

Sığ kriyojenik işlemin ise literatürde  $-80\text{ °C}$  ila  $-145\text{ °C}$  arası sıcaklıklara kadar soğutulup daha kısa süreli bekletilerek yapıldığı görülmüştür. Şekil 3.1’de DCT ve SCT’ye ait örnek çevrim süreleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Derin ve Sığ Kriyojenik İşlemlere Ait Örnek Çevrim Süreleri (Akincioglu vd., 2014)

#### 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bilyalı dövme yöntemi 1940'lı yıllarda ortaya çıkmıştır. İlk uygulamalar II. Dünya Savaşı sırasında kullanılan uçak motorlarına ait yüksek strese ve yorulmaya maruz kalan parçaların yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Prosesin öncüleri General Motors ve SAE olarak kayıtlara geçmiştir. Yapılan ilk çalışmalar F.P. Zimmerli tarafından yapılmış ve bilyalı dövmenin yorulmaya olan olumlu etkisi incelenmiştir.

Zimmerli (1941) karşılaşılan en büyük sorunun, prosesi kontrollü ve tutarlı olarak gerçekleştirilememesini belirtmiştir. Çalışmasında yaylar, teller, paslanmaz çelik ve fosfor bronzuna farklı bilya çapları ile bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Çalışmasının sonucunda dayanım değerlerinin %50'ye yakın arttığı görülmektedir. Çalışmasının özetinde metallerde yorulma ömrünün arttığını, ısı etkisiyle bilyalı dövme etkisinin yok olduğunu, ağırlık azaltmak için bilya ile dövme yönteminin kullanılabileceğini ve yorulma direnci için yüzey pürüzlülüğünün iyi olmasının gerekmediğini çalışmasının özeti olarak belirtmiştir.

J.O. Almen (1942) tarafından, dövme yoğunluğunun belirlendiği ve günümüzde adını verdiği yöntem ve ekipmanlar ile ilgili bir patent başvurusu yapılmıştır. Bu yöntem günümüze kadar ulaşmış olup bilyalı dövme prosesinin karakterinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Akiniwa vd. (2009) yaptıkları çalışmalarında, AISI 1045 karbon çeliğine 2 farklı ısı işlem uygulayarak bilyalı dövmenin yorulma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İşlenmiş parçalar 1223 K sıcaklıktan 1 saat normalize edildikten sonra yağda 1 saat soğutulan ve sıvı azot sıcaklığında soğutulmaya devam edilen 2 farklı numuneden biri 723 K, diğeri 523 K sıcaklıklarında temperlenmiş ve sırasıyla 400 HV ile 617 HV yüzey sertliği elde edilmiştir. Sonrasında yüzeylere aynı parametrelerde bilyalı dövme uygulanmıştır. Ardından kalıntı gerilmeler ölçülmüş ve sırasıyla 684 ve 1240 MPa kalıntı gerilme olduğu belirlenmiştir. İki farklı numune, sonrasında yorulma testine tabii tutulmuş ve A numunesinde yorulma dayanımı artmazken B numunesinde yaklaşık 50 MPa arttığı görülmüştür. Buna karşın, çevrim süreleri 10 ila 100 kat arasında artmıştır. A parçasının dayanımının değişmemesi, dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün daha büyük olmasına bağlanmıştır. Sonuç olarak

yorulmaya olumlu etkisi olduğu görülmüş ancak yüzey pürüzlülüğünün de en az yüzey sertlikleri ve kalıntı gerilme kadar önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Medvedevaa vd (2010) bilya ile dövülmüş 3 farklı takım çeliğinde sıcaklığa bağlı olarak kalıntı gerilme değişimini incelemiştir. Malzeme karakteristiğine göre belirlenen 3 farklı sıcaklık setinde yapılan çalışmaların sonucunda bilyalı dövmenin sonucu oluşan kalıntı gerilmenin 200 °C sıcaklık mertebesinde ilk yarım saat içerisinde %10 düştüğü ve sonrasında sabit kaldığı görülmüştür. İkinci deney setinde sıcaklık yaklaşık 400 °C mertebesinde tutulmuş ve 3 saat içerisinde yaklaşık %40 düştüğü ve sonrasında hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. Son deney setinde sıcaklık yaklaşık olarak 600 °C mertebesinde tutulmuş ve yaklaşık 3 saat sonunda tüm kalıntı gerilmelerin yok olduğu gözlenmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere malzemeye uygulanan sıcaklıktaki artış, kalıntı gerilmede değişik mertebelerde de olsa düşüşe neden olmaktadır. Bu değişim malzemeye, maruz kalınan sıcaklığa ve maruziyet süresine bağlı olup malzemenin yorulma dayanımı ve yorulma çevrim sürelerindeki olumlu etkinin tersi bir durum beklenmesine neden olmaktadır. Bu sebeple bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey işlemi olarak kriyojenik yüzey işlemi tercih edilmiştir.

Goulmy vd. (2017) Inconel 718 malzemedan üretilmiş bir türbin diskinin bilyalı dövme sonrası yorulma ömründeki değişimi incelemiştir. Çalışmanın amacı bilyalı dövme sonrası yüzeyde oluşan kalıntı gerilmelerin ısıya bağlı olarak nasıl değişkenlik gösterdiğini anlamaktır. Bilyalı dövmenin yorulma ömrüne olan etkisinin anlaşılabilmesi için kalıntı gerilmelerin ve pekleşmenin oluşumu iyi değerlendirilmelidir. Bu sebeple numuneler üzerinde işlem öncesi ve sonrası 20 ve 550 °C sıcaklıktaki termal ve mekanik yükler incelenmiştir. Numunelerden bir sete bilyalı dövme işlemi uygulanmamış, 2 sete de sırasıyla 12A ve 22A yoğunluğunda dövme işlemi yapılmıştır. Çalışma sebebiyle malzemede çok düşük seviyede pekleşme gerçekleşirken bilya ile dövülen numunelerde dövme parametrelerine bağlı olarak yüzeyde kalıntı gerilmelerin oluştuğu görülmüştür. Daha yüksek yoğunluğa sahip numunede kalıntı gerilme miktarı ve derinliği daha fazladır. Çalışmanın sonucunda yorulmaya maruz kalan parçalarda kalıntı gerilmelerin göreceli olarak azaldığı görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıkta test edilen numunede gerilmelerin azalmasının daha fazla olduğu görülmüştür.

Slavin vd. (2017) bilyalı dövme prosesi için küresel olarak şekillendirilmiş tel ile (SCCW - spherical conditioned cut wire) ile çelik döküm bilyayı karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada, parça üzerindeki kalıntı gerilmeler, parçanın yorulma dayanımı ve dövme malzemesinin performansı incelenmiştir. Bunun için düz plaka ve yorulma deneyi için dış açılmış silindirik numuneler hazırlanmıştır. Tüm parçalar 7A yoğunluğunda dövülmüştür. Yapılan deneylerin sonucunda küreleştirilmiş tel ile dövülen numunelerde yüzey pürüzlülüğünün bilya ile dövülene göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak küreleştirilmiş telin geometrik toleranslarının daha düşük olması ve yüzey sertliğinin çelik döküm bilyadan daha yüksek olması gösterilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümlerinde küreselleştirilmiş tel ile dövülen numunelerde kalıntı gerilmenin kısmen daha fazla olduğu görülmüştür. Yorulma deneylerinde düşük gerilim değerlerinde her 2 numune seti de benzer performans sergilerken, gerilim değerleri arttıkça dövülen numunelerin performansının dövülmeyenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Deney sonucu olarak dövme için kullanılan medyanın değişmesinin yorulma performansından çok yüzey pürüzlülüğünü etkilediği yorumu yapılmıştır.

Klotz vd. (2017) bilya ile dövülmüş Inconel 718 için yorulma ömrü gelişimini gösteren bir model üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda 3 farklı parametre ile dövülmüş malzeme için çatlak başlangıcı ve ilerlemesini düşük ve yüksek yük çevrim durumunda gözlenmesini ve uygulanan yük seviyesine bağlı bir model geliştirebilmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada işlenmiş, işleme sonrası parlatılmış, S230 küre ile 4A yoğunluğunda dövülmüş, CW14 küreselleştirilmiş tel ile 4A yoğunluğunda dövülmüş ve CW14 küreselleştirilmiş tel ile 8A yoğunluğunda dövülmüş olmak üzere 5 farklı numune seti hazırlanmıştır. Düşük ve yüksek çevrim yorulma testleri için silindirik numuneler hazırlanmış, kalıntı gerilme ve soğuk işlem dağılımının görülebilmesi için ise dikdörtgen kesitli numuneler hazırlanmıştır. Kalıntı gerilmeler XRD ile ölçülmüş, çatlak başlangıcı gözlemi için SEM kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda tüm düşük çevrim yorulma çatlaklarının silindirik numunelerin yüzeyinden başladığı, yorulma ömrünün yüzeyin tokluğu ile çok yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Yüksek çevrim yorulma deneylerinde çatlak farklı bölgelerde başlamıştır. Bilya ile dövme, yorulma ömürlerinde 2 – 20 kat arası iyileşmeye sebep olmuştur. Çalışmanın bir diğer çıktısı da bilyalı dövme parametrelerinin yorulma ömrüne doğrudan etkisi olduğu için doğru parametre seçiminin çok önemli olduğudur.



Senthilkumar (2016) yaptığı bir çalışmada indüksiyonla sertleştirilmiş EN 8 karbon çeliğine derin kriyojenik işlem uygulayarak mekanik davranışını incelemiştir. Deneyinde indüksiyonla sertleştirilen malzeme önce 880 °C'ye kadar çıkmış, sonra soğutularak -196 °C'de 24 saat bekletilmiştir. Son olarak oda sıcaklığına kadar yavaşça ısıtılan malzeme 150 °C'de temperlenerek ve temperlenmeden farklı numuneler oluşturmuştur. Deneylerin sonucunda indüksiyonla sertleştirilmiş numunelerin sertlikleri artmış olmasına rağmen kendi aralarında çok büyük farklılıklar göstermemişlerdir. Yüzde uzama miktarları işlem görmemiş malzemeye göre düşmesine rağmen yalnızca kriyojenik işlem yapılmış numunenin diğer numunelere göre daha yüksek yüzde uzama değeri olduğu görülmüştür. Benzer şekilde akma ve kopma gerilmesi değerlerinde de yalnızca DCT uygulanmış olan numune işlem görmemiş numuneye ve diğer numunelere göre daha yüksek değerlere sahiptir. Yapılan mikroskop incelemelerinde kriyojenik işlem yapılan numunelerde martensitik yapılar görülmüştür.

Kaya ve Ulutan (2016) çalışmalarında 38MnVS6 ve 38MnVS6+Ti çeliklerine farklı sürelerde SCT ve DCT işlemi yapmış ve geleneksel ısıl işlem (850 °C'ye ısıtılıp yağda soğutma) ile farklılıklarını incelemiştir. Kriyojenik işlem sonucunda ortaya çıkan tabloda malzeme sertliklerinin geleneksel işleme göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca, DCT ve SCT'nin de birbirlerine göre etkileri araştırılmış ve malzemelerin DCT'ye daha iyi cevap verdiği görülmüştür. Aşınma açısından incelendiğinde ise geleneksel ısıl işlem yapılan numuneler daha iyi bir aşınma performansı sergilemiştir.

Baldissera ve Delprete (2008) yaptıkları yayında kriyojenik işlem üzerine yapılan çalışmalarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yaptıkları incelemelerde farklı malzemelere farklı parametrelerde kriyojenik yüzey işlemi yapıldığı görülmektedir. İncelenen çalışmalarda görülen ortak kanı, parametrelerden yola çıkarak soğukta bekletme süresinin 24 saatin üzerinde kayda değer bir değişikliğe yol açmadığıdır. Bir diğer önemli parametre ise termal şok sebebiyle parçada çatlak oluşmaması için soğutmanın olabildiğince düşük tutulmasıdır. Genel olarak soğutma hızının 0,3 K/dk ile 1,2 K/dk arasında olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığına tekrar ısıtılma sürecinde ise bu parametrenin karbür çökmesi ile bağlantılı olduğuna yönelik hipotezler olsa dahi çok kontrol edilebilir olmadığı görülmüştür. Bir diğer dikkat çekilen konunun, sıcaklıkların çok düşük olması sebebiyle hedeflenen ve gerçek sıcaklıkların değişkenlik gösterebildiği ve işlem performansı için ısı

yalıtımının önemli olduğudur. Yapılan işlemlere malzemelerin verdikleri tepkiler farklı olsa dahi genel olarak yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle takım çelikleri kriyojenik işleme genel olarak olumlu cevap vermişlerdir. Alüminyum alaşımlarında ise genel olarak kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Aşınma direnci açısından incelendiğinde, literatürde yapılan bir çok çalışmada takım ömrü veya aşınma direnci nadiren düşse de genel olarak yükselme eğilimindedir. Çevrim süreleri 6 kata kadar artış göstermektedir. Sertlik değerlerinde bir kaç çalışma haricinde %5 - %10 bandı arasında sertliğin arttığı görülmüştür. 18-8 Cr-Ni paslanmaz çelik malzemede dayanım değeri 50 MPa arttığı görülmüştür.

Manjunath ve Kumar (2016), Baldissera ve Delprete'nin çalışmasına benzer olarak kesici takımlara uygulanan derin kriyojenik işlemlerin etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Yapılan performans analizlerinde görülen sonuçlar takım ömründe %300'e varan oranda artış, takım aşınmasında %70'e varan azalma, kesme kuvvetinde %20'ye varan artış şeklindedir.

Gu vd. (2013) Ti-6Al-4V titanyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine kriyojenik işlemin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle alaşım 2 saat içerisinde 20 °C'den -180 °C'ye soğutulmuş ve 2 saat bekletilmiştir. Sonrasında 2 saat içerisinde alaşım tekrar 20 °C'ye ısıtılmış ve yarım saat bekledikten sonra yaklaşık 1 saatlik sürede 160 °C – 170 °C aralığına ısıtılarak 1 saat bekletilmiş ve 1 saat içerisinde tekrar 20 °C sıcaklığa getirilmiştir. Alaşımda yer alan hacim merkezli kübik  $\beta$  yapılarının ve ikincil yapıların büyük oranda azaldığı ve kriyojenik işlemin taneciklerde büyümeye neden olduğu ve daha saf bir kristal yapı oluştuğu görülmüştür. Alaşımın yüzde uzaması %16,5'ten %24,5'e yükselmiştir. Çekme dayanımı 4 MPa, akma gerilmesi 7 MPa artış göstermiştir. Mikroyapının daha homojen ve düz bir yapıda olması, daha az süreksizliğin olması sebebiyle malzemenin genel mekanik özelliklerinde de iyileşme bekleneceği değerlendirilmektedir.

Kalıntı gerilme ölçümü geleneksel metotlar ile yapılamayan zorlu bir ölçümdür. Schajer ve Ruud (2013) kalıntı gerilme ölçüm metotları üzerinde yaptıkları çalışmada, metotları temel olarak tahribatlı ve tahribatsız olarak sınıflandırmışlardır. Tahribatlı ölçümlerde temel mantık kalıntı gerilmenin oluştuğu yüzeyin kesilerek gerilmenin serbestleştirilmesine dayanmaktadır. Kesilen yüzey serbest durumda gerilme barındırmaz veya çok az barındırır. Tekrar eski haline getirildiğinde ise üzerinde gerilim oluşur. Kesim

sonrası oluşan deformasyon ile kalıntı gerilme arasında doğrusal bir bağ olduğu görülmüştür. Gerilimin serbestleştirilmesi, kesit alma, ayırma, dilimleme, yüzey işleme ve delik delme gibi birden çok yöntem ile yapılmaktadır. Tahribatsız metotlar ise çoğunlukla ışık kırılması prensibine dayalı olup X-Ray, Senkroton X-Ray, Nötron Kırılımı gibi alternatif yöntemler kullanılmaktadır. Bunların dışında manyetik, ultrasonik yöntemler de, az da olsa kullanılmaktadır. Ölçüm için yöntem seçilmesinde gerilmenin yüzey derinliği, yüzeyin homojenliğine bağlı olarak kaç boyutta ölçüm gerektiği ve ölçüm maliyeti gibi değişkenler göz önüne alınmaktadır.

Fitzpatrick vd. (2005) yaptıkları çalışmada XRD yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümünü detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışma, XRD yöntemi ile ölçüm için örnek uygulama olarak yayınlanmıştır. Çalışmada cihaz, cihaza bağlama, aparatlar, radyasyon seçimi, örnek hazırlama ve farklı örneklerin incelemesi, ölçme prosedürü ve kalıntı gerilme sonuçları bir çok deneme ile uygulamalı olarak tecrübe edilmiştir. Buna göre çalışılacak yüzeylerin temizliğinin önemli olduğu ve tel fırça gibi yüzeyi deforme eden uygulamaların ölçümleri yanıltması sebebiyle doğru bir seçim yapılması gerektiği üzerinde durulmuştur. Cihazın ölçüm konfigürasyonundaki değişimin ölçümü etkilediği görülmüştür. XRD yöntemi ile sonuç alabilmek için uygun pik değerlerinin seçilmemesi durumunda ölçüm süresi çok uzamaktadır. Bu sebeple geçmişte kullanılan değerlerin göz önüne alınmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Ölçüm hatalarının en aza indirgenmesi için + ve - yönde en az 5 farklı eğiklik açısında (tilt angle) gerilme ölçümü yapılmasının gerektiği belirtilmektedir.

Tez çalışmasına konu malzeme Inconel 718 malzemeye ait kriyojenik yüzey işlemine yönelik çalışmaya literatürde rastlanamamıştır. Ono vd. (2004) kriyojenik sıcaklıklarda Inconel 718'e ait yüksek çevrim yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada kriyojenik yüzey işleme sıcaklıklarına inilmiş deney süresince bu sıcaklıklarda kalınmıştır. Çalışmanın sonucunda çevrim limiti değişmemiş ancak dayanım değerlerinin kısmen arttığı görülmüştür.

Tez çalışmasına konu olan Inconel 718'e ait kriyojenik yüzey işleme ile birlikte bilyalı dövme işlemini ele alan bir çalışmaya literatür araştırması sırasında rastlanmamıştır.

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, yüksek sıcaklıktaki çalışma koşullarına dayanıklı ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Inconel 718 malzemesinin farklı parametrelerde bilyalı dövme işleminin ardından kriyojenik işlem uygulanmış ve ortaya çıkan 9 farklı numunenin kalıntı gerilme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı aşınma direncine en uygun cevap veren bilyalı dövme ve kriyojenik işlem parametre setinin belirlenmesidir.

Inconel 718 malzeme yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir alaşım olarak kullanılmaktadır. Ancak çalışma süresince kriyojenik işlem harici yapılan tüm deney ve ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

### 5.2. Çalışmada Kullanılan Materyal

Tez çalışmasında Inconel 718 alaşımı kullanılmıştır. Inconel, havacılıkta sıklıkla kullanılan ısıya dayanıklı bir süper alaşımdır. Günümüzde Inconel ailesi birden fazla alaşımdan oluşmaktadır. Temel olarak bir Ni-Cr alaşımıdır. Ancak alaşım tipine göre içerdikleri malzeme yüzdeleri farklılık göstermektedir. Inconel ailesinin en çok kullanılan üyelerinin özellikleri göre aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Inconel 625: Minimum %58 Ni, %20 - %23 arasında Cr içerir. Demir içeriği %5'in altındadır. %8 - %10 arasında Molibden içerir. Asit dayanımı yüksek ve iyi kaynaklanabilir özelliktedir.
- Inconel 690: %59.5, %30 Cr ve %9.2 Fe içerir. Co eser miktarda bulunur. Bu sebeple nükleer alanda tercih edilmektedir. Öz direnci çok düşüktür.
- Inconel 713C: Çökeltme ile sertleşebilir özelliktedir. Inconel dökümlerde çoğunlukla tercih edilir.
- Inconel 718: %50 - %55 Ni, %17 - %21 Cr, %5 civarı Nb, %3 civarı Mo, eser miktarda diğer metaller ve geri kalanını Fe oluşturur. Kaynaklanabilirliği iyidir.  $\gamma$ " çökeltmesi ile sertleştirilmiştir.

- Inconel 751: Daha yüksek alüminyum içeriğine sahiptir. Bu sayede 850 °C – 900 °C aralığında yüksek kırılma mukavemetine sahiptir.
- Inconel 792: Gaz türbinlerinde yüksek korozyon özelliklerine sahiptir. Alüminyum içeriği daha yüksektir.
- Inconel 939:  $\gamma'$  ısıtma işlemi ile sertleştirilmiştir. Kaynaklanabilirliği yüksek seviyededir.

Inconel işleme çok zor bir alaşımdır. Özel takımlarla ve çok yavaş ilerleme ile işlenir. Levha halinde kesim su jeti veya lazer ile yapılmaktadır. İşlenebilirliğinin aksine kaynaklanabilirlik açısından bir çok Inconel alaşımı iyi davranış göstermektedir. TIG kaynağı ile kaynaklanabilmektedir. Son yıllarda gelişen katmanlı imalat teknolojilerindeki gelişme sayesinde işleme yerine katmanlı imalat yöntemiyle de üretimi tercih edilmektedir.

Inconel ailesine ait en çok bilinen havacılık uygulamalarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- NASA tarafından yürütülen uzay mekiği projelerinde katı roket iticilerinin fırlatma platformuna bağlantısı 4 inconel saplama ile yapılmıştır. 8 inconel saplama fırlatılmaya hazır mekik sisteminin ağırlığını taşımak için kullanılmıştır.
- Havacılık şirketi North American Aviation X-15 Roket ile donatılmış uçağın dış gövdesini Inconel X ile inşa etmiştir.
- Rocketdyne firmasına ait F-1 roket motorlarının itki odalarında Inconel X-750 alaşımı kullanılmıştır.
- SpaceX firması, Falcon 9 aracına güç veren Merlin Roket Motoru'na ait manifoldları inconel alaşımından üretmiştir.
- SpaceX firması Dragon V2 araçlarına ait insan taşıyıcı kapsüllerin SuperDraco roket motorlarını katmanlı imalat yöntemi ile yanma odalarını ile lazer sinterleme işlemi ile Inconel alaşımından üretmiştir.

Havacılık endüstrisi dışında otomotivde turboşarj türbini, egzoz manifoldu, egzoz valfi gibi sıcak bölge parçalarının yanısıra, Tesla Model S aracında ana batarya anahtarının yüksek akım ve ısı durumunda kullanılabilir olabilmesi için Inconel malzeme kullanılmaktadır.

Tez konusu olan Inconel 718, AMS 5596 standardına uygun olarak levha, kütük ve çubuk olarak temin edilebilmektedir. Inconel 718 ilk kez 1960'larda kullanılmış ve bugün havacılık gaz türbinli motorlarının %30'undan fazlasında kullanılmaktadır.

Inconel 718'in kimyasal bileşimi Çizelge 5.1'de verilmiştir. Alaşıma ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Inconel 718'in kimyasal bileşimi

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
<b>Yüzde Bileşim</b>	0.08 maks.	0.35 maks.	0.015 maks.	0.015 maks.	0.35 maks.	17-21	50-55	2.80-3.30
Element	Nb	Ti	Al	Co	B	Cu	Ta	Fe
<b>Yüzde Bileşim</b>	4.75-5.50	0.65-1.15	0.20-0.80	1.00 maks.	0.006 maks.	0.30 maks.	0.05 maks.	Balans

Çizelge 5.2. Inconel 718'in fiziksel ve mekanik özellikleri

Erime Aralığı	1260°C - 1336°C
Yoğunluk (Oda sıcaklığında)	8.22 g/cm <sup>3</sup>
Young Modülü (Tavlanmış)	200 GPa
Kesme Modülü (Tavlanmış)	77.2 GPa (11.2 x 10 <sup>3</sup> KSI)
Poisson's Ratio	0.294
Termal İletkenlik	11.4W/m.K
Akma Dayanımı (Çözündürme Isıl İşlemi)	725 MPa
Çekme Dayanımı (Çözündürme Isıl İşlemi)	1035 MPa
Akma Dayanımı (Çözündürme Isıl İşlemi Sonrası Çökelme ile Sertleştirilmiş)	1035 MPa
Çekme Dayanımı (Çözündürme Isıl İşlemi Sonrası Çökelme ile Sertleştirilmiş)	1240 MPa
% Uzama	12
Özısı	435 Joules/kg-K

Başlıca kullanım alanları havacılık gaz türbinli motorları, yüksek mukavemet gerektiren bağlantı elemanları, enstrümantasyon komponentleri, nükleer yakıt sızdırmazlık elemanları, petrol endüstrisinde sürgülü vana, boğma elemanları, borulama tutucuları ve yangın emniyet valfleridir.

Bu çalışmada iki adet yaklaşık 30 mm çapında Inconel 718 çubuk malzemeden yaklaşık 10 mm kalınlığında kesilmiş iki dilim malzeme kullanılmıştır. Bu dilimler, jet taşı kullanılarak, çok yavaş ilerleme hızıyla minimum 10x10 mm çalışma yüzeyi bırakacak ölçüde bölünmüştür.

### 5.3. Bilyalı Dövme Cihazı

Bu çalışmada numuneleri hazırlamak için Sigma Shot Peening Sistemleri (SSPST) firması bünyesinde kullanılan bilyalı dövme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Bilyalı Dövme Cihazı (SSPST)

#### 5.4. Kriyojenik İşlem Cihazı

Bu çalışmada numunelere Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Teknokent'te faaliyet gösteren Makine ve Malzeme Teknolojileri Danışmanlığı (MMD Tekno) firması bünyesindeki Kriyojenik İşlem Cihazı ile kriyojenik yüzey işlemi yapılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Kriyojenik İşlem Cihazı (MMD Tekno)

#### 5.5. Deney Parametreleri

Bilyalı dövme işleminde sabit bilya çapı kullanılarak 3 farklı dövme yoğunluğu ile işlem yapılmıştır. Dövme yoğunluğu, püskürtme debisi, püskürtme basıncı ve püskürtme mesafesi değiştirilerek 3 farklı parametre seti olarak belirlenmiştir. Sonrasında bilyayla dövülmüş parçalara sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmıştır (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. Deney matrisi

	Bilyalı Dövme Yapılmamış	Bilyalı Dövme (Set – 1)	Bilyalı Dövme (Set – 2)	Bilyalı Dövme (Set – 3)
Kriyojenik İşlemsiz	1	1	1	1
Sığ Kriyojenik	-	1	1	1
Derin Kriyojenik	-	1	1	1



Bilyalı dövme ile ilgili işlem şartları aşağıda verilmiştir:

- Set-1: 8A → 3,5 Bar Püskürtme Basıncı / 3,0 - 3,5 kg/dk Püskürtme Debisi
- Set-2: 10A → 4,0 Bar Püskürtme Basıncı / 3,5 - 4,0 kg/dk Püskürtme Debisi
- Set-3: 12A → 4,5 Bar Bar Püskürtme Basıncı / 4,5 - 5,0 kg/dk Püskürtme Debisi

Nozul mesafesi her 3 set için sabit olup 10 cm dir.

Bilyalı dövme işlemi için S230 tipi bilya kullanılmıştır. Bilyaların ortalama sertliği 58 HRC seviyesindedir. Parça geometrisinin düz olması sebebiyle dövme açısı dike yakın olup 80 – 85 derece arasındadır. Kapsama oranı tüm numuneler için % 100'dür.

Kriyojenik işlem ile ilgili işlem şartları aşağıda verilmiştir:

- Set-1: Sığ Kriyojenik → -145 °C
- Set-2: Derin Kriyojenik → -196 °C

Her iki işlemde de 2 °C/dk hızında ısıtma ve soğutma uygulanmıştır. Numunelerin en düşük kriyojenik sıcaklıkta kalma süreleri 24 saattir. İşlem sonrası temperleme uygulanmamıştır.

## 5.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Bilyalı dövme işleminde parametre setinden ortaya çıkan dövme enerjisi kadar, malzemenin bilyalı dövme işlemi öncesi fiziksel durumu, yüzeyin bilyalı dövme prosesine verdiği tepkiye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü önemli bir kavram olarak ortaya çıkmaktadır.

Malzeme, numune boyutlarına getirilmeden önce yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Yüzey işlemleri sonrası tahribatlı testler öncesinde 9 numunenin yüzey pürüzlülükleri tekrar ölçülmüştür. Ölçüm için Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.3). Mitutoyo SJ-210 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı Ra ve Rz ölçümlerini yapabilmekte ve ölçüm yaparken taradığı yüzeyleri eş zamanlı grafik olarak ekranına yansıtmaktadır.

Her bir numunede farklı yönlerde en az 3 farklı noktadan ölçümler alınarak değerlerin tutarlılığı doğrulanmış, ölçüm sonuçlarında alınan değerlerin ortalaması yazılmıştır.



Şekil 5.3. Mitutoyo SJ-210 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

### 5.7. Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümü, GKN Driveline Eskişehir Fabrikası'nda bulunan EMCO TEST Duro Scan cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Normal şartlarda yüzey hazırlama işlemi yapılarak yapılan işlem, numunelerin yüzeylerinin bozulması istenmediği için yapılmamış olup ölçümler arası yaklaşık %10'luk farklılıklar gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4. ve Şekil 5.5. Sertlik Ölçüm Cihazı

Sertlik ölçümünde malzemenin Inconel olması sebebiyle ve uygulanan işlemler ile yüzey sertliğinin yükseleceği öngörüldüğünden Vickers ölçümü yapılmıştır. HV5 yöntemi

ile her bir numune üzerinde farklı 3 er noktadan ölçüm alınmıştır. Normal şartlarda numuneler ölçüm öncesi parlatılıp yüzey pürüzü minimize edilerek ölçüm yapılmaktadır. Ancak deneyin ana fikri bilyalı dövme işlemi görmüş parçaların aşınma direncini incelemek olduğu için ve yüzeyin parlatılması durumunda dövülmüş yüzey yok olacağından dolayı Vickers diagonalinde mükemmel bir şekil yakalanamamıştır. Ölçülen değerler %5'lik bir değişkenlik göstermekte olup yüzey işleminin etkisini anlamaya yeterli olmuştur.

## 5.8. Kalıntı Gerilme Ölçümü

İş parçaları üzerine mekanik veya termal işlemler uygulandığında, parça herhangi bir etki altında kalmasa dahi üzerinde gerilme barındırabilir. Bu etki altında kalmadan var olan gerilmeler kalıntı gerilme olarak adlandırılır (Schajer ve Ruud, 2013). Kalıntı gerilme, uygulamaya bağlı olarak istenebilir ya da istenmeyebilir. Buna bağlı olarak tavlama gibi parça üzerinde kalan gerilmelerin yok edilmesine yönelik çalışmalar yapılabilirken, tam tersine parça üzerinde bilinçli olarak kalıntı gerilme oluşması amaçlanabilir. Kalıntı gerilme mekanik yapılar üzerinde birden çok sebepten dolayı oluşabilir. En yaygın sebepler imalat yöntemleri kaynaklı sebeplerdir. Talaşlı veya talaşsız bir çok imalat metodunda parça üzerinde kalıntı gerilme oluşması normaldir. Döküm işlemi sonrası soğuma, kaynak operasyonları, ısıl işlemler, bükme, şekil verme gibi plastik deformasyon ile yapılan üretimler, dövme prosesi gibi sebep olan bir çok farklı proses kaynaklı kalıntı gerilme oluşmaktadır. Bu işlemlerin ardından oluşan kalıntı gerilmeler çoğunlukla istenmeyen kalıntı gerilmelerdir. Bu gerilmelere bağlı olarak özellikle yüksek çevrim yükü altında çalışan parçalarda çatlak başlangıcı daha hızlı oluşabilmekte ve parça ömrü düşmektedir. Dolayısı ile bu tip kalıntı gerilmeler tavlama benzeri ısıl işlemler ile yok edilir ya da kontrol edilebilir bir kalıntı gerilme yaratılması için yüzey ve mekanik özellikleri geliştirici prosesler uygulanır. Kontrollü olarak kalıntı gerilme yaratılmış parçaların yorulma dayanım ve ömürlerinde önemli ölçüde artış sağlanmaktadır. Kontrollü kalıntı gerilme yaratılan proseslerin başında bilyalı dövme işlemi gelmektedir. Bilyalı dövme dışında ısıl işlem uygulanarak da kalıntı gerilme elde edilebilmektedir.

Numuneler üzerinde bilyalı dövme işlemi ve kriyojenik işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmeler için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi bünyesinde yer alan XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı ile işlem yapılmıştır. Kalıntı gerilme ölçümü,

Merkez bünyesinde tahribatlı ve tahribatsız olarak yapılabilmektedir. Numunelerin boyutu gözönüne alınarak ölçüm sonrası deneylerin yapılacak olması sebebiyle tahribatsız yöntem tercih edilmiştir. Ölçüm için Şekil 5.6. ve Şekil 5.8.'de görülen GE Seifert XRD ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerin tamamı aynı koşullarda yapılmıştır.

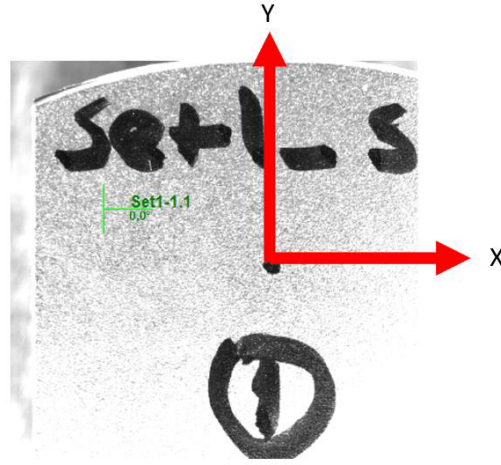
Öncelikle malzemenin XRD ölçümüne uygun olup olmadığı saptanmıştır. Bunun için cihazın yaydığı krom radyasyonuna malzemenin cevap verip vermediği denenmiş, ölçümün başarılı olması sonrasında krom radyasyonu ile devam edilmiştir. Kalıntı gerilme, yüzey kalitesinin tekdüze dağıldığı kabul edilerek tek noktadan yapılmış olup tüm deneyler boyunca  $\Phi$  açısı 0 derece olarak alınmıştır.



Şekil 5.6. XRD Ölçüm Cihazı (Dış Görünüm)

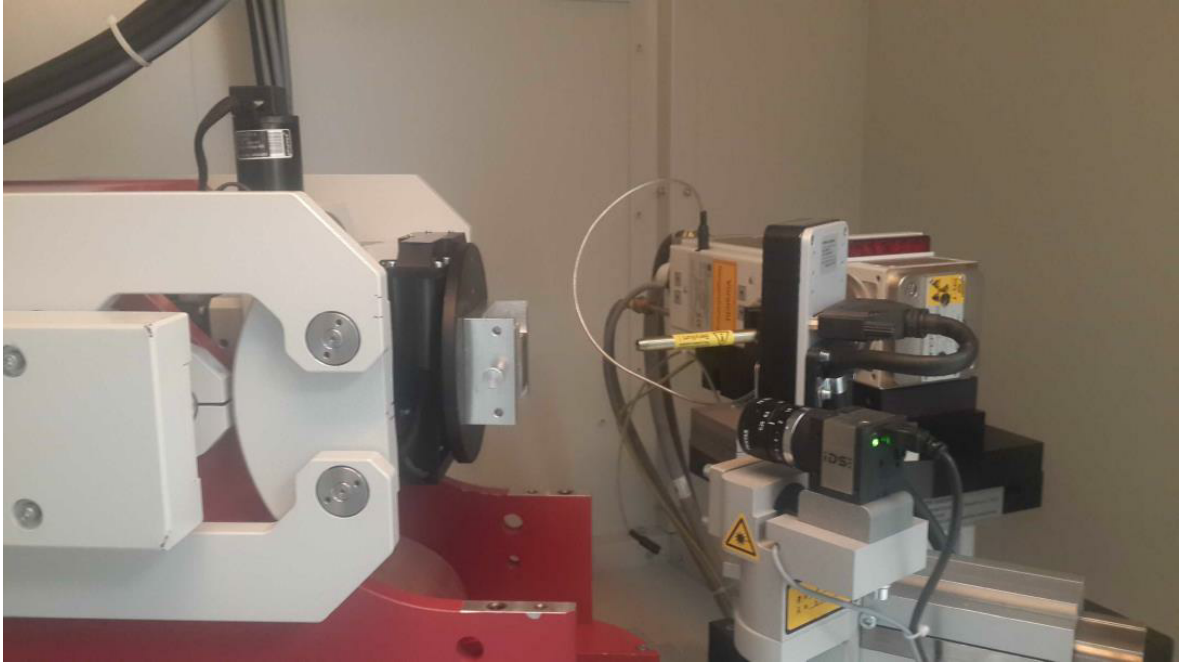
Numune bilya ile dövüldüğü ve hadde yönü bilinmediği için rasgele olarak cihaz içine konumlanmış ve X-Y yönü şekil 5.7'de gösterildiği gibi kabul edilmiştir. Cihazın gerilme ölçümü, numunenin bağlandığı mendenenin, yatay ekseninde yukarı ve aşağı toplam 120 derecelik  $\Psi$  açısına karşılık bir alanın taranması şeklinde yapılmıştır. Ölçüm parametrelerinin belirlenmesinde Prevey'in izlediği yöntem ve ATÜMEK'in geçmiş ölçümlerde ettiği tecrübe gözönüne alınarak 120 derece  $2\theta$  açısı seviyelerinde tarama yapılarak en uygun pik değerinin bulunması için denemeler yapılmıştır. Bahsedilen bu açı, numune üzerine x-ışını gönderen X-Ray tüpü ile piklerden yansımaları toplayan kollektör

ve kameranın konumu arasında olan açıdır. Sistem, optik sistem mantığında ışınların kırılması ve yansımaları prensibine dayalı olarak çalışmaktadır.

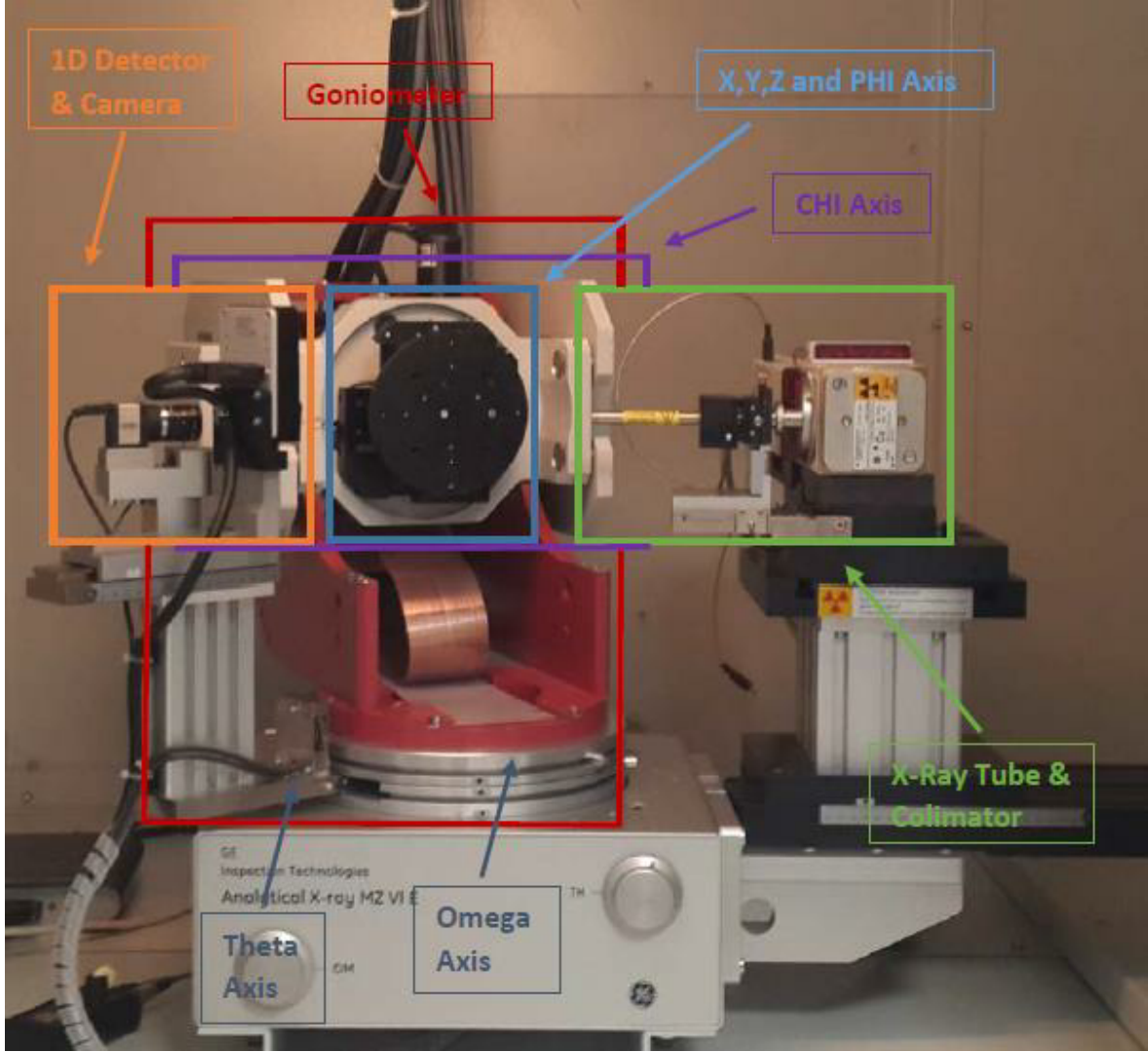


Şekil 5.7. Deney Numunelerinin XRD Cihazı İçinde Yerleşimi

Cihaz ölçüm kabiliyetinin artırılabilmesi için toplamda 7 eksen hareket kabiliyetine sahip olup, 5 eksen numune tutucudan gelmektedir. 2 eksen, x-ışını kaynağına göre konumlamayı sağlayan omega ve teta açılarıdır. Cihaz bileşenleri ve eksen kabiliyeti Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.8. XRD Ölçüm Cihazı (İç Görünüm)



Şekil 5.9. XRD Ölçüm Cihazına ait Temel Ekipmanlar ve Eksenler

### 5.9. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi bünyesinde bulunan CSM Tribometer (Şekil 5.10) aşınma test cihazı ile yapılmıştır. Test numunelerinin yüzeylerine bilya ile dövülmüş olması sebebiyle herhangi bir parlatma vb hazırlama işlemi yapılmamıştır. Numunelere yapılan test parametreleri aşağıdaki gibidir.

- Yük: 5N
- Mesafe: 100 m
- Lineer Hız: 3 cm/s
- Bilya çapı: 3 mm
- Bilya malzemesi:  $Al_2O_3$
- Bilya sertliği (HV): 1100 – 1200 HV



Şekil 5.10. CSM Tribometer Aşınma Test Cihazı

### 5.10. EDS ve SEM Analizleri

Bilyalı dövme ve kriyojenik işlem görmüş olan numunelerin aşınma testi sonrasında oluşmuş yüzeylerinin EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (MERLAB) bünyesinde bulunan JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu ile yapılmıştır (Şekil 5.11).

Elektron mikroskobu analizlerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ve mikroyapıların belirlenmesinde enerji dağılımlı x-ray analizi (EDS) kullanılmıştır. SEM fotoğrafları 100X, EDS analizi fotoğrafları 50X büyütme ile alınmıştır.



Şekil 5.11. JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu



## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

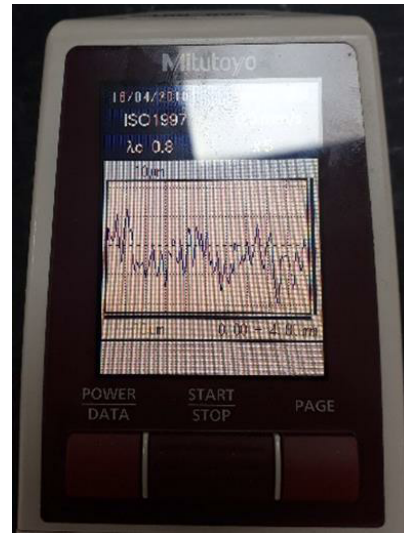
### 6.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Bilyalı dövme işlemi sonrasında parçaların yüzeyindeki değişim göz ile görülebilmektedir. Parçalar sırasıyla hiç işlem görmemiş, bilyalı dövme yapılmış ve kriyojenik işlem yapılmış halleriyle ayrı ayrı ölçülmüştür (Çizelge 6.1). Yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılırken ölçüm cihazının anlık pürüzleri ekrana yansıtmasından da bilyalı dövme işleminin etkisi oldukça net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2).

Yüzey pürüzlülüğünün bilyalı dövme işlemi sonrası dağılımının işlenmiş yüzeye göre daha değişken olduğu görülmüştür.



Şekil 6.1. Bilyalı Dövme Öncesi  
Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 6.2. Bilyalı Dövme Sonrası  
Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Çizelge 6.1. Yüzey Pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)				
	NOSP	SP1	SP2	SP3
DCT	0,28	1,34	1,77	2,13
SCT		1,15	1,65	2,39
NOCT		1,32	1,58	2,22

## 6.2. Yüzey Sertliği Ölçüm Sonuçları

Yüzey sertliklerinin bilyalı dövme sonrası belirli oranda yükselmiş olup, kriyojenik işlem sonrası bir miktar düştüğü ve normal değerlerine yaklaştığı görülmüştür.

Çizelge 6.2. Yüzey sertliği ölçüm sonuçları.

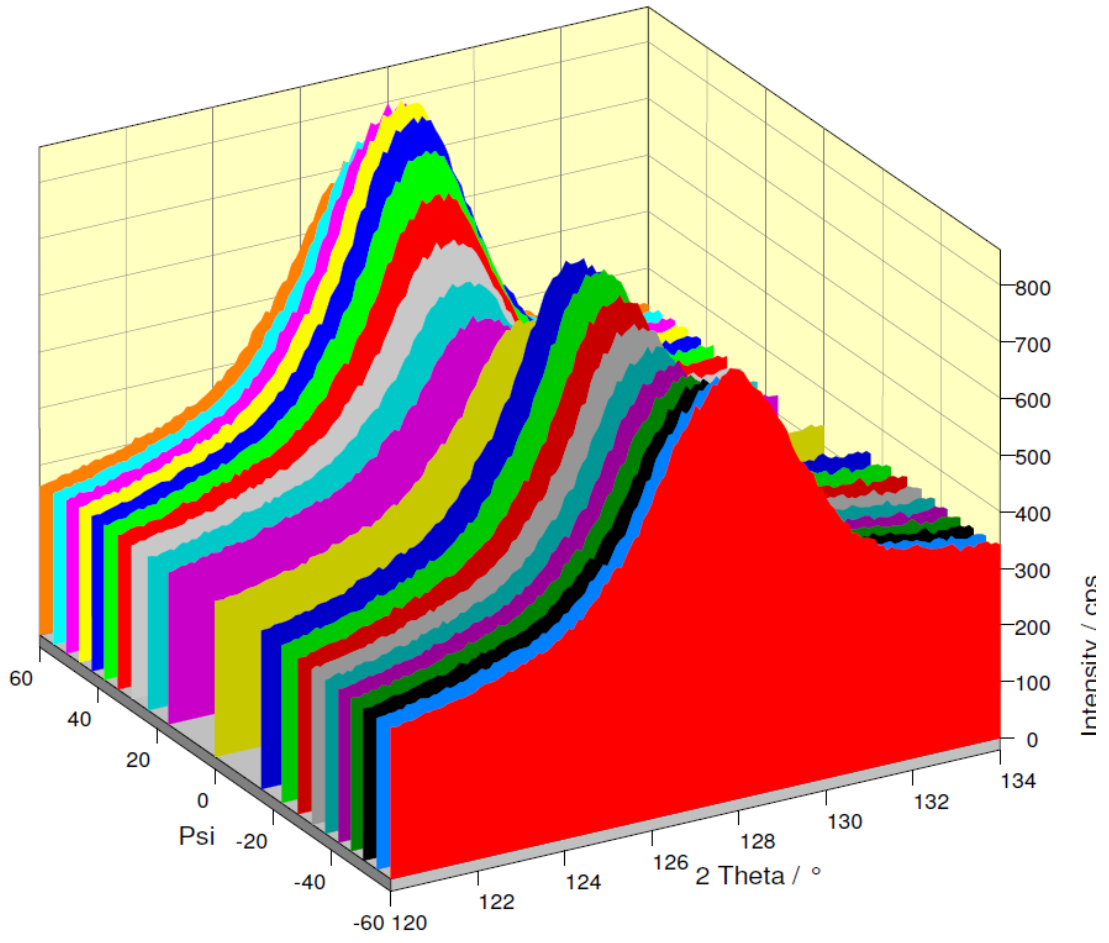
<b>Sertlik (HV)</b>				
	<b>NOSP</b>	<b>SP1</b>	<b>SP2</b>	<b>SP3</b>
<b>DCT</b>	-	555	561	544
<b>SCT</b>	-	517	557	525
<b>NOCT</b>	547	612	591	556

## 6.3. Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları

Atılım Üniversitesi'nin daha önce Inconel malzemeler üzerinde yaptığı çalışmaları gözönüne alarak kalıntı gerilmenin olduğu yön ve açı bulunmuştur. Buna göre 128 derece açıda bir kalıntı gerilme olduğu görülmüştür.

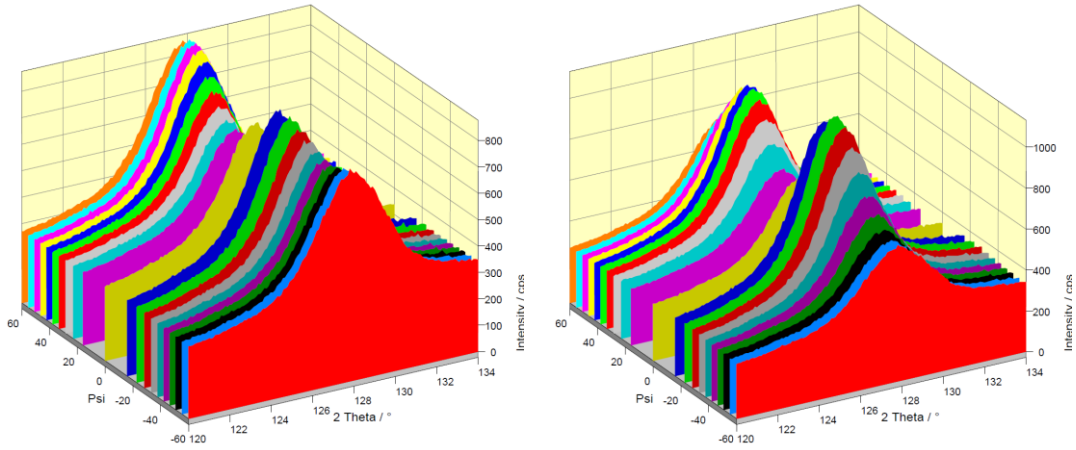
Çizelge 6.3. Kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

<b>Numune No</b>	<b>Bilyalı Dövme</b>	<b>Kriyojenik İşlem</b>	<b>Kalıntı Gerilme [Mpa]</b>
<b>1</b>	Yapılmamış	Yapılmamış	-
<b>2</b>	Bilyalı	DCT	-703,5±28,4
<b>3</b>	Dövme Set	SCT	-812,7±27,0
<b>4</b>	1	NOCT	-673,8±45,8
<b>5</b>	Bilyalı	DCT	-845,6±15,2
<b>6</b>	Dövme Set	SCT	-896,2±73,0
<b>7</b>	2	NOCT	-706,6±30,1
<b>8</b>	Bilyalı	DCT	-906,1±31,3
<b>9</b>	Dövme Set	SCT	-964,7±33,5
<b>10</b>	3	NOCT	-902,4±59,4



<b>Cross - Correlation</b>	
$\sigma_\psi$ [MPa]	$-703.5 \pm 28.4$
$\tau_\psi$ [MPa]	$60.7 \pm 7.5$

Şekil 6.3. 2 No'lu Numuneye ait kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



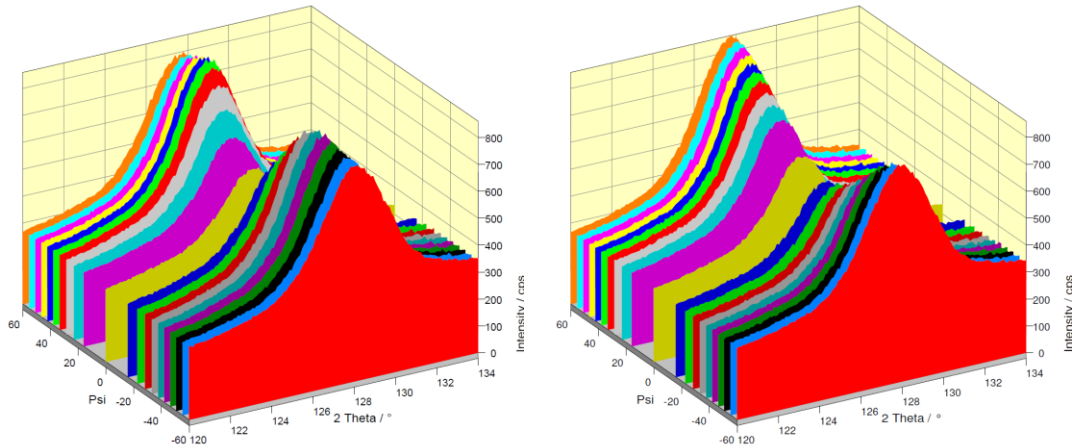
**Cross - Correlation**

$\sigma_{\varphi}$ [MPa]	$-812.7 \pm 27.0$
$\tau_{\varphi}$ [MPa]	$36.1 \pm 7.1$

**Cross - Correlation**

$\sigma_{\varphi}$ [MPa]	$-673.8 \pm 45.8$
$\tau_{\varphi}$ [MPa]	$47.0 \pm 12.1$

Şekil 6.4. ve Şekil 6.5. 3 ve 4 No'lu numunelere ait kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



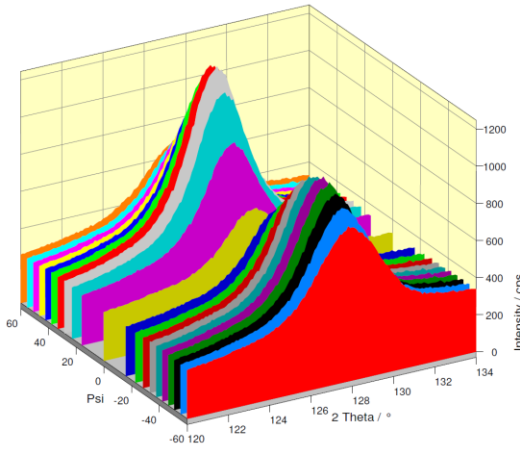
**Cross - Correlation**

$\sigma_{\varphi}$ [MPa]	$-896.2 \pm 73.0$
$\tau_{\varphi}$ [MPa]	$97.1 \pm 19.3$

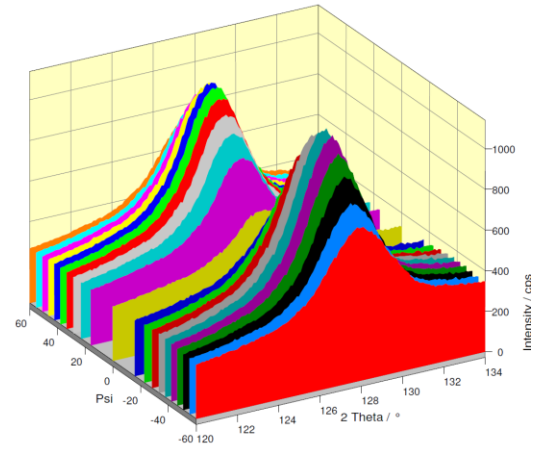
**Cross - Correlation**

$\sigma_{\varphi}$ [MPa]	$-845.6 \pm 15.2$
$\tau_{\varphi}$ [MPa]	$54.0 \pm 4.0$

Şekil 6.6. ve Şekil 6.7. 5 ve 6 No'lu numunelere ait kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

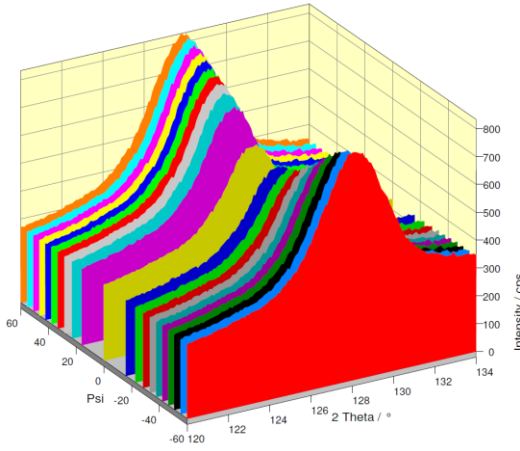


**Cross - Correlation**  
 $\sigma_{\varphi}$  [MPa]  $-706.6 \pm 30.1$   
 $\tau_{\varphi}$  [MPa]  $49.4 \pm 79.0$

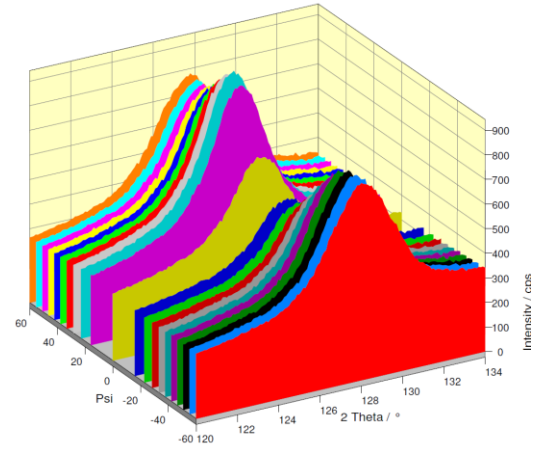


**Cross - Correlation**  
 $\sigma_{\varphi}$  [MPa]  $-906.1 \pm 31.3$   
 $\tau_{\varphi}$  [MPa]  $49.2 \pm 8.3$

Şekil 6.8. ve Şekil 6.9. 7 ve 8 No'lu numunelere ait kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



**Cross - Correlation**  
 $\sigma_{\varphi}$  [MPa]  $-964.7 \pm 33.5$   
 $\tau_{\varphi}$  [MPa]  $65.0 \pm 8.8$



**Cross - Correlation**  
 $\sigma_{\varphi}$  [MPa]  $-902.4 \pm 59.4$   
 $\tau_{\varphi}$  [MPa]  $94.3 \pm 15.7$

Şekil 6.10. ve Şekil 6.11. 9 ve 10 No'lu numunelere ait kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

#### 6.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

Çalışmada numuneler ile yapılan son test aşınma testi olup test sonucunda elde edilen veriler Çizelge 6.4'te verilmektedir.

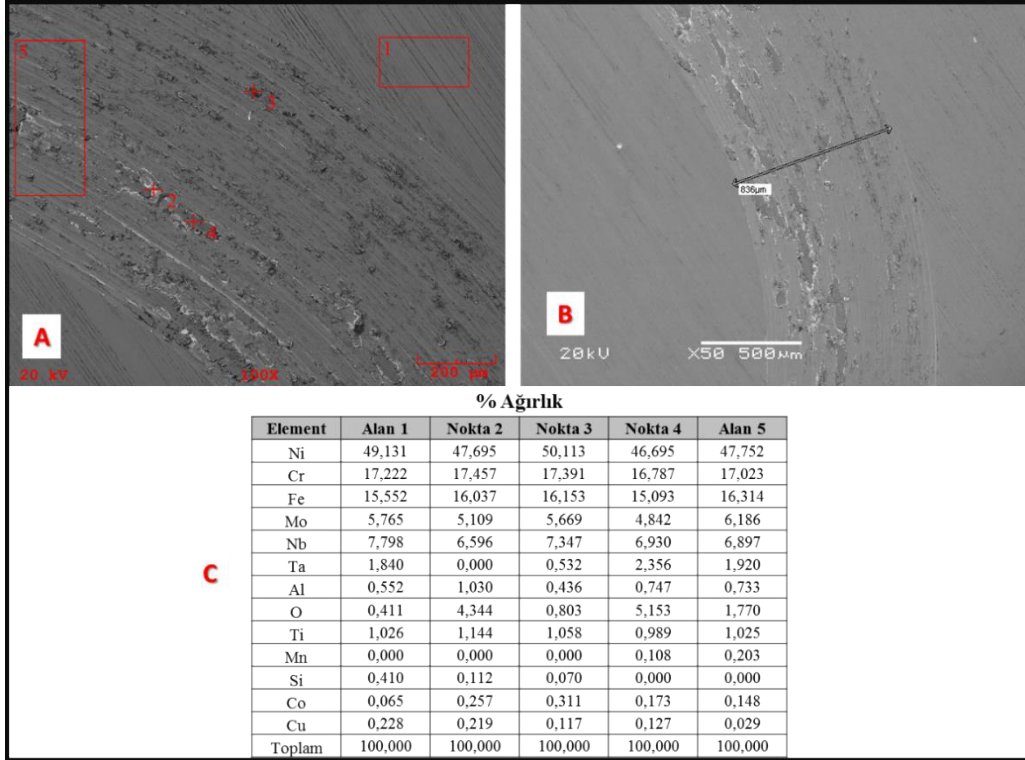
Çizelge 6.4. Aşınma testi sonuçları

Numune No	Bilyalı Dövme	Kriyojenik İşlem	Aşınma Oranları (*10 <sup>-6</sup> ) (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme Katsayısı
1	Yok	Yok	0,552	0,66
2	Bilyalı	DCT	0,739	0,65
3	Dövme	SCT	0,704	0,63
4	Set - 1	NOCT	0,777	0,65
5	Bilyalı	DCT	0,686	0,64
6	Dövme	SCT	0,637	0,67
7	Set - 2	NOCT	0,746	0,66
8	Bilyalı	DCT	0,675	0,63
9	Dövme	SCT	0,609	0,63
10	Set - 3	NOCT	0,716	0,65

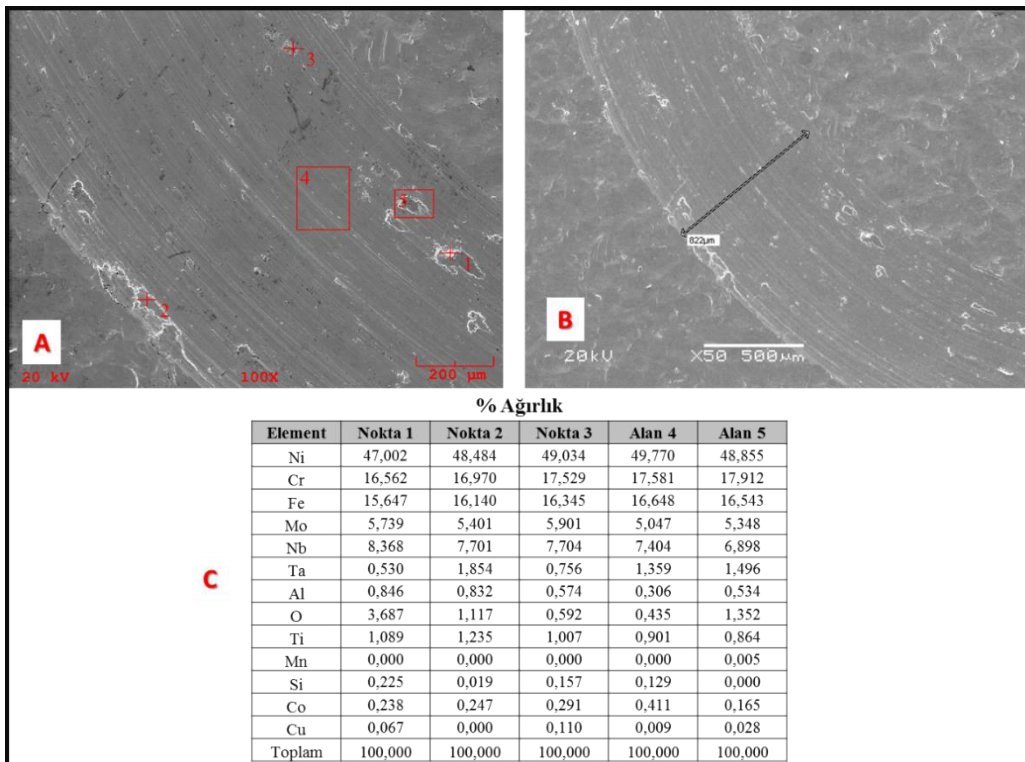
Aşınma testinin sonucunda aşınmaya en dirençli olan numunenin hiç işlem yapılmamış numunedir. Diğer yandan, her bir bilyalı dövme setinde en az aşınan numunelerin sıg kriyojenik işleme tabi tutulan numuneler olduğu görülmüştür.

#### 6.5. SEM ve EDS Analiz Sonuçları

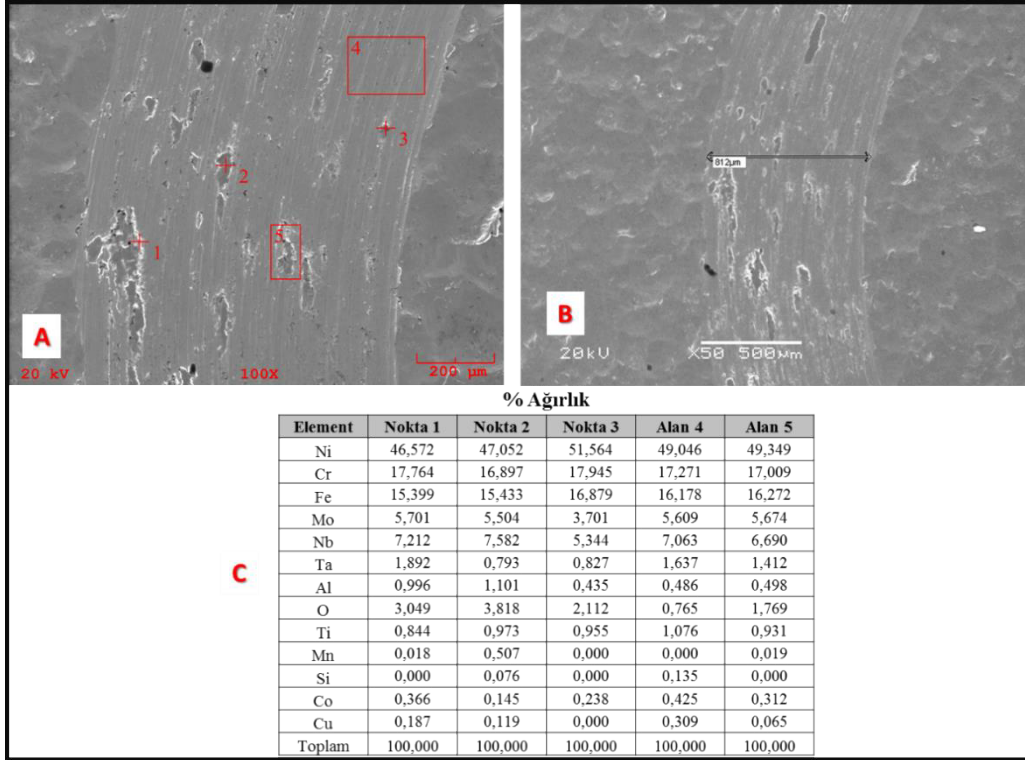
Numunelere yapılan SEM ve EDS analizlerinin sonuçları Şekil 6.12 – 6.21 arasında verilmektedir. Yapılan EDS analizlerinin sonucu Inconel 718 içeriği ile uyumludur. Analiz sonuçlarında aşınma testi sırasında ortaya çıkan oksitlere rastlanmıştır. EDS analizinde karşılaşılan oksijen muhteviyatı SEM fotoğraflarıyla uyum göstermektedir.



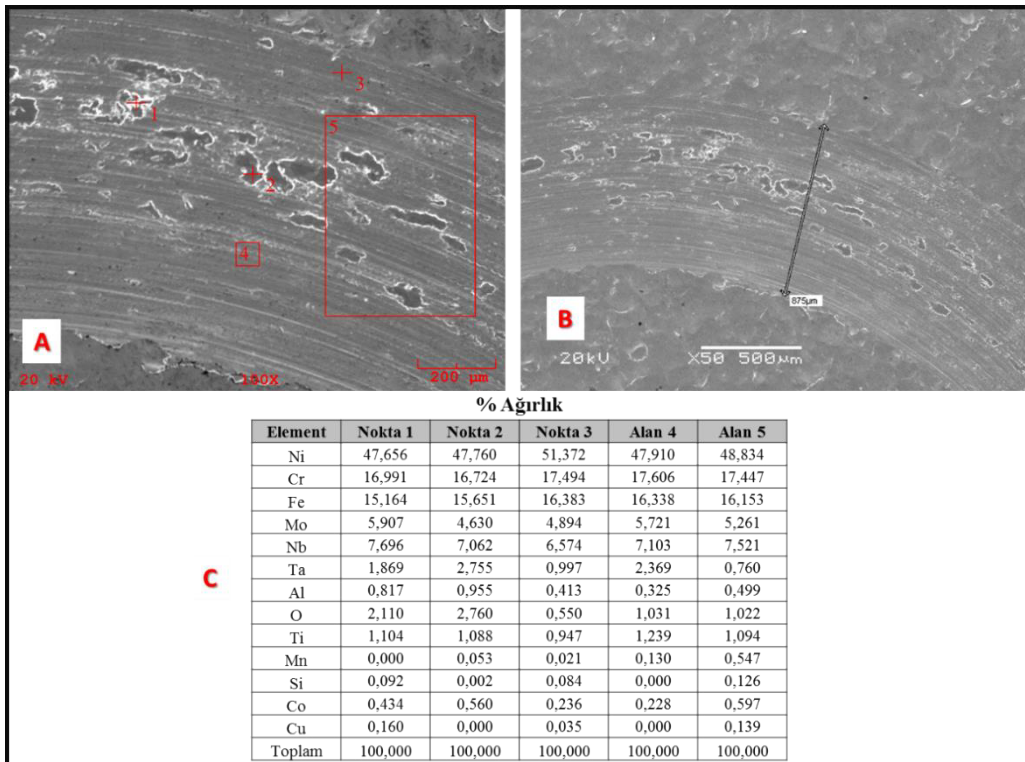
Şekil 6.12. İşlem yapılmamış 1 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



Şekil 6.13. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 2 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.

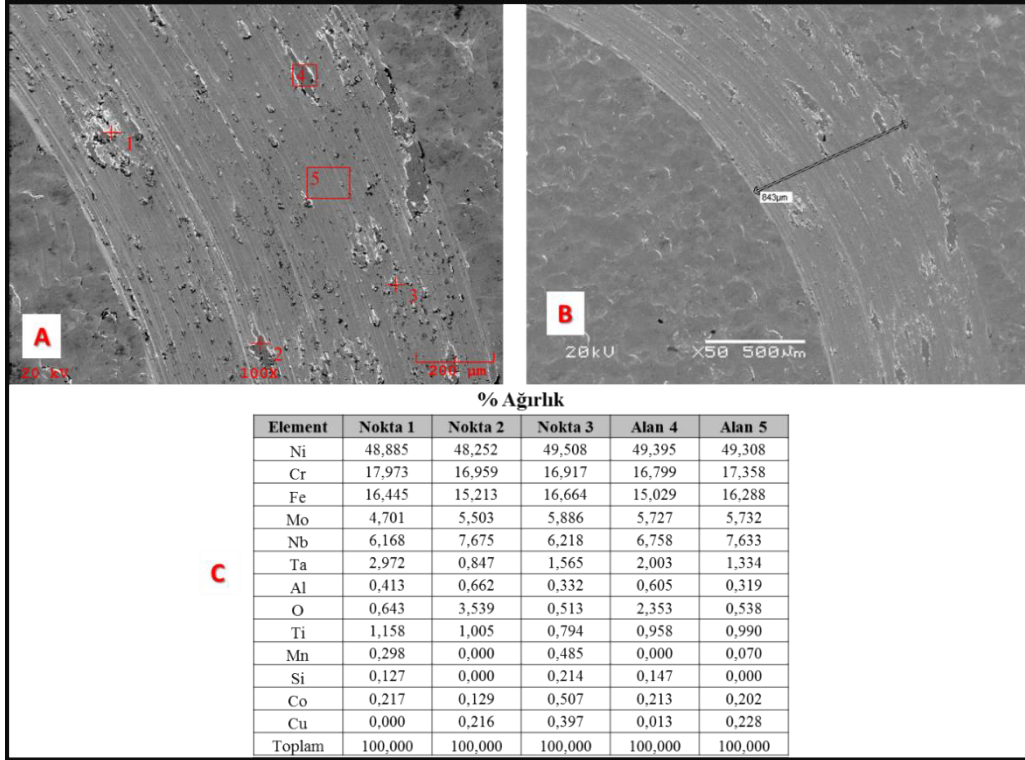


Şekil 6.14. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış 3 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.

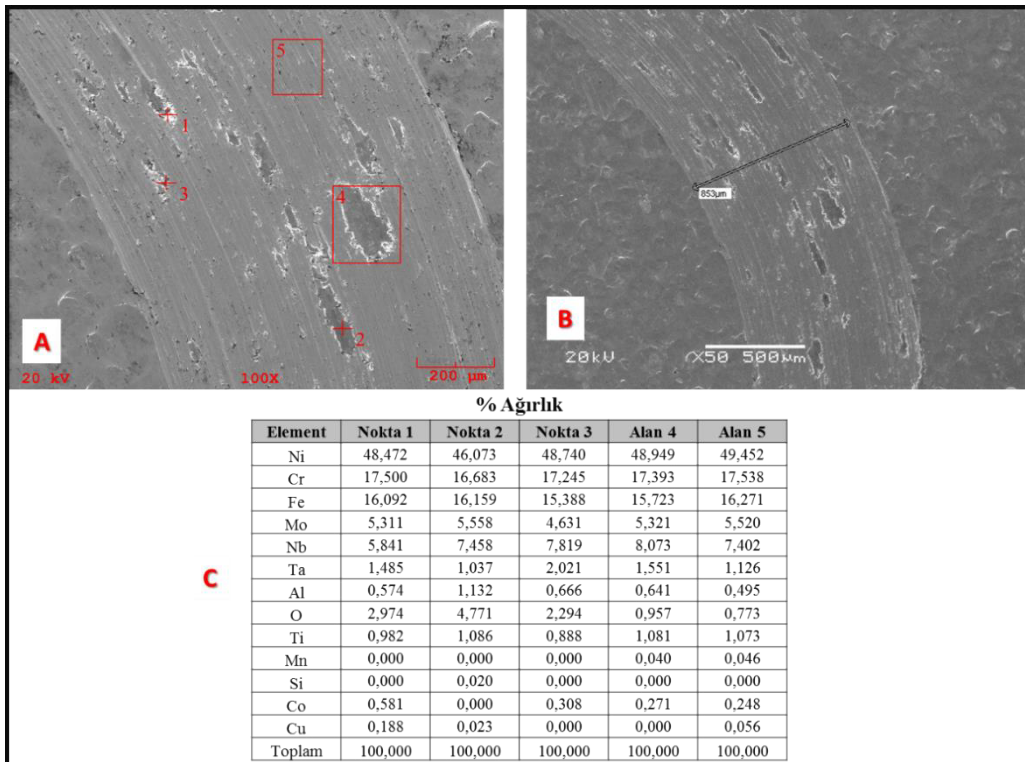


Şekil 6.15. 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş, kriyojenik işlem uygulanmamış 4 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.

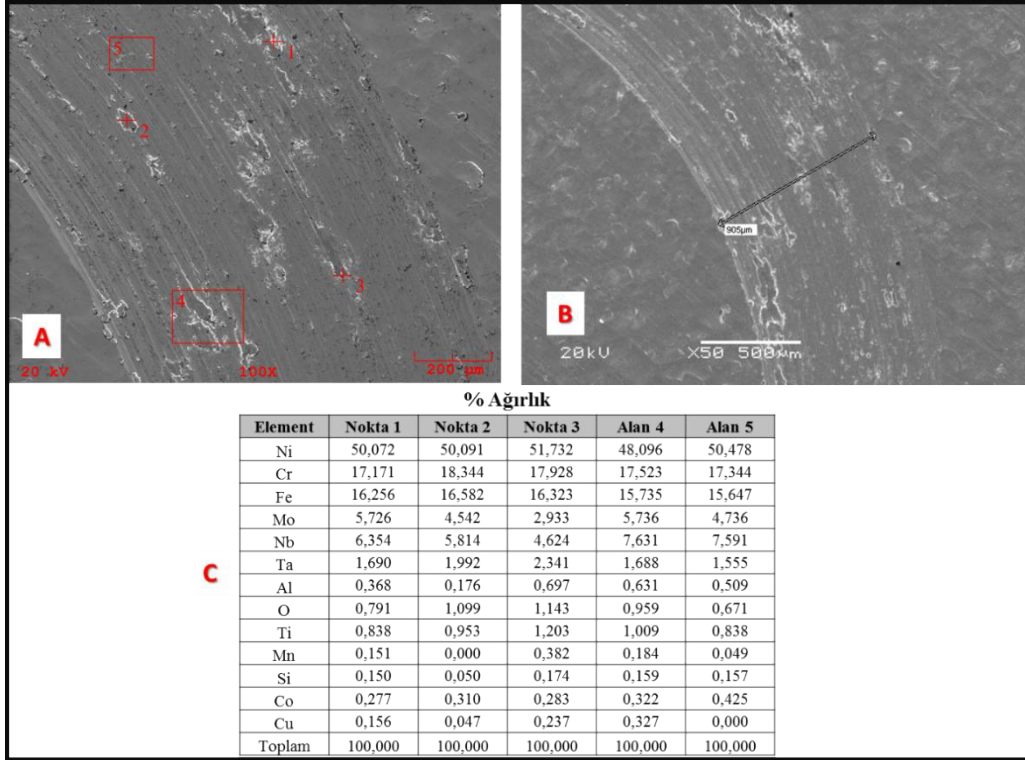




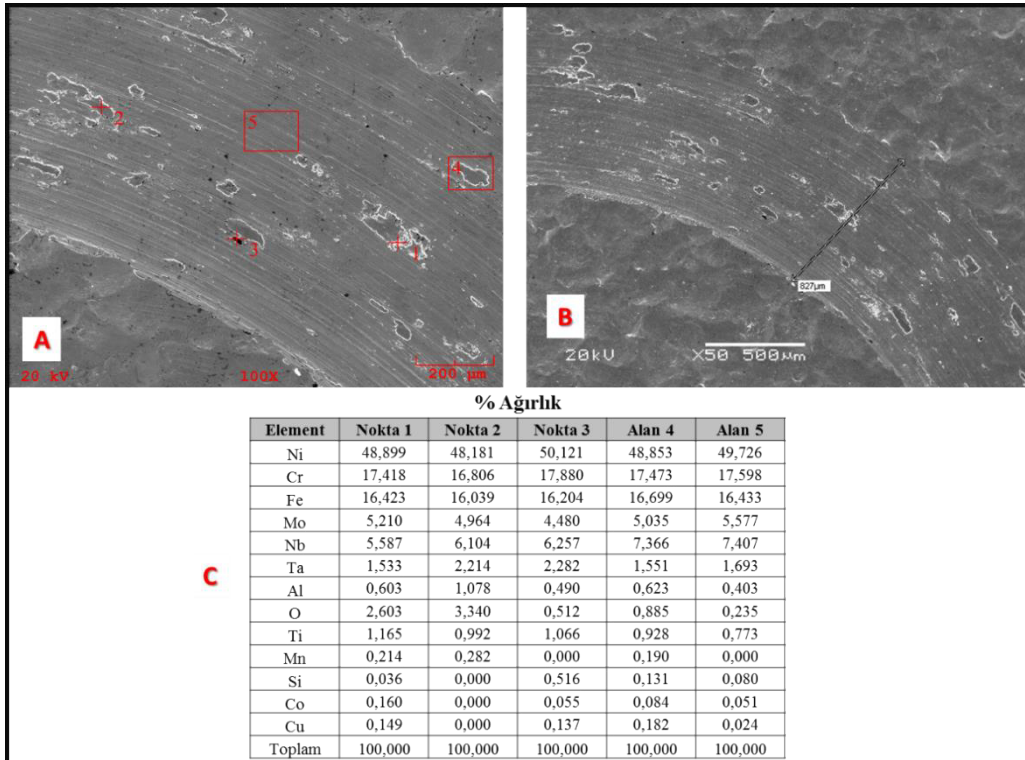
Şekil 6.16. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 5 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



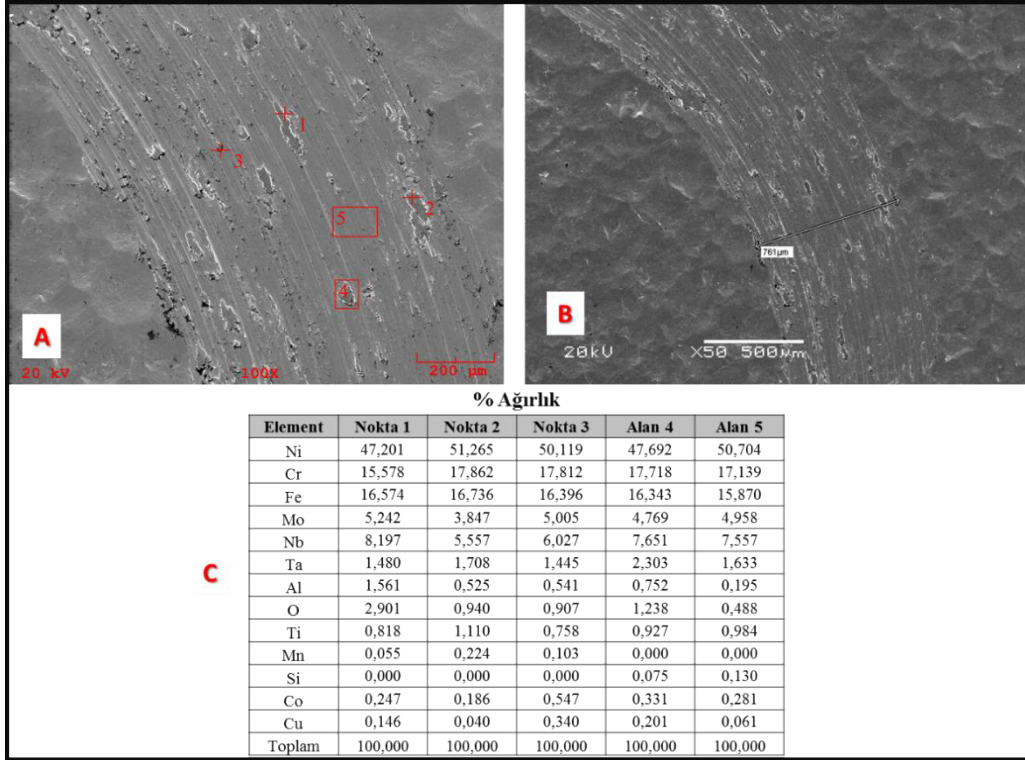
Şekil 6.17. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış 6 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



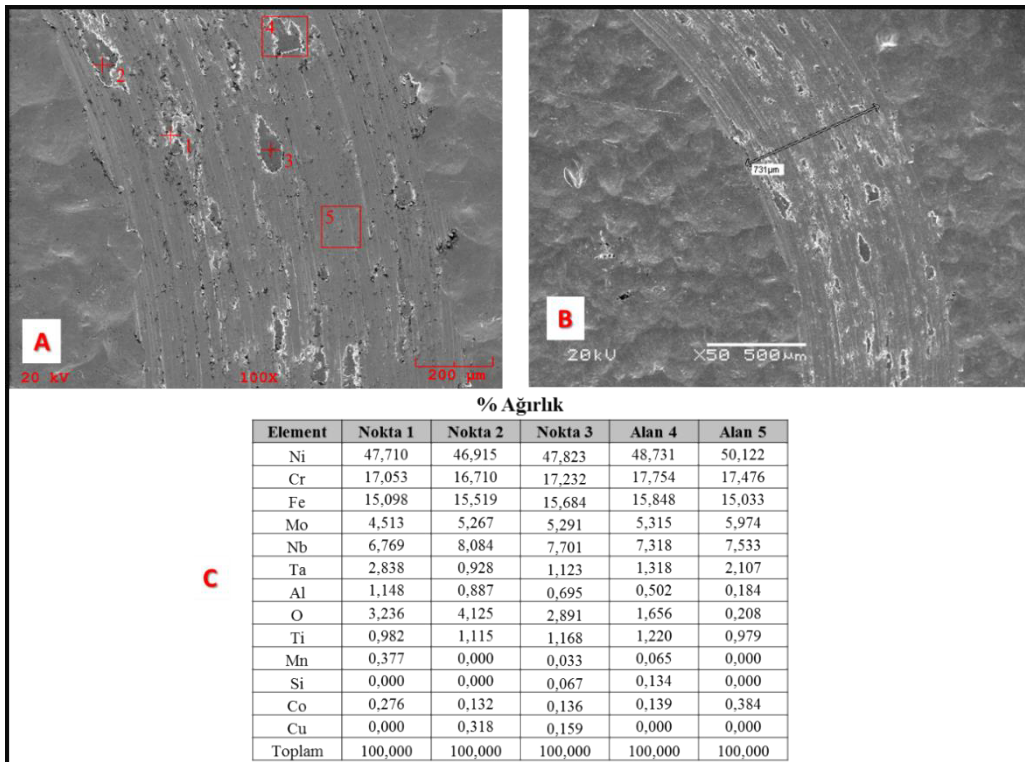
Şekil 6.18. 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş, kriyojenik işlem uygulanmamış 7 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



Şekil 6.19. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve derin kriyojenik işlem uygulanmış 8 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



Şekil 6.20. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve sıg kriyojenik işlem uygulanmış 9 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.



Şekil 6.21. 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş ve kriyojenik işlem uygulanmamış 10 numaralı numunenin; a) EDS fotoğrafı (100X), b) SEM fotoğrafı (50x), c) EDS analizi.

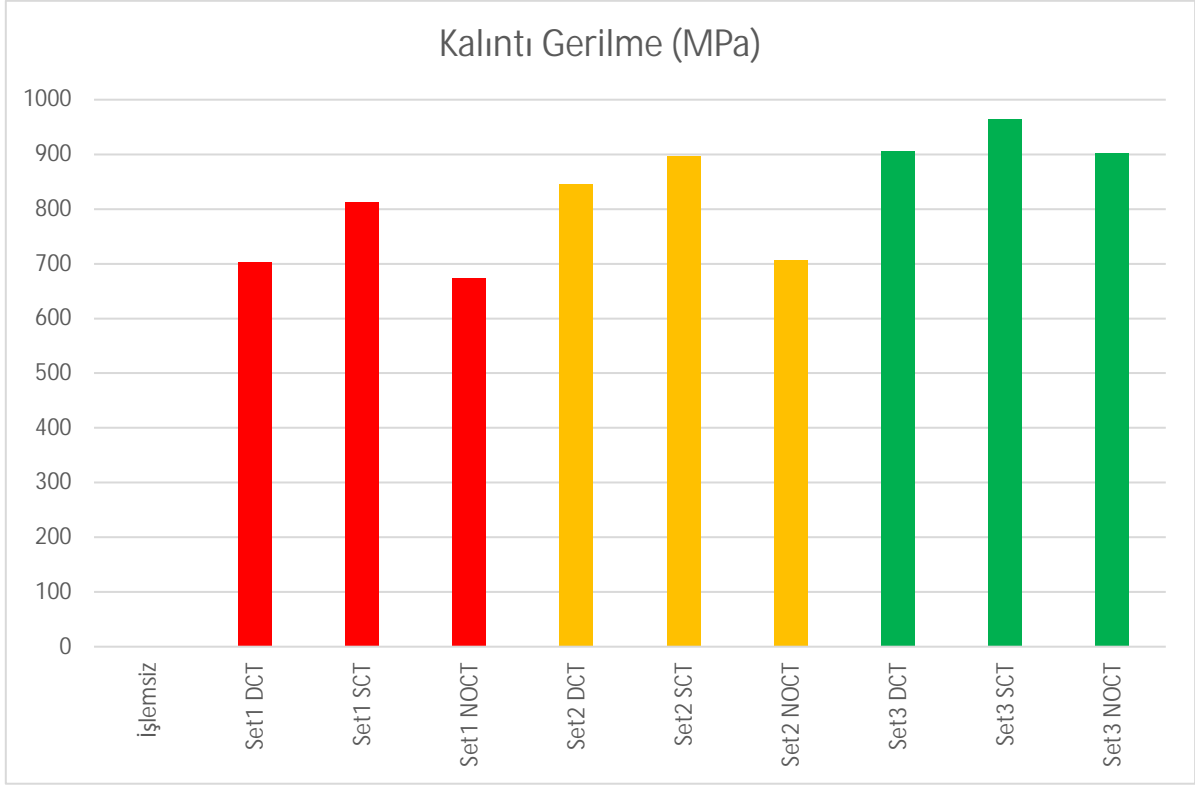
## 6.6. DeneY Sonuçlarının İrdelenmesi

Tez alışması kapsamında yapılan tüm yüzey işlemleri, ölçümler ve test sonuçları izelge 6.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.5. Tez alışması kapsamında yapılan tüm ölçüm ve test sonuçları

Numune No	Bilyalı Dövme	Kriyojenik işlem	Kalıntı Gerilme [Mpa]	Aşınma Oranları (*10 <sup>-6</sup> ) (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme Katsayısı	Yüzey Sertliği (Hv)	Kanal Genişliği (μ)
1	Yok	Yok	-	0,552	0,66	547	836
2	Bilyalı	DCT	-703,5±28,4	0,739	0,65	555	822
3	Dövme	SCT	-812,7±27,0	0,704	0,63	517	812
4	Set - 1	NOCT	-673,8±45,8	0,777	0,65	612	875
5	Bilyalı	DCT	-845,6±15,2	0,686	0,64	561	843
6	Dövme	SCT	-896,2±73,0	0,637	0,67	557	853
7	Set - 2	NOCT	-706,6±30,1	0,746	0,66	591	905
8	Bilyalı	DCT	-906,1±31,3	0,675	0,63	544	827
9	Dövme	SCT	-964,7±33,5	0,609	0,63	525	761
10	Set - 3	NOCT	-902,4±59,4	0,716	0,65	556	731

Yalnızca bilyalı dövme işlemi yapılmış numunelerde dövme yoğunluğu ile kalıntı gerilmenin doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bilyalı dövme parametrelerine göre numuneler gruplandığında, kriyojenik işlem yapılmış numunelerde kalıntı gerilmenin arttığı görülmektedir. Bilyalı dövme numunelerine ait tüm setlerde SCT işlemi yapılan numunelerin kalıntı gerilmeler DCT yapılanlara göre daha yüksek çıkmıştır (şekil 6-22).



Şekil 6.22. Numunelerin Kalıntı Gerilme Değerleri

Aşındırıcı bilya ile numuneler arasındaki sürtünme katsayıları birbirlerine yakın olup 0,63 – 0,67 aralığında olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkarak mikroyapısında bir değişiklik yapılmamış ve sertlik değerleri birbirine yakın olan numuneler ile aşındırıcı bilya arasındaki sürtünme değerlerinin birbirlerine yakın olması normal olarak değerlendirilmektedir.

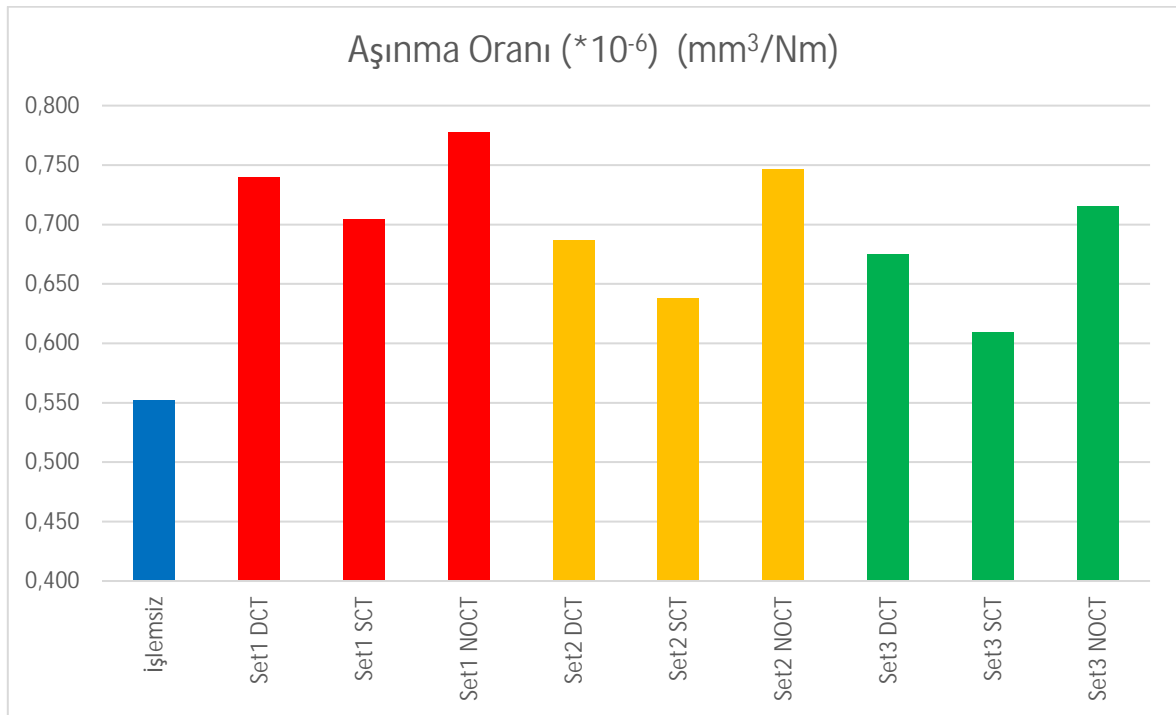
Aşınma testinin sonucunda aşınma oranı en düşük numune işlemsiz numune olmuştur. Bu durumun aşağıdaki sebeplerden dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir:

- Bilya ile dövülmüş yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü büyük oranda artmıştır. Aşındırıcı bilya, deney başlangıcında işlemsiz numunenin yüzeyinde düşük yüzey pürüzlülüğü nedeniyle kısmen daha düşük bir temas alanı oluşturmuştur. Bunun haricinde yüzeyden kopan aşınma partikülleri, işlemsiz numunenin aşınma yüzeyinde yapışarak kalmıştır (Şekil 6.12). Bu durum, işlemsiz numunede aşınma oranını göreceli olarak azaltmıştır. Bilya ile dövülen numunelerde artan temas alanı ve kopan

parçaların aşınma miktarını şiddetlendirmesi ve bu parçaların aşınma yüzeyinden uzaklaşması aşınma oranlarını kısmen arttırmıştır.

- Pürüzlülük yaratan ve numunenin genelinden daha sert durumda olan dövülmüş üçüncü partiküller işlem görmüş numuneleri bilya ile birlikte aşındırmıştır.

Burada işlemsiz numunenin yalnızca aşınma direnci açısından gösterdiği performans dikkate alınarak yorum yapılmamalıdır. Bilyalı dövme işlemi, bu tip havacılık alaşımlarında yorulma ömrünün arttırılabilmesi için talaşlı imalat işlemlerinden sonra özellikle uygulanmaktadır. Çalışmada, bilyalı dövme ve kriyojenik işlem gören numunelerin aşınma deneylerinin sonucunda her bir bilyalı dövme setinde en az aşınan numunenin SCT işlemi yapılan numune olduğu görülmüştür. DCT ve NOCT numunelerinden daha yüksek kalıntı gerilmeye sahip olan SCT'li numunelerin her 3 bilyalı dövme parametre setinde de en az aşınan numune olduğu Şekil 6.23'te görülmektedir.



Şekil 6.23. Numunelerin Aşınma Oranları

Çizelge 6.5'te 2, 3 ve 4 numaralı numuneler olarak gösterilen, en düşük yoğunluk olan 8A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş birinci sette, en yüksek aşınma yalnızca bilya ile dövülmüş olan numunede görülmüştür. Aynı setin kriyojenik işlem uygulanmış olan

numunelerinde aşınmalar daha az çıkmıştır. Bu grup içerisinde en yüksek kalıntı gerilme SCT işlemi yapılmış olan numunede görülmüştür. Sürtünme katsayıları ve sertlik değerlerinde büyük değişiklik olmamış, yüzey sertliği kriyojenik işlem ile kısmi olarak azalmıştır. Şekil 6.15.a'da verilen EDS fotoğrafında derin abrasif izler görülmektedir. Bu izlerin dışında, aşınma sırasında oluşan aşınma partikülleri açık şekilde görülmektedir. Şekil 6.15.a nokta 1 ve Şekil 6.15.a nokta 2'de görülen oksit içerikli yapılar bu durumu doğrulamaktadır. Inconel 718'in oksijene karşı olan direnci dikkate alındığında aşınmanın şiddetli olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.14.a'da verilen EDS fotoğrafında, SCT uygulanmış numunenin abrasif izlerin derinliklerinin azaldığı ve aşınma partiküllerinin belirli bölgelerde olduğu görülmektedir. Yüzey bu bilyalı dövme parametre setindeki diğer numunelere göre oldukça düzgündür. Şekil 6.13.a'da verilen EDS fotoğrafında DCT uygulanmış numunenin diğer 2 numunenin arasında bir durumda olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.5'te 5, 6 ve 7 numaralı numuneler olarak gösterilen 10A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş olan ikinci set numuneleri incelendiğinde bilyalı dövme yoğunluğunun artışına bağlı olarak aşınma değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Şekil 6.18.a'da verilen EDS fotoğrafında numune yüzeyinde, birinci bilyalı dövme setine benzer şekilde aşınma partikülleri oluşmuştur. Partiküllerin işlemsiz numuneye göre daha ince yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 6.16.a'da verilen EDS fotoğrafında bu sete ait DCT numunesinde abrasif aşınma izlerindeki azalma daha net görülmektedir. Bu sette en az aşınma ilk sette olduğu gibi SCT numunesinde görülmektedir. Şekil 6.16.a'da verilen EDS fotoğrafında SCT numunesine ait olan 6.16.a nokta 2 ve 6.16.a alan 4'te görülen oksit yüzeyleri temas alanını azaltmakta ve aşınmayı geciktirmektedir. Bu tabakaların yüzeye sağlam şekilde tutulması aşınmayı azaltan bir diğer etkidir. Diğer iki numunenin yüzeylerinde aşınma partiküllerinin delaminasyonu görülmektedir.

Çizelge 6.5'te 8, 9 ve 10 numaralı numuneler olarak gösterilen, çalışmanın en yüksek dövme yoğunluğu olan 12A yoğunluğunda bilya ile dövülmüş üçüncü set numuneleri en düşük aşınma ve en yüksek kalıntı gerilmeler elde edilmiştir. Şekil 6.20.a'da verilen EDS fotoğrafında bu sete ait olan SCT numunesinde diğer SCT numunelerine benzer aşınma partikülleri görülmektedir. Aşınma yüzey derinliğinin sığ olduğu ve kısmen geniş bir alanda temasın olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda, ilerleyen aşınma mesafelerinde oluşan aşınma partiküllerinin oluşturduğu abrasif etkiler ile aşınma ortaya çıkmıştır. Ancak yüksek

kalıntı gerilme, bu partiküllerin yaptığı plastik deformasyonu yani kazımayı azaltmıştır. Şekil 6.19.a ve Şekil 6.21.a'da verilen EDS fotoğraflarında bu sete ait SCT ve kriyojenik işlemsiz numuneler birarada incelendiğinde numunelerin aşınma yüzey görüntülerinin birbirlerine oldukça yakın olup benzer aşınma partikülleri ve çizgileri görülmektedir.

Şekil 6.12.a'da verilen EDS fotoğrafında işlemsiz numunenin aşınmış yüzey görüntüsü incelendiğinde yüzeyde büyük partiküller kaynaklı derin abrasif etkiler ve aşınma çizgisi kenarında delaminasyona uğramış tabakalar görülmektedir. Bu durum, işlem yapılmayan numunenin oldukça şiddetli aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir. 6.12.a nokta 2 ve 6.12.a nokta 4'te görülen %5 mertebelerindeki oksijen muhteviyatı bu durumu desteklemektedir. Ancak, tekrarlanan aşınma turları ile oluşan küçük partiküller yüzeye gömülü kalarak deney sonunda aşınma oranının az oluşmasına neden olmuştur.

Tüm deney sonuçları göz önüne alındığında aşınma ve yorulma mekanizmalarının aynı anda yer aldığı sistemlerde, yorulma ömrünü arttıran bir işlem olan bilyalı dövme işlemi sonrasında kriyojenik işlem yapılarak parçaların aşınma direncinin de arttırabilmenin mümkün olacağı sonucuna varılmıştır.



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Inconel 718 malzemeye ait numunelere farklı parametrelerde bilyalı dövme ve kriyojenik işlem uygulanarak bu işlemlerin mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Numunelere üç farklı yoğunlukta dövme işlemi yapılmıştır. Her bir bilyalı dövme setinden birer adet numune olduğu gibi bırakılmış, birer numuneye SCT, birer numuneye DCT uygulanmıştır. Böylece 9 farklı işlem yapılmış, 1 adette hiç işlem yapılmamış toplamda 10 adet numune ile Inconel 718 malzemede yapılan işlemlerin etkileri incelenmiştir. İşlem sonrası bilya ile dövülmüş ve kriyojenik işlem yapılmış numunelere kalıntı gerilme ölçümü yapılmış, sonrasında sertlik ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, son olarak aşınma deneyleri ile mekanik özelliklerde oluşan etkiler araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Numunelere 8A, 10A ve 12A yoğunluğunda, aynı bilya, nozul mesafesi ve nozul açısı ile bilyalı dövme işlemi yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemi sonucu yüzey sertliğinin artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bilyalı dövme sonrasında yüzey pürüzlülükleri ciddi oranda artmıştır. Her bilyalı dövme setinin kendi içinde yüzey pürüzlülüklerinin benzer oldukları görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki ölçüm farklılıklarının, işlenmiş yüzeye göre daha fazladır.
- Her bir bilyalı dövme seti üçerli olarak gruplanmış ve birer adedine aynı -196 °C'de 24 saat kriyojenik işlem, birer adedine -145 °C'de 24 saat kriyojenik işlem yapılmıştır. Birer adedi de bilyalı dövme yapılmış olarak bırakılmıştır.
- İşlem sonrası kriyojenik işlem yapılmayan numuneler karşılaştırıldığında kalıntı gerilmeler ile dövme yoğunluğunun doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Kalıntı gerilmeler literatürde daha önce bulunmuş olan pik değerleri ile uyumlu olacak şekilde 128°'lik 2θ açısına denk gelen bölgelerden ölçülmüştür.
- Sadece bilyalı dövme yapılmış numuneler kendi içlerinde incelendiğinde gösterdikleri aşınma performansının birbirlerine yakın olduğu ve %10'luk bir bandın içinde oldukları görülmektedir. Aşınma deneyi sonuçlarına göre bilyalı dövme

işleminde sonra uygulanan kriyojenik işlemin aşınma performansını %25'e kadar arttırdığı görülmüştür. Test sonuçlarına göre SCT uygulanan numunelerin aşınma performansı, DCT uygulananlara göre daha iyi çıkmıştır.

- Sürtünme katsayısının, aşındırıcı bilya ile numune malzemesinin sabit olması, mikroyapıların değişmemiş olması sebebiyle birbirine yakın çıkmış ve sürtünme katsayılarının deney çıktılarına doğrudan bir etkisi olmadığı değerlendirilmiştir.
- Aşınma deneylerinin sonucunda hiç işlem görmeyen numunenin en az aşındığı görülmüştür. Ancak EDS analizinde görülen yüksek oksit içeriği ve EDS fotoğrafı bu numunenin çok şiddetli aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir.
- Bilyalı dövme sonucunda beklenildiği gibi kalıntı gerilmeler oluşmuştur. İşlem görmüş 9 numunenin sonuçları, aşınmanın kalıntı gerilme ile orantılı olduğunu göstermektedir.
- Bilyalı dövme ve kriyojenik işlem yapılmış Inconel 718'in sertlik ve sürtünme katsayısı gibi mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

Çalışmanın genel sonucu olarak hem yorulma, hem aşınma mekanizmalarının rol oynayacağı sistemlerde yorulma dayanımının artırılması amacıyla yapılacak bilyalı dövme prosesine ilave olarak, aşınma direncinin artırılması için sıg kriyojenik yüzey işleminin uygulanması tavsiye edilmektedir.

Aşınma deneyleri, Inconel 718 malzemenin çalışma ortamı olan yüksek sıcaklar yerine aşınma cihazının oda sıcaklığında çalışmaya uygun olması sebebiyle oda sıcaklığında yapılmıştır. İlerleyen dönemde yapılacak benzer bir çalışmanın yüksek sıcaklığa sahip ortamda yapılarak sonuçlara olan etkisi araştırılabilir.

Bilyalı dövme ve kriyojenik işlemin birlikte uygulandığı bir çalışma literatür araştırmasında görülmemiştir. Bu iki yüzey işleminin Inconel 718 dışında diğer metallere olan etkileri araştırılarak aşınma ve yorulma mekanizmalarının bir arada olduğu sistemlerdeki etkileri incelenebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ajit Jain, 2001, A database for shot peening parameters and desired residual stress distribution
- Andrzej Kubit, Magdalena Bucior, Władysław Zielecki, Feliks Stachowicz, 2016, The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel
- Anna Medvedeva, Jens Bergström, Staffan Gunnarsson, Pavel Krakhmalev, 2010, Thermally activated relaxation behaviour of shot-peened tool steels for cutting tool body applications
- ABSS – Abrasive Blasting Service & Supplies Pty Ltd, 2018  
<https://www.abss.net.au/products/shot-peening-equipment/>  
erişim tarihi: 24.04.2018
- D. Senthilkumar, 2016, Effect of deep cryogenic treatment on residual stress and mechanical behaviour of induction hardened En 8 steel, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2:4, 427-436, DOI: 10.1080/2374068X.2016.1244326
- Esad Kaya, Mustafa Ulutan, 2016, Investigation of Tribological and Mechanical Properties of Cryogenic Treated Micro Alloyed Steels
- F.P. Zimmerli, 1941, Shot blasting and its effect on fatigue life
- Franck Petit-Renaud, 2002, Optimization of the Shot Peening Parameters
- Frederick J. (Rick) Diekman, 2013, Deep Cryogenic Treatment, *Thermal Processing Magazine* 04.2013 – 52-55  
<http://thermalprocessing.com/article/detail/6271/deep-cryogenic-treatment/>  
erişim tarihi: 16.03.2018
- G. Wallis – Vapormatt Limited, 1991, Peening and Wet Peening, *The Shot Peener Magazine* Volume 5 Issue 1, p.4-7
- Gary Slavin, Daniel Child, Benjamin Moore, Wolfgang Hennig, 2017, Evaluation of spherical conditioned cut wire in comparison to cast steel shot peening media applied to Inconel 718

**KAYNAKLAR DİZİNİ ( devam )**

Gary S. Schajer, Clayton O. Ruud, Overview of Residual Stresses and Their Measurement, 2013, Practical Residual Stress Measurement Methods, John Wiley & Sons Ltd p.1-27

Gerhard W. König, 2002, Life Enhancement of Aero Engine Components by Shot Peening: Opportunities and Risks

Innovatie Peening Systems Global – The Shot Peener Magazine Intensity 101 – Intensity review, [http://www.ipeenglobal.com/Intensity\\_review.pdf](http://www.ipeenglobal.com/Intensity_review.pdf)  
erişim tarihi: 24.04.2018

Jack Champaigne, 1992, Shot Peening Intensity Measurement, The Shot Peener Magazine Volume 6 Issue 4, p.1-6

Jean-Patrick Goulmy, V. Boyer, L. Toualbi, P. Kanoute, S. Kruch, D. Reiraint, E. Rouhaud, A. Seror, Q. Puydt, 2017, Assessment of shot-peening on fatigue life of Inconel 718 turbine disk

John O. Almen, 1942, Shot Blasting Test, US Patent No: 2350440

Kaixuan Gu, Zhiqiang Li, Junjie Wang, Yuan Zhou, Hong Zhang, Bing Zhao, Wei Ji, 2013, The Effect of Cryogenic Treatment on the Microstructure and Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy

Kip Hanson, 2015, Shot peening offers a cost-effective way to make stronger metal products, <https://www.practicalmachinist.com/cutting-tool-engineering/shot-peening-offers-a-cost-effective-way-to-make-stronger-metal-products>,  
erişim tarihi: 20.05.2018

M.N. James, 2010, Residual Stress Influences in Mechanical Engineering

Manjunath S, Ajay Kumar B S, 2016, An Extensive Review on the Effects of Deep Cryogenic Treatment on Cutting Tools

**KAYNAKLAR DİZİNİ ( devam )**

- Matteo Strano, Stefano Tirelli, Elio Chiappini, Michele Monno, Quirico Semeraro, Emanuele Perazzoli, 2015, Cryogenics in Machining
- Mattias Lundberg, Ru Lin Peng, Maqsood Ahmad, Taina Vuoristo, Daniel Bäckström, Sten Johansson, 2014, Influence of Shot Peening Parameters on Residual Stresses in Flake and Vermicular Cast Irons
- M.E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway, F.A. Kandil, J. Shackleton and L. Suominen, 2005, Measurement Good Practice Guide No. 52, Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2
- OSK-Kiefer GmbH – Definition Of Shot Peening Control And Parameters, 2018  
[http://osk-kiefer.de/wp-content/uploads/28\\_definition\\_of\\_shot\\_peening\\_control\\_and\\_parameters\\_go.pdf](http://osk-kiefer.de/wp-content/uploads/28_definition_of_shot_peening_control_and_parameters_go.pdf), erişim tarihi: 24.04.2018
- P. Baldissera, C. Delprete, 2008, Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review
- Paul S. Prevéy, 1977, Method Of Determining The Elastic Properties Of Alloys In Selected Crystallographic Directions For X-Ray Diffraction Residual Stress Measurement
- Peter Hutmann, 2002, The Application of Mechanical Surface Treatment in the Passenger Car Industry
- Richard E. Brooks, 2016, An Introduction to Shot Peening for Increasing Gear Fatigue Life, Gear Solutions Magazine  
[http://gearsolutions.com/media/uploads/uploads/assets/Digital\\_Editions/201610/1016-Peening.pdf](http://gearsolutions.com/media/uploads/uploads/assets/Digital_Editions/201610/1016-Peening.pdf), erişim tarihi: 18.03.2018
- Shandong Kaitai Shot-Blasting Machinery Co. Ltd., 2018,  
<http://www.kaitaimachinery.com/product/steel-shot.html>  
erişim tarihi: 23.05.2018
- Sıtkı Akıncioğlu, Hasan Gökkaya, İlyas Uygur, 2014, A review of cryogenic treatment on cutting tools

**KAYNAKLAR DİZİNİ ( devam )**

Special Metals Corporation – Inconel 718 Datasheet

[http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel\\_alloy\\_718.pdf](http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf),  
erişim tarihi: 20.03.2018

Thierry Klotz, Dorian Delbergue, Hong Yan Miao, Philippe Bocher, Martin Lévesque,  
Myriam Brochu, 2017, Analytical fatigue life prediction of shot peened Inconel 718

Yoshiaki Akiniwa, Hidehiko Kimura And Takeo Sasaki, 2009, Effect Of Residual Stresses  
On Fatigue Strength Of Severely Surface Deformed Steels By Shot Peening

Yoshinori Ono, Tetsumi Yuri, Hideshi Sumiyoshi, Etsuo Takeuchi, Saburo Matsuoka,  
Toshio Ogata, 2004, High-Cycle Fatigue Properties at Cryogenic Temperatures in  
INCONEL 718 Nickel-based Superalloy