



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SIĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN CPOH TAKIM  
ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**FERHAT ÇALIŞKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. FUAT KARA**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**SİĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN X40 CRMOV5 1 TAKIM**  
**ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN**  
**İNCELENMESİ**

Ferhat ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Fuat KARA

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Fuat KARA

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nursel ALTAN ÖZBEK

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat AYDIN

Karabük Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08/09/2022

## BEYAN

Bu tezde yapılan çalışmanın bana ait olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi beyan ederim. Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

08 Eylül 2022

Ferhat ÇALIŞKAN

## TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans eğitimimde ve bu tez çalışmasının hazırlanması süresince desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarım esnasında karşılaştığım problemlerin çözümünde tecrübesi ile bana destek olan, tez çalışmamı gerçekleştirmemde, görüşleri ile yol gösteren çok değerli hocam Doç. Dr. Fuat KARA'ya en içten dileklerle teşekkür ederim.

Aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Gebze Teknik Üniversitesi Alüminyum Araştırma ve Uygulama Merkezi Öğretim Görevlisi Ömer Faruk DENİZ'e teşekkür ederim. Darbe ve makro sertlik deneylerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Has Çelik A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi destekleriyle beni bugünlere getiren değerli aileme, her zaman yanımda olan eşim Zümra ÇALIŞKAN ve canım kızım Merve'ye teşekkürü bir borç bilirim.

**08 Eylül 2022**

**Ferhat ÇALIŞKAN**

## İÇİNDEKİLER

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                       | II   |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                     | IV   |
| KISALTMALAR .....                                        | V    |
| SİMGELER.....                                            | VI   |
| ÖZET .....                                               | VII  |
| ABSTRACT.....                                            | VIII |
| 1. GİRİŞ.....                                            | 1    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                           | 3    |
| 2.1 KRİYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR ..... | 3    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                              | 10   |
| 3.1 KRİYOJENİK İŞLEM UYGULAMASI .....                    | 16   |
| 3.2 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....                               | 18   |
| 3.3 DARBE DENEYLERİ.....                                 | 19   |
| 3.4 AŞINMA DENEYLERİ .....                               | 20   |
| 3.5 MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....                          | 21   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....                             | 24   |
| 4.1 MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....        | 24   |
| 4.2 MAKRO VE MİKRO SERTLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....     | 36   |
| 4.3 DARBE DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....             | 39   |
| 4.4 AŞINMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....         | 41   |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                | 48   |
| 6. KAYNAKLAR .....                                       | 50   |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                           | 57   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                   | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 3.1 Çentik darbe testi numunesinin teknik resmi. ....                       | 12              |
| Şekil 3.2 Aşınma deney numunesi teknik resmi. ....                                | 12              |
| Şekil 3.3 CNC torna taşlama tezgahı. ....                                         | 13              |
| Şekil 3.4 Kalıpcı freze tezgahı. ....                                             | 14              |
| Şekil 3.5 Düzlem yüzey taşlama tezgahı. ....                                      | 15              |
| Şekil 3.6 Tel Erezyon tezgahı. ....                                               | 16              |
| Şekil 3.7 Akış diyagramı. ....                                                    | 17              |
| Şekil 3.8 CPOH takım çeliğine uygulanan ısıl işlem basamakları. ....              | 18              |
| Şekil 3.9 MMD Criyo 125 marka kriyojenik işlem cihazı. ....                       | 19              |
| Şekil 3.10 REF-SAN marka RD-50 ısıl işlem fırını. ....                            | 20              |
| Şekil 3.11 MICROBUL-N marka mikro sertlik ölçüm cihazı. ....                      | 21              |
| Şekil 3.12 Çentik darbe test cihazı. ....                                         | 22              |
| Şekil 3.13 CSM marka aşınma cihazı. ....                                          | 23              |
| Şekil 3.14 Veeco Dektak 8 marka yüzey profilometre cihazı. ....                   | 23              |
| Şekil 3.15 QUANTA FEG-250 marka taramalı elektron mikroskobu. ....                | 24              |
| Şekil 3.16 BRUKER D-8 ADVANCE X-Ray Device marka XRD analiz cihazı. ....          | 25              |
| Şekil 4.1 Östenit fazının martenzit fazına dönüşümü [52], [53]. ....              | 27              |
| Şekil 4.2 CHT numunesi mikroyapı görüntüsü ....                                   | 29              |
| Şekil 4.3 SCT-18 numunesi mikroyapı görüntüsü. ....                               | 29              |
| Şekil 4.4 DCT-18 numunesi mikroyapı görüntüsü. ....                               | 30              |
| Şekil 4.5 DCT-36 numunesi mikroyapı görüntüsü. ....                               | 30              |
| Şekil 4.6 CHT numunesi element dağılım analizi. ....                              | 33              |
| Şekil 4.7 SCT-18 numunesi element dağılım analizi ....                            | 34              |
| Şekil 4.8 DCT-18 numunesi element dağılım analizi. ....                           | 35              |
| Şekil 4.9 DCT-36 numunesi element dağılım analizi. ....                           | 36              |
| Şekil 4.10 Numunelerin XRD paternleri. a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36. .... | 37              |
| Şekil 4.11 Makro sertlik değerlerindeki değişim. ....                             | 39              |
| Şekil 4.12 Mikro sertlik değerlerindeki değişim. ....                             | 40              |
| Şekil 4.13 Numunelerin darbe dayanımı. ....                                       | 42              |
| Şekil 4.14 Aşınma oranları. ....                                                  | 44              |
| Şekil 4.15 10N için sürtünme katsayıları. ....                                    | 45              |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16 Aşınma alanı 3D görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.....                     | 44 |
| Şekil 4.17 Aşınan yüzey pürüzlülük değeri (Ra).....                                                | 45 |
| Şekil 4.18 Aşınan yüzeylerin SEM görüntüsü a) CHT b) SCT-18 c) SCT-18 d) DCT-36.<br>.....          | 45 |
| Şekil 4.19 Aşınma yüzeyindeki element dağılım analizi a) CHT b) SCT-18 c) DCT-18<br>d) DCT-36..... | 46 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                               | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Çizelge 3.1 CPOH Çeliğinin kimyasal bileşenleri [49].                         | 11              |
| Çizelge 3.2 CNC torna tezgahı teknik özellikler.                              | 13              |
| Çizelge 3.3 Kalıpcı freze tezgahı teknik özellikler.                          | 14              |
| Çizelge 3.4 Satih taşlama tezgahı teknik özellikler.                          | 15              |
| Çizelge 3.5 Tel erezyon tezgahı teknik özellikler.                            | 16              |
| Çizelge 3.6 Kriyojenik işlem cihazının teknik özellikleri                     | 19              |
| Çizelge 4.1 Kriyojenik işlemin kalıntı östenit oranında sağladığı iyileşme.   | 27              |
| Çizelge 4.2 Takım çeliklerinde görülen karbürlerin kristal yapısı [65], [66]. | 32              |



## KISALTMALAR

|       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| AISI  | Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü |
| CHT   | Temperli Geleneksel Isıl İşlem    |
| CNC   | Bilgisayar Sayısal Kontrol        |
| DCT   | Derin Kriyojenik İşlem            |
| DIN   | Alman Standartları Enstitüsü      |
| HB    | Brinell sertlik birimi            |
| HRb   | Sertlik birimi (B-Rockwell)       |
| HRc   | Sertlik birimi (C-Rockwell)       |
| HV    | Vickers sertlik birimi            |
| MPa   | Mega paskal (basınç birimi)       |
| N     | Newton                            |
| Nm    | Newton metre                      |
| OM    | Optik Mikroskop                   |
| XRD   | X-Işını Kırınım yöntemi           |
| EDAX  | Element Dağılım Analizi           |
| SAE   | Otomotiv Mühendisleri Birliği     |
| SCT   | Temperli Sıg Kriyojenik İşlem     |
| cm    | Santimetre                        |
| dk.   | Dakika                            |
| g     | Gram                              |
| m     | Metre                             |
| maks. | Maksimum                          |
| mm    | Milimetre                         |
| s     | Saniye                            |
| vd.   | ve diğerleri                      |

## SİMGELER

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| C      | Karbon                    |
| Co     | Kobalt                    |
| Cr     | Krom                      |
| Cu     | Bakır                     |
| J      | Joule                     |
| K      | Kelvin                    |
| Mn     | Mangan                    |
| Mo     | Molibden                  |
| Ni     | Nikel                     |
| P      | Fosfor                    |
| S      | Aşınma mesafesini         |
| Si     | Silisyum                  |
| V      | Vanadyum                  |
| X      | Malzeme sınıfı            |
| °C     | Santigrat derece          |
| k      | Spesifik aşınma oranı     |
| v      | Aşınan malzemenin hacmini |
| $\eta$ | Eta karbür                |

## ÖZET

### SIĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN CPOH TAKIM ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ferhat ÇALIŞKAN  
Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Fuat KARA

Eylül 2022, 56 sayfa

CPOH soğuk iş takım çeliği; plastik ve sac metal kalıpları, ovalama makaraları ve yonga bıçakları gibi yüksek aşınma ve darbe dayanımı gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan CPOH soğuk iş takım çeliği hakkında, literatürde sınırlı sayıda araştırma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışma ile derin ve sığ kriyojenik işlem uygulanan CPOH soğuk iş takım çeliğinin mikroyapısı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Deney numuneleri sadece geleneksel ısıl işlem uygulanan “CHT” 18 saat bekleme süresinde ve -80 °C sıcaklıkta sığ kriyojenik işlem uygulanan “SCT-18” 18 ve 36 saat bekleme sürelerinde -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulanan “DCT-18” ve “DCT-36” olmak üzere 4 farklı grupta sınıflandırılmıştır. Kriyojenik işlem uygulanan numunelere 200 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca temperleme işlemi yapılmıştır. Numunelerin mikro sertlik, makro sertlik, aşınma dayanımı darbe enerjisi ve mikro yapıları incelenmiştir. CPOH takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem neticesinde makro sertlik değerinde %1,1 ve mikro sertlik değerinde ise %2,17 olmak üzere en fazla oransal artış SCT-18 deney numunesinde ölçülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinde sırasıyla %13,47, %11,77 ve %3,71 oranında iyileşmeler meydana gelmiştir.

**Anahtar sözcükler:** CPOH takım çeliği, Kriyojenik işlem, Mekanik özellikler, Mikroyapı.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHALLOW AND DEEP CRYOGENIC PROCESS ON WEAR AND IMPACT PERFORMANCE OF CPOH TOOL STEEL

Ferhat ÇALIŞKAN  
Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Manufacturing Engineering  
Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fuat KARA  
September 2022, 56 pages

CPOH cold work tool steel; It is used in places where high wear and impact resistance is required such as plastic and sheet metal molds, scouring rollers and chip blades. It is seen that limited research has been done in the literature about CPOH cold work tool steel, which has a wide usage area in the industry. In this study, the changes in the microstructure and mechanical properties of CPOH cold work tool steel, which were subjected to deep and shallow cryogenic treatment, were investigated. The test specimens were only tested with conventional heat treated "CHT" 18 hours holding time and -80 °C shallow cryogenic treatment "SCT-18" 18 and 36 hours deep cryogenic treatment at -196 °C temperature. It is classified in 4 different groups as DCT-18" and "DCT-36". The cryogenically treated samples were tempered at 200 °C for 2 hours. Microhardness, macro hardness, abrasion resistance, impact energy and microstructure of the samples were investigated. As a result of the cryogenic treatment applied to CPOH tool steel, the highest proportional increase in macro hardness value of 1.1% and microhardness value of 2.17% was measured in the SCT-18 test sample. The friction coefficient values of the experimental samples named SCT-18, DCT-18 and DCT-36, which were subjected to cryogenic treatment, were improved by 13.47%, 11.77% and 3.71%, respectively.

**Keywords:** Cryogenic treatment, CPOH tool steel, Mechanical properties, Microstructure.

# 1. GİRİŞ

Takım çelikleri, endüstride kullanılan birbirinden farklı birçok malzeme türünün talaşlı ve talaşsız şekillendirmede işlemlerinde kullanılmakta olup [1], toplam çelik imalatının %8'ini oluşturmaktadır [2]. Takım çelikleri kullanım yerleri ve mekanik özelliklerine göre; soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri ve plastik kalıp takım çelikleri olmak üzere dört farklı grupta sınıflandırılmıştır [3]. Endüstride; baskı makaraları, şekillendirme merdaneleri, kesme bıçakları, zımbalar ve kalıplar gibi talaşlı ve talaşsız form verme takımlarında soğuk iş takım çelikleri kullanılmaktadır [4]. Kullanım yerlerinde basınç ve darbeye tabi tutulduklarından, aşınma dayanımı ve sertliğin önem arz ettiği soğuk iş takım çelikleri 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarında yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Çeliklerin endüstriyel kullanımında istenilen mekanik özellikleri vermesindeki en önemli etken ısı işlemidir [6]. Isıl işlem, metalik malzemelerin şeklini bozmadan mikro yapı ve mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlamak için kontrollü bir şekilde ısıtılıp soğutulması sürecidir [7]. Isıl işlem sonrası takım çeliklerinin mikro yapısında kalıntı östenit oluşmakta ve bu durum mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir [8], [9]. Kriyojenik işlem, ısı işlem sonrasında malzemede istenmeyen bir faz olan kalıntı östenit yapısını, sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesine katkı sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirmektedir [10], [11].

Kriyojenik işlem malzemelerin sıfır altı sıcaklıklarda kademeli soğutulması, bu sıcaklıklarda uygun sürede bekletilmesi ve tekrardan kademeli bir şekilde oda sıcaklığına getirme sürecidir [12]. Kriyojenik işlem tek başına ısı işlem yerine geçmemekle birlikte geleneksel ısı işlem ile temperleme işlemi arasında ısı işlemi tamamlayıcı bir işlemdir [13]. Çevre dostu olmasıyla da bilinen kriyojenik işlem [14], kaplama işlemi ile mukayese edildiğinde kriyojenik işlem malzemelere bir defa uygulanır ve malzemenin tamamında kalıcı iyileşmeler sağlar [4]. Kriyojenik işlem; sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olmak üzere iki farklı uygulama sıcaklığında malzemelere uygulanır [15]. Sığ kriyojenik işlem -50 °C ile -80 °C arasındaki sıcaklıklarda uygulanırken, derin kriyojenik işlem -125 °C'nin altındaki sıcaklıklarda

uygulanmaktadır [16]. Kriyojenik işlem çevrimi; soğutma hızı, bekleme sıcaklığı ve uygulama süresi olmak üzere üç kısımdan oluşur [17]. Kriyojenik işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi, malzemenin kimyasal yapısı ile soğutma hızı, bekleme sıcaklığı ve uygulama süresi gibi kriyojenik işlem parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [18]-[21]. Farklı kriyojenik işlem parametrelerinin %18 Cr martenzit paslanmaz çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkileri araştırıldığında; aşınma direncine en fazla katkı %72'lik oranla -184 °C'deki bekletme sıcaklığı sağlarken, sonra sırasıyla 36 saatlik bekletme süresinin %24 oranında katkı sağladığı, 1 °C/dk soğuma hızının ise %10 oranında katkı sağladığı tespit edilmiştir [22]. Soğu bilim olarak da adlandırılan kriyojenik işleminin kelime kökeni Yunanca soğuk manasına gelen “kryos” kelimesinden gelmekte ve 1937'li yıllardan itibaren takım çeliklerinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağladığı bilinmektedir [23].

Bu çalışmanın gayesi CPOH soğuk iş takım çeliğine farklı bekletme sıcaklıkları ve bekleme sürelerinde uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlemin mikroyapı ve mekanik özelliklerden sertlik, darbe ve aşınma değerleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde takım çeliklerine uygulanan kriyojenik işlem ilgili önceden yapılmış araştırmalar ve sonuçları detaylı şekilde anlatılmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde deneysel süreç ile ilgili detaylı bilgiler paylaşılmıştır, 4. bölümde deneyler sonrası bulgular irdelenmiştir. En son 5.bölümde ise deneysel bulgular neticesinde sonuçlar detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, literatürde takım çeliklerine uygulanan kriyojenik işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla; yapılan çalışmaların özetleri derlenmiştir.

### 2.1 KRIYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Barron, araştırmasında; 3 paslanmaz çelik, 12 takım çeliği ve kimyasal bileşimleri birbirinden farklı 4 çelik grubundan oluşan toplamda 19 adet numuneye uygulanan sıg (-84°C) ve derin (-196°C) kriyojenik işlemin abrasif aşınma dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Takım çeliklerinde sonuçlar incelendiğinde; derin kriyojenik işlemin takım çeliklerinin aşınma dayanımında önemli bir artış sağladığı, sıg kriyojenik işlemin ise aşınma direncinde daha az bir iyileşme gösterdiği görülmüştür. Sıg ve derin kriyojenik işlemin paslanmaz çeliklerin aşınma dayanımında az miktarda bir iyileşme sağlarken, Dökme demir ile sade karbonlu çeliklerin aşınma direncinde ise herhangi bir artış sağlamadığı tespit edilmiştir [24].

Moore ve Collins, deneylerinde; üç farklı takım çeliği (AISI H13, AISI D2 ve Vanadis 4) gurubundan hazırladıkları numunelere, farklı bekletme sıcaklıkları (-40°C, -100°C ve -196°C) ve bekleme sürelerinde (0 dakika ve iki hafta) uygulanan kriyojenik işlem ve farklı temperleme işlemi sonucunda takım çeliklerinin sertliğinde meydana gelen değişimleri araştırmışlar. Kriyojenik işlemde bekleme süresi ve sıcaklığının sertliğe etkisi incelendiğinde; bekleme sıcaklığındaki artış ile sertlik değeri artarken, İki hafta bekleme süresindeki sertlik değeri hiç bekletilmeyen numunelerle kıyasla daha düşük çıktığı tespit etmişlerdir. Ayrıca temperleme sıcaklığındaki artışın ise sertlik değerini düşürdüğü belirtilmektedir [25].

Collins ve Dormer, apmış oldukları çalışmada; AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlem (DCT) sonrasında çelikte meydana gelen mekanik özelliklerdeki değişimi araştırmışlardır. Sıvı nitrojen içerisine daldırılan D2 soğuk iş takım çeliğine -140°C ile -196°C sıcaklıklarında DCT uygulanmıştır. Deney neticesinde aşınma direnci, tokluk ve sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Aşınma direnci ve toklukta iyileşmeler, temperleme sonrasında mikro yapıdaki karbür tanelerinin

homojen bir hal alarak daha ince bir dağılım göstermesine bağlanmıştır. Sertlik değerindeki artışı ise ısıtma işlem sonrasında malzemede kalan yumuşak bir faz olan kalıntı östenitin yapısının, kriyojenik işlem sonrasında sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesi ile açıklanmıştır [26].

Das vd. çalışmalarında; AISI D2 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş numunelere 0, 1, 12, 36, 60, 84 ve 132 saat olmak üzere yedi farklı bekleme süresinde -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulayıp, uygun bekleme süresini tespit etmek amacıyla farklı bekleme sürelerine maruz bırakılan numunelerin sertlik, aşınma direnci ve mikroyapı üzerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Çalışma neticesinde kriyojenik işlem uygulanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği için en yüksek aşınma direncinin 36 saat bekleme süresi boyunca kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinde tespit edildiği ileri sürülmüştür [27].

Dhokey ve Nirbhavne, çalışmalarında, AISI D3 soğuk iş takım çeliğine 8 saat bekleme süresinde -185 °C sıcaklıkta kriyojenik işlem uygulayıp, sonrasında numunelerin aşınma dayanımlarını karşılaştırarak farklı sayıda temperlemenin etkisini inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Geleneksel ısıtma işlemine kıyasla kriyojenik işlem uygulanan AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin aşınma hızı %93 oranında daha az olduğu belirlenmiştir. AISI D3 soğuk iş takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem sonrası iki ve üç temperleme işleminin ise aşınma dayanımına negatif bir etki ettiği tespit edilmiştir. Aşınma direncindeki düşüş iki ve üç temperleme sonrasında karbür boyutunun büyümesi ile açıklanmıştır [28].

Amini vd. farklı bekletme sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlemin 80CrMo12 5 soğuk iş takım çeliğinin aşınma direnci üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sıg kriyojenik işlem numunesinde kalıntı östenitin martenzit dönüşümünde %6 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür. Ayrıca derin kriyojenik işlem numunesinde yaklaşık olarak %2 oranında karbür yüzdesinde artış meydana geldiği ve daha homojen karbür dağılımı olduğu ileri sürülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası mikroyapıdaki bu değişimlerin, numunelerin sertlik ve aşınma değerlerinde iyileşmeler sağladığı düşünülmektedir. Maksimum sertlik ve aşınma değerleri 48 saat derin kriyojenik işlem gören numunede tespit edilmiştir [29].

Amini vd. yapmış oldukları çalışmada farklı bekletme sürelerinde (24, 36, 48, 72, 96 ve

120 saat) derin kriyojenik işlem uygulanan AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin mikro yapısı ve mekanik özelliklerini araştırmışlar. Çalışma neticesinde; 36 saat bekletme süresinde derin kriyojenik işleme tabi tutulan deney numunesinin diğerlerine kıyasla mikroyapıda daha homojen bir karbür dağılımı yaparak makro ve mikro sertliğin değerlerini iyileştirdiği belirtilmiştir [30].

Arslan vd. çalışmalarında, AISI D3 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş zımbaya -145°C sıcaklıkta 24 ve 32 saat iki farklı bekleme süresinde, kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında zımbada meydana gelen aşınma dayanımını incelemişler. Geleneksel ısıtma işlem ve kriyojenik işleme tabi tutulan deney numuneleri; 1,5 mm kalınlığındaki AISI 304 sac malzeme üzerinde her bir zımba 6000, 12000, 18000 ve 24000 adet delme işlemi yapmıştır. Deney sonucunda 24000 delme sayısında kriyojenik işlem uygulanan numuneler geleneksel ısıtma işlem uygulanan numunelere kıyasla ağırlıkça azalmada, alın aşınması ve hacimsel kayıp oranlarında daha iyi performans sergilemiştir. Mikroyapı incelemesinde kriyojenik işlem sonrasında karbürlerin küçülüp daha homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca kriyojenik işlem süresinin AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin aşınma ömrüne, kriyojenik işlemin ise sertlik değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı ileri sürülmüştür [31].

Dixit vd. araştırmalarında; AISI D5 soğuk iş takım çeliğine -185°C'de 36 saat derin kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında tekli ve çoklu temperleme işlemine tabi tutulan deney numunelerinin sertlik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Derin kriyojenik işlem gören numunelerin mekanik özelliklerinde geleneksel ısıtma işlemiyle oranla daha iyi neticeler gözlenmiştir. D5 çeliğinde meydana gelen bu iyileşmeler derin kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenit fazındaki düşüş neticesinde sertlik ve aşınma dayanımının artması şeklinde değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde sertlik ve aşınma değerleri bakımından optimum sonucu veren deney numunesi derin kriyojenik işlem uygulanıp sonrasında tekli temperleme işlemi uygulanan numune olduğu ileri sürülmüştür [32].

Niaki ve Vahdat, çalışmalarında; farklı bekletme sürelerindeki derin kriyojenik işlemin mekanik özelliklere olan etkisini AISI S1 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş deney numunelerinde incelemişler. Derin kriyojenik işlem sonrası numunelere üç farklı (1, 2 ve 3 saat) temperleme yapılmıştır. Sonrasında deney numunelerinin sertliği, gerilme tokluğu ve gerilme direnci değerleri belirlenip birbirleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen

bulgular sonucunda 36 saat bekle süresinde derin kriyojenik işleme tabi tutulup sonrasında 2 saat temperleme işlemi uygulanan deney numunesinin sertlik değerinde %9-16 gerilme tokluğu değerinde %12-35 ve gerilme direnci değerinde ise %28-36 oranlarında iyileşmeler olduğu belirtilmektedir [33].

Podgornik vd. çalışmalarında; derin kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için düşük karbon içerikli soğuk iş takım çeliği (A1), yüksek karbon içerikli soğuk iş takım çeliği (A2) ve orta karbon içerikli yüksek hız çeliği (B1) olmak üzere kimyasal bileşimleri birbirinden farklı üç çeliği deney numuneleri olarak seçmişler. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgulara göre; derin kriyojenik işlem A1 numunesinde kırılma tokluğu değerinde iyileşme sağladığı, A2 numunesinde negatif bir etki meydana getirdiği ve B1 numunesinde ise herhangi bir etkiye yol açmadığı tespit edilmiştir. A1 numunesinin tokluk değerindeki iyileşme mikroyapıdaki karbürlerin daha ince dağılımı ile açıklanmıştır [34].

Korade vd. çalışmalarında -185°C sıcaklıkta 36 saat bekleme süresinde derin kriyojenik işlem öncesi ve sonrası tekli ve çoklu temperleme işleminin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş deney numunelerinin tribolojik davranışlarına olan etkisini incelemişlerdir. Deneysel veriler incelendiğinde; kriyojenik işlem sonrasında bir kez temperlemenin numunenin aşınma dayanımı, sürtünme katsayısı ve sertlik bakımından optimum değerlere ulaştığı görülmüştür [35].

Güneş vd. Vanadis 4 soğuk iş takım çeliğine -145 °C sıcaklıkta farklı bekleme sürelerinde (0, 1, 12 ve 24 saat) derin kriyojenik işlem sonrasında farklı sıcaklıklarda (175 °C ve 525 °C) temperleme işlemi uygulayıp mekanik özellikler ve mikro yapıda meydana gelen değişimi araştırmışlardır. Araştırma neticesinde; 24 saat bekleme süresinde derin kriyojenik işlem ve sonrasında 525°C sıcaklıkta temperlemenin Vanadis 4 soğuk iş takım çeliğinin mikroyapısında kalıntı östenitin martenzit yapısına dönüşmesi ve ince karbür oluşumunu artırıp daha homojen karbür dağılımına katkı sağladığı savunulmaktadır. Mikroyapıdaki bu iyileşmeler aşınma dayanımını ve sertlik değerini artırıp Vanadis 4 çeliğinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirdiği görülmüştür [36].

Sing vd. çalışmalarında; kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş olan zımbaya etkilerini araştırmışlar. Araştırma sonucunda kriyojenik işlem görmüş

zımbalar görmeyenlere kıyasla; sertlikte %7.27, aşınma direncinde yaklaşık olarak %60 ve yıllık ciroda %3,5 iyileşme sağlamıştır. Aşınma direncindeki artış, ısıtılma işlem sonrasında kalan östenitin martenzite dönüşmesi ve ikincil sert karbür yapılarının çökmesi sonucunda mikroyapıdaki meydana gelen değişiklikler ile ilişkilendirilmiştir [37].

Jimbirt vd. derin kriyojenik işlemin AISI A8 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş deney numunelerine mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Aşınma dayanımı; pin-on-disk aşınma cihazında deney parametreleri 0,3 m/s hız, 100N yük ve 500 m mesafe olacak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırıldığında derin kriyojenik işlem görmüş numune geleneksel ısıtılma işlem görmüş numuneye kıyasla aşınma dayanımında yaklaşık %14'lük bir iyileşme sağlamıştır. Numuneler mikroyapı bakımından kıyaslandığında derin kriyojenik işlem gören numunenin karbür çökmesinin %6 oranında daha fazla olduğu ve karbürlerin mikroyapıda daha homojen bir dağılım sergilediği belirtilmektedir [38].

Soleimany vd. çalışmalarında; AISI H11 sıcak iş takım çeliğine uygulanan sıg ve derin kriyojenik işlemin aşınma dayanımı ile mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Pin-on-disk cihazında soğuk ( $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) ve sıcak ( $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ) aşınma testi yapılmıştır. Sıg kriyojenik işlem uygulanan numuneler sertlik değerinde %4 soğuk aşınma direncinde %31 ve sıcak aşınma direncinde %30 oranlarında iyileşme görülürken, derin kriyojenik işlem uygulanan numunede bu oranlar sırasıyla %9, 36 ve %40 olarak görülmüştür. Sertlik ve aşınma dayanımındaki iyileşmeler kriyojenik işlem sonrasında AISI H11 sıcak iş takım çeliğinin mikro yapısındaki kalıntı östeniti fazının martenzit fazına dönüşmesi ile açıklanmıştır [39].

Akgümüş ve Öztürk, çalışmalarında; Vanadis 8 soğuk iş takım çeliğine  $-196^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletme süresinde derin kriyojenik işlem uygulayıp numunelerin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Sertlik ve basma dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde; geleneksel ısıtılma işlemine kıyasla, derin kriyojenik işlem uygulanan numunenin değerlerinde daha iyi sonuçlar tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerdeki iyileşmeler; derin kriyojenik işlem sonunda daha fazla kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşmesi ve daha büyük karbür boyutları oluşması sonucunda Vanadis 8 soğuk iş takım çeliğinin mikro yapısında meydana gelen değişimler ile açıklanmıştır [40].

Cardosa vd. AISI D6 soğuk iş takım takım çeliğine iki farklı bekle süresinde (2 ve 24 saat) derin kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında deney numunelerini iki farklı (2 ve 4 saat) temperleme işlemine tabi tutup mikro yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimi araştırmışlar. Geleneksel ısı işlem ve derin kriyojenik işlem gören deney numunelerindeki mikroyapısal ve mekanik özelliklerdeki meydana gelen değişimler incelenip değerlendirildiğinde; bekleme süresi ve çift temperlemenin sertlik değerini artırdığı ve kalıntı östenit oranını düşürdüğü ileri sürülmüştür [41].

Sıtkı Akıncıoğlu, DIN X153CrMoV12 soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş numunelere -140°C'de 2 saat derin kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında tribolojik özelliklerde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Sonuçlar incelendiğinde kriyojenik işlem uygulanan numunelerin daha iyi elektriksel iletkenlik ve mikrosertlik değeri verdiği, %64,67 oranında sürtünme katsayısında artış sağladığı görülmüştür. Kriyojenik işlemin mikroyapıda ince karbür oluşumunu kolaylaştırdığı, karbür miktarında artış sağladığı ve daha homojen karbür dağılımında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir [42].

Kara vd. çalışmalarında; derin kriyojenik işlemin makro sertlik, mikro sertlik ve mikroyapı üzerinde meydana getirdiği değişimleri incelemişler. Deneyde malzeme olarak Sleipner soğuk iş takım çeliği seçilerek deney numuneleri geleneksel ısı işlem ve derin kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Derin kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerin makro ve mikro sertlik değerleri geleneksel ısı işleme kıyasla makro sertlikte 0,5 HRC mikro sertlikte ise 27,57 HV daha fazla çıkmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasındaki ölçümlerde kalıntı östenit miktarında %36, Eksenel kalıntı değerinde %48,84 ve çevresel kalıntı değerinde ise %36,52 oranlarında düşüş gözlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde derin kriyojenik işlemin Sleipner soğuk iş takım çeliğinin sertliğini artırıp, mikroyapısı homojenleştirip, kalıntı östenit ve kalıntı gerilme değerlerini ise düşürdüğü savunulmaktadır [43].

Patricia vd. araştırmalarında; -196 °C sıcaklıkta 24 saat bekleme süresinde derin kriyojenik işlemin farklı ısı işlem sıcaklıklarında farklı dört çelik grubuna (soğuk iş takım çeliği X210Cr12, sıcak iş takım çeliği X38CrMoV5-3, rulman çeliği 100Cr6 ve paslanmaz çelik X17CrNi16-2) uygulandığında meydana gelen mikroyapısal değişimleri incelemişlerdir. Deney sonuçları incelenip değerlendirildiğinde; derin kriyojenik işlemin matris iyileştirmesi ve karbür çökmesine etkisi, daha yüksek östenitleme sıcaklığına, daha düşük tavlama sıcaklıklarına ve çelik sınıfıyla ilgili olduğu

belirtilmektedir [44].

Ramos vd. derin kriyojenik işlemin, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş zımbanın takım ömrüne olan etkisini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemeleri değerlendirildiğinde; derin kriyojenik işlem gören numunede geleneksel ısıtma işlemine kıyasla daha fazla karbür çökelmeleri meydana geldiği ve zımbaların ömründe yaklaşık %50,3 oranında artış meydana geldiği belirtilmiştir [45].

Yarasu vd. çalışmalarında, Vanadis 6 soğuk iş takım çeliğinden hazırlanan deney numunelerine farklı sıcaklıklarda ( $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 17saat kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında 2 saat  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  veya  $530\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda temperleme işlemine tabi tutup aşınma davranışını incelemişlerdir. Pin-on-disk aşınma test cihazı ile iki farklı yük (1, 5 ve 10 N) ve üç farklı kayma hızda (0.064 m/s, 0.128 m/s ve 0.1885 m/s) deneyler yapıp aşınma değerleri tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar neticesinde;  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta kriyojenik işlem uygulanıp sonrasında  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de temperleme yapılan numuneler aşınma dayanımı ve sertlik bakımından en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir [46].

Shaohong vd. yapmış oldukları çalışmalarında; AISI H13 sıcak iş takım çeliğine -  $196\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 24 saat bekleme süresinde uygulanan derin kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar değerlendirdiğinde; derin kriyojenik işlemin AISI 13 sıcak iş takım çeliğinin mikroyapısında kalıntı östenitin martenzit yapısına dönüşmesini ve ince karbür oluşumunu artırıp daha homojen bir ince dağılım göstermesiyle, sertlik değerini iyileştirdiği belirtilmiştir [47].

Xu vd. çalışmalarında, AISI M35 yüksek hız çeliğinden hazırlanan deney numunelerine  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat derin kriyojenik işleme tabi tutup sonrasında 150 ile  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki farklı sıcaklıklarda 2 saat süresince üçlü temperleme işlemi uygulaması neticesinde meydana gelen mekanik ve mikroyapısal değişimi araştırmışlardır. Kriyojenik işlem sonrasında temperleme sıcaklığındaki artışın mikroyapıda kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşmesine katkı sağladığı ve  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperleme sıcaklığında başlayan karbür çökmesinin  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  de en yüksek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca temperleme sıcaklığı  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıktığında darbe dayanımı ve sertlik değerinde artış gözlenirken,  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıktığında düşüş gözlenmiştir [48].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

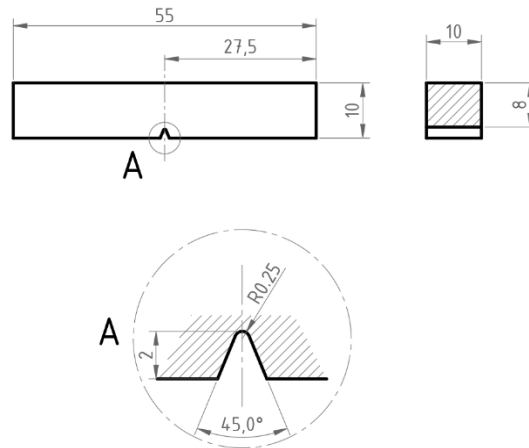
Bu çalışmada, konvansiyonel ısıl işlem sonrasında sığ ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan CPOH soğuk iş takım çeliğinden yapılan deney numunelerinin mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu doğrultuda deney numunelerinin mikroyapısındaki değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve numunelerin element dağılım analizleri (EDAX) yapılmıştır. Kriyonejik işlem sonrası mekanik özelliklerdeki değişimi incelemek amacıyla deney numunelerine sertlik, darbe ve aşınma testleri yapılmıştır.

Deneylerde, CPOH soğuk iş takım çeliği malzemesi kullanılmıştır. CPOH soğuk iş takım çeliği; plastik ve sac metal kalıpları, ovalama makaraları ve yonga bıçakları gibi yüksek aşınma ve darbe dayanımı gerektiren yerlerde kullanılmaktadır [49]. Çizelge 3.1’de CPOH soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 CPOH Çeliğinin kimyasal bileşenleri [49].

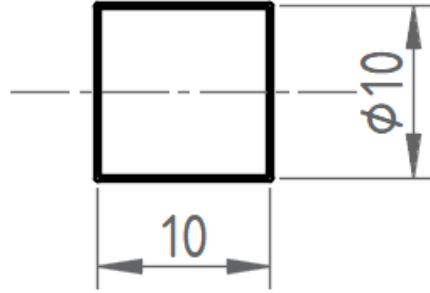
| Element | C | Cr | Mo   | V    | Diğerleri |
|---------|---|----|------|------|-----------|
| %       | 1 | 8  | 2,50 | 0,30 | +         |

Darbe enerjisi incelemek için 55 mm boyunda 10 mm kare kesite sahip deney numunelerine ait çentik darbe testi numunesinin teknik resmi şekil 3.1’de verilmiştir. Teknik resmi verilen çentik darbe deney numuneleri her deney grubu için 3 adet olmak üzere 4 deney grubu için toplamda 12 adet hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Çentik darbe testi numunesinin teknik resmi.

Aşınma deneyi ve mikro yapı incelemeleri için  $\text{Ø}10 \times 10$  mm ölçülerinde silindirik kesite sahip deney numunelerin teknik resmi şekil 3.2’de verilmiştir. Teknik resmi verilen aşınma ve mikroyapı incelemelerinde kullanılan deney numuneleri her deney grubu için 3 adet olmak üzere 4 deney grubu için toplamda 12 adet hazırlanmıştır.



Şekil 3.2. Aşınma deney numunesi teknik resmi.

Şekil 3.2’de teknik resmi verilen aşınma deney numunesi Hatice Bayraktar Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi bünyesinde bulunan şekil 3.3’te gösterilen, ACE marka CNC torna tezgahında kesme yağı kullanılarak imal edilmiştir. Çizelge 3.2’de ACE marka CNC torna tezgahına ait teknik özellikler verilmiştir.



Şekil 3.3. CNC torna taşlama tezgâhı.

Çizelge 3.2 CNC torna tezgâhı teknik özellikler.

| ACE CNC Torna Tezgâhı   |                        |
|-------------------------|------------------------|
| İşlemem Çapı:           | 270 mm                 |
| İşleme Boyu:            | 400 mm                 |
| İş Mili Hızı:           | 50 – 4000 Devir/Dakika |
| İş Mili Delik Çapı:     | 47 mm                  |
| Taret Takım Kapasitesi: | 8 Adet                 |

Şekil 3.1’de teknik resmi verilen çentik darbe testi numunesi Hatice Bayraktar Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi bünyesinde bulunan şekil 3.4’te gösterilen, JETCO marka kalıpcı freze tezgahında imal edilmiştir. Çizelge 3.3’te JETCO kalıpcı freze tezgahına ait teknik özellikler verilmiştir.



Şekil 3.4. Kalıpcı freze tezgâhı.

Çizelge 3.3 Kalıpcı freze tezgâhı teknik özellikler.

| KALIPÇI FREZE TEZGÂHI        |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Tabla Ebadı:                 | 254 x 1270 mm      |
| X & Y & Z Eksen Hareketleri: | 825 & 400 & 406 mm |
| T Kanal Ölçüsü:              | 16X3X63 mm         |
| Pinol Çapı:                  | 85,72 mm           |

Çentik darbe testi numuneleri ile aşınma testi numuneleri “Makersan A.Ş.” firması bünyesinde bulunan şekil 3.5 'te gösterilen, CHEVALIER marka düzlem yüzey taşlama tezgahında taşlanmıştır. Çizelge 3.4 'de CHEVALIER düzlem yüzey taşlama tezgahına ait teknik özellikler verilmiştir.



Şekil 3.5. Düzlem yüzey taşlama tezgâhı.

Çizelge 3.4 Satıh taşlama tezgâhı teknik özellikler.

| Düzlem yüzey taşlama tezgâhı |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| Tabla Ölçüsü:                | 400 x 400 mm                 |
| Tabla Tipi:                  | Elektro manyetik tabla       |
| Çalışma Sistemi:             | Hidrolik                     |
| Hareket Sistemi:             | Aşağı yukarı motorlu         |
| Soğutma Sistemi:             | Otomatik bor yağ ile soğutma |

Şekil 3.1’de Çentik darbe testi numunesinin teknik resminde detayları verilen 2 mm derinlik ve 45°’lik açıdaki V-çentik, “Makersan A.Ş.” firması bünyesinde bulunan şekil 3.6 ’de gösterilen, CHARMILLES marka tel erozyon tezgahında açılmıştır. Çizelge 3.5 ’de CHARMILLES tel erozyon tezgahına ait teknik özellikler verilmiştir.



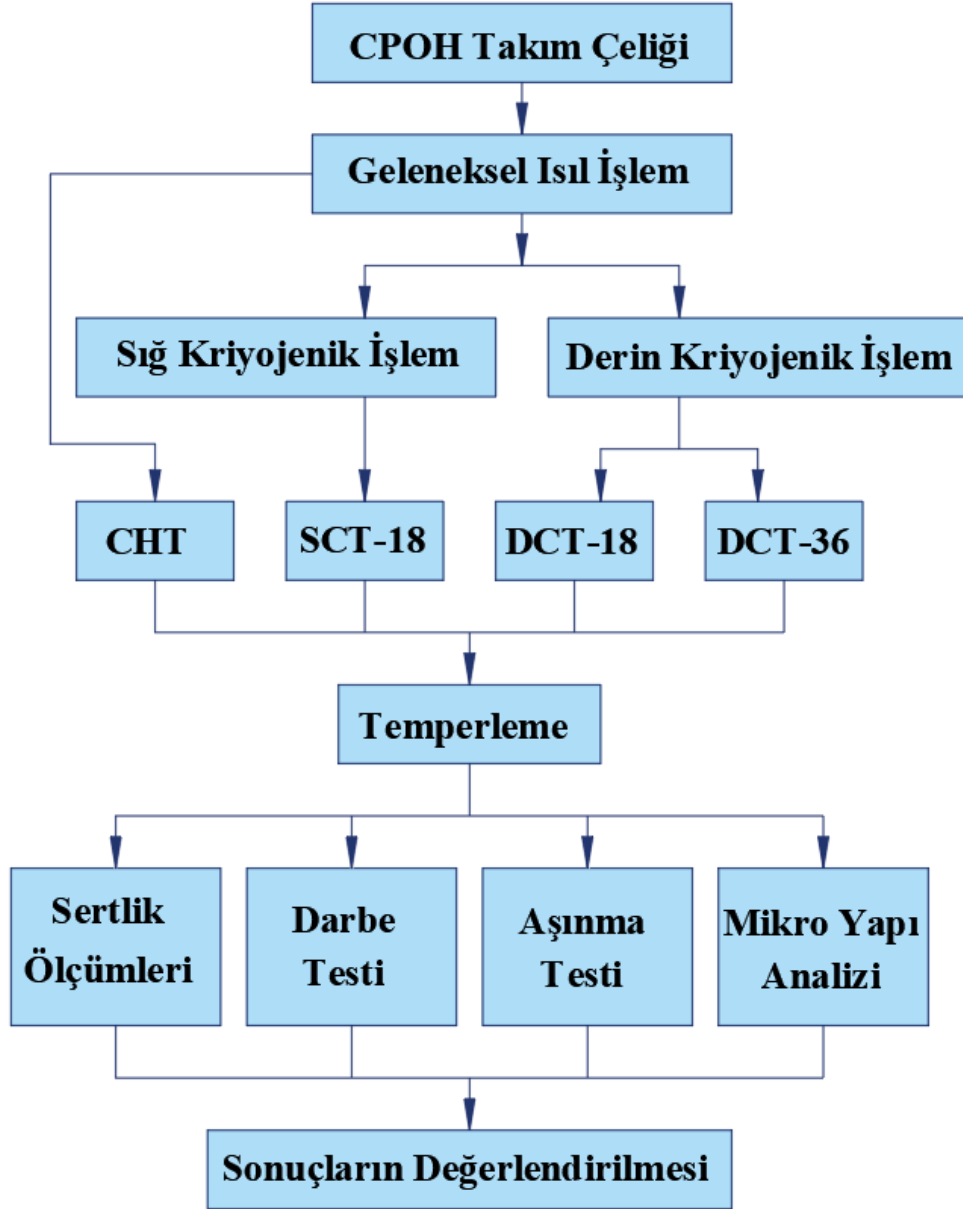
Şekil 3.6. Tel erozyon tezgâhı.

Çizelge 3.5 Tel erozyon tezgâhı teknik özellikler.

| Tel erozyon tezgâhı              |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| Maksimum İş Parçası Ağırlığı:    | 2300 kg                   |
| X & Y & Z Eksen Hareketleri:     | 800 & 600 & 400 mm        |
| U/V Hareket:                     | 60 mm                     |
| X & Y & Z Eksen Besleme Hızları: | 900 & 900 & 900 mm/dakika |

Konvansiyonel ısıt işlem sonrasında sığ ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan CPOH soğuk iş takım çeliğinden hazırlanan deney numunelerine darbe testi, aşınma testi, mikroyapı incelemesi, mikro ve makro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sadece geleneksel ısıt işlem uygulanan “CHT” 18 saat bekleme süresinde sığ kriyojenik işlem uygulanan

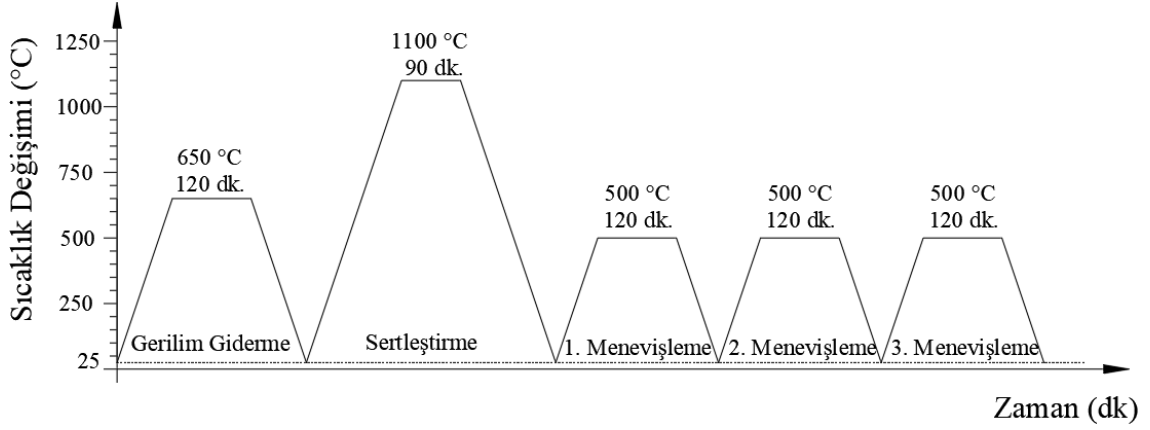
“SCT-18” 18 ve 36 saat bekleme sürelerinde derin kriyojenik işlem uygulanan “DCT-18” ve “DCT-36” olmak üzere deney numuneleri 4 farklı grupta incelenmiştir. Şekil 3.7’de bu tez çalışmasına ait akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Akış diyagramı.

CPOH soğuk iş takım çeliğinden imal edilen deney numuneleri istenilen sertliğe getirebilmek için geleneksel ısıl işleme tabi tutulmuştur. Vakum fırınında kademeli olarak artan sıcaklıkta 650 °C’de 120 dakika gerilim giderme, 1100 °C’de 90 dakika sertleştirme ve 3 er kez 500 °C’de 120 dakika menevişleme uygulanarak ısıl işlem tamamlanmıştır. Uygulanan ısıl işlem sonrası 63 HRc sertlik değeri elde edilmiştir.

Geleneksel ısıl işlem basamakları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. CPOH takım çeliğine uygulanan ısıl işlem basamakları.

### 3.1 KRIYOJENİK İŞLEM UYGULAMASI

Deney numuneleri mikroyapı incelemesi ve mekanik testler için 4 farklı grupta sınıflandırılmıştır. Birinci gruptaki deney numunelerine sadece geleneksel ısıl işlem uygulanıp “CHT” olarak isimlendirilmiştir. İkinci gruptaki deney numunelerine ise geleneksel ısıl işlem sonrası 2°C/dakika soğutma hızında, 18 saat bekleme süresinde ve -80 °C sıcaklıkta sıg kriyojenik işlem uygulanıp “SCT-18” olarak isimlendirilmiştir. Üçüncü gruptaki deney numunelerine ise geleneksel ısıl işlem sonrası 2°C/dakika soğutma hızında, 18 saat bekleme süresinde ve -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulanıp “DCT-18” olarak isimlendirilmiştir. Son olarak dördüncü gruptaki deney numunelerine geleneksel ısıl işlem sonrası 2°C/dakika soğutma hızında, 36 saat bekleme süresinde ve -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulanıp “DCT-36” olarak isimlendirilmiştir. SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numuneleri için kriyojenik işlem parametreleri ayrı ayrı programlanmıştır. Kriyojenik işlem Şekil 3.9’da gösterilen Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan MMD Criyo 125 marka cihaz ile yapılmıştır. Kriyojenik işlem cihazına ait teknik özellikler çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.9. MMD Criyo 125 marka kriyojenik işlem cihazı.

Çizelge 3.6 Kriyojenik işlem cihazının teknik özellikleri

| MMD Criyo 125 marka kriyojenik işlem cihazı |                                                                |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| İç ölçüler                                  | 60 cm L x 50 cm W x 50 cm D                                    |
| İç hazne                                    | 304 paslanmaz çelik                                            |
| Yalıtım                                     | 15 cm çok katmanlı yalıtım                                     |
| Kapasite                                    | <100kg                                                         |
| Kontrol                                     | Dokunmatik ekranlı programlanabilir PLC kontrol                |
| Sıcaklık sensörü                            | PT100                                                          |
| LN2 kaynağı                                 | Orta veya yüksek basınçlı sıvı azot kapları ile kullanılabilir |
| LN2 Transfer Bağlantısı                     | 180cm esnek, yalıtımlı kriyojenik sıvı transfer hortumu        |
| LN2 Dozajlama                               | Selenoid valf                                                  |
| İşlem Sıcaklığı                             | < -190 °C                                                      |
| Sıcaklık dağılımı                           | ± 2 °C                                                         |
| Soğutma-Isıtma Hızı                         | ≥ 10 °C / dk (malzeme yükleme kapasitesine göre değişebilir)   |

Sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerine REF-SAN marka RD-50 ısıtma fırınında 200 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.10'da REF-SAN marka RD-50 ısıtma fırını gösterilmiştir.



Şekil 3.10. REF-SAN marka RD-50 ısıtma fırını.

### 3.2 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Ø10x10 mm ölçülerindeki silindirik deney numunelerinin makro ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Makro sertlik testleri Has çelik firmasında bulunan DIGIROCK marka makro sertlik cihazı ile Rockwell C (HRC) sertlik ölçme metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik testleri ise Cumayeri Meslek Yüksekokulunda bulunan MICROBUL-N marka mikro sertlik cihazı ile 200 gram yük ve 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de MICROBUL-N marka mikro sertlik ölçüm cihazı gösterilmiştir. Her bir numune için 5 sertlik testi yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.11. MICROBUL-N marka mikro sertlik ölçüm cihazı.

### 3.3 DARBE DENEYLERİ

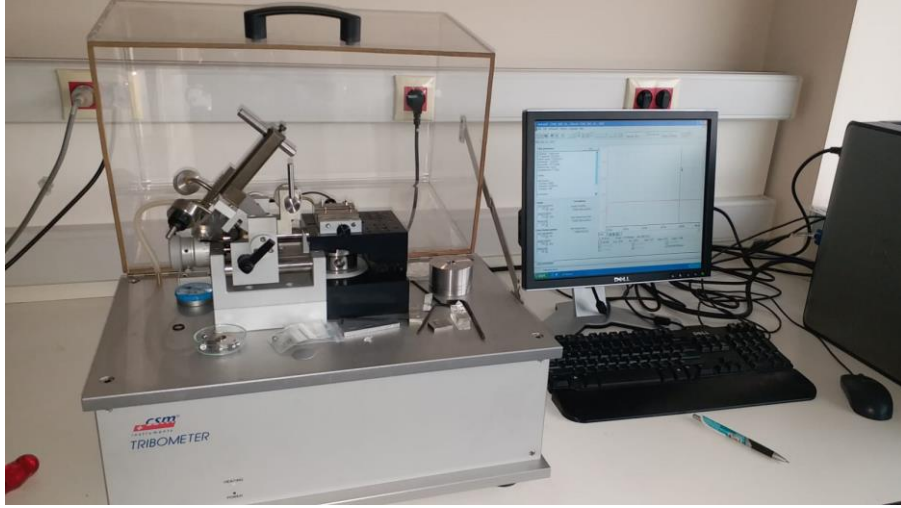
Darbe enerjisi incelemek için 55 mm boyunda 10 mm kare kesite sahip deney numunelerine darbe deneyi uygulanmıştır. Darbe enerjisi ölçümlerinde deney numunelerine 3 adet ölçüm yapıp aritmetik ortalama alınmıştır. Darbe testleri, Has Çelik firması bünyesinde bulunan, zwick marka çentik darbe test cihazında 400 J kapasite ile uygulanmıştır. Şekil 3.12’de Çentik darbe test cihazı gösterilmiştir.



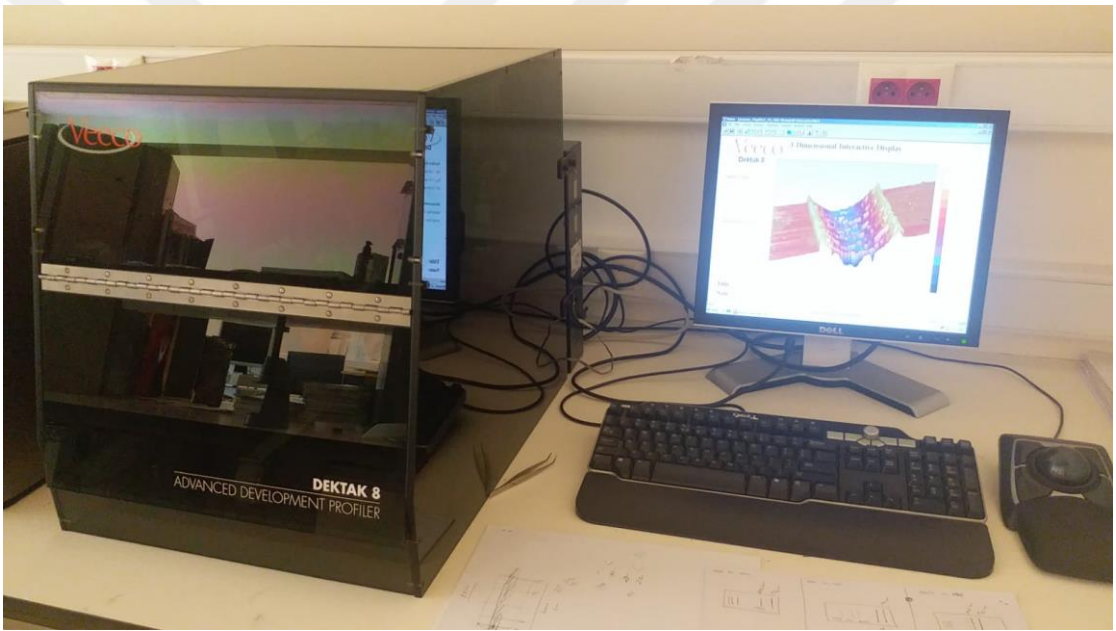
Şekil 3.12. Çentik darbe test cihazı.

### 3.4 AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma testi Gebze Teknik Üniversitesi Alüminyum Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan CSM marka test cihazında yapılmıştır. Kuru-kayma aşınma testleri ball-on-disk ve salınım hareketli (reciprocating) lineer tipte gerçekleştirilmiştir. Aşınma deney parametreleri; 20 cm/s hız, 10N yük ve 1000 m mesafe olacak şekilde seçilmiştir. Aşınma deneyinde aşındırıcı malzeme olarak Ø3 mm çapında WC bilye kullanılmıştır. Şekil 3.13'te CSM marka aşınma cihazı gösterilmiştir. Numunelerin aşınma izleri profilometre cihazında ölçülmüş ve ölçülen değerler aşınma cihazının yazılımına girilerek deney numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları bulunmuştur. Şekil 3.14'te Veeco Dektak 8 marka yüzey profilometre cihazı gösterilmiştir. Deney numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri mekanik yüzey profilometresi ile tespit edilmiştir.



Şekil 3.13. CSM marka aşınma cihazı.

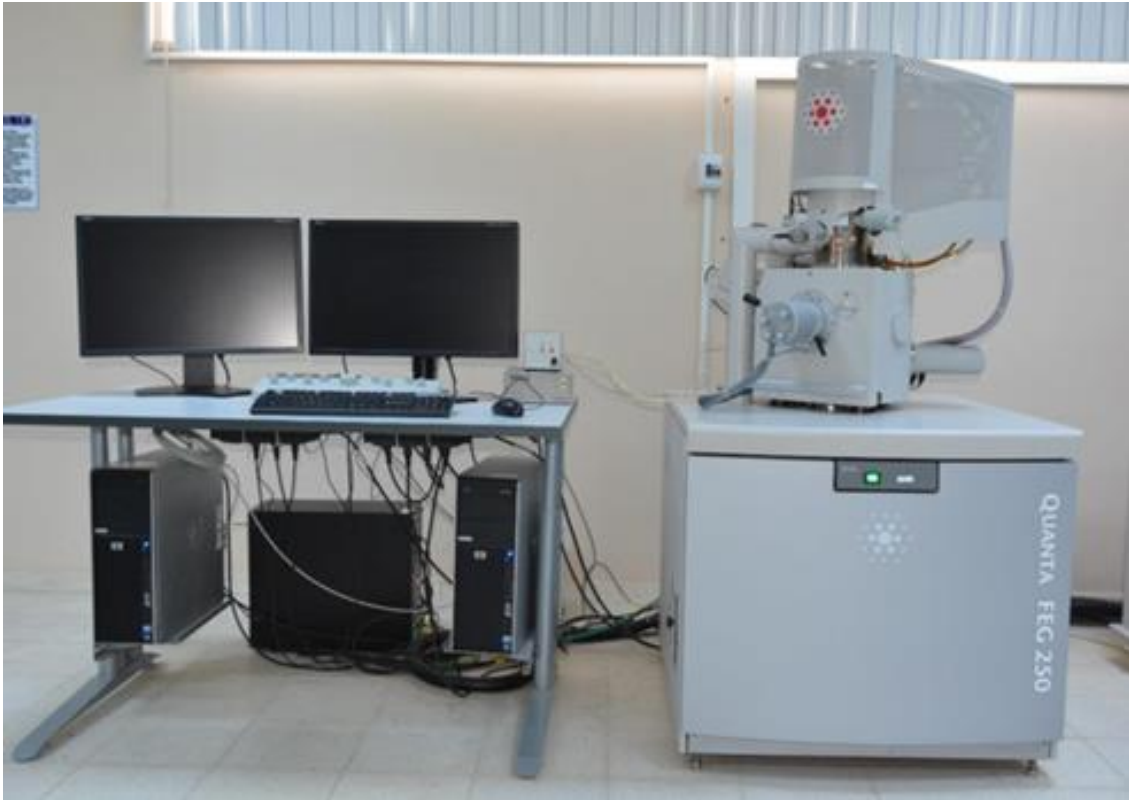


Şekil 3.14. Veeco Dektak 8 marka yüzey profilometre cihazı.

### 3.5 MİKROYAPI İNCELEMELERİ

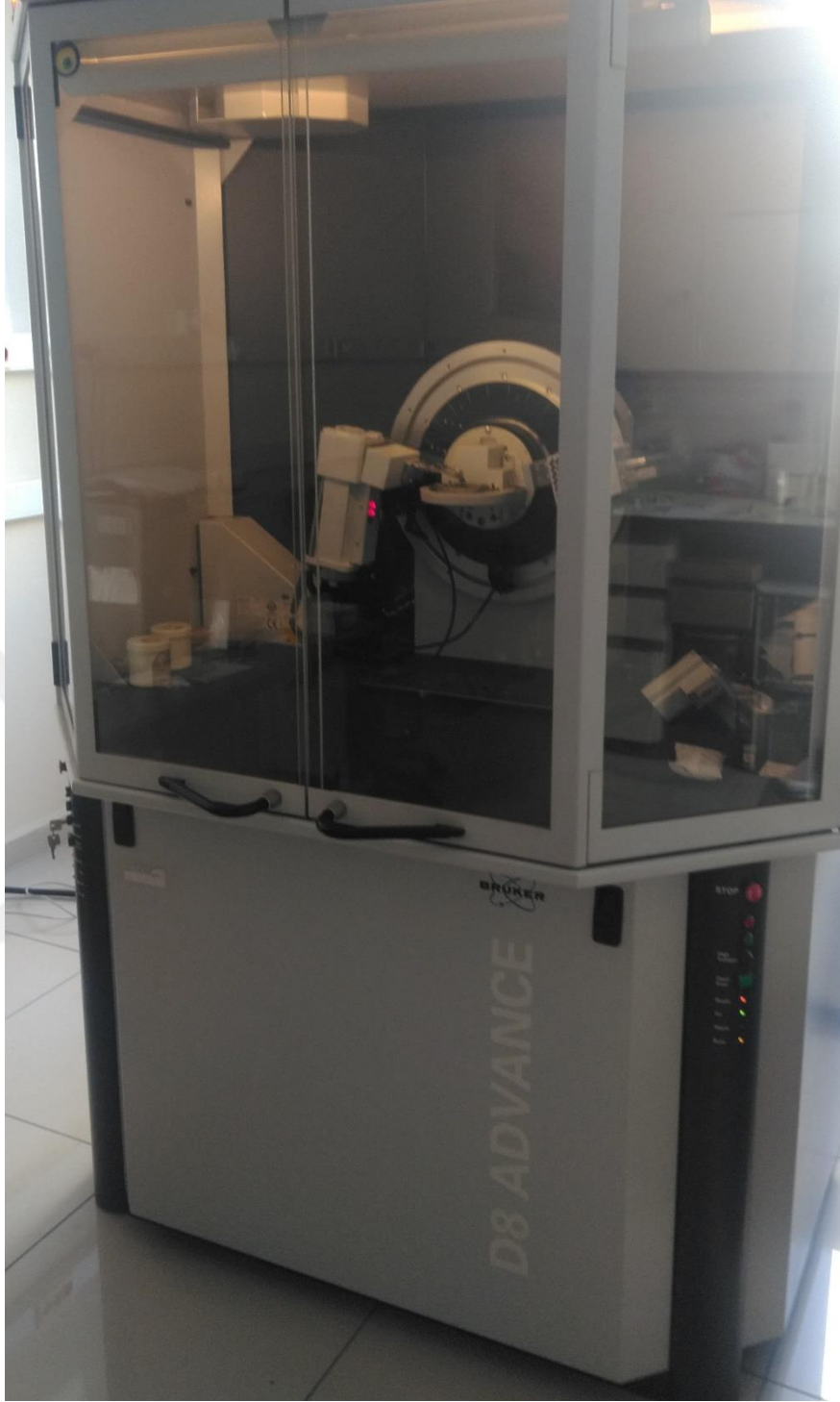
Mikroyapı incelemelerinde  $\text{Ø}10 \times 10$  mm ölçülerindeki silindirik deney numuneleri kullanılmıştır. Her iki yüzeyi taşlanan numuneler markalanıp bakalite alınmıştır. Bakalite alınmış deney numuneleri sırası ile 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik SiC zımpara kağıtları ile yüzeyleri zımparalanarak parlatılmıştır. Sonraki aşamada numuneler 240 saniye boyunca  $1\mu\text{m}$ 'luk poly elmas süspansiyon ve ramda parlatma keçesi ile parlatılmıştır. Deney numuneleri bir sonraki aşamada 60 saniye 20N kuvvetle

napal ve 1 $\mu$ m'luk poly elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Son olarak numuneler %4 Nital ile dağlanarak analiz için hazır hale getirilmiştir. Bakalite alınıp yüzey parlatma ve dağlama işlemine tabi tutulan deney numunelerinin 5000X ve 10000X büyütmelerdeki SEM görüntüleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan QUANTA FEG-250 marka taramalı elektron mikroskobu ile alınmıştır. Şekil 3.15'te QUANTA FEG-250 marka taramalı elektron mikroskobu gösterilmiştir. Deney numunelerin mikro yapısındaki elementler, element dağılımları (EDAX) analiz edilmiştir.



Şekil 3.15. QUANTA FEG-250 marka taramalı elektron mikroskobu.

XRD testi Gebze Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan BRUKER D-8 ADVANCE X-Ray Device marka test cihazında yapılmıştır. XRD testi sonrasında elde edilen deneysel bulgular, görüntü, grafik ve sonuçlar değerlendirilerek sığ ve derin kriyojenik işlemin karbür çeşitleri ve kalıntı östenit miktarı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3.16'da BRUKER D-8 ADVANCE X-Ray Device marka XRD analiz cihazı gösterilmiştir.



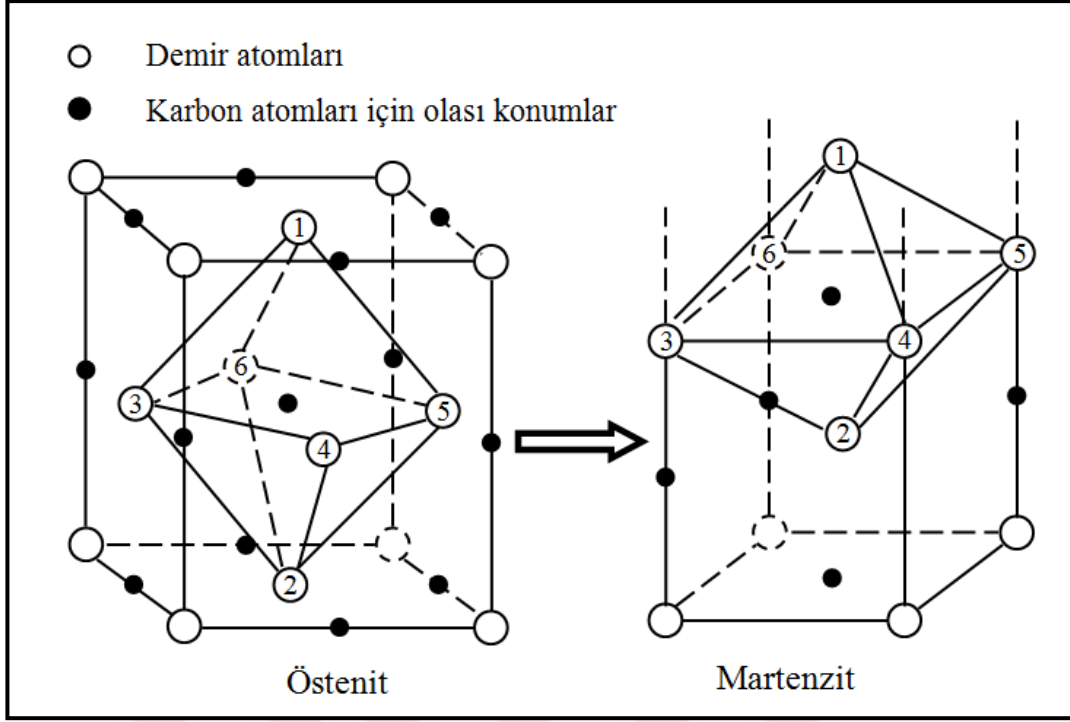
Şekil 3.16. BRUKER D-8 ADVANCE X-Ray Device marka XRD analiz cihazı.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

CPOH soğuk iş takım çeliğine uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda meydana gelen değişimleri incelemek için CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 olarak adlandırılan dört farklı numunenin SEM mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntüleri, literatürdeki benzer görüntülerde baz alınarak analiz edilip, sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası deney numunelerinin; makro sertlik, mikro sertlik, aşınma ve darbe test sonuçları değerlendirilmiştir.

Literatürde kriyojenik işlem uygulanan malzemelerin mikroyapı incelemeleri sonucunda; kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüştüğü, ince karbürlerin çökeldiği ve mikroyapıda homojen karbür dağılımı olduğu tespit edilmiştir [26], [36], [48], [79]. Geleneksel ısıtma işlem sonrası çeliklerinin mikro yapısında kalıntı östenit oluşmakta ve bu durumun mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir [8], [9]. Literatür araştırmalarında çeliklere uygulanan kriyojenik işlem ile ısıtma işlem sonrasında istenmeyen bir faz olan kalıntı östenit yapısının, sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşerek çeliklerin mekanik özelliklerinde kalıcı iyileşmeler sağlandığı görülmektedir [50], [51]. Soleimany vd. araştırmalarında; AISI H11 sıcak iş takım çeliğine uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası mekanik özelliklerdeki iyileşmeleri mikroyapıdaki kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşmesi ile açıklamışlardır [39]. Başka bir çalışmada; 80CrMo12 5 soğuk iş takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem sonrası yumuşak bir faz olan kalıntı östenitin, sert bir faz olan martenzit fazına dönüşümünde %6 oranında iyileşme tespit edilmiştir [29]. Şekil 4.1 'de östenit fazının martenzit fazına dönüşümü gösterilmiştir [52], [53].



Şekil 4.1. Östenit fazının martenzit fazına dönüşümü [52]-[53].

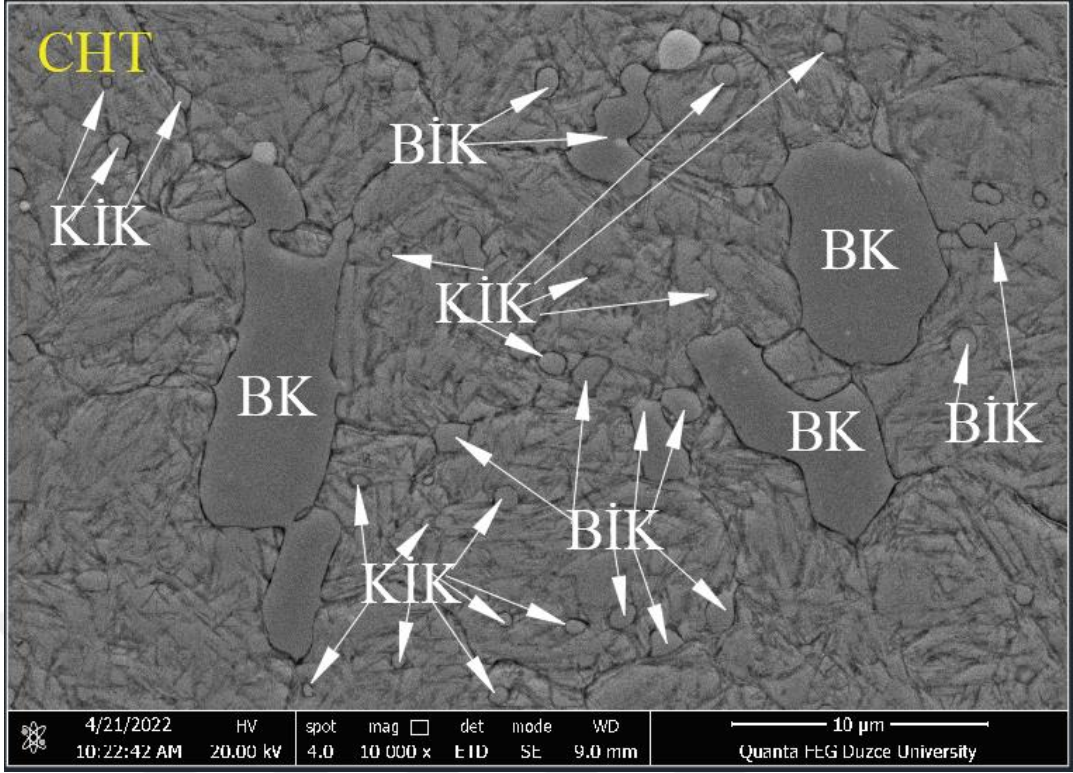
Isıl işlem sonrasında malzemede kalan yumuşak bir faz olan kalıntı östenit yapısının, kriyojenik işlem sonrasında sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesi önemli bir metalürjik yöntem olarak malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlamaktadır [54]. Bensely vd. (2008), çalışmalarında, EN 353 karbonlu çeliğe farklı ısıl işlem parametreleri uygulaması sonrasında kalıntı östenit ölçümleri yapmışlar ve Tutulan östenitin hacim oranını geleneksel ısıl işlemde %28 sığ ve derin kriyojenik işlemde sırası ile %22 ve %14 oranında kalıntı östenit tespit etmişler [55]. Çizelge 4.1’de farklı malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin geleneksel ısıl işleme kıyasla kalıntı östenit oranında sağladığı iyileşmeler gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kriyojenik işlemin kalıntı östenit oranında sağladığı iyileşme.

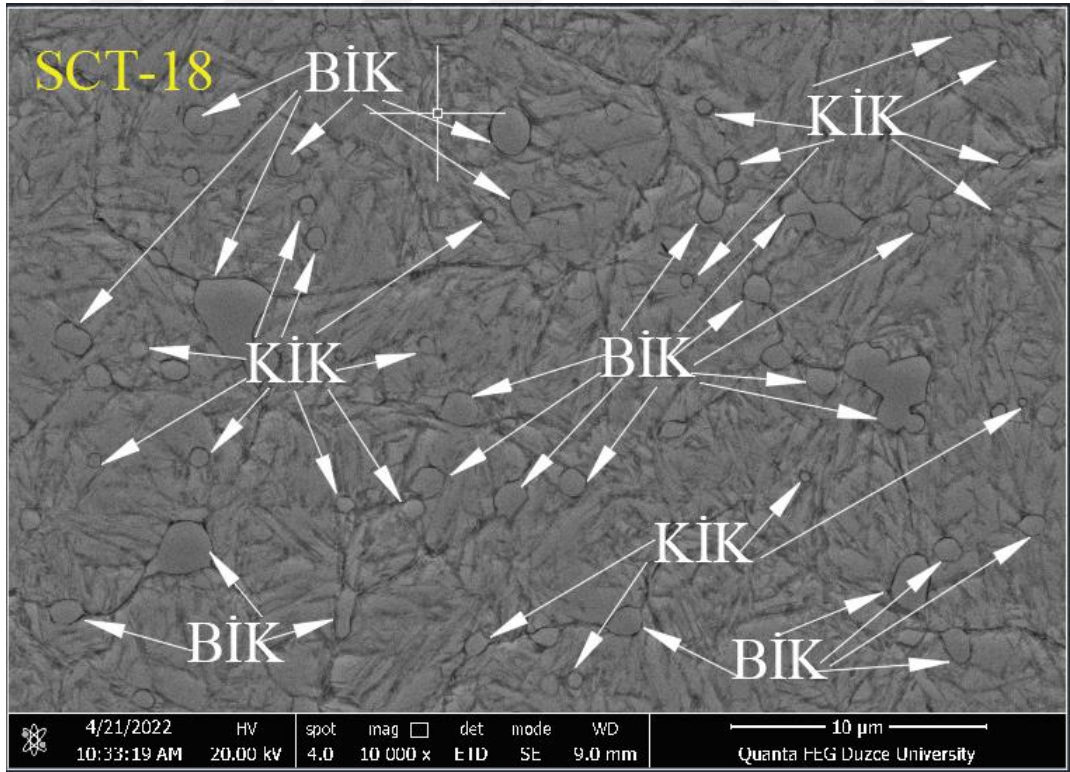
| Referans        | Malzeme   | Östenit Değerindeki İyileşme |
|-----------------|-----------|------------------------------|
| El ve Kara [54] | Sleipner  | %61                          |
| Durica vd. [56] | Vanadis 6 | %85                          |
| Özer [57]       | AISI H13  | %60                          |
| Das [58]        | AISI D2   | %53                          |

Kara (2014) çalışmasında AISI 52100 rulman çeliğine farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36, 48, 60 saat)  $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de derin kriyojenik işlem uygulaması sonrasında deney numunelerinin kalıntı östenit ölçümlerini yapmıştır. Kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinin kalıntı östenit oranı geleneksel ısıtma işlemi uygulanan deney numunesinden daha düşük çıkmıştır. Kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşümünün maksimumuna ulaştığı deney numunesi 36 saat bekletme süresindeki kriyojenik işlem uygulanan deney numunesi olup geleneksel ısıtma işlemine kıyasla %52 oranında iyileşme sağlamıştır. 36 saat bekletme süresinden sonra kalıntı östenit hacim oranı tekrar yükselmiştir [53].

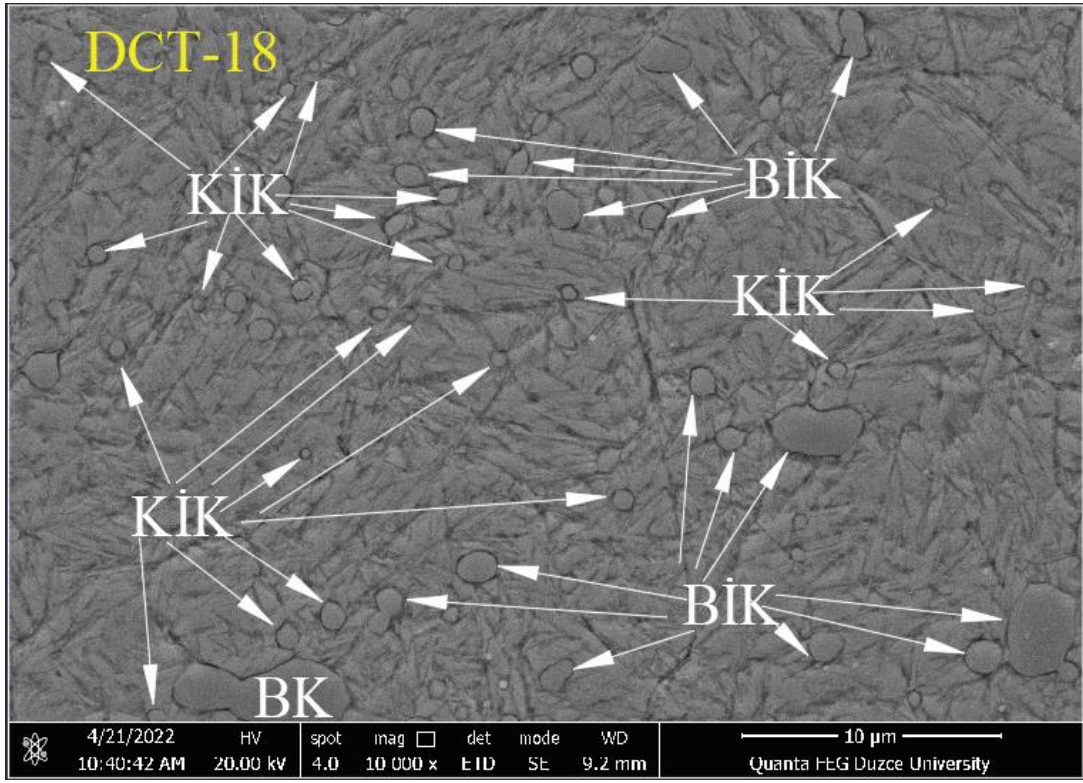
Literatürde, kriyojenik işlem ve temperleme sonrasında malzemelerin mikroyapısında ikincil karbür çökmesine bağlı olarak karbür dağılımının daha homojen bir hal aldığı bilinmektedir [59]. Collins ve Dormer (1997), çalışmalarında geleneksel ısıtma işleminden sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile mikroyapıdaki karbür sayılarında artış gözlemlemiştir [26]. Koneshlov vd. (2011) araştırmalarında AISI H13 sıcak iş takım çeliğinden hazırlanmış deney numunelerine sıg ve derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiştir. Deneysel bulgular neticesinde derin kriyojenik işlemin mikroyapıda ince karbür parçacıkların çökmesine ve daha homojen karbür dağılımına katkı sağladığı belirlenmiştir [50]. Güneş vd. (2016) çalışmalarında kriyojenik işlemin Vanadis 4 soğuk iş takım çeliğine olan etkisini araştırmışlar. Mikroyapısal incelemelerde kriyojenik işlem sonrası karbür tanelerinin incelmesi ve karbürlerin daha homojen bir dağılım gösterdiğini tespit etmişlerdir [36]. Başka bir çalışmada kriyojenik işlem uygulanan AISI 52100 rulman çeliğinin mikroyapısında karbürlerin küçülmesi ve daha homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir [60]. Sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerin (CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36) mikroyapısına ait SEM görüntüleri 10000x büyütme oranında şekil 4.2, şekil 4.3, şekil 4.4 ve şekil 4.5'te gösterilmiştir. (BK: Birincil karbür. BİK: Büyük ikincil karbür ve KİK: Küçük ikincil karbür)



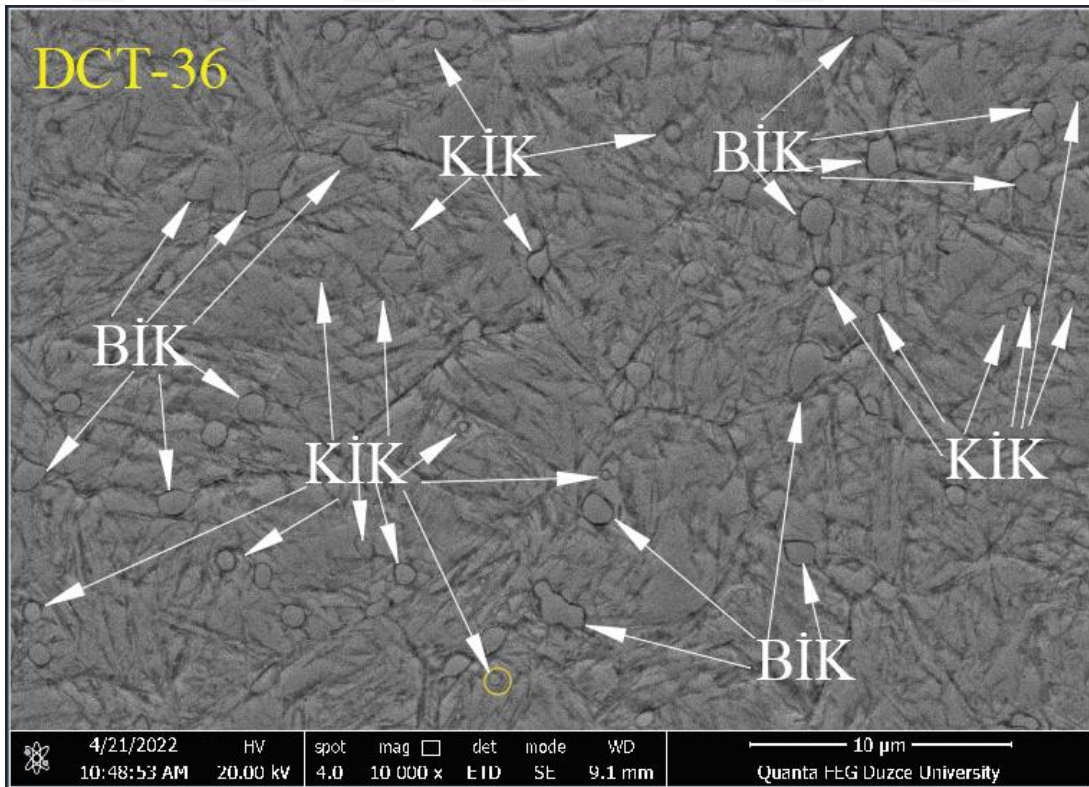
Şekil 4.2. CHT numunesi mikroyapı görüntüsü.



Şekil 4.3. SCT-18 numunesi mikroyapı görüntüsü.



Şekil 4.4. DCT-18 numunesi mikroyapı görüntüsü.



Şekil 4.5. DCT-36 numunesi mikroyapı görüntüsü.

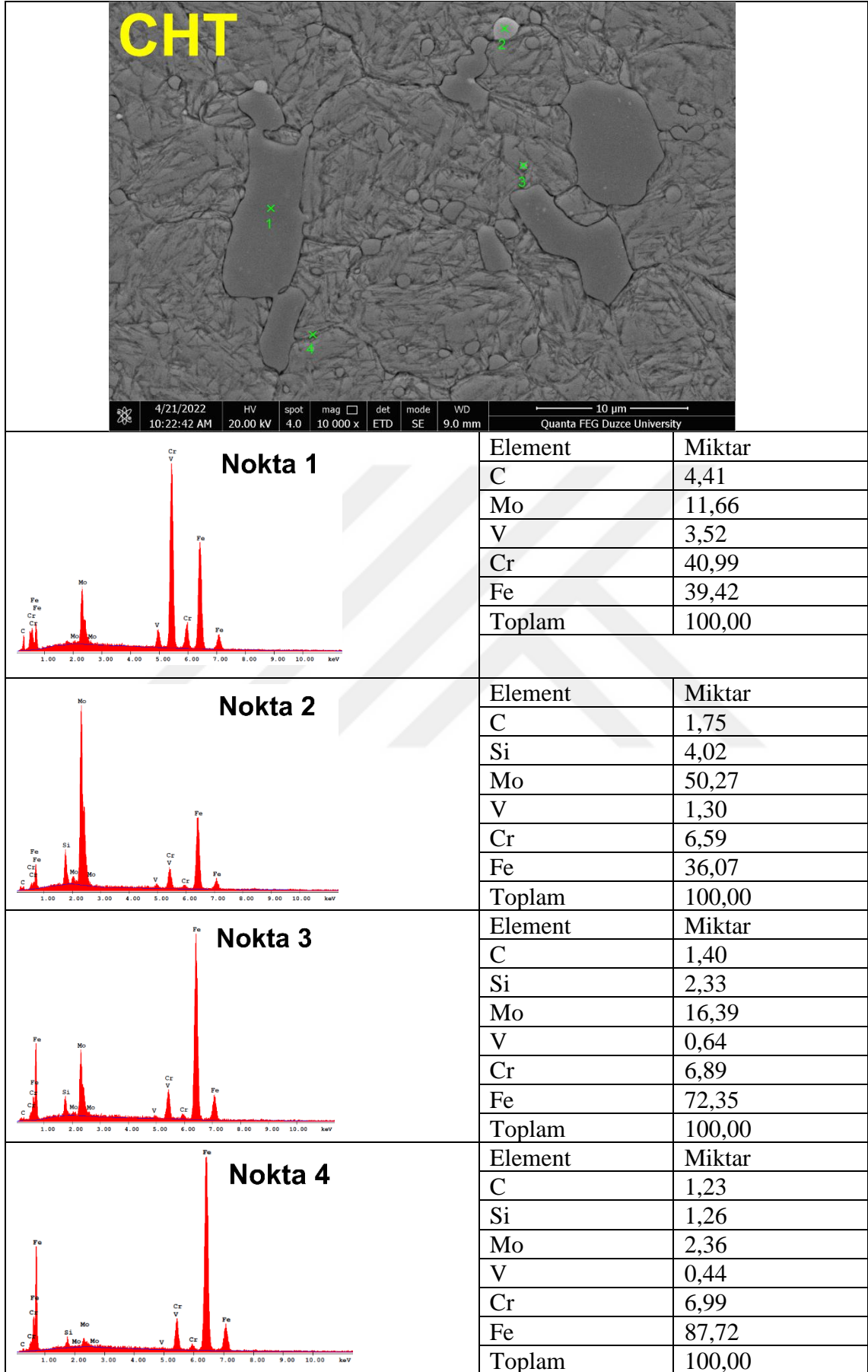
Şekil 4.2'deki SEM görüntüleri incelendiğinde sıg ve derin kriyojenik işlem gören deney numunelerinin, geleneksel ısıl işlem gören deney numunesiyle kıyasla; karbür tanelerinin daha homojen bir hal alarak ince bir dağılım sergilediği açık biçimde görülmektedir. Literatürde farklı kimyasal bileşime sahip soğuk iş takım çeliklerinde de benzer bulgular görülmektedir [26], [29], [31], [36]. Kriyojenik işlem sonrası, ikincil karbürlerin boyutunda küçülme ve yoğunluğunda artış ile birlikte mikroyapıda daha homojen bir karbür dağılımı görülmektedir [58]. Literatür incelemelerinde karbür boyutları üç grupta kategorize edilmiştir; boyutları 1 µm'den az olanlara küçük ikincil karbür, boyutları 1 ile 5 µm arasında olanlara büyük ikincil karbür ve boyutları 5 µm'den büyük olanlara ise birincil karbür denilmiştir [58], [61]. Şekil 4.2'deki SEM görüntülerinde geleneksel ısıl işlem uygulanan CHT numunesi ve 18 saat bekleme süresinde derin kriyojenik işlem uygulanan DCT-18 numunesinde birincil karbür görülmektedir. CHT numunesindeki birincil karbür miktarı ve sayısı DCT-18 numunesine oranla daha fazladır. Ayrıca DCT-18 numunesinde ikincil karbürler CHT numunesine kıyasla daha fazla olup homojen bir dağılım sergilemektedirler. SCT-18 ve DCT-36 numunelerinde birincil karbür görülmemekte ve oluşan ikincil karbürlerde mikroyapıda CHT Numunesine göre daha homojen bir dağılım sergilemektedir. Genel olarak kriyojenik işlem gören deney numunelerin mikroyapısında geleneksel ısıl işlem gören numuneye kıyasla daha fazla ikincil karbür bulunup daha homojen karbür dağılımı görüldüğü SEM görüntülerinde görülmektedir.

Takım çeliklerinin ısıl işlem sonrası mikroyapısındaki iyileşmeler sonucunda arzu edilen mekanik özellikleri alması; kimyasal kompozisyonunda bulunan V, Cr ve Mo benzeri elementlerin; MC, M<sub>2</sub>C M<sub>6</sub>C M<sub>7</sub>C M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> gibi karbürler meydana getirmesine bağlıdır [62]. Karbür oluşumu malzemenin dayanım, sertlik ve aşınma direnci bakımından daha iyi performans sergilemesi sağlar [63]. Takım çeliklerinde mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi anlamak, sonrasında mikroyapıyı iyileştirmek için karbürleri türlerine göre kategorize etmek gerekir [64]. Çizelge 4.2'de Takım çeliklerinde görülen başlıca karbürlerin kristal yapıları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir [65], [66].

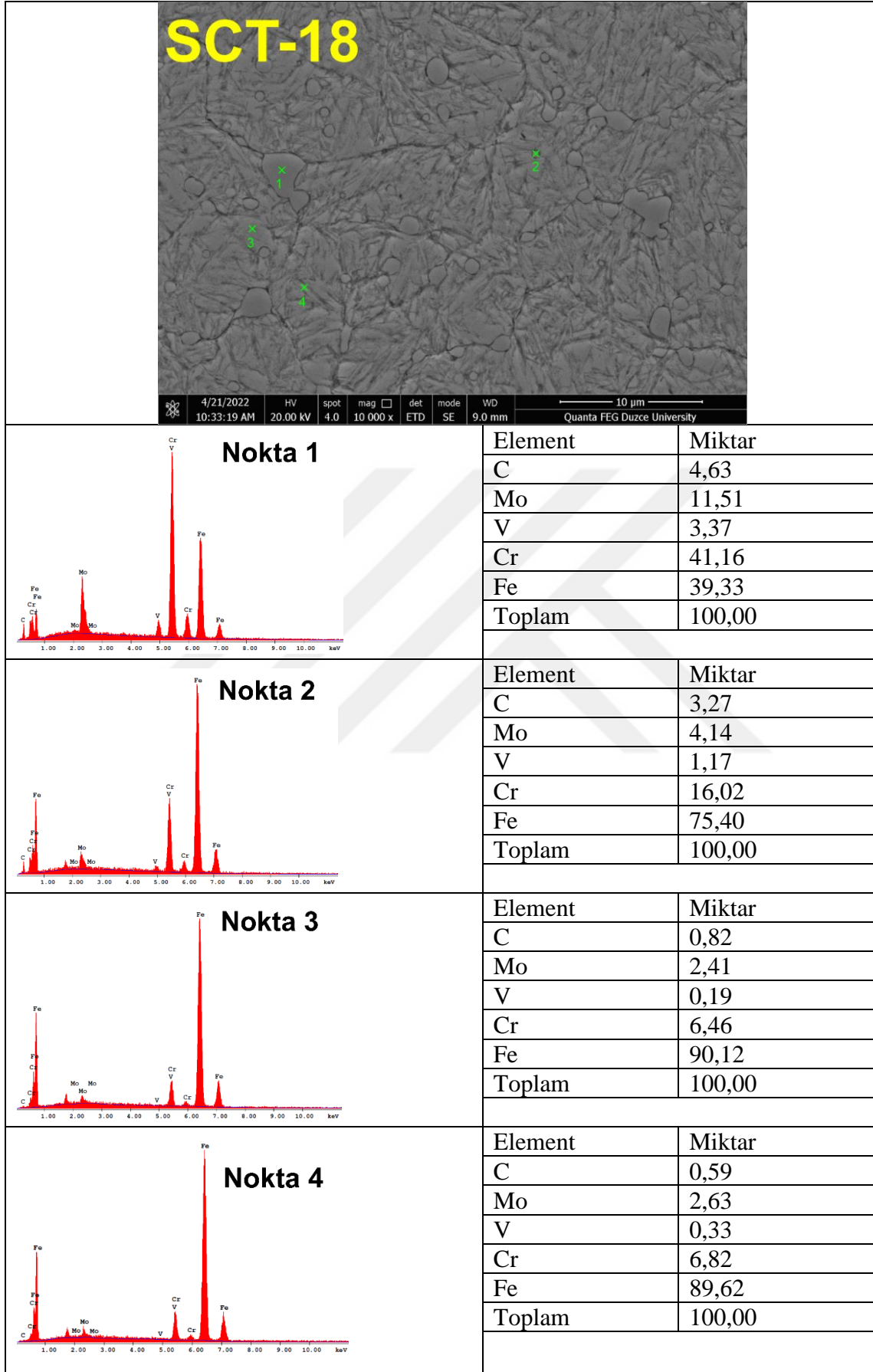
Çizelge 4.2 Takım çeliklerinde görülen karbürlerin kristal yapısı [65], [66].

| Karbür Türleri | Demir içeriği | Kristal Yapı         |
|----------------|---------------|----------------------|
| MC             | Düşük         | Yüzey merkezli kübik |
| M2C            | Düşük         | Hekzagonal           |
| M3C            | Yüksek        | Ortorombik           |
| M6C            | Yüksek        | Yüzey merkezli kübik |
| M7C3           | Yüksek        | Hekzagonal           |
| M23C6          | Yüksek        | Kübik (kompleks)     |

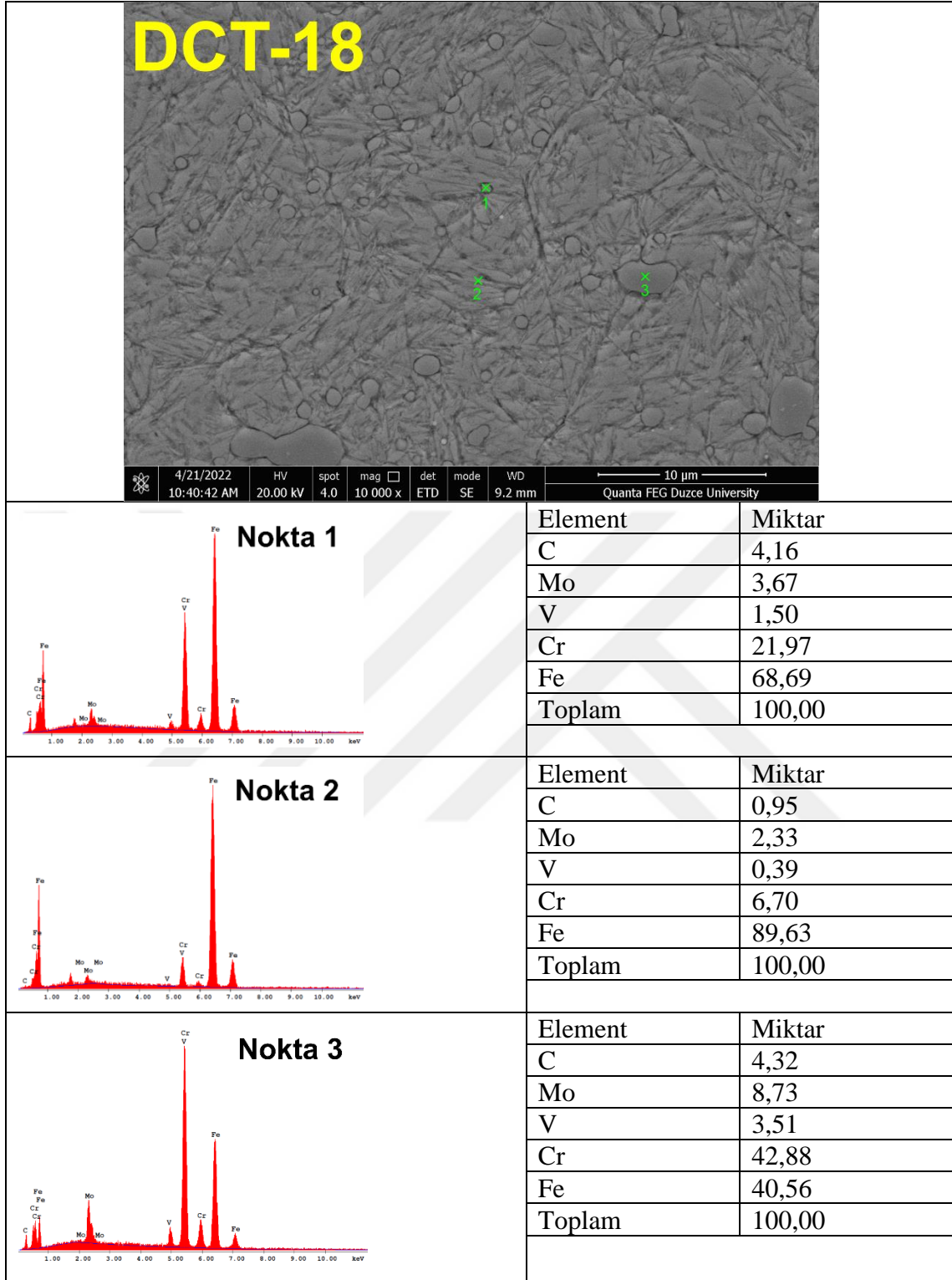
Karbürler türleri M23C6 (0.15 – 0.30  $\mu\text{m}$ ), M7C3 (0.10 – 0.18  $\mu\text{m}$ ) ve MC M6C ve M2C (0.07 – 0.12  $\mu\text{m}$ ) boyutlarında bulunmaktadır [65], [67]. Das vd. (2009) çalışmalarında, AISI D2 takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem ve geleneksel ısıtma işlem sonrasında deney numunelerine XRD deneyi yapmışlar. Tüm deney grubu numunelerindeki birincil ve ikincil karbürleri az miktarda M23C6 çoğunlukla M7C3 olarak tanımlanmışlardır [68]. Ghasemi vd. (2014) araştırmalarında, AISI D2 takım çeliğinden imal edilmiş numunelere kriyojenik işlem uygulaması sonrasında numuneler üzerinde XRD deneyleri yapmışlar ve deney sonuçları neticesinde, mikroyapıda hekzagonal ve kübik yapıdaki M23C6 ve M7C3 karbürleri olduğu görülmüştür [61]. Şekil 4.6'da CHT numunesinin, şekil 4.7'de SCT-18 numunesinin, şekil 4.8'de DCT-18 numunesinin ve şekil 4.9'da ise DCT-36 numunesine ait element dağılım analizi grafikleri verilmiştir. Şekil 4.10'da deney numunelerinin XRD sonuçları verilmiştir.



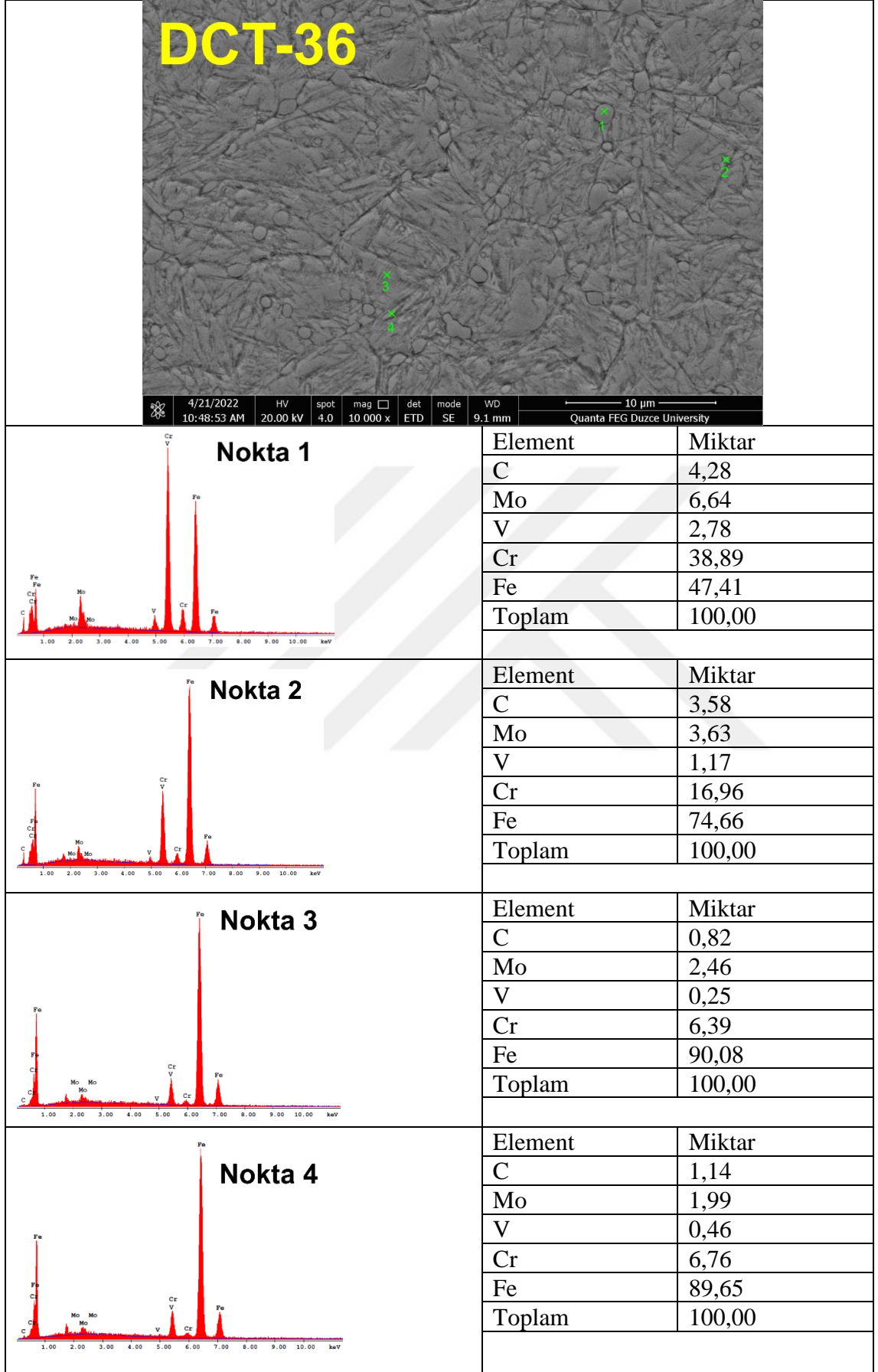
Şekil 4.6 CHT numunesi element dağılım analizi.



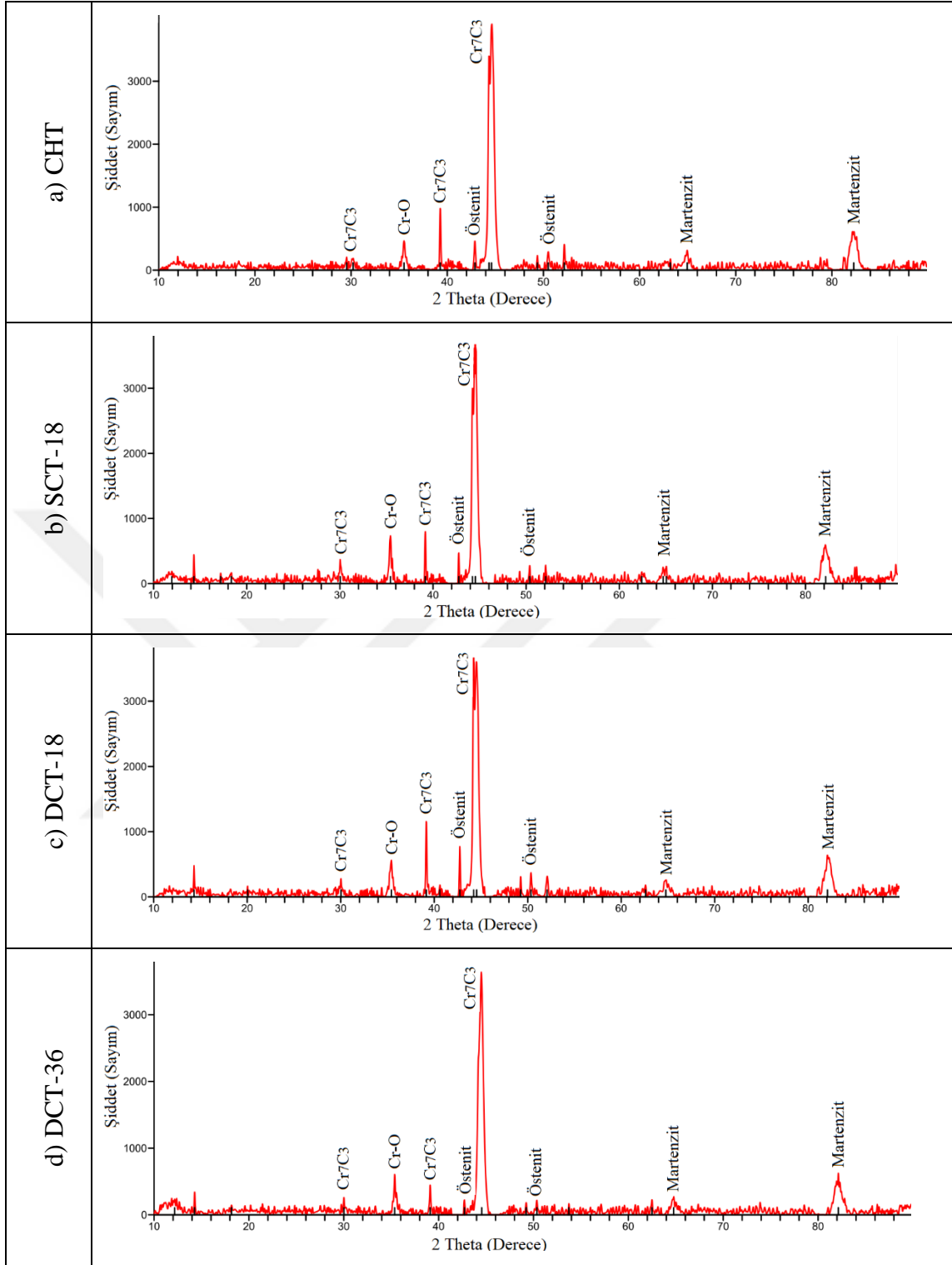
Şekil 4.7. SCT-18 numunesi element dağılım analizi.



Şekil 4.8. DCT-18 numunesi element dağılım analizi.



Şekil 4.9. DCT-36 numunesi element dağılım analizi.



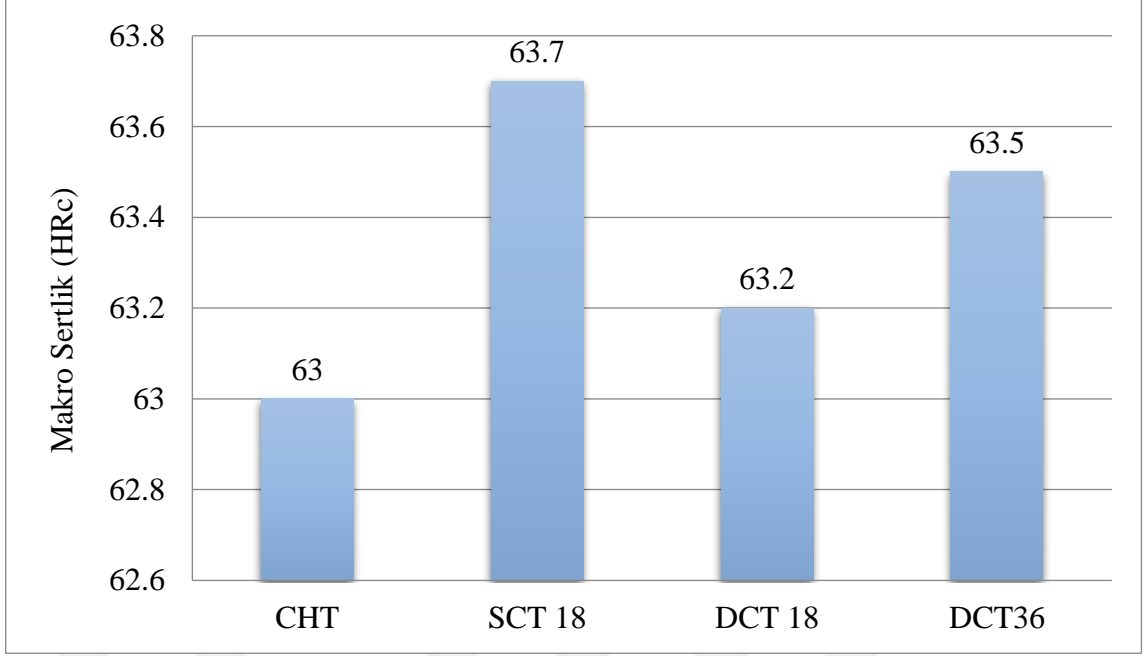
Şekil 4.10. Numunelerin XRD paternleri. a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.

Deney numunelerinin element dağılım analizleri incelendiğinde, numunelerde genel olarak Mo, Fe, Cr, V ve C elementlerine rastlanmıştır. CHT numunesinin ikinci ve üçüncü noktalarında ek olarak Si elementine de rastlanmıştır. CHT numunesinin ikinci ve üçüncü noktalarında Mo elementinin baskın olduğu ve bunun sonucu olarak da

karbür türü molibden karbür olarak tanımlanmıştır. CHT numunesinin diğer noktaları ve kriyojenik işlem uygulanan numunelerin tamamında Cr elementi baskın olduğu krom karbür tanımlanmıştır. Şekil 4.10'daki XRD görüntüleri incelendiğinde deney numunelerinde Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbür oluşumu görülmektedir. CPOH takım çeliğinin muadili olan AISI D2 takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda hekzagonal ve kübik kristal yapıdaki M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> ve M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> karbürler tanımlanmıştır.[58], [61], [68], [69]. XRD görüntülerinde östenit ve martenzite karşılık gelen pikler görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası kalıntı östenit fazının sert martenzit fazına dönüşmesi nedeni ile kriyojenik işlem gören numunelere ait östenit piklerinin şiddeti CHT numunesine göre daha düşüktür. Bu durum kriyojenik işlem esnasında östenit fazının martenzit fazına dönüştüğü tezini doğrulamaktadır.

#### **4.2 MAKRO VE MİKRO SERTLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sertlik deneyi, aşınma, darbe, çekme gibi deneylere kıyasla az tahribatlı ve kolay uygulanabilir oluşu ve sertlik değerinin bilinmesi neticesinde diğer mekanik özellikler hakkında tespitlere olanak sağlamasından dolayı çok tercih edilmektedir [53]. Literatürde kriyojenik işlem uygulanan malzemelerin sertlik değerlerindeki artış; istenmeyen bir faz olan yumuşak kalıntı östenit yapısının, sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesi [51] ve ince karbürlerin çökmesiyle mikroyapıdaki homojen karbür dağılımının meydana gelmesi ile açıklanmıştır [61]. Koneshlou vd. AISI H13 takım çeliğinden hazırladıkları deney numunelerine 8 saat bekleme süresinde uyguladıkları sığ ve derin kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenitin %8,1'den %7,4 ve %4,5'e düştüğünü ve buna istinaden sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde sırası ile sertlik değerlerinde %4,08 ve %12,24 oranında iyileşme tespit etmişlerdir [50]. Yan ve Li, W<sub>9</sub>Mo<sub>3</sub>Cr<sub>4</sub>V takım çeliğinden imal edilmiş numunelere kriyojenik işlem uygulaması sonrasında meydana gelen sertlik değerlerindeki iyileşmeyi yumuşak kalıntı östenit fazının sert martenzite dönüşmesi ve homojen mikroyapı dağılımı ile ilişkilendirmişlerdir [70]. Şekil 4.11'de konvansiyonel ısı işlem akabinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış CPOH soğuk iş takım çeliğinden hazırlanmış deney numunelerinin makro sertlik değerleri gösterilmiştir.

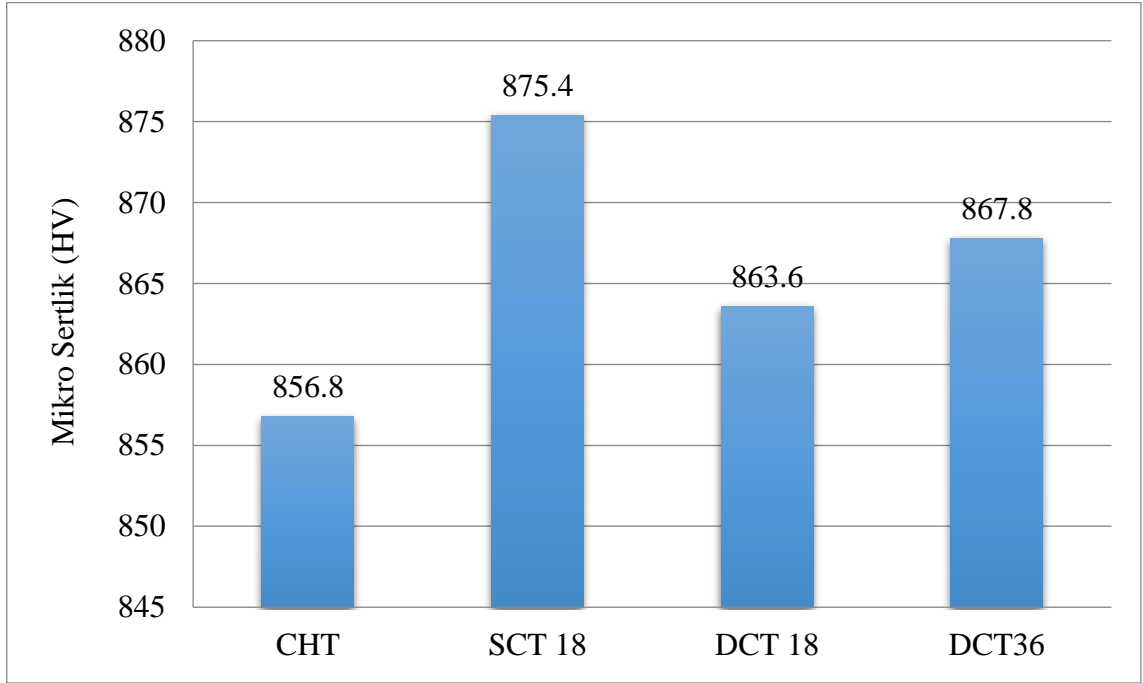


Şekil 4.11. Makro sertlik değerlerindeki değişim.

Sertlik değerleri büyükten küçüğe sırasıyla SCT-18, DCT-36, DCT-18 ve CHT numuneleri için 63,7, 63,5, 63,2 ve 63 HRC olarak bulunmuştur. CPOH takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem neticesinde makro sertlik değerindeki en fazla oransal artış %1,11 ile SCT-18 deney numunesinde ölçülmüştür. Çıkan sonuç derin kriyojenik işlem sonrasında numunelerin mikroyapısında gerçekleşen östenit martenzit dönüşümünün diğer numunelere kıyasla SCT-18 numunesinde daha yüksek miktarda gerçekleşmesine bağlanmıştır. Benzer çalışmalarda kriyojenik işlem sonrasında sertlik değerindeki artış mikroyapıdaki kalıntı östenit fazının martenzite dönüşmesi ve homojen mikroyapı dağılımı elde edilmesi ile açıklanmaktadır [32], [37], [71], [72]. Collins ve Dormer, araştırmalarında kriyojenik işlem uygulanması sonrasında AISI D2 takım çeliğinin sertlik değerlerindeki iyileşmeyi mikroyapıda kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşümü ve daha homojen karbür dağılımı ile ilişkilendirmişlerdir [26]. Nalbant. (2018) tarafından yapılan çalışmada, AISI 4140 ıslah çeliğine farklı bekletme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlem sonrasında mikro sertlikte en iyi sonucu %3,59 oranında iyileşme ile 12 saat bekletme süresinde derin kriyojenik işleme tabi tutulan deney numunesi vermiştir [73].

Şekil 4.12’de konvansiyonel ısıtma işlem sonrasında sığ ve derin kriyojenik işlemin CPOH soğuk iş takım çeliğinin mikro sertlik değerlerindeki değişim gösterilmiştir.

Mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek değer SCT-18 numunesinde 875,4 HV olarak ölçülürken DCT-36, DCT-18 ve CHT numunelerinde ise sırasıyla 867,8 HV, 863,6 HV ve 856,8 HV olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümlerindeki deneysel sonuçlar ile makro sertlik deney sonuçları arasında paralellik görülmektedir. CPOH takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlem neticesinde mikro sertlik değerindeki en fazla oransal artış makro sertlik sonuçlarında olduğu gibi yine SCT-18 deney numunesinde %2,17 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.12. Mikro sertlik değerlerindeki değişim.

Cardoso vd. (2020) çalışmalarında, AISI D6 soğuk iş takım çeliğine -180°C sıcaklıkta ve farklı bekleme sürelerinde derin kriyojenik işlem uygulayıp sonrasında tekli ve çoklu temperleme işlemine tabi tutulan deney numunelerinin mikro sertlik değerlerini incelemişler ve 24 saat bekleme süresi ve çift temperleme yapılan deney numunesinin mikro sertlik değerinde %26,76 oranında artış tespit etmişlerdir. Mikro sertlik değerindeki artış kalıntı östenitin yapısının, kriyojenik işlem sonrasında sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesi ve ikincil karbür çökmesine atfedilmiştir [41]. El vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliğine 18 saat bekleme süresinde uygulanan sığ kriyojenik işlemin Sleipner takım çeliğinin mikro sertlik değerinde yaklaşık olarak %7 oranında bir iyileşme sağladığını tespit etmişler ve mikro sertlik değerindeki bu iyileşmeyi kalıntı östenit fazının, sert faz martenzit fazına

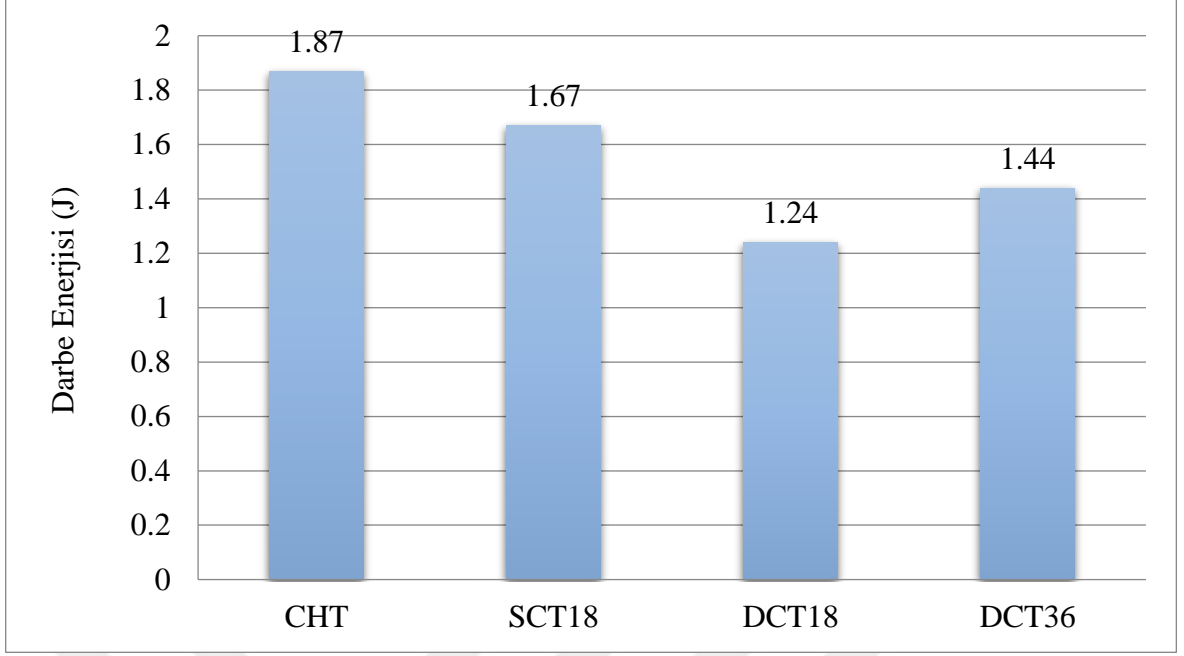
dönüşmesi ile açıklamışlardır [54]. Başka bir çalışmada Sri Siva vd. (2012) 100Cr6 Rulman çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda östenitin fazının sert faz martenzite dönüşmesi ile birlikte mikro sertliğin %18 oranında iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [61].

Sertlik değerleri için genel bir değerlendirme yapılacak olursa hem sığ hem de derin kriyojenik işlemden sonra sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Makro ve mikro sertlikteki bu iyileşme literatür çalışmaları ile benzerlik göstermiştir. Sertlikteki bu iyileşme literatür de olduğu gibi bu çalışmada da kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda yumuşak kalıntı östenit fazının sert martenzit fazına dönüşmesi ve daha homojen karbür dağılımı sağlanmasına atfedilmiştir.

### **4.3 DARBE DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mühendislik malzemelerinin sertlik değerleri ile tokluk değerleri arasında ters bir orantı vardır. Tokluk değeri, takım çeliklerinin aşınma dirençlerine sertlik ile birlikte etki eden önemli bir özelliktir [74]. Literatürde kriyojenik işlemin tokluk üzerindeki etkilerine incelendiğinde; kimi çalışmalarda sertlik artışıyla birlikte tokluk değeri düşerken [26], [75] kimi çalışmalarda ise artan sertlikle birlikte tokluk değerinde de iyileşmeler olduğunu bildiren araştırmalar bulunmaktadır [76], [41]. Nalbant. (2018) yaptığı çalışmada, AISI 4140 ıslah çeliğine farklı bekletme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlem sonrasında darbe enerjisinde en iyi sonucu yaklaşık olarak %5 oranında iyileşme ile 36 saat bekle süresinde derin kriyojenik işlem uygulanan deney numunesi vermiştir [73]. Başka bir çalışmada Zhirafar vd. (2007), AISI 4340 ıslah çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin; geleneksel ısıtma işlemine kıyasla, sertlik değerlerinde artışa tokluk değerlerinde ise %14,3 oranında bir düşme sağladığını tespit etmişlerdir [51].

Kriyojenik işlemin, CPOH soğuk iş takım çeliğinin darbe dayanımına olan etkisini incelemek üzere 4 farklı deney grubu (CHT, SCT18, DCT18 ve DCT36) darbe testine tabi tutulmuştur. Darbe testi deney grubu numunelerine 3 defa uygulanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Şekil 4.13'te geleneksel ısıtma işlem ve kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinin darbe dayanım değerleri grafik olarak gösterilmiştir.



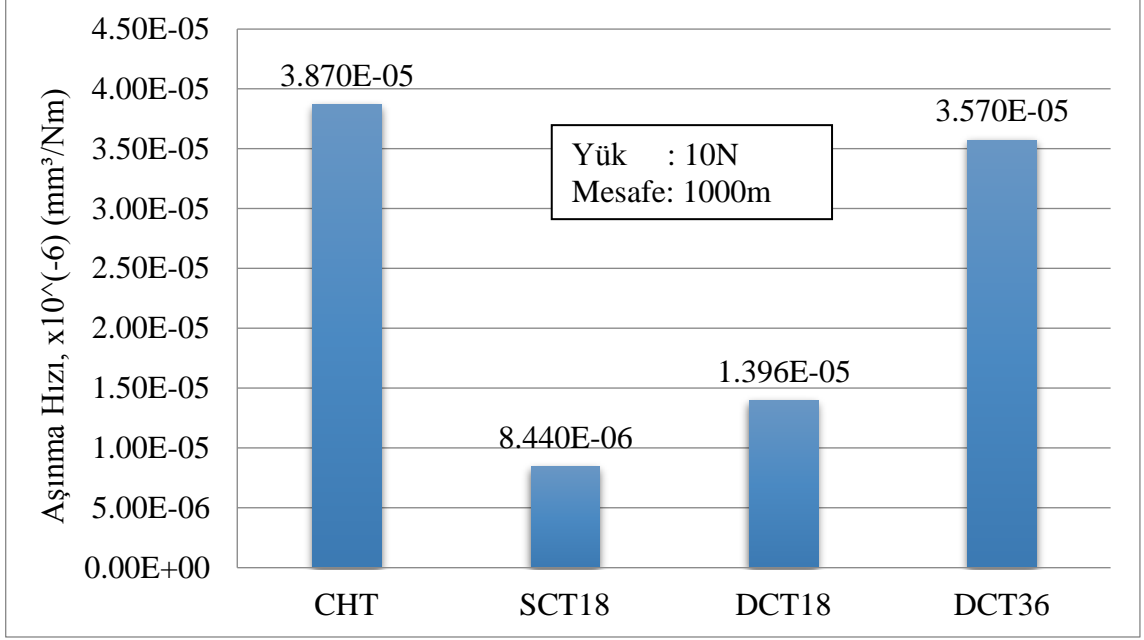
Şekil 4.13. Numunelerin darbe dayanımı.

CHT, SCT18, DCT18 ve DCT36 numunelerinin darbe enerjileri sırasıyla 1,87J, 1,67J, 1,44J ve 1,24J değerlerinde çıkmıştır. Sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan deney numuneleri ile sadece geleneksel ısıl işlem uygulanan deney numunelerinin kırılma enerjileri kıyaslandığında; SCT18 numunesi %10,7 oranında, DCT18 numunesi 33,69 oranında ve DCT36 numunesi de %22,99 oranında CHT numunesine göre kırılma enerji değerlerinde düşüş görülmüştür. Senthilkumar vd. (2011) kriyojenik işlemin AISI 4140 ıslah çeliğinin darbe dayanımını düşürmesinin nedeni olarak yumuşak faz östenitin sert faz martenzite dönüşmesi ve ince karbür çökmesini gösterilmişlerdir [77]. Kriyojenik işlem ve temperleme sonrasında mikroyapıda ikincil karbür çökmesine bağlı olarak daha homojen karbür dağılımı meydana gelmektedir [59]. İkincil karbür partikülleri etrafında oluşan çatlaklar yayılıp büyüyerek darbe tokluğunu olumsuz etkilediği bilinmektedir [78].

Bu çalışmada, darbe enerji değerleri bakımından literatürdeki benzer çalışmalar paralellik göstermektedir [74] ve darbe enerjisi değerlerindeki düşüşler kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda yumuşak kalıntı östenit fazın sert martenzit fazına dönüşmesi ve daha homojen karbür dağılımı ile sertlik değerlerindeki iyileşmeye atfedilmiştir.

#### 4.4 AŞINMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sığ ve derin kriyojenik işlemin CPOH takım çeliğinin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemek için aşınma deney bulguları; aşınma oranı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülük değerleri, aşınma yüzeyindeki element dağılım analizleri, aşınan yüzeylerin SEM görüntüsü ve aşınma alanlarının 3D görüntüleri bakımından değerlendirilmiştir. Aşınma deneyinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için deney öncesi numuneler 54 HRc sertliğine getirilmiştir. Aşınma deney parametreleri 20 cm/s hız, 1000 m mesafe ve 10N yük olacak şekilde ayarlanarak aşınma deneyi gerçekleştirilmiş ve aşınma oranı hesaplanmıştır. Kriyojenik işlem tamamlayıcı bir ısıl işlem olarak; geleneksel ısıl işlem ile temperleme arasında, mekanik özelliklere ilave iyileştirmeler sağlamak için takım çeliklerinde uygulanmaktadır [54]. Kriyojenik işlem uygulamasının en önemli nedenlerinden biri aşınma direncini artırmaktır [58]. Literatür incelemelerinde kriyojenik işlemin takım çeliklerine uygulanması neticesinde aşınma performansında %800 oranında ciddi iyileşmeler sağladığı görülmektedir [79]. Dixit vd. (2013), araştırmalarında AISI D5 soğuk iş takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlemin, kalıntı östenit fazında düşüş sağlayarak sertlik ve aşınma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir [32]. Güneş vd. (2016) çalışmalarında, Vanadis 4 soğuk iş takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlem sonrasında aşınma dayanımını ve sertlik değerinde iyileşmeler gözlemlemişler ve bu durumu mikroyapısında kalıntı östenitin martenzit yapısına dönüşmesi ve ince karbür oluşumunu artırıp daha homojen karbür dağılımı ile açıklamışlardır [36]. CPOH takım çeliğine yapılan aşınma deneyi neticesinde, elde edilen deney numunelerine ait aşınma oranları Şekil 4.14'te verilmiştir.

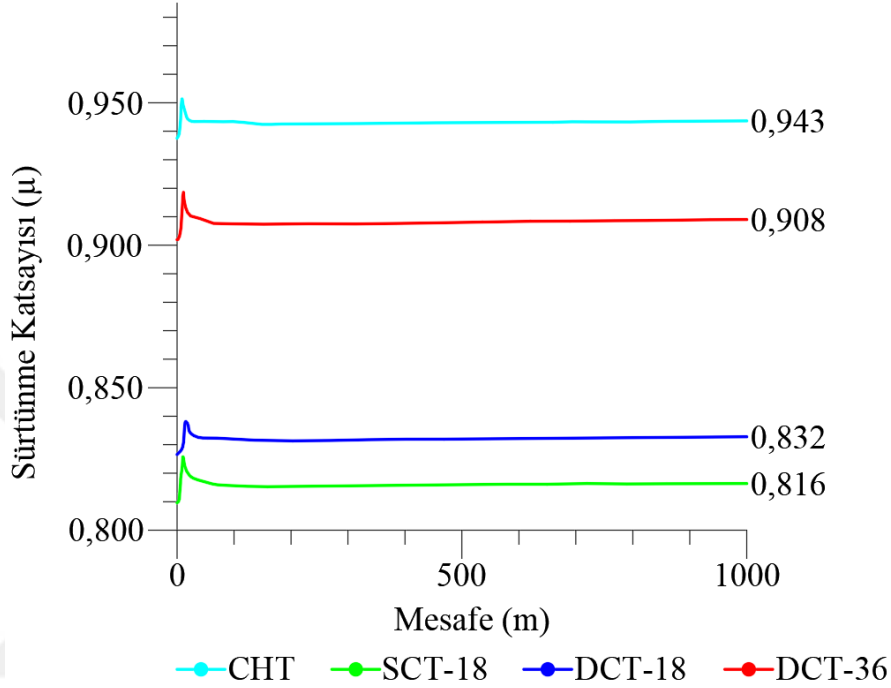


Şekil 4.14. Aşınma oranları.

Edilen deneysel veriler neticesinde; geleneksel ısıl işlem (CHT) uygulanan numunenin aşınma oranı  $3,870 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/N/m, 18 saat sığ kriyojenik işlem (SCT-18) uygulanan numunenin aşınma oranı ise  $8,44 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N/m, 18 saat derin kriyojenik işlem (DCT-18) uygulanan numunenin aşınma oranı  $1,396 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/N/m olur iken, 36 saat derin kriyojenik işlem (DCT-36) uygulanan numunenin aşınma oranı ise  $3,570 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/N/m olarak hesaplanmıştır. Aşınma oranları incelendiğinde en az aşınma oranı SCT-18 numunesinde elde edilmiş ve sığ kriyojenik işlemin CPOH takım çeliğinin aşınma oranında derin kriyojenik işlem ve geleneksel ısıl işleme kıyasla daha fazla iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri sırasıyla aşınma oranlarında yaklaşık olarak %358,53 %177 ve %7,75 oranında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinin sertlik değerleri ile aşınma oranları geleneksel ısıl işlem uygulanan deney numunelerine kıyasla daha iyi bir sonuç verdiği görülmektedir. Literatürde kriyojenik işlem sonrası artan sertlikle birlikte aşınma oranlarında iyileşmeler olduğunu rapor eden benzer çalışmalar bulunmaktadır [26], [29], [46]. Korade vd. (2017) çalışmalarında; AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlemin, sertlik değerinde yaklaşık olarak %5 oranında iyileşme sağladığı ve aşınma dayanımı, sürtünme katsayısı, aşınma hacmi bakımından optimum değerleri sağladığını tespit etmişlerdir [35]. Li vd. (2017) çalışmalarında M2 takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin mikro yapıda ince karbür çökelmesine

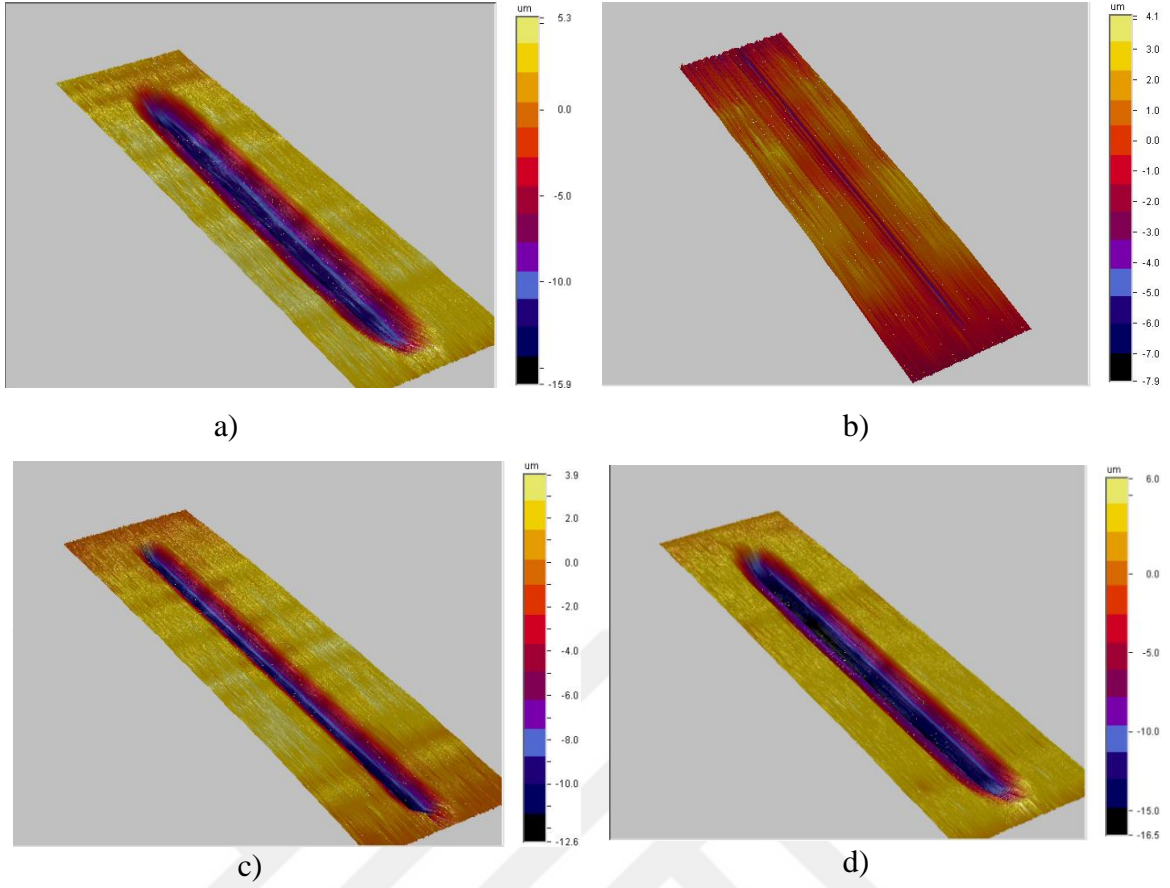
katkı sağlayarak aşınma direncini iyileştirdiği ve sürtünme katsayısında %15,55 oranında iyileşme sağladığı belirtilmektedir [80].

Şekil 4.15'te CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numunelerine yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayıları görülmektedir.



Şekil 4.15. 10N için sürtünme katsayıları.

Şekil 4.15'teki sürtünme katsayılarına bakıldığında; geleneksel ısı işlem (CHT) uygulanan numunenin sürtünme katsayısı 0.943  $\mu$ , 18 saat sığ kriyojenik işlem (SCT-18) uygulanan numunenin sürtünme katsayısı ise 0.816  $\mu$ , 18 saat derin kriyojenik işlem (DCT-18) uygulanan numunenin sürtünme katsayısı ise 0.832  $\mu$  ve 36 saat derin kriyojenik işlem (DCT-36) uygulanan numunenin sürtünme katsayısı ise 0.908  $\mu$  olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri sırasıyla sürtünme katsayısı değerinde %13,47, %11,77 ve %3,71 oranında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 4.16'de CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numunelerinin 3D görüntüsü verilmiştir.

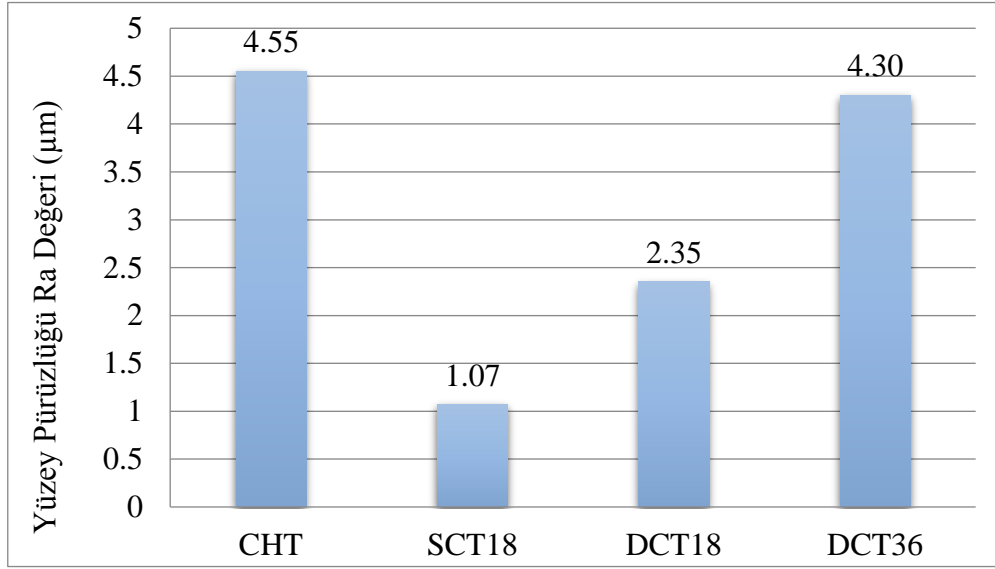


Şekil 4.16. Aşınma alanı 3D görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.

Şekil 4.16’de 3D görüntüsü verilen aşınma alanları değerlendirildiğinde en yüksek aşınma alanının CHT numunesinde, en düşük aşınma alanı ise SCT-18 numunesinde olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanan numunelerin aşınma alanlarının geleneksel ısıtma oranla daha az çıkmasının nedeni olarak, östenitin yapısının martenzit yapısına dönüşümü ve homojen karbür dağılımı ile birlikte sertlik değerlerindeki iyileşme olarak açıklanmaktadır.

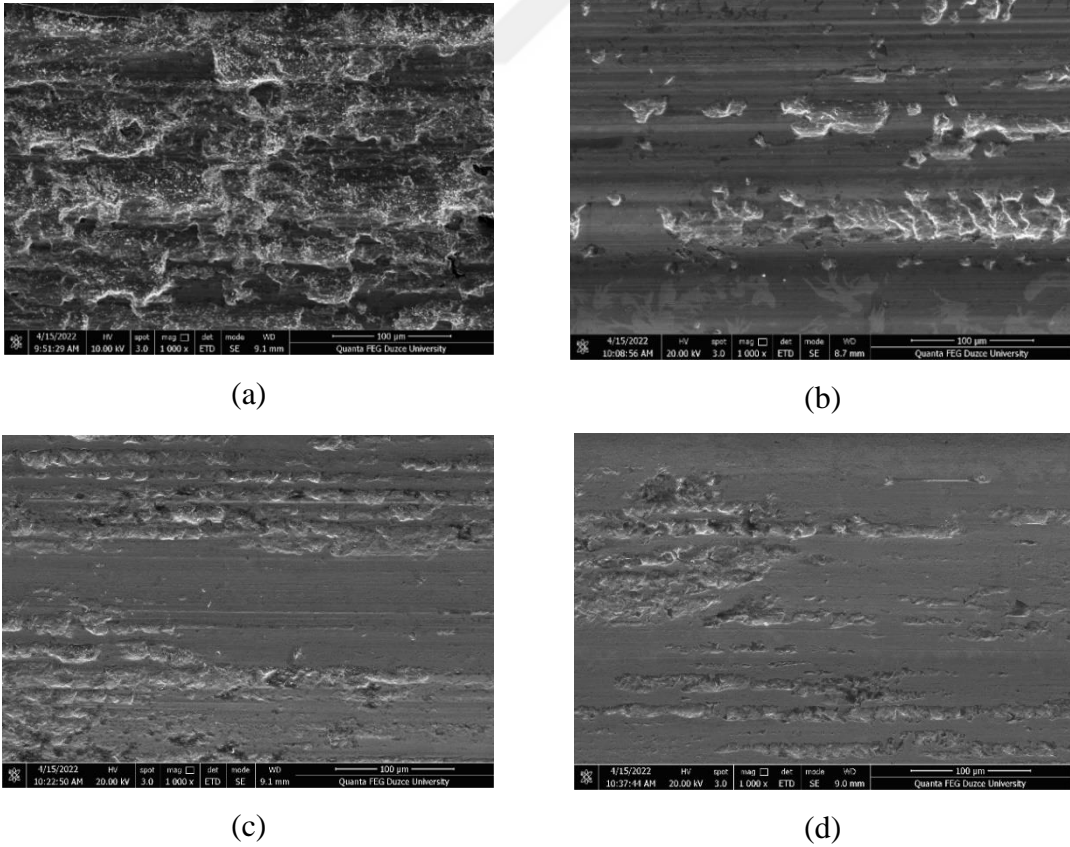
Aşınma testi sonucunda CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ölçülmüş ve numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. CHT, SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numunelerinin Ra değerleri sırasıyla 4,55µm, 1,07µm, 2,35µm ve 4,30µm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında, SCT-18 numunesinin yüzey pürüzlülük değerinde en fazla iyileşmeyi sağladığı görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri geleneksel ısıtma kıyasla yüzey pürüzlülük değerlerinde sırasıyla %325, %93,6 ve %5,49 oranında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Aşınma deneyi bulguları yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirildiğinde

sıg ve derin kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğü değerlerine pozitif katkılar sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.17. Aşınan yüzey pürüzlülük değeri (Ra).

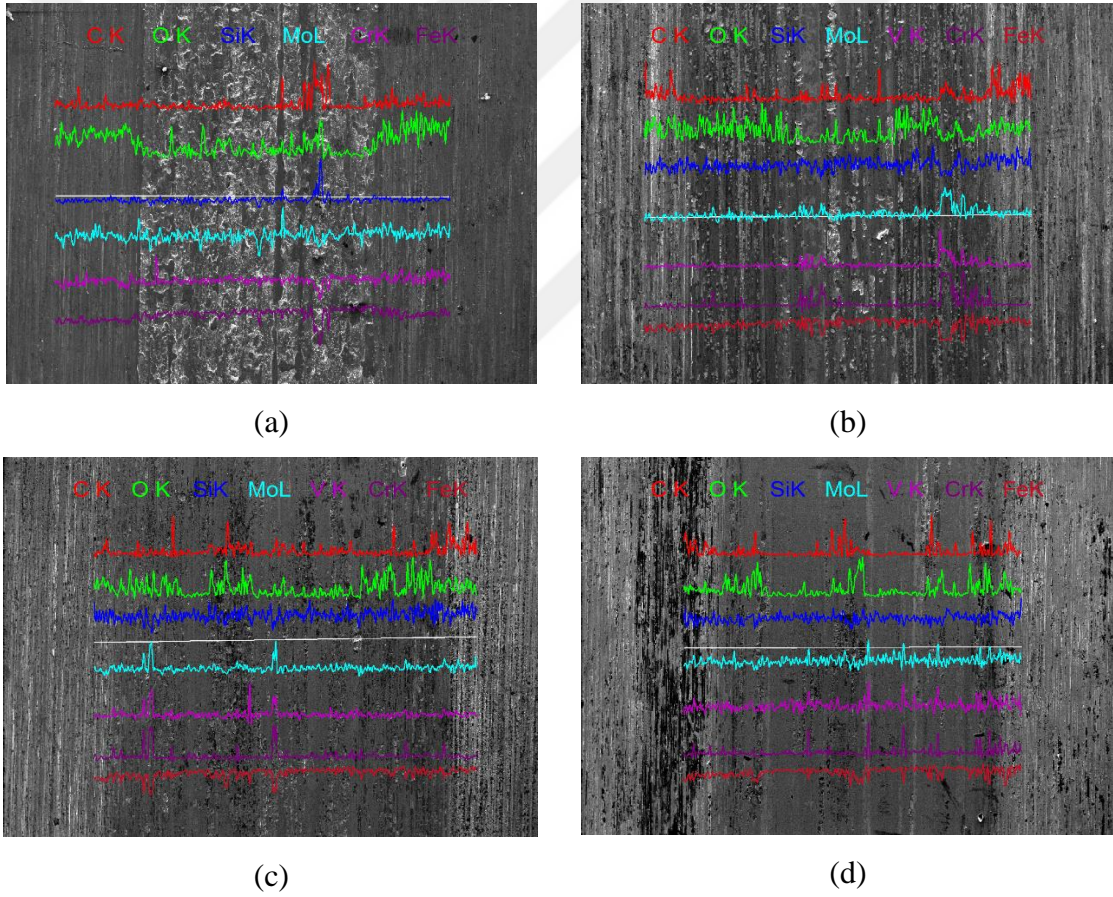
Şekil 4.18'de numunelere ait aşınma yüzeylerindeki deformasyon görülmektedir.



Şekil 4.18. Aşınan yüzey SEM görüntüsü a) CHT b) SCT-18 c) SCT-18 d) DCT-36.

Şekil 4.18'deki deney numunelerine ait aşınan yüzeylerin SEM görüntüsü incelendiğinde, geleneksel ısıtma işlemi uygulanan deney numunesinde kriyojenik işleme göre daha fazla deformasyon görülmektedir. Ayrıca kriyojenik işlem gören numunelerde daha homojen bir yüzey görülmektedir. Deney numunelerinin aşınan yüzey görüntüleri ile yüzey pürüzlülük değerleri paralellik göstermektedir. Malzemelerin sürtmesi sonucu yüzeylerde aşınma gerçekleşmekte ve sertlik ve süneklik gibi mekanik özelliklere göre deformasyon artış ya da azalış göstermektedir. Numunelerin aşınan yüzey görüntülerine incelendiğinde, aşınma kayıpları ile sertlik değerleri arasında paralellik görülmektedir.

Şekil 4.19'da aşınma deneyinden sonra yüzeyinde oluşan element çizgilerine ait görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.19. Aşınma yüzeyindeki element dağılım analizi a) CHT b) SCT-18 c) DCT-18 d) DCT-36.

Deney numunelerine ait element çizgileri incelendiğinde genel olarak normal yüzeylerden aşınmış yüzeye geçiş sırasında C, O, Cr ve V elementlerine ait çizginin yükseldiği görülmektedir. CHT numunesinde ait analiz sonucunda Cr miktarı düşük

oranda yükselme gösterse de kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinin Cr miktarında önemli artışlar görülmektedir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, CPOH soğuk iş takım çeliğine uygulanan derin ve sığ kriyojenik işlem sonrasında mikroyapı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Deney numuneleri sadece geleneksel ısıtma işlemi uygulanan “CHT” 18 saat bekleme süresinde sığ kriyojenik işlem uygulanan “SCT-18” 18 ve 36 saat bekleme sürelerinde derin kriyojenik işlem uygulanan “DCT-18” ve “DCT-36” olmak üzere 4 farklı grupta sınıflandırılmıştır. Numunelerin mikro sertlik, makro sertlik, aşınma dayanımı darbe enerjisi ve mikro yapıları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası CPOH takım çeliğinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir. Darbe enerji değeri haricinde mikroyapı ve mekanik özelliklerde en fazla iyileşme SCT-18 numunesinde meydana gelmiştir.
- Darbe deneyi sonrasında DCT numunesinin darbe enerji değeri 1,87J olup en iyi sonucu vermiştir. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 numunelerinin darbe enerji değerlerinde sırası ile %10,7 %33,69 ve %22,99 oranında düşüş tespit edilmiştir. Darbe enerjisi değerlerindeki düşüşler kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda yumuşak kalıntı östenit fazın sert martenzit fazına dönüşmesi ve daha homojen karbür dağılımı ile sertlikteki artışa atfedilmiştir.
- Kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda yumuşak kalıntı östenit fazın sert martenzit fazına dönüşmesi ve daha homojen karbür dağılımı ile sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir.
- Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri sırasıyla aşınma oranlarında yaklaşık olarak %358, %177 ve %7,75 oranında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanan deney numunelerinin sertlik değerleri ile aşınma oranları geleneksel ısıtma işlem uygulanan deney numunelerine kıyasla daha iyi bir sonuç vermiştir.
- Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri sırasıyla sürtünme katsayısı değerinde %13,47, %11,77 ve %3,71 oranında iyileşmeler meydana gelmiştir.

- Yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında, SCT-18 numunesinin yüzey pürüzlülük değerinde en fazla iyileşmeyi sağladığı görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanan SCT-18, DCT-18 ve DCT-36 isimli deney numuneleri geleneksel ısıl işleme kıyasla yüzey pürüzlülük değerlerinde sırasıyla %325, %93,6 ve %5,49 oranında iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir.
- Mikroyapı analizlerinde sığ ve derin kriyojenik işlem gören deney numunelerinin, geleneksel ısıl işlem gören deney numunelere göre; karbür tanelerinin daha homojen bir hal alarak ince bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışmada deneysel bulgular değerlendirildiğinde, derin ve sığ kriyojenik işlemin CPOH soğuk iş takım çeliğinin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir.

Bu alanda geliştirilebilecek konu önerileri aşağıda sıralanmıştır.

- Farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin seçilen malzeme grubu üzerindeki çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Seçilen malzeme grubuna kriyojenik işlem sonrasında farklı sıcaklıklarda ve sayılarda temperleme uygulayarak temperleme etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin seçilen malzeme grubu üzerindeki takım ömrü ve aşınma davranışları incelenebilir.
- Geleneksel ısıl işlem sonrası direkt kriyojenik işlem uygulanarak, temperlemenin kriyojenik işlem üzerine olan etkisi araştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] F. Kara, O. Özbek, N. A. Özbek ve İ. Uygur, “Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Process on Residual Stress and Residual Austenite”, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, c.7, sayı 2, ss. 143-151, 2021.
- [2] A. Çetin ve A. Çiçek, “Takım Çeliklerinin Kriyojenik İşlemi”, *In 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, ss. 922-931, 2016.
- [3] Ş. Şirin ve E. Şirin, “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesi Üzerine Bir Derleme”, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, c. 1, sayı 2, ss. 14-24, 2020.
- [4] M. I. Costa, D. Verdera, M. T. Vieira ve D. M. Rodrigues, “Surface enhancement of cold work tool steels by friction stir processing with a pinless tool”, *Applied surface science*, c. 296, ss. 214-220, 2014.
- [5] U. Sen ve S. Sen, “The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels”, *Materials Characterization*, c. 50, sayı. 4-5, ss. 261-267, 2003.
- [6] S. Šolić, B. Podgornik ve V. Leskovšek, “The occurrence of quenching cracks in high-carbon tool steel depending on the austenitizing temperature”, *Engineering Failure Analysis*, c. 92, ss.140-148, 2018.
- [7] A. Bhateja, A. Varma, A. Kashyap ve B. Singh, “Study the effect on the hardness of three sample grades of tool steel ie EN-31, EN-8, and D3 after heat treatment processes such as annealing, normalizing, and hardening & tempering”, *The International Journal of Engineering And Science*, c. 1, sayı. 2, ss. 253-259, 2012.
- [8] D. M. Lal, S. Renganarayanan ve A. Kalanidhi, “Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels”, *Cryogenics*, c. 41, sayı. 3, ss. 149-155, 2001.
- [9] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei ve M. A. Golozar, “Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel”, *Materials & Design*, c. 30, sayı.8, ss. 3259-3264, 2009.
- [10] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini ve K. H. Stiasny, “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels”, *Journal of materials processing technology*, c. 118, sayı. 1-3, ss. 350-355, 2001.
- [11] A. Bensely, A. Prabhakaran, D. M. Lal ve G. Nagarajan, “Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment”, *Cryogenics*, c. 45, sayı. 12, ss. 747-754, 2005.

- [12] D. G. Fantineli, C. T. Parcianello, T. S. Rosendo, A. Reguly ve M. D. Tier, “Effect of heat and cryogenic treatment on wear and toughness of HSS AISI M2”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı. 6, ss. 12354-12363, 2020.
- [13] S. S. Gill, R. Singh, H. Singh ve J. Singh, “Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 49, sayı. 3-4, ss. 256-260, 2009.
- [14] S. Magadum, S. A. Kumar, V. G. Yoganath, C. K. Srinivasa ve T. GuruMurthy, “Evaluation of Tool Life and Cutting Forces in Cryogenic Machining of Hardened Steel”, *Procedia Materials Science*, c. 5, ss. 2542–2549, 2014.
- [15] E. Ersöz ve İ. Ovalı, “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, c. 21, sayı. 2, ss. 411-417, 2018.
- [16] F. Kara, M. Karabatak, M. Ayyıldız ve E. Nas, “Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı. 1, ss. 969-983, 2020.
- [17] Ş. Şirin, S. Akıncıoğlu ve H. Gül, “Kriyojenik İşlem Zamanının AISI 430 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 7, sayı. 3, ss. 66-71, 2018.
- [18] D. Yun, L. Xiaoping ve X. Hongshen, “Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism”, *Heat Treatment of Metals*, c. 3, ss. 55-59, 1998.
- [19] C. Wang, “Wear resistance study on cryogenic treated AISI D2 steel”, MS Thesis, Materials of Engineering Department, Institute of Science, Tatung University, Tatung, Tayvan, 2006.
- [20] P. Baldissera ve C. Delprete, “Deep cryogenic treatment of AISI 302 stainless steel: Part II–Fatigue and corrosion”, *Materials & Design*, c. 31, sayı. 10, ss. 4731–4737, 2010.
- [21] C. L. Gogte, K. M. Iyer, R. K. Paretkar ve D. R. Peshwe, “Deep subzero processing of metals, alloys: evolution of microstructure of AISI T42 tool steel”, *Materials and Manufacturing Processes*, c. 24, sayı. 7-8 ss. 718 – 722, 2009.
- [22] J. D. Darwin, D. M. Lal ve G. Nagarajan, “Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method”, *Journal of materials processing technology*, c. 195, sayı.1-3, ss. 241-247 2008
- [23] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin ve O. Özbek, “Kriyojenik İşlem Uygulanmış Kaplamasız WC-Co Takımlarla AISI 304 Paslanmaz Çeliğin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi”, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, 2016.

- [24] R. F. Barron ve C. Mulhern, "Cryogenic treatment of AISI-T8 and C1045 steels", *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, ss. 171-179, 1980.
- [25] K. Moore ve D. N. Collins, "Cryogenic treatment of three heat treated tool steels", *Key Engineering Materials*, c. 86-87, ss. 47-54, 1993.
- [26] D. N. Collins ve J. Dormer, "Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel", *Heat Treatment of Metals*, ss. 71-74, 1997.
- [27] D. Das, A. K. Dutta ve K. K. Ray, "Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel", *Cryogenics*, c. 49, sayı. 5, ss. 179-184, 2009.
- [28] N. B. Dhokey ve S. Nirbhavne, "Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel", *Journal of materials processing technology*, c. 209, sayı. 3, ss. 1484-1490, 2009.
- [29] K. Amini, S. Nategh ve A. Shafyei, "Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel", *Materials & Design*, c. 31, sayı. 10, ss. 4666-4675, 2010.
- [30] K. Amini, A. Akhbarizadeh ve S. Javadpour, "Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment", *Vacuum*, c. 86, sayı. 10, ss. 1534-1540, 2012.
- [31] Y. Arslan ve A. Özdemir, "Farklı sürelerde kriyojenik işlem uygulanmış AISI D3 soğuk iş takım çeliği zımbalarda aşınma davranışları ve takım ömrü", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 2, sayı. 3, ss. 87-99, 2013.
- [32] S. Dixit, S. S. R. Nimbalkar, ve R. R. Kharde, "Dry sliding wear analysis of D5 tool steel at different heat treatments", *International Journal Engineering Science*, c. 2, sayı. 5, 16-26, 2013.
- [33] K. Niaki ve S. E. Vahdat, "Optimization of tensile properties of AISI S1 tool steel", *Transmation Indian Inst Metsrisl*, c. 68, sayı. 5, ss. 777-781, 2015.
- [34] B. Podgornik, I. Paulin, B. Zajec, S. Jacobson, ve V. Leskovsek, "Deep cryogenics treatment of tool steels," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 229, ss. 389-406, 2016.
- [35] D. N. Korade, K. V. Ramana, K. R. Jagtap ve N. B. Dhokey, "Effect of deep cryogenic treatment on tribological behaviour of D2 tool steel-an experimental investigation", *Materials Today: Proceedings*, c. 4, sayı. 8, ss. 7665-7673, 2017.
- [36] I. Gunes, M. Uzun, A. Cetin, K. Aslantas, ve A. Cicek, "Evaluation of wear performance of cryogenically treated Vanadis 4 Extra tool steel", *Kovove Mater*, c. 54, sayı. 3, ss. 195-204, 2016.
- [37] G. Singh, S. S. Gill ve M. Dogra, "Techno-economic analysis of blanking punch life improvement by environment friendly cryogenic treatment", *Journal of Cleaner Production*, c. 143, ss. 1060-1068, 2017.

- [38] P. Jimbert, M. Iturrondobeitia, J. Ibarretxe ve R. Fernandez-Martinez, “Influence of cryogenic treatment on wear resistance and microstructure of AISI A8 tool steel”, *Metals*, c. 8 ss. 1-11, 2018.
- [39] J. Soleimany, H. Ghayour, K. Amini ve F. Gharavi, “The effect of deep cryogenic treatment on microstructure and wear behavior of H11 tool steel”, *Physics of Metals and Metallography*, c. 120, sayı. 9, ss. 888-897, 2019.
- [40] D. Akgümüş Gök ve V. Öztürk, “Kriyojenik İşlemin Vanadis 8 Çeliğinin Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısı Üzerindeki Etkisi”, *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, c. 2, sayı. 1, ss. 22-32, 2020.
- [41] P. H. S. Cardoso, C. L. Israel, M. B. Da Silva, G. A. Klein ve L. Soccol, “Effects of deep cryogenic treatment on microstructure, impact toughness and wear resistance of an AISI D6 tool steel”, *Wear*, c. 456, 2020.
- [42] S. Akıncıoğlu, “Investigation of the effect of deep cryogenic process on the tribological properties of X153CrMoV12 mold steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 30 sayı.4, ss. 2843-2852, 2021.
- [43] F. Kara, O. Özbek, N. A. Özbek ve İ. Uygur, “Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Process on Residual Stress and Residual Austenite”, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, c.7, sayı.2, ss.143-151, 2021.
- [44] P. Jovičević-Klug, M. Jovičević-Klug, T. Sever, D. Feizpour ve B. Podgornik, “Impact of steel type, composition and heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 14, ss. 1007-1020, 2021.
- [45] F. D. Ramos, J. Oliveira Bairros ve M. F. C. Moscoso, “Deep cryogenic treatment in AISI D2 tool steel punches to enhance tool life”, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, c. 18, 2021.
- [46] V. Yarasu, P. Jurci, J. Hornik ve S. Krum, “Optimization of cryogenic treatment to improve the tribological behavior of Vanadis 6 steel using the Taguchi and grey relation approach”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 18, ss. 2945-2962, 2022.
- [47] S. Li, H. Guo, J. Li, Z. Li ve J. Li, “Carbides precipitation and kinetics of H13 steel subjected to deep cryogenic treatment”, *Materials Science and Technology*, ss. 1-14, 2022.
- [48] G. Xu, P. Huang, Z. Wei, Z. Feng ve G. Zu, “Microstructural variations and mechanical properties of deep cryogenic treated AISI M35 high-speed steel tempered at various temperatures”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 17, ss. 3371-3383, 2022.
- [49] Sağlam Metal. (2022, 15 Ağustos), “CPOH Kimyasal Bileşeni”. Sağlam Metal [Online]. Erişim: <https://www.saglammetal.com>.

- [50] M. Koneshlou, K. M. Asl, ve F. Khomamizadeh, “Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of aisi h13 hot work tool steel”, *Cryogenics*, c. 51, sayı. 1, ss. 55–61, 2011.
- [51] S. Zhirafar, A. Rezaeian ve M. Pugh, “Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 186, sayı. 1-3, ss. 298-303, 2007.
- [52] S. S. Gill, J. Singh, R. Singh ve H. Singh, “Metallurgical principles of cryogenically treated tool steels—a review on the current state of science”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 54, sayı. 1, ss. 59-82, 2011.
- [53] F. Kara, “AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye 2014.
- [54] E. El ve F. Kara, “Sığ Kriyojenik İşlemin Sleipner Soğuk İş Takım Çeliğinin Metalurjik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 7, sayı. 2, ss. 111-120, 2021.
- [55] A. Bensely, S. Venkatesh, M. D. Lal, G. Nagarajan, A. Rajadurai ve K. Junik, “Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 479, sayı.1-2, ss. 229-235, 2008.
- [56] J. Durica, J. Ptacinova, M. Hudakova, M. Kusy ve P. Jurci, “Microstructure and Hardness of Cold Work Vanadis 6 Steel after Subzero Treatment at-140 [degrees] C”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- [57] M. Özer, “AISI H13 Takım Çeliğine Uygulanan Derin Kriyojenik İşlem ve Temperleme Isıl İşleminin Mikroyapı, Sertlik ve Darbe Enerjisine Etkisi”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, c. 7, sayı.3, ss. 688-699, 2019.
- [58] D. Das, A. K. Dutta ve K. K. Ray, “Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 527, sayı. 1-2, ss. 2182-2193, 2010.
- [59] J. Y. Huang, Y. T. Zhu, X. Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke ve T. E. Mitchell, “Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 339, sayı. 1-2, ss. 241-244, 2003.
- [60] R. S. Siva, M. A. Jaswin ve D. M. Lal, “Enhancing the wear resistance of 100Cr6 bearing steel using cryogenic treatment”, *Tribology transactions*, c. 55, sayı. 3, ss. 387-393, 2012.
- [61] H. G. Nanesa ve M. Jahazi, “Simultaneous enhancement of strength and ductility in cryogenically treated AISI D2 tool steel”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 598, ss. 413-419, 2014.

- [62] T. V. Pirtovšek, G. Kugler ve M. Terčelj, “The behaviour of the carbides of ledeburitic AISI D2 tool steel during multiple hot deformation cycles”, *Materials characterization*, c. 83, ss. 97-108, 2013.
- [63] D. Bombac, M. Fazarinc, A. S. Podder ve G. Kugler, “Study of carbide evolution during thermo-mechanical processing of AISI D2 tool steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 22, sayı. 3, ss. 742-747, 2013.
- [64] H. Kim, J. Y. Kang, D. Son, T. H. Lee ve K. M. Cho, “Evolution of carbides in cold-work tool steels”, *Materials Characterization*, c. 107, ss. 376-385, 2015.
- [65] M. M. Serna, E. R. B. Jesus, E. Galego, L. G. Martinez, H. P. S. Corrêa ve J. L. Rossi, “An overview of the microstructures present in high-speed steel-carbides crystallography”, *In Materials science forum*, c. 530, ss. 48-52, 2006.
- [66] A. Sert , “AISI M2 Takım Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Davranışları Üzerine Derin Kriyojenik Isıl İşlemin ve Temperlemenin Etkisi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 22, sayı. 66, s. 801-811, 2020.
- [67] J. Zhang, M. Yu, Z. Li, Y. Liu, Q. Zhang, R. Jiang ve S. Sun, “The effect of laser energy density on the microstructure, residual stress and phase composition of H13 steel treated by laser surface melting”, *Journal of Alloys and Compounds*, c. 856, 2021.
- [68] D. Das, A. K. Dutta ve K. K. Ray, “Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel”, *Wear*, c. 267 sayı. 9-10, ss. 1371-1380, 2009.
- [69] D. Das, A. K. Dutta, V. Toppo ve K. K. Ray, “Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel”, *Materials and Manufacturing Processes*, c. 22 sayı.4, ss. 474-480, 2007.
- [70] X. G. Yan ve D. Y. Li, “Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3C15V high speed steel”, *Wear*, c. 302, sayı. 1-2, ss. 854-862, 2013.
- [71] M. Preciado, P. M. Bravo ve J. M. Alegre, “Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 176, sayı. 1-3, ss. 41-44, 2006.
- [72] J. Yi, W. J. Xue, Z. P. Xie, W. Liu, L. X. Cheng, J. Chen ve Y.X. Gao, “Enhanced toughness and hardness at cryogenic temperatures of silicon carbide sintered by SPS”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 569, ss. 13-17, 2013.
- [73] H. Nalbant, “Derin kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.

- [74] D. Das, R. Sarkar, A. K. Dutta ve K. K. Ray, “Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 528, sayı.2, ss. 589-603, 2010.
- [75] S. Li, Y. Xie ve X. Wu, “Hardness and toughness investigations of deep cryogenic treated cold work die steel”, *Cryogenics*, c. 50, sayı. 2, ss. 89–92, 2010.
- [76] İ. Ovalı ve E. Kızılkaya, “AISI 4140 Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, c. 6, sayı. 1, ss. 137-148, 2018.
- [77] D. Senthilkumar, I. Rajendran, M. Pellizzari ve J. Siiriainen, “Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 211, sayı. 3, ss. 396-401, 2011.
- [78] I. Calliari, M. Zanesco ve E. Ramous, “Influence of isothermal aging on secondary phases precipitation and toughness of a duplex stainless steel SAF 2205”, *Journal of Materials Science*, c. 41, sayı. 22, ss. 7643-7649, 2006.
- [79] P. I. Patil ve R. G. Tated, “Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels: A review”, *In International Conference in Computational Intelligence*, c. 9, 2012.
- [80] J. Li, X. Yan, X. Liang, H. Guo ve D. Y. Li, “Influence of different cryogenic treatments on high-temperature wear behavior of M2 steel”, *Wear*, c. 376, ss. 1112-1121, 2017.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ferhat ÇALIŞKAN

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan               | Okul/Üniversite           | Mezuniyet Yılı |
|--------|--------------------|---------------------------|----------------|
| Lisans | Talaşlı Üretim Öğ. | Gazi Üniversitesi         | 2010           |
| Lise   | Tesviye            | Seyyid Burhaneddin E.M.L. | 2002           |

## YAYINLAR

F. ÇALIŞKAN, F. Kara, “Derin kriyojenik işlemin CPOH soğuk iş takım çeliğinin aşınma performansına etkisinin araştırılması,” *Al -Farabi 4. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 2022.