

# AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Enes ERSÖZ\*, İsmail OVALI**

Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.05.2017 ; Kabul/Accepted : 26.07.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, AISI D2 (DIN 1.2379) soğuk iş takım çeliğine, konvansiyonel ısı işlemlere takiben farklı bekletme sürelerinde (2 saat ve 6 saat) endüstriyel kriyojenik işlem uygulanmış olup bu işlemlerin aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Abrasif aşınma testinde tüm grup numunelerine 5, 10 ve 15 N kuvvetleri uygulanmış olup, test kuru ortamda sabit kayma hızında (3,16 m/s) ve üç farklı aşınma mesafesinde yapılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde kriyojenik işlemlerin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Kriyojenik işlemde artan bekleme süresi ile numunelerin aşınma dirençlerinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek aşınma direnci altı saat bekleme süresine sahip numunede elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük aşınma direnci işlem uygulanmamış (dökülmüş halde) numunede elde edilmiştir. Kriyojenik işlem parametrelerinin kontrolü ile AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışlarının optimize edilebileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AISI D2, DIN 1.2379, kriyojenik işlem, sertlik testi, aşınma testi.

## The Effects of The Industrial Cryogenic Process on The Wear Behaviours of AISI D2 Cold Work Tool Steels

### ABSTRACT

In this study, industrial cryogenic process after conventional heat treatment process for various holding time was applied to AISI D2 (DIN 1.2379) cold work tool steel. The effects of the industrial cryogenic process on the wear behavior was investigated. In the wear test 5,10 and 15 N forces were carried out to all group specimens at a constant shear rate (3,16 m/s) and three different wear distances. Experimental results show that cryogenic processing of AISI D2 cold work tool steels have a significant effect on wear behavior. It is determined that the cryogenic process increases the wear resistance of the samples with increasing sliding time. On the other hand, the lowest wear resistance was obtained in the as-cast sample. It has been determined that the wear behavior of the AISI D2 cold work tool steel can be optimized by controlling the cryogenic process parameters.

**Keywords:** AISI D2, DIN 1.2379, cryogenic process, hardness test, wear test.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI D2 çelikleri karbon ve krom oranı yüksek soğuk takım çelikleri olarak bilinirler. Endüstride Sverker 21 olarak geçen bu çeliklerin sertleştirilebilirlikleri yüksek olduğu için iyi bir aşınma direnci gösterirler.

Ayrıca yüksek tokluk değerlerine sahip olduğu da bilinmektedir. Isıl işlem yapıldığı takdirde 63-65 HRC sertliklerine ulaşabilmektedir.

Endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadırlar (derin çekme kalıplar 1, zimbalar, plastik kırma bıçakları vs.) [1]. Bu malzemenin aşınma dayanımı ve tokluk dışında birçok özelliği de içeriğinde bulundurmaktadır. Özelliklerinin geniş kapsamlı olmasının nedenlerinden biri de yapısında yüksek oranda karbon ve krom elementlerini

bulundurmasıdır. Diğer özellikleri ise yüksek basma dayanımı, yüksek tokluk, yüksek meneviş direnci, ısıl işlemlerde mükemmel boyutsal kararlılık, PVD işlemine uygunluk, ikincil sertlik özelliğidir [2].

Kriyojenik işlem malzemeye uygulanan konvansiyonel ısı işlemlerin ardından yapılan özel bir işlemdir. Bu işlem genel olarak aşınma dayanımını arttırmak için yapılmaktadır. Kriyojenik işlemde malzemeye su verildikten sonra, -196°C'ye kadar soğutulmaktadır. 0°C'nin altında yapılan bu soğutma işleminde malzemenin yapısının tamamen değişmesi beklenir. Su verme işleminden sonra mikroyapıda kalan kalıntı östenitler bu işlemle giderilir ve ardından soğutma ortamından çıkarılarak oda sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır [3]. Kriyojenik işlem derin ve sıg kriyojenik işlem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Farklı alanlarda kullanılan birçok takım çeliğinde aşınma

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : iovali@pau.edu.tr

olayı meydana gelir. Bu çeliklerde östenitleme işleminin oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi gerçekleştirilir, sert ve kırılabilir bir yapı olan martenzit oluşur. Oda sıcaklığına kadar soğutulmuş takım çeliklerinin mikroyapısında metastabil (yarı kararlı) faz olarak da bilinen kalıntı östenit kalır. Kalıntı östeniti ortadan kaldırmak için kriyojenik işlem uygulanır. Kriyojenik işlemin ardından temperleme ısıl işlemi yapılmaktadır. Bu ısıl işlem ile mikroyapıda ki eta karbürlerin çökmesi sağlanmaktadır. Eta karbürlerin çökmesi ve kalıntı östenitlerin yok edilmesi malzemenin aşınma dayanımının artmasına neden olmaktadır. Kriyojenik işlem özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılmakla birlikte birçok sektörel faaliyette kullanılmaktadır [4,5].

Yamaoğlu çalışmasında, kriyojenik işleminde içinde olduğu 4 farklı işlem uygulamıştır. Aşınma deney numuneleri 800 mesh, 1000 mesh ve 1200 mesh zımpara üzerinde 10 N, 20N ve 30 N yük altında test edilmiştir. 800,1000 ve 1200 mesh zımparalarda uygulanan deneylerde en iyi aşınma dayanımı su verildikten sonra kriyojenik işlem uygulanarak elde edilmiştir. 800 mesh ve 1000 mesh zımparada en az aşınma kaybı 10 N yük altında, 1200 mesh zımparada ise 20 N yük altında görülmüştür. Malzemeye uygulanan yük arttıkça aşınma dayanımının azaldığı, aşınma kaybının ise arttığı gözlenmiştir [6].

D. Das ve arkadaşları çalışmalarında, AISI D2 soğuk takım çeliklerinde derin kriyojenik işlemin kalıntı östeniti belirgin bir biçimde azalttığını ve ikincil karbürlerin çökme davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Kriyojenik işlem ile sertliğin arttığı gözlenmiştir. Kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk takım çeliğinin aşınma dayanımını önemli ölçüde arttırdığını ancak artış oranının uygulanan yüke bağlı olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Literatür çalışmaları incelendiğinde kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk takım çeliğinin aşınma davranışları üzerindeki etkisini araştıran çalışmaların sınırlı olduğu, yapılan çalışmaların genel olarak malzemenin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlem parametrelerinin aşınma davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneyel çalışmalarda, kullanım alanı geniş olan ve endüstride Sverker 21 olarak da bilinen AISI D2 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Kullanılmış olan malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** AISI D2 soğuk takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% Ağırlık) (Chemical composition wt %)

Kimyasal Kompozisyon (% Ağırlık)								
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co
1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	-	0,75	-	-

Isıl işlemler ve kriyojenik işlem parametreleri Çizelge 2 ve Çizelge 3’te verilmiştir. Kriyojenik işlemler sonrası temperleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

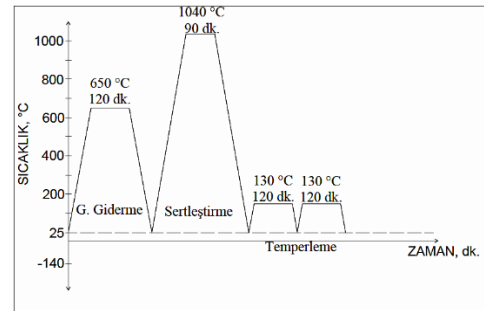
**Çizelge 2.** Isıl işlem parametreleri (Heat treatment parameters)

Isıl İşlem	Gerilim Giderme	Östenitleme + Su verme	Temperleme
SICAKLIK	650°C	1040°C	130°C

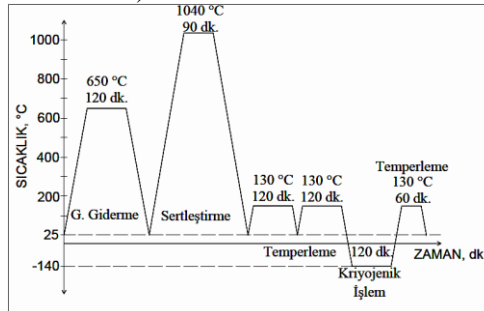
**Çizelge 3.** Kriyojenik işlem parametreleri (Cryogenic process parameter)

Numune Kodu	Uygulanan Isıl İşlemler	Kriyojenik İşlem (-140)	Temperleme
1	-	-	-
2	Gerilim Giderme	-	-
3	Su Verme	2 saat	130°C
4	Temperleme	6 saat	130°C

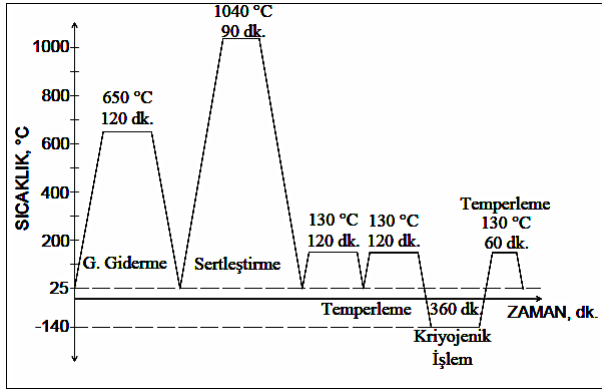
Numuneler işlem uygulanmamış (döküm halinde), konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, konvansiyonel ısıl işlem + kriyojenik işlem uygulanmış (2 saat) + temperlenmiş, konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış + kriyojenik işlem uygulanmış (6 saat) + temperlenmiş olmak üzere dört gruba ayrılmıştır. Kriyojenik işlemler sıvı azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Sertleştirme işlemleri vakum fırınında, kriyojenik işlemler ise PLC kontrole sahip mikro işlemcili kriyojenik kamara ünitelerinde yapılmıştır. Uygulanan işlemlerin sıcaklık-zaman grafikleri Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’te gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Konvansiyonel ısıl işlem planı (Summary of heat treatments)



**Şekil 2.** Kriyojenik işlem (2 saat) planı (Summary of cryogenic process-2)

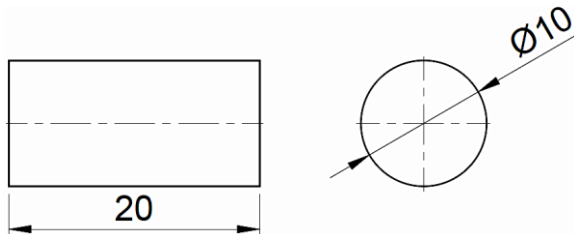


Şekil 3. Kriyojenik işlem (6 saat) planı (Summary of cryogenic process-6)

Deney numunelerinin yapısında talaşlı işlem sonrası gerilmeler oluşabilmektedir. Isıl işlemler sistematik bir sıra ile gerçekleştirilmiştir. 1. İşlem; Gerilmeleri en aza indirmek amacıyla 650°C'de gerilim giderme tavlama yapılmıştır. Ardından numunelerde yüksek aşınma dayanımı ve yüksek sertlik istendiğinden dolayı vakum fırınlarında 1040°C'de su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. 2. İşlem; Bu işlemin ardından gevrekliği yani kırılabilirliği azaltmak ve tokluğu arttırmak amacıyla 130°C'de temperleme işlemi uygulanmıştır. 3. İşlem; Ardından -140°C'de 2 saat ve 6 saat bekletme sürelerinde iki ayrı endüstriyel kriyojenik işlem uygulanmıştır. 4. İşlem; Kriyojenik işlemin ardından numunelere 130°C'de 1 saat boyunca temperleme işlemi uygulanmış ve temperlemenin ardından havada soğutulmaya bırakılmıştır.

AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin sertlik testi ASTM E18 standardında, Rockwell C (HRC) skalası cinsinden ölçülmüştür. Üç farklı bölgeden alınan ölçülerin ortalaması alınarak sertlikler hesaplanmıştır. Sertlik testi Meba MHT-150 sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır.

Numunelerin ön talaş kaldırma işlemlerinde işlemleri universal torna tezgahında, finish işlemleri ise Taksan CNC torna tezgahında yapılmış ve istenilen boyutsal ölçülere getirilmiştir. Ø10 x 20mm boyutlarında 12 adet numune hazırlanmıştır. Ardından numunelerin çapakları temizlenmiş ve testlere hazır hale getirilmiştir. Aşınma testi numunelerinin ölçüleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Aşınma testi numune şekli ve ölçüleri (Wear test specimen dimension)

Ø10 x 20 mm ölçülerinde hazırlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin aşınma testi, pin-on-disk aşınma cihazında yapılmıştır. Aşınma testi herhangi bir yağlayıcı kullanılmadan oda sıcaklığında yapılmıştır.

Teste başlamadan önce aşınma yapılacak tüm yüzeyler 220 mesh SiC zımpara ile zımparalanarak tüm yüzeylerde aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Numuneler aşındırıcı zımpara yüzeyine dik hareket ettirilmiş ve sürekli olarak kullanılmamış yeni bir aşındırıcı yüzeyine temas sağlanmıştır. Numunelerin ağırlık kayıpları  $\pm 0.001$  g hassasiyette elektronik terazide ölçülmüştür. Ayrıca sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla cihaza monte edilmiş yük hücre sensörü ile sürtünme kuvvetleri ölçülerek sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma test öncesi ve sonrasında numuneler etil alkol ile temizlenip kurutulmuştur.

Abrasif aşınma testinde tüm grup numunelerine 5, 10 ve 15 N yük uygulanmış olup kayma hızı 3,16 m/s ve test süresi 30,60 ve 90 s. olarak belirlenmiştir. Abrasif aşındırıcı olarak 220 mesh aşındırıcı zımpara kullanılmıştır. Test parametreleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Abrasif aşınma parametreleri (Wear test parameters)

Numune Numaraları	Kayma Hızı (m/s)	Yük (N)	Kayma Mesafesi (m)
Dökülmüş Halde -1	3,16	5	95
Dökülmüş Halde -2	3,16	5	190
Dökülmüş Halde -3	3,16	5	285
Dökülmüş Halde -4	3,16	10	95
Dökülmüş Halde -5	3,16	10	190
Dökülmüş Halde -6	3,16	10	285
Dökülmüş Halde -7	3,16	15	95
Dökülmüş Halde -8	3,16	15	190
Dökülmüş Halde -9	3,16	15	285
Konven-1	3,16	5	95
Konven -2	3,16	5	190
Konven -3	3,16	5	285
Konven -4	3,16	10	95
Konven -5	3,16	10	190
Konven -6	3,16	10	285
Konven -7	3,16	15	95
Konven -8	3,16	15	190
Konven -9	3,16	15	285
Kriyojenik_2-1	3,16	5	95
Kriyojenik_2-2	3,16	5	190
Kriyojenik_2-3	3,16	5	285
Kriyojenik_2-4	3,16	10	95
Kriyojenik_2-5	3,16	10	190
Kriyojenik_2-6	3,16	10	285
Kriyojenik_2-7	3,16	15	95
Kriyojenik_2-8	3,16	15	190
Kriyojenik_2-9	3,16	15	285
Kriyojenik_6-1	3,16	5	95
Kriyojenik_6-2	3,16	5	190
Kriyojenik_6-3	3,16	5	285
Kriyojenik_6-4	3,16	10	95
Kriyojenik_6-5	3,16	10	190
Kriyojenik_6-6	3,16	10	285
Kriyojenik_6-7	3,16	15	95
Kriyojenik_6-8	3,16	15	190
Kriyojenik_6-9	3,16	15	285

Testlerde meydana gelen ağırlık kayıpları tespit edilmiş ve aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak aşınma testi diyagramları karakterize edilmiştir.

$$\text{Sürtünme Katsayısı } (\mu) = \left( \frac{F}{P} \right) \quad (1)$$

burada F yük hücresi (load cell) tarafından ölçülen sürtünme kuvveti ve P numunelere uygulanan normal yüküdür [8].

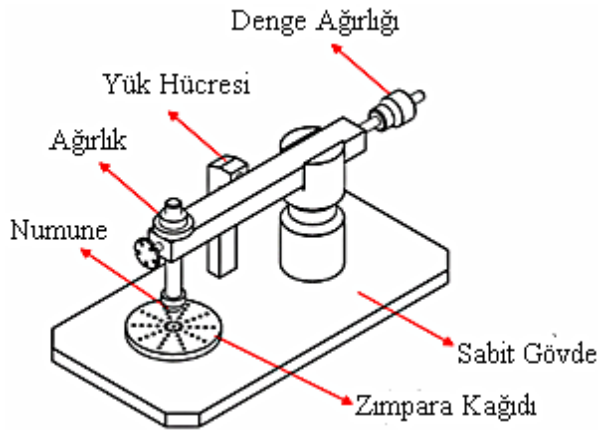
Hacim kaybı, ağırlık kaybından yararlanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır [8]:

$$\text{HacimKaybı } (mm^3) = \left( \frac{\text{AğırlıkKaybı}(g)}{\text{Yoğunluk}(g/mm^3)} \right) \times 1000 \quad (2)$$

Aşınma testleri her numune için üç defa ölçüm gerçekleştirildi. Aşınma oranı aşağıdaki denklemden hesaplanır [8]:

$$\text{AşınmaOranı } (mm^3/m) = \left( \frac{\text{HacimKaybı}(mm^3)}{\text{KaymaMesafesi}(m)} \right) \times 1000 \quad (3)$$

Abrasif aşınma testi Pin-On-Disk aşındırma cihazında (Şekil 5) yapılmış, ağırlık ve yoğunluklar ise RADWAG elektronik terazi cihazında ölçülmüştür. Aşınma kuvvetleri takibi Esit Data Logger v1.1.9 programıyla sağlanmıştır.



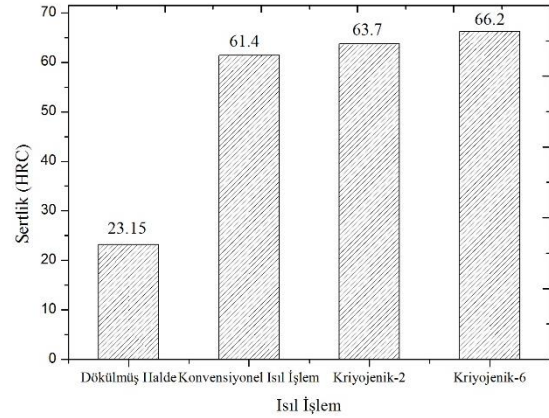
Şekil 5. Pin-on-disk aşındırma cihazı şematik gösterimi (Pin-on disk wear set-up)

Aşınma davranışını karakterize edebilmek için hacimsel kayba, aşınma oranına ve sürtünme katsayısına göre değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca kayma mesafesinin aşınma davranışına etkisini tespit edebilmek için 100 m, 200 m ve 300 m mesafelerinde testler gerçekleştirilmiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

AISI D2 soğuk iş takım çelik numuneleri işlem uygulanmamış (Dökülmüş Halde) (D), konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanmış (K), konvansiyonel ısıtma işlemi-kriyojenik işlem uygulanmış (iki saat)- temperlenmiş (K+KR+T), konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanmış-kriyojenik işlem uygulanmış (altı saat)- temperlenmiş (K+KR+T) olmak üzere dört gruba ayrılmış ve sertlik

testi yapılmıştır. Tüm ısıtma işlemleri için üçer numune bulunmaktadır. Sertlik testi her bir numunenin üç farklı bölgesinden alınan sertliklerin ortalamasıyla yapılmıştır. 150 kg yük uygulanarak yapılan sertlik testi sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

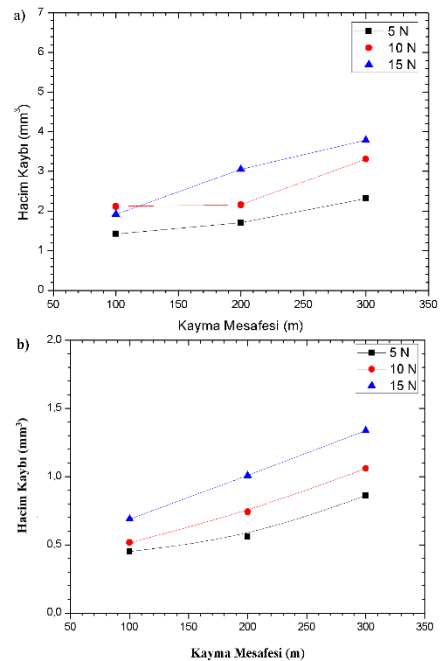


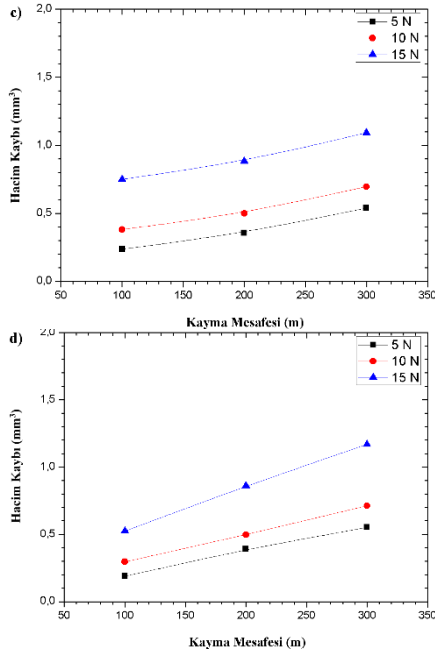
Şekil 6. Isıl işlemlerin sertlik üzerindeki etkisi (The effects of heat Treatments on the the hardness)

Yapılan sertlik testi sonuçları incelendiğinde, tüm ısıtma işlemi ve kriyojenik işlem süreçlerinde sertliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Konvansiyonel ısıtma işlemlerinin AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin sertliğini yaklaşık 38 HRC arttırdığı, konvansiyonel ısıtma işlemlerinin ardından uygulanan kriyojenik işlemlerinde, bekleme sürelerinden kaynaklı sertlik artışına (yaklaşık 3 HRC) neden olduğu görülmektedir.

Yapılan testlerde konvansiyonel ısıtma işlemleri sonucu elde edilen sertliklerin, iki ve altı saat bekleme sürelerinde yapılan kriyojenik işlemler sonrasında da arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bir malzemenin aşınma davranışlarını karakterize edebilmek için hacim kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı parametrelerinin etkileri araştırılmalıdır.





**Şekil 7.** Isıl işlemlerin hacim kaybı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the volume loss a)As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

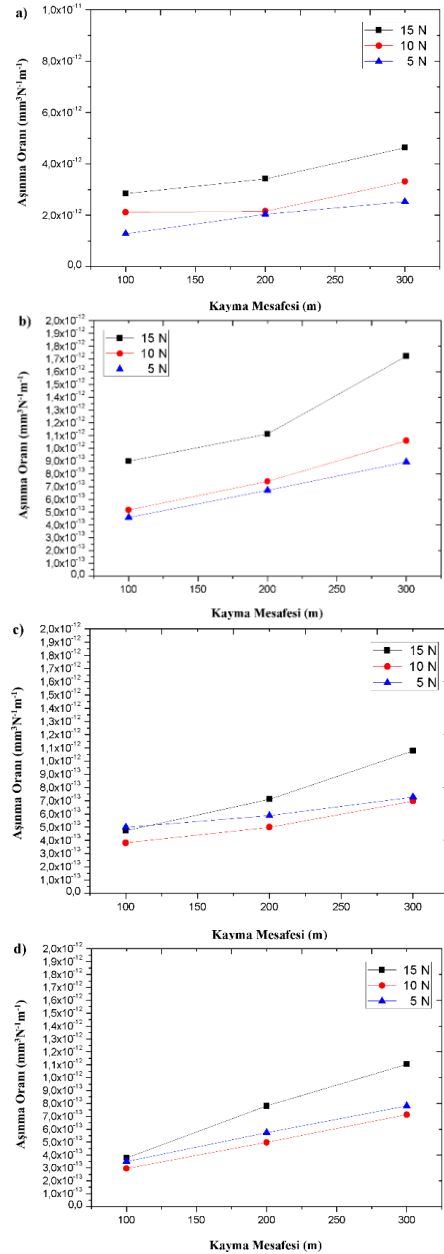
Yukarıda verilmiş olan Şekil 7’de ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak hacim kaybı sonuçları görülmektedir.

Yapılan abrasif aşınma testinde kayma mesafesinin etkileri hacimsel kayıp grafiklerinden net bir şekilde fark edilmektedir. İşlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 200 m kayma mesafesine kadar ki 5 N yük altında hacim kaybı yaklaşık 0,2 mm<sup>3</sup>, 15 N yük altında yaklaşık 1 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gösterirken, 10 N yük altında 0,2 mm<sup>3</sup>’lük bir azalma gözlenmiştir. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yükler altında 200 m kayma mesafesindeki hacim kaybı incelenecek olursa yaklaşık olarak (sırasıyla) 0,1 mm<sup>3</sup>, 0,2 mm<sup>3</sup> ve 0,25 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yükleri altındaki hacim kaybı değerlerinde ise yaklaşık 0,1 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenmiştir. Ayrıca Altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin hacim kaybı yaklaşık (sırasıyla) 0,25 mm<sup>3</sup>, 0,2 mm<sup>3</sup> ve 0,3 mm<sup>3</sup>’lük bir artış görülmüştür.

Benzer şekilde işlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5 N yük altında ve 200-300 m kayma mesafesi aralığında ki hacim kaybında yaklaşık 0,4 mm<sup>3</sup>, 10 ve 15 N yük altında 1 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelerde 5,10 ve 15 N yükleri altında yaklaşık 0,3 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenmektedir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında hacim kaybında yaklaşık 0,1 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenirken, 10 ve 15 N yükleri altında 0,2 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenmektedir. Altı saat

kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5,10 ve 15 N yükleri altında hacim kaybında yaklaşık (sırasıyla) 0,15 mm<sup>3</sup>, 0,2 mm<sup>3</sup> ve 0,3 mm<sup>3</sup>’lük bir artış gözlenmiştir. Şekil 3.2 ‘de görüldüğü üzere uygulanan yükün artmasıyla, hacim kaybının da buna bağlı olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Konvansiyonel ısıl işlem ve kriyojenik işlem uygulanmış deney numunelerinin sertliği yüksek olduğu için aşınma direncini arttırmış ve hacim kaybını azaltıcı bir etki göstermiştir. İşlem görmemiş numuneler ise fazla aşındığı için hacim kaybı daha fazla gerçekleşmiştir.



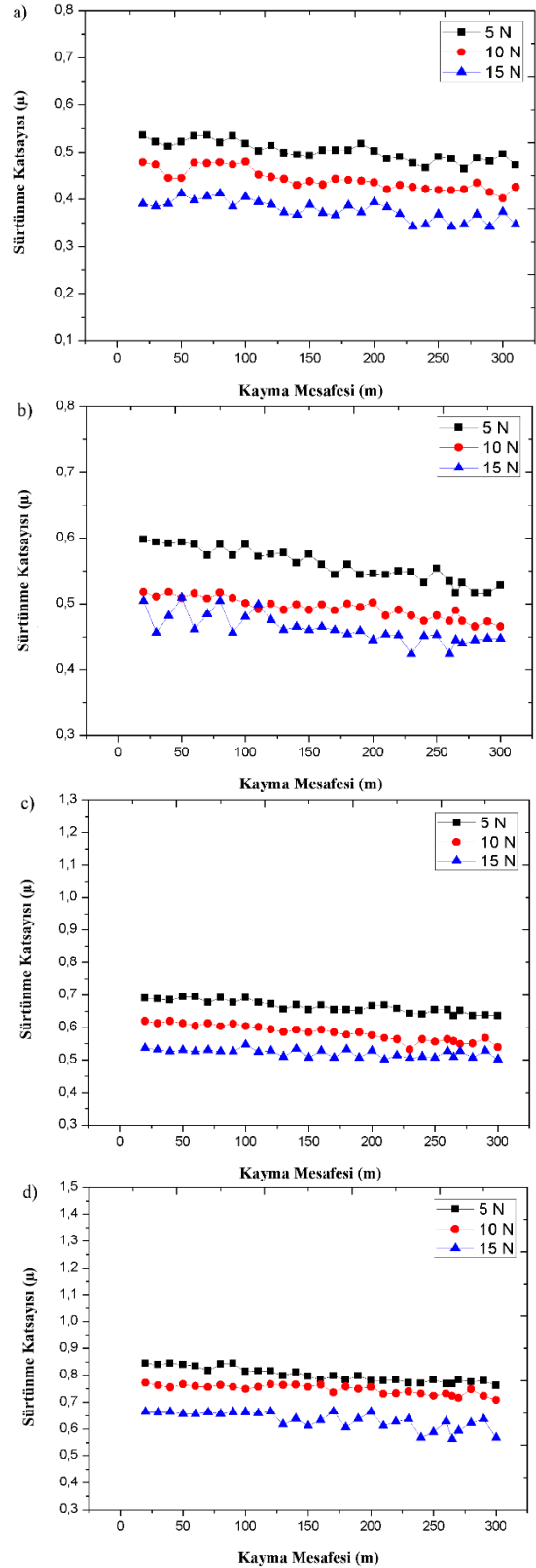
**Şekil 8.** Isıl işlemlerin aşınma oranı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the Wear rate a)As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

Yukarıda verilmiş olan Şekil 8’de ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak aşınma oranı sonuçları görülmektedir.

Yapılan abrasif aşınma testinde kayma mesafesinin etkileri aşınma oranı grafiklerinden net bir şekilde fark edilmektedir. İşlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5,10 ve 15 N yükleri altında 200 m kayma mesafesine kadar ki aşınma oranında yaklaşık  $1 \times 10^{-12}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıtma işlemde 5,10 ve 15 N yük altındaki aşınma oranında yaklaşık  $2 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yük altındaki aşınma oranında yaklaşık olarak (sırasıyla)  $2,5 \times 10^{-13}$ ,  $1,1 \times 10^{-13}$  ve  $0,5 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında aşınma oranında yaklaşık  $3,5 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenirken, 10 ve 15 N yük altında ise  $1,5 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir.

Benzer şekilde işlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5 ve 10 N yük altında ve 200-300 m kayma mesafesi aralığında ki aşınma oranında yaklaşık  $1,5 \times 10^{-12}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> ve 15 N yük altında  $0,5 \times 10^{-12}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıtma işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında yaklaşık  $6 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>, 10 N yük altında yaklaşık  $3 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> ve 15 N yük altında yaklaşık  $2 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında yaklaşık  $4 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>, 10 N yük altında  $2 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> ve 15 N yük altında  $1 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında yaklaşık  $2,5 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>, 10 ve 15 N yük uygulandığında ise yaklaşık  $2 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>’lik bir artış gözlenmiştir.

Deney sonuçlarında görüldüğü üzere genel olarak aşınma oranları, kullanılan zımpara ve uygulanan yüklerin etkisiyle artmıştır. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır. Grafiklerin genelinde görüldüğü üzere en fazla aşınmanın işlem uygulanmamış numunelerde, en az aşınmanın ise altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise numunelerin sertlik değerlerinin ciddi oranlarda artırılmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. İşlem uygulanmamış numunenin sertliği düşük olduğu için en yüksek aşınma sağlanmıştır. Kriyojenik işlem bekletme sürelerinin artmasıyla birlikte aşınma oranlarında azalma meydana geldiği görülmektedir.



**Şekil 9.** Isıtma işlemlerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıtma işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the Wear coefficient a) As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

Yukarıda verilmiş olan Şekil 9’da ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçları görülmektedir.

İşlem uygulanmamış numunelerin en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında 0,35  $\mu$  değerinde olduğu belirlenirken, en yüksek sürtünme katsayısı 5 N yük altında elde edildiği ve 0,53  $\mu$  değerinde olduğu gözlenmiştir.

Konvansiyonel ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında gözlenmiştir ve değeri 0,43  $\mu$ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısı ise 5 N yük altında gerçekleşmiştir ve değeri 0,6  $\mu$ ’dur.

İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında 0,53  $\mu$ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısının 5 N yük altında 0,7  $\mu$  değerinde olduğu belirlenmiştir.

Altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında olduğu gözlenmiştir ve değeri 0,58  $\mu$ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısı 5 N yük altında olduğu belirlenmiş ve değeri 0,85  $\mu$ ’dur.

Tüm grafiklerden elde edilen veriler doğrultusunda aşınmanın minimum sürtünme katsayısına sahip 15 N yük altındaki işlem uygulanmamış numunelerde yüksek olduğu gözlenirken, maksimum sürtünme katsayısının 5 N yük altında altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiş ve en düşük aşınma bu parametrelerde gerçekleşmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere uygulanan yükün artırılmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı ve aşınmanın arttığı görülmüştür. Ayrıca kayma mesafesinin artırılmasıyla sürtünme katsayısı azalmıştır ve buna bağlı olarak aşınma daha rahat bir şekilde gerçekleşmiştir.

Sürtünme katsayısının bir malzemeden parça koparmasını gerekli olan kuvvet ile ilişkilendirebiliriz. Malzeme yüzeyinden parça koparmak kolaylaştıkça sürtünme katsayısı azalırken, parça koparmak zorlaştıkça sürtünme katsayısı artmaktadır. Uygulanan kuvvet arttıkça daha kolay parça kopmaktadır.

Numunelerin konvansiyonel ısıtıl işlemden sonra sertlikleri artmaktadır. Sertlik sürtünme katsayısını artırıcı, aşınma üzerinde ise azaltıcı bir etki gösterir. Aynı şekilde numunelere farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulandığında bekletme süresine bağlı olarak sertliklerde yine artış görülmüştür.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin etkisi; sertlik ve abrazyon aşınma kriterleri açısından değerlendirilmiştir.

Deneyler sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır:

- AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sertliklerinde konvansiyonel ısıtıl işlemden itibaren yüksek oranda artış gerçekleşmiştir.

- En yüksek sertlik altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sağlanmıştır.
- En düşük sertlik işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde görülmüştür.
- Maksimum sürtünme katsayısı 5 N yük altında, altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde elde edilmiştir.
- Minimum sürtünme katsayısı 15 N yük altında, işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde elde edilmiştir.
- En az hacim kaybının altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde gerçekleştiği belirlenmiştir.
- En fazla hacim kaybının işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde gerçekleştiği gözlenmiştir.
- Minimum aşınmaya maruz kalan numunelerin altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numuneler olduğu tespit edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada numunelerin ısıtıl işlem ve kriyojenik işlem operasyonlarının gerçekleştirilmesinde sağladıkları destekten dolayı Alper Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş. ‘ye teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yüksel M., Meran C., ‘‘ Malzeme Bilgisine Giriş’’, Cilt2, AnkaMat Matbaacılık San. Ltd. Şti., Yayın No:MMO/545/2, Ankara 453-460, (2013).
- [2] Ozkeklik, E., ‘‘TiN/TiAlN kaplanmış Sverker21 ile nitrasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox44 malzemelerin aşınma performanslarının karşılaştırılması’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 35, (2013).
- [3] Stratton, P., Ugurtan, M., ‘‘Malzemelerin sıfırlatıl işlemleri’’, BOC Industrial Gases, The Linde Group, İngiltere.
- [4] Jha, A. R., ‘‘Cryogenic technology and applications’’, USA: *Elsevier Academic Press*, 15-20, (2006).
- [5] Timmerhaus, K. D., Reed, R. P. ‘‘Cryogenic engineering’’, Fifty Years of Progress. USA: *Springer*, 20-25, (2007).
- [6] Yamanoglu, O., ‘‘ Soğuk iş takım çeliklerinin aşınma direnci üzerinde kriyojenik işlemin etkisi’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33-59, (2015).
- [7] Das, D., Dutta, A.K., Ray K.K., ‘‘Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Carbide Precipitation and Tribological Behavior of D2 Steel’’, *Materials and Manufacturing Processes*, 22: 474-480, (2007).
- [8] Ovalı, İ., ‘‘Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzeyinde Çil Oluşumu ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi’’, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (201