



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Sığ Kriyojenik İşlemin AISI 410 Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

 Sıtkı AKINCIOĞLU^{a,*}

^aMakine Resim ve Konstrüksiyon Bölümü, Gümüşova MYO, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

*Sorumlu yazar e-posta: sitkiakincioglu@duzce.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.469762

ÖZET

Kriyojenik işlem malzemelere uygulanan ve malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştiren ve geleneksel ısıtma işlemi tamamlayıcı veya geleneksel ısıtma işlemine alternatif ucuz bir ısıtma işlemidir. Malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin, kalıntı östeniti martenzite dönüştürdüğü, daha homojen mikroyapı sağladığı, aşınma direncini, sertlik ve elektrik iletkenliğinde artış sağladığı bilinmektedir. Bu çalışmada sığ kriyojenik işlemin AISI 410 paslanmaz çeliğin mikroyapısına, sertliğine ve elektrik iletkenliğine etkisi araştırılmıştır. Sığ kriyojenik işlem 4 farklı (24, 48, 72 ve 96 saat) bekleme sürelerinde uygulanarak bekleme süresinin etkisi tespit edilmiştir. İşlem görmemiş numuneler (N0) referans alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sığ kriyojenik işlemin AISI 410 paslanmaz çeliğin mikroyapısını düzenleyerek homojen hale getirdiği gözlemlenmiştir. Sığ kriyojenik işlem N4 numunenin sertliğini, N0 numuneye göre yaklaşık %4 arttırmıştır. Ayrıca elektrik iletkenliğinde %300 artış sağlanmıştır. Sertlik ve elektrik iletkenliğine en fazla etki 96 saat bekleme süresinde elde edilmiştir. Genel olarak sığ kriyojenik işlemin, uygun bekleme süresinde, paslanmaz çeliğin sertlik ve elektrik iletkenliğine olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz çelik, Sığ kriyojenik işlem, Mikroyapı

Investigation of the Effect of Shallow Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of 410 Stainless Steel

ABSTRACT

Cryogenic processing is a cheap heat treatment applied to materials and improving the tribological properties of materials and complementing conventional heat treatment. It is known that the cryogenic process applied to the materials transforms the residual austenite martensite, provides a more homogeneous microstructure, provides abrasion resistance, increases the hardness and electrical conductivity. In this study, the effect of shallow cryogenic process on microstructure, hardness and electrical properties of AISI 410 stainless steel was investigated. Shallow cryogenic processing was performed at 4 different waiting times (24, 48, 72 and 96 hours) to determine the effect of waiting time. According to the results, it was observed that the shallow cryogenic process regulated the microstructure of AISI 410 stainless steel and homogenized. The shallow cryogenic process increased the hardness of the sample by about 4%. In addition, the electrical conductivity increased by 300%. The maximum impact on hardness and electrical conductivity was obtained at a waiting time of 96 hours. In general, the shallow cryogenic process has been found to have a positive effect on the hardness and electrical conductivity of the stainless steel in the appropriate waiting time.

Keywords: Stainless steel, Shallow cryogenic treatment, Micro structure

I. GİRİŞ

Kriyojenik işlem malzemelere düşük sıcaklıkta uygulanan bir ısıl işlem türüdür [1]. Kriyojenik işleminde numuneler kontrol ünitesi yardımıyla -80 °C ile -196 °C arasında değişen sıcaklıklarda kademeli olarak ısıtılır ve belirli bir süre bekletildikten sonra tekrar kademeli olarak oda sıcaklığına getirilir [2]. Kriyojenik işlemin -80 °C ile -140 °C arasında uygulanması sığ kriyojenik, -140 °C ile -196°C arasında uygulanması derin kriyojenik işlem olarak adlandırılmaktadır [3]. Kriyojenik işlem için helyum, oksijen, nitrojen (azot), neon gibi çeşitli gazlar kullanılmaktadır [4]. Sıvı nitrojen kriyojenik işlem uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Kriyojenik işlem malzemelerin sertlik, tokluk, aşınma direnci, elektrik iletkenliği gibi birçok özelliklerini iyileştirmektedir [6-9].

Paslanmaz çelikler yüksek korozyon direnci sayesinde genellikle mühendislik malzemesi olarak birçok alanda kullanılır. Ancak düşük aşınma direnci ve zayıf tribolojik davranışları nedeniyle bazı uygulamalarda kullanılmasını kısıtlamaktadır. Bu nedenle paslanmaz çeliklerin özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok işleme tabi tutulmaktadır [10]. Arslan ve Özdemir [11] AISI D3 takım çeliğinden yapılmış DIN 9861 zımbaya yapılan kriyojenik işlemin, zımbanın aşınma davranışına etkileri araştırmıştır. Bu amaçla D3 takım çeliği zımbalar farklı sürelerde -145C°'de kriyojenik işleme tabi tutmuşlardır. Kriyojenik işlemin D3 takım çeliği zımbaların aşınma direncini artırmış olduğu görülmüştür ancak kriyojenik işlem süresi zımba ömrüne önemli bir etki yapmamıştır. Kriyojenik işlemin numunelerin sertlik değerini arttırdığı fakat temperleme işleminin ardından sertlik değerinin azaldığını görmüşlerdir. Güneş ve arkadaşları [12] çalışmalarında derin kriyojenik arıtmanın (DCT) AISI 52100 rulman çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç için, derin kriyojenik sıcaklıklarda (-145 ° C) farklı zamanlarda (12, 24, 36, 48, 60 saat) çeşitli çelik numuneleri tutmuşlardır. Numunelerin DCT bekleme sürelerinin homojen ve yeni küçük karbürlerin oluşmasına katkı sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca numunelerin sertliğini arttırdığını bulmuşlardır. Nas ve Akıncıoğlu [13] çalışmalarında kriyojenik işlem uygulanmış nikel esaslı süper alaşımın elektro erozyon işleme ile işleme performansı araştırmıştır. Bu amaçla ısıl dirençli nikel esaslı süper alaşıma sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Elektrik iletkenliği en yüksek sırasıyla sığ kriyojenik, derin kriyojenik ve işlem görmemiş numunelerde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca kriyojenik işlemlerin sertliğe çok az miktar katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Birçok çalışmada uygulanan malzemenin yapısına göre farklı temperleme işlemleri uygulanmaktadır. Temperleme işleminin sonuçlara bazen olumlu katkısı bazen de önemli katkısının olmadığı anlaşılmaktadır. Baldissera ve ark. [14] AISI 302 çeliğine derin kriyojenik işlem uygulayarak yorulma ve korozyon direnci üzerine etkisini araştırmıştır. Derin kriyojenik işlemin korozyon direnci üzerinde belirgin etkisinin görülmediğini ifade etmişlerdir. Fakat yorulma ömrü üzerine etkisinin olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Myeong ve ark. [15] paslanmaz çeliğe kriyojenik işlem uygulamıştır. İşlem sonrasında yorulma direncinde iyileşme ve ince martenzit yapının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Darwin ve arkadaşları [16] paslanmaz çelik (% 18 Cr içeren SR34) ticari segmanlara maksimum aşınma direnci kazandırmak için numunelere 12, 24 ve 36 saat uygulama sürelerinde kriyojenik işleme tabi tutmuştur. En iyi aşınma direncine 36 saat uygulama süresinde ulaşılar. Kriyojenik işlem uygulama süresinin uygulama ısısından sonra en etkili parametre olduğu sonucuna varmışlardır. Höke ve ark. [17] Kriyojenik soğutma işleminin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelemiştir. Kriyojenik işlemin, mikro sertlik üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Darwin ve ark. [18] martenzitik paslanmaz çeliğe farklı şartlarda derin kriyojenik işlem uygulamıştır. Ayrıca kriyojenik işlemin ardından temperleme işlemi uygulamışlardır. Kriyojenik bekleme süresi, ısı ve soğutma oranları ile temperleme işlemlerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Aşınma direncine en

etkili değişkenin kriyojenik uygulama ısının olduğunu sonucuna ulaşmışlardır. Temperleme işleminin aşınma direnci üzerine sadece %2'lik bir etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir.

Çeliklerle ilgili yapılmış çalışmalar olmasına rağmen AISI 410 paslanmaz çelikle ilgili kriyojenik işlem uygulaması tam olarak incelenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada AISI 410 paslanmaz çeliğin mikroyapı, sertlik ve elektrik iletkenliğine sığ kriyojenik işlemin etkisi araştırılmıştır.

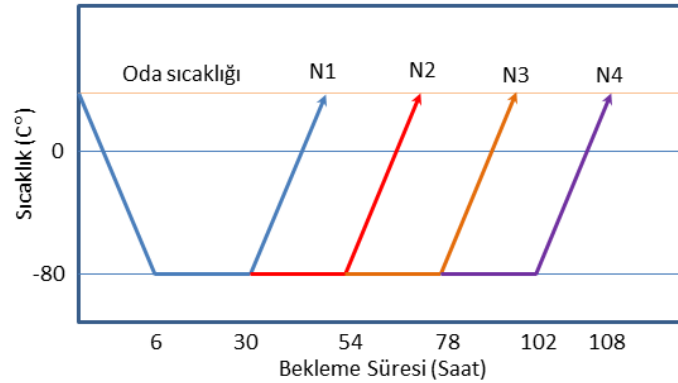
II. MATERYAL METHOD

Sığ kriyojenik işlemin etkisinin araştırıldığı deneylerde Ø10mm x 15mm ebatlarında 410 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kullanılan çelik malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi

Fe	Cr	Mn	Si	C	Diğer
84,384	12,247	0,5	0,2	0,15	-

Deney numunelerine sığ kriyojenik işlem (-80 C°) uygulanmıştır. Kriyojenik sıcaklıkta bekleme sürelerinin çeliğin sertlik, elektrik iletkenliği ve mikroyapısına etkisi araştırılmıştır. Sığ kriyojenik işlem ısıl işlem dolabında uygulanmıştır. Numuneler 6 saatte -80 C°'ye getirilerek sırasıyla 24 (N1), 48 (N2), 72 (N4) ve 96 (N5) saat bekletilmiştir. Kriyojenik işlem sonrasında tekrar oda sıcaklığına 6 saatte getirilmiştir. İşlem uygulanmamış numune N0 olarak adlandırılmıştır. Sığ kriyojenik işlem şeması Şekil 1'de verilmiştir.



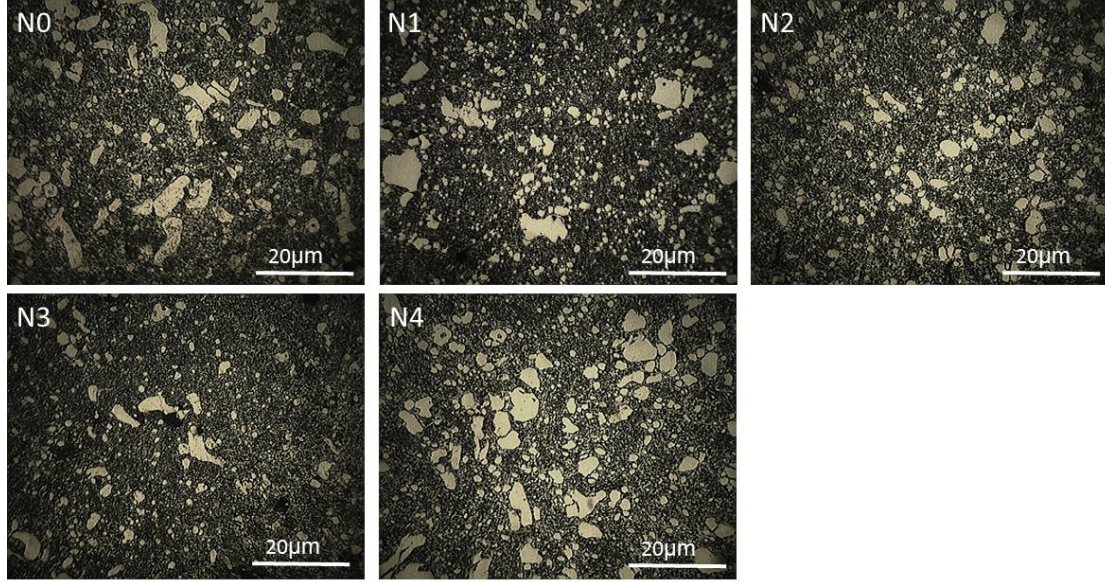
Şekil 1. Sığ kriyojenik işlem süreci

Sığ kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin elektrik iletkenliği ölçümleri Alpha-A High Performance Frequency Analyzer test cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 10kgf yük altında 11 saniyede Rockwell sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Her bir numuneden 10 sertlik ölçümü alınarak değerlerin ortalaması alınmıştır. Kriyojenik işlemin malzemelerin içyapısına etkisini görmek için numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. Numuneler görüntüleme öncesinde %10 nital ile 10 sn dağlanmıştır.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

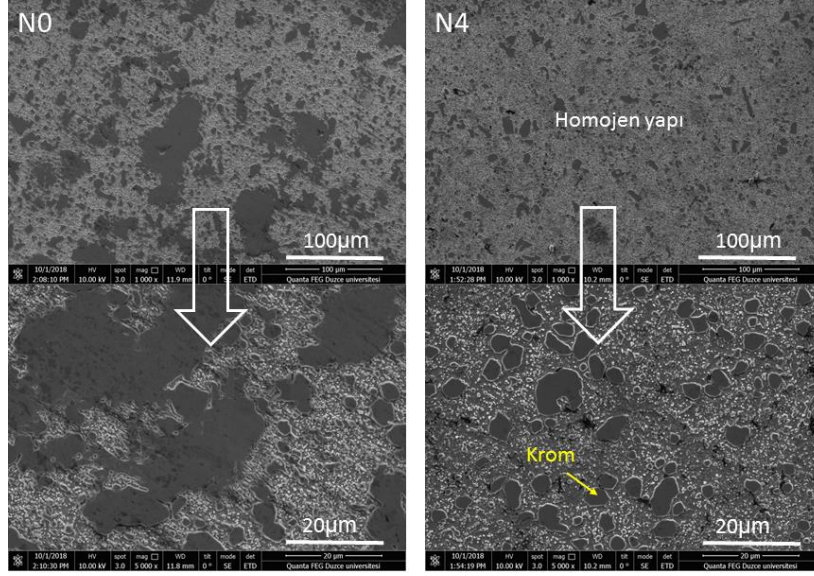
A. MİKRO YAPI

Numunelerin mikroyapısına ait mikroskop görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.



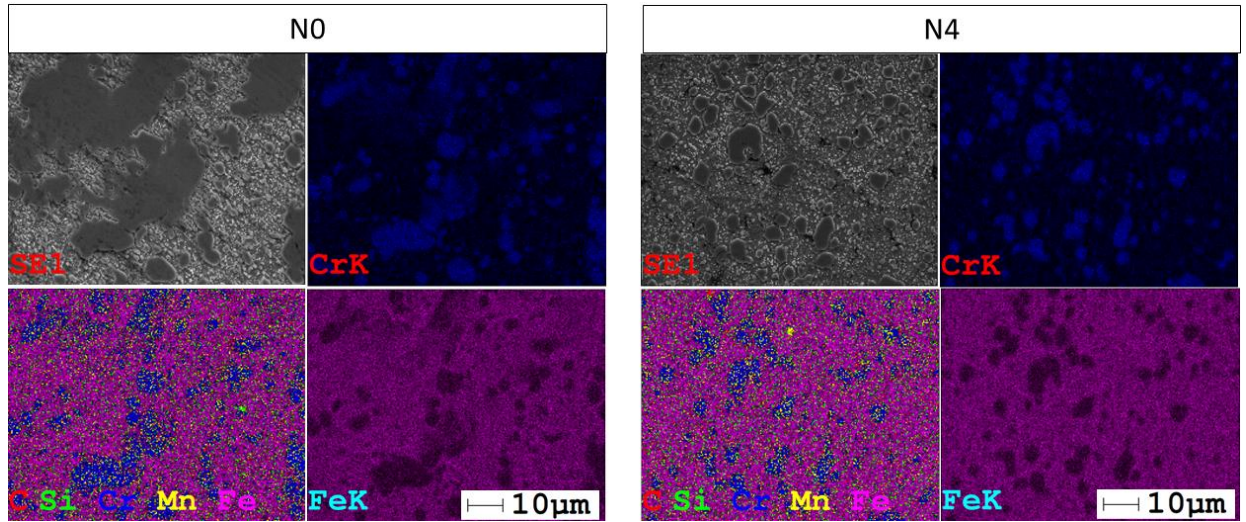
Şekil 2. Sığ kriyojenik işlem süreci

Numunelere ait mikroskop görüntülerine göre uygulanan kriyojenik bekleme sürelerine göre mikroyapının değiştiği görülmektedir. N4 numunede krom elementinin daha yoğun ve düzenli olduğu görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemin yoğunluğu artırıp mikroyapıyı homojenleştirdiği bilinmektedir [8]. Kriyojenik işlem sertlik ve elektrik iletkenliklerine en fazla N4 numunesine etkide bulunmuştur. Diğer numunelerin sertlik ve elektrik iletkenliği gibi sonuçlarında fazla değişim bulunmadığı görülmüştür. Bu nedenle sadece N0 ve N4 numunelerine ait numunelerin mikroyapılarının SEM görüntüleri incelenmiştir. Böylece en fazla etki gösteren 96 dak bekleme süresindeki değişim, işlem görmemiş numune ile kıyaslanmıştır. Sığ kriyojenik işlemin çeliğin mikroyapısına etkisinin incelendiği SEM görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. N0 ve N4 malzemeye ait mikroyapı görüntüleri

Sığ kriyojenik işlem görmüş N4 numunenin, işlem görmemiş (N0) numunenin mikroyapısına göre daha homojen olduğu görülmektedir. Şekil 4'teki numunelere ait element haritası analizi (Mapping) ile mikroyapıdaki elementlerin mikroyapıdaki dağılımları tespit edilmiştir. Element haritası analizinden anlaşılacağı gibi demir ve krom elementlerinin dağılımda belirgin olduğu görülmektedir. Mikroyapıdaki krom elementi işlem görmemiş numunede belli bölgelerde yoğunlaşırken N4 numunede daha homojen dağılmıştır. Yapılan birçok çalışmada kriyojenik işlemin malzemelerin mikroyapısını daha homojen yaptığı belirtilmiştir. Gogte ve ark. [19] AISI T42 numuneye uyguladıkları derin kriyojenik işlemin daha ince boyutlu ve homojen karbür dağılımı sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca sığ kriyojenik işlem ile krom elementinin sınırlarının daha kavisli olduğu görülmüştür.



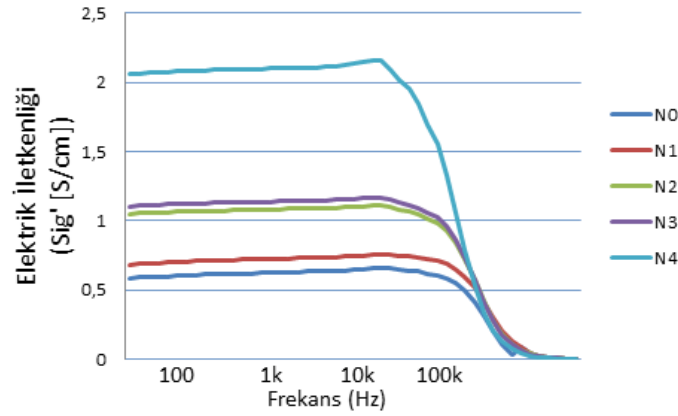
Şekil 4. N0 ve N4 numunelere ait element haritası (EDX- mapping)

Element haritası ile mikroyapıdaki elementlerin yoğunluğu ve dağılımı hakkında bilgi alınmıştır. Element haritasına göre her iki numunede de Fe, Si ve Mn elementlerinin ince yapıda olduğu ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Krom (Cr) elementinin ise 96 saat sığ kriyojenik işleme tabi olmasıyla elde edilen N4 numunede daha homojen ve ince yapıda olduğu görülmektedir. Kriyojenik

işlemin mikroyapıyı homojen yapıya dönüştürdüğü birçok çalışmada belirlenmiştir [6]. N4 numunede krom elementinin boyutları genelde 10 μm 'nin altında olduğu görülmektedir. Fakat N0 numunede kromun boyutları 30 μm 'nin üzerinde ve bazı bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir.

B. ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

Numunelere uygulanan kriyojenik işlemin malzemelerin mikroyapısında meydana gelen değişimler nedeniyle elektrik iletkenliğinin arttığı bildirilmektedir [20]. Wiedemann-Franz kanununa göre katı metallerin ısı iletkenliği ile elektrik iletkenliği (Simens/cm) arasında sabit bir oran vardır [21, 22]. Şekil 5'te kriyojenik bekleme sürelerinin elektrik iletkenliklerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem görmüş numunelerin elektrik iletkenlikleri

Paslanmaz çeliğe uygulanan kriyojenik işlemin ardından ölçülen elektrik iletkenliği incelendiğinde, elektrik iletkenliğine kriyojenik bekleme sürelerinin etki ettiği görülmektedir. 4 gün (96 saat) bekletilen N4 numunesinin elektrik iletkenliği en yüksek ölçülmüştür. İşlem görmemiş numunenin elektrik iletkenliği ortalama 0,5 S/cm iken N4 numunenin elektrik iletkenliği 1,5 S/cm olarak ölçülmüştür. Sığ kriyojenik işlem ile paslanmaz çelik numunenin elektrik iletkenliği yaklaşık %300 artmıştır. Kriyojenik işlem sayesinde çeliklerdeki östenitin martensite dönüştürüldüğü ve daha homojen bir tane yapısı ve homojen çelik oluştuğu bilinmektedir. Bu işlem, düzensiz tane / kristal yapının boşlukları ve zayıflıklarını ortadan kaldırdığı için daha sert ve daha dayanıklı bir malzeme oluşmasını sağlamaktadır [23]. Mikroyapıda meydana gelen daha sıkı yapı ile numunelerin elektrik iletkenliğinin arttığı söylenebilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi işlem görmemiş N0 ile N4 numunelerin mikroyapıları farklılık göstermektedir. N4 numunedeki mikroyapının daha homojen olduğu görülmektedir [24]. N1, N2 ve N3 numunelerinin elektrik iletkenliği sonuçlarında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu durum, sığ kriyojenik işlemin 96 saatlik bekleme sürelerinde elektrik iletkenliğine olumlu katkı sunmadığını göstermektedir.

C. SERTLİK

Sığ kriyojenik işlemin paslanmaz çeliğin sertliğine etkisini tespit etmek için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Malzemelere uygulanan kriyojenik işlem ile takımların sertliğin artırıldığı söylenmektedir [24]. Tablo 2'de sığ kriyojenik işlem uygulanmış 410 paslanmaz çeliğin sertlik değişimi verilmiştir.

Tablo 2. Farklı bekleme sürelerinde sığ kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin sertlikleri

	Sertlik (HRB)				
	N0	N1	N2	N3	N4
Ort.	64,52	65,84	65,92	66,34	67,08

Kriyojenik işlem malzemelerin özelliklerine göre numunelerin sertliklerine farklı katkılar sunmaktadır. Bazı malzemelerin sertliklerinde önemli artışlar sağlanırken bazı malzemelere daha az etki ettiği görülmektedir. En fazla sertlik artışı N4 numunede (%4 artış) 67,08 HRB olarak ölçülmüştür. Elde edilen sertlik değişimi elektrik iletkenliğindeki değişimle doğru orantılıdır. Bu çalışmada sığ kriyojenik işlem bekleme sürelerinin sertlik değişiminde etkili olduğu görülmüştür. En yüksek bekleme süresinde en fazla değişim olmuştur. Düşük bekleme sürelerinde ise belığın bir fark görülmemektedir. Bu sonuç literatürdeki sonuçlarla da örtüşmektedir. Baldissera ve ark. [14] derin kriyojenik işlemin AISI 302 malzemenin yorulma davranışı üzerinde önemli etkisini tespit etmişlerdir. Fakat yaptıkları bu çalışmada, kriyojenik işlemin numunelerin sertliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

IV. SONUÇ

410 paslanmaz çeliğe, farklı bekleme sürelerinde uygulanan sığ kriyojenik işlemin malzemenin mikroyapı ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırıldığı çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir;

- 410 paslanmaz çeliğe uygulanan sığ kriyojenik işlemin mikroyapısını homojenleştirdiği gözlemlenmiştir.
- Sığ kriyojenik işlemin numunelerin sertlik değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. En fazla sertlik artışı N4 numunede (%4 artış) 67,08 HRB olarak ölçülmüştür.
- Elektrik iletkenliğinin sığ kriyojenik işlem ile arttığı tespit edilmiştir. Sığ kriyojenik işlem ile paslanmaz çelik numunenin elektrik iletkenliği yaklaşık %300 artmıştır.
- Paslanmaz çeliğe uygulanan sığ kriyojenik işlemin en fazla bekleme süresi olan 4 gün (96saat) ile sertlik ve elektrik iletkenliğine en fazla katkı sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

V. KAYNAKLAR

- [1] K. Gu, J. Wang, and Y. Zhou, "Effect of cryogenic treatment on wear resistance of Ti-6Al-4V alloy for biomedical applications," *journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 30, pp. 131-139, 2014.
- [2] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, "Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Vacuum*, vol. 86, no. 10, pp. 1534-1540, 2012.
- [3] S. Akıncıoğlu, H. Gökkaya, and İ. Uygur, "The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method," *The*

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 1-4, pp. 303-314, 2016.
- [4] P. Baldissera and C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: a bibliographic review," *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, 2008.
- [5] V. Firouzdor, E. Nejati, and F. Khomamizadeh, "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill," *Journal of materials processing technology*, vol. 206, no. 1-3, pp. 467-472, 2008.
- [6] S. Akincioğlu, H. Gökkaya, and İ. Uygur, "A review of cryogenic treatment on cutting tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, journal article vol. 78, no. 9, pp. 1609-1627, June 01 2015.
- [7] Y. Arslan, I. Uygur, and A. Jazdzewska, "The effect of cryogenic treatment on microstructure and mechanical response of AISI D3 tool steel punches," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 3, p. 034501, 2015.
- [8] A. Çiçek, F. Kara, T. Kivak, and E. Ekici, "Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 41, pp. 461-469, 2013/11/01/ 2013.
- [9] F. Kara, A. Çiçek, and H. Demir, "Multiple Regression and ANN Models for Surface Quality of Cryogenically-Treated AISI, 52100 Bearing Steel," *J. Balkan Tribol. Assoc*, vol. 19, no. 4, pp. 570-584, 2013.
- [10] P. Corengia, G. Ybarra, C. Moina, A. Cabo, and E. Broitman, "Microstructure and corrosion behaviour of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 187, no. 1, pp. 63-69, 2004/10/01/ 2004.
- [11] Y. ARSLAN and A. ÖZDEMİR, "Farklı Sürelerde Kriyojenik İşlem Uygulanmış Aisi D3 Soğuk İş Takım Çeliği Zımbalarda Aşınma Davranışları Ve Takım Ömrü," *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, vol. 2, no. 3, pp. 87-99, 2013.
- [12] I. Gunes, A. Cicek, K. Aslantas, and F. Kara, "Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance of AISI 52100 Bearing Steel," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, journal article vol. 67, no. 6, pp. 909-917, December 01 2014.
- [13] E. NAS and S. AKINCIOĞLU, "Kriyojenik İşlem Görmüş Nikel Esaslı Süper Alaşımın Elektro-Erozyon İşleme Performansı Optimizasyonu," *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 6-1, pp. 1-7, 2019.
- [14] P. Baldissera and C. Delprete, "Deep cryogenic treatment of AISI 302 stainless steel: Part II–Fatigue and corrosion," *Materials & Design*, vol. 31, no. 10, pp. 4731-4737, 2010.
- [15] T. H. Myeong, Y. Yamabayashi, M. Shimojo, and Y. Higo, "A new life extension method for high cycle fatigue using micro-martensitic transformation in an austenitic stainless steel|This work was carried out as a part of the Ph.D. thesis of one of the authors (T.H.M.).1," *International Journal of Fatigue*, vol. 19, no. 93, pp. 69-73, 1997/06/01/ 1997.
- [16] J. Darwin, D. M. Lal, and 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*, vol. 195, no. 1-3, pp. 241-247, 2008.
- [17] H. Gürhan, İ. Şahin, H. Çinici, and T. FINDIK, "Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 25-37, 2014.

- [18] J. D. Darwin, D. Mohan Lal, and 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*, vol. 195, no. 1, pp. 241-247, 2008/01/01/ 2008.
- [19] C. Gogte, K. M. Iyer, R. Paretkar, and D. Peshwe, "Deep subzero processing of metals and alloys: evolution of microstructure of AISI T42 tool steel," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 7-8, pp. 718-722, 2009.
- [20] L. P. Singh and J. Singh, "Effects of cryogenic treatment on the cutting tool durability," *International Journal of Design and Manufacturing Technology (IJDMT)*, vol. 3, no. 1, pp. 11-23, 2012.
- [21] N. S. Kalsi, R. Sehgal, and V. S. Sharma, "Cryogenic treatment of tool materials: a review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 10, pp. 1077-1100, 2010.
- [22] K. S. Bal, "Performance appraisal of cryo-treated tool by turning operation," 2012.
- [23] S. Rout, A. Behera, and S. Mishra, "Assurance of Quality Improvement for Tool Steel by Cryo-processing," 2012.
- [24] M. Dogra, V. S. Sharma, A. Sachdeva, N. M. Suri, and J. S. Dureja, "Performance evaluation of CBN, coated carbide, cryogenically treated uncoated/coated carbide inserts in finish-turning of hardened steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 5-8, pp. 541-553, 2011.