



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derin Kriyojenik İşlemin Farklı Bekletme Sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) Çeliğın Mekanik Özelliklerine Etkisi

Menderes KAM^{a,*}, Hamit SARUHAN^b

^a Makine ve Metal Tek. Bölümü, Dr. Engin PAK Cumayeri MYO, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliğı Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mendereskam@duzce.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan AISI 4140 (42CrMo4) çeliğının mekanik özellikleri üzerinde farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan AISI 4140 çeliğinden imal edilen numunelere geleneksel ısıt işlem uygulanmış ve geleneksel ısıt işlemi tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) - 140 °C sıcaklıkta uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasında numunelere 200 °C' de temperleme işlemi uygulanmıştır. AISI 4140 çeliğın mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için sertlik ölçüm ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen bulgular analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin ve derin kriyojenik işlem sonrası uygulanan temperleme işleminin AISI 4140 çeliğın mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Derin kriyojenik işlemlili numunelerde önemli sertlik artışları ve çekme dayanımlarında kayda değer iyileşmeler olmuştur. Ayrıca, mekanik özelliklere etkisi yönünden derin kriyojenik işlemin en uygun bekletme süresinin 36 saat olduğu tespit edilmiştir. Derin kriyojenik işlemlili numunelerin çekme dayanımlarında yaklaşık % 10 ve sertlik değerlerinde ise yaklaşık % 5 iyileşme olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Derin kriyojenik işlem, Mekanik özellikler, Sertlik.

The Effect of Deep Cryogenic Treatment with Different Holding Times on the Mechanical Properties of AISI 4140 (42CrMo4) Steel

ABSTRACT

In this study, the effect of Deep Cryogenic Treatment with different holding times on the mechanical properties of AISI 4140 steel was investigated. For this purpose; AISI 4140 steel samples were subjected to quenched treatment, deep cryogenic treatment and deep cryogenic treatment - tempering. The samples were cooled down from room temperature to -140 °C and holded for different holding times (12, 24, 36 and 48 hours) for the deep cryogenic treatment. The tensile and hardness tests were performed to investigate the effect on the mechanical

properties of the AISI 4140 steel. The results showed that different holding times of Deep Cryogenic Treatment have significant effect on the mechanical properties of AISI 4140 steel. Deep Cryogenic Treatment was shown to have a positive effect on the hardness. It was also found that the optimum holding time of the deep cryogenic treatment was 36 hours. The results showed that tensile strength was found to improve about 10 % and hardness value about 5 %.

Keywords: AISI 4140, Deep cryogenic treatment, Mechanical properties, Hardness.

I. GİRİŞ

Makine parçalarının imalatında uygun malzeme seçimi ve bu malzemelere uygulanan ısı işlemler büyük önem arz etmektedir. Makine parçalarının imalatında kullanılan ıslah çeliklerinden olan AISI 4140 (42CrMo4) çeliği özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-2]. Bu çeliğe uygulanan ısı işlemler sayesinde kazandığı mekanik özelliklerden dolayı krank mili, aks mili, yivli mil, cıvata, somun, saplama, dişli çark, piston kolları, soğuk çekme mil, yaylar ve fren halka ve kolları gibi birçok makine elemanlarının imalatında kullanılmaktadır [3-6]. Çelik malzemelere uygulanan ısı işlemlerle malzemelere çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür. Bu bağlamda, soğuk (sıfır altı) işlem yöntemi olan kriyojenik işlem, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan geleneksel ısı işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. Bu işlem, malzeme üzerindeki uygulama sıcaklıklarına bağlı olarak sıg kriyojenik ve derin kriyojenik işlem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıg kriyojenik işlem, su verme işleminden sonra -50 °C ile -80 °C arasında malzemenin sıvı azot veya nitrojen gazında bekletilme işlemidir. Derin kriyojenik işlem ise -125°C' den daha düşük sıcaklıklarda genelde -196 °C' ye kadar malzemelerin soğutulma ve bu sıcaklıklarda bekletilme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda genellikle -125 °C ve -196 °C aralığında derin kriyojenik işlem ile yapının tamamının martenzite dönüştürülmesi sağlanır. Bu sayede sertlikten feragat etmeden tokluğu artırmakta mümkün olur. Kriyojenik işlem, kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü olumlu yönde etkileyen ve bir defa olmak üzere yapılan kalıcı bir işlem türüdür [7-8].

Literatürde derin kriyojenik işlemin çelik malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde etkisi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [9-12]. Ancak derin kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde etkisi ve özellikle bekletme sürelerinin etkisi ile ilgili çok az çalışma vardır. AISI 4140 çeliği için yapılan çalışmalarda farklı bekletme sürelerinin mekanik özelliklere etkisi göz önüne alınmamıştır. Yapılan çalışmalarda Höke ve ark. [6] kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğin mekanik özelliklere etkisini deneysel olarak incelemek amacıyla numunelere -140 °C sıcaklıkta sadece 24 saat bekletme süreli kriyojenik işlem uygulamış, sertlik ölçüm ve çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik işlemin, sertlik üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu ve numunelerde tokluğun arttığını görmüşlerdir. Senthilkumar ve ark. [10] AISI 4140 çeliğin kalıntı gerilme durumu üzerine derin kriyojenik işlemin etkisini incelemişlerdir. Su verme ve temperleme işlemi arasında sıg kriyojenik işlem (- 80°C' de 5 saat) ve derin kriyojenik işlem (-196°C' de 24 saat) olmak üzere iki farklı soğutma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettiği sonuçlarda kriyojenik işlem sıcaklığındaki azalmanın daha fazla östenitin martenzite yol açtığını görmüşlerdir. Zhirafar ve ark. [12] kriyojenik işlemin AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde etkilerini araştırmışlar ve farklı ısı işlemleri numunelerde yorulma, darbe, kırılma ve sertlik gibi mekanik deneyler yaparak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda geleneksel ısı işlem uygulanan numunelerin tokluğu

daha düşük iken, sertlik ve yorulma dayanımının ise biraz daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminden sonra çeliğin yorulma sınırının iyileştiği yönünde buldukları sonucu malzemenin yüksek sertliği ve mukavemeti ile ilişkilendirmişlerdir. Baldissera ve Delprete [13] çeliğin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini sertlik ve çekme testleri aracılığıyla araştırmışlardır. Derin kriyojenik işlem ve temperleme işleminin sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Kriyojenik işlemler numunelerin önemli sertlik artışı ile kayda değer çekme dayanımı artışı olduğunu tespit etmişlerdir. Koneshlou ve ark. [14] AISI H13 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde kriyojenik işlemin etkisini incelemek amacıyla malzemeye -72 °C' de sığ kriyojenik işlem ve -196 °C' de derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. İşlem sonucunda malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martenzite dönüştüğünü ve kriyojenik işlem ile çeliğin mekanik özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağladığını tespit etmişlerdir. Dixit ve ark. [15] D5 takım çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin sertlik ve aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Geleneksel ısıtılmış numunelere derin kriyojenik işlemden (-185 °C' de 36 saat) önce ve sonra bir, iki ve üç defa olmak üzere temperleme işlemi uygulamışlardır. Kriyojenik işlemler numuneler geleneksel ısıtılmış numunelere göre daha iyi mekanik performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu durumu kriyojenik işlem ile kalıntı östenit miktarındaki azalmaya ve sonrasında aşınma direncinin ve sertliğin iyileşmesi ile ilişkilendirmişlerdir. Derin kriyojenik işlem uygulamasında önce bir kez temperleme işlemi uygulanan numunede sertlik ve aşınma oranı açısından en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Podgornik ve ark. [16] takım çeliklerinin farklı bekletme sürelerinde (25 ve 40 saat) derin kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kriyojenik işlem ile birlikte daha yüksek sertlik ve daha düşük kırılma tokluğu elde etmiştir. Mekanik özellikler açısından 40 saat bekletme süreli kriyojenik işlemler numunelerde 25 saat bekletilen kriyojenik işlemler numunelere göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Güneş ve ark. [17] AISI 52100 rulman çeliğinin aşınma direnci üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini araştırmak için numunelere farklı bekletme süreli (12, 24, 36, 48 ve 60 saat) - 145 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Optimum bekletme süresinin 36 saat olduğunu, 36 saat bekletme süreli numunelerde sertliğin en yüksek değerde olduğunu ve ayrıca aşınma oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Senthilkumar ve ark. [18] En 8 çeliğinin indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve numunelere derin kriyojenik işlemi 24 saat bekletme süresinde - 196 °C sıcaklıkta uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, derin kriyojenik işlemi geleneksel yüzey sertleştirme işlemi ile karşılaştırmışlar ve çeliğin mukavemetini % 39,94 artırdığını ve derin kriyojenik işlemin çeliğin dayanımında bir artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Zare ve ark. [19] derin kriyojenik işlem uygulamasında bekletme süresinin sertliğe etkisini incelemişlerdir. Li ve ark. [20] paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri üzerinde kriyojenik işlemin etkisini incelemişler ve uygulanan işlemin numunelerin sertliğini artırırken tokluğunu düşürdüğü yönünde sonuç elde etmişlerdir. İdayan ve ark. [21] AISI 440C çeliğin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve derin kriyojenik işlemin geleneksel ısıtılmış işleme göre numunelerin sertliğini % 7 oranında artırdığı yönünde sonuç elde etmişlerdir. Khun ve ark. [22] AISI D3 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemişler ve derin kriyojenik işlemin çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve sertliğini önemli derecede artırdığını tespit etmişlerdir.

Literatürde birçok araştırmacı, kriyojenik işlemin çeliğin mekanik özelliklerine etkisi üzerinde çalışma yapmış, derin kriyojenik işlemin mekanik özellikleri iyileştirdiği ve özellikle aşınma direncini ve sertliğini önemli derecede artırdığını tespit etmişlerdir [17-24]. Kriyojenik işlemin çeliğin mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili daha detaylı bilgi için literatürde yapılan çalışmalara [6-33] bakılabilir.

Bu çalışmada çeşitli makine elemanlarında özellikle otomotiv parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisi incelenmiştir. AISI 4140 çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme

testleri ve sertlik ölçüm testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucu elde edilen bulgular analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

AISI 4140 çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir. AISI 4140 çeliğin en önemli özelliği, içerdiği Cr ve Mo alaşım elementleri sayesinde, su verme işlemi sonrasında sert martenzitik bir yapı oluşturabilmesi, mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerin bir arada bulunmasına imkân vermesidir.

Tablo 1. AISI 4140 Çeliğin kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
(%)	0,39	0,27	0,74	0,008	0,01	1,06	0,2	0,03

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinden çekme ve sertlik testi numuneleri hazırlanmıştır. Tablo 2’de AISI 4140 çeliği numunelerin ısıl işlem süreçleri ve durumları verilmiştir. Bu numunelerden, bir nolu numune standart (S) olarak kullanılmakta olup ek olarak herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Diğer numunelere ise ilk önce geleneksel ısıl işlem (CHT - Conventional Heat Treatment) uygulanarak istenilen sertlik değerine getirilmiştir. Geleneksel ısıl işlem; ilk olarak atmosfer kontrollü fırında 420 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak ön ısıtma, 850 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak östenitleme işlemi ve 70 °C yağda su verme işlemi ile sertleştirilen numuneler, 320 °C sıcaklıkta 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan üç nolu ve yedi nolu numunelere, geleneksel ısıl işlemi tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem (DCT12 - Deep Cryogenic Treatment) - 140 °C’de 12 saat süre uygulanmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan dört nolu ve sekiz nolu numunelere, derin kriyojenik işlem -140 °C’de 24 saat süre (DCT24) uygulanmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan beş nolu ve dokuz nolu numunelere, derin kriyojenik işlem -140 °C’de 36 saat süre (DCT36) uygulanmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan beş nolu ve on nolu numunelere, derin kriyojenik işlem -140 °C’de 48 saat süre (DCT48) uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasında yedi nolu (DCTT12), sekiz nolu (DCTT24), dokuz nolu (DCTT36), ve on nolu (DCTT48) numunelere ise 200 °C’de 2 saat temperleme işlemi (DCTT - Deep Cryogenic Treatment and Tempering) uygulanmıştır.

AISI 4140 çeliğinden imal edilen numunelere derin kriyojenik işlemin uygulandığı kriyojenik işlem fırını Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekilde görülen kriyojenik işlem fırınında numunelere farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlem - 140 °C’ de uygulanmıştır.



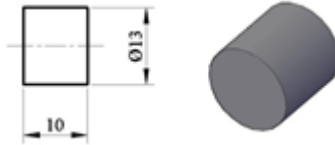
Şekil 1. Kriyojenik işlem fırını

Tablo 2. AISI 4140 çeliği numunelerin ısıtım işlem süreci

No	Numune Kodu	Standart	Uygulanan Isıtım İşlemler	
1	S	STANDART	-	-
2	CHT	CHT	-	-
3	DCT12	CHT	DCT (12 saat)	-
4	DCT24	CHT	DCT (24 saat)	-
5	DCT36	CHT	DCT (36 saat)	-
6	DCT48	CHT	DCT (48 saat)	-
7	DCTT12	CHT	DCT (12 saat)	Temperleme (2 saat)
8	DCTT24	CHT	DCT (24 saat)	Temperleme (2 saat)
9	DCTT36	CHT	DCT (36 saat)	Temperleme (2 saat)
10	DCTT48	CHT	DCT (48 saat)	Temperleme (2 saat)

Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan sertlik ölçme testleri diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunun nedeni bu yöntemin basit oluşu, kolay uygulanabilir olması ve diğer testlere göre numuneler üzerinde daha az hasar oluşturmasıdır. Ayrıca, bir malzemenin sertliği hakkında bilgi sahibi olduğunda bu malzemenin diğer mekanik özellikleri (tokluk, akma dayanımı gibi) hakkında ayrıntılı değerlendirme yapılabilir.

Derin kriyojenik işlem uygulanan AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde farklı bekleme sürelerinin etkisini incelemek amacıyla 13 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda hazırlanan sertlik ölçme numunelerine geleneksel ısıtım işlem, derin kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem sonrasında temperleme işlemi uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri, Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu'nda bulunan sertlik ölçme cihazında Rockwell (HRC) sertlik ölçme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm sonuçları en az dokuz sertlik ölçümünün ortalamasını yansıtmaktadır. Şekil 2 'de sertlik ölçme test numunelerinin boyutları verilmiş ve Şekil 3'de ise sertlik ölçme cihazı gösterilmiştir.



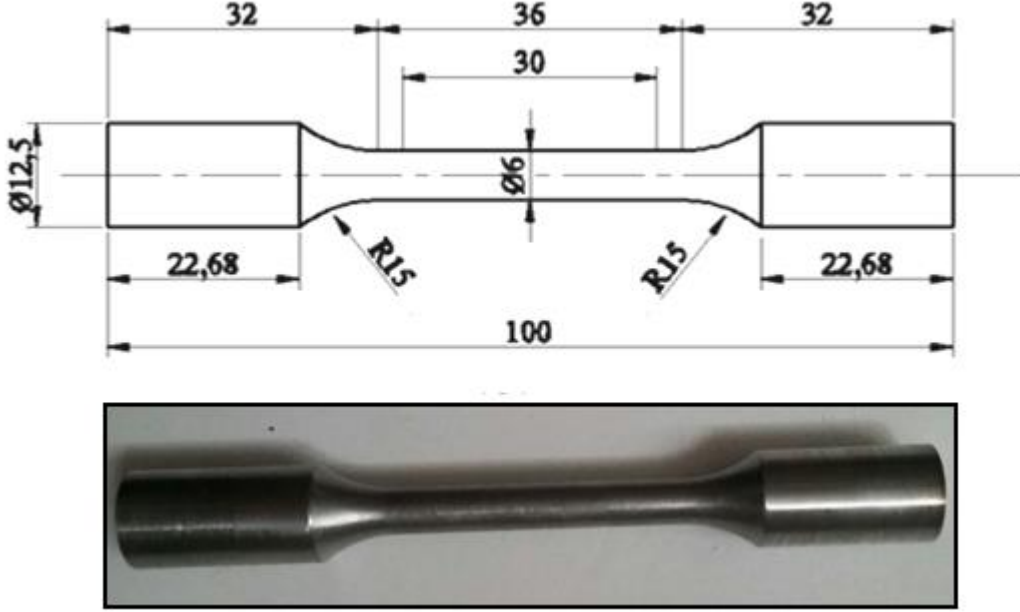
Şekil 2. Sertlik ölçme numuneleri



Şekil 3. Rockwell sertlik ölçme cihazı (HRC)

Çekme testleri uygulamaları için TS 138-A normuna göre Şekil 4'te verilen ölçülerde 30 adet numune göre hazırlanmıştır. Çekme testlerinde çekme hızı 2 mm/dakika olarak alınmıştır. Çekme testleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT)

bünyesinde bulunan alt tarafı 40 ton ve üst tarafı 20 ton kapasiteli çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



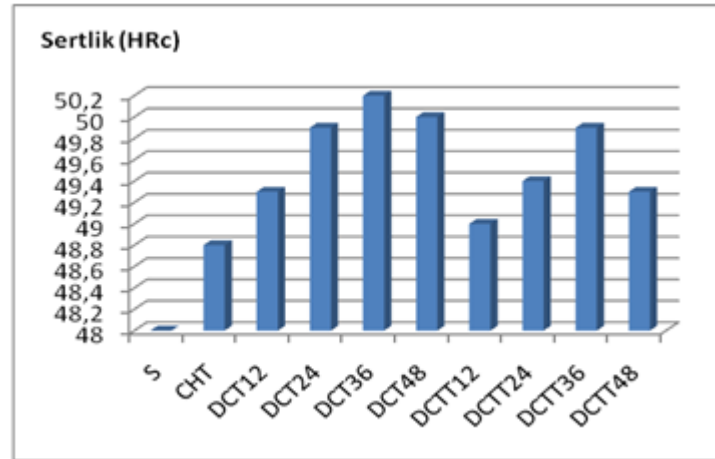
Şekil 4. Çekme testi numunesi



Şekil 5. Çekme test cihazı

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, test numunelerine geleneksel ısı işlem, farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlem ve son olarak temperleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında numunelerin Rockwell (HRC) sertlik ölçme cihazında (Şekil 3) sertlik ölçüm testleri yapılmıştır. AISI 4140 çeliği numunelerinin ısı işlem durumuna göre sertlik değerlerindeki değişim Şekil 6’da verilmiştir. Sertlik değerlerine baktığımızda sırasıyla en yüksek değerler DCT36, DCT48, DCTT36, DCT24, DCTT24, DCTT48, DCT12, DCTT12, CHT ve S olduğu görülmektedir. DCT36 ve DCT48 numunelerinde en yüksek sertlik değerlerinin bulunmasının nedeni, derin kriyojenik işlemle birlikte AISI 4140 çeliğinin iç yapısında bulunan yumuşak bir yapıya sahip olan östenit fazının sert bir yapıya sahip olan martenzit fazına dönüşmesi sonucu daha gevrek bir yapının oluşmasına bağlanmıştır [7, 10, 12]. DCTT12, DCTT24, DCTT36 ve DCTT48 numunelerinde ise temperleme işlemi sonucunda numunelerin sertlik değerleri düşmüştür. Elde edilen sertlik bulguları literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında eşdeğerlik göstermiştir. Derin kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında en yüksek sertlik değeri DCT36 numunesi ile elde edilmiştir. Bu durum, derin kriyojenik işlemle birlikte malzemenin mikro yapısında gerçekleşen östenit martenzit dönüşümünün diğer DCT numunelerine göre DCT36 numunesinde daha yüksek oranda gerçekleşmesi ile ilişkilendirilmiştir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda [25, 26] yüksek sertlik değerlerinin 36 saat bekletme sonucunda elde edildiği bilinmektedir.



Şekil 6. Numunelerin sertlik değerlerindeki değişim

Kriyojenik işlemden sonra sertlikteki artış, kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, 36 saat bekletme süreli DCT36 numunesinin sertliğinin daha yüksek değerde bulunması bu numunedeki kalıntı östenit hacim oranının diğer numunelere göre daha düşük olmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte 36 saat bekletme süreli yapılan derin kriyojenik işlem ile sertlik artışına sebep olan daha ince karbürlerin çökmesine bağlanmıştır [25, 27]. Tablo 3’te farklı türden malzemelerin derin kriyojenik işlem ile sertlikteki maksimum iyileşmeleri görülmektedir. Derin kriyojenik işlemin malzemelerin sertliğinde olumlu iyileşmeler sağladığı yapılan literatür çalışmaları ile doğrulanmıştır.

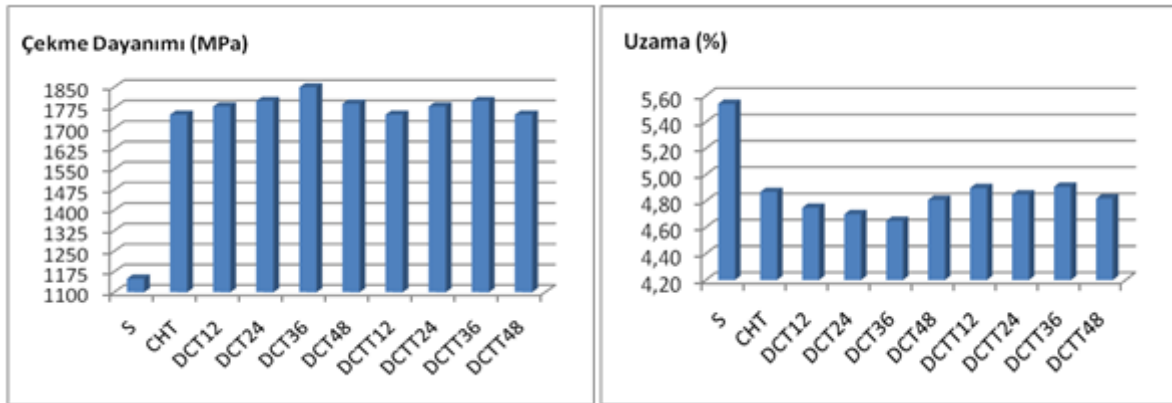
Tablo 3. Derin kriyojenik işlemin sertlik değerlerine etkisi

Literatür	Malzeme	Maksimum sertlik artışı (%)
Senthilkumar ve ark. 2011	AISI 4140	+ 10 (HRC)

Molinari ve ark. 2001	AISI H13	+ 6,9 (HRc)
Pellizzari ve ark. 2001	AISI H13	+ 6,9 (HRc)
Singh ve ark. 2012	AISI M2	+ 9,2 (HRc)
Yun ve ark. 1998	AISI T1	+ 2,8 (HRc)
Zhirafar ve ark. 2007	AISI 4340	+ 2,4 (HRc)

AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin bekletme sürelerinin etkisini belirlemek amacıyla farklı işlemlenmiş numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri her farklı numune için üç kez tekrarlanmış ve çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre numunelere ait maksimum çekme dayanımı değerleri ve yüzde uzama değerleri Şekil 7’de gösterilmiştir.

Elde edilen çekme dayanımı sonuçlarına göre sırasıyla en yüksek değerler DCT36, DCTT36, DCT24, DCT48 numunelerinde olduğu görülmektedir. Standart ve geleneksel ısıl işlem görmüş numuneler ile karşılaştığımızda, derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin çekme dayanımları daha yüksek değerlerde çıkmıştır. Burada en yüksek çekme dayanımı değerlerinin DCT numunelerinde olmasının nedeni, derin kriyojenik işlemle birlikte AISI 4140 çeliğinin iç yapısında bulunan yumuşak bir yapıya sahip olan östenit fazının sert bir yapıya sahip olan martenzit fazına dönüşmesi, karbür tanelerinin daha düzenli dağılması, daha gevrek bir yapının oluşması ve tokluğun azalmasıdır [12], [30]. Bu durum önce sertliğin artması sonrasında ise çekme dayanımlarının belirli oranlarda S ve CHT numunelerinden daha yüksek değerlerde çıkması ile sonuçlanmıştır. Derin kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında en yüksek çekme dayanımı değerleri DCT36 numunesi ile elde edilmiştir. Bu sonuç, derin kriyojenik işlemle birlikte malzemenin mikro yapısında gerçekleşen östenit martenzit dönüşümünün diğer DCT numunelerine göre DCT36 numunesinde daha yüksek oranda gerçekleşmesi olduğu tahmin edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemden sonra mekanik özelliklerin iyileştiği saptanmıştır. Bensely ve ark. [30] yaptıkları çalışmada, En353 çeliğinden elde edilen -196°C’ de 24 saat derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin çekme dayanımlarında % 9,34 oranında bir iyileşme tespit etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen çekme testi sonuçlarının literatür sonuçları ile benzer sonuçlar gösterdiği görülmüştür.



Şekil 7. Numunelerin maksimum çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri

Şekil 7’de verilen yüzde uzama değerleri incelendiğinde en düşük değerlerin sırasıyla DCT36, DCT24, DCT12 ve DCT48 numunelerinde olduğu görülmektedir. Uzama değerlerinin çekme

dayanımlarına göre ters orantılı olarak değişim göstermiş olduğu görülmüştür. Bu durum malzemelerin gevrek veya sünek olma durumuna bağlıdır. S numunesi diğer numunelere göre sünek bir yapıya sahip olduğu için diğer DCT numunelerine göre daha fazla uzama yapmış ve daha düşük dayanım değerinde kopmuştur. Ancak DCT48 numunesi daha fazla uzama göstermiştir. Çelik malzemeler daha düşük sıcaklıklarda daha gevrek bir yapı eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Derin kriyojenik işlemten dolayı sertliği artan DCT numuneleri daha gevrek bir yapıya sahip oldukları için daha büyük dayanım değerlerinde kopmuşlardır ve bu durumla ters orantılı olarak daha az miktarlarda uzamaya maruz kalmışlardır.

Bu sonuçlar derin kriyojenik işlemin metalik malzemelerin çekme davranışı üzerine yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermiştir. Xiong ve ark. [31], kriyojenik işlem ile çeliğin maksimum çekme dayanımı ve uzama değerlerinde sırasıyla % 38, % 57 ve % 280 oranlarında iyileşmeler elde etmişlerdir. Benzer şekilde Baldissera ve Delprete [32], çeliğe uygulanan derin kriyojenik işlem ile maksimum çekme dayanımında % 11 oranında iyileşme elde etmişlerdir [32]. Yapılan çalışmalarda mekanik özelliklerdeki iyileşmeler, kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir.

IV. SONUÇ

AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisi incelenmiştir. AISI 4140 çeliğine geleneksel ısıtma işlemi (CHT), derin kriyojenik işlem (DCT) farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) ve derin kriyojenik işlem sonrasında temperleme işlemi (DCTT) uygulanmıştır. Bu numunelere çekme testleri ve sertlik ölçme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, AISI 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerinde farklı bekletme süreli uygulanan derin kriyojenik işlemin ve temperleme işleminin önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Derin kriyojenik işlemin, belirli oranlarda sertliği arttırdığı görülmüştür. Derin kriyojenik işlemlenmiş numunelerde bekletme süreleri ile orantılı olarak sertlik artışları olmuştur. En yüksek sertlik artışı DCT36 numunesinde elde edilmiştir. Çekme dayanımlarında ise maksimum çekme dayanımı DCT36 numunesinde görülmüştür. Derin kriyojenik işlemlenmiş numunelerde önemli sertlik artışları ve çekme dayanımlarında kayda değer iyileşmeler olmuştur. Ayrıca, mekanik özelliklere etkisi yönünden derin kriyojenik işlemin en uygun bekletme süresinin 36 saat olduğu tespit edilmiştir. Derin kriyojenik işlemlenmiş numunelerin çekme dayanımlarında yaklaşık % 10 ve sertlik değerlerinde ise yaklaşık % 5 iyileşme olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje no: BAP-2015.06.05.351.) tarafından desteklenmiştir. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu'nda (UMAS2017) sunulmuştur.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Kam, "Kriyojenik işlem görmüş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi," Doktora tezi, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2016.
- [2] Kam, M. H. Saruhan ve F. Kara. "Isıl işlem görmüş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi." *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, s.1, ss. 80-90, 2016.

- [3] M. Kam, H. Saruhan ve T. Guney, “Kriyojenik işlem ve sıcak dövme işlemi uygulanmış millerin deneysel titreşim analizi,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, s. 3, ss. 21-30, 2016.
- [4] M. Kam ve H. Saruhan, “Kriyojenik işlem görmüş millerin titreşim analizi,” 1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı, Afyon, 2016, ss. 1207-1213.
- [5] B. Pekgöz, S. Sarıdemir, İ. Uygur ve Y. Aslan, “Sementasyon işleminin farklı çeliklerin mikroyapı ve sertlik değerlerine etkileri,” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 10, s. 1, ss. 19-24, 2013.
- [6] G. Höke, Şahin, İ. Ç. Henifi ve T. Fındık, “Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi,” *Teknik-Online Dergi*, c. 13, s. 2, ss. 25-37, 2014.
- [7] F. Kara, “AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması,” Doktora tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.
- [8] 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.
- [9] D.Senthilkumar, I. Rajendran, “Optimization of deep cryogenic treatment to reduce wear loss of 4140 steel,” *Mater. Manuf. Process.*, Vol. 27, No.5, pp. 567-572, 2012.
- [10] D. Senthilkumar, I. Rajendran, M. Pellizzari and J. Siirainen, “Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 211, No. 3, pp. 396-401, 2011.
- [11] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan and A. Kalanidhi, “Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels,” *Cryogenics*, Vol. 41, No. 3, pp. 149-155, 2001.
- [12] S. Zhirafar, A. Rezaeian, and M. Pugh, “Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 298-303, 2007.
- [13] P. Baldissera, and C. Delprete., “Deep cryogenic treatment: a bibliographic review” *The Open Mechanical Engineering Journal*, Vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [14] M. Koneshlou, K. Meshinchi and F. Khomamizadeh, “Effect of cryogenic treatment on microstructure mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel” *Cryogenics*, Vol. 51, No. 1, pp. 55-61, 2011.
- [15] S. S. Dixit, S. R. Nimbalkar and R. R. Kharde, “Dry sliding wear analysis of D5 tool steel at different heat treatments,” *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 2, No.5, pp. 16-26, 2013.
- [16] B. Podgornik, F. Majdic, V. Leskovsek and J. Vizinti, “Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding,” *Wear*, Vol. 288, pp. 88-93, 2012.

- [17] 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*, Vol. 67, No. 6, pp. 909-917, 2014.
- [18] D. Senthilkumar, “Effect of deep cryogenic treatment on residual stress and mechanical behaviour of induction hardened En 8 steel,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 1, pp. 10, 2016.
- [19] A. Zare, H. Mansouri and S. R. Hosseini, “Influence of the holding time of the deep cryogenic treatment on the strain hardening behavior of HY-TUF steel,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-9, 2015.
- [20] S. Li, X. Yuan, W. Jiang, H. Sun, J. Li, K. Zhao and M. Yang, “Effects of heat treatment influencing factors on microstructure and mechanical properties of a low-carbon martensitic stainless bearing steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 605, pp. 229-235, 2014.
- [21] A. Idayan, A. Gnanavelbabu and K. Rajkumar, “Influence of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of AISI 440C bearing steel,” *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 1683-1691, 2014.
- [22] N. W. Khun, E. Liu, A. W. Y. Tan, D. Senthilkumar, B. Albert and D. M. Lal, “Effects of deep cryogenic treatment on mechanical and tribological properties of AISI D3 tool steel,” *Friction*, Vol. 3, No. 3, pp. 234-242, 2015.
- [23] H. Li, W. Tong, J. Cui, H. Zhang, L. Chen and L. Zuo, “The influence of deep cryogenic treatment on the properties of high-vanadium alloy steel,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 662, pp. 356-362, 2016.
- [24] K. Amini, A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, “Investigating the effect of quench environment and deep cryogenic treatment on the wear behavior of AZ91,” *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 154-160, 2014.
- [25] D. Das, A. K. Dutta, K. K. Ray, “Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel,” *Cryogenics*, Vol. 49, pp. 176- 184, 2009.
- [26] 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,” *Vac.*, Vol. 86, pp. 1534-1540, 2012.
- [27] D. Das, A. K. Dutta and K. K. Ray “Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness,” *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, pp. 2182-2193, 2010.
- [28] N. Altan Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, “Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 86, pp. 34-43, 2014.

- [29] A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of as-quenched vacancies in the final microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Mater. Lett.*, Vol. 93, pp. 247-250, 2013.
- [30] K. Gu, H. Zhang, B. Zhao, J. Wang, Y. Zhou and Z. Li, "Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 584, pp. 170-176, 2013.
- [31] A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal and G. Nagarajan, "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment," *Cryogenics*, Vol. 45, pp. 747-754, 2006.
- [32] C. X. Xiong, X. M. Zhang, Y. L. Deng, Y. Xiao, Z. Z. Deng and B. X. Chen, "Effects of cryogenic treatment on mechanical properties of extruded Mg-Gd-Y-Zr (Mn) alloys," *J. Central South Univ. Technol.*, Vol. 14, pp. 305-309, 2007.
- [33] P. Baldissera and C. Delprete, "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel," *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1435-1440, 2009.