

KRİYOJENİK İŞLEMİN SAE 4140 ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Gürhan HÖKE¹, İsmail ŞAHİN², Henifi ÇİNİCİ³, Tayfun FINDIK³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, Ankara, Türkiye,
gurhanhoke@hotmail.com

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye, isahin@gazi.edu.tr

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye, hcinici@gazi.edu.tr, tayfunfindik@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, kriyojenik soğutma işleminin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla SAE 4140 çelik numunelere; ıslah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işlemi uygulanmıştır. Islah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işleminin SAE 4140'a etkilerini birbirinden bağımsız olarak inceleyebilmek için toplam beş varyant oluşturulmuştur. Numuneler 2°C/dk sabit hızla oda sıcaklığından -140°C'ye soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiştir. Yapılan mikrosertlik incelemeleri ve çekme deneyi sonucunda, ıslah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işlemi uygulanmış olan numunelerde tokluğun arttığı gözlenmiştir. Ayrıca kriyojenik işlemin, mikrosertlik üzerinde de pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: SAE 4140, kriyojenik işlem, mekanik özellik, mikroyapı

EFFECT OF CRYOGENIC PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SAE 4140 STEEL

Absract

In this study, effect on mechanical properties of the SAE 4140 steel of cryogenic treatment was investigated experimentally. SAE 4140 steel samples for this purpose;

quenched treatment, cryogenic treatment and tempering was subjected. In order to examine independently of each other the effects on the SAE 4140 of quenched treatment, cryogenic treatment and tempering treatment, total five variant were created. The samples were cooled from room temperature to -140°C with $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ constant speed and holded for 24 hours at this temperature. As a result of the micro-hardness and tensile test, It was observed that toughness increases in the samples applied of quenched, cryogenic and tempering treatment. Also, on microhardness of the cryogenic process was found to have a positive effect.

Keywords: SAE 4140, cryogenic treatment, mechanical properties, microstructure

1. Giriş

Günümüzde mekanik sistemler aşırı yük ve yüksek hız gibi birçok ağır koşul altında çalışmaktadır. Bu nedenle endüstriyel ve bilimsel çalışmalar, mevcut malzemelerin sınırlarını sürekli genişletme doğrultusunda ilerlemektedir [1]. Bu durumun bir sonucu olarak; son yıllarda metalik malzemelerin içyapısı, temel mekanik özellikleri ve kırılma karakteristiği arasındaki ilişkiler üzerine yapılan çalışmaların sayısı artmaktadır [2]. Bir makineden beklenen en önemli özellik öngörülen ömürü boyunca sorunsuz çalışmasıdır. Bu da, gereç olarak yapımında kullanılan çeliğin uygun seçilmiş olmasıyla doğrudan ilişkilidir [3]. Ayrıca çeliklere, doğru bir ısıtma işlemiyle çok çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür [4]. Düşük sıcaklıklarda gerçekleşen bir ısıtma işlemi türü olan kriyojenik işlem ile yapının tamamının martenzite dönüştürülmesi sağlanır. Bu sayede sertlikten feragat etmeden tokluğu arttırmakta mümkün olur [5].

Makine imalat endüstrisinde yaygın bir kullanım alanı olan SAE 4140 ıslah çeliği, talaşlı imalat endüstrisinde yaklaşık %10 oranında kullanım alanına sahiptir. Ayrıca içerdiği alaşım elementleri sayesinde yüksek sertleşebilirlik özelliğine sahip bir çelik türüdür [6]. SAE 4140 (42CrMo4) çeliğin kimyasal bileşimi karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli ve ıslah işlemi sonunda belirli yükler altında yüksek tokluk özelliği gösterir.

Kriyojenik işlem, yüksek aşınmaya maruz kalan takımlarda aşınma direncini arttırmaya yönelik uygulanan bir soğutma işlemidir. Kriyojenik işlem, bir kez yapılan kalıcı bir işlemdir ve genellikle geleneksel ısıtma işlemi sonunda fakat menevişlemeden önce yapılan, malzemenin tüm kesitini etkileyen bir işlemdir. Son yıllarda malzemelerin

mekanik özelliklerini güçlendirmek için kriyojenik işlem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kriyojenik işlemin, uzay araştırmalarından gıda nakliyesine kadar birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır [7].

Son yıllarda kriyojenik işlemin, çeliklerin mekanik özelliklerine etkileri yoğun araştırılan konular arasında göze çarpmaktadır. Yıldız, bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımlı iş parçalarını, soğuk işlem için -100°C 'ye kriyojenik işlem için ise -185°C sıcaklığa maruz bırakmıştır. Çalışmada, kriyojenik işlem sonucunda bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımlı iş parçalarının tane boyutunun büyüdüğü, sertliğin azaldığı, kristal yapıların değiştiği, bakır elektrotların elektriksel iletkenliklerinin azaldığı, berilyum-bakır alaşımlı iş parçalarının elektriksel iletkenliklerinin arttığı ve bakır elektrotların ısıl genleşme miktarlarının azaldığı gözlenmiştir [7]. Firouzdor ve arkadaşları, karbonlu çeliklerin yüksek hızlarda ve kuru delme şartlarında M2 HSS matkap uçlarının, aşınma direnci ve takım ömrü üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik ve kriyojenik işlem sonrası meneviş uygulanmış numunelerin matkap ömürlerinde sırasıyla %77 ve %126 iyileşme göstermiştir. Talaşların kimyasal analizi ve SEM incelemeleri sonucunda, difüzyon aşınmasının baskın aşınma mekanizması olduğunu saptamışlardır. Ayrıca sertlik değerlerinde de yükselme görülmüştür [8]. Seah ve arkadaşları, kriyojenik işlem uyguladıkları kesici takım uçlarında çatlama karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışmada, kriyojenik işlemin yüksek kesme hızlarında takım ömrüne ve aşınma direncine etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır [9]. Preciado ve arkadaşları, dişlilerde kullanılan karbürizasyon çeliklerinin sertliği ve aşınma direnci üzerine derin kriyojenik işlemin etkisini araştırmıştır. Su verilmiş ve menevişlenmiş çeliklerde derin kriyojenik işlemin (-190°C 'de 22 saat), aşınma direncini arttırdığını ifade etmişlerdir. Sertlik artışını ise sadece 200°C 'de menevişlenen çeliklerde gözlemlemişlerdir [10]. Harish ve arkadaşları, EN 31 rulman çeliğinin mikro yapısı üzerine sığ ve derin kriyojenik davranışın etkisini araştırdıkları çalışmalarında, sığ kriyojenik davranışlı numunede eş eksenli çukurlar ve düz yüzeylerin varlığını gözlemişlerdir. Derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise geniş alana yayılmış mikro çatlaklar görmüşlerdir [11]. Zhirafar ve arkadaşları, AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri ve mikro yapıları üzerine kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, geleneksel ısıl işlem uygulanan çeliklerle karşılaştırıldığında kriyojenik işlemlenmiş numunelerin tokluğu daha düşükken

yine bu numunelerin sertliği ve yorulma dayanımının küçük bir miktar yüksek çıktığı kaydedilmiştir. Menevişleme sırasında muhtemel karbür oluşumundan kaynaklanan kriyojenik işlemler numunelerin sertliğinin ve yorulma direncinin iyileşmesi, kalıntı östenitin martenzite dönüşmesine bağlanmıştır [12]. Das ve arkadaşları, farklı bekletme süreleri (0–132 saat) için -196°C sıcaklıkta kriyojenik işleme tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin aşınma özellikleri, sertlik değerleri ve mikro yapı karakteristiklerini inceleyerek, aşınma direncinin maksimizasyonu için kriyojenik işlemde optimum bekletme zamanının bulunmasına yönelik bir çalışmada en iyi aşınma direnci 36 saat kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerde elde etmişlerdir [13]. Baldissera ve Delprete, çeliklerde kriyojenik işlem uygulamalarına artan ilgiyi dikkate alarak, ticari sementasyon dişli çeliği olan (18NiCrMo5)'in mekanik özellikleri üzerine kriyojenik işlemin etkisini, sertlik ve çekme deneyleri aracılığıyla araştırmışlardır. Kriyojenik işlem uyguladıkları tüm değişkenlerde, 0.6 HRC'den 2.4 HRC'ye kadar sertlik artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzemenin çekme dayanımında ve çekme deneyine bağlı olarak elastikiyet modülünde artış tespit edilmiştir [14]. Bensely ve arkadaşlarının yaptıkları, 815M17 sementasyon çeliğinin çekme davranışı üzerine kriyojenik işlemin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise kriyojenik işlemin numuneler üzerinde çok az miktarda olumsuz tesiri görülmüştür. Kırık yüzeylere yapılan SEM analizinde, derin kriyojenik işlem ve geleneksel ısıl işlem uygulanan numunelerin kırık yüzey performansının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [15]. Shyamala ve arkadaşları ise EN 353 çeliğine, geleneksel ısıl işlem, sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem uyguladıkları çalışmalarında, sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde, geleneksel ısıl işlem uygulanan numunelere göre tüm yorulma ömründe sırasıyla %71 iyileşme ve %26 azalma gözlemlenmişlerdir [16].

Literatürde çelik ve değişik malzemelerin mekanik özelliklerini güçlendirmek amacıyla yapılmış pek çok çalışma varken kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelenmediği görülmektedir. Özellikle transmisyon milleri, ray ve dişliler gibi endüstride önemli mekanizmaların imalinde yaygın bir kullanıma sahip olan SAE 4140 çeliğinde sağlanabilecek bir iyileştirme, endüstride kaydedilmiş bir katma değer olarak karşılığını bulacaktır. Bu amaçla yürütülen bu çalışmada, kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

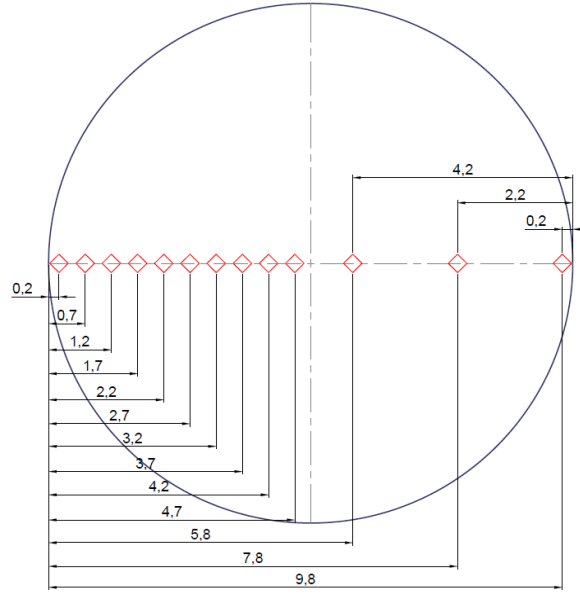
2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada, kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğinin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneyler için üç adet, 12 mm çapında 6 m boyunda SAE 4140 çelik çubuk kullanılmıştır. Bu çubuklardan alınan numuneler, Türk Traktör Fabrikası'nda, "ARL 3560 Optik Emisyon Spektrometresi"nde kimyasal analize tabi tutulmuştur. Kimyasal analiz sonucunda malzemenin 42CrMo4 (SAE 4140) olduğu ve kullanılan üç boy çubuğun da aynı şarjın ürünü olduğu anlaşılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Kimyasal analizi yapılan SAE 4140 numunelerinin kimyasal bileşim değerleri

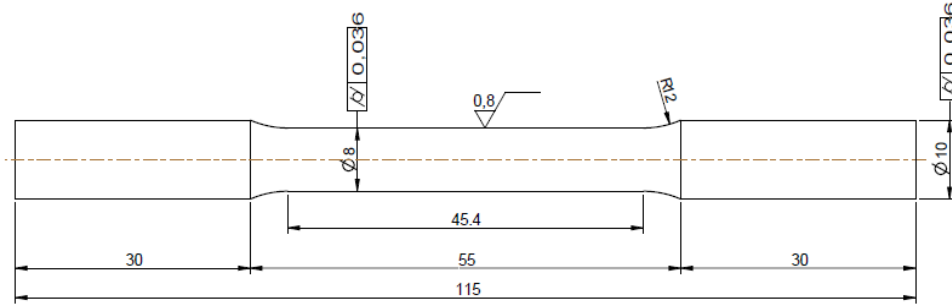
| Element | Standart Aralık | Numune – 1 | Numune – 2 | Numune – 3 |
|---------|-----------------|------------|------------|------------|
| % C | 0,35 ~ 0,44 | 0,445 | 0,442 | 0,444 |
| % Si | 0,15 ~ 0,35 | 0,263 | 0,267 | 0,262 |
| % Mn | 0,60 ~ 0,90 | 0,802 | 0,807 | 0,801 |
| % P | 0,0 ~ 0,040 | 0,017 | 0,015 | 0,017 |
| % S | 0,0 ~ 0,040 | 0,026 | 0,024 | 0,026 |
| % Cr | 0,8 ~ 1,10 | 0,934 | 0,936 | 0,931 |
| % Mo | 0,15 ~ 0,25 | 0,194 | 0,193 | 0,193 |

Kimyasal analizin ardından, mikrosertlik incelemeleri ve çekme deneyi için standart numuneler CNC torna tezgâhı vasıtasıyla üretilmiştir (Şekil 2, 3). Mikrosertlik ölçümleri, Türk Traktör Fabrikası'nda, DuraScan marka, bilgisayar kontrollü, Vickers mikrosertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Şekil 1'de görünen aralıklarda ve 1 Kg yükleme ile gerçekleştirilmiş, ölçümlerde batıcı uç olarak 136° tepe açılı elmas kare piramit kullanılmıştır.

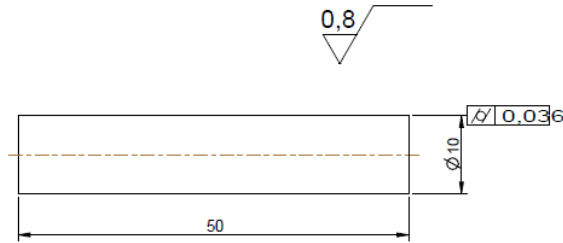


Şekil 1. Mikrosertlik ölçüm aralıkları

Çekme testleri için Türk Traktör Fabrikası'na ait Dartec marka 25 ton kapasiteli üniversal çekme test tezgâhı kullanılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında, 3N ön yüklemeli olarak 5 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Tokluk verisini hesaplayabilmek için gerilim-gerinim grafiği kullanılmıştır.



Şekil 2. Çekme deney numunesi [17]



Şekil 3. Mikrosertlik analiz numunesi

İslah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işleminin SAE 4140'a etkilerini birbirinden bağımsız olarak inceleyebilmek için her adımda bir olmak üzere toplam beş

değişken oluşturulmuştur. Bu değişkenlerden birincisi (değişken 1) hiçbir işlem yapılmadan bırakılmıştır. İkincisi (değişken 2) yalnızca kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Üçüncüsü (değişken 3) yalnızca ıslah işlemine tabi tutulmuştur. Dördüncüsü (değişken 4) ıslah işlemi ardından kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Beşinci (değişken 5) değişkene ise ıslah işlemi, kriyojenik işlem ve son olarak menevişleme işlemi uygulanmıştır. Her değişkenden alınan örnekler için yüzey pürüzlülüğü testi yapılmıştır. Numunelerin farklı özelliklerindeki değişimleri inceleyebilmek için her bir değişken için 5'er adet olmak üzere toplam 25 adet numuneye çekme deneyi uygulanmıştır. Mikrosertlik analizi için üretilen numuneler, mikrosertlik testine tabi tutulmuştur.

Islah işlemi için numuneler öncelikle 850 °C'de, % 0,40 C'lu ortamda 185 dk. bekletilmiş ve 80 °C yağda, hareketli soğutularak sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Sertleştirme işleminin hemen ardından, 230 °C sıcaklıkta, 60dk. menevişleme işlemi uygulanmıştır. Islah işlemi gereği uygulanan sertleştirme işlemi ve hemen ardından gelen menevişleme işleminin 230 °C ve 60dk. olarak belirlenmesindeki amaç; yalnızca iç gerilimleri alıp sertliği yüksek tutmaktır. Bu bağlamda, yüksek sertliklerde tokluk açısından bir iyileşme sağlayabilmek hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde Şekil 4'te görünen Alper ısıl işlem tesislerine ait PLC kontrollü direkt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sistemi kullanılmıştır. Değişken 2, 4 ve 5 numaralı numuneler, kriyojenik işlem uygulanmak üzere; ortalama 2 °C/dk hızla oda sıcaklığından -140 °C'ye indirilmiş ve bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda yine ortalama 2 °C/dk hızla oda sıcaklığına çıkması sağlanmıştır.



Şekil 4. PLC kontrollü, direkt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sistemi

Tablo 2. Deneysel çalışma kapsamında uygulanan ısı işlemler ve bu doğrultuda oluşturulan değişkenler

| | Ham | Islah | Kriyojenik İşlem (Kİ) | Menevişleme |
|------------|-----|-------|-----------------------|-------------|
| Değişken 1 | ✓ | | | |
| Değişken 2 | | | ✓ | |
| Değişken 3 | | ✓ | | |
| Değişken 4 | | ✓ | ✓ | |
| Değişken 5 | | ✓ | ✓ | ✓ |

Malzemedeki dayanımsal değişimleri incelemek amacıyla her bir değişken için 5'er adet olmak üzere toplam 25 adet numuneye çekme deneyi uygulanmıştır. Malzeme yapısında gerçekleşen sertlik değişimlerinin analizi için ise her bir değişkenden 3'er adet olmak üzere toplam 15 analiz numunesi mikrosertlik analizine tabi tutulmuştur.

3. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar kapsamında SAE 4140'a ıslah, kriyojenik işlem ve ilave menevişleme uygulanmıştır. Oluşturulan değişkenler ile ilgili başlangıç koşullarını tanımlayabilmek için 1 numaralı değişken hiçbir işlem uygulanmamış malzeme grubu olarak tanımlanmıştır. Kriyojenik işlemin ham malzemeye olan etkisini ortaya koyabilmek amacıyla 2 numaralı değişken yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış grup olarak tanımlanmıştır. Ancak kriyojenik işlem yalnız başına uygulandığında ham malzemeye hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu sebeple kopma dayanımı, tokluk dayanımı ve mikrosertlik analizlerinde referans olarak, yalnızca ıslah işlemi uygulanmış olan 3 numaralı değişken kullanılmış, 1 ve 2 numaralı değişkenlerden elde edilen değerler başlangıç koşullarını tanımlamaktan ileri geçememiştir. Kriyojenik işlem ıslah işlemine tabi tutulan numunelerde etkili sonuçlar vermiştir. Buradan kriyojenik işlemin, ıslah işleminin ardından uygulandığında etkili olduğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar da bu durumu destekler doğrultudadır. Araştırmacılar, yaptıkları çalışmalarda kriyojenik işlemin konvansiyonel ısı işlemin ardından uygulanan tamamlayıcı nitelikte bir işlem olduğunu ve ısı işlemin yerini alabilecek bir yöntem olmadığını belirtmişlerdir [5, 18].

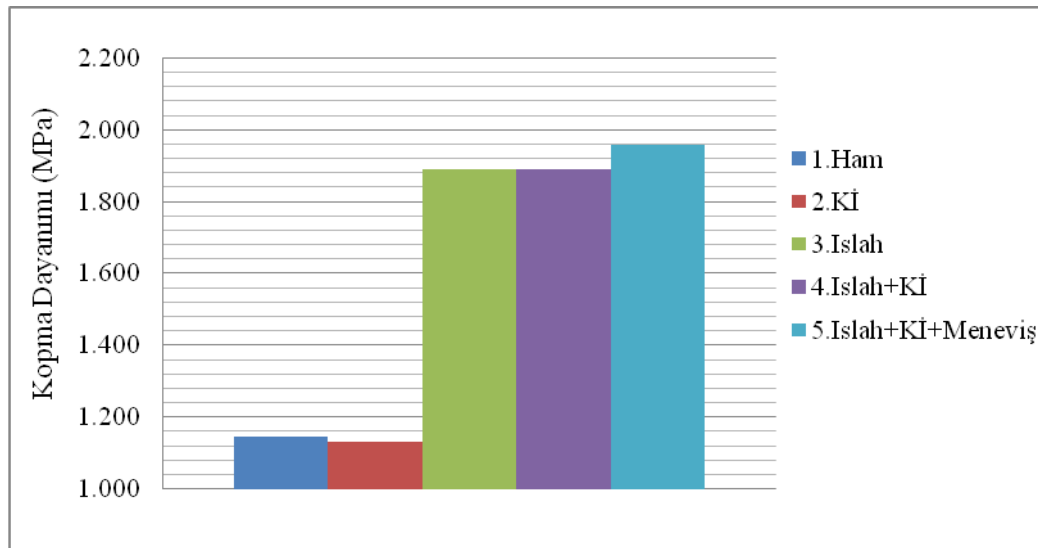
3.1. Çekme deneyi sonuçları

3.1.1. Kopma dayanımı verileri

Tablo 3'te tüm değişkenlerde elde edilen kopma dayanım verileri görülmektedir. Çalışmada her bir değişken için beş çekme deneyi yapılarak kopma dayanım verileri elde edilmiş, son olarak da ortalama kopma dayanımları hesaplanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda, sadece ıslah işlemi yapılmış olan 3 numaralı değişken referans alınarak yapılan hesaplama sonunda 4 ve 5 numaralı değişkenler için kopma dayanımının değişimi sırasıyla; % -0.05 ve % 3.49 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 5). Kopma dayanımı değişimlerinden de anlaşılacağı üzere en yüksek değişim % 3.49 ile 5 numaralı değişkende gerçekleşmiştir. 4 numaralı değişkende ise kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Tablo 3. Kopma dayanımı verileri

| | Değişken:1 Ham | Değişken:2 Kİ | Değişken:3 Islah | Değişken:4 Islah+Kİ | Değişken:5 Islah+Kİ+Meneviş |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|
| R _m : Kopma Dayanımı (MPa) | 1145 | 1130 | 1891 | 1890 | 1957 |



Şekil 5. Kopma dayanımının ısı işleme göre değişimi (Kİ: Kriyojenik işlem)

3.1.2. Tokluk verileri

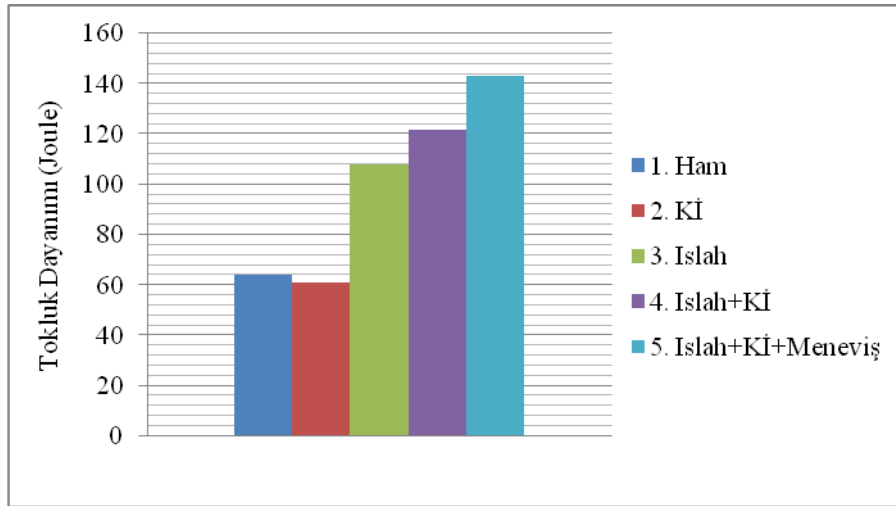
Tokluk verileri çekme deneyi sonuçlarından Eşitlik 1'de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\left(\int_0^{\varepsilon_k} \sigma \cdot d\varepsilon \right) \quad (1)$$

Tablo 4’de verilen tokluk verileri ile hesaplanan ortalama tokluk değerlerine göre; sadece ıslah işlemi yapılmış olan 3 numaralı değişken referans alınarak hesaplanan tokluk dayanımı değişimleri 4 ve 5 numaralı değişkenler için sırasıyla; % 12.68 ve % 32.83 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 6).

Tablo 4. Tokluk dayanımı verileri

| | Değişken:1 Ham | Değişken:2 Kİ | Değişken:3 Islah | Değişken:4 Islah+Kİ | Değişken:5 Islah+Kİ+Meneviş |
|-------------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|
| Tokluk Dayanımı (Joule) | 64,165 | 61,007 | 108,015 | 121,714 | 143,476 |



Şekil 6. Tokluk dayanımının ıslı işleme göre değişimi (Kİ: Kriyojenik işlem)

3.2. Mikrosertlik ölçümleri

Numunelere uygulanan işlemlerin etkisini incelemek amacıyla, sadece ıslah işlemi yapılmış olan 3 numaralı değişken referans alınarak hesaplanan mikrosertlik değişimleri 1, 2, 4 ve 5 numaralı değişkenler için sırasıyla; % -42,71, % -42,71, % 0.69 ve % 2.92 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Mikrosertlik değerleri

| | Değişken:1 Ham | Değişken:2 Kİ | Değişken:3 Islah | Değişken:4 Islah+Kİ | Değişken:5 Islah+Kİ+Meneviş |
|-------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|
| Mikrosertlik (Hv) | 334 | 334 | 583 | 587 | 600 |

4. Değerlendirme

Çalışma kapsamında, kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre;

- Kriyojenik işlemin hemen ardından uygulanan menevişleme işleminin, tokluk ve kopma dayanımı açısından büyük önem taşıdığı gözlenmiştir.
- Son işlem olarak uygulanan menevişlemenin yapıdaki gerilimi giderdiği ve bunun bir sonucu olarak tokluğu arttırdığı düşünülmektedir.
- Yapılan deneysel çalışmalarda en büyük iyileşme etkisi tokluk değerlerinde gözlenmiştir.
- Kriyojenik işlemin, mikrosertliği küçük oranlarda da olsa arttırdığı dikkati çekmektedir.
- Ham SAE 4140'a yalnızca kriyojenik işlem uygulanmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde hiçbir etkisi olmadığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeler Birimi tarafından 07/2012-55 Kod'lu proje ile desteklenmiştir. Gazi Üniversitesi'ne verdiği destekten ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Ekinci, Ş., Akdemir, A., "Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi", Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, 10 (1):39 (2011).
- [2] Ulu, S., AYTEKİN, H., SAİD, G., "4 Farklı çeliğin bazı mekanik özelliklerine Fe-Fe₃C faz diyagramında A1-A3 arasında yapılan ısıtma işlemlerinin etkisi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2: 1 (2006).
- [3] MKEK, "MKE normu özel nitelikte çelik türleri kataloğu", Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu Basımevi, Ankara, 5 (1978).
- [4] İnem, B., "Çeliklerin ısıtma işlemleri ve çelik türleri ile ilgili bilgisayar programı yazılımı", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1 (1988).

- [5] Arslan, F., K., “Soğuk iş takım çeliklerinde sıfırlı işlem derecesinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-4, 41-53 (2010).
- [6] Kesti, E., “Ç - 4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, II, 14-23, (2009).
- [7] Yıldız, Y., “Soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5 (2010).
- [8] Firouzdor, V., Nejati, E., Khomamizadeh, F., “Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206: 467–472, (2008).
- [9] Seah, K.H.W., Rahman, M., Yong, K.H., “Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts”, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217: 29–43, (2003).
- [10] Preciado, M., Bravo, P.M., Alegre, J.M., “Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176: 41–44, (2006).
- [11] Harish, S., Bensely, A., Mohan Lal, D., Rajadurai, A., Lenkey, G. B., “Microstructural study of cryogenically treated En 31 bearing steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209 (7): 3351–3357 (2009).
- [12] Zhirafar, S., Rezaeian, A., Pugh, M., “Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186: 298–303, (2007).
- [13] Das, D., Dutta, A.K., Ray, K.K., “Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel”, *Cryogenics*, Vol. 49: 176–184, (2009).
- [14] Baldissera, P., Delprete, C., “Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel”, *Materials & Design*, Vol. 30: 1435–1440, (2009).

- [15] Bensely, A., Senthilkumar, D., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Rajadurai, A., “Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized steel-815M17”, *Materials Characterization*, Vol. 58: 485–491, (2007).
- [16] Shyamala, L., Bensely, A., Harish, S., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Junik, K., Rajadurai, A., “Fatigue behaviour and fracture mechanism of cryogenically treated En 353 steel”, *Materials & Design*, Vol. 30: 2955–2962, (2009).
- [17] TS EN ISO 6892–1 “Metalik malzemeler - çekme deneyi - bölüm 1: oda sıcaklığında deney metodu”, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, 24–28, (2011).
- [18] Kıvak, T., “Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6AL-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması”, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, IV-V, (2012).