



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi

## *Investigation on fracture toughness values for various martensite volume fractions*

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Fatih AYCAN

ORCID: 0000-0001-9434-5955

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aycan M.F., “Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 277-282, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.520142

# Farklı Martenzit Hacim Oranlarında Kırılma Tokluğu Değerlerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet Fatih AYCAN**

Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.01.2019 ; Kabul/Accepted : 02.04.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerde martenzit hacim oranlarının sertlik ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çeliklerin ara kritik sıcaklık aralıkları belirlenerek üçer farklı sıcaklıkta su verme işlemi, ardından görüntü işleme yöntemi ile içyapı görüntüleri üzerinde her koşul için martenzit hacim oranı belirlenmiştir. Ara kritik sıcaklığın artmasıyla martenzit hacim oranları artış göstermiştir. Numunelere sertlik ve kırılma tokluğu testleri uygulanmış, martenzit miktarının artmasıyla numunelerin sertlikleri artarken kırılma tokluğunun azaldığı belirlenmiştir. AISI 4340'ın, AISI 4140'a göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olmasına rağmen daha düşük kırılma tokluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** AISI 4140, AISI 4340, martenzit hacim oranı, mekanik özellikler.

# Investigation on Fracture Toughness Values for Various Martensite Volume Fractions

## ABSTRACT

In this study the effect of martensite volume fraction on hardness and fracture toughness properties of AISI 4140 and AISI 4340 steels were investigated. After determining of intercritical boundary temperatures for steels, the water quenching processes were performed at three intercritical annealing temperatures. The martensite volume fractions were determined from microstructure images for each condition by using image processing method. The martensite volume fraction increased with increasing intercritical temperature. The hardness and fracture toughness tests were conducted on the specimens. Increasing of martensite content increased the hardness values whereas decreased the fracture toughness values. Although AISI 4340 had higher hardness than AISI 4140, it had lower fracture toughness properties.

**Keywords:** AISI 4140, AISI 4340, martensite volume fraction, mechanical properties.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 4140 ve AISI 4340 çelikleri endüstride yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yerlerini almıştır. Birçok malzemeye göre daha iyi seviyede ısıtma işlemi ve sertleşebilirlik özellikleri ile söz konusu çelikler uzay, havacılık ve otomotiv sanayinde geniş uygulama alanı bulmaktadır [1]. Çeliklerde dayanım, sertlik ve kırılmaya karşı gösterilen direnç aranan mekanik özelliklerin başında gelmektedir. Bu özelliklerin elde edilmesi için çeliklere alternatif farklı malzeme türlerinin geliştirilmesinin yanında mevcut malzemelerin ısıtma işlemi ve termomekanik işlemler ile özelliklerinin iyileştirilmesi seçeneği de yaygın olarak tercih edilmektedir [2]. Örneğin yüksek dayanım değerlerine sahip AISI 4340'ın kısmen düşük tokluk ve süneklik değerleri, gerçekleştirilen ısıtma işlem süreçleri ile önemli ölçüde artırılarak yüksek dayanım ve yüksek tokluk değerleri elde edilmektedir [3].

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi noktasında kullanılan bir başka yöntem ise alaşımlı çeliklerden çift fazlı çeliklerin imal edilmesidir. Genellikle iki fazın aynı anda bulunduğu içyapıya sahip çelikler çift fazlı çelik

olarak adlandırılırken, bu çeliklerde ara kritik sıcaklık aralığında gerçekleştirilen ısıtma işlem uygulamaları ile kompozit malzemelerde olduğu gibi iki veya daha fazla yapının bir arada bulunması sağlanmaktadır. Bu şekilde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanırken, aynı tür malzemelerde farklı mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yapıların ilk diğeri yapılaraya göre kısmen daha sünek olan ferrit olurken, diğeri faz yapısı gerçekleştirilen ısıtma işlem uygulamasına bağlı olarak martenzit, beynit veya kalıntı östenitten oluşmaktadır [1],[4].

Çift fazlı çelikler geleneksel ısıtma işlem görmüş çeliklere göre dayanım ve tokluk değerlerinin daha yüksek olmasına bağlı olarak özellikle düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Çift fazlı çeliklerde fazlar arasında başarılı bir denge oluşturulması durumunda oldukça yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Ferrit-martenzit ve ferrit-beynit çift fazlı yapılar çelik endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [3],[5]. Östenitin belirli sıcaklık değerinden farklı soğuma hızlarında dönüşmesi ile elde edilen martenzitin beynite göre daha sert ve kırılma tokluğunda olması, ferrit-martenzit yapısını ferrit-beynit yapısına göre mekanik özellikler açısından tercih edilebilir hale getirmektedir. Çift fazlı

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

yapıda ferrit ve martenzit fazlarının hacimsel oranları malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkili olan temel faktör olarak kabul edilmektedir. Yapı içerisindeki martenzit hacim oranının artması malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik vb. mekanik özelliklerinin artmasına neden olmaktadır [6],[7]. Bunun yanında yüksek martenzit oranları uzama, süneklik, kırılma tokluğu ve darbe enerjisi gibi mekanik özellikler üzerinde de olumsuz etki oluşturmaktadır [5],[8],[9]. Farklı ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen ısı işlemler ile farklı martenzit hacim oranları elde edilirken, elde edilen hacim farkları mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple malzemelerin mekanik özelliklerinin daha iyi seviyelere gelmesi için ideal hacim oranlarının belirlenmesi oldukça büyük önem kazanmaktadır. Bu sayede belirlenen uygun faz kombinasyonları ile dayanım değerleri yüksek, sert malzemeler elde ederken aynı zamanda kırılma tokluğu yüksek sünek malzemelerin elde edilmesi de sağlanmaktadır [10].

Bu çalışmada, martenzit hacim oranlarının farklı iki orta karbon düşük alaşım çeliğinin sertlik ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı endüstride ıslah çelikleri olarak da adlandırılan orta karbon düşük alaşım çeliklerinden AISI 4140 ve AISI 4340'ın başka bir ısı işlem sürecine maruz bırakılmadan su verme işlemleri sonrasında elde edilen martenzit fazı ile mekanik özellikler arasındaki değişimin ortaya konulması amaçlanmıştır.

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

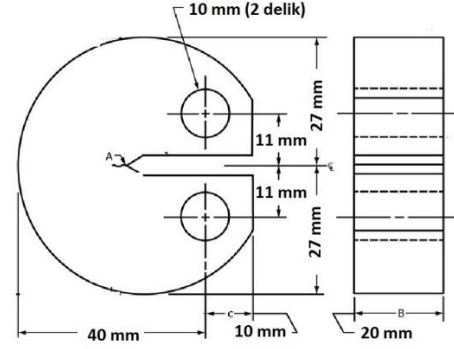
### 2.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Isıl İşlem Uygulamaları (Preparing Specimens and Heat Treatment Processes)

AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin kullanıldığı çalışmada ASTM E399 standardına göre disk şekilli deney numuneleri üretilmiş ve belirlenen koşullarda ısı işlem uygulamalarına tabi tutulmuştur [11]. Çeliklerin üretici tarafından beyan edilen ortalama kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Deneysel çalışmada kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Chemical composition of steels used in experimental studies (% wt))

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
AISI 4140	0,39	0,21	0,65	0,93	0,23	0,01
AISI 4340	0,37	0,32	0,59	1,16	0,25	1,35

Silindirik olarak temin edilen malzemeler, gerekli talaşlı imalat işlemlerinden sonra ilgili standartta verilen nihai boyutlara getirilmiş olup, deney numunelerinin boyutsal ölçüleri Şekil 1'de verilmiştir. Numunelerin boyutsal ölçüleri ilgili şekilde oransal olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Deney numunesinin genel görünümü (General view of specimen)

Çeliklerin ara kritik sıcaklık aralığının alt ve üst sınırlarını ifade eden Ac1 ve Ac3 sıcaklık değerleri, Andrew deneysel denklemlerinin J. Trzaska ve L.A. DobrzaEski tarafından revize edilmiş versiyonu kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir [12]. Belirlenen sınır değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Teorik olarak elde edilen Ac1 ve Ac3 sıcaklık değerleri (The temperature of Ac1 and Ac3 determined theoretically)

AISI 4140		AISI 4340	
Ac1	Ac3	Ac1	Ac3
793°C	739°C	785°C	724°C

Her bir çelik için ara kritik sıcaklık aralığında ve ostenitleme bölgesinden su verme işlemleri gerçekleştirilmiştir. AISI 4140 çeliği 750°C, 780°C ve ostenitleme sıcaklığı olan 850°C'de, AISI 4340 çeliği ise 730°C, 750°C ve ostenitleme sıcaklığı olan 850°C'de su verme işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler atmosfer kontrollü fırınlarda 30 dakika süreyle ısıtma işlemine maruz bırakılan oda sıcaklığındaki sürekli karıştırma işlemine maruz bırakılan suda soğutma işlemine tabi tutulmuştur.

### 2.2 Metalografik İnceleme ve Martenzit Hacim Oranlarının Belirlenmesi (Metallographic Investigation and Determining of Martensite Volume Fraction)

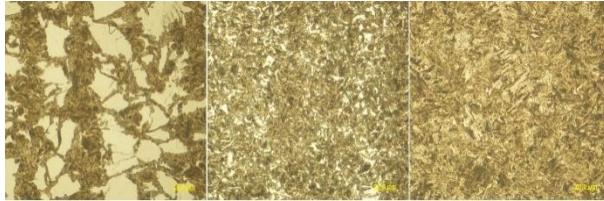
Su verme işlemlerinden sonra numunelerden örnekler alınarak içyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Metalografik süreçlerin tamamlanmasının ardından optik mikroskop altında incelenen numunelerden farklı büyütme değerlerinde içyapı görüntüleri alınmıştır. Farklı büyütmelerde alınan içyapı görüntüleri, görüntü işleme yöntemi ile incelenmiş ve numunelerdeki ferrit ve martenzit hacim oranları belirlenmiştir. Martenzit hacim oranlarının belirlenmesi, içyapı görüntüsünde yer alan açık ve koyu renkli alanların dağılımların birbirine oranı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Koyu renkler martenzit bölgeyi temsil ederken açık renkli alanlar ferrit olarak tanımlanmıştır. Kullanılan yöntemde, hacim oranları %5 hassasiyet ile hesaplanmıştır.

### 2.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi (Determining of Mechanical Properties)

Sertlik ölçümleri Rockwell C yöntemi ile ASTM E18 standardına göre ve en az beş ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir [13]. Her iki malzeme grubu için de geçerli olmak üzere, sertlik değerleri dağılımlarının birbirine göre istatistiksel olarak anlamlı veya anlamsız olduğunun belirlenmesi amacıyla Student T analizleri yapılmıştır. Analizler sonunda elde edilen p değerleri 0,05'ten küçük ise dağılımlar birbirine göre anlamlı aksi halde anlamsız olarak kabul edilmiştir. Isıl işlem uygulamalarının tamamlanmasından sonra numunelerde ASTM E399 standardına göre ön çatlak oluşturulmuş ve daha sonra numuneler kırılma tokluğu deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, eksenel çekme yükü altında 60 kN kapasiteli Instron marka çekme deney cihazında 1 mm/min sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde numunelerin kırıldığı andaki yükler kritik yükler olarak kabul edilmiş ve bu kritik yükler kullanılarak ilgili ASTM standardı referans alınarak her bir koşul için kritik gerilme yoğunluk faktörü ( $K_{Ic}$ ) belirlenmiştir.

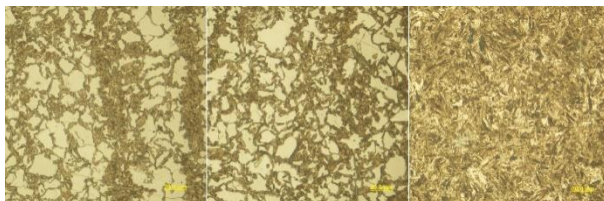
## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda elde edilen içyapı görüntüleri incelendiğinde yapıların büyük ölçüde ikili yapıda olduğu belirlenirken, söz konusu ikili yapının da martenzit ve ferrit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Elde edilen içyapı görüntüleri AISI 4140 ve AISI 4340 için sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



(a) (b) (c)

**Şekil 2.** AISI 4140 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarındaki içyapı görüntüleri; (a) %45, (b) %85, (c) %100 (Micrographs of AISI 4140 steel on different martensite volume fractions; (a) 45%, (b) 85%, (c) 100%)



(a) (b) (c)

**Şekil 3.** AISI 4340 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarındaki içyapı görüntüleri; (a) %40, (b) %55, (c) %100 (Micrographs of AISI 4340 steel on different martensite volume fractions; (a) 40%, (b) 55%, (c) 100%)

İçyapı görüntülerinde toplam alan içerisindeki martenzit fazının oranı olarak ifade edilen martenzit hacim oranları AISI 4140 için Çizelge 3 ve AISI 4340 için Çizelge 4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** AISI 4140 çeliğinin martenzit hacim oranları (Martensite volume fractions of AISI 4140)

Su Verme Sıcaklığı (°C)	Martenzit Hacim Oranı (%)
850	100
780	85
750	45

**Çizelge 4.** AISI 4340 çeliğinin martenzit hacim oranları (Martensite volume fractions of AISI 4340)

Su Verme Sıcaklığı (°C)	Martenzit Hacim Oranı (%)
850	100
750	55
730	40

Numuneler üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin ortalamaları ve standart sapma değerleri her bir martenzit hacim miktarı için Çizelge 5'te, farklı sıcaklıklara ait sertlik dağılımlarının istatistiksel olarak anlamlı veya anlamsız olduğunu gösteren p değerleri ise Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 5.** Numunelere ait sertlik değerleri (Hardness values of specimens)

	AISI 4140			AISI 4340		
Martenzit Hacim Oranı (%)	100	85	45	100	55	40
Sertlik (HRC)	54,9	49,4	32,4	58,2	49,7	30,4
Standart Sapma	1,65	1,55	1,95	1,50	0,92	0,82

**Çizelge 6.** Farklı su verme sıcaklıklarında elde edilen sertlik dağılımları için p değerleri (p values of hardness distributions for various water quenching temperatures)

	AISI 4140		AISI 4340	
	780°C	760°C	750°C	730°C
850°C	2.82 E-06	8.23 E-10	850°C E-06	2.37 E-10
780°C		2.76 E-09	750°C	9.99 E-09

Kırılma tokluğu deneyi sonucunda elde edilen kritik yüklerle bağlı olarak farklı ısıl işlem koşulları için hesaplanan kırılma tokluğu değerleri AISI 4140 ve AISI 4340 çelikleri için sırasıyla Çizelge 7 ve Çizelge 8'de verilmiştir.

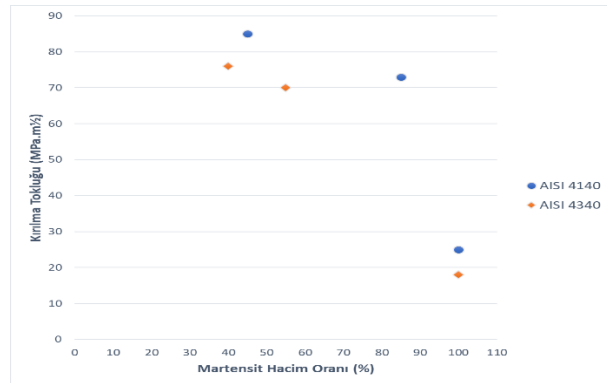
**Çizelge 7.** AISI 4140 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values of AISI 4140 steel for various martensite volume fractions)

Martenzit Hacim Oranı (%)	Kırılma Tokluğu (MPa.m <sup>1/2</sup> )
100	25
85	73
45	85

**Çizelge 8.** AISI 4340 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values of AISI 4340 steel for various martensite volume fractions)

Martenzit Hacim Oranı (%)	Kırılma Tokluğu (MPa.m <sup>1/2</sup> )
100	18
55	70
40	76

AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin her ikisine ait kırılma tokluğu değerlerinin martenzit hacim oranlarına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Martenzit hacim oranlarına karşılık gelen kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values on various martensite volume fractions)

Alaşım elementlerinin miktarına göre elde edilen ara kritik sıcaklık sınır değerlerinin teorik olarak hesaplanmasından sonra farklı martenzit hacim oranlarının elde edilmesi amacıyla ara kritik bölgede her iki malzeme grubu için ikişer sıcaklık değeri belirlenmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda AISI 4140 çeliği için %45 ve %85 martenzit hacim oranları, AISI 4340 için ise %40 ve %55 martenzit hacim oranları elde edilmiştir. Bunun yanında östenitleme sıcaklığında gerçekleştirilen su verme işlemleri ile her iki malzeme grubu için de yapının tamamen martenzit olması sağlanmıştır. Ferrit ve östenitten oluşan yapının ara kritik sıcaklıklarda gerçekleştirilen su verme işlemlerinden sonra hızlı soğuma koşullarına bağlı olarak östenit fazının martenzite dönüşmesi sağlanarak, yapıların ferrit ve martenzitten oluşması gerçekleştirilmiştir [5]. İy yapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak açık renkli

bölgelerin ferrit, koyu renkli bölgelerin ise ağırlıklı olarak martenzit olduğu görülmektedir. İlgili sürekli soğuma eğrilerine göre oda sıcaklığında gerçekleştirilen su verme işlemi sonrasında teknik olarak beynit oluşma olasılığı oldukça düşük olmasına rağmen, uygulama sonrasında numune boyutlarının da etkisi ile koyu renkli bölgelerde çok az miktarda beynit fazı da oluşabilmektedir. Ancak incelenen numunelerin iç yapılarının ferrit ve martenzit fazlarından oluştuğu kabul edilmiştir.

Bir takım ısı işleme süreçlerinin gerçekleştirilmesiyle elde edilen çift fazlı çeliklerin, tek fazlı çeliklere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları ve bazı ihtiyaçları aynı anda karşılayabildikleri bilinmektedir [14]. İy yapının ferrit ve martenzitten oluşması sağlanarak çelik numunelerin kompozit malzeme gibi davranması sağlanmaktadır. Kısmen daha sünek olan ferrit ana yapı; dayanım ve sertlik değerleri oldukça yüksek olan martenzit ise takviye elemanı gibi rol oynamaktadır [4]. Ferrit içerisinde martenzitin bulunması yapıda dislokasyon yoğunluğunun artmasını ve buna bağlı olarak yapının dayanım değerlerinin yükselmesini sağlamıştır [15]. Gerçekleştirilen su verme işlemleri neticesinde numunelerin su verme sıcaklıklarına göre farklı içyapılara ve buna bağlı olarak da farklı mekanik özelliklere sahip oldukları görülmüş; içyapıdaki farklılaşmanın, numunelerin sertlik ve kırılma davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Numunelerin sertliklerine bakıldığında; sertliğin artan martenzit hacim oranları ile doğrusal olarak değiştiği, artan martenzit hacim oranı ile birlikte beklendiği gibi artış gösterdiği görülmektedir. Fereiduni ve Banadkouki'nin [7] AISI 4140'ın çift fazlı bölgede mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında sertlik değerlerinin %100 martenzit hacim oranında en yüksek olduğu, azalan martenzit hacim oranları ile doğrusal olarak azaldığı ve en düşük oran olan %40'ta ise en düşük sertlik değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bunun yanında aynı koşullarda temperleme işleminin uygulanması durumunda martenzit hacim oranının sertlik üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

AISI 4340 çeliğinin daha düşük martenzit hacim oranlarına sahip olmasına rağmen, AISI 4140 çeliğine göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen su verme işlemi ile içyapıların %100 martenzit olması durumunda AISI 4340'ın 58,2 HRC ile AISI 4140'a göre daha yüksek sertlik değerine ulaştığı, dolayısıyla AISI 4340 çeliğinin AISI 4140 çeliğine göre daha sertleşebilir nitelikte olduğu görülmektedir. Çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişim davranışı genel olarak benzerlik göstermesine rağmen büyüklük olarak farklılık göstermektedir.

AISI 4140'tan farklı olarak AISI 4340'ta nikel bulunması, kritik soğutma hızını düşürmekte ve daha kolay ısı işleme tabi tutulmasını sağlamaktadır. Bunun yanında nikelin krom ile birlikte bulunması çeliklerde sertleşebilirlik, darbe dayanımı ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği geçmişte

yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [16]. Ayrıca nikelin çeliklerde yapı içerisindeki ferrit sertliğini artırmasına bağlı olarak, çift fazlı yapıda ana yapının toplam sertliği artarken beraberinde yapının daha gevrek bir ferrit ile çevrenmesine bağlı olarak da malzemenin süneklik davranışının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [17]. Bunun yanında AISI 4140'ın su verme işlemi ile hızlı soğumaya maruz kalması neticesinde östenitin martenzite dönüşmesi esnasında numunelerin iç kısımlarında çok az miktarda kısmen beynitin de var olması, beraberinde yapının AISI 4340'a göre göreceli olarak daha sünek olmasında etkili olmuştur.

Kırılma tokluğu deneyi sonunda elde edilen değerler incelendiğinde her iki malzeme için de kırılma tokluğunun martenzit hacim oranı ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Artan martenzit hacim oranı ile birlikte daha kırılma hale gelen numunelerin kırılma tokluk değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Numunelerin sertlik değerleri kırılma tokluğu ile ilgili bir gösterge kabul edilmesine rağmen, her iki mekanik özelliğin birbiri için tahmin aracı olarak kullanılmasının uygun olmadığı ortaya konmuştur [18]. Zamani ve arkadaşları [19] ara kritik sıcaklıklarda su verme işlemleri sonunda AISI 4130 çeliğinin mekanik özellikleri ve kırılma davranışındaki değişimi incelemiştir. Artan su verme sıcaklıklarına bağlı olarak sertlik değerlerinin yükseldiği, bunun aksine kırılma davranışının olumsuz etkilendiği ortaya konmuştur. Sertlik değerlerinin yükselmesinde ve dayanım değerlerindeki azalma eğiliminde martenzit fazı içerisindeki karbon miktarının etkili olduğu tespit edilmiştir. Orta karbonlu AISI 4130 çeliğinde yüksek martenzit fazı içerisinde bulunan yüksek karbon miktarı yapının gevrek bir hale gelmesinde birincil etken olarak ifade edilmiştir.

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde düşük martenzit oranına sahip numunelerin daha mat ve dalı yapıda olduğu, yüksek martenzit oranına sahip olanların ise parlak ve az çukur yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Singh ve arkadaşları [20] düşük karbonlu çeliğin (%0,21 C) farklı ara kritik sıcaklıklardaki su verme işlemlerinin sertlik ve tokluk özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, artan kritik sıcaklık değerine bağlı olarak tokluk ve sertlik değerlerinin artış gösterdiğini belirlemiştir. Düşük karbonlu çeliklerde tokluk özellikleri artan martenzit hacim oranı ile artış gösterirken, orta karbonlu çeliklerde yüksek karbon miktarının etkisi ile tokluk özelliklerinin azalma gösterdiği ortaya konmuştur. Movaheda ve arkadaşları [21] SAE 1010 düşük karbonlu çeliğin beş farklı martenzit hacim oranında mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Sertlik değerlerinin martenzit miktarının artması ile artış gösterdiği ancak çekme dayanımı ve darbe enerjisinin ise %50 martenzit hacim oranına kadar yükselme eğiliminde olduğu fakat sonrasında azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Martenzit fazındaki karbon miktarının çift fazlı çeliklerin dayanım değerleri, süneklik ve kırılma özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Faz dönüşümü

sonrasında oluşan dislokasyon yoğunluğunun bu özellikleri olumlu etkilediği ancak artan martenzit hacim oranının artmasıyla martenzit içerisindeki karbon miktarının azalması ile söz konusu değerlerin azalmaya başladığı ortaya konmuştur.

AISI 4140 çeliğinin tamamen martenzit yapıda olması durumunda 25 MPa/m<sup>2</sup> olan kırılma tokluğu değerinin martenzit hacim oranının %45'e düştüğünde 85 MPa/m<sup>2</sup>'ye yükseldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde AISI 4340 çeliğinin %100 martenzit hacim oranında 18 MPa/m<sup>2</sup> olan kırılma tokluğu, %40 martenzit hacim oranında 76 MPa/m<sup>2</sup>'ye yükselmiştir. Martenzit hacim oranlarının farklı olması ve kırılma tokluk değerlerinin birbirine yakın olması nedeniyle çeliklerin kırılma davranışları ile ilgili karşılaştırma yapılmasının istatistiksel olarak anlamlı olmamasının yanında, genel olarak benzer kırılma davranışı sergiledikleri görülmektedir. Her iki çeliğin aynı koşullarda gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda AISI 4140 çeliğinin AISI 4340 çeliğine göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğu görülmektedir. Prabhu ve arkadaşları da [22] SAE 1040, SAE 4140 ve SAE 4340 çeliklerine farklı ara kritik sıcaklıklarda su verme işlemi uygulamış ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini incelemiştir. Çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte her üç çelik türü için de artma eğiliminde olduğu bunun yanında darbe dayanımının ise azalma gösterdiği belirlenmiştir. SAE 4340'ın içerdiği nikel sayesinde diğer çeliklere göre sertleşebilirlik ve dayanım değerlerinin daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca SAE 4140 ve SAE 4340'ta bulunan krom ve molibdenin oluşan karbürlerinin her iki çeliğin kırılma tokluğunu olumsuz etkilediği ifade edilmiştir.

Martenzit hacim oranının artmasına bağlı olarak yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunun artması ile dislokasyon hareketliliği sınırlanmaktadır. Sınırlanan dislokasyon miktarının artması yapının sünekliği üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Yüksek ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen su verme işlemleri ile sınırlı biçimde ve yüksek yoğunluklu martenzit oluştuğundan yapının sünekliği azalmaktadır [4]. Sünekliğin düşmesi beraberinde tokluk ve darbe enerjisinin de düşmesine neden olmaktadır. Yapının dayanım ve sertlik değerlerini artıran dislokasyon yoğunluğu ve hareketleri, beraberinde süneklik, tokluk ve darbe enerjisini düşürdüğü ortaya konmuştur [23].

Diğer yandan yapıda martenzit hacminin artması numunelerde mikro çatlak oluşma ve gevrek kırılma görülme olasılığını oldukça artırmaktadır. Östenitin martenzite dönüşmesi esnasında oluşan mikro çatlaklar, numunelerin kırılma davranışını ve darbe dayanımını hatta çekme dayanımını olumsuz etkilemektedir [24]. Ayrıca, ferrit fazının bu noktada engelleyici veya geciktirici rol oynamasından dolayı, toplam ferrit miktarının azalması da malzemenin uzama ve darbe enerjisi üzerinde olumsuz etki oluşturduğu belirlenmiştir [3].

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Orta karbon düşük alaşım çelikleri ara kritik sıcaklık bölgesinde yapılan su verme işlemi ile elde edilen farklı martenzit hacim oranlarında farklı sertlik ve kırılma tokluk değerlerine sahip olmaktadır. Artan martenzit hacim oranlarına bağlı olarak sertlik değerleri artış gösterirken, kırılma tokluk değerleri azalma göstermektedir. Her iki malzemenin mekanik özelliklerinin genel olarak benzer olmasına rağmen, AISI 4140 çeliğinin AISI 4340 çeliğine göre daha düşük sertlik değerlerine sahip olduğu fakat daha yüksek kırılma tokluk değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. İslah çelikleri olarak adlandırılan AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin normal koşullarda birçok uygulama için yeterli mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, bu çeliklerin çift fazlı bölgede gerçekleştirilecek uygun ısıtma işlem uygulamaları ile mekanik özelliklerinin daha iyi hale getirilebileceği ortaya konmuştur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zare A. and Ekrami A., "Influence of martensite volume fraction on impact properties of triple phase (TP) steels", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(3): 823-829, (2013).
- [2] Saeidi N. and Ekrami A., "Impact properties of tempered bainite-ferrite dual phase steels", *Mater. Sci. Eng. A*, 527(21-22): 5575-5581, (2010).
- [3] Saeidi N. and Ekrami A., "Comparison of mechanical properties of martensite/ferrite and bainite/ferrite dual phase 4340 steels", *Materials Science and Engineering A*, 523(1-2): 125-129, (2009).
- [4] Dalalli Isfahani A., Shafye A. and Sharifi H., "Impact and tensile properties of ferrite-martensite dual-phase steels", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38(2): 141-147, (2009).
- [5] Güral A. and Tekeli S., "Microstructural characterization of intercritically annealed low alloy PM steels", *Materials and Design*, 28(4): 1224-1230, (2007).
- [6] Zare A. and Ekrami A., "Influence of martensite volume fraction on tensile properties of triple phase ferrite-bainite-martensite steels", *Materials Science and Engineering A*, 530(1): 440-445, (2011).
- [7] Fereiduni E. and Banadkouki G., "Improvement of mechanical properties in a dual-phase ferrite-martensite AISI4140 steel under tough-strong ferrite formation", *Materials and Design*, 56(1): 232-240, (2014).
- [8] Topçu O. and Übeyli M., "On the microstructural and mechanical characterizations of a low carbon and micro-alloyed steel", *Materials and Design*, 30(8): 3274-3278, (2009).
- [9] Asadi M., De Cooman B.C. and Palkowski H., "Influence of martensite volume fraction and cooling rate on the properties of thermomechanically processed dual phase steel", *Materials Science and Engineering A*, 538(1): 42-52, (2012).
- [10] Kumar A., Singh S. and Ray K., "Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels", *Materials Science and Engineering A*, 474(1-2): 270-282, (2008).
- [11] ASTM E399-17, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials", *ASTM International*, (2017).
- [12] Pawłowski B., "Critical points of hypoeutectoid steel - prediction of the pearlite dissolution finish temperature  $A_{c1f}$ ", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(2): 331-337, (2011).
- [13] ASTM E18-18a, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", *ASTM International*, (2018).
- [14] İkpeseni, S., Onyekpe, B. and Ovri, H., "Influence of intercritical annealing temperature on mechanical properties and microstructure of 0.23%C low alloy steel", *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*: 34(3): 499-505, (2015).
- [15] Karimi M., Kheirandish S. and Gomes U., "Study on work hardening behaviour of ferritic-bainitic dual phase steels", *22th CBECiMat-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Natal, RN, Brasil, 6226-6235, (2016).
- [16] El-Bitar T., Gamil M., Mousa I. and Helmy F., "Development of carbon-Low alloy steel grades for low temperature applications", *Materials Science and Engineering A*, 528(18): 6039-6044, (2011).
- [17] Shibuya M., Toda Y., Sawada K., Kushima H. and Kimura K., "Effect of nickel and cobalt addition on the precipitation-strength of 15Cr ferritic steels", *Materials Science and Engineering A*, 528(16-17): 5387-5393, (2011).
- [18] Funni S., Koul M. and Moran A., "Evaluation of properties and microstructure as a function of tempering time at intercritical temperatures in HY-80 steel castings", *Engineering Failure Analysis*, 14(5): 753-764, (2007).
- [19] Zamani M., Mirzadeh H. and Ghasemi H. M., "Mechanical properties and fracture behavior of intercritically annealed AISI 4130 chromoly steel", *Materials Research Express*, 5(6): 066548, (2018).
- [20] Singh V.P., Gaikwad A., Khan M.Z.R. and Tiwari K., "Development of dual phase steel and determination of its mechanical properties and comparison with low carbon steel", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*: 5(7): 151-159, (2014).
- [21] Movaheda P., Kolahgara S., Marashia S.P.H., Pouranvarib M. and Parvina N., "The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets", *Materials Science and Engineering A*, 518(1-2): 1-6, (2009).
- [22] Prabhu S.M., Kini U.A., Sharma S.S. and Gurumurthy B.M., "Heat treatment and mechanical characterization of dual phase (ferrite-martensite) medium carbon low alloy steels", *International Journal for Technological Research In Engineering*, 3(8): 1776-1779, (2016).
- [23] Sun C., Liu S., Misrac R., Li Q. and Li D., "Influence of intercritical tempering temperature on impact toughness of a quenched and tempered medium-Mn steel: Intercritical tempering versus traditional tempering", *Materials Science & Engineering A*, 711(1): 484-491, (2018).
- [24] Manoj M.K., Pancholi V. and Nath S.K., "Mechanical properties and fracture behavior of medium carbon dual phase steels", *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(4): 2443-249, (2014).