

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YAPRAK YAY ÇELİKLERİNİN İÇ YAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ**

**ADEM BİÇER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Sare ÇELİK  
Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

**BALIKESİR, OCAK - 2024**

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Yaprak Yay Çeliklerinin İç Yapı ve Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Adem BİÇER**

**Bu tez çalışması BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA  
PROJELERİ (BAP) tarafından (2022/078) nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**YAPRAK YAY ÇELİKLERİNİN İÇ YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ISIL İŞLEMİN ETKİSİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ADEM BİÇER  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)**

**BALIKESİR, OCAK - 2024**

Bu çalışmada, kara ve demir yolu ulaşımında yük taşımacılığına hizmet eden araçların süspansiyon sistemi elemanı olan yaprak yayların imalatında kullanılan 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinde menevişleme sıcaklığının mekanik özelliklere ve iç yapıya etkisi incelenmiştir. Bunun için tüm çelik numunelere önce normalizasyon işlemi uygulanarak çeliklerde aynı başlangıç yapısı elde edilmiştir. Islah işlemi için numuneler 870 °C'de 30 dakika östenitleme ve yağda soğutma ile sertleştirilmişlerdir. Ardından 300, 375, 450 ve 525 °C sıcaklıklarında meneviş işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemler ile mekanik özelliklerdeki değişimleri belirlemek için çekme ve sertlik (Vickers ve Rockwell) deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, menevişleme sıcaklığının darbe geçiş sıcaklığına etkisini belirlemek için çeliklere -40 ile +80 °C arasındaki sıcaklıklarda Charpy V-çentik darbe deneyleri yapılmıştır. Isıl işlemlerle elde edilen iç yapılar metalurji mikroskobu ile, faz analizleri XRD tekniği ile ve kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Menevişleme sıcaklığı arttıkça her iki çeliğin dayanım (akma ve çekme) ve sertlik değerleri azalmış, süneklik (yüzde uzama ve kesit daralması), tokluk ve darbe enerjisi değerleri artmıştır. Düşük darbe sıcaklıklarında tüm meneviş şartları için her iki çeliğin darbe enerjisi değerleri azalmış, menevişlenen çeliklerde belirgin sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları gözlenmemiştir. Ayrıca, normalize edilen çeliklerde süneklik tüm meneviş sıcaklıklarına göre daha yüksek elde edilmiş olup bu çeliklerin darbe enerjileri düşük darbe sıcaklıklarında (0 ve -40 °C) 10 J altında büyük düşüşler göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Yaprak yay çelikleri, 51CrV4, 55Cr3, ısıl işlem, iç yapı, mekanik özellikler.

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LEAF SPRING STEELS**

**MSC THESIS**

**ADEM BICER**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. GULCAN TOKTAS )**

**BALIKESİR, JANUARY - 2024**

This study investigated the impact of tempering temperature on the mechanical properties and microstructure of 51CrV4 and 55Cr3 spring steels. These steels are commonly used in the production of leaf springs, which are crucial components of suspension systems in vehicles used for freight transportation on roads and railways. In order to achieve this objective, the normalizing procedure was initially implemented on all steel samples, resulting in the attainment of identical starting structures in the steels. In the quenched-tempered procedure, the samples underwent hardening by being heated to 870 °C for 30 minutes and then rapidly cooled in oil. Subsequently, the tempering procedure was conducted at temperatures of 300, 375, 450, and 525 °C. The mechanical properties were assessed by conducting tensile and hardness tests (Vickers and Rockwell methods) in order to ascertain the alterations resulting from heat treatments. In addition, Charpy V-notch impact tests were conducted on several steels within a temperature range of -40 to +80 °C in order to ascertain the influence of tempering temperature on the transition temperature for impact. The microstructures resulting from heat treatments were analyzed using a metallurgical microscope, the phases were analyzed using X-ray diffraction (XRD) technology, and the fracture surfaces were investigated using a scanning electron microscope (SEM). With an increase in the tempering temperature, the strength (yield and tensile), hardness values of both steels declined, but the ductility (percent elongation and cross-section reduction), toughness and impact energy values rose. At low temperatures, the impact energy values of both steels declined under all tempering levels, and no noticeable transition from ductile to brittle behavior was seen in the tempered steels. Furthermore, normalized steels exhibited superior ductility compared to all tempering temperatures. Additionally, the impact energies of these steels experienced significant reductions below 10 J at low impact temperatures of 0 and -40 °C.

**KEYWORDS:** Leaf spring steels, 51CrV4, 55Cr3, heat treatment, microstructure, mechanical properties.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. YAPRAK YAYLAR</b> .....	<b>3</b>
<b>3. YAY ÇELİKLERİ VE ISIL İŞLEMLERİ</b> .....	<b>6</b>
3.1 Yay Çelikleri .....	6
3.2 Alaşım Elementleri ve Etkileri.....	8
3.2.1 Karbon (C) .....	8
3.2.2 Kükürt (S) .....	8
3.2.3 Mangan (Mn) .....	8
3.2.4 Fosfor (P) .....	9
3.2.5 Silisyum (Si) .....	9
3.2.6 Alüminyum (Al).....	9
3.2.7 Azot (N) .....	9
3.2.8 Nikel (Ni) .....	10
3.2.9 Krom (Cr).....	10
3.2.10 Molibden (Mo).....	10
3.2.11 Vanadyum (V) .....	11
3.2.12 Bakır (Cu) .....	11
3.2.13 Kalay (Sn).....	11
3.3 Isıl İşlemler .....	12
3.3.1 Isıl İşlem Çeşitleri .....	16
3.3.1.1 Normalizasyon .....	16
3.3.1.2 Homojenleştirme.....	16
3.3.1.3 Yumuşatma (Küreselleştirme) .....	16
3.3.1.4 Su Verme (Sertleştirme) .....	17
3.3.1.5 Temperleme (Menevişleme) .....	17
3.3.1.6 Islah İşlemi.....	17
3.3.1.7 Gerilim Giderme .....	18
3.3.1.8 Yeniden Kristalleştirme (Rekristalizasyon).....	18
3.3.1.9 Östemperleme .....	18
3.3.1.10 Martemperleme .....	18
3.4 Yay Çeliklerinin Mekanik Özellikleri ve İç Yapıları .....	19
<b>4. LİTERATÜR ÖZETİ</b> .....	<b>21</b>
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>29</b>
5.1 Deneyin Amacı .....	29
5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	29

5.3 Isıl İşlemler .....	34
5.4 İç Yapı Analizi .....	36
5.5 XRD Analizi .....	37
5.6 Sertlik Testleri.....	38
5.7 Çekme Testleri.....	39
5.8 Charpy Darbe Testleri.....	41
5.9 SEM Analizi.....	44
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>45</b>
6.1 İç Yapı Analizi Sonuçları.....	45
6.2 XRD Analizi Sonuçları .....	51
6.3 Sertlik Sonuçları.....	53
6.4 Çekme Deneyi Sonuçları .....	56
6.5 Darbe Deneyi Sonuçları .....	61
6.6 Kırılma Yüzeylerinin Makro Yapı Analiz Sonuçları.....	64
6.6.1 Çekme Deneyi Kırılma Yüzeyleri.....	64
6.6.2 Darbe Deneyi Kırılma Yüzeyleri .....	65
6.7 Kırılma Yüzeylerinin SEM Analiz Sonuçları .....	68
<b>7. GENEL SONUÇLAR .....</b>	<b>71</b>
<b>8. KAYNAKLAR .....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>77</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Yaprak yay konstrüksiyonu ve yaprak yayı oluşturan yapı elemanları.....	3
Şekil 2.2: Yaprak yayın araç altındaki konumu.....	4
Şekil 2.3: Yaprak yayların üretim aşamaları.....	5
Şekil 3.1: Genel olarak ısıl işlem prosesi.....	12
Şekil 3.2: Fe-C denge diyagramı çelik bölgesi.....	13
Şekil 3.3: Demirin soğuma eğrisi ve allotropik değişimi.....	14
Şekil 3.4: Ötektoid çeliğe ait TTT diyagramı.....	16
Şekil 4.1: 51CrV4 yay çeliğine ait iç yapı görüntüleri a) döküm yapısı, b) sertleştirme işlemi, c) menevişleme işlemi.....	21
Şekil 4.2: 55Cr3 yay çeliğine ait iç yapı görüntüleri a) döküm yapısı, b) sertleştirme işlemi, c) menevişleme işlemi.....	22
Şekil 5.1: 51CrV4 yay çeliğine ait yassı lamalar.....	30
Şekil 5.2: 55Cr3 yay çeliğine ait yassı lamalar.....	31
Şekil 5.3: Numunelerin hadde yönüne dik olarak kesilmesi.....	31
Şekil 5.4: Çekme numunesine ait teknik resim.....	32
Şekil 5.5: Charpy V- çentik darbe numunesine ait teknik resim.....	32
Şekil 5.6: CNC freze makinesinde çekme numunesinin işlenmesi.....	33
Şekil 5.7: CNC freze makinesinde Charpy V-çentik darbe numunesinin işlenmesi.....	33
Şekil 5.8: Protherm PLF110/45 kamara fırını.....	35
Şekil 5.9: Normalizasyon ısıl işlemine ait sıcaklık (T)-zaman (t) grafiği.....	35
Şekil 5.10: Islah (sertleştirme + menevişleme) işlemine ait sıcaklık (T)-zaman (t) grafiği.....	36
Şekil 5.11: Struers marka Hexamatic Robotik zımparalama ve parlatma cihazı.....	37
Şekil 5.12: OLYMPUS marka BX51M model metalurji mikroskobu.....	37
Şekil 5.13: Zwick/Roell marka ZHU250 model sertlik cihazı.....	38
Şekil 5.14: EMCO-TEST marka Durajet DJ10G5 model sertlik cihazı.....	39
Şekil 5.15: SCHIMADZU marka UH - F1000kN model çekme test cihazı.....	40
Şekil 5.16: Mohr & Federhaff A.G. darbe test cihazı.....	42
Şekil 5.17: BINDER etüv fırını.....	42
Şekil 5.18: PMT TAMSON TLC40 soğutma sirkülatörü.....	43
Şekil 5.19: Testo 925 daldırma tip termometre ile sıcaklık ölçümünün yapılması.....	43
Şekil 5.20: Hitachi marka TM-1000 model SEM cihazı.....	44
Şekil 6.1: 51CrV4 yay çeliğinin normalizasyonla oluşan iç yapı görüntüsü.....	45
Şekil 6.2: 55Cr3 yay çeliğinin normalizasyonla oluşan iç yapı görüntüsü.....	46
Şekil 6.3: 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	46
Şekil 6.4: 51CrV4 yay çeliğinin 375 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	47
Şekil 6.5: 51CrV4 yay çeliğinin 450 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	47
Şekil 6.6: 51CrV4 yay çeliğinin 525 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	48
Şekil 6.7: 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	48
Şekil 6.8: 55Cr3 yay çeliğinin 375 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	49
Şekil 6.9: 55Cr3 yay çeliğinin 450 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	49
Şekil 6.10: 55Cr3 yay çeliğinin 525 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.....	50
Şekil 6.11: 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.....	51



<b>Şekil 6.12:</b> 51CrV4 yay çeliğinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.	52
<b>Şekil 6.13:</b> 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.	52
<b>Şekil 6.14:</b> 55Cr3 yay çeliğinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği. ....	53
<b>Şekil 6.15:</b> 51CrV4 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre sertlik değişimleri. ....	54
<b>Şekil 6.16:</b> 55Cr3 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre sertlik değişimleri. ....	55
<b>Şekil 6.17:</b> 51CrV4 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre dayanım – süneklik değişimleri. ....	57
<b>Şekil 6.18:</b> 55Cr3 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre dayanım – süneklik değişimleri. ....	57
<b>Şekil 6.19:</b> 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin meneviş sıcaklığına göre tokluk değişimleri. ....	60
<b>Şekil 6.20:</b> 51CrV4 yay çeliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişen darbe enerjisi değerleri.	61
<b>Şekil 6.21:</b> 55Cr3 yay çeliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişen darbe enerjisi değerleri. ...	62
<b>Şekil 6.22:</b> 51CrV4 yay çeliğine -40 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme. ....	68
<b>Şekil 6.23:</b> 51CrV4 yay çeliğine +80 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme. ....	68
<b>Şekil 6.24:</b> 55Cr3 yay çeliğine -40 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme. ....	69
<b>Şekil 6.25:</b> 55Cr3 yay çeliğine +80 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme. ....	69
<b>Şekil 6.26:</b> Normalizasyon uygulanmış ve oda sıcaklığında darbe deneyi yapılmış yay çeliklerinin SEM görüntüleri; a)51CrV4, b)55Cr3. ....	69

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> Çeşitli yay çeliklerinin kullanım yerleri.....	7
<b>Tablo 3.2:</b> İslah İşlemi sonucunda yay çeliklerinin mekanik özellikleri.....	20
<b>Tablo 5.1:</b> 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık). ....	29
<b>Tablo 6.1:</b> 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve tokluk değerleri. ....	64
<b>Tablo 6.2:</b> 51CrV4 yay çeliğinin darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve darbe enerjisi değerleri. ....	66
<b>Tablo 6.3:</b> 55Cr3 yay çeliğinin darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve darbe enerjisi değerleri. ....	67



## SEMBOL LİSTESİ

<b>C</b>	: Karbon
<b>°C</b>	: Santigrat Derece
<b>dk</b>	: Dakika
<b>F</b>	: Kuvvet (N)
<b>Fe</b>	: Demir
<b>Fe<sub>3</sub>C</b>	: Demir Karbür (Sementit)
<b>HRC</b>	: Rockwell Sertlik
<b>HV</b>	: Vickers Sertlik
<b>J</b>	: Joule
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>kN</b>	: Kilonewton
<b>kpm</b>	: Kilopondmetre
<b>MPa</b>	: Megapascal
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>mm<sup>2</sup></b>	: Milimetrekaare
<b>cm<sup>3</sup></b>	: Santimetreküp
<b>N</b>	: Newton
<b>nm</b>	: Nanometre
<b>R<sub>m</sub>(σ<sub>C</sub>)</b>	: Çekme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
<b>R<sub>p0,2</sub>(σ<sub>0.2AK</sub>)</b>	: Akma Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
<b>s</b>	: Saniye
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>t</b>	: Zaman
<b>U<sub>T</sub></b>	: Tokluk (J/cm <sup>3</sup> )
<b>µm</b>	: Mikrometre

## KISALTMA LİSTESİ

<b>AISI</b>	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
<b>ASTM</b>	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
<b>DIN</b>	: Alman Standartlar Enstitüsü
<b>EDS</b>	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
<b>EN</b>	: Avrupa Normu
<b>HMK</b>	: Hacim Merkezli Kübik
<b>HMT</b>	: Hacim Merkezli Tetragonal
<b>IM</b>	: Işık Mikroskobu
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
<b>SAE</b>	: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TS</b>	: Türk Standardı
<b>TTT</b>	: Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm
<b>YMK</b>	: Yüzey Merkezli Kübik
<b>XRD</b>	: X-Işımları Difraktometresi

## ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimimin başlangıç aşamasından itibaren yardımlarını ve fikirlerini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ'a, deneylerin ilerlemesinde bana zaman ayıran ve fikirlerini benimle paylaşan Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Türker TÜRKÖĞLU'na çok teşekkür ederim.

Çalışmanın yapıtaşını oluşturan numunelerin temini ve hazırlanması aşamasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen başta Sayın Tahsin DÖŞEMEN ve Sayın Evren DÖŞEMEN olmak üzere Döşemenler Otomotiv San. ve Tic. A.Ş. çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Bilgi birikimini paylaşmasının yanısıra İstanbul Teknik Üniversitesi'nde laboratuvar imkanını bize tanıyan değerli hocam Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN olmak üzere Araş. Gör. Erdem BALCI ve Araş. Gör. Burak BAYRAM hocama da deneylerdeki özverilerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Eğitime yapılan yatırımın her zaman karşına çıkacağı bilincini bana kazandıran babam İsmail BİÇER ve annem Hatice BİÇER'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmam esnasında desteklerini esirgemeyen ablam Ayçin AÇIKGÖZ ve eşi Orhan AÇIKGÖZ'e çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitime başlamamda ve yeni bir hayata birlikte adım atmamda her zaman yanımda olan, bundan sonra da yanımda olacak olan değerli eşim Erinç ÇELİK BİÇER'e teşekkürün ötesinde sonsuz sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2024

Adem BİÇER

# 1. GİRİŞ

Kara yolu ve demir yolu ulaşımında yük taşımacılığına hizmet eden araçların sürüş konforunu maksimum seviyede tutabilen ve bu araçların şasi ve aktarma organlarına gelebilecek ani kuvvet girdilerini minimize edebilen süspansiyon sistemi elemanlarına yaprak yay denilmektedir [1,2].

17. yy.'ın ortalarından günümüze kadar gelen yaprak yaylar araç ile yol arasında köprü konumundaki görevleri gereği buradaki bağlantıyı sönümleme özellikleri sayesinde aracın zarara uğramasını minimuma indirger [2,3] ve dolaylı olarak sürücünün yol durumundan etkilenmesini minimum seviyede tutarak sürüş esnasında aracın stabilizasyonunu da en iyi seviyede sağlar.

Bu önemli özelliklere sahip yaprak yayların konstrüksiyon yapısı tasarımsal anlamda çok önemli bir yere sahiptir. Yaprak yaylar eğilme gerilmesine maruz kalan konstrüktif yapıya sahip oldukları için yaprak yayların tasarımlarında dışarıdan gelebilecek kuvvetlere veya yüklere karşı dayanımının ideal seviyelerde olması istenir. Bunun yanı sıra yaprak yaylardan tekrarlı yüklere karşı ideal yorulma dayanımı, ani yükleri absorbe edebilme, plastik şekil değiştirmeye uğramadan elastik şekil değiştirme bölgesinde çalışabilme gibi spesifik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; yaprak yaylardan beklenen özelliklerin uygun malzeme seçimi ve uygun ısıl işlem uygulaması ile gerçekleştirilebilmesidir.

Yaprak yayların üretiminde genellikle yay çelikleri kullanılmaktadır. Yay çeliklerine uygulanan ısıl işlem prosesleriyle yay çeliklerinin iç yapısı ve mekanik özellikleri ideal seviyelere getirilerek yaprak yaylardan istenen verim elde edilebilmektedir. Bazı durumlarda ise yanlış ısıl işlem uygulaması ya da yay çeliğindeki iç yapısal bir sorun yaprak yayın araç üzerindeyken ya da direkt üretim esnasındayken kırılmasına neden olmaktadır. İstenmeyen bu durumların önüne geçebilmek için malzeme ve ısıl işlem proses seçimine çok dikkat edilmesi gerekmektedir.

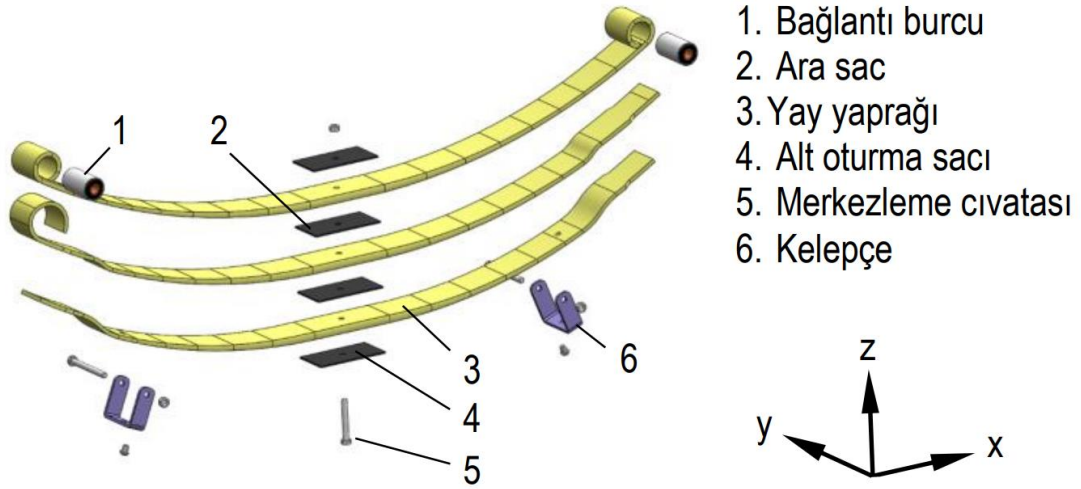
Bu çalışmada, orta karbonlu 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliği numunelerine 5 farklı ısıl işlem uygulanarak yay çeliklerinin ısıl işlemle iç yapısındaki ve mekanik özelliklerindeki değişimlerinin gözlemlenmesi planlanmıştır. Isıl işlem uygulamalarının ardından 3 aşamada

planlanmış olan mekanik testler; Charpy V-çentik darbe, çekme ve sertlik testlerinden oluşturulmuştur. Çalışmada dikkat çekici nitelikte bulunan Charpy V-çentik darbe testi ile numunelere 4 farklı darbe sıcaklığı uygulanarak yay çeliklerinin farklı ısıl işlem çeşitlerindeki darbe geçiş sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmamızı destekler nitelikte olan çekme testi numunelere oda sıcaklığında uygulanarak yay çeliklerinin farklı ısıl işlem çeşitlerindeki çekme ve akma dayanımının, yüzde kopma uzamasının, yüzde kesit daralmasının ve tokluğunun bulunması amaçlanmıştır. Bir diğer destekleyici çalışma olan sertlik testi numunelere oda sıcaklığında uygulanarak farklı ısıl işlem çeşitlerindeki sertlik değerlerine ulaşılması amaçlanmıştır. Çalışmanın bir diğer önemli adımını farklı ısıl işlem çeşitlerine sahip numunelerin iç yapısının incelenmesi, XRD analizlerinin incelenmesi ve darbe testi sonucu kırılan yüzeylerin morfolojik yapılarının SEM analizi ile incelenmesi oluşturmuştur.

Çalışmanın spesifik noktası olan eksi ve artı sıcaklıklardaki darbe deneyi ile farklı iklim koşullarında ve çalışma sıcaklıklarında kullanılan yaprak yayların darbe dayanımlarını gözlemlemeyi, sünek-gevrek geçiş sıcaklıklarını bulmayı, kırılma yüzeylerinin SEM analizi ile incelenmesini dikkat çekici buluyoruz. Çalışmayı farklı test yöntemleri; çekme deneyi, sertlik deneyi, iç yapı incelemesi, XRD analizi ile öncelikli kılıyoruz. Böylece yaprak yay çelikleri üzerine yapılan çalışmalara farklı bir bakış açısı kazandırmayı önemli buluyoruz.

## 2. YAPRAK YAYLAR

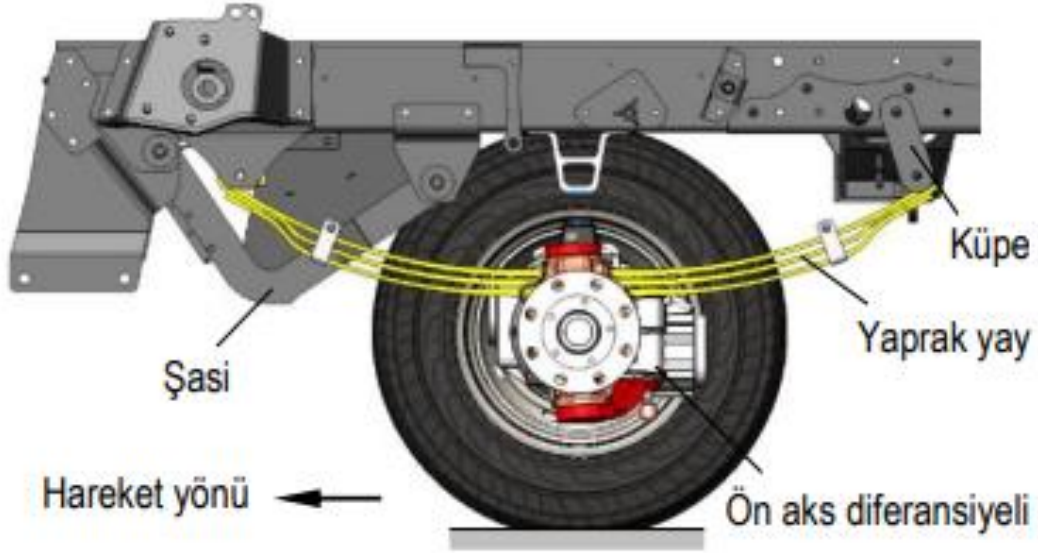
Temel olarak yaprak yaylar; uzun bir katın uç kısımlarına göz kıvrıma işlemi uygulanarak oluşturulan ana kat gözünün içine burç yerleştirilerek ve ana katın altına birden çok katın kat sırasına göre bükümlü şekilde konumlandırılarak merkez civatası ve somunla ya da merkez pimi ile montajlanması esasına dayanmaktadır. Ayrıca yay katlarının konstrüksiyon dışına çıkmasını engellemeye yarayan kelepçeler de yay katlarına eklenebilmektedir (Şekil 2.1). Çok katlı yaprak yayların dışında tek katlı yaprak yaylar da mevcuttur [1,4].



Şekil 2.1: Yaprak yay konstrüksiyonu ve yaprak yayı oluşturan yapı elemanları [5].

Bu konstrüktif yapının Şekil 2.2’de gösterilen araç altındaki konumu büyük öneme sahiptir. Çünkü yaprak yayın tasarımı yapılırken şasiyle bağlantısının yapılacağı yerler dikkate alınmaktadır. Yaprak yayların araç altındaki konumlarında hareketli ve sabit kısımlar vardır. Hareketli kısım yaprak yayın arka kısmındaki gözün yay küpesiyle, sabit kısım ise yaprak yayın ön kısmındaki gözün yay askısıyla, merkez kısmında ise iki adet U-civatası ile aks kovanına montajlanmasına esasına dayanmaktadır. Yaprak yaylar hareketli kısımdaki yay küpesi sayesinde eğilme gerilmesine maruz kalır ve bu sayede yaprak yayların ileri geri hareket etmesi sağlanır [1,4,5].

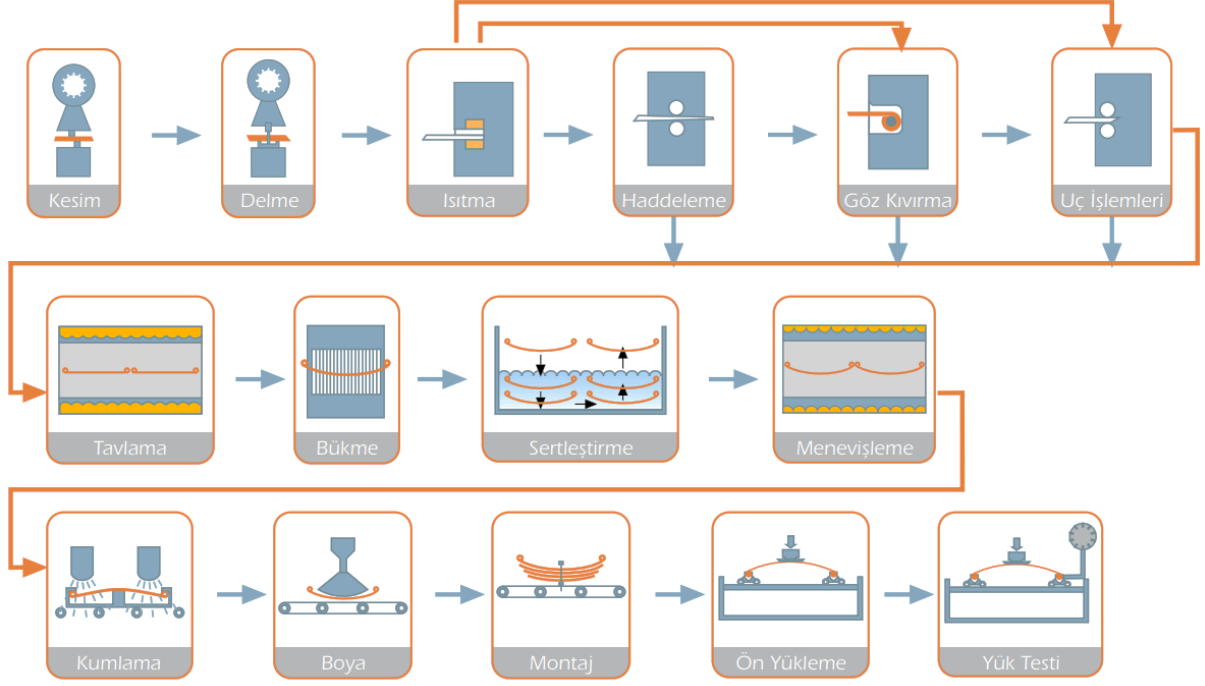




Şekil 2.2: Yaprak yayın araç altındaki konumu [5].

Araç altında konumlandırılan yaprak yayların araçların yük taşıma kapasitesine ve araç tipine göre değişiklik gösteren konvansiyonel, parabolik, z tipi, römork tipi gibi birçok çeşidi mevcuttur [6]. Yaprak yayların çeşitleri tasarımsal anlamda her geçen gün yenilenmektedir ki bunun temel nedeni otomotiv sektöründe rekabetin artmasından dolayı yaprak yaylarda ağırlık azaltmak ve böylece aracın yakıt sarfiyatını olumlu yöne çekmektir [2,7]. Bu durumu örnekle açıklamak gerekirse; konvansiyonel yaprak yaylar çok katlı ve aynı kalınlığa sahip yay katlarının üst üste dizilerek montajlanması sonucu oluşturulmaktadır. Tasarımsal faaliyetlerin geliştirilmesi sonucunda daha az kat sayısı ve ağırlık açısından daha hafif yaprak yay çeşidi olan parabolik yaprak yaylar sıcak haddeleme ile kalınlık azaltılması prensibine dayanarak üretilmektedir. Bu sayede parabolik yaprak yaylar konvansiyonel yaprak yaylara göre araçta hacimsel anlamda büyük bir yer kaplamasının önüne geçilmesine olanak sağlamakta ve ağırlık açısından %30'lara kadar bir azaltım sağlamaktadır. Parabolik yaprak yayların bu avantajlarının yanı sıra yaylanma karakteristiğinde, yorulma dayanımı ve yakıt sarfiyatında da konvansiyonel yaprak yaylara göre daha iyi konumda oldukları bilinen bir gerçektir [6].

Yukarıda bahsi geçen tüm özelliklere sahip yaprak yayları üretebilmek özel üretim teknikleri gerektirmektedir. Şekil 2.3'te yaprak yayların üretimi aşamalar halinde gösterilmiştir.



**Şekil 2.3:** Yaprak yayların üretim aşamaları [8].

Yaprak yay üretim aşamalarının kalbi olarak geçen ıslah işlemi; tavlama (östenitleme), bükme (şekil verme), sulama (yağlama, ani soğutma) ve menevişleme (temperleme) işlemlerinin ardı ardına yapılmasından oluşmaktadır. İdeal bir ısıl işlemin uygulanması ise tek başına yeterli olmayıp uygun malzeme seçiminin yapılması da burada önemli bir yere sahiptir [9,10].

### 3. YAY ÇELİKLERİ VE ISIL İŞLEMLERİ

#### 3.1 Yay Çelikleri

Yay çelikleri ağırlıkça %0.25 ile %0.60 arasında karbon içeren orta karbonlu çelikler sınıfında yer almaktadır [11]. Genel olarak otomotiv ve endüstri sektöründe kullanılmakta olan yay çeliklerine yaylanma karakteristiğini veren form verildikten sonra, yay çelikleri kinetik enerjiyi potansiyel enerjiye dönüştürür. Yay çeliklerinin elastik deformasyon bölgesinde çalışması beklendiğinden dolayı üzerlerine yüklenmiş olan enerjiyi depolar ve yük kaldırıldığında ise minimum kayıp ile enerjiyi sisteme geri verir. Radyal ya da doğrusal çeki-bası gerilmelerinin etkisi altında kalabilmektedirler. Kuvvet etkisi ortadan kaldırıldığında ise başlangıç noktasına dönmesi beklenmektedir [12]. Ayrıca bu çeliklerin yorulma ömrü açısından yüksek çevrim oranına sahip olmalarının yanısıra dayanım değerlerinin de yüksek olması istenen bir diğer mekanik özellikleridir.

Beklenen bu özelliklerin sağlanması ise yay çeliklerinin kimyasal bileşenlerine bağlı olarak değişmektedir. Kimyasal bileşenlerinin içerisinde bulunan karbon oranı yay çeliklerinin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Yay çeliklerinin enerji depolama ve depolanan enerjiyi geri verme özellikleri dikkate alındığı zaman elastik deformasyon bölgesinde çalışması yani akma mukavemetinin yüksek olması istendiğinden dolayı karbon oranının yüksek olması bu durumun en belirgin göstergesidir. Yay çeliklerinin kimyasal içeriğinde silisyum, mangan, molibden, krom ve vanadyum gibi elementler bulunmaktadır. Yay çeliklerinin kimyasal bileşenlerinde fosfor ve kükürt oranının minimum seviyelerde olması istenmektedir. Çünkü, bu iki element malzemede kalıntıya ve dolayısıyla yorulma ömründe negatif etkiye sebep olmaktadır ki bu da temiz çelik olarak nitelendirilen yay çeliklerinde istenmeyen bir durumdur [13]. Krom ve vanadyum içeriğine sahip yay çeliklerinde ise sertlik önemli derecede artmaktadır.

Genellikle yay çelikleri, DIN ve ASTM standartları dikkate alınarak üretilmektedir [12]. Geleneksel şekillendirme ve ısıl işlem prosesiyle üretimi yapılan yay çeliklerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sadece iç yapısının değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir [14].

Yay çeliklerine, kullanım yerlerine göre farklı parametrelerde ısıl işlemler uygulanır. Yay çeliklerinin mekanik özellikleri ve iç yapısı ideal hale getirilerek yay çeliklerinden istenen

özellikler sağlanabilmektedir. Bu özellikler ise DIN ve SAE/AISI normlarına göre Tablo 3.1’de verilen yay çeliklerinin kullanılacağı yere göre farklılıklar gösterebilmektedir.

**Tablo 3.1:** Çeşitli yay çeliklerinin kullanım yerleri [15].

DIN	SAE-AISI	KULLANIM YERLERİ
38Si6	-	Raylı taşıtlar için sıcak şekil verilen yaprak yaylar, büyük çekme ve basma yayları, plaka yaylar, tabak yaylar, yay bilezikleri
46Si7	-	Genel makine yapımında özellikle yaprak yay, helis yay, tabak yay ve spiral yay, taşıt ve uçaklarda
51Si7	-	Genel makine yapımında özellikle yaprak yay, helis yay, tabak yay ve spiral yay, taşıt ve uçaklarda
55Si7	9255	7 mm’den kalın yaprak yaylar, plaka, yaylar, tabak yaylar
65Si7	-	7 mm’den kalın taşıt yaprak yayları, orta ve yüksek zorlanmalarda spiral yay, helis yay, konik yay
60SiMn5	-	7 mm’den kalın yüksek ve orta zorlanmalarda taşıt yaprak yayları, tabak, helis ve bilezik yaylar
60SiCr7	9262	Taşıtlar için 7 mm’den kalın yaprak yaylar, ayrıca genel makine yapımında helis ve tabak yaylar
38Si7	-	Cıvata emniyetleri için bilezik yay ve kopilya, üst yapılar için germe yayı
66Si7	-	Taşıtlar için 25 mm kalınlığa kadar yaprak yaylar, helis yaylar ve döner çubuk yaylar
71Si7	-	Saat endüstrisi ve benzer kullanım alanları için çok fazla zorlanan çekme yayları
51MnV7	-	Yüksek zorlamalar için yaprak, helis ve konik yaylar
67SiCr5	-	Özellikle darbeli zorlanan helis yaylar, 25...40 mm döner çubuk yaylar, vana yayları, bilezik ve tabak yaylar
52MnCrB3	52MnCrB3	Yüksek zorlamalar için taşıt yaprak yayları
55Cr3	5155	Taşıtlar için, yaprak, döner çubuk ve helis yaylar, özellikle büyük çekme ve basma yayları
51CrMoV7	-	Taşıtlarda fazla zorlanan çubuk, helis, çekme ve basma yaylar
51CrV4	6150	Fazla zorlanan taşıt yaprak yayları
58CrV4	-	Çok fazla zorlanan, büyük çaplı spiral, helis yayları, tabak yaylar ve bilezik yaylar

### 3.2 Alaşım Elementleri ve Etkileri

Demir karbon alaşımı olarak bilinen çelikler içerisine çeşitli alaşım elementleri eklenerek çeliğin sertlik, mukavemet, tokluk, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı gibi spesifik özellikleri ideal seviyelere getirilir [16].

#### 3.2.1 Karbon (C)

Çeliğin sertliğini artırma özelliğine sahip olan karbon elementi, kritik soğuma hızını düşürerek sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Soğuma esnasında segregasyon eğilimi yüksektir. Karbür oluşturuçu elementlerle etkileşime geçebilmektedir. Katı çözeltili sertleşmesi ve karbür ayrışma sertleşmesinden dolayı çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır. Çeliğin kimyasal bileşimindeki karbon miktarı arttıkça sertlik ve mukavemet değerleri artarken % uzama, şekil verilebilirlik, süneklik ve kaynak edilebilirlik azalır. Kimyasal bileşimde ağırlıkça %0.70'den fazla olması durumunda su verme sonrası iç yapıda artık östenit oluşumuna neden olmaktadır ki bu durum gevrekliğe neden olmaktadır, ısıl işleme deformasyon ve çatlama riskini artırır.

#### 3.2.2 Kükürt (S)

Demir (Fe) ile birleşerek FeS oluşturur. Düşük sıcaklıkta eriyen ve tane sınırlarında toplanabilen FeS bileşeni, haddeleme sıcaklığında eriyerek sıcak kırılma eğilimine neden olur. Bu yüzden kimyasal içerikte kükürt oranı %0.05'in altında tutulur. Ayrıca tokluğu ve % uzamayı önemli ölçüde düşürür. Talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır.

#### 3.2.3 Mangane (Mn)

Genellikle %0.03-1 aralığında bulunan mangane, kükürtün etkisini MnS oluşturarak yok eder. Bu sayede haddeleme sırasında sıcak kırılma eğilimine neden olan FeS bileşiminin oluşmasını önler. Fazla mangane ise karbon ile birleşerek sementit ile ilişkili olarak Mn<sub>3</sub>C bileşimini oluşturur. Ayrıca sıvı çelikte oksijen giderici etkisi vardır. Kritik soğuma hızını düşürerek sertleşebilirliği ve sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Akma ve çekme mukavemetini artırır. Isıya ve korozyona karşı direnci artırır. Yay çeliklerine Mn ilavesi dökülebilirliği, sıcak işlenebilirliğini kolaylaştırır. Ayrıca hızlı ve derinlemesine sertleşme sürecini hızlandırır. Yüksek yüzey kalitesi için ise Mn/S > 40 olması gerekir. Yüksek oranda Mn kullanımı ise ısıl işlem sonrasında iç yapıda hidrojen kalıcılığına neden olur, bu durumda korozif ortamlarda hidrojen gevrekliğine neden olur.

### 3.2.4 Fosfor (P)

Çelikte fosfor oranı %0.04'ü geçmemesi gerekmektedir. Eğer bu oran geçilmişse süneklik, % uzama, eğme özellikleri, darbe tokluğu önemli ölçüde azalır ve soğuk gevreklik meydana gelir. Fosfor temper gevrekleşmesine sebep olmaktadır, bu durumun nedeni ise tane sınırlarında segregasyona meyilli bir element olmasıyla açıklanabilmektedir. Sertliği, akma ve çekme mukavemetini artırır. Talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır. Talaş kaldırma özelliğini idealize etmek için geliştirilmiş bazı çeliklere %0.07-0.12 arası yüksek miktarda fosfor eklenir.

### 3.2.5 Silisyum (Si)

Ferritin içerisinde çözünür ve kimyasal içerikte ağırlıkça %0.05-0.30 aralığında bulunur. Silisyum elementi çeliklerin mukavemetini artırırken sünekliğe ve tokluğa etki etmez. Çelikte SiO<sub>2</sub> oluşturarak oksijen giderici özelliğe sahiptir. Kritik soğuma hızını düşürerek sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Akma ve çekme mukavemetini, elastikiyeti artırır. Tufal oluşumunu önler. Çelik üretiminde yabancı maddeleri yüzeyde toplayarak cüruf oluşturur ve çelikten uzaklaştırır. Çeliğin sıcak işlenmesini kolaylaştırır. Si oranı arttıkça dekarbürizasyon eğilimi artar. Çelikte ağırlıkça %1.8'den fazla Si bulunması durumunda dekarbürizasyon problemi oluşur, ayrıca bu durum çeliğin tokluğunu düşürür. Çelik üretiminde metalik olmayan inklüzyonlar oluşturur.

### 3.2.6 Alüminyum (Al)

Tane boyutunu inceltici ve güçlü bir oksijen giderici olarak bilinen alüminyum, azot ile çok güçlü nitürler oluşturur. Tufal direncini artırıcı etkisi sayesinde ısıya karşı dayanıklı çeliklerde ve alaşımlarda kullanılır. Korozyon dayanımını arttırıcı etkisinden dolayı düşük karbonlu, korozyon dirençli çeliklerde kullanılır. Su verme işleminden önce tane büyümesi kontrolünde diğer alaşım elementlerinin arasında en etkili elementtir. Sıvı haldeki çeliğe Al ilavesi yapıldığında oksijeni zararsız hale getirir. Akma mukavemetini ve darbe tokluğunu artırır. Çeliğin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmesini önler.

### 3.2.7 Azot (N)

Östenit ( $\gamma$ ) fazını genişleten elementlerden biri olan azot, östenitik yapıyı arttırarak, stabilize edebilir. Östenitik çeliklerde nikelin yerine geçebilme özelliğine sahiptir. Azot, mikro alaşımlı çeliklerde ve paslanmaz çeliklerde çökelme sertleşmesi ve katı çözelti sertleşmesine neden olduğu için alaşım elementi olarak kullanılabilir. Düşük karbonlu çeliklerde azot,

gerinim yaşlanmasına, su verme yaşlanmasına ve mavi gevrekliğe neden olabilir. Ayrıca azot, çelikte kırılabilirliğe neden olmaktadır. Eğme özelliklerini önemli ölçüde kötüleştirir.

### **3.2.8 Nikel (Ni)**

Özellikle Cr ile kullanıldığında kritik soğuma hızını düşürerek sertleşebilirliği, sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Akma ve çekme mukavemetini artırır. Elastikiyeti yükseltir. Isıya karşı direnci artırır, kabuklaşmayı önler. Korozyon direncini, aşınma direncini ve tokluğu artırır. Su verme işlemi sırasında çarpılma ve çatlama riskini azaltır.

### **3.2.9 Krom (Cr)**

Karbür oluşturma özelliğine sahip olan krom çeliklerdeki en önemli alaşım elementidir. Düşük Cr/C oranlarında sadece alaşımli sementit  $(Fe,Cr)_3C$  oluşmaktadır. Cr/C oranı artarsa krom karbürlerden biri  $(Cr,Fe)_7$  ve  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  veya her ikisi oluşmaktadır. Krom çeliklerin sertleşebilirliğini, korozyon ve oksitlenme dirençlerini artırır, yüksek sıcaklık dayanımını ve yüksek basınç hidrojenleşme özelliklerini, ayrıca yüksek karbonlu çeliklerde abrazyon dayanımını artırır. Krom karbürler serttir ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Karmaşık krom-demir karbürleri östenit fazında yavaşça çözeltiye girerler. Bu sebeple çözeltinin oluşabilmesi için su vermeden önce yüksek sıcaklıkta daha fazla bekletmek gerekir. Çeliğe yapılan krom ilavesi P, Sn, Sb ve As empüritelerinin tane sınırlarına segregasyonunu artırır ve temper gevrekleşmesine neden olur. Kritik soğuma hızını düşürerek sertleşebilirliği ve sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Dekarbürizasyonu ve tufal oluşumunu önler. Kimyasal içerikte %1.20'den fazla bulunması durumunda tokluğu olumsuz yönde etkiler. Menevişleme sıcaklığını arttırmadan sadece süreyi arttırarak ideal menevişlemeyi sağlar.

### **3.2.10 Molibden (Mo)**

Karbür oluşturu bir elementtir. Çelikteki Mo içeriği yeterince yüksek olduğunda molibden karbürleri oluşturur, ayrıca çok az miktarda da sementit yapı içerisinde çözünür. Menevişleme sırasında ikincil sertleşmeye sebep olarak yüksek sıcaklıklarda düşük alaşımli çeliklerin sürünme mukavemetlerini artırır. Çeliğe Mo ilave edilmesi durumunda çeliğin iç yapısında ince taneler oluşmakta, sertleşebilirliğin ve yorulma dayanımının artmasına sebep olmaktadır. Çeliğin kimyasal içeriğinde ağırlıkça %0.20-0.40 arasında Mo veya V içermesi gecikmeli temper gevrekleşmesine neden olmaktadır. Kritik soğuma hızını

düşürerek sertleşebilirliği ve sertleşme derinliğini artırır. Martenzitik dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını düşürür. Akma ve çekme mukavemetini artırır. Tane büyümesini önler. Aşınma direncini artırır. Yüksek sıcaklıklarda işleme özelliği sağlar. Molibden miktarı ağırlıkça %0.30'dan fazla olduğunda, iç yapıda kaba karbürlerin arttığı görülür ve bu karbürlerin östenitleme işleminde çözünmesi zorlaşır, bu durumda yaprak yayların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

### **3.2.11 Vanadyum (V)**

Çok güçlü bir karbür oluşturuçu olarak bilinen vanadyum elementinin çok küçük bir kısmı sementit içerisinde çözünür. Vanadyum elementi östenit içerisinde çözünür ve sertleşebilirliği yüksek oranda artırır fakat çözünmemiş olan vanadyum karbürler bu oranı düşürür. Mukavemet ve tokluk özelliklerini tane boyutunu incelterek arttıran vanadyum elementi menevişleme sırasında ikincil sertleşme sağlar. Çeliğin yorulma direncini ve çentik hassasiyetini arttıran vanadyum, aşınma dayanımını ve yüksek sıcaklıktaki mukavemetini artırır. Bu sebeplerle genellikle hız çeliklerinde, sıcak dövme çeliklerinde ve sürünme dayanımı yüksek çeliklerde alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Vanadyum, ısıl işlem çeliklerinin kaynak edilebilirliğini sağlarken, molibden içeren rulman çeliklerinde temperleme kırılganlığını geciktirmektedir. Dekarbürizasyonu önler. Sıcağa karşı direnci artırır.

### **3.2.12 Bakır (Cu)**

Çelikte segregasyona eğilimi olan bir element olarak geçen bakır elementi, sertleşebilirliği artırır. Çeliklerde ağırlıkça %0.30 oranının üstünde bulunan bakır elementi çökeltme sertleşmesine neden olabilmektedir. Eğer ki çelikteki bakır oranı %0.20'den fazla ise atmosferik korozyon direncini artırır. Alaşım ve düşük alaşım çeliklerde çeliklerin çekme özelliklerini idealize seviyelere getirmektedir. Ayrıca boyanın adhezyonuna yardımcı olmaktadır. Akma ve çekme mukavemetini arttırırken % uzama ve şekil verilebilirliği azaltıcı etkisi vardır.

### **3.2.13 Kalay (Sn)**

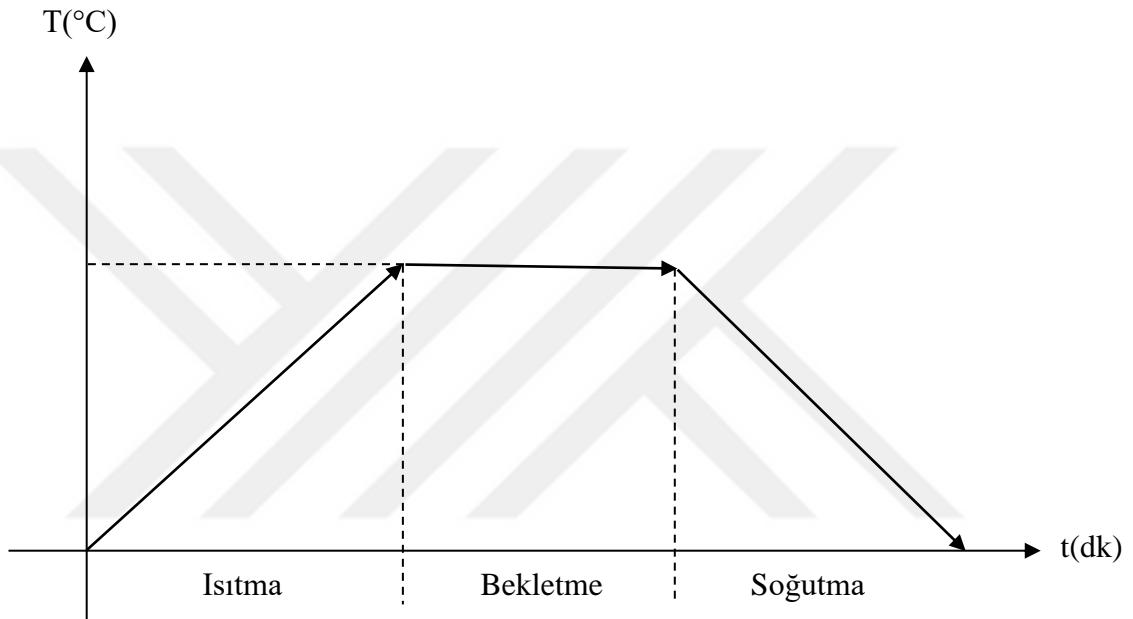
Minimum seviyelerde bile olsa çeliğe zararlı bir element olarak bilinen kalay tane sınırlarında segregasyona oldukça eğilimlidir ve alaşım çeliklerde temper kırılganlığına sebep olur. Çelikte düşük miktarlarda bulunan kalay ve bakır, östenit+ferrit bölgesindeki



çeliklerin sıcak sünekliğini azaltır. Düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler oluşturarak haddeleme sırasında kopmalara neden olur.

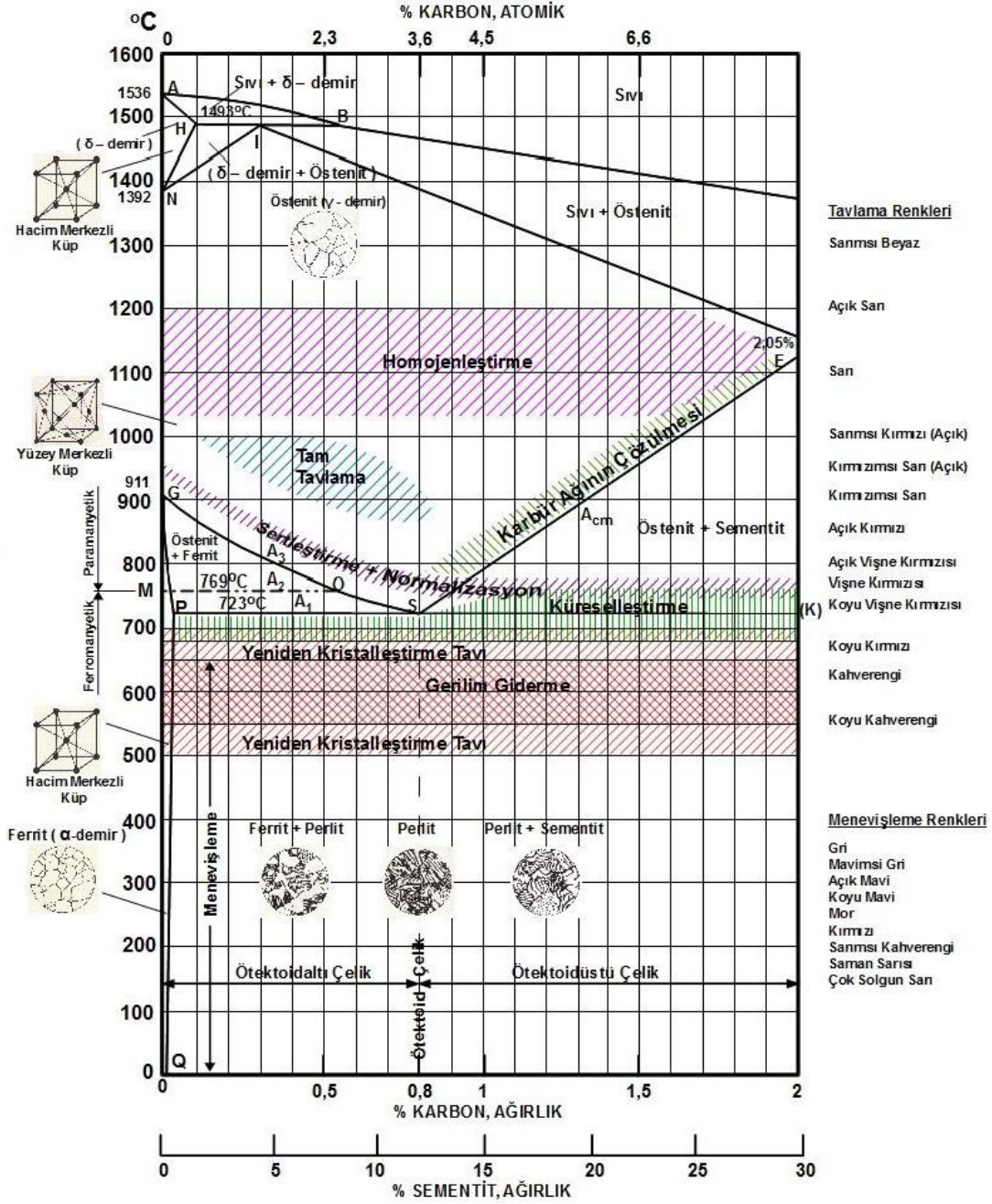
### 3.3 Isıl İşlemler

Isıl işlem; belirli bir malzemeyi, istenilen özellikler doğrultusunda belirli bir sıcaklığa çıkartarak ısıtma, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletme ve ardından belirli bir hızda soğutma işlemlerinden oluşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Genel olarak ısıl işlem prosesi.

Buradaki sıcaklıklar, bekleme süresi, ısıtma hızı, soğutma hızı değişken parametrelerdir. Çeliğin; kimyasal bileşenleri, boyutları, şekli ve final ürününden beklenen özelliklerine göre parametreler değişmektedir. Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerle, sünekliğin ve tokluğun artırılması, artık (iç) gerilmelerin giderilmesi, sertliğin, çekme ve akma mukavemetlerinin artırılması, ince tane boyutuna ulaşılması, talaşlı işlenebilirliğin kolaylaştırması, manyetik ve elektriksel iletkenliğin idealize edilmesi, istenen kimyasal kompozisyonun sağlanması amaçlanmaktadır. Çeliklere ısıl işlem uygulanırken Şekil 3.2’de verilen Fe-C (Demir-Karbon) denge diyagramı referans alınmaktadır [16].



Şekil 3.2: Fe-C denge diyagramı çelik bölgesi.

Sıcaklık değişimleriyle çelikte oluşan fazlar aşağıda verilmiştir.

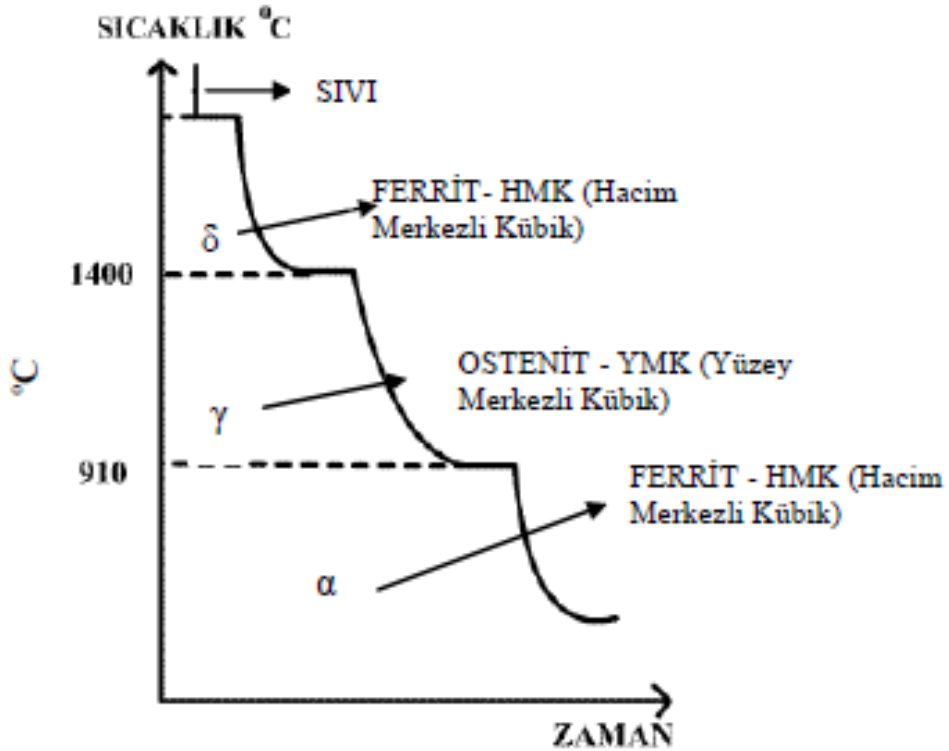
**Ferrit ( $\alpha$ ):** Karbonun  $\alpha$  demiri içinde erimesi sonucu oluşan katı çözüldür. Karbon, ferrit içinde 723 °C'de en fazla %0.025 kadar eriyebilmektedir. Oda sıcaklığında %0.008 karbon çözündürür. Hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes yapıdadır. Yumuşak ve sünek.

**Östenit ( $\gamma$ ):** Karbon atomunun yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısındaki  $\gamma$  demiri içerisinde çözünmesi sonucunda oluşan katı çözüldür. Maksimum %2.11 karbon

çözünürlüğüne sahiptir. Çoğu çelikte oda sıcaklığında kararlı değildir. Yüksek tokluğa sahiptir.

**δ katı çözeltisi:** Karbonun δ demiri içerisinde erimesi sonucu elde edilir. Karbon bu eriyik içerisinde 1493 °C sıcaklıkta en fazla %0.08 oranında eriyebilir. Hacim Merkezli Kübik (HMK) kristal kafes yapısındadır.

Ferrit, östenit ve δ katı çözeltisi, demirin allotropik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle demir, farklı sıcaklıklarda farklı kristal kafes yapıları göstermektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Demirin soğuma eğrisi ve allotropik değişimi [17].

**Sementit (Fe<sub>3</sub>C):** Sert ve kırılgan demir karbür bileşimidir. Kararsız bir fazdır.

**Perlit:** Ferrit ve sementit fazlarının bir araya gelerek oluşturduğu iki fazlı ötektoid yapıdır. Ötektoid reaksiyon sonucu östenitten oluşur. %0.8 karbon içeren çeliğin oda sıcaklığındaki mikroyapısında %100 oranında bulunur.

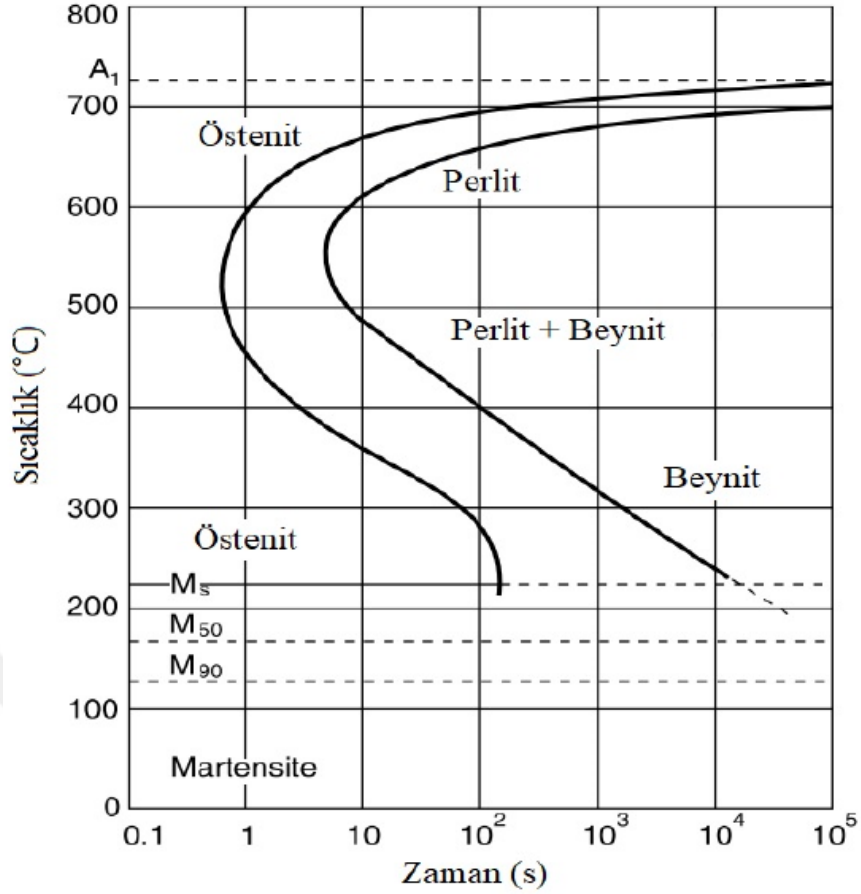
**Beynit:** Ferrit ve sementit fazlarının oluşturduğu bir diğer iki fazlı yapıdır. Üst ve alt beynit olmak üzere iki farklı morfolojidedir. Morfolojisi ısıtılma işlem koşullarına bağlıdır. İzotermal bir ısıtılma işlemle östenitin dönüşümü sonucu oluşur.

**Martenzit:** Isıtılma sırasında östenit bölgesinden yapılan çok hızlı soğutma sonucunda oluşur. Çok sert bir yapıya sahiptir. Kristal kafes yapısı hacim merkezli tetragonal (HMT) olup karbonca aşırı doymuş bir katı eriyiktir. Fe-C denge diyagramında olmayan bir fazdır. Metalografik incelemeler sonucunda, düşük karbonlu çeliklerde iğnesel, yüksek karbonlu çeliklerde ise levhasaldır. Orta karbonlu çeliklerde ise her iki morfoloji de bir arada bulunabilir.

**Temperlenmiş Martenzit:** Martenzitin temperlenmesi sonucu ferrit ve karbür fazlarının oluştuğu iki fazlı bir karışımdır. Ferrit taneleri içerisinde küçük ve yuvarlak karbür partiküllerinin bulunduğu bir yapıdadır.

Şekil 3.4'te ötektoid çeliğe ait TTT (Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm) diyagramında gösterildiği gibi çelik malzemenin hızlı, orta ve yavaş hızlarda soğutulması malzemenin iç yapısında farklı faz yapılarını oluşturmaktadır ki bu durum da malzemenin mekanik özelliklerine önemli derecede etki etmektedir.

Soğutma hızını belirleyen öncül çeliklerde hızlı soğutma esnasında %100 martenzit oluşumunu sağlayan en yavaş soğutma hızı olarak geçen kritik soğutma hızıdır ( $V_{kritik}$ ). Malzemenin kritik soğutma hızının üzerinde soğutulmasıyla bir başka deyişle hızlı soğutulmasıyla martenzit fazı oluşmakta, izotermal sıcaklıkta bekletme ve soğutma ile beynit fazı, yavaş hızda soğutulmasıyla perlit fazı oluşmaktadır. TTT diyagramından da görüldüğü üzere perlit ve beynit fazları zamanın ilerlemesi ile oluşurken martenzit fazı sıcaklığın düşmesi neticesinde zamandan bağımsız difüzyonsuz olarak oluşmaktadır. Martenzit başlangıç sıcaklığının ( $M_s$ ) altındaki sıcaklıklarda martenzit oluşum miktarı çeliğin kimyasal kompozisyonuna, östenitleme işleminin koşullarına, sertleştirme işlemindeki soğutma hızına bağlı olarak değişmektedir [16]. İç yapıda %100 martenzit fazına ulaşılabilmesi için martenzit dönüşüm tamamlanma sıcaklığının ( $M_f$ ) altına inilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.4: Ötektoid çeliğe ait TTT diyagramı [16].

### 3.3.1 Isıl İşlem Çeşitleri

#### 3.3.1.1 Normalizasyon

Malzemelerin tane boyutunu küçültmek, homojen bir içyapı elde etmek, malzemelerin işlenme ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan bir ısıl işlemdir. Ötektoid altı çeliklerde A<sub>3</sub>, ötektoid üstü çeliklerde A<sub>1</sub> veya A<sub>cm</sub> sıcaklığının 30-50 °C üzerinde tutup havada soğutularak yapılan bir işlemdir.

#### 3.3.1.2 Homojenleştirme

Özellikle döküm parçalarda kimyasal homojenliği sağlamak amacıyla malzemeyi 1100 °C sıcaklık civarında bir süre tutup yavaş soğutma işlemlerinden oluşan bir ısıl işlemdir.

#### 3.3.1.3 Yumuşatma (Küreselleştirme)

Çelikteki karbürleri küresel hale getirerek dengeli bir yapı oluşturmak amacıyla uygulanan bir ısıl işlemdir. Yumuşatma sonucunda sertlik önemli ölçüde düşer ve süneklik artar. Yüksek karbonlu çeliklerde yumuşatma ile talaşlı şekillenebilirlik iyileşirken, düşük

karbonlu çeliklerde talaşlı şekillenebilirlik kötüleşmektedir. Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde yapının sertleştirme için uygun hale getirilmesi amacıyla yumuşatma tavlama yapılması önemlidir. Malzemenin ötektoid sıcaklığın (723 °C) hemen altında uzun süre tutup yavaş olarak soğutulması işlemidir.

#### **3.3.1.4 Su Verme (Sertleştirme)**

Ötektoid altı çeliklerde A<sub>3</sub>, ötektoid üstü çeliklerde A<sub>1</sub> sıcaklığının 30-50 °C üzerinde tutup östenit bölgesine kadar ısıtılması ve bütün yapının östenit fazına dönüşene kadar bekletilmesi sonrasında hızlı bir şekilde yağda, suda ya da farklı bir ortamda soğutulması ile gerçekleştirilir. Bu dönüşüm sonucunda martenzit adı verilen yüksek sertliğe sahip faz oluşur.

#### **3.3.1.5 Temperleme (Menevişleme)**

Su verme sonrası martenzitik yapıda oluşan ve oldukça sert ve kırılgan yapıyı bir miktar yumuşatma işlemidir. Ancak bu sırada sertlikte de düşme meydana gelir. Malzemeyi belirlenmiş bir sıcaklığa (200-600 °C) homojen olarak ısıtma, bu sıcaklıkta belirli bir sürede tutma ve hava veya çeşitli sıvılar yardımıyla soğutmayı içeren ısıl işlemdir. Sertleştirme sonrası martenzit fazında oluşan iç gerilmeleri gidermek, sünekliği artırarak sertleştirilmiş malzemeye tokluk kazandırmak ve çalışma şartlarında gerekli mukavemet ve sertlik değerlerini karşılamak amacıyla yapılır.

Sertleştirilmiş çelikler menevişlendiğinde çekme dayanımı ve akma sınırı, düşük meneviş sıcaklıklarında bir miktar artış gösterebilir. Ancak meneviş sıcaklıkları arttırıldığında bu özelliklerde devamlı düşme gözlenir. Buna karşın malzemenin şekil değiştirebilirlik karakteristikleri olan kopma uzaması, kesit daralması ve çentik darbe dayanımı meneviş sıcaklığı arttıkça artar.

#### **3.3.1.6 Islah İşlemi**

Sertleştirme ve menevişleme işlemlerinin ard arda uygulanmasıdır. Islahta seçilen meneviş sıcaklıkları, sertleştirilmiş duruma kıyasla sertlikte önemli ölçüde düşme yapar. Menevişleme işleminin yüksek sıcaklıkta (450-675 °C) yapılması uygundur. Su verme işleminden sonra martenzit olan faz yapısı menevişleme sonrası temperlenmiş martenzite dönüşür. Böylece malzeme kopmaya ve uzamaya karşı dayanıklı hale gelir. İş parçalarına ve yapı elemanlarına büyük dayanım, yüksek bir akma sınırı, yüksek süneklik kazandıran

bir işlemdir. Sertleştirme öncesi gerilim giderme veya normalizasyon işlemi yapılması yararlıdır.

### **3.3.1.7 Gerilim Giderme**

Çeliklerde kaynak, döküm, ısıtım işlem ve soğuk şekillendirme sonrası çok değişik nedenlerle iç gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan iç gerilmeler malzemede çatlama ve çarpılma riskine neden olabilmektedir. Oluşan iç gerilmeleri azaltarak sorun yaratmayacak seviyeye indirmek ya da tamamen yok etmek için yapılan bir ısıtım işlemidir. Çelik malzemelere 550 °C ile 650 °C sıcaklık aralığında bir sıcaklıkta gerilim giderme tavı uygulanır. Malzemeler 550 °C ile 650 °C sıcaklık arasındaki bölgeye yavaş bir şekilde ısıtılır ve burada yaklaşık olarak 25 mm kalınlık için 1 saat bekletildikten sonra soğutma işlemi çok yavaş bir şekilde yapılır.

### **3.3.1.8 Yeniden Kristalleştirme (Rekristalizasyon)**

Plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilen parçaların tane yapılarında, özellikle cidar bölgelerinde, kalıcı yapı bozulmaları meydana gelir. Bu durum sertlik ve mukavemetin artması, süneklik ve elektrik iletkenliğinin azalmasına sebep olur. A<sub>1</sub> dönüşüm sıcaklığının altında bir sıcaklıkta (500-700 °C) bir saate kadar bekletme ve yavaş soğutma işlemidir. Rekristalizasyon iç yapıda homojen dağılımlı yeni taneler oluşturmak, soğuk deformasyon ile oluşan dislokasyon yoğunluğunu azaltmak, malzemenin sünekliğini ve tokluğunu arttırmak amacıyla yapılmaktadır.

### **3.3.1.9 Östemperleme**

Östenit sıcaklığına getirilen çelik malzeme martenzit dönüşüm başlama sıcaklığının ( $M_s$ ) üzerinde tutulan tuz ya da kurşun banyosuna daldırılır ve beynit oluşuncaya kadar bekletilir. Dönüşüm tamamlandıktan sonra banyodan alınan çelik malzemeler havada soğutulur. Östemperleme ile malzemelerin süneklik, tokluk, aşınma direnci, darbe dayanımı, yorulma dayanımı, sertlik, çekme ve akma mukavemetleri gibi mekanik özelliklerinde artış meydana gelmektedir.

### **3.3.1.10 Martemperleme**

Östenit sıcaklığına getirilen çelik malzeme martenzit dönüşüm başlama sıcaklığının ( $M_s$ ) üzerinde tutulan tuz ya da kurşun banyosuna daldırılır ve malzemenin yüzeyi ile merkezinin sıcaklıkları aynı olana ve faz dönüşümü olmayana kadar bekletilir, ardından malzemeye su

verilerek tamamen martenzit fazı elde edilir. Martemperlemede soğuma ile oluşan büzülme ve büyük parçalardaki su verme çatlama önlenir.

### 3.4 Yay Çeliklerinin Mekanik Özellikleri ve İç Yapıları

Yay çeliklerine uygulanan ısı işlem prosesi ile yay çeliklerinin iç yapısı değişmektedir. İç yapıdaki değişim neticesinde çeliklerin mekanik özellikleri önemli derecede etkilenmektedir. Bu yüzden uygun ısı işlem parametrelerinin seçimi burada büyük bir öneme sahiptir.

İdeal bir ısı işlem seçimiyle yay çeliklerinden beklenen özellikler; tokluk, süneklik, mukavemet, rezilyans, % uzama, % kesit daralması, yorulma direnci, darbe enerjisi gibi mekanik özelliklerinin istenen değerlerde olması sağlanabilmektedir.

Yay çeliklerine ısı işlem prosesi olarak genellikle ıslah işlemi uygulanmaktadır. Islah işlemi ise sırasıyla; ilk olarak su verme tavlama olarak geçen östenitleme işlemiyle Fe-C denge diyagramında A<sub>3</sub> eğrisinin yaklaşık 30 ile 50 °C üzerinde uygulanır. İşlem sonunda malzemede yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısında östenit fazı ( $\gamma$ ) oluşur. Ayrıca sertleştirme işleminde çelik malzemenin içi ve dışı arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı çatlama riskini önlemek amacıyla ön ısıtma (kademeli ısıtma) yapılabilmektedir.

Östenitleme işleminin ardından ani su verme işlemi olarak geçen sertleştirme işlemi çeliğin karbon ve alaşım elementlerinin miktarına göre havada, yağda, suda, N<sub>2</sub> ile soğutma ya da polimer soğutması ile gerçekleştirilmektedir. Suda soğutma yağda soğutmadan daha hızlı gerçekleşmektedir. Böylece suda soğutma işlemi neticesinde östenitin martenzite dönüşümü çok hızlı gerçekleştiği için malzemede oluşan iç gerilmelerden dolayı çatlamlar veya kırılmalar meydana gelebilmektedir. Yağda soğutma işlemi daha yavaş gerçekleştiği için termal şok etkisi suda soğutmaya göre daha düşük olup çatlak ve tufal oluşumu engellenir. Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapıdaki östenit faz, ani soğutma işlemi ile difüzyon (yayınma) olmadan hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal kafes yapısındaki martenzit fazına dönüşür. Difüzyonsuz olarak gerçekleşen martenzitik dönüşümde çeliğin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişim meydana gelmez.



Martenzit fazına dönüşen çelik oldukça kırılğan yani gevrek bir yapıya sahiptir. Malzemenin tokluğunu arttırmak ve faz dönüşümü sonrasında yapıda oluşan gerilmeleri ortadan kaldırmak amacıyla menevişleme (temperleme) işlemi uygulanır ve yay çeliği malzemesinin faz yapısı temperlenmiş martenzite dönüşür [16,18].

Yay çeliklerine uygulanan ıslah işleminin içerisinde bulunan proseslerin parametreleri değiştirilerek çeliklerin iç yapısında bulunan faz yapıları ile oranları değişmekte ve bu duruma istinaden mekanik özelliklerde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler göz önüne alındığında ıslah işleminin bir prosesi olan menevişleme prosesinin işlem sıcaklığı arttıkça çeliklerdeki sertlik, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, rezilyans değerlerinde düşme meydana gelirken % uzama, % kesit daralması, tokluk, darbe enerjisi değerlerinde artma meydana gelmektedir. Mekanik özelliklerdeki bu değişiklikler iç yapıda meydana gelen farklılıklardan kaynaklanmaktadır [9].

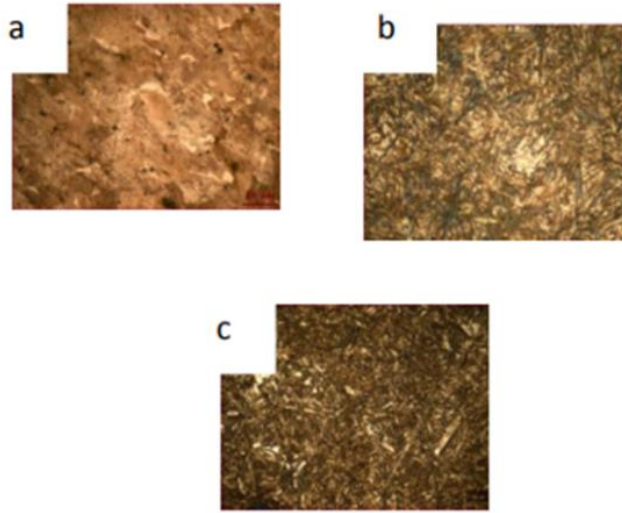
Tablo 3.2’de, TS EN 10089 standardı dikkate alınarak yay çeliklerinden iki tanesi (51CrV4 ve 55Cr3) için ıslah işlemi sonrasında elde edilebilecek bazı mekanik özellikler verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Islah İşlemi sonucunda yay çeliklerinin mekanik özellikleri [19].

Yay Çeliği	Su Verme Sıcaklığı (°C) (±10°C)	Su Verme Sertleştirme Ortamı	Temperleme Sıcaklığı (°C) (±10°C)	Akma Mukavemeti (R <sub>p0.2</sub> ) (MPa) (min.)	Çekme Mukavemeti (R <sub>m</sub> ) (MPa)	Kopma Uzaması (A) (%) (min.)	Kesit Daralması (Z) (%) (min.)	20 °C’ de vurma enerjisi (KU) (J) (min.)
51CrV4	850	Yağ	450	1200	1350-1650	6	30	8
55Cr3	840	Yağ	400	1250	1400-1700	3	20	5

#### 4. LİTERATÜR ÖZETİ

Soğuk deformasyonla üretimi yapılan 51CrV4, 54SiCr6, 55Cr3 ve 60SiCr7 yay çeliklerinin incelendiği bir çalışmada; 900 °C 1 saat östenitlenen numuneler yağda soğutularak sertleştirilmiştir. Sertleştirme işleminin akabinde 400 °C’de 1.5 saat menevişleme işlemi uygulanmış ve menevişleme sonrası yağda soğutulmuştur. Numunelerin Vickers sertlik ölçümleri, HV 0.5 olarak uygulanmıştır. Standart metalografik yöntemlerle numune yüzeyleri hazırlanıp, %3 Nital çözeltilisi ile dağlanmış. Yapılan testler ve incelemeler sonucunda, sertleştirme işlemi görmüş numuneler, martenzit iç yapısından dolayı sert, gevrek ve kırılğan bir yapı gösterirken menevişleme işlemi ile iç yapıdaki martenzit, temperlenmiş martenzite, troostite ve sorbite dönüşmüştür. Çalışmadaki 4 farklı yay çeliğinden olan 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin iç yapı görüntüleri Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

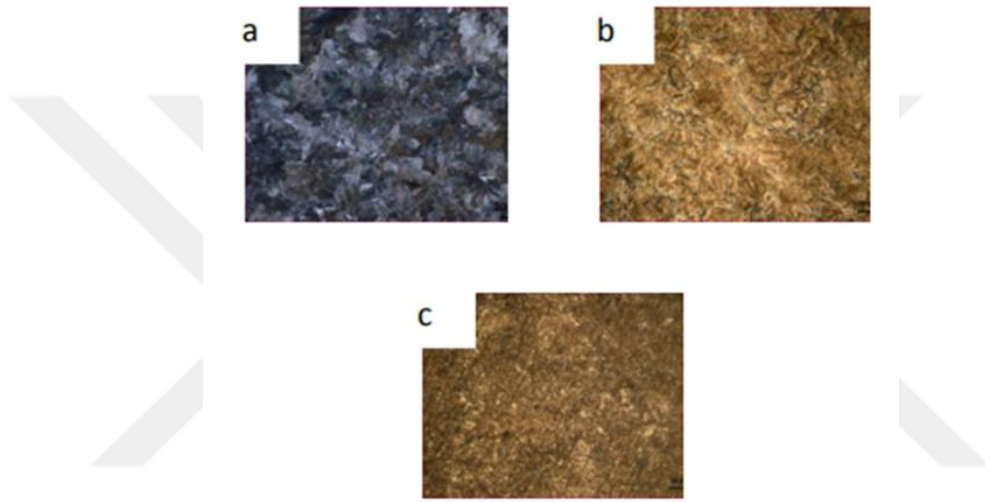


**Şekil 4.1:** 51CrV4 yay çeliğine ait iç yapı görüntüleri  
a) döküm yapısı, b) sertleştirme işlemi, c) menevişleme işlemi [20].

Şekil 4.1 (a)’da yay çeliğinin döküm yapısında pro ötektoid ferrit, bir kısmı kaba lamelli perlit ve daha çok ince perlit yapısı görülmüştür. Şekil 4.1 (b)’de yay çeliğine sertleştirme ısı işlemi uygulandıktan sonra martenzit fazları ve çok az miktarda kalıntı östenit fazına rastlanmıştır. Şekil 4.1 (c)’de yay çeliğine menevişleme ısı işlemi uygulandıktan sonra bir miktar ferrit çökmesi ve çoğunlukla temperlenmiş martenzit fazı görülmüştür.

Şekil 4.2 (a)’da yay çeliğinin döküm yapısında pro ötektoid ferrit miktarı daha az çoğunlukla ince lamelli perlit yapısı görülmüştür. Şekil 4.2 (b)’de yay çeliğine sertleştirme ısı işlemi

uygulandıktan sonra iğnesel martenzit ve kalıntı östenit fazına rastlanmıştır. Şekil 4.2 (c)'de yay çeliğine menevişleme ısıl işlemi uygulandıktan sonra ferrit çökmesi ve temperlenmiş martenzit fazı görülmüştür. Menevişleme işlemi ile iç yapılarda gözlenen temperlenmiş martenzit ve ferrit çökeltisi yay çeliklerinin sertlik değerlerini düşürmüştür. Ayrıca 51CrV4 yay çeliğinin sertliği, tüm durumlarda diğer yay çeliklerine göre daha sert çıkmıştır. Bu durumun temel nedeni, yay çeliğinde V alaşım elementinin çeliğin tane boyutunu küçülten V(CN) gibi çökeltileri oluşturduğu için çökelti sertleşmesi meydana getirip sertliği arttırdığından dolayı ortaya çıktığı açıklanmıştır [20].



**Şekil 4.2:** 55Cr3 yay çeliğine ait iç yapı görüntüleri  
a) döküm yapısı, b) sertleştirme işlemi, c) menevişleme işlemi [20].

51CrV4 çeliğine ait numune gruplarına iki farklı menevişleme sıcaklığı uygulanan bir çalışmada; numunelere 970 °C'de 30 dk. östenitleme işlemi uygulandıktan sonra yağda soğutulmuş ve ardından birinci numune grubuna 220 °C'de 120 dk. menevişleme işlemi uygulanmıştır. İkinci numune grubuna ise 315 °C'de 120 dk. menevişleme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem uygulanan numuneler mikroyapı, çekme testi, Charpy darbe testi ve aşınma testleri yapılarak farklı menevişleme sıcaklıklarının 51CrV4 çeliği üzerinde morfolojiye, mekanik özelliklere ve aşınma dayanımına etkisi incelenmiştir. İncelemeler neticesinde, ferritik yapı içinde dağılmış karbür içeren ve beynitik yapı içeren iki farklı mikroyapıya ulaşılmıştır. Yapılan EDS analizleri ile Cr elementinin homojenel dağılım gösterdiği fakat bazı bölgelerde karbür oluşmasına sebep olan C elementinin heterojenel bir yapı gösterdiği gözlemlenmiştir. XRD analizleri ile martenzit ve ferrit fazları gözlenmiş, ferrit fazının yumuşak yapısından dolayı numunelere uygulanan çekme, çentik darbe ve

aşınma testlerinde toklukla birlikte artış olduğu görülmüştür. Sonuç olarak en uygun menevişleme sıcaklığı 315 °C seçilmiştir [21].

51CrV4 yay çeliğine parabolik şekil verme (sıcak haddeleme), ısıl işlem ve bilyalı dövme işlemleri uygulandıktan sonra yay çeliğinin yüzey özelliklerinde ve iç yapısındaki değişimlerin mikroskopik olarak incelendiği bir çalışmada; numuneye ilk olarak 910 °C'de 4 pasoda parabolik şekil verme (sıcak haddeleme) işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından numune 1000 °C'de 35 dk. tutularak östenitleme işlemine tabi tutulmuştur. Fırın çıkış sıcaklığı 920 °C ve yağa giriş öncesi sıcaklığı 860 °C sıcaklıkta olan numuneye yağda su verme işleminden sonra 350-550 °C sıcaklık aralığında 50 dk. menevişleme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası S390 kalite çelik bilyaların 1700 rpm. ve 9 m/dk. hızla numuneye püskürtülmesiyle bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Her bir işlem sonrasında temin edilen numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlanmış ve kesitleri ışık mikroskobu (IM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Yüzeydeki oksit formunun ve içeriğinin analizi için ise enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDS) ile nitel bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde parabolik şekil verme sırasında oluşan tufalın (demir oksit yapısı) ısıl işlem sonrası uygulanan bilyalı dövme işlemi ile önemli ölçüde giderildiği, yay çeliğinin yorulma ömrünü uzattığı ve aynı zamanda bilyalı dövme işlemi ile yay çeliğinde oluşan dekarbürizasyon tabakasının azaltıldığı görülmüştür [10].

51CrV4 (SAE-AISI 6150) çeliğine indüksiyonla ısıtma ve konvansiyonel ısıtma yöntemi kullanılarak iki farklı ısıtma yönteminin karşılaştırılmasının yapıldığı, çeliğin mekanik özelliklerindeki ve iç yapısındaki değişikliklerin incelendiği bir çalışmada; 50x10x6 mm ölçülerinde numuneler kullanılmıştır. Numunelere ilk olarak konvansiyonel ısıtma yöntemi kullanılarak 870 °C'de 30 dk. normalizasyon tavlaması yapıldıktan sonra sırasıyla indüksiyonla ısıtma ve konvansiyonel ısıtma yöntemleri kullanılarak ısıl işlemler uygulanmıştır. İndüksiyon yöntemiyle yapılan ısıl işlem prosesinde sırasıyla; 870 °C'de 2 dk. su verme tavlaması, 40 °C'de yağda soğutma, menevişleme işlemi için ise; 420 °C'de 1 dk., 240 °C'de 1 dk. olarak iki farklı işlem uygulanmıştır ve numuneler havada soğumaya bırakılmıştır. İndüksiyonla yapılan ısıl işlemde; su verme tavlaması için orta frekanslı birim (45 kHz- 12 kW) indüksiyon mekanizması, menevişleme işlemi için düşük frekanslı birim (2.5 kHz- 5 kW) indüksiyon mekanizması kullanılmıştır. Konvansiyonel ısıtma ile yapılan ısıl işlemde ise; 870 °C'de 25 dk. su verme tavlaması, 40 °C'de yağda soğutma, menevişleme

işlemi için ise; 420 °C'de 180 dk., 240 °C'de 120 dk. olarak iki farklı sıcaklık-zaman uygulanmıştır ve numuneler havada soğumaya bırakılmıştır. Uygulanan ısıtma işlemlerinden sonra numunelerin Rockwell-C ve Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Numuneler, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. İç yapı incelemeleriyle normalize edilmiş numunelerde ferrit ve perlit karışımından oluşan iç yapı görülürken yağda soğutma işlemi ile martenzit fazının görüldüğü vurgulanmıştır. SEM incelemeleriyle normalizasyon tavlama uygulanan numunelerde ferrit fazındaki ince karbürler görülürken yağda soğutulmuş numunelerde martenzit fazının görüldüğü açıkça kanıtlanmıştır. Konvansiyonel ve indüksiyonla sertleştirme yöntemi kullanılarak üretilen numuneler arasında karbürlerin boyut ve dağılım farklılıkları belirlenememiştir. Yapılan incelemeler neticesinde indüksiyonla ısıtmanın hem östenitleme süresini hem de temperleme süresini kısalttığı, çelikte daha yüksek sertlik değerleri ile iç yapıda daha küçük tane boyutu sağladığı görülmüştür. Bu çalışma, indüksiyonun sadece su verme için değil, aynı zamanda temperleme için de kullanılabileceğini, bu işlemlerin daha hızlı ve daha düşük enerji tüketimi ile gerçekleştirilebileceğini de göstermiştir. Ayrıca, düşük frekanslı indüksiyonla yüzey etkisinin önlenirliği görülmüştür. Bununla birlikte, düşük frekansta hızlı ısıtma sağlanamadığından, orta frekansın su verme tavlama için düşük frekanstan daha uygun olduğunun sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için temperleme işleminde daha düşük bir frekansın seçilmesiyle daha iyi sonuçların ortaya çıkacağı sonucuna varılmıştır [22].

55Cr3, 51CrV4, 52CrMoV4 orta karbonlu yay çeliklerine derin kriyojenik işlem (DCT) ve konvansiyonel ısıtma işlemi (CHT) uygulanan bir çalışmada, DCT işlemi sırasıyla; 850 °C'de su verme tavlama, yağda soğutma, -196 °C'de 24 saat tutma, 500 °C'de 1 saat menevişleme şeklinde uygulanmıştır. CHT işlemi ise sırasıyla; 850 °C'de su verme tavlama, yağda soğutma, 500 °C'de 1 saat menevişleme şeklinde uygulanmıştır. Uygulanan ısıtma işlemlerinden sonra mekanik özellikleri belirlemek için Vickers sertlik, çekme ve Charpy çentik tokluğu testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda kriyojenik işlem uygulanan numunelerin mikrosertliklerinde, çentik darbe tokluklarında ve çekme mukavemetlerinde konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanan numunelere göre artış olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda buradaki artış miktarının çeliğin alaşımlama derecesine göre de arttığının sonucuna varılmıştır. Kriyojenik işlemin orta karbonlu yay çeliklerinin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili bir yöntem olarak sunulabileceği sonucuna varılmıştır [14].

55Cr3, 51CrV4, 52CrMoV4 orta karbonlu yay çeliklerine derin kriyojenik işlem (DCT) ve konvansiyonel ısıtım işlem (CHT) uygulanan bir çalışmada; SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kullanılarak XRD (Rietveld) analizi ile martenzitin tetragonallığı nicel olarak belirlenmiştir. SEM analizi sonuçlarında DCT numunesinin, CHT numunesine kıyasla karbür yoğunluğunda önemli bir artışa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca karbür yapılarında kabalaşma görülmüştür. Karbür yapısının daha yuvarlak hale geldiği, matris içinde daha homojen bir şekilde dağıldığı ve karbür çökeltisinin arttığı görülmüştür. Alışımın artmasıyla bu etkinin arttığı gözlemlenmiştir. XRD analizi sonrasında yapılan Rietveld analizi sonuçlarıyla kriyojenik işlemden sonra martenzitin tetragonalitesinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir [23].

55Cr3 (AISI-5155) yay çeliği numunelerinin sertleştirme işlemi için faz dönüşüm sıcaklıklarının ve kritik soğutma hızının numunelerin kimyasal bileşiminden tahmin edildiği bir çalışmada; numuneler 870 °C’de östenitlenip, havada ve yağda su verilmiş, ardından 400-550 °C sıcaklık aralığında 1, 2 ve 3 saat menevişlenmiştir. Menevişleme işlemlerinden sonra numuneler havada soğutulmuştur. Bu işlemlerin ardından numuneler iç yapı incelemesi için hazırlandıktan sonra %2 nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Uygulanan ısıtım işlemlerden sonra Rockwell sertlik, çekme ve yorulma testleri yapılmıştır. Ayrıca maksimum çubuk çapını ve sertleşebilirliği bulabilmek için Grossmann’ın kritik çap yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, menevişleme süresinin ve sıcaklığının artmasıyla sertlik ve çekme mukavemetinde kademeli bir azalma gözlenirken, süneklikte artış gözlemlenmiştir. Akma mukavemeti pik noktasına 450 °C menevişleme sıcaklığında ulaşmıştır. Maksimum yorulma ömrü 400 °C ile 450 °C menevişleme sıcaklıkları arasında gözlemlenmiştir. Yapısal açıdan bakıldığında yağda soğutmanın suda soğutmaya göre daha fazla kalıntı östenit oluşturduğu ortaya çıkmıştır. 400 °C ile 450 °C menevişleme sıcaklıklarında ferrit ve epsilon karbür oluşmuş ve 450 °C’nin üzerindeki menevişleme sıcaklıklarında ise küresel sementit oluşmuştur. Seçilen çubuğun ideal kritik çapı Grossman yöntemi ile 2.7 inç ve 2.5 inç olarak hesaplanmıştır. Yağda soğutma ve temperleme prosesinde gerekli özelliklerin elde edilmesi için optimum çubuk çapı 1.5 inç olarak ilişkilendirilmiştir. Ayrıca 450 °C’de, 1 saatlik temperleme koşulunun yay üretimi için optimum durum olduğu sonucuna varılmıştır [24].

51CrV4 yay çeliğine ısıtım işlem ve bilyalı kumlama uygulanarak yay çeliğinin yorulma mukavemeti, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada; 110x38.4 mm kesitinde, 1 mm kalınlığındaki numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, hiçbir

işlem görmemiş olanlar (WT), ısıtıl işlem uygulananlar (Q&T) ve sadece bilyalı kumlama işlemi uygulananlar (SP) olmak üzere 3 gruptan oluşturulmuştur. Isıl işlem prosesi olarak; 860 °C'de 2 saat 15 dk. tavlandıktan sonra yağda soğutulmuş, ardından 480 °C'de 15 dk menevişleme işlemi uygulanmıştır. Bilyalı kumlama işlemi ise; 0.6 MPa basınç altında 10 dakika boyunca 2 mm çapındaki yatak bilyaları ile her iki taraftan uygulanmıştır. Uygulanan işlemlerin neticesinde numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür, numunelere çekme, yorulma, mikro sertlik deneyleri uygulanmıştır. Yüzey tabakası sertleşme derecesi denklem 4.1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$S_u = \frac{HV_{\max} - HV_0}{HV_{\max}} \quad (4.1)$$

Deney sonuçlarına göre, Q&T numunelerinin en yüksek akma noktasına sahip oldukları vurgulanmış. SP numunelerinin kesin bir akma noktasına sahip olmadıkları ve Q&T numunelerinin maksimum çekme mukavemeti değerlerinin diğer numune gruplarına göre 2.1 kat daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Numunelerin en büyük toplam uzama değeri %24.3 ile SP numunelerinde gözlemlenmiştir. Q&T numunelerinin yüzey tabakasının sertleşme derecesi %52 iken SP'den sonra bu oran %22.6 olduğu ortaya çıkmıştır. Maksimum pürüzlülük değerleri Ra=2.180 µm ve Rz=12.800 µm olarak SP numunelerinde elde edilmiştir. Q&T numunelerinin Ra ve Rz parametreleri WT numunelerine göre 2.1 kat kadar arttığı ortaya çıkmıştır. Q&T ve SP işlemlerinin her ikisinin de 51CrV4 çeliğinin yorulma mukavemetini arttırmada önemli etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. En büyük etki, yorulma ömrünün %86.3 oranında arttığı Q&T numunelerinde elde edilmiştir. Sonuç olarak 51CrV4 çeliğinin Q&T ve SP sonrası mekanik özellikleri ve mikrosertliğinin yorulma mukavemeti ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir [25].

51CrV4 yay çeliğinin otomobillerde çarpışma kutusu malzemesi olarak kullanıldığı ve çarpışma dayanıklılığına ısıtıl işlemin ve kesit geometrisi etkisinin incelendiği bir çalışmada; numuneler öncelikle 400 °C'de 1 saat ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ön ısıtma işleminden sonra numuneler normalize edilmiştir. Bu işleminden ardından 850 °C'de 1 saat östenitleme işlemi uygulanan numuneler 80 °C'de yağda soğutulmuştur. Yağda soğutulan numuneler 400 °C, 440 °C ve 480 °C'de 75 dakika süreyle temperlenmiştir. Isıl işlemlerin ardından numunelere Rockwell sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Mekanik testlere ek olarak kare ve silindir kesit geometrisine sahip çarpışma kutuları SolidWorks programında

tasarlanmış ve RADIOSS açık zaman entegrasyon yöntemi ve lineer olmayan sonlu elemanlar kodları ile çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan mekanik testlerin sonucunda meneviş sıcaklığı arttıkça sertlik, akma mukavemeti ve çekme mukavemetinin azaldığı; yüzde uzama, süneklik ve toklukta artış olduğu gözlemlenmiştir. 51CrV4 yay çeliğinin ısıtma işlem sonrası mekanik özellikleri değiştiği için çarpışma performansı da değişmiştir. Isıtma işlem uygulamasının ve kesit geometrisinin çarpışma performansına ciddi etki yaptığı sonucuna varılmıştır. Çarpışma dayanıklılığı açısından silindirik kesite sahip çarpışma kutusunun tüm durumlarda daha iyi olduğu kanıtlanmıştır [18].

51CrV4 yay çeliğinde östenitleme sıcaklığının ve süresinin martenzitik dönüşüm üzerindeki etkisinin analiz edildiği bir çalışmada; numuneler vakum ve Ar atmosferi altında dilatometri ölçümleri için hazırlanmıştır. İlk olarak çeliğin 1000 °C'ye kadar vakumda ısıtılması ve soğutulması sırasında dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Sırasıyla 0.05 ve 10 °C/s'lik ısıtma ve soğutma hızları kullanılmıştır. İkinci aşamada, östenitleme sıcaklığının ve süresinin östenit kristal tanelerinin boyutu ve martenzit başlangıç sıcaklıkları ( $M_s$ ) üzerindeki etkisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler vakumda 10 °C/s ısıtma hızıyla 800 °C, 860 °C, 920 °C, 960 °C, 1000 °C ve 1040 °C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta sırasıyla 5, 10 ve 30 dakika tutulmuştur. Bu durumu Ar atmosferinde 40 °C/s hızında hızlı soğutma takip etmiştir.  $M_s$  sıcaklıkları, tanjant yöntemi kullanılarak dilatometrik soğuma eğrilerinden belirlenmiştir. Numunelere metalografik analizler, SEM analizleri ve EDS analizleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. Numunelerin kimyasal bileşimine dayanarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak denge fazı bileşimi Thermo-Calc programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan işlemler neticesinde; önceki östenit taneleri, östenitleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla büyümüş, sıcaklığın artmasıyla tane büyümesi daha yoğun olmuştur. Malzemenin üretim şekli nedeniyle numunelerde farklı dağılıma sahip segregasyon bantlarının mevcut olduğu kanıtlanmıştır. Segregasyon bantlarında alaşım elementlerinin konsantrasyonunda artış olduğu kanısına varılmış ve segregasyon alanlarında metalik olmayan kalıntılar ve daha yüksek karbür konsantrasyonu karakterize edilmiştir. 800 °C'lik bir östenitleme sıcaklığında, östenitte kısmi bir dönüşüm meydana gelmiştir ve bu sıcaklıkta daha uzun tutma süresiyle dönüşümün daha büyük bir oranı gerçekleşmiş olup bu durumda da  $M_s$ 'nin düşmesini etkilemiştir. Östenitik dönüşümün tam olması durumunda kristal tanelerin büyümesiyle  $M_s$  sıcaklığı artmıştır ve 960 °C'nin üzerinde  $M_s$  sıcaklığı alaşım elementlerinin dağılımından da etkilenmiştir. Alaşım elementlerinin daha yoğun difüzyonu ve ayrışmaların



farklı derecelerdeki dağılımı nedeniyle  $M_s$  sıcaklığında daha büyük sapmalar oluşmuştur. Thermo-Calc programı kullanılarak yapılan termodinamik hesaplamalarla 51CrV4 yay çeliğindeki vanadyum karbürlerin 956 °C'ye kadar stabil olduğu ortaya çıkmıştır. Yerel homojensizlikler ve karbür çözünme süresinin sınırlı olmasından dolayı SEM analizi ile vanadyum karbürleri 1040 °C'ye kadar yüksek östenitleme sıcaklıklarında bile analiz edilebilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri ise 706 ile 739 HV arasında ölçülmüştür. 800 °C ve 860 °C'ye ısıtılan numuneler için, östenitleme süresi arttıkça hafif bir sertlik artışı eğilimi gözlenmiştir [26].

55Cr3 (SUP 9) yay çeliğinin otomobillerde yaprak üretiminde kullanıldığı, sünek-gevrek geçiş sıcaklığının bulunmak istendiği bir çalışmada; numuneler ilk olarak 900 °C'de 20 dakika östenitlenmiş, ardından yağda soğutulmuştur. Sertleştirme işleminden sonra 480 °C ve 600 °C'de 3 saat menevişleme işlemi ve yağda soğutma yapılmıştır. Bu ısıl işlemin haricinde iç yapıda alt, orta ve üst beynit yapısı elde etmek için numunelere sırasıyla; 900 °C'nin üzerinde 20 dakika östenitleme, ardından 350, 400 ve 450 °C sıcaklıklarındaki tuz banyosunda 2 saat bekletme, yağda soğutma işlemleri uygulanmıştır. Numunelere Charpy darbe testleri farklı darbe sıcaklıklarında (-20, -10, -5, 0, 10, 20, 30 °C) sünek-gevrek geçiş sıcaklığının bulunabilmesi için yapılmıştır. Darbe testleri yapılırken numunelerin kriyojenik test sıcaklıklarına ulaşılabilmesi için numuneler sıvı nitrojende 20 dakika bekletilmişlerdir. Yapılan test ve incelemelerin neticesinde, yay çeliğinin tokluk değerlerine bakıldığında en yüksek tokluk, 450 °C'de östemperleme sonrasında ölçülmüştür. Tokluktaki maksimum artış, 600 °C'de menevişlenmiş numunelerde gözlenmiştir. Sertlik ile tokluk arasında ters bir ilişki olduğunu öne sürülmüştür. Menevişleme sıcaklığının 480 °C'den 600 °C'ye artırılmasıyla martenzit çıtalarının kabalaştığı görülmüştür. Östemperleme işlemi ile östenitin üst, orta ve alt beynite dönüşümü görülmüştür. Gözlemlenen süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklığının, belirli bir sıcaklıkta değerlendirilmesinin zor olduğu öne sürülmüştür. Ancak kırılma görünümü yaklaşımı kullanıldığında temperlenmiş ve östemperlenmiş numunelerin geçiş sıcaklığının -10 °C'de olduğu vurgulanmıştır. Östemperlenmiş numunelerde tokluktaki maksimum artış -5 °C'de ölçülmüştür. Darbe test sıcaklığının azalmasıyla birlikte tokluğun arttığı gözlemlenmiştir. Yaprak yay imalatında sıklıkla kullanılan 450 °C menevişleme işlemine alternatif olarak 600 °C'de menevişleme işlemi önerilmiştir [27].

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1 Deneyin Amacı

Yaprak yayların imalatında sıklıkla kullanılan orta karbonlu 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerine uygun şartlar altında ısıl işlem uygulanarak bu çeliklerin mekanik özellikleri ve iç yapısı optimum hale getirilebilmektedir.

Bu çalışmada, 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliği numunelerine farklı sıcaklıklarda menevişleme (temperleme) işlemi uygulanarak iç yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimler ilgili test yöntemleri ile incelenerek optimum mekanik özelliklerin sağlandığı meneviş sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

### 5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Numune hazırlamak için Döşemenler Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.'nin yaprak yay üretimi için tedarik ettiği, sıcak biçimlendirilmiş 51CrV4 ve 55Cr3 yay çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklere ait kimyasal bileşimler (% ağırlık) Tablo 5.1'de verilmiştir. Çeliklerin % karbon eşdeğerleri ( $C_{eş}$ ), denklem 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır [28].

**Tablo 5.1:** 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Yay Çeliği	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Sn	V
51CrV4	0.49	0.26	0.87	0.008	0.012	0.99	0.02	0.08	0.023	0.10	0.007	0.124
55Cr3	0.54	0.23	0.83	0.004	0.006	0.82	0.03	0.09	0.015	0.08	0.009	-

$$C_{eş} = C + \left(\frac{Mn}{6}\right) + \left(\frac{Cr + Mo + V}{5}\right) + \left(\frac{Ni + Cu}{15}\right) \quad (5.1)$$

51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliğinden deney parçaları sırasıyla 80mm x 20mm (genişlik x kalınlık) ve 70mm x 16mm Profil-A yassı lamalardan Repkon marka hidrolik kesim presi yardımıyla kesilmiştir (Şekil 5.1 ve 5.2). Çıkarılan parçalar şerit testere makinesinde, Şekil 5.3'te gösterildiği gibi hadde yönüne dik olacak şekilde kesilmiştir. Çekme ve Charpy V-çentik darbe numunelerinin standarda uygun teknik resimleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterildiği gibi SolidWorks 2016 çizim programında çizilmiş, SolidCAM 2016

programında programı yazılmış ve CNC freze makinesinde işlenmek üzere numuneler hazır hale getirilmiştir. Twinhorn marka VP-1100 model 3 eksen CNC freze makinesinde freze işlemi ile numuneler standartlara uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7). Ayrıca 10mm x 10mm kesitinde uygun boyutlarda sertlik, iç yapı ve XRD analizi numuneleri de hazırlanmıştır.



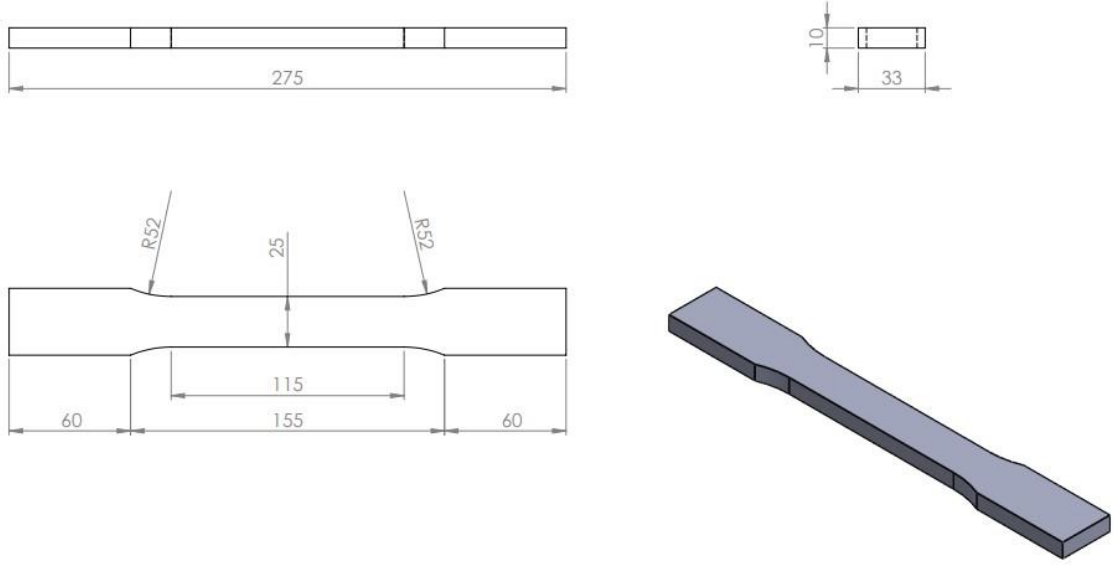
**Şekil 5.1:** 51CrV4 yay çeliğine ait yassı lamalar.



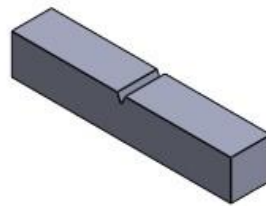
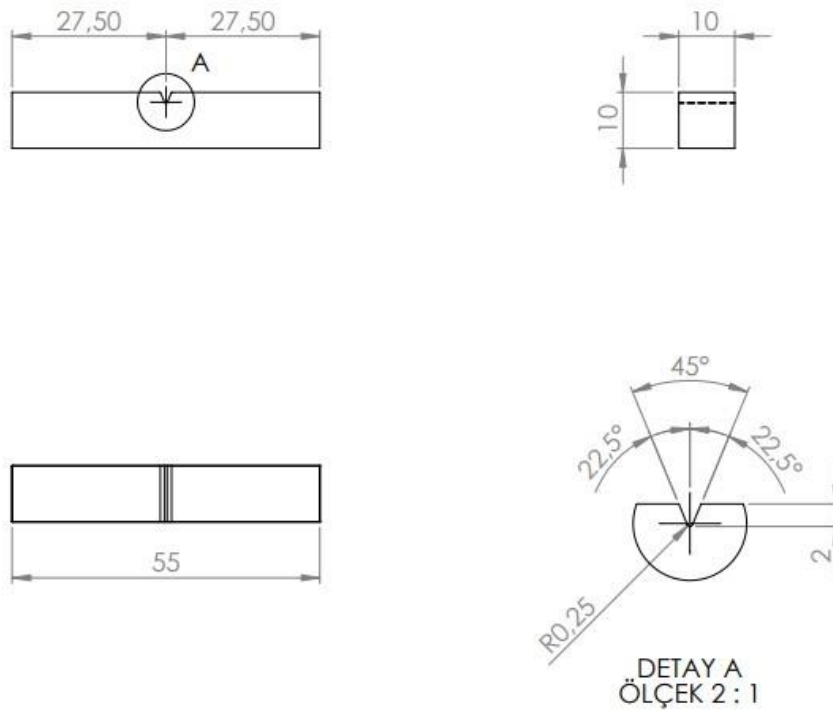
**Şekil 5.2:** 55Cr3 yay çeliğine ait yassı lamalar.



**Şekil 5.3:** Numunelerin hadde yönüne dik olarak kesilmesi.



Şekil 5.4: Çekme numunesine ait teknik resim.



Şekil 5.5: Charpy V- çentik darbe numunesine ait teknik resim.



**Şekil 5.6:** CNC freze makinesinde çekme numunesinin işlenmesi.



**Şekil 5.7:** CNC freze makinesinde Charpy V-çentik darbe numunesinin işlenmesi.

### 5.3 Isıl İşlemler

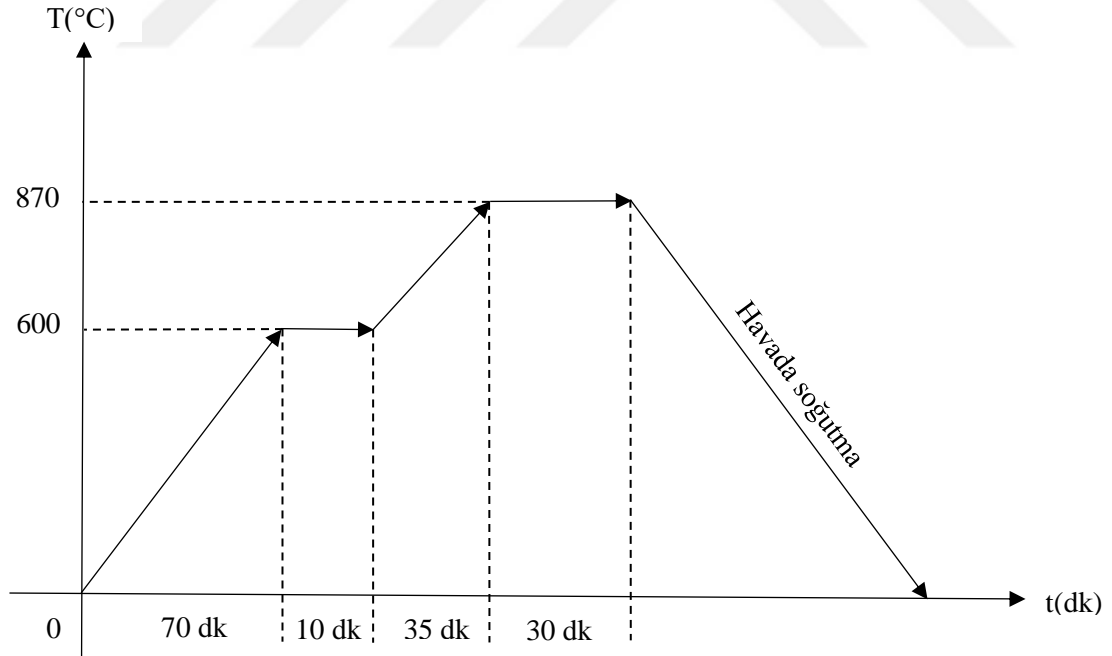
Numunelere Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında Şekil 5.8’de gösterilen Protherm marka PLF 110/45 model kamara fırınında ısıl işlem (normalizasyon ve ıslah işlemleri) uygulamaları yapılmıştır.

Öncelikle, deney numunelerinin aynı başlangıç iç yapısında olması ve üretimden kaynaklanabilecek iç yapı olumsuzluklarını önlemek için her iki çeliğin tüm numunelerine normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon ısıl işlemi, 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliği numunelerine 600 °C’de 10 dakika ön ısıtma işleminden sonra 870 °C’de 30 dakika östenitleme ve ardından havada soğutma işlemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9).

Normalizasyon işlemi uygulanan numuneler, malzemelerin ham hali olarak kabul edilerek her iki çelikten de birer grup bu haliyle testlere tabi tutulmuştur. Diğer numunelere östenitleme, yağda soğutma ve menevişleme işlemlerinden oluşan Şekil 5.10’da gösterilen ıslah (sertleştirme + menevişleme) işlemleri uygulanmıştır. Islah işlemi için numunelere 600 °C’de 10 dakika ön ısıtma, 870 °C’de 30 dakika östenitleme ve yağda soğutma ile sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Fırın ısıtma hızı yaklaşık  $8\pm 1$  °C/dk olarak ayarlanmıştır. Sertleştirme işleminden yaklaşık 2 saat sonra numune grupları 300, 375, 450 ve 525 °C sıcaklıklarda 120 dakika boyunca ayrı ayrı menevişlenerek havada soğutulmuşlardır. Yağda soğutma (ani soğutma) prosesi Döşemenler Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.’den tedarik edilen PETROFER marka ISORAPID 277 HM ısıl işlem yağı kullanılarak oda sıcaklığındaki yağ içinde 5 dakika süreyle uygulanmıştır.

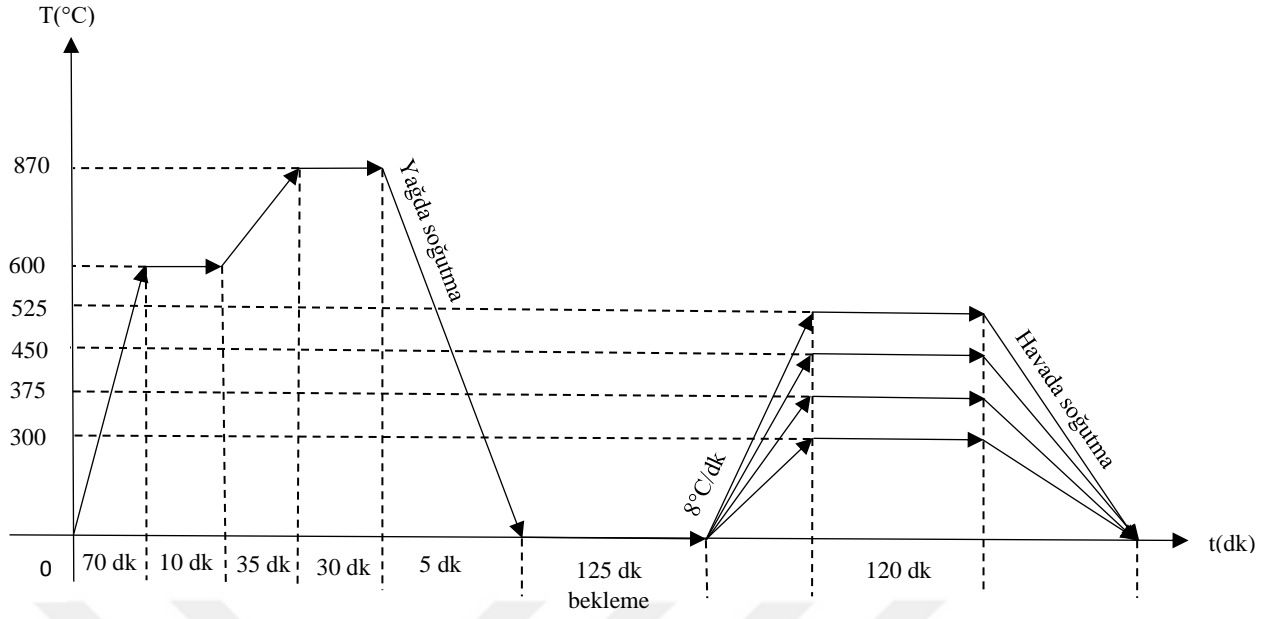


Şekil 5.8: Protherm PLF110/45 kamara fırını.



Şekil 5.9: Normalizasyon ısıtma işlemine ait sıcaklık (T)-zaman (t) grafiği.





**Şekil 5.10:** Islah (sertleştirme + menevişleme) işlemine ait sıcaklık (T)-zaman (t) grafiği.

#### 5.4 İç Yapı Analizi

Numuneler, Şekil 5.11’de gösterilen Struers marka Hexamatic Robotik zımparalama ve parlatma cihazında 60, 30, 15, 3 mikron elmas zımparalama diskleri kullanılarak su altında zımparalanmıştır. Ardından aynı cihaz kullanılarak 3 mikron elmas parlatma keçesi ve 3 mikron parlatma süspansiyonu kullanılarak numuneler parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra numunelere %3 Nital çözeltisi (%97 alkol + %3 nitrik asit) 20-25 sn. uygulanarak dağlama yapılmıştır. Numune hazırlama işlemlerinden sonra numunelerden Şekil 5.12’de gösterilen OLYMPUS marka BX51M model metalurji mikroskopunda 100x büyütmede iç yapı görüntüleri alınmıştır.



**Şekil 5.11:** Struers marka Hexamatic Robotik zımparalama ve parlatma cihazı [29].



**Şekil 5.12:** OLYMPUS marka BX51M model metalurji mikroskobu [30].

### **5.5 XRD Analizi**

300 °C ve 525 °C meneviş sıcaklığında ıslah işlemi uygulanan 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliği numunelerinin X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi Laboratuvarı'nda, GBC MMA-027 X-Ray Difraktometre cihazı kullanılarak  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 0.154$  nm) dalga boyu ile  $2\theta$  60°-105° arasında 1 °/dk adım aralığı ile taranmıştır. Taramalarda 35 kV ve 28.5 mA kullanılmıştır.

## 5.6 Sertlik Testleri

Numunelerin Vickers sertlik ölçümleri, TS EN ISO 6507-1 standardına göre Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜBTAM) Makine Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 5.13'te gösterilen Zwick/Roell marka ZHU250 model sertlik cihazında, 10 kg. yük altında, 8 sn. uygulama süresi ve 10 sn. bekleme süresi olacak şekilde uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri her bir numunenin 5 farklı yerinden uygulanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.13: Zwick/Roell marka ZHU250 model sertlik cihazı.

Numunelerin Rockwell sertlik ölçümleri, TS EN ISO 6508-1 standardına göre Şekil 5.14'te gösterilen EMCO-TEST marka Durajet DJ10G5 model sertlik cihazında, 150 kg. yük altında uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri her bir numunenin 4 farklı yerinden uygulanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



**Şekil 5.14:** EMCO-TEST marka Durajet DJ10G5 model sertlik cihazı [31].

### 5.7 Çekme Testleri

Çekme testlerine başlamadan önce çekme numunelerinin her birinin ilk boy ölçülerini belirleyebilmek için denklem 5.2 ve 5.3 kullanılmıştır. Denklemlerde kullanılan  $L_0$ ; ilk boy ölçüsü (mm),  $A_0$ ; ilk kesit alanı ( $\text{mm}^2$ ),  $a_0$ ; ilk kalınlık (mm),  $b_0$ ; ilk genişlik (mm) ölçüsüdür.

$$L_0 = 5.65 * \sqrt{A_0} \quad (5.2)$$

$$A_0 = a_0 * b_0 \quad (5.3)$$

Çekme numunelerinin testleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi Mekanik Metalurji Laboratuvarı'nda, Şekil 5.15'de gösterilen SCHIMADZU marka UH - F1000kN model çekme test cihazında, 5 mm/dk çekme hızında, oda sıcaklığında (25 °C), TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Her ısıl işlem şartı için 3 adet çekme deneyi yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



**Şekil 5.15:** SCHIMADZU marka UH - F1000kN model çekme test cihazı.

Çekme test cihazından alınan maksimum kuvvet değerleri denklem 5.4'te yerine yazılarak çekme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Denklemde,  $\sigma_{\zeta}$ ; çekme mukavemeti (N/mm<sup>2</sup>),  $F_{\max}$ ; maksimum kuvvet (N),  $A_0$ ; ilk kesit alanı (mm<sup>2</sup>) ifade etmektedir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (5.4)$$

Akma mukavemeti değerleri ise %0.2 birim şekil değiştirme değerinden çekme eğrisinin doğrusal kısmına paralel çizilerek eğriyi kestiği noktadan  $\sigma_{0.2Ak}$  olarak elde edilmiştir.

Yüzde uzama değerleri, denklem 5.5 ile elde edilmiştir. Denklemde,  $L_0$ ; ilk boy ölçüsü (mm),  $L_s$ ; son boy ölçüsü (mm) olarak kullanılmıştır.

$$\%UZ = \left( \frac{L_s - L_0}{L_0} \right) * 100 \quad (5.5)$$

Yüzde kesit daralması değerleri, denklem 5.6 ile elde edilmiştir. Denklemde,  $A_0$ ; ilk kesit alanı ( $\text{mm}^2$ ),  $A_s$ ; son kesit alanı ( $\text{mm}^2$ ) olarak kullanılmıştır.

$$\%KD = \left( \frac{A_0 - A_s}{A_0} \right) * 100 \quad (5.6)$$

Tokluk değerleri, denklem 5.7 ile elde edilmiştir [32]. Denklemde,  $U_T$ ; tokluk ( $\text{J}/\text{cm}^3$ ),  $\sigma_C$ ; çekme mukavemeti ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $UZ$ ; uzama ( $\text{mm}/\text{mm}$ ) olarak kullanılmıştır.

$$U_T = \frac{2}{3} * (\sigma_C * UZ) \quad (5.7)$$

### 5.8 Charpy Darbe Testleri

Charpy V-çentik darbe testleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi Mekanik Metalurji Laboratuvarı'nda Şekil 5.16'da gösterilen 30 kpm kapasiteli Mohr & Federhaff A.G. marka darbe test cihazında TS EN ISO 148-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Meneviş sıcaklığının darbe geçiş sıcaklığına etkisini belirlemek amacıyla numuneler  $+80\text{ }^\circ\text{C}$ , oda sıcaklığı ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $0\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarında darbe deneyine tabi tutulmuşlardır.  $+80\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık için Şekil 5.17'de gösterilen BINDER marka etüv fırınında numuneler 30 dakika süre ile bekletilmişlerdir.  $0\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarına ise PMT TAMSON marka TLC40 model soğutma sirkülatöründe numunelerin etil alkol içinde 30 dakika bekletilmesi ile ulaşılmıştır (Şekil 5.18). Soğutma sirkülatöründeki sıcaklık ölçümleri, Şekil 5.19'da gösterilen Testo 925 daldırma tip termometre ile yapılmıştır. Ayrıca bir grup numuneye darbe sıcaklığı  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  için sıvı azotla soğutma işlemi uygulanmış fakat ölçülen darbe enerjisi değerleri  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki değerlere çok yakın sonuçlar verdiği için diğer numunelere  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de darbe testi uygulanmamıştır ve bu sebeple en düşük  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 'de darbe testleri yapılmıştır.



Şekil 5.16: Mohr & Federhaff A.G. darbe test cihazı.



Şekil 5.17: BINDER etüv fırını.



Şekil 5.18: PMT TAMSON TLC40 soğutma sirkülatörü.



Şekil 5.19: Testo 925 daldırma tip termometre ile sıcaklık ölçümünün yapılması.



## 5.9 SEM Analizi

Charpy V-çentik darbe testi yapıldıktan sonra kırılan yüzeylerin morfolojik olarak incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi Mekanik Metalurji Laboratuvarı'nda, Şekil 5.20'de gösterilen Hitachi marka TM-1000 model SEM cihazı 500x büyütme kullanılarak yapılmıştır. Normalize edilmiş çeliklerin oda sıcaklığında darbe deneyleri sonucunda kırılan yüzeyleri ile 300 °C ve 525 °C'de menevişlenen çeliklerin -40 °C ve +80 °C sıcaklıklarda darbe deneyleri sonucunda kırılan yüzeyleri incelenmiştir.



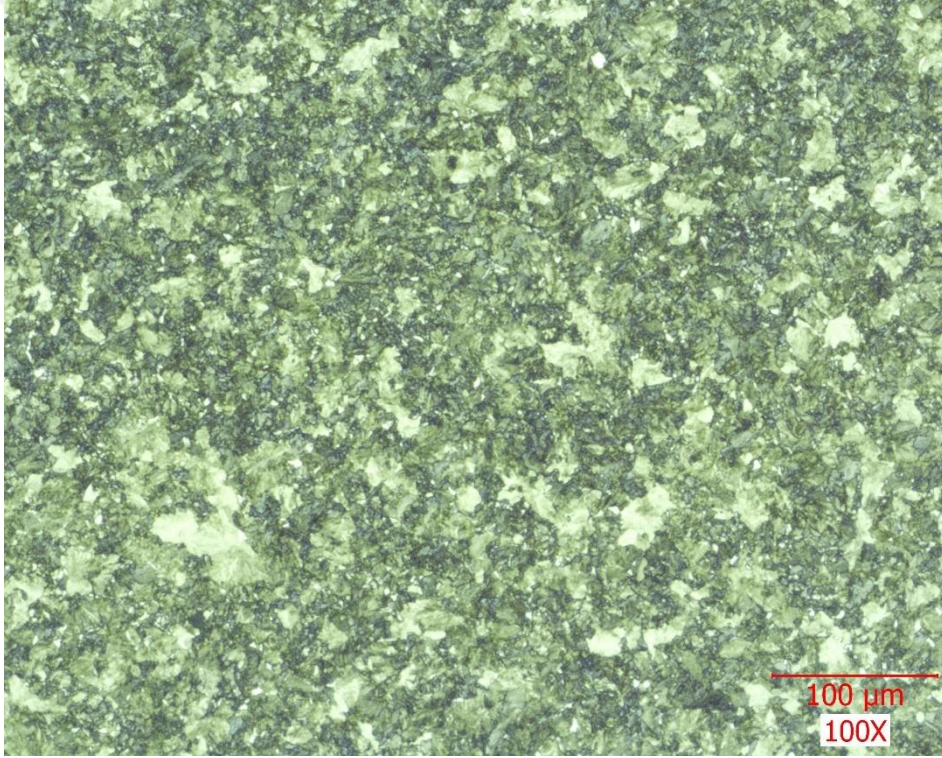
Şekil 5.20: Hitachi marka TM-1000 model SEM cihazı [33].

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

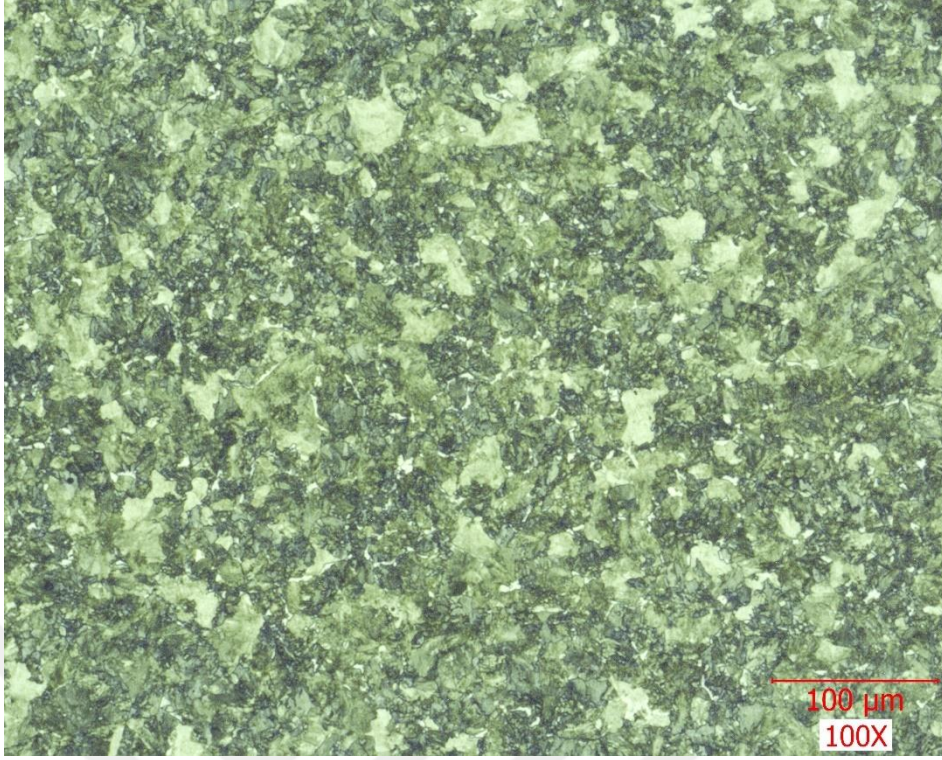
51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin % karbon eşdeğerleri (Ceş) sırasıyla, 0.87 ve 0.86 olarak birbirlerine çok yakın elde edilmiştir. Çalışmada bu çeliklerin meneviş sıcaklıklarının (300, 375, 450 ve 525 °C) iç yapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiş ve deney sonuçları aşağıdaki alt başlıklarda sırasıyla tartışılmıştır.

### 6.1 İç Yapı Analizi Sonuçları

51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerine normalizasyon işlemi uygulanması sonucunda oluşan iç yapı görüntüleri 100x büyütmede Şekil 6.1 ve 6.2’de verilmiştir. İç yapılardan görüldüğü üzere her iki çelik iç yapısında az oranda ferrit ve daha ağırlıklı olarak perlit fazları görülmektedir.

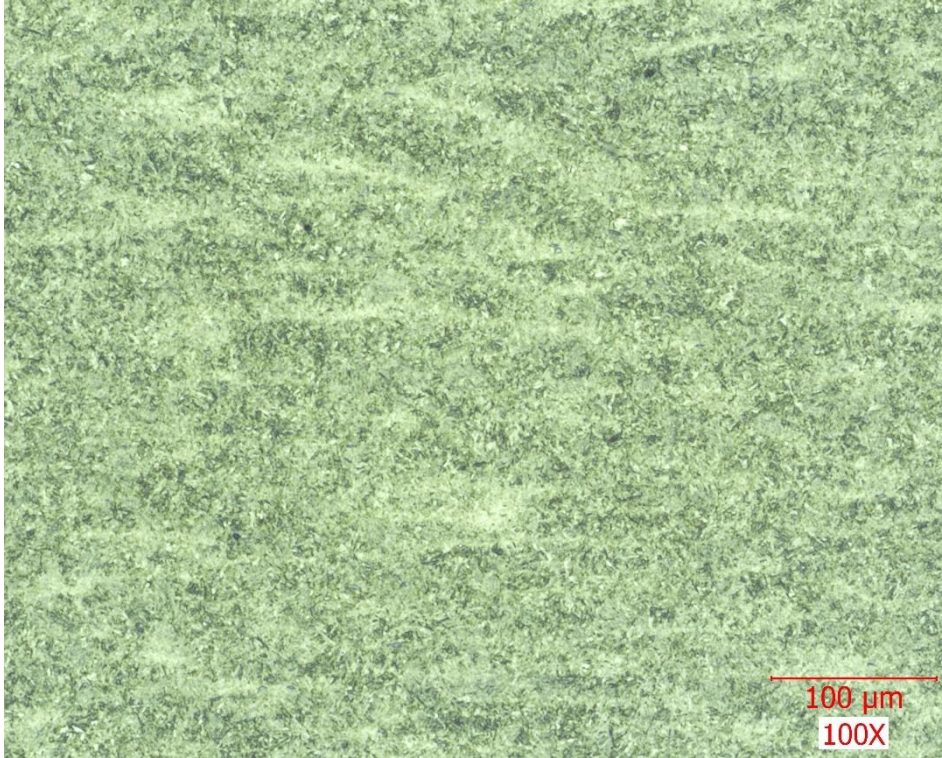


Şekil 6.1: 51CrV4 yay çeliğinin normalizasyonla oluşan iç yapı görüntüsü.

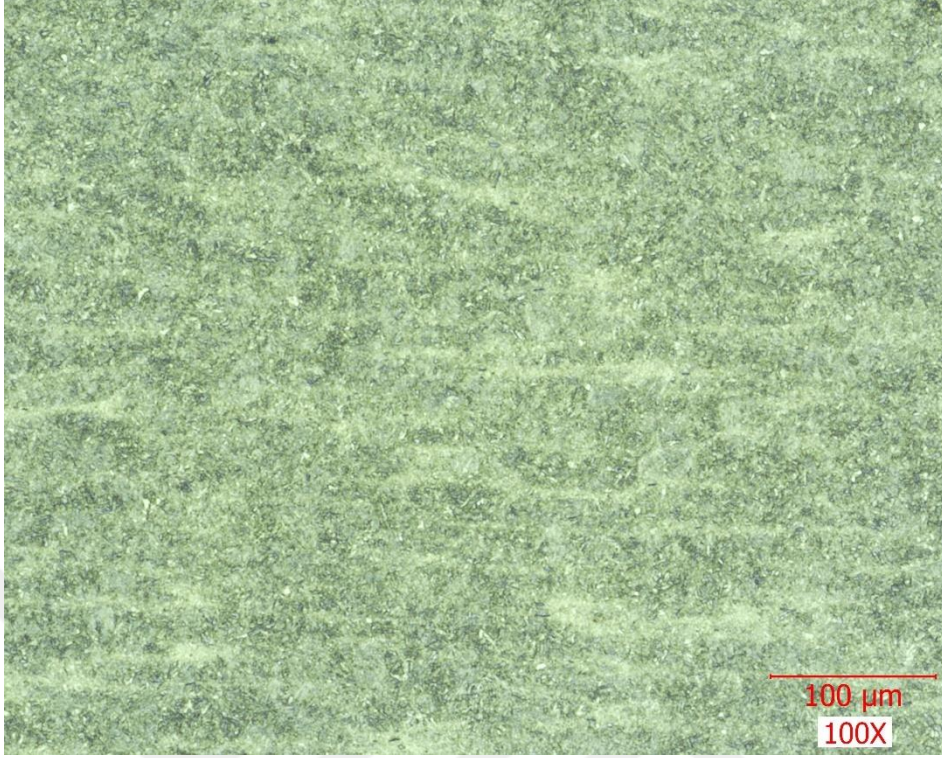


**Şekil 6.2:** 55Cr3 yay çeliğinin normalizasyonla oluşan iç yapı görüntüsü.

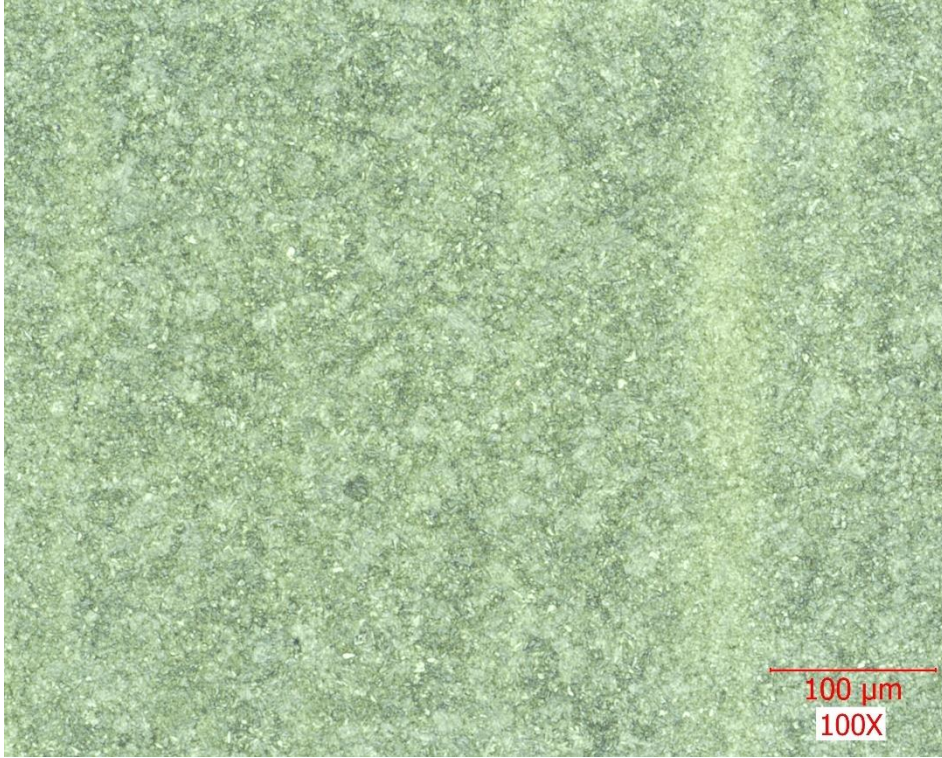
51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin farklı menevişleme sıcaklıklarında oluşan iç yapıları, 100x büyütmede Şekil 6.3-6.10 arasında verilmiştir.



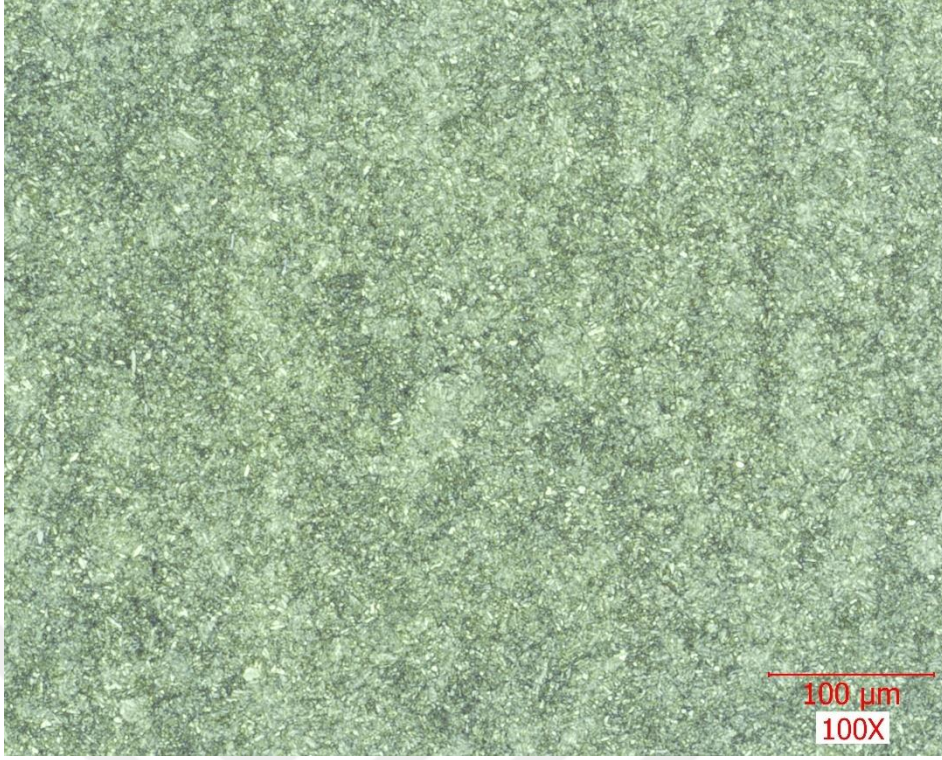
**Şekil 6.3:** 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C'de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



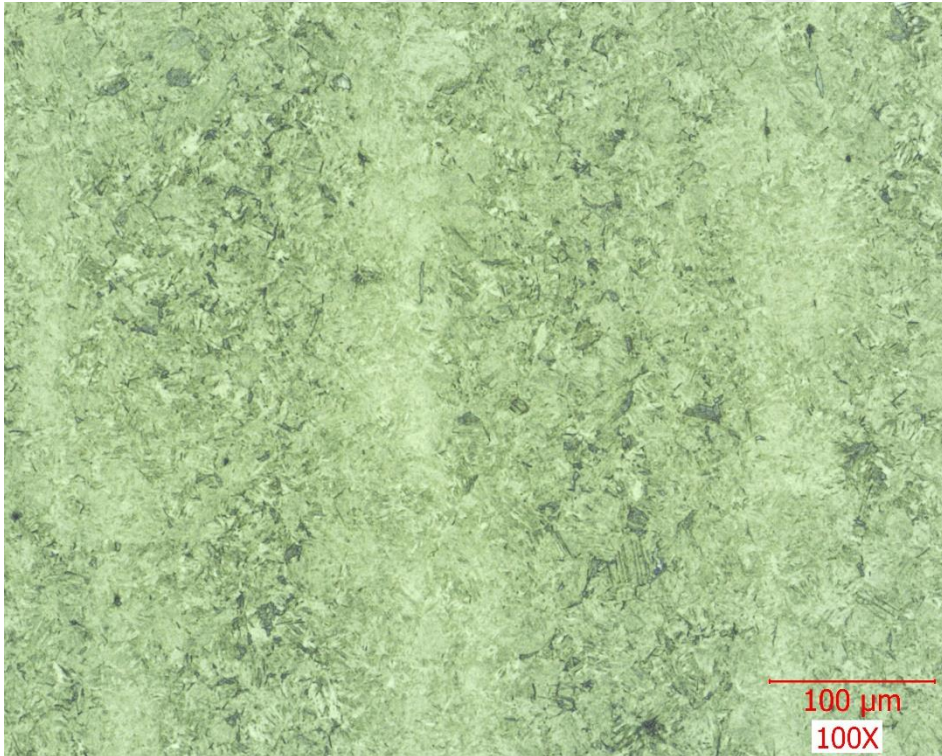
**Şekil 6.4:** 51CrV4 yay çeliğinin 375 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



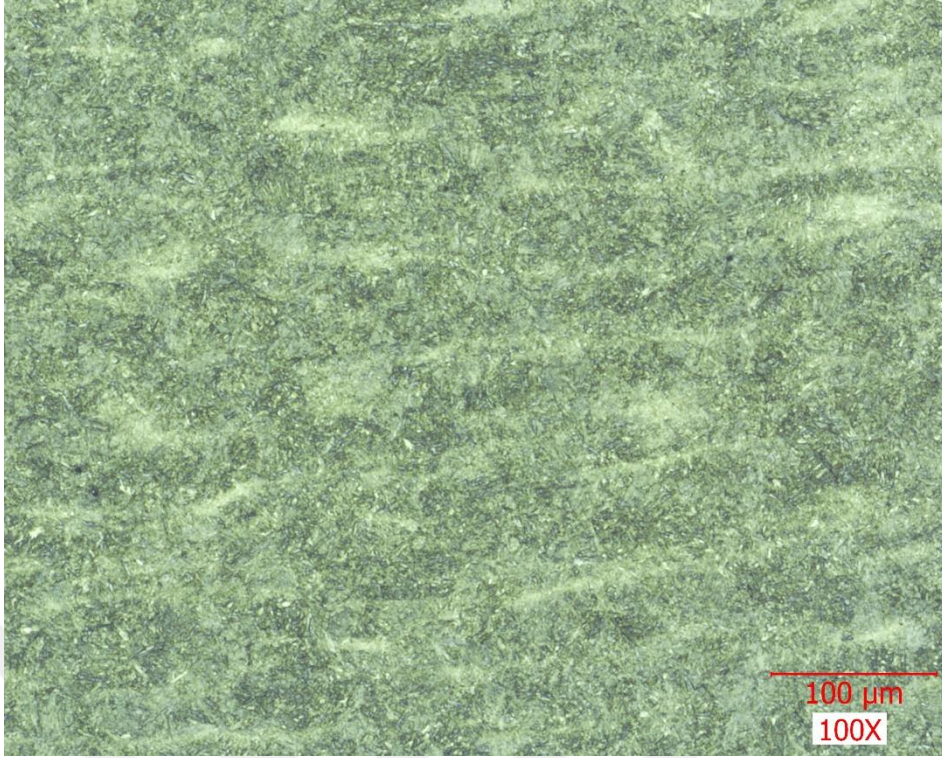
**Şekil 6.5:** 51CrV4 yay çeliğinin 450 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



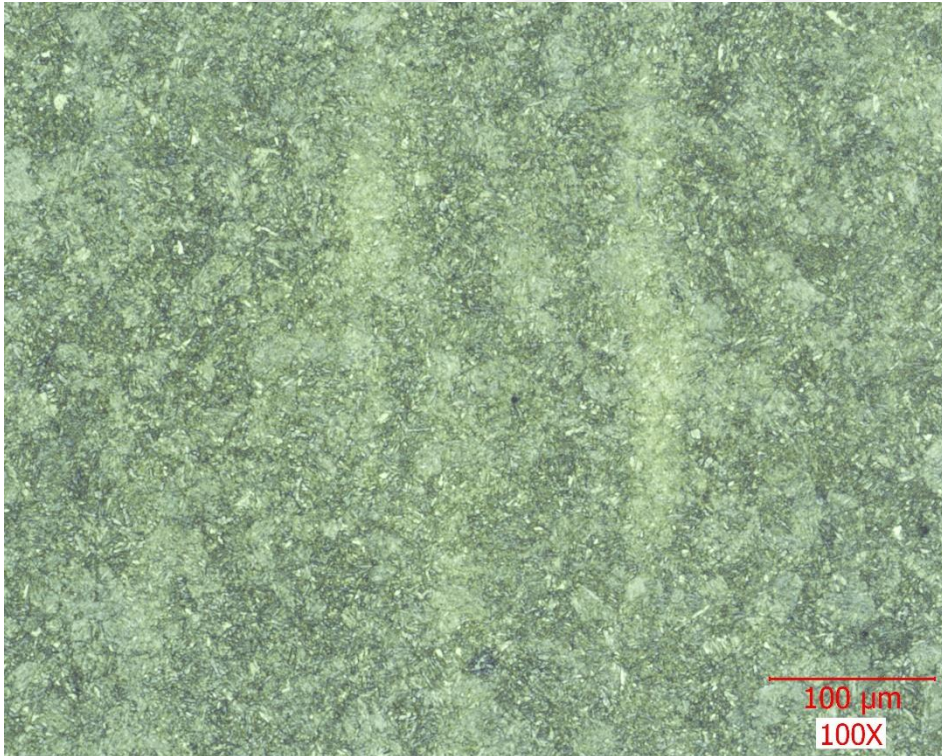
**Şekil 6.6:** 51CrV4 yay çeliğinin 525 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



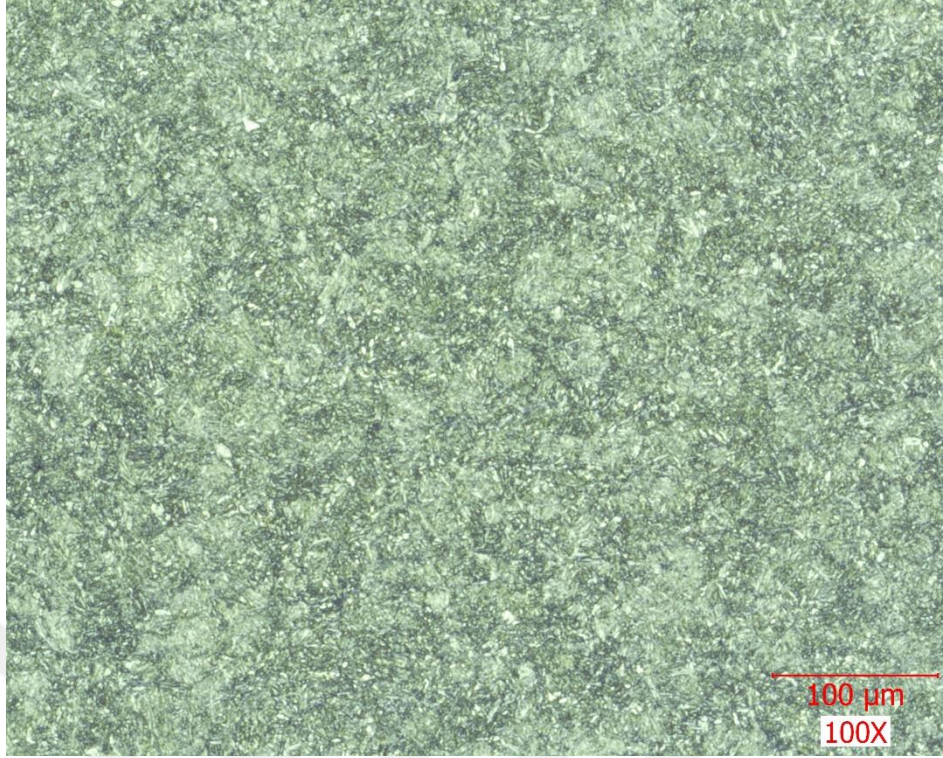
**Şekil 6.7:** 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



Şekil 6.8: 55Cr3 yay çeliğinin 375 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



Şekil 6.9: 55Cr3 yay çeliğinin 450 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.



**Şekil 6.10:** 55Cr3 yay çeliğinin 525 °C’de menevişlenmesiyle oluşan iç yapı görüntüsü.

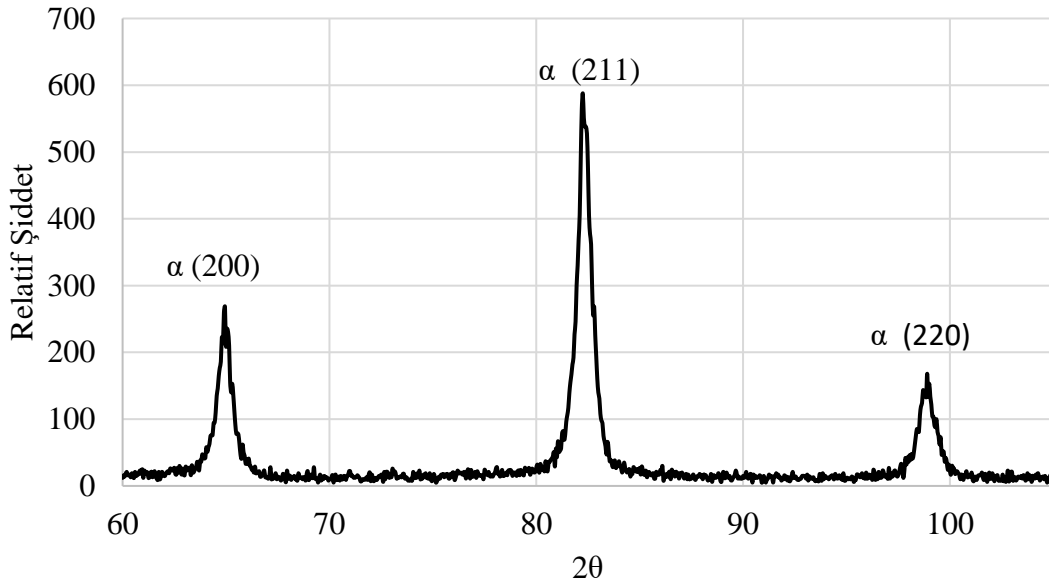
51CrV4 ve 55Cr3 yay çelikleri, farklı menevişleme sıcaklıklarında iç yapısal olarak karakteristik davranışlar göstermiştir. Her iki çelik grubunun 300, 375 ve 450 °C’de menevişlenmiş numunelerinde temperlenmiş martenzit ve segregasyon bantları gözlenirken 525 °C’de menevişlenmiş numunelerde segregasyon bantlarının yok olduğu ve sadece temperlenmiş martenzit fazı görülmüştür. Menevişleme sıcaklığı arttıkça temperlenmiş martenzit fazının kabalaştığı ve homojenize bir şekilde yayıldığı görülmüştür.

Literatür incelendiğinde, 4 farklı yay çeliğiyle yapılan bir çalışmada 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 400 °C’de menevişleme işlemi sonrasında yay çeliklerinin iç yapılarında daha çok temperlenmiş martenzit ve ferrit çökmesi görülmüştür [20]. 51CrV4 yay çeliğine ısıtma işleminin konvansiyonel ve indüksiyonla yapıldığı bir çalışmada ise normalize edilen numunelerin iç yapılarında ferrit ve perlit fazlarından meydana geldiği gözlenirken ısıtma işlem türünün iç yapıya etkisinin az olduğu görülmüştür. Su verme işlemiyle iç yapıda martenzit fazının oluştuğu gözlenirken 240 ve 420 °C menevişleme sıcaklıklarının uygulanmasıyla iki meneviş sıcaklığı dikkate alındığı zaman numunelerin iç yapılarında belirgin farklılıklar gözlenmemiştir [22]. 55Cr3 yay çeliği üzerine yapılan bir çalışmada ise çelik numunelerin yağ ve suda soğutulmasıyla martenzit ve kalıntı östenit gözlenmiştir. Her bir menevişleme süresinde 400 ve 450 °C menevişleme sıcaklıklarında numunelerin iç yapılarında ferrit ve

epsilon karbür yapılarından oluşan beynitik yapı gözlenirken 500 ve 550 °C menevişleme sıcaklıklarında Fe<sub>3</sub>C çökeltisi ve ferrit matrisi gözlenmiştir [24]. Yapmış olduğumuz iç yapı çalışmasının literatürle uyum sağladığı gözlenmiştir.

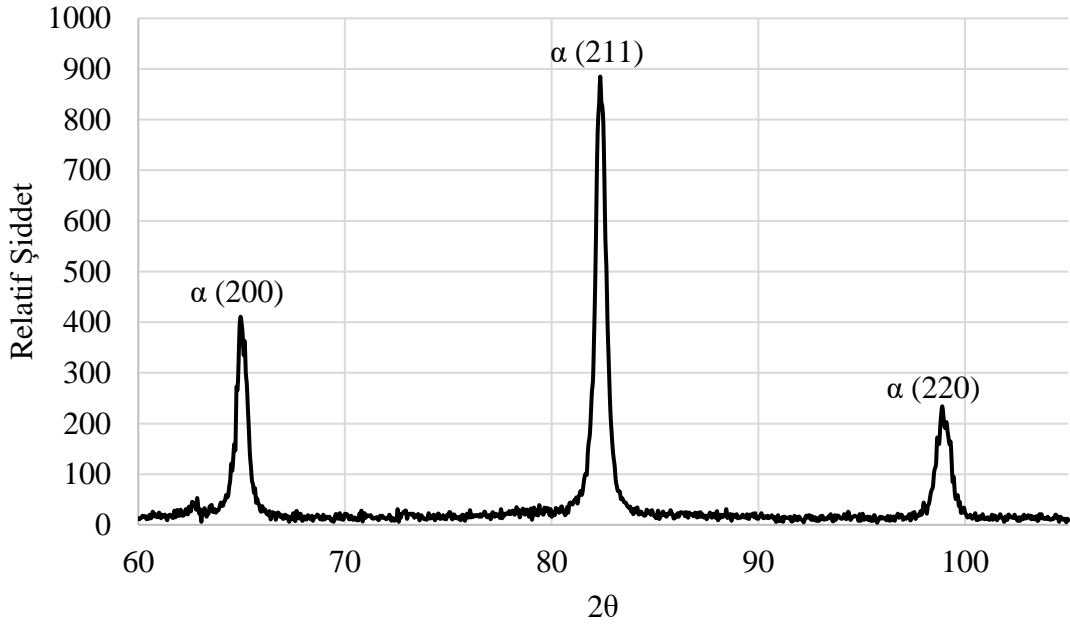
## 6.2 XRD Analizi Sonuçları

51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerine en düşük (300 °C) ve en yüksek (525 °C) menevişleme sıcaklıkları uygulandıktan sonra çeliklerin içerdikleri fazları, özellikle kalıntı östenit fazını görebilmek için 60-105 derece arasında XRD analizi uygulanmıştır ve grafikleri Şekil 6.11-6.14 arasında verilmiştir.

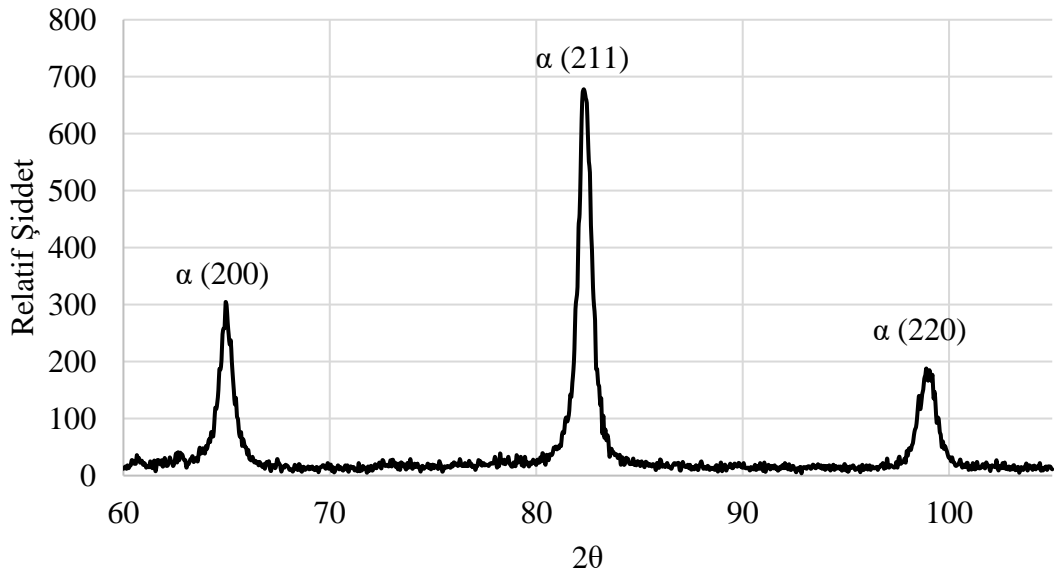


Şekil 6.11: 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.

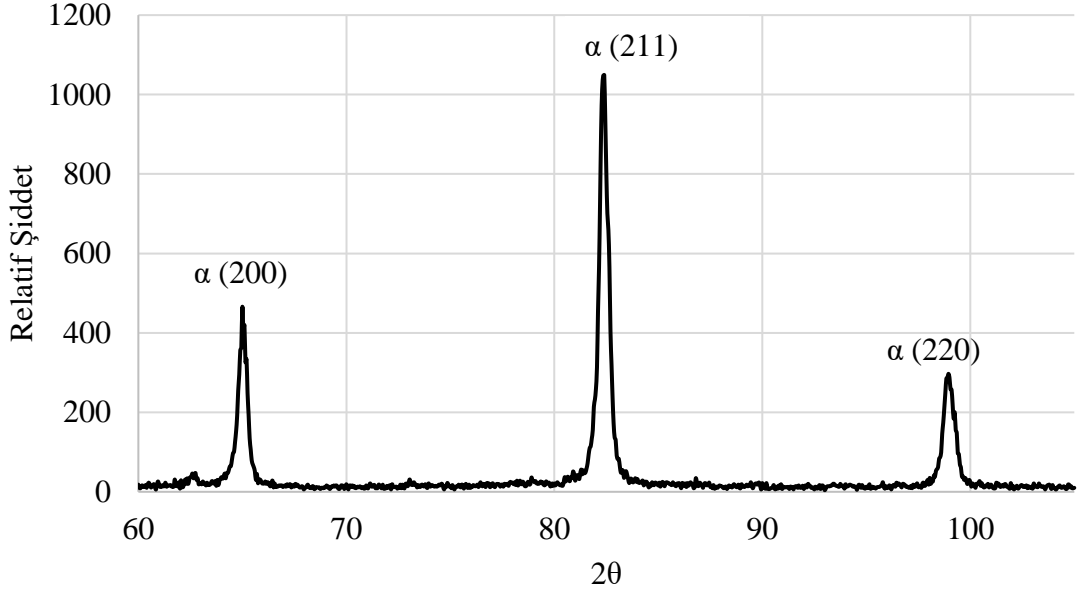




Şekil 6.12: 51CrV4 yay çeliğinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.



Şekil 6.13: 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.



**Şekil 6.14:** 55Cr3 yay çeliğinin 525 °C menevişle sıcaklığındaki XRD analiz grafiği.

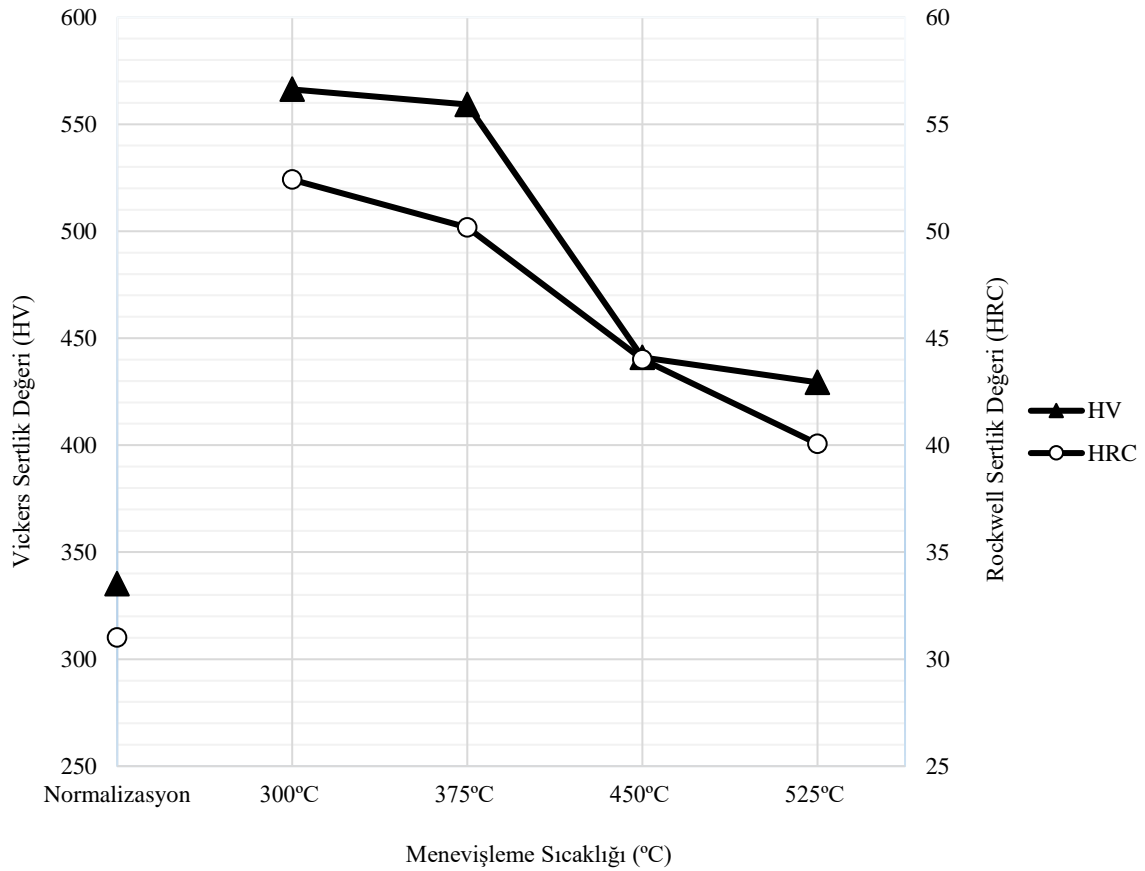
Şekillerdeki XRD analizleri incelendiğinde; genel olarak 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinde temper martenzit (ferrit + sementit ( $Fe_3C$ )) fazı gözlenmiştir. Dönüşmemiş (kalıntı) östenit fazı gözlenmemiştir.

Literatürdeki XRD analizleri incelendiğinde; 51CrV4 yay çeliğine 220 ve 315 °C menevişleme sıcaklığının uygulandığı bir çalışmada XRD analizi uygulanması sonucunda martenzit ve ferrit fazlarının pikleri elde edilmiş, karbon pik şiddetinin demirden daha düşük değerde olmasından dolayı karburlu fazlar elde edilememiştir [21].

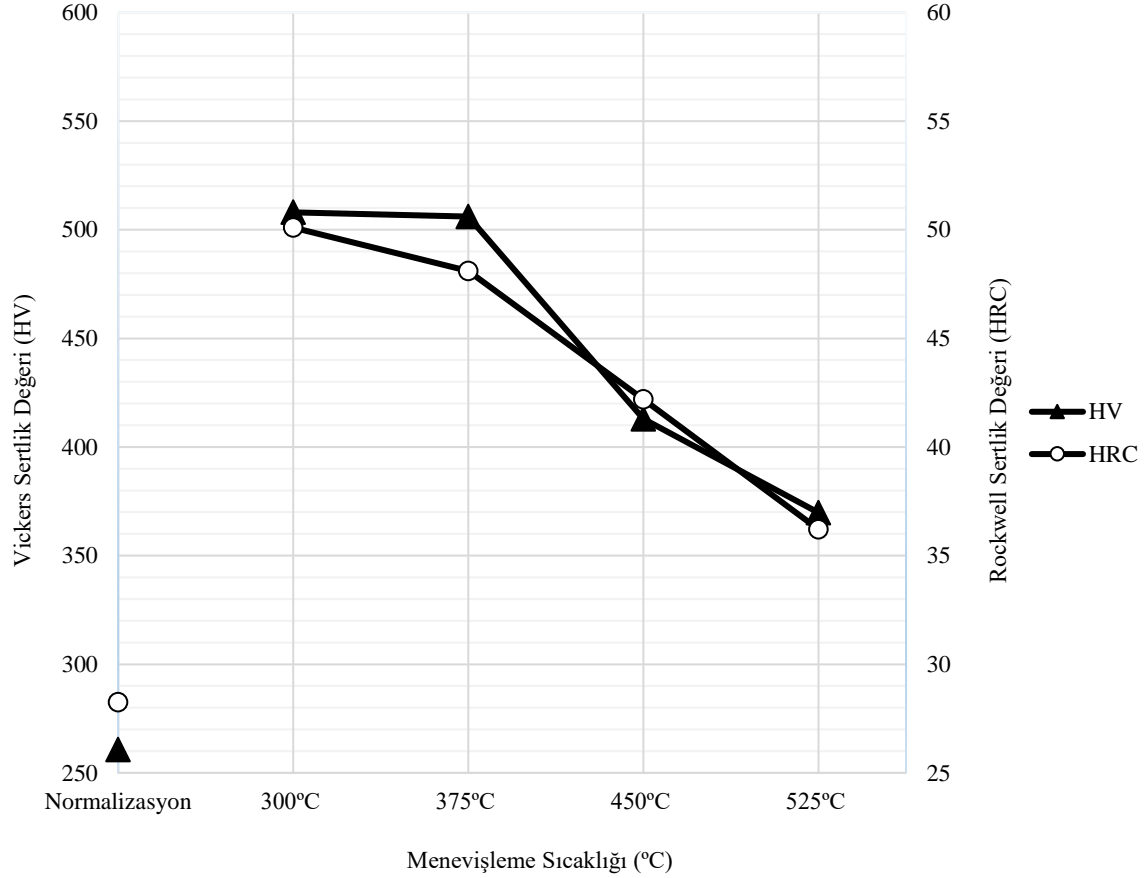
### 6.3 Sertlik Sonuçları

51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin ısıtma işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri sırasıyla Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 51CrV4 çeliğinin tüm ısıtma işlem koşullarında 55Cr3 çeliğinden daha yüksek sertliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi 51CrV4 çeliğinin kimyasal bileşimindeki Cr ve V miktarlarına atfedilebilir. Menevişleme sıcaklığı artışı ile her iki çeliğin sertlik değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Bu sonuç literatür ile uyumludur. Yapılan bir çalışmada, menevişleme sıcaklığının artışı ile çeliklerin sertlik değerlerinin düşmesi martenzit fazının dönüşümü ile açıklanmıştır. Şöyle

ki; çelikler ani soğutma işleminin ardından menevişleme işlemi uygulandığında karbonca aşırı doymuş katı eriyik olan martenzitin HMT kristal kafes yapısında bulunan C atomlarının bir kısmı difüzyon ile yayınıp kafesten ayrılarak serbest karbürler ( $Fe_3/M_x$ )C oluşturur ve karbon miktarı azalan martenzit yapı da ferrite dönüşür. Eğer ki menevişleme sıcaklığı düşük tutulursa bu dönüşümler tam olarak gerçekleşmez ve meneviş sonucu sertlik değerleri yüksek çıkar. Bunun tersine menevişleme sıcaklığı arttıkça iç yapıdaki faz dönüşümleri tam olarak gerçekleştiği için sertlik değerlerinin düştüğünü açıklamışlardır [9].



**Şekil 6.15:** 51CrV4 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre sertlik değişimleri.



**Şekil 6.16:** 55Cr3 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre sertlik değişimleri.

Şekil 6.15 ve 6.16’da gösterilen sertlik değerleri incelendiğinde; Vickers sertlik sonuçlarına göre 300-525 °C meneviş sıcaklıkları aralığında 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerindeki sertliklerin azalma oranları sırasıyla %24 ve %27 olarak birbirine yakın elde edilmiştir. Aynı şartlar için Rockwell sertlik azalış oranlarının sırasıyla %23.5 ve %27.7 olduğu görülmüştür. Çeliklerin sertlik değerlerinin ıslah işlemi ile normalizasyon durumuna göre belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Çeliklerin ıslah işlemi ile normalizasyon işlemindeki Vickers sertlik değerleri karşılaştırıldığında; ıslah işlemi ile 51CrV4 çeliğinde %68.9-%28.1 ve 55Cr3 çeliğinde %94.8-%41.8 aralığında sertlik artışları gözlenmiştir.

Literatürdeki sertlik değerleri incelendiğinde; 51CrV4 çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada 240 ve 420 °C meneviş sıcaklıklarında Vickers sertlik değerleri sırasıyla 267.66 ve 265.56 HV, Rockwell sertlik değerleri sırasıyla 50 ve 43 HRC olarak elde edilmiştir [22]. Bu çalışmada aynı çelik için bahsi geçen çalışmaya göre daha yüksek olan 300 ve 450 °C meneviş sıcaklıklarında Vickers sertlik değerlerimiz sırasıyla 566.3 ve 441 HV, Rockwell sertlik değerlerimiz sırasıyla 52.4 ve 44 HRC olarak elde edilmiştir. Üç farklı yay çeliğinin

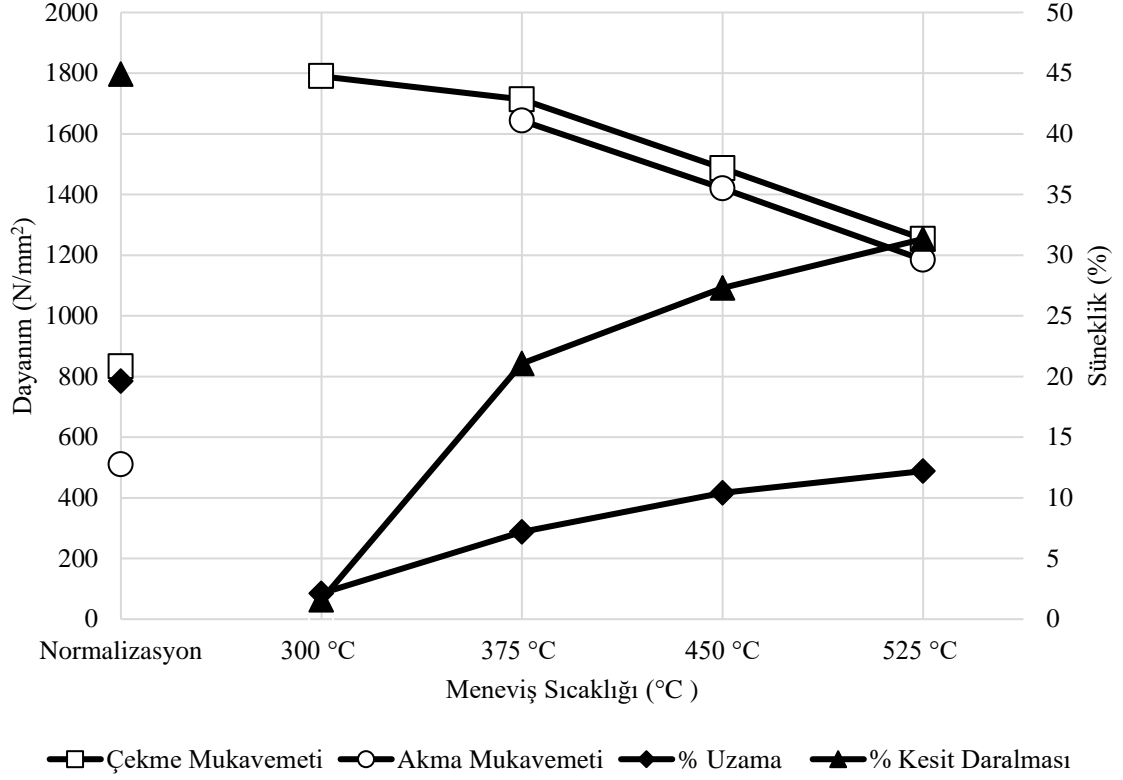
çalışıldığı bir başka çalışmada ise 51CrV4 ve 55Cr3 çeliğinin 500 °C meneviş sıcaklığındaki Vickers sertlik değerleri sırasıyla 393 ve 390.8 HV olarak elde edilmiştir [14]. Yapmış olduğumuz çalışmada ise 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerinin 525 °C meneviş sıcaklığındaki Vickers sertlik değerlerimiz sırasıyla 429.4 ve 369.8 HV olarak elde edilmiştir. Literatürdeki çalışma ile yapmış olduğumuz çalışma karşılaştırıldığında; bu çalışmada 525 °C meneviş sıcaklığında iki çelik arasındaki sertlik farkının (59.6 HV) daha yüksek ve 55Cr3 çeliğinin sertlik değerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde; bu çalışmada elde edilen sertlik değerlerinin literatürdeki aynı değerlere göre az bir oranla da olsa yüksek çıktığı görülmüştür.

Bununla birlikte, 51CrV4 çeliği ile yapılan bir diğer çalışmada 400, 440 ve 480 °C meneviş sıcaklıklarındaki Rockwell sertlik değerleri sırasıyla 48, 45 ve 43 HRC olarak elde edilmiştir [18]. Bahsedilen çalışmada 440 °C meneviş sıcaklığındaki sertlik değerini (45 HRC) çalışmamızdaki en yakın meneviş sıcaklığındaki (450 °C) Rockwell sertlik değerimiz (44 HRC) ile karşılaştırdığımızda ıslah işleminde literatür ile uygun sertlik değerlerinin elde edildiğini söyleyebiliriz.

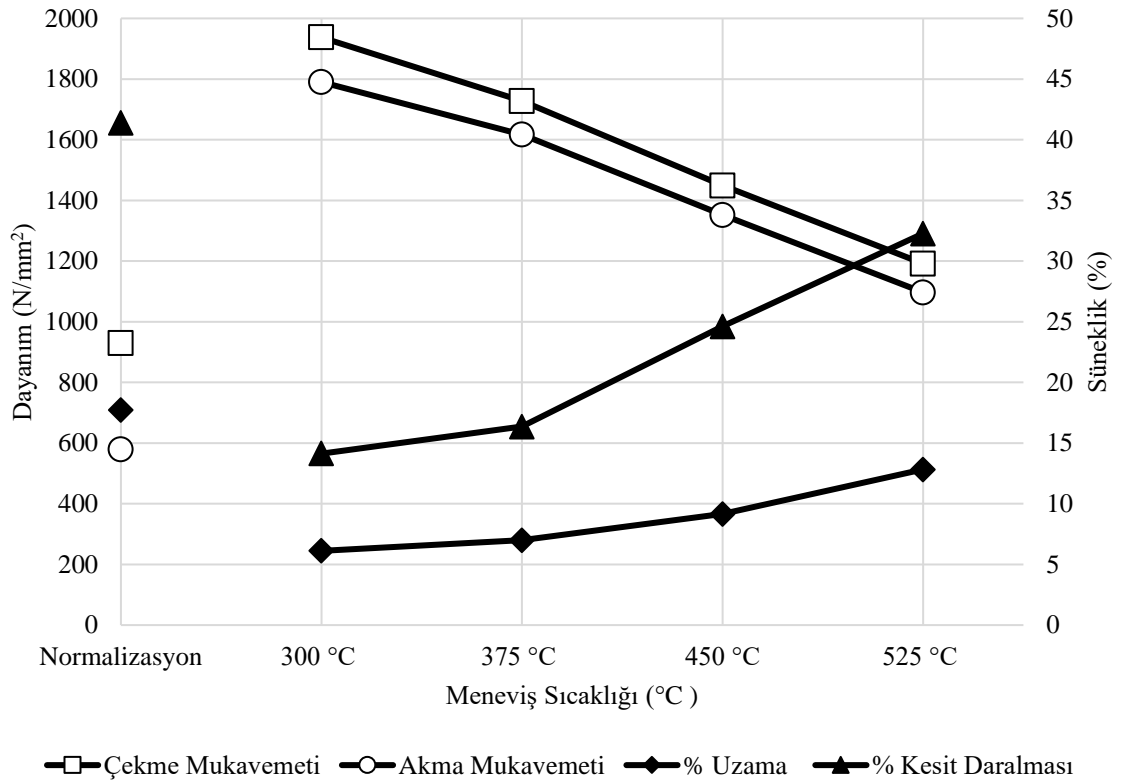
#### **6.4 Çekme Deneyi Sonuçları**

Bu bölümde, normalizasyon ve ıslah ısıl işlemi uygulanmış 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerine uygulanan çekme testi sonuçları verilmiştir.

Normalize ve ıslah edilmiş 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin meneviş sıcaklığına bağlı olarak dayanım (çekme mukavemeti ve 0.002 akma mukavemeti) – süneklik (% uzama ve % kesit daralması) değişimleri Şekil 6.17 ve 6.18’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde her iki çelik grubu için meneviş sıcaklığı arttıkça; çekme mukavemeti ve akma mukavemeti değerlerinin azaldığı görülürken gerilimli martenzitin temper martenzite daha fazla dönüşümü ve temper martensit yapının kabalaşması (Şekil 6.3-6.10) ile çeliklerde sertlik düşüşü ve süneklik artışı olduğundan % uzama ve % kesit daralması değerlerinin arttığı görülmüştür.



**Şekil 6.17:** 51CrV4 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre dayanım – süneklik değişimleri.



**Şekil 6.18:** 55Cr3 yay çeliğinin meneviş sıcaklığına göre dayanım – süneklik değişimleri.

Şekil 6.17 ve 6.18’de gösterilen çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde; 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki çekme mukavemeti değerleri 1750 N/mm<sup>2</sup> değerinin üzerinde seyrederken 525 °C menevişleme sıcaklığındaki çekme mukavemeti değerleri 1300 N/mm<sup>2</sup> değerinin üzerine çıkamamıştır. Normalizasyon işlemi görmüş yay çeliklerinde ise çekme mukavemeti değerlerinin 800-1000 N/mm<sup>2</sup> aralığında olduğu görülmüştür.

Literatürdeki çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde; 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerinin 500 °C meneviş sıcaklığındaki çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 1517 ve 1534 N/mm<sup>2</sup> elde edildiği görülmüştür [11]. Bu çalışmada literatürdeki meneviş sıcaklığına en yakın 525 °C sıcaklıktaki 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerinin çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 1253.65 ve 1191.36 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Çekme mukavemeti değerlerimizin literatüre göre daha düşük çıkmasının sebebi, 25 °C’lik meneviş sıcaklık artışı ve çeliklerin kimyasal kompozisyon farklılıkları ile ısıtılma koşullarındaki farklılıklar olabilir. Bunun tersine başka bir çalışmada 51CrV4 yay çeliğinin 315 °C meneviş sıcaklığındaki çekme mukavemeti değeri 1750 N/mm<sup>2</sup> elde edilmiştir [21]. Bu çalışmada literatürdeki meneviş sıcaklığına en yakın sıcaklık olan 300 °C’deki 51CrV4 çeliğinin çekme mukavemeti değerinin 1789.5 N/mm<sup>2</sup> olduğu görülmüştür. 51CrV4 çeliği üzerine yapılan bir başka çalışmada 480 °C meneviş sıcaklığındaki çekme mukavemeti değeri 1260±2 N/mm<sup>2</sup> elde edilmiştir [25]. Bu çalışmada 51CrV4 çeliğinin 450 ve 525 °C meneviş sıcaklıklarındaki çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 1486.8 ve 1253.6 N/mm<sup>2</sup> elde edilmiştir. Literatürdeki çekme mukavemeti değerine en yakın çekme mukavemeti değerimizin 525 °C meneviş sıcaklığında olduğu görülmüştür.

Şekil 6.17 ve 6.18’de gösterilen akma mukavemeti değerleri incelendiğinde; 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C’de menevişlenen numunelerden iki tanesi ölçü uzunluğu aralığında kopmamıştır, bir tanesinin ise akma mukavemeti ölçülememiştir. Bu yüzden bu numune grubunun akma mukavemeti verileri elde edilememiştir (Şekil 6.17). 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki akma mukavemeti değerine bakıldığında 1750 N/mm<sup>2</sup> değerinin üzerinde olduğu gözlenirken 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki akma mukavemeti değerleri 1200 N/mm<sup>2</sup> değerinin üzerine çıkamadığı gözlenmiştir. Normalize edilmiş yay çeliklerinin akma mukavemeti değerlerinin ise 500-600 N/mm<sup>2</sup> aralığında olduğu görülmüştür.

Literatürdeki akma mukavemeti değerleri incelendiğinde; 51CrV4 çeliği üzerine yapılan bir çalışmada 480 °C meneviş sıcaklığındaki akma mukavemeti değeri  $1217 \pm 10$  N/mm<sup>2</sup> elde edilmiştir [25]. Bu çalışmada 51CrV4 çeliği için 450 ve 525 °C meneviş sıcaklıklarındaki akma mukavemeti değerlerimiz sırasıyla 1420 ve 1185 N/mm<sup>2</sup> elde edilerek literatürdeki sonucu kapsadığı görülmüştür.

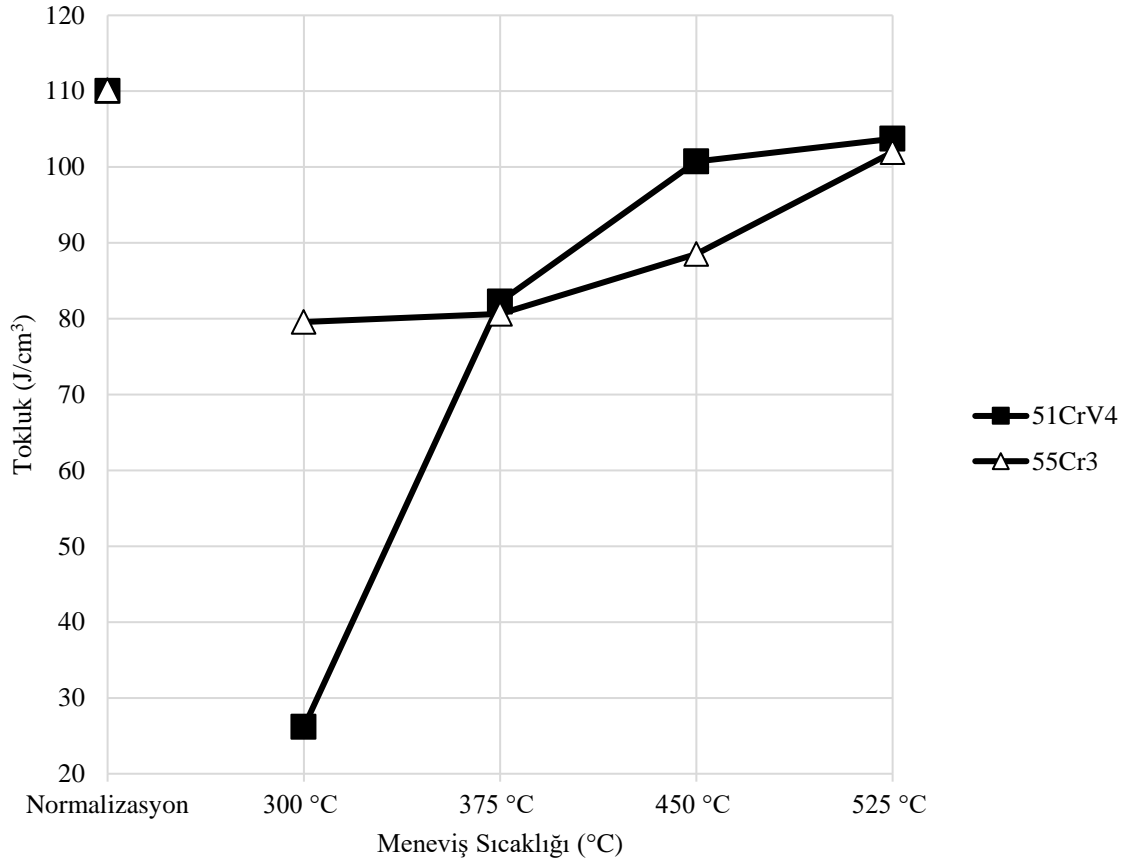
Şekil 6.17 ve 6.18’de gösterilen % uzama değerleri incelendiğinde; 51CrV4 yay çeliğinin 300 °C meneviş sıcaklığı için bir deney sonucundaki % uzama değeri %2.1 iken 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki % uzama değerinin %6.1 olduğu gözlenmiştir. 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki % uzama değerlerinin %12-13 arasında olduğu kaydedilmiştir. Normalize edilmiş yay çeliklerinin % uzama değerleri %17.5 değerinin altına inmemiştir. Bu değer in ıslah işlemi gören çeliklerin % uzama değerlerinden daha yüksek olması, normalize edilen çeliklerin iç yapısındaki dengeli ferrit ve perlit fazları sünekliklerinin temper martenzite fazının sünekliğinden daha fazla olmasından dolayı uygun ve beklenen bir sonuçtur.

Literatürdeki % uzama değerleri incelendiğinde; üç farklı yay çeliği ile yapılan bir çalışmada 51CrV4 ve 55Cr3 çeliğinin 500 °C meneviş sıcaklığındaki % uzama değerleri sırasıyla yaklaşık olarak %8.5 ve %8 olarak elde edilmiştir [14]. Bu çalışmada literatürdeki meneviş sıcaklığına en yakın sıcaklık olan 525 °C’deki 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerinin % uzama değerleri sırasıyla %12.2 ve %12.8 olarak daha fazla elde edilmiştir. 51CrV4 çeliği üzerine yapılan bir başka çalışmada 480 °C meneviş sıcaklığındaki % uzama değeri  $5.6 \pm 0.3$  olarak elde edilmiştir [25]. Bu çalışmada 51CrV4 çeliği için 450 ve 525 °C meneviş sıcaklıklarındaki % uzama değerlerimiz sırasıyla %10.4 ve %12.2 olarak yaklaşık 2 kat daha fazla elde edilmiştir.

Şekil 6.17 ve 6.18’de gösterilen % kesit daralması değerleri incelendiğinde; 51CrV4 çeliğinin 300 °C meneviş sıcaklığı için bir deney sonucundaki % kesit daralması değeri %1.6 iken 55Cr3 yay çeliğinin 300 °C menevişleme sıcaklığındaki % kesit daralması değerinin %14.1 olduğu gözlenmiştir. 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki % kesit daralması değerlerinin %31-33 değerleri arasında olduğu kaydedilmiştir. Normalize edilen yay çeliklerinin % kesit daralması değerlerinin %41 değerinin altına inmediği ve ıslah işlemi görmüş çeliklerin % kesit daralması değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.



Normalize ve ıslah edilmiş 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin meneviş sıcaklığına bağlı olarak tokluk değişimleri Şekil 6.19’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki çelik grubu için meneviş sıcaklığı arttıkça; tokluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir.



**Şekil 6.19:** 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin meneviş sıcaklığına göre tokluk değişimleri.

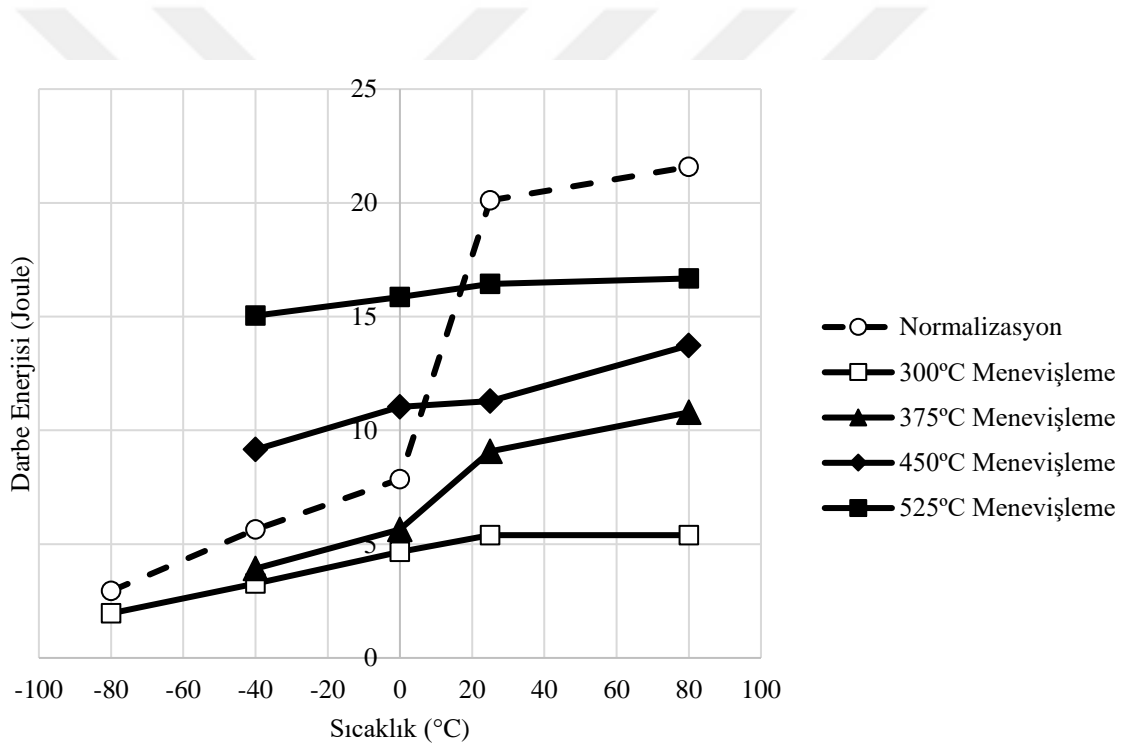
Şekil 6.19’da gösterilen tokluk değerleri incelendiğinde; 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin 525 °C menevişleme sıcaklığındaki tokluk değerleri sırasıyla; 103.71 J/cm<sup>3</sup> ve 101.94 J/cm<sup>3</sup> olarak kaydedilmiştir. Normalize edilmiş 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin tokluk değerleri sırasıyla; 110 ve 110.11 J/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.

Genel olarak çekme deneyinin tüm sonuçları ele alındığında çeliklere uygulanan ani soğutma işleminden sonra düşük menevişleme sıcaklığında C atomları kristal kafes yapısından yetersiz difüzyon nedeniyle yayılamadığı için bir başka deyişle; tüm martenzit yapı (HMT-Hacim Merkezli Tetragonal yapı) tamamen dönüşemediğinden çekme mukavemeti, akma mukavemeti değerleri artmakta, bu durumun tam tersi şekilde % uzama, % kesit daralması ve tokluk değerleri azalmaktadır. Meneviş sıcaklığının artmasıyla çelikteki martenzit yapı

HMK yapıdaki ferrit içinde homojen şekilde dağılmış sementitten ( $Fe_3C$ ) dolayı sertlik değerlerinde olduğu gibi çekme mukavemeti, akma mukavemeti değerlerinin azaldığı, bu durumun tam tersi şekilde % uzama, % kesit daralması ve tokluk değerlerinin arttığı ve sonucun literatürle uyumlu olduğu görülmüştür [9,18]. Ayrıca, her iki çelikte meneviş sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme özellikleri (çekme mukavemeti, akma mukavemeti, % uzama, % kesit daralması) bu iki çeliğin ıslah işleminden beklenen ve standartta verilen değerleri karşılamaktadır [19].

### 6.5 Darbe Deneyi Sonuçları

Normalizasyon ve ıslah ısı işlemi uygulanmış 51CrV4 yay çeliğinin -40 ile +80 °C sıcaklıkları arasındaki darbe enerjisi sonuçları Şekil 6.20’de verilmiştir.



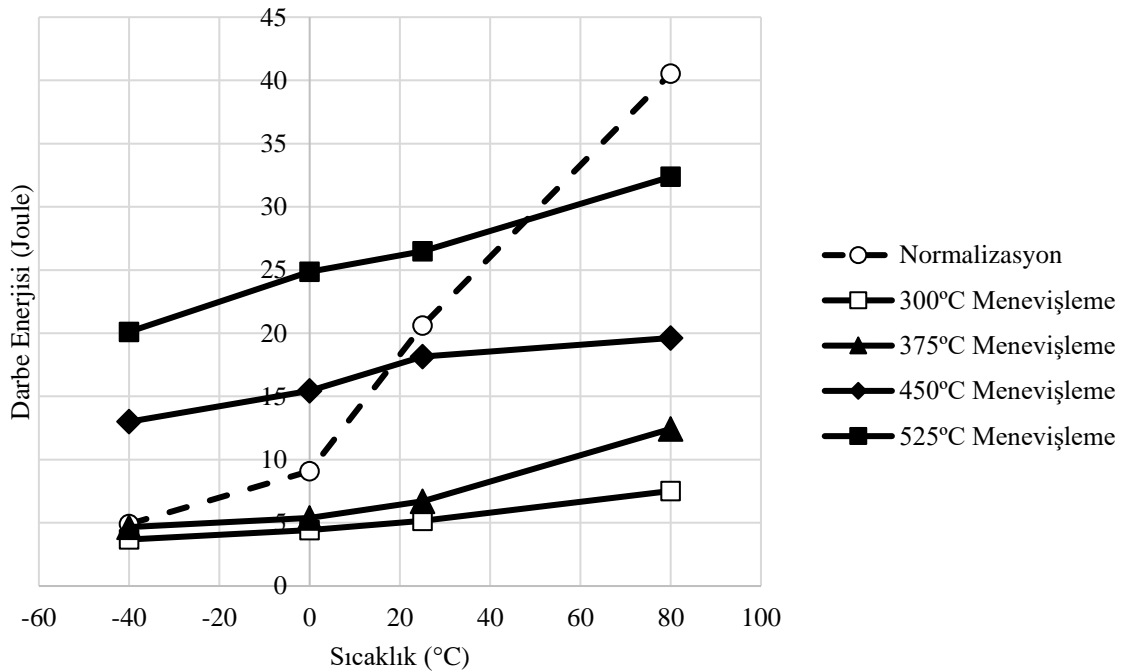
Şekil 6.20: 51CrV4 yay çeliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişen darbe enerjisi değerleri.

Şekil 6.20 incelendiğinde; meneviş sıcaklığı artışı ile tüm deney sıcaklıkları için darbe enerjilerinin de arttığı görülmüştür. Menevişleme sıcaklığı ile darbe enerjisinin artışı yani çeliği kırmak için daha fazla enerji gerektiğinin bir başka deyişle çeliğin sünekleştiğinin vurgulandığı çalışmalarda meneviş sıcaklığı ile çelikte sertlik düşerken (Şekil 6.15 ve 6.16) sünekliğin artışı ile darbe enerjilerinin arttığı ifade edilmiştir [9,21].

525°C meneviş sıcaklığında -40 ile +80 °C deney sıcaklıkları aralığında 15 J değerinin üzerinde en yüksek darbe enerjisi değerleri elde edilmiştir. Öyle ki; normalize edilen çeliğin 0 ve -40 °C sıcaklıklarındaki darbe enerjisi değerlerinden daha yüksektir. Menevişleme sıcaklığı artışı ile ortam sıcaklığına bağlı olarak darbe enerjilerindeki düşüşlerin (geçiş sıcaklığı eğrilerinin eğiminin) azaldığı görülmüştür. Buna göre menevişleme sıcaklığı artışı ile 51CrV4 çeliğinin düşük deney sıcaklıklarında darbe direncinin daha az düştüğü söylenebilir.

Normalizasyon işlemi uygulanan çeliğin darbe geçiş sıcaklığının en belirgin olduğu ve oda sıcaklığı ile 0 °C sıcaklık aralığında meydana geldiği söylenebilir. Bununla birlikte ıslah işlemi uygulanan çeliklerde ortam sıcaklığının düşüşü ile darbe enerjisinde büyük düşüşler gözlenmemiştir. Diğer bir deyişle, ıslah işlemi ile darbe geçiş sıcaklığının ve özellikle de meneviş sıcaklığı artışı ile darbe geçiş sıcaklığının ortadan kaybolduğu gözlenmiştir.

Normalizasyon ve ıslah ısıl işlemi uygulanmış 55Cr3 yay çeliğine -40 ile +80 °C sıcaklıkları arasında uygulanan darbe deneylerinin sonuçları Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21: 55Cr3 yay çeliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişen darbe enerjisi değerleri.

Şekil 6.21 incelendiğinde; darbe enerjilerinin 300 ve 375 °C meneviş sıcaklıklarında neredeyse tüm ortam sıcaklıklarında 10 J değerinin altında elde edildiği görülmüştür. Çelikler sertleştirildikten sonra düşük sıcaklıklarda menevişlenirse martensitin HMT kristal kafes yapısının içerisinde bulunan C atomlarının bir kısmı serbest karbürlere ve martenzit fazı da ferrite tam olarak dönüşemediği için yüksek menevişleme sıcaklıklarına göre daha gevrek bir yapı sergilemektedir. 450 ve 525 °C meneviş sıcaklıklarında tüm ortam sıcaklıklarında darbe enerjileri belirgin artış göstermiştir. Öyle ki, oda sıcaklığı ve altındaki sıcaklıklarda 525 °C’ de menevişlenen numunelerin darbe enerjisi değerleri normalizasyon ısı işlemli numunelerin aynı sıcaklıktaki değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir.

Normalize edilmiş 55Cr3 çeliği ortam sıcaklığının düşüşü ile birlikte darbe enerjilerinde ani azalmalar göstermiştir. +80 °C’deki darbe enerji değeri 40 J üzerinde iken 0 °C’de 10 J altına düşmüştür. Normalize edilen bu çelik için darbe geçiş sıcaklık aralığı net olarak ifade edilememiştir. Bunu ortaya çıkarabilmek için oda sıcaklığı ile +80°C aralığındaki birkaç sıcaklıkta deneylerin yapılması uygun olabilirdi. Bununla birlikte, darbe geçiş sıcaklık aralığının alt limitinin 0 °C olduğu söylenebilir.











Literatür incelendiğinde; 51CrV4 ve 55Cr3 çeliğinin 500 °C meneviş sıcaklığındaki darbe enerjisi değerleri sırasıyla 24 ve 26 J olarak elde edilmiştir [14]. Yapmış olduğumuz bu çalışmada 525 °C’de menevişlenmiş 51CrV4 ve 55Cr3 çeliklerinin oda sıcaklığındaki darbe enerjisi değerleri sırasıyla 16.43 ve 26.49 J olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre çalışmamızda 51CrV4 çeliğinin darbe enerjisi değerinin daha düşük, 55Cr3 çeliğinin darbe enerjisi değerinin ise literatür ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bir başka çalışmada 51CrV4 yay çeliğinin 315 °C meneviş sıcaklığı için darbe enerjisi değeri yaklaşık 41 J olarak elde edilmiştir. Yapmış olduğumuz çalışmada ise literatürdeki çalışmaya en yakın meneviş sıcaklığı 300 °C için oda sıcaklığındaki darbe enerjisi değerimiz 5.4 J olarak elde edilmiştir. Literatürdeki 41 J darbe enerjisi değerine ancak normalize edilmiş 55Cr3 yay çeliğinin, +80 °C darbe sıcaklığında rastlanmıştır. Bu değer yaptığımız çalışmadaki her iki çelik ve tüm deney şartlarında (ısı işlem ve darbe sıcaklıklarında) elde edilen maksimum değerdir. Düşük meneviş sıcaklığındaki (300 °C) çeliğin darbe enerjisi değerinin bahsi geçen literatürle örtüşmediği ve aradaki farkın çok fazla olduğu görülmüştür fakat literatürdeki çalışmada bir diğer meneviş sıcaklığı olan 220 °C’deki darbe enerjisi değerinin yaklaşık 8 J olarak elde edildiği görülmüştür [21].

## 6.6 Kırılma Yüzeylerinin Makro Yapı Analiz Sonuçları

### 6.6.1 Çekme Deneyi Kırılma Yüzeyleri

51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin çekme deneylerinde kırılan numunelerin yüzeyleri dijital kamera ile görüntü alınarak analiz edilmiştir. Kırılma morfolojilerine ait makro yapı görüntüleri ise Tablo 6.1’de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve tokluk değerleri.

Meneviş Sıcaklığı / Yay Çeliği	51CrV4	55Cr3
300 °C	 26.17 J/cm <sup>3</sup>	 79.57 J/cm <sup>3</sup>
375 °C	 82.23 J/cm <sup>3</sup>	 80.63 J/cm <sup>3</sup>
450 °C	 100.72 J/cm <sup>3</sup>	 88.55 J/cm <sup>3</sup>
525 °C	 103.71 J/cm <sup>3</sup>	 101.94 J/cm <sup>3</sup>
Normalizasyon	 110 J/cm <sup>3</sup>	 110.11 J/cm <sup>3</sup>





















Normalize edilen çeliklerin ıslah işlemi uygulanan çeliklere göre % kesit daralmasının daha fazla olduğu gözlenmiştir (şekil 6.17 ve 6.18). Ayrıca meneviş sıcaklığının artışı ile sünek kırılmanın daha belirgin şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

### **6.6.2 Darbe Deneyi Kırılma Yüzeyleri**





















51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin darbe deneylerinde kırılan numunelerin yüzeyleri dijital kamera ile görüntü alınarak analiz edilmiştir. Kırılma morfolojilerine ait makro yapı görüntüleri ise Tablo 6.2 ve 6.3'te verilmiştir.



**Tablo 6.2:** 51CrV4 yay çeliğinin darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve darbe enerjisi değerleri.

Meneviş Sıcaklığı / Darbe Sıcaklığı	-40 °C	0 °C	+25 °C	+80 °C
300 °C	 3.27 J	 4.66 J	 5.40 J	 5.40 J
375 °C	 3.92 J	 5.64 J	 9.07 J	 10.79 J
450 °C	 9.16 J	 11.04 J	 11.28 J	 13.73 J
525 °C	 15.04 J	 15.86 J	 16.43 J	 16.68 J
Normalizasyon	 5.64 J	 7.85 J	 20.11 J	 21.58 J

**Tablo 6.3:** 55Cr3 yay çeliğinin darbe deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin makro yapı görüntüleri ve darbe enerjisi değerleri.

Meneviş Sıcaklığı / Darbe Sıcaklığı	-40 °C	0 °C	+25 °C	+80 °C
300 °C	 3.68 J	 4.41 J	 5.15 J	 7.52 J
375 °C	 4.66 J	 5.40 J	 6.70 J	 12.43 J
450 °C	 13 J	 15.45 J	 18.15 J	 19.62 J
525 °C	 20.11 J	 24.85 J	 26.49 J	 32.38 J
Normalizasyon	 4.91 J	 9.07 J	 20.60 J	 40.55 J

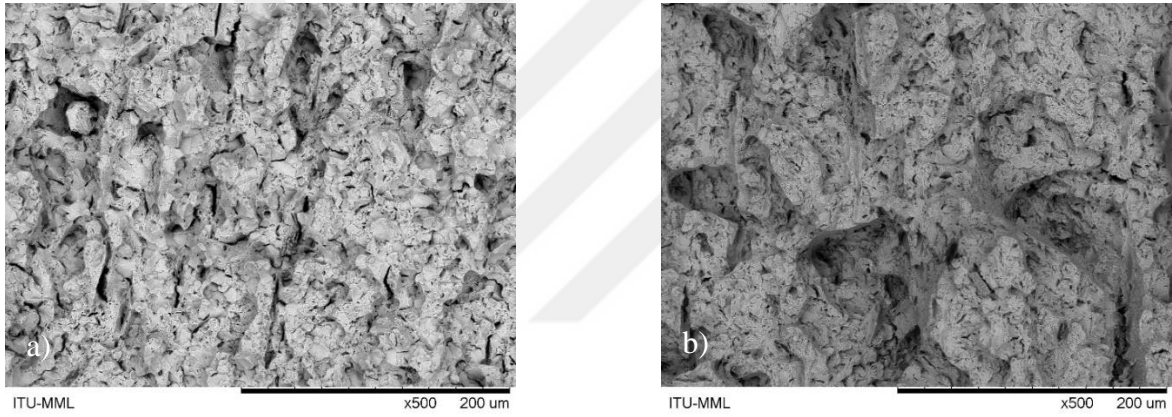
İslah edilen çeliklerde çatlak yönünü belirleyen ve çatlak tabanına dik yönde ilerleyen radyal çatlaklar belirgin bir şekilde gözlenirken, normalize edilen çeliklerin kırılma yüzeylerinde ise daha dağınık çatlaklar gözlenmiştir. Normalize edilen çeliklerde düşük darbe sıcaklıklarında daha belirgin ikincil çatlaklar gözlenirken, özellikle yüksek darbe



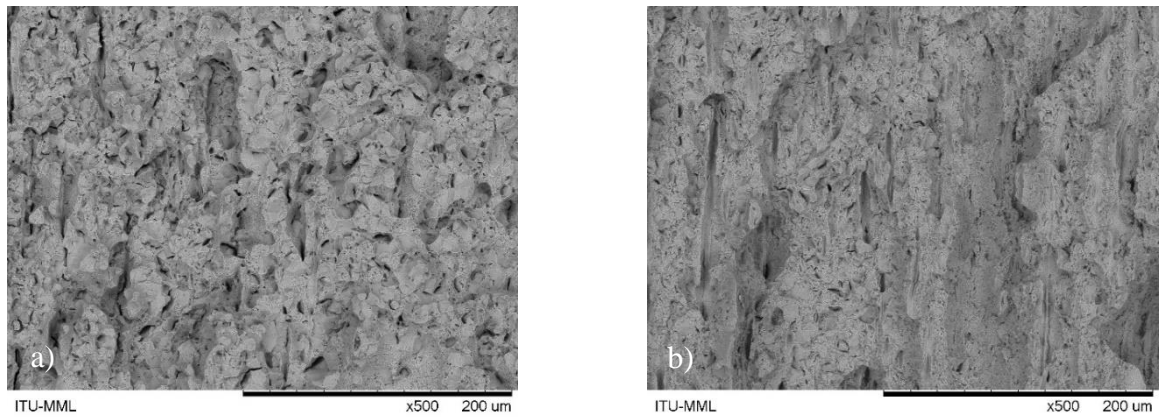
sıcaklıklarında (+80 °C) bu çatlaklar azalmış ve daha parlak granüler bir yapı gözlemlenmiştir. Ayrıca, meneviş sıcaklığı ve darbe sıcaklığı artışı ile kırılma yüzeylerinin yan taraflarında oluşan plastik deformasyon bölgelerinin (kayma bölgelerinin-shear lips) oluştuğu da görülmüştür.

### 6.7 Kırılma Yüzeylerinin SEM Analiz Sonuçları

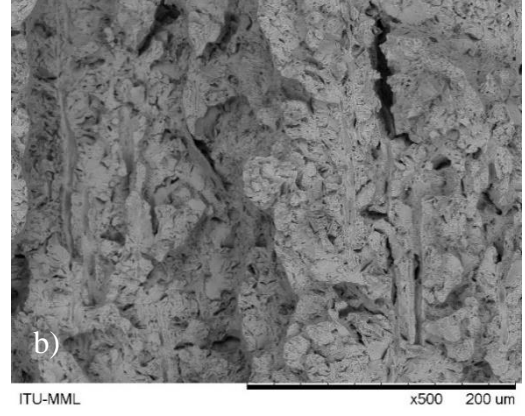
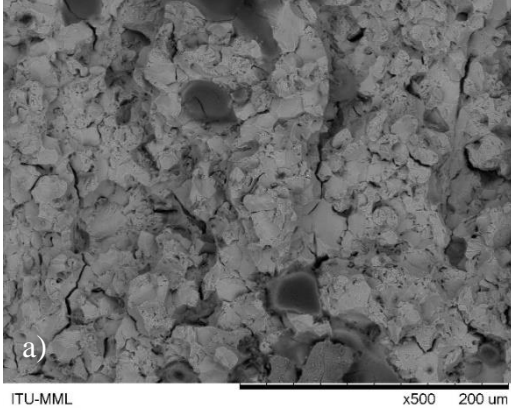
Bu bölümde, 300 °C ve 525 °C’de menevişlenen 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerinin -40 °C ve +80 °C darbe sıcaklıklarında ve normalize edilmiş çeliklerin oda sıcaklığında yapılan deneylerinde kırılan numunelerinin 500x büyütmedeki SEM görüntülerinden elde edilen morfofjiler analiz edilmiştir. Kırılma morfofjilerine ait SEM görüntüleri ise Şekil 6.22-6.26 arasında verilmiştir.



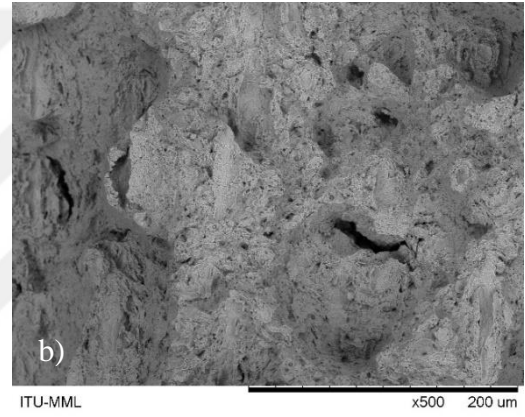
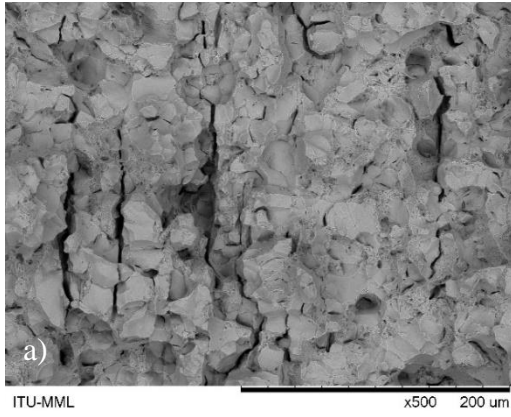
Şekil 6.22: 51CrV4 yay çeliğine -40 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme.



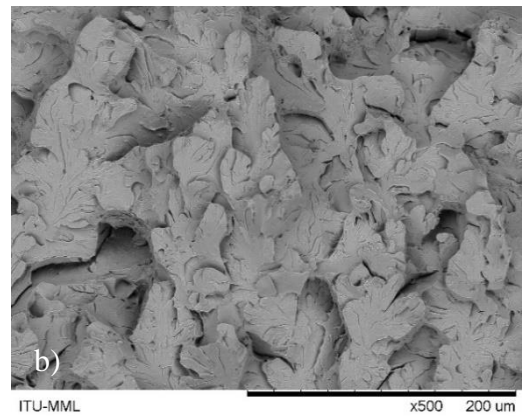
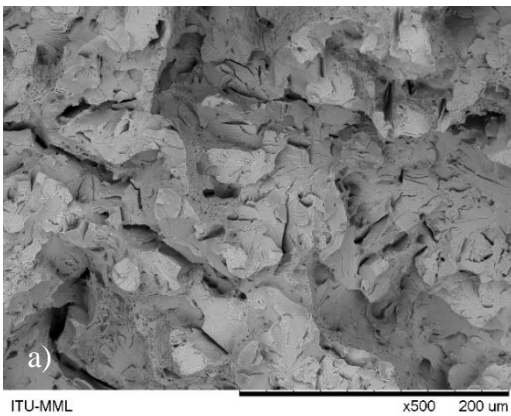
Şekil 6.23: 51CrV4 yay çeliğine +80 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme.



**Şekil 6.24:** 55Cr3 yay çeliğine -40 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme.



**Şekil 6.25:** 55Cr3 yay çeliğine +80 °C sıcaklıkta darbe deneyi yapılmış SEM görüntüleri; a)300 °C menevişleme, b)525 °C menevişleme.



**Şekil 6.26:** Normalizasyon uygulanmış ve oda sıcaklığında darbe deneyi yapılmış yay çeliklerinin SEM görüntüleri; a)51CrV4, b)55Cr3.

Kırılma yüzey görüntülerinde iki çeşit morfolojiye rastlanmıştır. Bunlardan birincisi geniş düz yüzeyler (lahana yaprağı gibi), bu yüzeyler transgranular gevrek kırılma (klivaj) morfolojisi olan sünek-gevrek geçiş sıcaklığının altında kırılan malzemelerde görülen bir morfolojidir.

Bazı numunelerde bu geniş düz yüzeylerin arasında küçük yuvarlak boşluklar şeklinde gözlenen bir morfolojiye rastlanmıştır. Bunlar da dimple (mikro boşluk) morfolojisidir. Bu da sünek kırılmanın karakteristiği ile ilgili bir durumdur. Dolayısı ile numunelerin pek çoğunda hem transgranular gevrek (klivaj) hem de sünek (dimple) kırılma morfolojilerinin bulunması nedeni ile su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerde tipik kırılma morfolojisi olan bu kırılma yüzeylerinin quasi klivaj kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeylerinde yarıklar şeklinde gözlenen ikincil çatlaklar görülmüştür. Malzemenin gevrekliği arttıkça bu ikincil çatlakların miktarı da artmaktadır. Genel olarak bu çatlakların her iki çelik için düşük menevişleme sıcaklığında (300 °C'de) daha fazla ve belirgin olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak kırılma yüzeylerinde düz bölgelerin (klivaj) ve ikincil çatlakların miktarının artması malzemenin daha gevrek olduğuna, mikro boşlukların (dimple) da var olması gevrekliğin bir miktar azaldığına işaret ettiği kaydedilmiştir.

Yapılan mekanik testlerdeki sonuçlarda meneviş sıcaklığı arttıkça % uzama, % kesit daralması, tokluk ve darbe enerjisi değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durum sünekliğin bir göstergesi olan kırılma yüzeylerindeki mikro boşlukların (dimple) etkisiyle açıklanabilirken bu durumun tam tersi olarak gevrek kırılma yüzeylerinin mekanik testlere etkisi, meneviş sıcaklığı azaldıkça sertlik, çekme mukavemeti, akma mukavemeti değerlerinin artmasıyla açıklanabilmektedir. Ayrıca darbe deneyi sonuçlarına bakıldığı zaman darbe sıcaklığı arttıkça (+80 °C'ye doğru) çeliklerin darbe enerjileri artarak kırılma tipinin sünek+gevrek, darbe sıcaklığı azaldıkça (-40 °C'ye doğru) darbe enerjileri düşerek kırılmaların daha çok gevrek tipte olduğu kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerinde görülmüştür. Özetle, ortam sıcaklıklarında elde edilen darbe enerji değerleri ile kırılma yüzeyleri uygunluk göstermektedir.

## 7. GENEL SONUÇLAR

Yaprak yayların üretiminde sıklıkla kullanılan orta karbonlu 51CrV4 ve 55Cr3 yay çeliklerine normalizasyon ve (300, 375, 450 ve 525 °C) sıcaklıklarda menevişleme işlemini içeren ıslah işlemleri uygulanmıştır. Farklı ısıl işlem uygulamaları sonucunda yay çeliği numunelerinin mekanik özelliklerindeki ve iç yapılarındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen bulgularlardan yorumlanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1- Her iki yay çeliğinin normalize edilmiş iç yapılarında az oranda ferrit ve daha ağırlıklı olarak perlit fazları gözlenirken ıslah işlemi uygulanmış çeliklerin iç yapılarında temper martenzit yapısı ve segregasyon bantları gözlenmiştir. Meneviş sıcaklığı arttıkça segregasyon bantlarının azaldığı, temperlenmiş martenzit fazının homojenize yayıldığı ve kabalaştığı görülmüştür.
- 2- Islah işlemi ile her iki çeliğin XRD analizlerinde temper martenzit (ferrit + sementit ( $Fe_3C$ )) fazına rastlanırken dönüşmemiş (kalıntı) östenit fazı gözlenmemiştir.
- 3- Tüm ısıl işlem koşullarında, bileşimindeki Cr ve V alaşım elementleri sebebiyle 51CrV4 yay çeliğinin sertlik değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Çeliklerde ıslah işlemi ile normalizasyon işlemine göre; 51CrV4 çeliğinde %68.9-%28.1 ve 55Cr3 çeliğinde %94.8-%41.8 aralığında Vickers sertlik artışları gözlenmiştir.
- 4- Menevişleme sıcaklığı arttıkça her iki çeliğin sertlik, çekme ve akma mukavemetleri değerlerinde azalma, % uzama, % kesit daralması ve tokluk değerlerinde artışlar elde edilmiştir.
- 5- Islah edilen her iki çelikte meneviş sıcaklıkları (300-525 °C) ve darbe sıcaklıkları (-40 ile +80 °C) artışı ile beklenildiği gibi çeliklerin darbe enerjileri de artmıştır.
- 6- 51CrV4 yay çeliğinde menevişleme sıcaklığı artışı ile ortam sıcaklığına bağlı olarak darbe geçiş sıcaklığı eğrilerinin eğimlerinde azalmalar gözlenmiş ve ıslah edilmiş bu çelik için darbe geçiş sıcaklığı net olarak belirlenememiştir.

- 7- Normalize edilen 51CrV4 çeliğinin darbe geçiş sıcaklığının en belirgin olduğu ve oda sıcaklığı ile 0 °C arasında olduğu tespit edilmiştir. Normalize edilen 55Cr3 çeliği için darbe geçiş sıcaklık aralığı net olarak ifade edilememiştir ancak alt sıcaklık değerinin 0 °C olabileceği gözlenmiştir.
- 8- Darbe testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM analiz sonuçlarından, kırılmanın hem transgranular gevrek (klivaj) ve hem de sünek (dimple) tipte quasi klivaj kırılma olduğu gözlenmiştir. Meneviş sıcaklığı artışı ile kırılma tipinin daha çok sünek karakterde olması, darbe enerjilerinin kırılma morfolojileri ile uyumlu olduğunu göstermiştir.



## 8. KAYNAKLAR

- [1] O. Kelebek, N.S. Kuralay, ve M.U. Karaoğlan, “Ağır taşıtlar için çok katlı konvansiyonel yaprak yay yerine tek katlı parabolik yaprak yay tasarımı ve analizi”, *Dokuz Eylöl Üniversitesi-Mühendislik Faköltesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt 20, sayı 59, s. 481-491, May. 2018, [doi.org/10.21205/deufmd.2018205938](https://doi.org/10.21205/deufmd.2018205938).
- [2] M.B. Çetinkaya and M. İşci, “ANSYS based analysis of multi-level parabolic leaf spring systems”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 73, pp. 109-121, Jul. 2023, [doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.043](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.043).
- [3] M.N. James, D.G. Hattingh, and L. Matthews, “Embrittlement failure of 51CrV4 leaf springs”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 139, p. 106517, pp. 1-10, Jun. 2022, [doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106517](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106517).
- [4] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, “Motorlu araçlar teknolojisi, Süspansiyon sistemleri”, Ankara, 2013.
- [5] M.M. Topaç ve İ. Bahar, “Bir askeri hizmet taşıtında kullanılan parabolik yaprak yayın yay karakteristiğinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, cilt 22, no. 1, pp. 115-120, 2019, [doi.org/10.2339/politeknik.389639](https://doi.org/10.2339/politeknik.389639).
- [6] S. Biber, “Parabolik (yaprak) yay üretiminde hidrolik oransal servo uygulamalar”, *Uluslararası Katılımlı VII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi*, İstanbul, 2014, s. 95-107. [Online] Erişim adresi: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/0e8b4689f8686a9\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0e8b4689f8686a9_ek.pdf).
- [7] A.ř. şener ve Y. Maral, “Bozuk yol verileri kullanarak bir yaprak yayın yorulma ömrünün SEA ile değerlendirilmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 7, sayı 4, s. 788-801, Ara. 2019, [doi.org/10.29109/gujsc.595235](https://doi.org/10.29109/gujsc.595235).
- [8] [http://altikardesler.com.tr/wp-content/uploads/2016/06/olgun\\_celik\\_2016.pdf](http://altikardesler.com.tr/wp-content/uploads/2016/06/olgun_celik_2016.pdf). Erişim tarihi: 23 Ağustos 2023.
- [9] A.A. Eser, E. Gökil, ve S. Akdı, “Farklı ıslah çeliklerin östenitleme ve menevişleme sıcaklık parametresinin mekanik özelliklere etkisi”, *5. Isıl İşlem Sempozyumu*, İstanbul, 2016, s. 223-234. [Online] Erişim adresi: <https://akdimuhendislik.com/wp->

[content/uploads/2020/01/20-fakli-islak-celiklerin-oztenitleme-ve-menevisleme-sicaklik-parametresinin-mekanik.pdf](https://ru.celikyay.com.tr/wp-content/uploads/2020/01/20-fakli-islak-celiklerin-oztenitleme-ve-menevisleme-sicaklik-parametresinin-mekanik.pdf).

- [10] A.A. Kömeç, vd., “51CrV4 yay çeliğinin yüzey özelliklerinin incelenmesi”, *Metal Dünyası Dergisi*, sayı 277, s. 2-6, Tem. 2016. [Online] Erişim adresi: <https://ru.celikyay.com.tr/wp-content/uploads/2021/06/akademik-makale.pdf>.
- [11] R.C. Ozden, E. Lokcu, and M. Anık, “Cryogenic process optimization for medium carbon spring steels”, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, vol. 16, pp. 14-19, Nov. 2021, [doi.org/10.55549/epstem.1052207](https://doi.org/10.55549/epstem.1052207).
- [12] R.C. Özden, “Alaşımly yay çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine kriyojenik işlemin etkisi”, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir, 2020.
- [13] Çemtaş Ar-Ge Merkezi, “Teknik yayınlar-I” Bursa, Mayıs 2016.
- [14] R.C. Ozden, E. Lokcu, and M. Anık, “Effects of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of medium carbon spring steels”, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, vol. 11, pp. 48-52, Nov. 2020. [Online] Erişim adresi: <http://www.epstem.net/en/download/article-file/1432612>.
- [15] <https://docplayer.biz.tr/4179935-Teknik-katalog-hascelik-sanayi-ve-ticaret-a-s.html>. Erişim tarihi: 5 Eylül 2023.
- [16] E.D. Gül, “Kriyojenik İşlem Uygulanmış Yay Çeliklerinin Aşınma Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi”, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir, 2020.
- [17] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, “Metal teknolojisi, Isıl işlemler, 521MMI233”, Ankara, 2011.
- [18] Ç. Dindar, H. Beytüt, and S. Karagöz, “Effect of heat treatment and cross section on the crashworthiness of 51CrV4 spring steel”, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 477-488, Sep. 2019, [doi.org/10.17482/uumfd.477569](https://doi.org/10.17482/uumfd.477569).
- [19] *Su Verilmiş ve Temperlenmiş Yaylar İçin Sıcak Haddelenmiş Çelikler - Teknik Teslim Şartları*, TS EN 10089, Ankara, 2005.

- [20] E. Keskin, H. Ahlatcı, Y. Türen, M.A. Küçük, and Y. Subaşı, “Heat treatment application of spring steel”, *UDCS'19 Fourth International Iron and Steel Symposium*, Karabük, Nis. 2019, pp. 383-386.
- [21] H. Durmuş, F.G. Çakır, ve C. Gül, “Farklı menevişleme sıcaklıklarının 51CrV4 çeliğinin mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 8, sayı 3, s. 662-670, Eyl. 2020, [doi.org/10.29109/gujsc.738641](https://doi.org/10.29109/gujsc.738641).
- [22] C. Civi, M. Yurddaşkal, E. Atik, and E. Celik, “Quenching and tempering of 51CrV4 (SAE-AISI 6150) steel via medium and low frequency induction”, *Mechanical Testing/Materialography*, vol. 60, no. 6, pp. 614-618, May. 2018, [doi.org/10.3139/120.111196](https://doi.org/10.3139/120.111196).
- [23] R.C. Ozden, E. Lokcu, and M. Anık, “Effects of deep cryogenic treatment on the microstructural properties of medium carbon spring steels”, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, vol. 11, pp. 5-8, Nov. 2020. [Online] Erişim adresi: <http://www.epstem.net/en/download/article-file/1432002>.
- [24] M.S. Htun, S.T. Kyaw, and K.T. Lwin, “Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of spring steel”, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 18, no. 2, pp. 191-197, Jan. 2008. [Online] Erişim adresi: [https://ahmadefancenter.files.wordpress.com/2011/11/effect-of-heat-treatment-htun-shan\\_-m.pdf](https://ahmadefancenter.files.wordpress.com/2011/11/effect-of-heat-treatment-htun-shan_-m.pdf).
- [25] A. Kubit, M. Bucior, W. Zielecki, and F. Stachowicz, “The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel”, *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 3330-3336, Jun. 2016. [Online] Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616304346>.
- [26] A. Bajželj and J. Burja, “Influence of austenitisation time and temperature on grain size and martensite start of 51CrV4 spring steel”, *Crystals*, vol. 12, p. 1449, pp. 1-13, Oct. 2022, [doi.org/10.3390/cryst12101449](https://doi.org/10.3390/cryst12101449).
- [27] M.I. Abro, M.M. Bloch, and M.H. Jokhio, “Effect of temperature on the toughness of locally manufactured low alloy steel SUP9 used for manufacturing leaf springs”, *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 635-644, Oct. 2011. [Online] Erişim adresi:



<https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/P20170126001-201110-201702060031-201702060031-635-644>.

- [28] İ. Ertürk, T. Durukan, ve B. Şentürk, “Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikro yapı ve özelliklerinin tahmini”, *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 2017, s. 1-14. [Online] Erişim adresi: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/e2613b3e8fe26e7\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/e2613b3e8fe26e7_ek.pdf).
- [29]<https://www.struers.com/en/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/Hexamatic>. Erişim tarihi: 8 Aralık 2023.
- [30]<https://microscopecentral.com/products/olympus-bx51m-metallurgical-microscope>. Erişim tarihi: 8 Aralık 2023.
- [31][https://www.emcotest.com/uploads/tx\\_pim/8/2/b/a/82bab2ac1fffb2afe18f1db308640858948ed22\\_EN3020\\_DuraJet.pdf](https://www.emcotest.com/uploads/tx_pim/8/2/b/a/82bab2ac1fffb2afe18f1db308640858948ed22_EN3020_DuraJet.pdf). Erişim tarihi: 8 Aralık 2023.
- [32] S.E. Vahdat, “Effect of deep cryogenic processing on tensile toughness of 45WCrV7 steel”, *International Journal of Steel Structures*, vol. 14, no. 3, pp. 571-578, Sep. 2014, [doi.org/10.1007/s13296-014-3014-9](https://doi.org/10.1007/s13296-014-3014-9).
- [33]<https://deben.co.uk/e-beam-instrumentation/tabletop-sem-accessories/hitachi-tm-1000-accessories/>. Erişim tarihi: 25 Ağustos 2023.