

**ÇİFT FAZLI BİR ÇELİĞİN FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI VE YAPAY SINIR AĞLARI İLE KESTİRİMİ**

**OKAN TOPÇU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2009  
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Anabilim Dalı Başkanı

Okan TOPÇU tarafından hazırlanan ÇİFT FAZLI BİR ÇELİĞİN FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE YAPAY SINIR AĞLARI İLE KESTİRİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Elif Derya ÜBEYLİ

2. Tez Danışmanı

---

Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

1. Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Üye : Doç. Dr. Adem ACIR

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Okan TOPÇU

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**1. Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**2. Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Elif Derya ÜBEYLİ  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Ağustos 2009

**Okan TOPÇU**

## **ÇİFT FAZLI BİR ÇELİĞİN FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KESTİRİMİ**

### **ÖZET**

Bu çalışmada değişik sıcaklıklarda ara-kritik tavlanmış ve su verilmiş düşük alaşımlı çeliğin frezede işlenebilirliği incelenmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçların yapay sinir ağları ile kestirimi yapılmıştır. Ara-kritik bölgede gerçekleştirilen ısıl işlemler sonrasında içyapılar incelenip martensit hacim oranları belirlenmiştir. Ayrıca 737°C, 754°C ve 779°C sıcaklıklarından su verilmiş düşük, orta ve yüksek martensit hacim oranlarına sahip çeliğin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda değişik martensit hacim oranlarına sahip çeliklere Jominy uca su verme deneyi yapılarak sertleşebilirlikleri tespit edilmiştir. İşlenebilirlik, frezeleme işlemi kullanılarak değişik kesme hızlarında değerlendirilmiştir. Ayrıca bu işlemlerde karşılaştırma yapmak amacıyla kaplamasız ve TiN kaplamalı sementite karbür uçlar kullanılmıştır. Martensit hacim oranının ve kesme parametrelerinin takım ucu aşınmasına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Elman'ın yinelenen sinir ağları ile birlikte Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmış ve kestirim işleminin başarılı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** çift fazlı çelik, martensit hacim oranı, mikro sertlik, Jominy uca su verme, işlenebilirlik, takım aşınması, yinelenen sinir ağları

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**2nd Supervisor** : Associate Professor Dr. Elif Derya ÜBEYLİ  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – August 2009

**Okan TOPÇU**

**INVESTIGATION ON THE MACHINABILITY OF A DUAL PHASE STEEL  
IN MILLING AND ITS ESTIMATION BY ARTIFICIAL NEURAL  
NETWORKS**

**ABSTRACT**

In this study, the machinability of a low alloy steel in milling, which was inter-critically annealed and quenched at various temperatures, was examined. In addition, estimation of the experimental results was made with the use of artificial neural networks. The micro structures were observed and the martensite volume fractions were determined after the application of heat treatments which were carried out in the inter-critical region. Also, the mechanical properties of the steel with low, medium and high martensite volume fractions, which were obtained by quenching from 737°C, 754°C and 779°C temperatures, were evaluated. Meantime, hardenability of the steel with various martensite volume fractions was detected by the application of Jominy end quench testing. Machinability was carried out by using the milling process at various cutting speeds. Besides, uncoated and TiN coated cemented carbide inserts used in order to make comparison. The effect of martensite volume fractions and the cutting parameters on tool wear and the surface roughness were determined. Along with the Elman's recurrent neural networks, Levenberg-Marquardt algorithm was applied and verified to be successful.

**Keywords: dual phase steel, martensite volume fraction, micro hardness, Jominy end-quench test, machinability, tool wear, recurrent neural networks**

## **TEŞEKKÜR**

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ ve Doç. Dr. Elif Derya ÜBEYLİ'ye, Gazi Üniversitesinden Doç. Dr. Adem ACIR'a, ayrıca maddi destekleri için TÜBİTAK'a, manevi desteklerinden dolayı aileme ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KURAM	3
2.1. Çift Fazlı Çelikler	3
2.1.1. Üretim Yöntemleri	4
2.1.2. Kullanım Alanları	5
2.2. Çelik Malzemeler	7
2.2.1. Alaşım Elementleri	7
2.3 Mikro Yapılar	9
2.3.1. Allotriomorfik Ferit	10
2.3.2. Widmanstätten Ferit	10
2.3.3. Beynit	11
2.3.4. Pörlit	12
2.3.5. Martensit	12
2.4. Malzeme Özellikleri	13

2.4.1. Metalografi	13
2.4.2. Gerilme-Gerinim	14
2.4.3. Sertlik	16
2.5. Isıl İşlem	16
2.5.1. Tavlama Isıl İşlemi	17
2.5.2. Normalleştirme Tavlaması	17
2.5.3. Sertleştirme Isıl İşlemi	18
2.5.3.1. Ara-kritik Bölgeden Su Verme Isıl İşlemi	19
2.5.4. Menevişleme	20
2.6. Sertleşebilirlik	20
2.7. Talaş Kaldırma	22
2.7.1. Talaş Biçimlenmesi	23
2.7.1.1. Talaş Kaldırma Kuramları	24
2.7.2. Genelleştirilmiş Talaş Oluşumu Modeli	24
2.7.2.1. Gevrek Malzemeler	25
2.7.2.2. Sünek Malzemeler	26
2.7.2.3. Aşırı Sünek Malzemeler	26
2.7.3. Frezeleme	27
2.7.4. Takım Malzemesi	29
2.7.5. Takım Ömrü	31
2.7.6. İşlenebilirlik	32
2.7.7. Yüzey Pürüzlülüğü	33
2.7.8. Takım Aşınması	35



3. DENEYSEL YÖNTEM	40
3.1. Martensit Hacim Oranının Belirlenmesi	40
3.2. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri	43
3.3. Jominy Uca Su Verme Deneyi	44
3.4. Çekme Deneyi	45
3.5. Mikro Yapı İncelemesi	45
3.6. Isıl İşlem	46
3.7. İşlenebilirlik	46
4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	50
4.1. Kimyasal İçerik	50
4.2. Martensit Hacim Oranı	50
4.3. Makro ve Mikro Sertlik	52
4.4. Jominy Uca Su Verme Deneyi Sonuçları	54
4.5. Mikro Yapı	56
4.6. Çekme Deneyi	66
4.7. İşlenebilirlik	68
4.8. Takım Aşınması	74
5. YAPAY SİNİR AĞLARI	94
5.1. Yinelenebilir Sinir Ağları	100
5.2. Levenberg Marquardt Algoritması	103
5.3. RNN ile İşlenebilirlik Kestirimi	104
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR	111



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan kesme parametreleri	47
Çizelge 3.2.	Deneylerde kullanılan kesici uçların teknik özellikleri	48
Çizelge 4.1.	Mikro alaşımlı çeliğe ait spektral analiz sonuçları	50
Çizelge 4.2.	Mikro alaşımlı çeliğin ısıtılma işlemi ile değişen mekanik özellikleri	68

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	Farklı sınıflardan çelik plakaların gerilme-gerinim diyagramında karşılaştırılması	4
Şekil 2.2.	Çift fazlı çelik elde edilmesinde kullanılan sıcak haddeleme ve ısı çevrimlerinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramı ile birlikte gösterimi	5
Şekil 2.3.	Yüksek dayanımlı çelik plakalar kullanılarak üretilebilen taşıt parçaları	6
Şekil 2.4.	1200°C'dan su verilmiş $\alpha_{\text{demir}}$ içerisinde çözünmüş alaşım elementlerinin sertliğe etkisi	10
Şekil 2.5.	Allotriomorfik ferrit ve Widmanstatten ferrit şematik gösterimi	11
Şekil 2.6.	Pörlit kolonileri şematik gösterimi	12
Şekil 2.7.	Üç farklı sıcaklıktan su verilen çeliğe ait martensit sertlik değerleri	13
Şekil 2.8.	Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı şematik gösterimi	19
Şekil 2.9.	41Cr4 çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm diyagramı ve oluşan yapılara ait hacim oranları	21
Şekil 2.10.	İmalat yöntemlerinin a) tolerans ve yüzey pürüzlülüğü, b) talaş kaldırma, soğuk deformasyon ve döküm ile elde edilebilecek parça karmaşıklığı ve boyutuna göre kıyaslanması	22
Şekil 2.11.	İlk talaş oluşumu gözlemleri a) Tresca (1878) ve b) Mallock (1881 - 82)	23
Şekil 2.12.	Gevrek bir iş parçasının işlenilmesi sırasında talaş oluşumu	25
Şekil 2.13.	Sünek bir iş parçasının işlenilmesi sırasında talaş oluşumu	26
Şekil 2.14.	Aşırı sünek bir iş parçasının işlenilmesi sırasında talaş oluşumu	27
Şekil 2.15.	Alın frezelemedeki kesme parametreleri	28
Şekil 2.16.	Artan kesme hızlarında, kesme süresine karşılık yan kenar aşınması	32
Şekil 2.17.	Kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi	35
Şekil 2.18.	Farklı takım aşınması türleri	36
Şekil 3.1.	Martensit hacim oranının belirlenmesi için resimlerin işlenilmesi aşamaları	42
Şekil 3.2.	Fe-Fe <sub>3</sub> C faz diyagramı ile $\gamma_{\text{demir}}$ içerisindeki C miktarının belirlenmesi	43
Şekil 3.3.	Jominy deneyi numunesi ve deney düzeneğindeki konumu	44
Şekil 3.4.	Çekme deneyi numunesi	45
Şekil 3.5.	Gerçekleştirilen ısı işlemlerin şematik gösterimi	46
Şekil 3.6.	İş parçası boyutları ve tezgâhtaki konumu	48
Şekil 3.7.	Kesici uç geometrisi	48
Şekil 4.1.	Su verme sıcaklığına bağlı martensit hacim oranı değişimi	51

Şekil 4.2.	Su verme sıcaklığına bağlı değişen yüzey sertlik değerleri	52
Şekil 4.3.	Fazlara ait mikro sertlik değerleri	53
Şekil 4.4.	Farklı martensit hacim oranlarında elde edilen sertleşebilirlik eğrileri	54
Şekil 4.5.	Jominy eğrisi ve mikro yapı ilişkisi	55
Şekil 4.6.	737°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)	56
Şekil 4.7.	754°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)	57
Şekil 4.8.	779°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)	58
Şekil 4.9.	900°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)	58
Şekil 4.10.	Normalleştirme yapılmış yapının mikroskop görüntüsü, (x1000 büyütme)	59
Şekil 4.11.	Tam tavlanmış yapının mikroskop görüntüsü, (x1000 büyütme)	60
Şekil 4.12.	Allotriomorfik ferrit ve widmanstatten ferrit, (x1000 büyütme)	60
Şekil 4.13.	Alt beynit (a) ve Üst beynitin (b) x1000 büyütmede çekilmiş mikroskop resimleri	61
Şekil 4.14.	Widmanstatten ferrite ait FIB görüntüsü	62
Şekil 4.15.	Alt beynite ait FIB görüntüsü	63
Şekil 4.16.	Üst beynite ait FIB görüntüsü	63
Şekil 4.17.	Martensite ait FIB görüntüsü	64
Şekil 4.18.	Normalleştirilmiş çelikteki pörlite ait FIB görüntüsü	65
Şekil 4.19.	Tam tavlanmış çelikteki pörlite ait FIB görüntüsü	66
Şekil 4.20.	Çekme deneylerine ait gerilme-gerinim diyagramları	67
Şekil 4.21.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 100 m/dak kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri	69
Şekil 4.22.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 160 m/dak kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri	70
Şekil 4.23.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 220 m/dak kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri	70
Şekil 4.24.	Kaplamasız kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 220 m/dak 'daki kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	72
Şekil 4.25.	Kaplamalı kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 220 m/dak 'daki kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	73
Şekil 4.26.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 20 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri	74

Şekil 4.27	20 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	76
Şekil 4.28.	20 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	77
Şekil 4.29.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 30 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri	78
Şekil 4.30.	30 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	80
Şekil 4.31.	30 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	81
Şekil 4.32.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 35 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri	82
Şekil 4.33.	35 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	83
Şekil 4.34.	35 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	84
Şekil 4.35.	Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 40 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri	85
Şekil 4.36.	40 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	86
Şekil 4.37.	40 HRC değerindeki iş parçasının 100 (a), 160 (b), 220 (c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri	87
Şekil 4.38.	20 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen kırılmanın SEM görüntüsü	88
Şekil 4.39.	20 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü	88
Şekil 4.40.	30 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü	89
Şekil 4.41.	35 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü	90

Şekil 4.42.	40 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü	91
Şekil 4.43.	40 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü	91
Şekil 4.44.	Kaplamalı kesici takım yüzeyinin EDS analizi, iş parçası 40 HRC, kesme hızı 100 m/dak	92
Şekil 4.45.	Kaplamalı kesici takım yüzeyinin EDS analizi, iş parçası 30 HRC, kesme hızı 160 m/dak	93
Şekil 5.1.	Basit bir sinir hücresinin şematik gösterimi	94
Şekil 5.2.	Gauss işlemcili ileri beslemeli bir yapay sinir	95
Şekil 5.3.	Çok katmanlı sinir ağı şematik gösterimi	95
Şekil 5.4.	Elman yinelenen sinir ağının şematik gösterimi	102
Şekil 5.5.	RNN'nin giriş ve çıkışlar ile şematik gösterimi	105
Şekil 5.6.	RNN ile 100 m/dak kesme hızında kaplamalı kesici uç aşınmasının kestirimi	105
Şekil 5.7.	RNN ile 160 m/dak kesme hızında kaplamasız kesici uç aşınmasının kestirimi	106
Şekil 5.8.	RNN ile 220 m/dak kesme hızında kaplamasız kesici uç aşınmasının kestirimi	107

## KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan kısaltmalar açıkları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>BSD / CNC</b>	Bilgisayar Sayısal Denetim
<b>BUE</b>	Yığıntı kenar
<b>CCT</b>	Sürekli Soğuma Dönüşüm
<b>EDS</b>	Enerji Dağılım Spektroskopisi
<b>FHO</b>	Ferrit Hacim Oranı
<b>FIB</b>	Odaklanmış İyon Işını
<b>HB</b>	Brinell Sertliği
<b>HRA</b>	Rockwell A Sertliği
<b>HRC</b>	Rockwell C Sertliği
<b>HV</b>	Vickers Sertliği
<b>HMT</b>	Hacim Merkezli Tetragonal
<b>MHO</b>	Martensit Hacim Oranı
<b>MMC</b>	Metal Esaslı Kompozit
<b>PCBN</b>	Çok kristalli Kübik Bor Nitür
<b>PCD</b>	Çok kristalli Elmas
<b>RNN</b>	Yinelenen Sinir Ağı
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>SFD</b>	Katı Film Elmas
<b>TFD</b>	İnce Film Elmas
<b>YDDA</b>	Yüksek Dayanım Düşük Alaşım
<b>YMK</b>	Yüzey Merkezli Kübik
<b>YSA</b>	Yapay Sinir Ağı



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\alpha_{\text{demir}}$	Ferrit
$\gamma_{\text{demir}}$	Östenit
$\text{Fe}_3\text{C}$	Sementit
$\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$	Demir-Sementit
$A_{c1}$	Alt dönüşüm sıcaklığı, eğrisi
$A_{c3}$	Üst dönüşüm sıcaklığı, eğrisi
$M_s$	Martensit başlama sıcaklığı
$M_f$	Martensit bitiş sıcaklığı
$r$	Plastik gerinim oranı
$M_{vf}$	Martensit hacim oranı
$T_q$	Su verme sıcaklığı
$t_1$	Talaş derinliği
$t_2$	Talaş kalınlığı
$\varphi$	Kayma açısı
$n$	Ana mil hızı
$V_c$	Kesme hızı
$D$	Freze çakısı çapı
$f$	Devir başına ilerleme
$f_z$	Kesici uç başına ilerleme
$z$	Kesici uç sayısı
$V_f$	İlerleme hızı
$a_p$	Eksenel talaş derinliği
$a_e$	Radyal talaş derinliği
$V$	Kaldırılan talaş hacmi
$R_a$	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
$r$	Uç yarıçapı
$R_{th}$	Takım ucu iz yüksekliği
$C_e$	Arka kesme kenarı açısı
$C_s$	Yan kesme açısı

## 1. GİRİŞ

1970'li yıllarda yaşanan enerji krizi sonucu yakıtların daha verimli kullanılabilmesi amacıyla taşıt sektörü, yüksek verimli motor, yüksek verimli vites, araç ağırlıklarının azaltılması ve aerodinamik özelliklerin iyileştirilmesi gibi alanlarda çalışmalar gerçekleştirmiştir [1]. Taşıt ağırlıklarının 1,5 – 1 tondan 500 kg gibi düşük seviyelere çekilmesi ile tüketilen yakıt miktarı yarı yarıya azaltılabilmektedir [2]. Günümüzde daha bilinçli tüketicilerin sayısının ve çevreye olan duyarlılığın artması ile yeni yakıt türleri araştırılmakta ve araç ağırlıklarının azaltılması amacı ile çeşitli malzemelerin kullanımı hız kazanmaktadır. Son yıllarda plastik ve kompozit malzemelerin daha fazla kullanım alanı bulmasına karşın, bu tür malzemeler insan hayatı söz konusu olduğu için, güvenlik sınırlamaları dolayısı ile taşıtlarda sınırlı kullanım alanları bulabilmektedirler. Taşıtlardaki güvenlik sınırlamaları yüksek dayanımlı malzemelerin kullanımını zorunlu kılmakta buna bağlı olarak taşıt ağırlıklarının düşürülmesi çalışmaları malzeme teknolojisi ile sınırlanmaktadır. Çift fazlı çelikler, düşük karbonlu çelikler ile kıyaslandığında benzer mekanik özellikleri çok daha düşük kesit alanlarında sağlayabilmekte ve kesit alanının azaltılması ile kullanılan malzeme hacmi ve beraberinde toplam taşıt ağırlığı azalmaktadır. Benzer biçimde ihtiyaç duyulan özelliklerin korunabildiği düşük miktarlarda malzeme kullanımı ile maliyetler de azaltılabilmektedir. Malzeme alanında yapılan araştırmalar sayesinde teknoloji ilerlemekte ve yeni malzemeler yeni kullanım alanları bulmaktadır.

Talaş kaldırma işlemleri diğer imalat yöntemlerinde elde edilmesi güç olan hassas parçaların imalatında ve yüksek yüzey kalitesine ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu uygulamalar özellikle taşıt ve uzay-havacılık sanayisinde geçmişte çelik ile imal edilen, günümüzde daha hafif malzemelerin kullanıldığı parçalarda büyük önem arz etmektedir. Ayrıca işlem maliyetlerinin en düşük seviyede tutulması için ideal kesme şartlarının belirlenmesi de talaş kaldırma uygulamalarında belirleyici rol oynamaktadır. Bu pahalı malzemelerin, en uzun takım ömrü ile en düşük yüzey pürüzlülük değerinde, en kısa sürede ve düşük maliyetlerle üretilmesi tercih edilmektedir. Fakat dayanımın artması ile kısalan takım

mr ve artan maliyetler, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi sırasında artan işlem zamanları, talaş kaldırma işleminin gerekleebilirliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu olumsuzluklara rağmen işlem parametrelerinin doğru seçilmesi ile en ideal durum tespit edilebilir ve olumsuz etkiler en alt seviyeye çekilebilir. Bu sebepten dolayı malzemenin ilenebilirliğinin belirlenmesi ilk olarak halledilmesi gereken itir.

Yapay sinir ağları (YSA) beyindeki sinirlerin matematiksel olarak modellenmesi sonucu ortaya çıkmış ve biyolojik sinirlerin gerçekleştirdiği işlemleri taklit edebilmeleri sayesinde farklı alanlarda kullanım bulmuşlardır. YSA'ları özellikle elektronik, tıp, savunma, üretim, kontrol ve otomasyon alanlarında uygulama bulmaktadır. İlenebilirlik uygulamalarında da YSA'larının yardımından faydalanılmaktadır. İlenebilirliği etkileyen ilerleme, kesme hızı, talaş derinliği, kesme kuvvetleri, titreşimler, malzeme özellikleri vb. değişkenler YSA'ları için giriş değerleri olarak kullanılmakta ve takım ömrü ile elde edilebilecek yüzey pürüzlülüğü tezgâh alıtırılmadan düşük hata değerleri ile tespit edilebilmektedir.

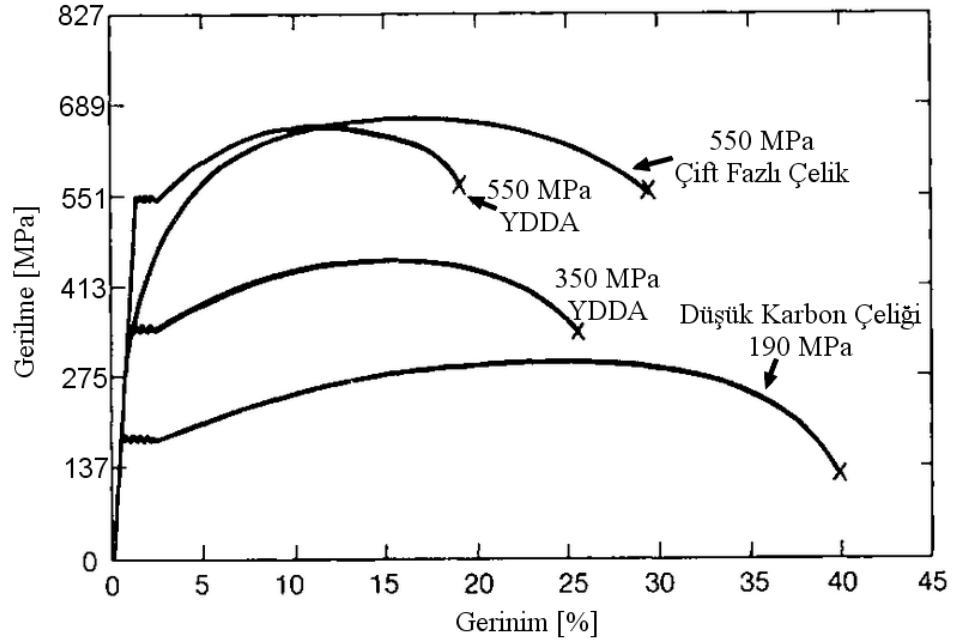
Yapılan bu tez çalışmasında düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliğin ara-kritik bölge sıcaklıkları tespit edilerek çift fazlı yapısı hakkında bilgi edinilmiştir. Üç farklı hacim oranında ısıl işlemleri gerçekleştirilen numunelerle çekme deneyleri, sertlik deneyleri ve Jominy uca su verme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlenebilirlik araştırması için farklı hacim oranlarında numuneler hazırlanmıştır. İlenebilirliğin tespit edilmesi amacıyla i parçalarının yüzey pürüzlülükleri ve kesici uçlarda oluşan aınmalar incelenmiştir. Elde edilen yan kenar aınmaları ile kaldırılan talaş hacimleri YSA'larının eğitiminde kullanılarak kestirilebilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalar ile düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliğin farklı kullanım alanları bulması amaçlanmaktadır.

## 2. KURAM

Çift fazlı çelikler farklı üretim yöntemleri ile üretilebilmektedirler. Farklı yöntemler sonucu bu yöntemlere bağlı değişiklik gösteren mekanik özellikler ve mikro yapılar oluşmaktadır. Çelik kullanılacağı alana bağlı olarak, tercih edilen özellikleri sağlaması amacı ile gerekli ve uygulanabilir yöntemler kullanılarak imal edilmektedir.

### 2.1. Çift Fazlı Çelikler

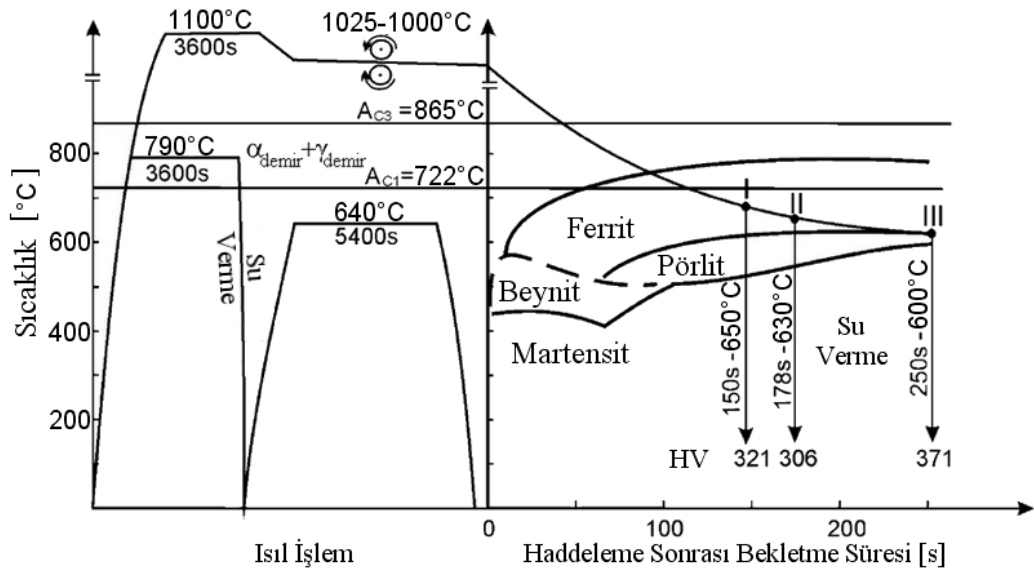
Çift fazlı çelikler, düşük değerlerde başlayan sürekli akma özellikleri, yüksek çekme dayanımları, düzgün ve toplam uzama değerleri birlikte düşünüldüğünde diğer çeliklere oranla üstün özellikleri olması ile bilinmektedirler [3]. Çeliğin bu özelliklerinin diğer çelik türleri ile kıyaslandığı gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.1'de verilmiştir. İlk olarak Rashid tarafından vanadyum mikro alaşımlı çeliğin tavlama ile raporlanmış ve Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı (YDDA) çeliklerden yüksek dayanım, iş sertleşmesi, süneklik ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özellikler açısından daha üstün niteliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir [4]. Günümüzde çift fazlı çelikler, YDDA'lı çeliklerden türetilmiş, akma dayanımları yaklaşık 550 MPa ve mikro yapısının %20 civarı  $\alpha_{\text{demir}}$  (ferrit) anayapı içerisindeki martensit fazdan oluşan, bir çelik türü olarak bilinmektedir [5].



Şekil 2.1. Farklı sınıflardan çelik plakaların gerilme-gerinim diyagramında karşılaştırılması [3]

### 2.1.1. Üretim Yöntemleri

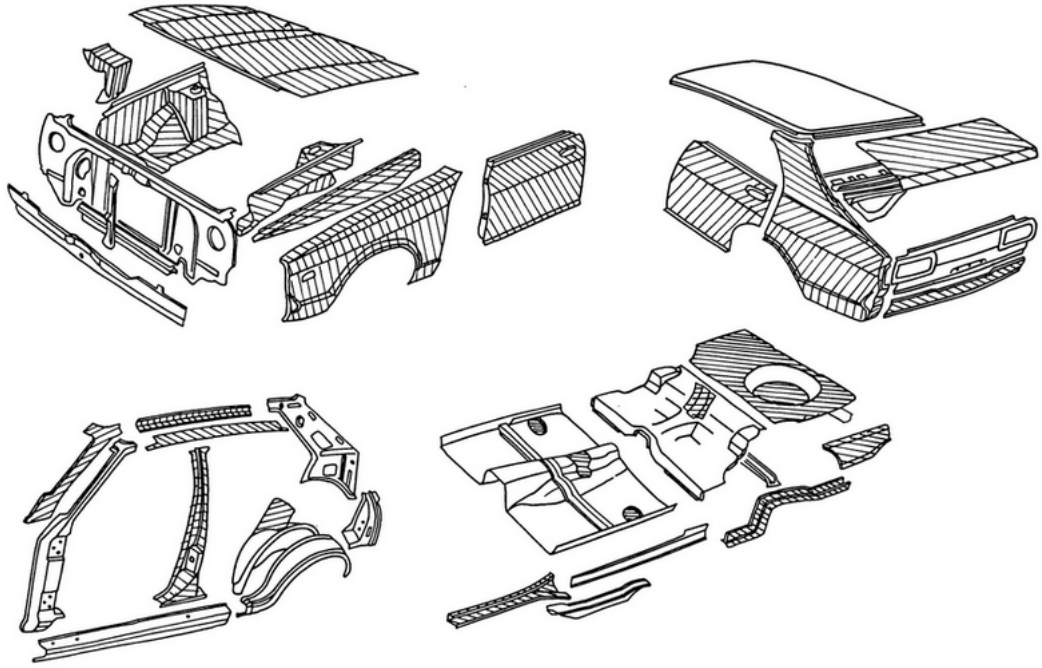
Teknolojik gelişmeler ile birlikte çelik üretim yöntemlerinde de gelişmeler yaşanmıştır. Sıcak ve soğuk haddeleme ile plakalar haline getirilen çelik, devamında çift fazlı yapı elde etmek ve tane boyutlarının iyileştirilmesi, çökelti sertleşmesi, kalıntı gerilmelerin giderilmesi gibi tavlama sırasında gerçekleşen iyileştirmeler için sürekli tavlama işlemine tabi tutulmaktadır. Tavlamadan sonraki sertleştirme işlemlerinde 10 °C/s'den 1000 °C/s'ye kadar değişen soğutma hızları ile  $\alpha_{\text{demir}}$  anayapı içerisinde martensit yapı elde edilebilmektedir.  $\alpha_{\text{demir}}$  hızlı soğutma sonucu karbonca zengin olmakta, ayrıca çelik yüksek dayanım, düşük süneklik ve düşük yaşlandırma direnci özellikleri göstermektedir. Hızlı soğutma sonucu gözlenen bu olumsuz özellikler menevişleme işlemi gerçekleştirilerek ortadan kaldırılabilmektedir [3]. Şekil 2.2'de sıcak haddeleme devamında çift fazlı yapı elde etmek için uygulanmış ısı işlemlere ait şematik bir gösterim verilmiştir.



Şekil 2.2. Çift fazlı çelik elde edilmesinde kullanılan sıcak haddeleme ve ısı çevrimlerin sürekli soğuma dönüşüm diyagramı ile birlikte gösterimi [6]

### 2.1.2. Kullanım Alanları

Çift fazlı çelikler büyük oranda taşıt sektörü tarafından araç ağırlıklarının azaltılmasında kullanılmaktadırlar. Çift fazlı yapı elde edildikten sonra ince plakalar son şekilleri verilmek üzere pres ile şekillendirilmekte ve taşıt gövdesine kaynaklanmaktadır. Pres ile şekillendirmede ön plana çıkan mekanik özellikler şekillendirilebilirlik, rijitlik, çentik direnci, sertlik, yorulma dayanımı ve geniş kesitlerde darbe dayanımı olmaktadır [1, 7]. Şekil 2.3’de taşıtlarda kullanılan yüksek dayanımlı çelik plakaların kullanıldığı yerler resmedilmiştir. Pres şekillendirme işleminde 0,7 mm’den 1,6 mm kalınlığına kadar değişen plakalar kullanılmaktadır [7].



Şekil 2.3. Yüksek dayanımlı çelik plakalar kullanılarak üretilen taşıt parçaları [7]

Çelik plakalar, Toyota firmasının 1978 model Mark II taşıtı referans alınarak, ana gövde, motor ve dış panellerde diğer kullanılan malzemeler arasında %43,4 oranında yer bulmaktadırlar [1]. Gelecekteki uygulamalar için tampon destek parçalarında 1200 MPa gibi yüksek dayanımlı, süspansiyon, tekerlek ve aks yuvasında 800 MPa dayanımlı, iç panellerde 500 MPa ve dış panellerde ise 450 MPa dayanıma sahip çelik plakalar kullanılması öngörülmektedir [2]. Kullanılan çelik plakalar, çift fazlı çelik, üç fazlı çelik, ferritik-beynitik çelik, beynitik çelik ve çökelti sertleşmesi ile dayanımı arttırılmış ferrit-pörlit çeliği biçiminde olmaktadır. Çift fazlı çelikler delik genişletme, dayanım ve süneklik göz önüne alındığında üç fazlı çeliğin hemen altında bir konumda bulunmaktadırlar [2].

Ayrıca ferrit ve martensit fazlardan oluşan çift fazlı çeliklerin, füzyon uygulamaları gibi taşıt sanayisi dışında çok farklı alanlarda da kullanılabilirliği araştırılmıştır [8].

## 2.2. Çelik Malzemeler

Çeliğin dayanımını, içerisinde bulunan alaşım elementlerinin katı çözültü oluşturması, tane boyutlarını inceltmesi ve dislokasyonları arttırması gibi etkileri ile arttırılabilmektedir. Her bir alaşım elementinin yapı üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Çelikler sahip oldukları alaşım elementleri sayesinde kazandıkları mekanik ve fiziksel özelliklere göre sınıflandırılmaktadırlar.

### 2.2.1. Alaşım Elementleri

Çift fazlı çeliklerde ince plakalar halinde kullanıldıkları için diğer çelik türlerinden farklı olarak mikro alaşımlama tercih edilmektedir. Bu amaçla tane inceltmesi, sertleşebilir derinliğin arttırılması ve karbür oluşturu etkisi bulunan alaşım elementleri düşük miktarlarda yapıya eklenilmektedirler.

Karbon ( C ) çeliklerde kullanılan temel alaşım elementini temsil etmektedir. Dayanımı arttırmak için C elementi ilavesi yapılmakta fakat  $\alpha_{\text{demir}}$  yapı içerisinde X-karbürler oluşmakta ve şekillendirilebilirlik azalmaktadır. Şekillendirilebilirliğin önemli olduğu plaka çeliklerde C alaşım elementi miktarı %0,10 seviyesinde veya daha az olması tercih edilmektedir [5]. Yüksek dayanım ve süneklik değerlerinin C atomu miktarı ile değişimi incelendiğinde en ideal değerlerin ağırlıkça %0,3 C içeren çift fazlı çeliğin  $A_{c1}$  sıcaklığının hemen üzerinden su verilerek elde edildiği gözlemlenmiştir [9]. Kaynaklanabilirliğin önemli olduğu uygulamalarda düşük C yüzde ağırlık oranları tercih edilmekte, buna bağlı olarak dayanım değerlerinden bir miktar fedakârlıkta bulunmaktadır.

Kükürtün ( S ) zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için yapıya genellikle %0,15 - %0,35 oranında eklenen Mangan ( Mn ), sıcak işlenebilirliği arttırmakta ve tane boyutu kontrolü sağlamaktadır [5]. Silisyum ( Si ) veya Krom ( Cr ) ilavesi ile Mn



alaşımli çeliklere ait dayanım ve süneklik değerleri iyileştirilebilmektedir [10]. Tavlama sırasında Mn 'ın  $\alpha_{\text{demir}}$  fazdan  $\gamma_{\text{demir}}$  faza geçişi ve  $\gamma_{\text{demir}}$  'in dayanımının artışı incelendiğinde, ayrışmanın önce,  $\alpha_{\text{demir}} - \gamma_{\text{demir}}$  tane sınırının Mn 'ca zenginleşmesi ve devamında  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisine yayılması biçiminde gerçekleştiği, tavlama süresindeki artış ile miktarın arttığı ve tavlama sıcaklığının düşmesi ile azaldığı gözlemlenmiştir [11].

Alaşım elementi olarak Si ilavesi ile fazların ayrışması hız kazanmakta ve  $\gamma_{\text{demir}}$  fazdaki C atomu miktarı artmakta, buna bağlı olarak sertleşebilirlik iyileşmektedir [10].

Genellikle çeliklerde belirli bir C oranına karşılık sertleşebilirliğin artırılması için Mn ilavesi yapılmaktadır. Maliyetlerin düşük tutulması amacıyla, yapıya sertleşebilirliği arttırmak amacıyla bilinen en ekonomik alaşım elementleri olan Cr ve Molibden (Mo) eklenmesi de bilinen bir yöntemdir. Tokluğun önemli olduğu uygulamalarda pahalı bir element olan Nikel (Ni) ilavesi yapılarak yüksek tokluk garanti edilebilmektedir [5].

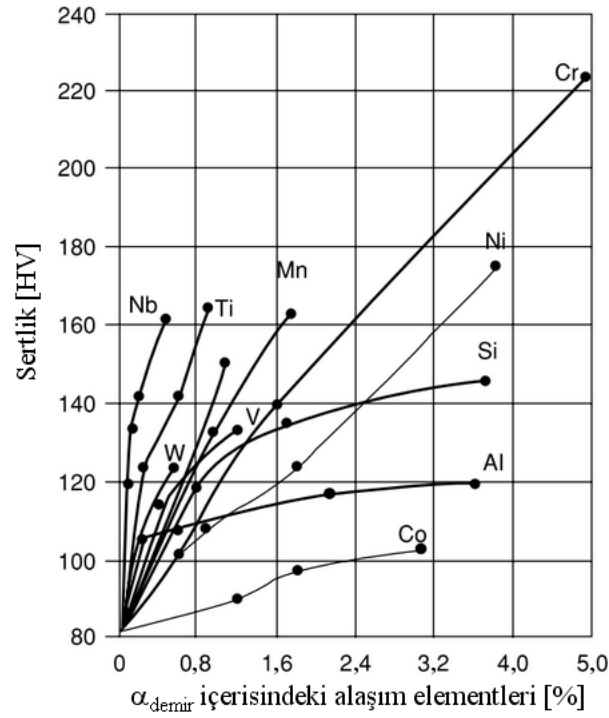
Vanadyum (V),  $\alpha_{\text{demir}}$  taneleri içerisinde V(CN) parçacıkları oluşturarak dayanım arttırıcı etki sağlamaktadır. Her bir ağırlıkça %0,01 miktarında V ilavesi ile dayanım 5 – 15 MPa aralığında arttırılabilmekte, ayrıca V alaşım elementi kullanılarak  $\alpha_{\text{demir}}$  tane boyutları inceltirilerek çeliğin dayanım ve sünekliği arttırılabilmektedir [5].

Martensit- $\alpha_{\text{demir}}$  tane sınırlarındaki karbür parçalarının, gerilme değerlerine zararlı olması dolayısı ile alaşımlama yaparak bu karbürlerin büyümesinin önlenmesi gerekmektedir [12]. Yüksek dayanımlı düşük alaşımli çeliklere alaşım elementi olarak Niyobyum (Nb) eklemesi ile NbC ve NbN oluşmakta ve plaka çeliklerin

inceltilmesi uygulamalarındaki direnci ifade eden plastik gerinim oranı ( $r$ ) ve dayanımı artmaktadır [5, 13].

### 2.3. Mikro Yapılar

Ötektoid altı çeliklerde,  $\gamma_{\text{demir}}$  fazdan yavaş soğutma yaparak  $\alpha_{\text{demir}}$  faz ve  $\alpha_{\text{demir}}$  ve ortorombik sementitin ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) katmanlı bir yapısı olan pörlit, ya da soğutma hızı arttırılarak Widmanstatten ferrit ve beynit yapı, ya da çok yüksek soğutma hızları ile  $\gamma_{\text{demir}}$  faz tamamen martensit yapıya dönüştürülebilmektedir. Farklı soğutma hızları ile elde edilen bu yapılarla, aynı kimyasal içeriğe sahip çeliklere farklı sertlik, tokluk, dayanım ve diğer mekanik özellikler kazandırılabilir. Benzer biçimde aynı fazlar, hızlı soğutma sonucu difüzyonların gerçekleşmemesinden dolayı farklı mekanik özelliklere de sahip olabilmektedirler. Şekil 2.4'de yüksek sıcaklıklarda  $\alpha_{\text{demir}}$  yapı içerisine giren fakat hızlı soğutma ile yapıda sıkışan alaşım elementlerinin, faza ait mekanik özelliklerden birisi olan sertliği arttırdığı görülmektedir [14].



Şekil 2.4. 1200°C'dan su verilmiş  $\alpha_{\text{demir}}$  içerisinde çözülmüş alaşım elementlerinin sertliğe etkisi [14]

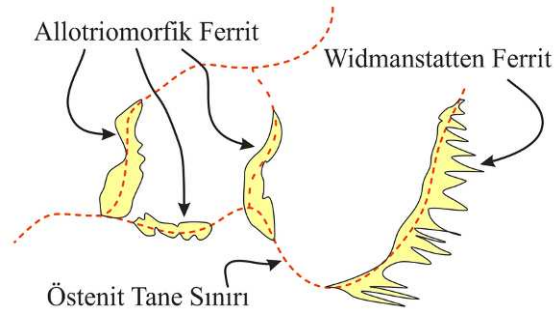
### 2.3.1. Allotriomorfik Ferrit

Allotriomorfik ferrit,  $\gamma_{\text{demir}}$  tane sınırı boyunca çekirdeklenen ve büyüyen  $\alpha_{\text{demir}}$  yapıyı ifade etmektedir. Oluşan yapı tane sınırları boyunca büyüdüktan sonra tane sınırlarına dik olarak büyümesine devam etmektedir. Dönüşüm sırasında kristal kafeslerin yeniden oluşması ile hacimsel değişim de gözlemlenmektedir [14].

### 2.3.2. Widmanstatten Ferrit

$\alpha_{\text{demir}}$  'in,  $\gamma_{\text{demir}}$  tanelerin içerisine doğru dik olarak büyümesi sonucu oluşturduğu şekle Widmanstatten ferrit adı verilmektedir.  $\gamma_{\text{demir}}$  tane sınırlarından ve  $\alpha_{\text{demir}}$  tane

sınırlarından büyüyerek oluşan iki farklı Widmanstatten ferrit yapı bulunmaktadır. Widmanstatten ferrit ve allotriomorfik ferritten daha düşük sıcaklıklarda oluşmaya başlamaktadır. Allotriomorfik ferrit yapıda çekirdeklenen  $\alpha_{\text{demir}}$  kristallerinin  $\gamma_{\text{demir}}$  'in içerisine doğru büyümesi sonucu Widmanstatten yapı oluşmakta ve büyümenin hızını  $\gamma_{\text{demir}}$  yapı içerisindeki C atomu yayılımı belirlemektedir [14]. Widmanstatten ve allotriomorfik ferrit yapıların şematik gösterimi Şekil 2.5'de resmedilmiştir.



Şekil 2.5. Allotriomorfik ferrit ve Widmanstatten ferrit şematik gösterimi

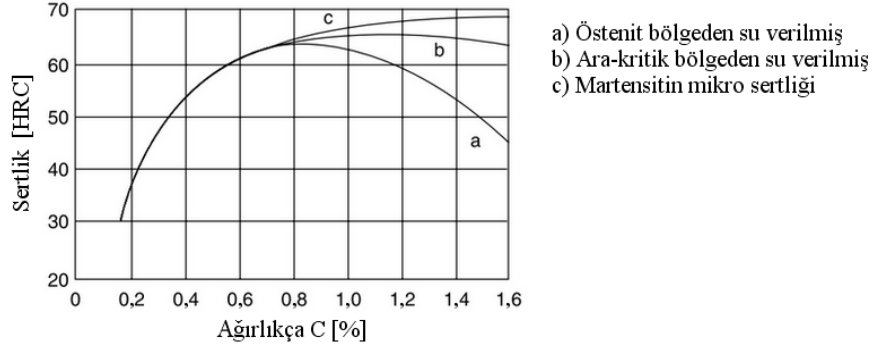
### 2.3.3. Beynit

$\alpha_{\text{demir}}$  plakalarının,  $\gamma_{\text{demir}}$  veya martensit veya  $\text{Fe}_3\text{C}$  'ten oluşan ince filmler ile ayrıldığı yapıya beynit adı verilmektedir. Beynit yapı alt beynit ve üst beynit olarak isimlendirilen iki farklı biçimde oluşabilmektedir. Alt beynit martensit başlama sıcaklığının üzerinde oluşmaya başlamakta, üst beynit ise alt beynitten daha yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır. C atomunca zengin plaka içerisindeki C atomu, soğuma sonucu çevresini kuşatan  $\gamma_{\text{demir}}$  'e yayılmaktadır. Soğuma hızının artması durumunda C atomunun bir kısmı plaka içerisinde sıkışmakta ve karbür çökeltileri oluşturmakta, plakayı kuşatan  $\gamma_{\text{demir}}$  ise martensit yapıya dönüşebilmektedir.[14]



$$\frac{c}{a} = 1 + (0,45) \cdot (\text{ağ. \% C}) \quad (2.1)$$

Ağırlıkça % C miktarına bağlı olan bu boyutsal farklılık martensitin sertliğini doğrudan etkilemektedir. Martensitin  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisindeki C atomu miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri Şekil 2.7’de “c” eğrisi ile verilmiştir. C atomu miktarının artması ile yumuşak bir yapı olan kalıntı östenit oluşmakta ve martensit yapının sertlik değerleri farklılıklar göstermektedirler [14].



Şekil 2.7. Üç farklı sıcaklıktan su verilen çeliğe ait martensit sertlik değerleri [14]

## 2.4. Malzeme Özellikleri

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla için mekanik testler, elektro-kimyasal teknikler, optik resimleme, X-ışını teknikleri, elektron teknikleri, iyon-ışını teknikleri v.b. yöntemler kullanılmaktadır.

### 2.4.1. Metalografi

Çeliklerdeki mikro yapıların incelenmesinde yaklaşık 20 saniye kadar %2’lik Nital çözeltisi ile dağlama işlemi tercih edilmektedir. Nitrik asidin C atomu içeren

yapılarla tepkimeye girmesi sonucu C atomunca zengin olan  $Fe_3C$  tamamen dağlanmakta ve resimlerde siyah renkte gözlemlenmektedir.  $\alpha_{demir}$  ise içerisinde çok az miktarda C atomu içerdiği için asit ile tepkimeye girmemekte ve beyaza yakın açık sarı bir renk almaktadır. Martensit yapının dislokasyon yoğunluğunun yüksek olması dolayısı ile dağlayıcı yapıdan C atomlarını tamamen sökmemekte ve martensit mikroskop altında kahverenginin tonları olarak görüntülenmektedir.

Yapının sağlıklı biçimde incelenebilmesi için kullanılan asidin araştırılan yapı ve diğer yapılarla veya numunelerin kalıplandığı bakalit ile tepkimeye girmemesi büyük önem arz etmektedir [15]. Dağlama işleminin asit ile aşındırılması esasına dayandığından aşınma direnci yüksek bir malzemenin incelenmesi zorlaşmaktadır. Çift fazlı çeliklerin aşınma direnci incelendiğinde, hacim oranı 0,3 olan  $\alpha_{demir}$  anayapı içerisindeki C atomunca aşırı doymuş martensit yapının, diğer hacim oranları ile kıyaslandığında en yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir [16].

Farklı çelik türlerinin ve bu çeliklere ait farklı yapıların incelenmesi amacıyla farklı dağlayıcılar kullanılmaktadır [15]. Marder ve Benscoter [17], martensit hacim oranı (MHO) ölçümlerini, farklı dağlayıcılar kullanarak, hem el ile hem de miktarsal mikroskop teknikleri kullanarak kıyaslamışlardır. Düşük hacim oranlarında sodyum meta bisülfat ( $N_2S_2O_5$ ) kullanılması durumunda bir düzeltme faktörüne gerek olduğunu belirtmiş ve pikrik asit- $N_2S_2O_5$ 'ın beynit ile de tepkimeye girmesinden dolayı daha düşük hacim oranı verdiğini gözlemlemişlerdir.

#### **2.4.2. Gerilme-Gerinim**

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan çekme deneyi, malzemenin çekme kuvvetleri altında

gösterdiği deformasyonun incelendiği gerilme-gerinim eğrisinin elde edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Gerilme-gerinim eğrisi yardımı ile malzemenin elastik, plastik, tokluk özellikleri doğrudan ve sertlik gibi diğer mekanik özellikleri de dolaylı olarak belirlenebilmektedir [18]. Gerilme-gerinim eğrisinden, elastik deformasyonun bitip plastik deformasyonun başladığı noktada akma dayanımı, çekme deneyi gerçekleştirilen numunenin boyun vermesi olarak isimlendirilen kesit alanının bölgesel değişim gösterdiği noktada çekme dayanımı ve düzgün uzama, boyun bölgesinden kopmanın gerçekleştiği noktada kopma dayanımı ve toplam uzama değerleri belirlenebilmektedir.

Bazı malzemelerde, özellikle düşük karbonlu çeliklerin tavllanmış durumlarında, gerilme altındaki davranışı incelenen bölgede dislokasyonlar arası etkileşim sonucu elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gecikmekte ve plastik deformasyona başlayan bantların ilerlemesi tamamlanana kadar plastik davranış başlamamaktadır. Gerilme-gerinim eğrisinde ilk oluşan plastik deformasyon ile üst akma noktası görülmekte ve Lüder bantları oluşmaktadır. Üst akma noktasından sonra tüm Lüder bantları oluşana kadar eğri üzerinde yaklaşık düz bir bölge oluşmakta ve alt akma noktası olarak isimlendirilmektedir [18]. Malzemenin en yüksek kesme gerilmesi Lüder bantlarının oluşmaya başlamasını belirleyen en önemli etkeni temsil etmektedir [19]. Kimyasal içeriği V alaşım elementi miktarı bakımından farklılık gösteren ağırlıkça %0,38 C içeren çelik ile yaptıkları çalışmada Karabulut ve Gündüz [20], normalleştirme ısıl işlemi yapmalarına karşın yüksek V içeren çeliklerde üst ve alt akma noktası elde etmişlerdir.

Çift fazlı çeliklerde çekme kuvvetleri altında önce  $\alpha_{\text{demir}}$  taneleri plastik olarak şekil değiştirmeye başlamakta, ikinci fazı temsil eden martensit taneleri ise elastik olarak şekil değiştirmektedirler. Yapıda akma davranışının gözlemlenmeye başlaması ile sert fazı temsil eden martensit iç ve dış kuvvetlerin etkisi ile akmaya başlamaktadır [21]. Çift fazlı çeliklerde tokluk, martensit tane boyutlarının küçültülmesi yöntemi ile,



martensit-ferrit ara yüzeyi ve martensit tanelerinin birbirleri ile olan teması artırılarak iyileştirilebilmektedir [22].

### 2.4.3. Sertlik

Bir kuvvet yardımı ile batıcı uç kullanılarak, malzemelerin ucun nüfuz etmesine karşı gösterdiği direncin ölçülmesinde Brinell, Rockwell, Vickers ve Knoop sertlik ölçüm yöntemleri yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Testler 1 kgf 'den büyük kuvvetlerin uygulandığı makro sertlik ve 1 kgf 'den küçük kuvvetlerin uygulandığı mikro sertlik olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Nano ölçeğinde sertlik almak amacıyla 0,01 gf 'den daha küçük kuvvetlerin uygulandığı testler de bulunmaktadır. Sertlik ölçümü malzeme özelliklerinin belirlenmesinden daha çok kalite kontrol amaçlı yapılmaktadır. Sertlik ve işlenebilirlik doğrusal bir ilişki göstermemektedir. Fakat ideal talaş kaldırma işlemlerinde 200 Brinell sertliği (HB) değeri tercih edilmekte, 300-350 HB değeri ise izin verilen en yüksek değer olarak kabul edilmektedir [18].

Çift fazlı çelikler, düşük MHO'larında üretildiklerinde, aşırı sert olan martensitin yumuşak olan  $\alpha_{\text{demir}}$  anayapı içerisindeki dağılımı, mikro sertlik ve mikro yapı bakımından metal esaslı kompozitlere (MMC) benzemektedir. Sert parçacıkların batıcı uca göre konumu, sert parçacıkların ve batıcı ucun boyutu, sert parçacıkların hacim oranı ve uygulanan yük metal esaslı kompozitlerin sertlik ölçümlerini etkilemektedir [23]. Benzer biçimde çift fazlı çeliklerde yapılacak mikro sertlik ölçümleri de bu etkenlerden etkilenmektedir.

### 2.5. Isıl İşlem

Çelikler mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulan değerlere getirilmesi amacıyla,  $A_{c1}$  sıcaklığının altına ve  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerine ısıtılmakta ve farklı soğutma

yöntemleri kullanılarak farklı soğutma hızları ile soğutulmaktadırlar. Kullanılan yöntemler genel olarak dört ana başlık altında toplanmaktadırlar.

### 2.5.1. Tavlama Isıl İşlemi

Tavlama ısı işlemi, çeliğin sertliğini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen ısı işlemi temsil etmektedir. Ötektoid altı çeliklerde  $A_{c1}$  sıcaklığının hemen altında, ötektoid üstü çeliklerde  $A_{c1}$  sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen tavlama işlemi küreselleştirme tavlaması olarak bilinmektedir. Bu ısı işlemi ile çelik içerisindeki  $Fe_3C$  'un küreselleşmesi ve çeliğin en yumuşak halini alması sağlanmaktadır.[24] Denklem 2.2'de alaşım elementlerinin miktarlarına bağlı olarak  $A_{c1}$  sıcaklığının belirlenmesi gösterilmiştir [14].

$$A_{c1} = 739 - 22(\%C) + 2(\%Si) - 7(\%Mn) + 14(\%Cr) + 13(\%Mo) + 13(\%Ni) + 20(\%V) \quad (2.2)$$

Yeniden kristalleştirme tavlamasında soğuk deformasyon sonucu bozulmuş tanelerin tekrar eski biçimlerini almalarını sağlamak amacıyla çelik  $600^{\circ}C$ 'a ısıtılmakta ve bu sıcaklıkta 0,5 – 1 saat bekletilmektedir. Gerilim giderme tavlamasında ise düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler,  $550 - 650^{\circ}C$  sıcaklık aralığında 1 - 2 saat tutularak kalıntı gerilmeler giderilmektedir [24].

### 2.5.2. Normalleştirme Tavlaması

Normalleştirme tavlamasında çelik östenitleme sıcaklığına çıkartılmakta ve bu sıcaklıkta 10 – 20 dakika kadar bekletildikten sonra havada soğumaya bırakılmaktadır [24]. Normalleştirme tavlaması sonucu taneler, tam tavlama ısı işlemine göre daha küçük boyutlarda gözlemlenmektedirler. Tane boyutundaki

değişim, tane sınırlarının ve dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmakta ve çeliğin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin iyileşmesini sağlamaktadır.

Normalleştirme tavlama için gerekli süre alaşım elementlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Mn , fosfor ( P ) ve Cr ilave edilmiş yüksek dayanımlı çeliklerin ve titanyum ( Ti ) ve Nb ilaveli düşük karbon çeliklerinin  $\alpha_{\text{demir}} \rightarrow \gamma_{\text{demir}}$  dönüşümlerinin araştırıldığı çalışmada

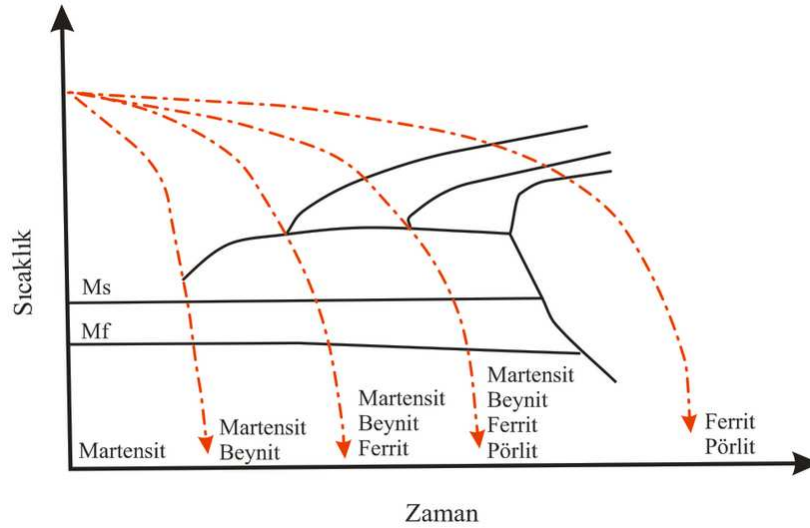
- TiC ve NbC gibi karbürlerin varlığı dolayısıyla  $\gamma_{\text{demir}} \rightarrow \alpha_{\text{demir}}$  dönüşümü sırasında dislokasyon yoğunluğunun yüksek olduğu
- $\alpha_{\text{demir}} \rightarrow \gamma_{\text{demir}}$  dönüşümünün yüksek dayanımlı çeliklerde düşük karbonlu çeliklere göre daha düşük bir  $A_{c1}$  sıcaklığında başladığı
- Ti ve Nb ilaveli düşük karbon çeliklerinin daha geniş bir  $A_{c1} - A_{c3}$  sıcaklık aralığına sahip olduğu ve diğer çeliğe kıyasla uzun sürelerde dönüşümün gerçekleştiği

Yoshinaga ve ark. [25] tarafından belirtilmiştir.

### 2.5.3. Sertleştirme Isıl İşlemi

Su verme olarak da bilinen sertleştirme ısıl işlemi çeliğin farklı soğutucu ortamlarda sertleştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Su verme ortamı olarak su, tuzlu su, yağ vb. farklı soğutma hızlarının sağlandığı ortamlar tercih edilmektedir. Su en etkili soğutmayı  $25^{\circ}\text{C}$ 'da göstermektedir.  $50^{\circ}\text{C}$ 'ın üzerindeki sıcaklıklarda su hızlı soğutma özelliğinin yaklaşık %80'ini kaybetmektedir. Ayrıca soğutucu ortam olarak %10 NaCl tuzlu su kullanılması durumunda ısı transfer katsayısı  $14 \text{ [mW/m}^2\text{K]}$  değerine yükseltilebilmektedir [26].

Yüksek sıcaklıklara ısıtılan ve devamında belirlenen sıcaklıktan su verilen çeliklerin sertliği  $\gamma_{\text{demir}}$ 'in sertleşebilirliği ve kimyasal içeriğe bağlı olarak değişmektedir. Su vermeye başlamadan önce yapının fazlarının tam olarak belirlenmesi ve gerçekleşecek dönüşümler sonrası oluşacak yapının kestirilmesi gerekmektedir. Sürekli soğuma dönüşüm (CCT) diyagramları incelendiğinde dönüşümler bittikten sonra su verilmesi durumunda faz dönüşümleri tamamlandığı için çeliğe ait mekanik özelliklerin değişmeyeceği anlaşılmaktadır. Şekil 2.8'de CCT diyagramı ve soğumanın tamamlanması ile oluşan yapılar gösterilmiştir. Furukawa ve arkadaşları [27] ara-kritik bölgeden başlayarak 200°C'a kadar değişen sıcaklıklarda su verdikleri çelikte faz dönüşümleri 400°C'dan düşük sıcaklıklarda tamamlandığını mekanik özelliklerin değişmediğini göstererek belirtmişlerdir.



Şekil 2.8. Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı şematik gösterimi

### 2.5.3.1 Ara Kritik Bölgeden Su Verme Isıl İşlemi

Martensit hacim oranı ara kritik bölgeden farklı sıcaklıklarda su verme işlemi gerçekleştirilerek değiştirilebilmektedir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilen martensit hacim oranı eğrisi birinci dereceden bir denklem biçiminde ifade edilebilmekte ve kimyasal içeriği aynı olan çelikler için referans olarak

kullanılabilmektedir [28]. Fakat demir-ementit ( Fe – Fe<sub>3</sub>C ) faz diyagramı incelendiğinde ara kritik bölgedeki değişimin doğrusal olmadığı görülmektedir.

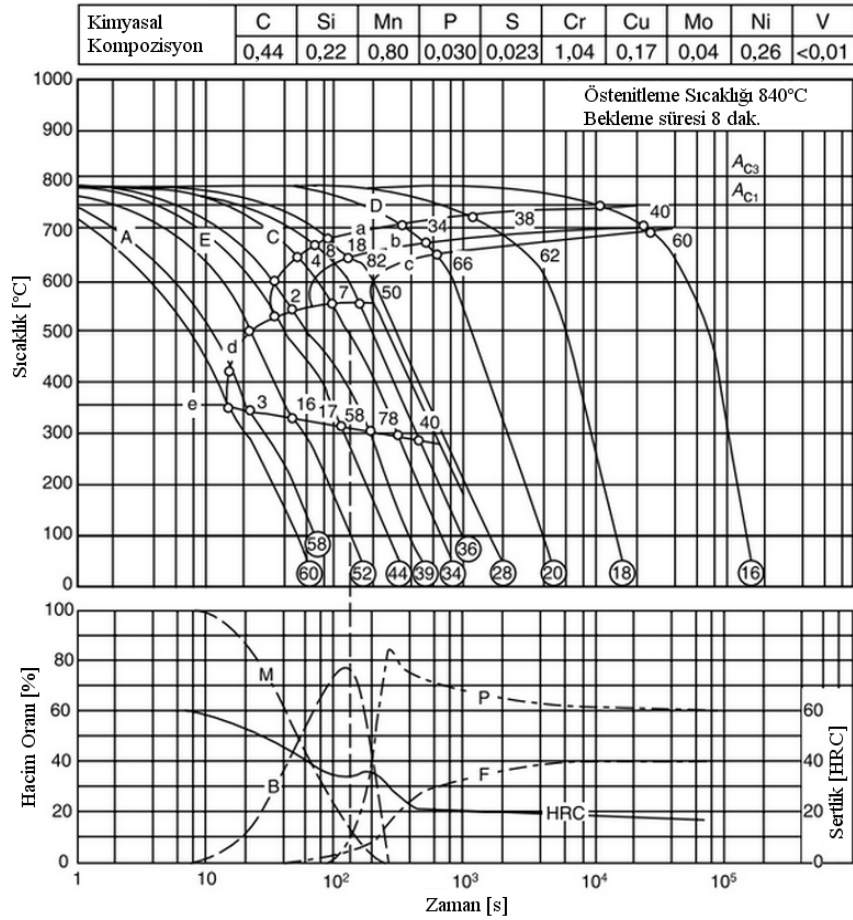
#### **2.5.4. Menevişleme**

Çeliklerde menevişleme ısııl işleme kalıntı östenit miktarını azaltmak, sünekliliği arttırmak, hızlı soğutma ve martensit yapıdan kaynaklanan gerilmeleri azaltmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Aynı şartlar altında sertleştirme ısııl işleme gerçekleştirilen çeliklerde C atomu miktarındaki artış ile kalıntı östenit miktarının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir [9]. Çift fazlı çeliklerde kalıntı östenit miktarını azaltmak ve sürekliliği arttırmak için menevişleme ısııl işleme yapılmaktadır.

#### **2.6. Sertleşebilirlik**

Sertleşebilirlik demir içerikli metallere, östenitleme sonrasında su verilerek martensite dönüşmesiyle sertlik kazanabilme yetenekleri olarak tanımlanmaktadır [14, 24]. Sertleşebilirliğin tespit edilmesinde Grossmann ve Jominy olmak üzere iki adet deneysel yöntem izlenilmektedir. Grossmann sertleşebilirlik deneylerinde değişen çaplarda çelik çubuklara su verilerek martensit hacim oranının %50 olduğu derinlik metalografik yöntemlerle tespit edilmektedir. Fakat Grossmann yöntemi pahalı ve zahmetli bir yöntem olduğu için günümüzde sınırlı uygulamaları bulunmaktadır. Jominy ve Boegehold tarafından geliştirilen ve tekrar edilebilirliği yüksek olan, Jominy sertleşebilirlik deneyinde ya da diğer adı ile uca su verme deneyinde tek bir seferde geniş bir soğuma aralığına ait veriler elde edilmektedir [14]. Uca su verme deneyi genellikle düşük alaşımlı ve yapısal çelikler için gerçekleştirilirken, sertleşebilirlikleri çok düşük ve çok yüksek çelikler için farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Hızlı soğutma gerçekleştirilse dahi farklı kesit alanlara sahip çeliklerin mikro yapılarındaki değişikliklere bağlı olarak sertleşebilirlikleri farklılıklar göstermektedir [5]. Şekil 2.9'da martensit ve beynit yapının hacim oranlarının hızlı bir biçimde azalması ve pörlit faza ait hacim oranının anlık yükselmesi sonucu sertlik değerinde artış olduğu görülmektedir. Farklı kesitlerde farklı soğuma hızları gerçekleştiğinden su verilen alından uzaklaştıkça farklı yapılar oluşmakta ve mekanik özellikler değişmektedir.  $\gamma_{\text{demir}}$  faz bölgesinde haddelenerek devamında ara kritik bölgede bekletilip ardından su verilerek sertleştirilen ve menevişleme işlemleri gerçekleştirilen 12 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik plakadan alınan numunelerle çekme ve darbe deneyi gerçekleştiren Lis ve arkadaşları [6], hızlı soğutma yapmalarına rağmen yapı içerisinde beynit gözlemlemişlerdir.

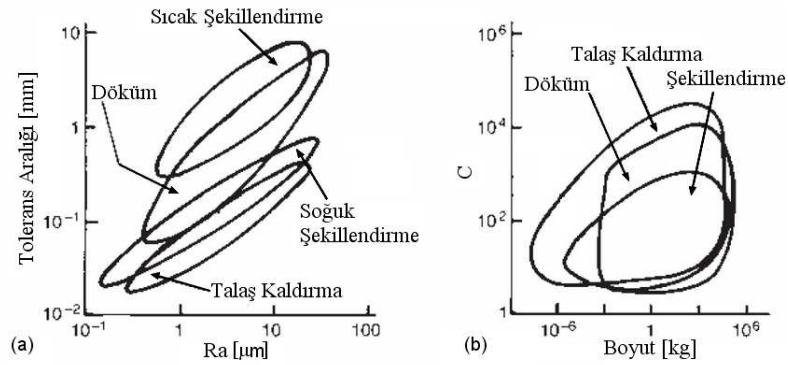


Şekil 2.9. 41Cr4 çeliğine ait Sürekli Soğuma Dönüşüm Diyagramı ve oluşan yapılara ait hacim oranları [H.P. Hougardy, Harterei-Tech. Mitt. 33(2):63-70, 1978, 14]

## 2.7. Talaş Kaldırma

İmalat sektöründe geniş kullanım alanı olan metal şekillendirme yöntemlerden bir tanesi talaşlı imalat (tornalama, frezeleme, delme, vb. ) yöntemidir. Her yıl dünya çapında, bu alana yapılan yatırımlar artmaktadır, sadece ekonomik durgunluk dönemlerinde bu yatırımların azaldığı gözlemlenmiştir [29].

İmalat sektöründeki gelişmeler, farklı yöntemlerin kullanımını arttırsa da talaşlı imalat yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Bunun nedenleri olarak, yüksek hassasiyetli parçaların imalatına olanak tanınması, düşük miktarlarda da olsa çeşitli ağırlıklarda farklı geometrilere sahip parçaların ucuz ve basit bir biçimde imal edilebilmesi, ürün çeşitliliği ihtiyacı ve rekabet unsurları sonucu talaşlı imalat alanında yapılan yatırımlar gösterilmektedir [29]. Şekil 2.10'da değişik imalat yöntemleri kullanılarak elde edilebilecek yüzey pürüzlülük, tolerans aralığı, parça karmaşıklığı ve ağırlığının kıyaslanması grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. İmalat yöntemlerinin a) Tolerans ve yüzey pürüzlülüğü, b) Talaş kaldırma, soğuk deformasyon ve döküm ile elde edilebilecek parça karmaşıklığı ve boyutuna göre kıyaslanması [29]

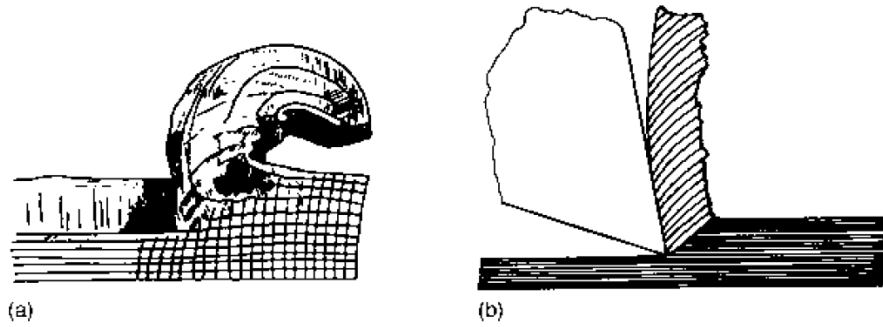
Bir parçanın karmaşıklığı, bağımsız geometri sayısının elde edilmesi gereken hassasiyet ile çarpılmasıdır [29].

$$C = n \cdot \log_2(l/\Delta l) \quad (2.3)$$

Yukarıdaki 2.3 numaralı denklemde,  $n$  parçanın geometrilerinin sayısını ve  $l/\Delta l$  tanımlandıkları kısmi hassasiyeti ifade etmektedir.

### 2.7.1 Talaş Biçimlenmesi

Tresca (1878) metal kesme işleminin visio-plastisite resmini yayınlamış ve deforme olmamış talaş kalınlığının ve en iyi kesici modelinin yorumlanması için kesimin anlık incelenmesinin önemini ifade etmiştir. Tresca'dan üç yıl sonra Mallock kesme işlemine ait dağlanmış ve mikroskop altında beş kat büyütülmüş resimlerin bulunduğu bir makale yayınlamıştır. Mallock talaş oluşumunun metalin kayması sonucu oluştuğunu ve ayrıca soğutma sıvısı kullanılması sonucu oluşan sürtünmenin azaldığını belirtmiştir [29]. Tresca ve Mallock'a ait ilk talaş oluşumu gözlemleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. İlk talaş oluşumu gözlemleri a) Tresca (1878) ve b) Mallock (1881 - 82)  
[29]

İkinci Dünya Savaşı'nın etkisi, talaş olumu ile ilgili ilk çalışmaların 1930'ların sonları ve 1940'ların ortalarında yayınlanmasına olanak tanımıştır [29]. Bu çalışmalarda



talaş kaldırma kuramları, kesme kuvvetlerinin ve sıcaklıklarının ölçülmesi, ekonomik işleme, metallerin işlenebilirliği ve kesme sıvıları gibi pek çok alanda gerçekleştirilmiştir.

### **2.7.1.1 Talaş Kaldırma Kuramları**

İlk talaş kaldırma kuramı olan tek kayma düzlemi modeli ya da diğer bilinen adıyla kart modeli Piispanen tarafından ortaya konmuştur. Talaş kaldırma işlemi sırasında  $\phi$  kayma açısı ile tanımlanan kayma düzleminde, talaş kalınlığının  $t_1$  'den  $t_2$  'ye değiştiği dik kesme modeli Time tarafından 1870 yılında sunulmuştur. Astakhov, Tresca ve Time'ın birbirleri ile çelişen talaş oluşumu yaklaşımlarını, gevrek malzemelerde basma gerilmelerinin, sünek malzemelerde ise kayma gerilmelerinin etkin talaş oluşturucular olduğunu belirterek birleştirmiştir. Briks, tek kayma düzlemi olması durumunda, kesme hızı ile talaş hızı arasındaki ilişkiyi referans göstererek, ani hız değişiminin fiziksel olarak mümkün olmadığını belirtmiş ve birden çok kayma düzlemi bulunduğunu açıklamıştır. Zorev, Briks'in modelini eleştirerek kayma düzlemlerinin doğrusal olmadıklarını belirtmiştir [31].

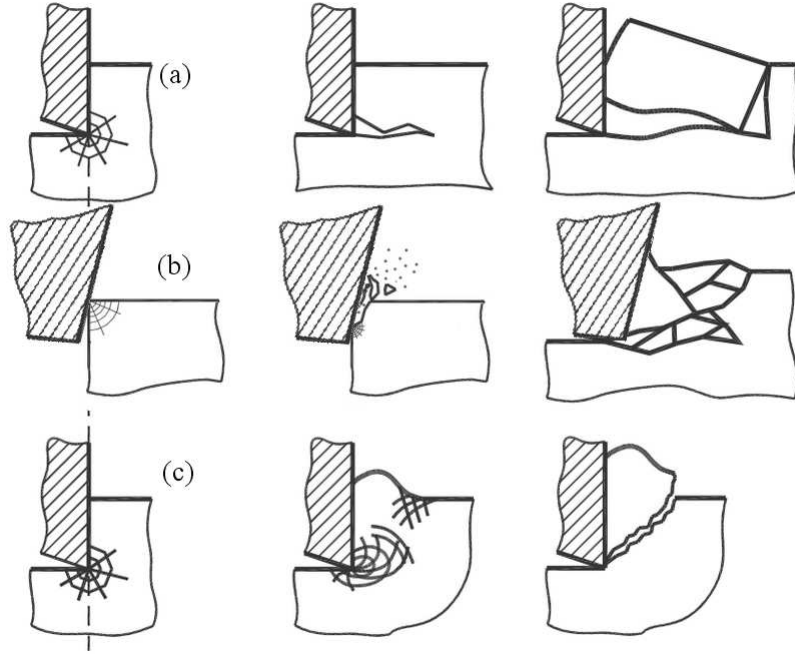
### **2.7.2 Genelleştirilmiş Talaş Oluşumu Modeli**

Bu yeni yaklaşımda birbirleri ile dinamik olarak etkileşen takım, talaş ve iş parçası benzeri bileşenler dikkate alınmaktadır.

#### **2.7.2.1 Gevrek Malzemeler**

Teknik olarak gevrek malzeme söz konusu olmamakta, plastik deformasyonu elastik deformasyonuna göre çok az olan malzemeler gevrek olarak isimlendirilmektedir

[31]. Şekil 2.12’de talaş oluşumuna ait gösterimlerden (a) incelenildiğinde, düzenli olarak kırılan neredeyse kare şekilli talaş parçaların oluştuğu, (b)’de ise düzensiz ve parçalar halinde talaşın kırıldığı, (c) incelenildiğinde ise deforme olmuş talaşın az bir plastik deformasyonla oluştuğu görülmektedir. Gevrek malzemelerde deformasyon bölgesi içerisinde sadece basma gerilmesi olduğundan dolayı negatif açılı kesici uç kullanımı tercih edilmekte, aksi durumda kesici ucun eğilme gerilmesini taşıyamaması söz konusu olmaktadır.

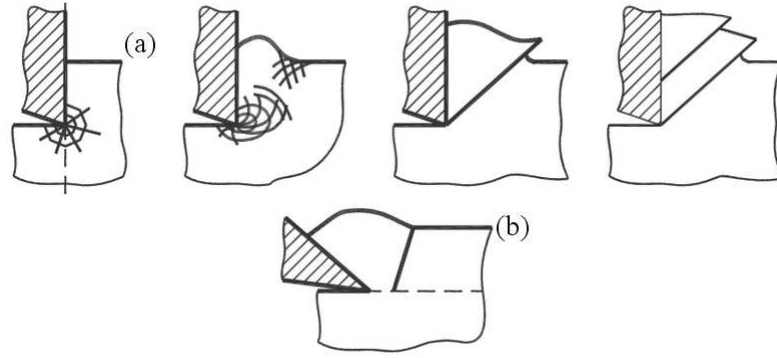


Şekil 2.12. Gevrek bir iş parçasının işlenmesi sırasında talaş oluşumu [31]

### 2.7.2.2 Sünek Malzemeler

Sünek malzemelerde talaş oluşumu ilk aşamada basma gerilmesine bağlı olarak malzemede elastik-plastik bölge oluşması ve plastik deformasyon sonucu kaymasıyla meydana gelmektedir. Kesici uç ilerledikçe plastik deformasyona uğrayan kısım, Şekil 2.13 (a)’da resmedildiği gibi aşamalar halinde talaş ve takım yüzeyi ile temas

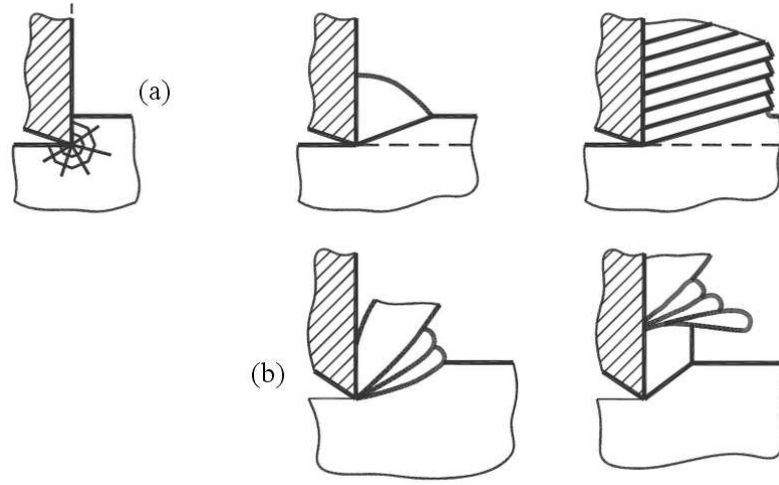
etmektedir. Basma ve eğilme gerilmeleri altında talaş oluşumu, bu iki gerilmeden dolayı karmaşıktır ve dönüşümlü olarak gerçekleşmektedir. Plastik gerilme sınırının aşılması ile malzeme oluşan düzlem boyunca kaymakta ve yeni oluşan yüzeylere kaynaklanarak ana malzemedan kopmamaktadır. Şekil 2.13 (b)'de pozitif açılı kesici uç kullanılması durumunda ise talaş sürekli olmaktadır.



Şekil 2.13. Sünek bir iş parçasının işlenmesi sırasında talaş oluşumu [31]

### 2.7.2.3 Aşırı Sünek Malzemeler

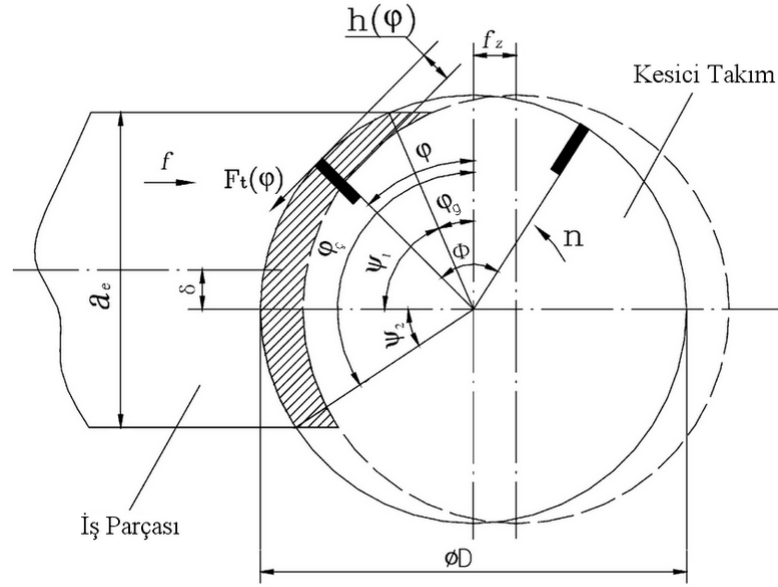
Aşırı sünek veya Plastik malzemelerin işlenmesinde, Şekil 2.14 (a)'da gösterildiği gibi ayırt edilemeyen bağlantılarla birbirine bağlanmış sürekli bir talaş oluşmakta ve (b)'de gösterildiği gibi talaş düzensiz olarak deforme olmakta ve farklı kalınlıklarda oluşarak kambur bir görünüm almaktadır.



Şekil 2.14. Aşırı sünek bir iş parçasının işlenilmesi sırasında talaş oluşumu [31]

### 2.7.3 Frezeleme

Frezeleme, dönen bir takım ile doğrusal hareket yapan bir iş parçasından talaş kaldırma işlemidir. Freze tezgâhında yatay, dikey ve eğimli yüzeylerin işlenmesi gerçekleştirilebilmektedir. Farklı freze çakıları kullanılarak dik köşeler, kanallar ve düzlem yüzeyler işlenebilmektedir. Şekil 2.15’de alın frezelemede kullanılan parametreler şekil üzerinde detaylı olarak gösterilmiştir [32].



Şekil 2.15. Alın frezelemedeki kesme parametreleri [32]

Freze takımının dinamiğinin tanımlanması için farklı tanımlamalara ve bu tanımlamalardan bazılarının hesaplandığı denklemlere gerek duyulmaktadır. Bu tanımlar ve denklemler:

Ana mil hızı ( $n$ ) [dev/dak], freze tezgâhının ana milinin dakikadaki devir sayısını ifade etmektedir. Kesme hızı ( $V_c$ ) [m/dak], ana mile bağlı kesici kenarın hızını ifade etmektedir. Freze çakısı çapının ( $D$ ) [m] olarak alındığı, kesme hızı ile ana mil hızı arasındaki ilişki, denklem 2.4'de verilmiştir.

$$n = \frac{V_c}{\pi \cdot D} \left[ \frac{\text{dev}}{\text{dak}} \right] \quad (2.4)$$

Devir başına ilerleme ( $f$ ) [mm/dev], ilerleme hızının ana mil hızına bölünmesi ile elde edilmektedir. Kesici uç başına ilerleme ( $f_z$ ) [mm], frezeleme işlemi sırasında

birden fazla kesici uç kullanıldığı durumlarda, ucun kendisinden önceki ucun konumuna geldiği andaki iş parçasının yer değiştirmesini ifade etmektedir. Kesici uç sayısının  $z$  ile gösterildiği, denklem 2.5’de hesaplanan dakikadaki ilerleme veya ilerleme hızı ( $V_f$ ) [ mm/dak ], iş parçasının kesici takıma birim zamandaki ilerlemesini ifade etmektedir.

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \left[ \frac{\text{mm}}{\text{dak}} \right] \quad (2.5)$$

Eksenel talaş derinliği ( $a_p$ ) [ mm ], dik frezelemede kaldırılan dalaş yüksekliğini, yatay frezelemede ise talaş genişliğini ifade etmektedir. Kesme genişliği veya radyal talaş derinliği ( $a_e$ ) [ mm ], dik frezelemede kaldırılan talaş genişliğini, yatay frezelemede ise talaş derinliğini ifade etmektedir. Denklem 2.6 yardımı ile hesaplanan, birim zamanda kaldırılan talaş hacmi ( $V$ ) [ mm<sup>3</sup>/dak ], birim zamandaki iş parçasının ilerlemesi sonucu kaldırılan talaş hacmine karşılık gelmektedir.

$$V = a_p \cdot a_e \cdot V_f \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{dak}} \right] \quad (2.6)$$

#### 2.7.4. Takım Malzemesi

Takım malzemesinin, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanan sıcak sertliğe, yüksek tokluğa, yüksek aşınma direncine sahip olması istenilmektedir. Bu amaçla kullanılan takım malzemeleri karbür, seramik, çok kristalli kübik bor nitrür (PCBN), çok kristalli elmas (PCD), katı veya ince film elmasdan (SFD / TFD) oluşmaktadır [33].

Karbür, tungsten tel çekme uygulamalarında kullanılan pahalı elmas kalıpların yerine ürün geliştirme aşamasında bulunmuş ve Widia (elmas gibi) N-WC-6Co olarak ilk 1927’de tanıtılmıştır. Bağlayıcı olarak kullanılan kobalt ( Co ) ilavesi ile tokluk artarken dayanım düşmektedir. Karbür takımlar yüksek hız ve ilerlemeye olanak tanıyan TiN , TiCN , TiAlN ve TiAlCN kaplamalarla kaplanmaktadır. Genel amaçlı kullanılan ve altın rengindeki TiN kaplama, 600°C’a kadar kararlı ve 0,3 sürtünme katsayısı ile kesici takıma aşınma direnci kazandırmaktadır. Diğer kaplama türleri ile kıyaslandığında TiN , en düşük sürtünme katsayısına sahipken, ısıl kararlılık ve sertlik olarak zayıf kalmaktadır. Yüksek ilerleme ve hızlarda kullanılması durumunda TiN takım ömrünü 2-3 kat arttırabilmektedir [33]. Güç sarfiyatı ve maliyetler açısından düşük kesme kuvvetleri ile çalışmak önem arz etmektedir. Yüksek kesme hızlarına çıkılması ile sıcaklığın artışı ile kesme kuvvetleri azalmaktadır. Ayrıca Yiğit ve ark. [34] TiN kaplamalı kesici uçların talaş kaldırma işlemlerinde, kaplamasız uçlara kıyasla daha düşük kuvvetler ile kesme işlemini gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir.

Yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik değerleri ile ön plana çıkan alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve silikon nitrür ( $Si_3N_4$ ) pahalı, kırılğan ve kimyasal olarak kararlı olan seramikleri temsil etmektedirler.  $Si_3N_4$  ‘ün düşük sertliği ve tokluğu, aşınma direnci yüksek  $Al_2O_3$  ‘in gevrekliği, Si – AlON bileşiklerinden elde edilen seramikler kullanılarak dengelenmektedir [33].

Karbürlerin 10 katı, seramiklerin 2 katı aşınma direncine sahip PCBN veya CBN kesici uçlar, düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesine olanak tanıyarak ısıl işlem görmüş soğuk sertleşen çeliklerin işlenilmesinde taşlama işlemine ihtiyacı ortadan kaldırmaktadırlar. PCD kesici uç malzemesi olarak karbürleri, seramikleri ve doğal elması pek çok uygulamada geride bırakmasına karşın, TFD’lar sertlik, yüksek aşınma dirençleri ve bağlayıcı bulundurmamalarının verdiği avantaj ile kesici malzemeleri arasında ön plana çıkmaktadırlar [33].

### 2.7.5. Takım Ömrü

Kesici takımın, iş parçasını istenilen toleranslarda üretebildiği, yüzey pürüzlülüğünü olması gereken aralıkta tutabildiği ve talaş oluşturma yeteneğini koruyabildiği zaman aralığı, o takımın ömrünü ifade etmektedir. F. W. Taylor (1907) tarafından kesme hızı ile değişen takım ömrünü belirleyen etkenlerden birisi olan yan kenar aşınmasının ilişkilendirildiği eşitlik denklem 2.7’de verilmiştir [35]. Denklemdeki  $C$  ve  $k$  sabitleri, kesme hızı ve zaman grafiğinin logaritmik olarak düzenlenilmesi ile elde edilmektedirler. İlerleme ( $f$ ), talaş derinliği ( $a_p$ ), malzeme sertliğinin ( $H$ ) eklenmesi ile bu eşitlik genişletilerek denklem 2.8 elde edilmiş, fakat daha sonra büyük miktarlarda işlenebilirlik verisine ihtiyaç duyulduğundan, uygulama kolaylığı sağlayabilmek için işlem değişkenlerinden sadece ilerlemenin denklemde bırakıldığı denklem 2.9 oluşturulmuştur [35].

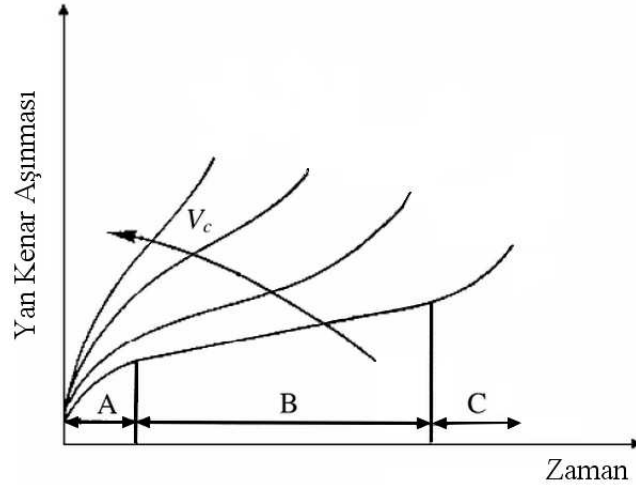
$$C = T.V^k \quad (2.7)$$

$$V.T^\alpha .f^m .a_p^p .H^q = K.T_{ref}^\alpha .f_{ref}^m .a_{p,ref}^p .H_{ref}^q \quad (2.8)$$

$$V.T^\alpha .f^m = K.T_{ref}^\alpha .f_{ref}^m \quad (2.9)$$

Artan kesme hızlarında oluşan yan kenar aşınması, başlangıç aşınması (A), düzgün aşınma (B), hızlı aşınma (C) bölgeleri ile birlikte grafiksel olarak Şekil 2.16’da görülmektedir.





Şekil 2.16. Artan kesme hızlarında, kesme süresine karşılık yan kenar aşınması [30]

Takım ömrü belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların büyük kısmı torna tezgâhlarında tek kesici uç ile gerçekleştirilmektedir. Frezelemede ise kesici takıma birden fazla kesici uç takılabilmektedir. Ezugwu ve ark. [36] birden fazla kesici uç kullanarak frezeleme işlemlerindeki takım ömrünü araştırdıkları çalışmalarında, kesici uç sayısındaki artışın, sıcaklıkların yüksek seviyelerde kalmasına neden olduğundan aşınmayı hızlandığını belirtmişler ve tek bir kesici uç kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin gerçek takım ömrü hakkında yetersiz kaldığını belirtmişlerdir.

### 2.7.6. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik ilk olarak 1938’de Ernst tarafından, kesici takım aşınmasına, yüzey pürüzlülüğüne ve çekme dayanımına bağlı metalin karmaşık bir fiziksel özelliği olarak tanımlanmıştır. 1950’de Boulger daha kısa bir tanımla işlenebilirliği “Herhangi bir bakış açısından, işlenebilirliği en iyi olan malzeme tatminkâr bir takım ömrü ve yüzey kalitesi ile hızlı talaş kaldırmaya izin verendir” olarak ifade etmiştir. 1989’da Smith metal yerine malzeme kullanarak “Talaş oluşturma yöntemleri ile görelî tatmin edici ürünlerin ve kesme işlemini etkileyen iş parçasının tüm

özelliklerinin toplamıdır” tanımı ile işlenebilirliği tanımlamıştır. 1999’da Gorzkowski ve ark. makalelerinde “işlenebilirlik miktarsal olarak belirlenmesi zor bir özelliktir” yorumunu yapmışlardır [35]. İşlenebilirliğin, ideal kesme şartlarında malzemenin en az maliyet ve en iyi yüzey kalitesinde imal edilmesi olarak düşünülmesi durumunda, en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği durumda ortaya çıkan yüksek maliyetler, ya da en düşük maliyetlerin elde edilmesi amaçlanması durumunda meydana gelen kötü yüzey kalitesi işlenebilirliğin tanımını zorlaştırmaktadır. Belirli bir malzemenin uygun kesici takım ile işlenmesi sırasında  $V_c$  ve  $f$  değerleri değiştirilerek işlenebilirlik en üst seviyeye getirilebilmektedir [37]. İşlenebilirliği aynı zamanda talaş kaldırmayı etkileyen faktörler,

- Kesici takımda meydana gelen yüksek sıcaklık, aşınma, titreşim ve kesme kuvvetlerinden,
- Kesme değişkenleri olan kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği ve soğutma sıvısından,
- Malzemenin kimyasal içeriğinden, mikro yapısından ve ısıl işlem geçmişinden,
- İşlenmiş yüzey ile ilgili olan kalıntı gerilmelerden, yüzey-yüzey altı sertliğinden, mikro yapıdaki değişimlerden ve yüzey deseninden,

etkilenmektedir [35].

### 2.7.7. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey bozuklukları DIN 4760’da belirtildiği gibi takım tutucunun hatalı ilerlemesinden, iş parçasının sertleşmesinden, kesici ucun kademeli aşınmasından, işlem sırasında meydana gelen titreşimlerden, kesici uç yarıçapından, ilerlemeden, talaş oluşumu ve kopmasından, yığıntı kenarın (BUE) iş parçası yüzeyine yapışmasından, yüzeyde oluşan kimyasal, fiziksel değişikliklerden meydana gelmektedir [DIN 4760, 39]. Yüzey pürüzlülüğünün uluslar arası kabul görmüş

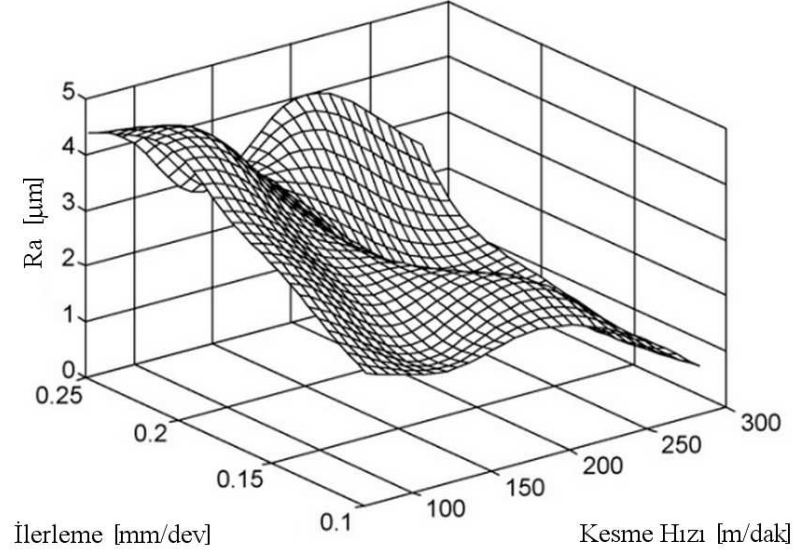
simgesi  $R_a$  olarak gösterilmekte ve pürüzlülük eğrisinin merkez çizgiden sapmasının aritmetiksel ortalaması olarak tanımlanmaktadır [35].  $R_a$  'nın hesaplanılmasında kullanılan matematiksel eşitlik, incelenen yüzey uzunluğunun  $L$  ve konuma bağlı yüksekliğin  $z$  ile gösterildiği denklem 2.10'de verilmiştir.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (2.10)$$

Talaş kaldırma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkiyi kesici takımın ilerlemesi yapmaktadır [40]. Shaw (1984), Boothorrd ve Knight (1989)  $R_a$  ile  $f$  ve uç yarıçapı ( $r$ ) arasındaki ilişkiyi denklem 2.11 ve denklem 2.12'deki gibi ifade etmişlerdir. Fakat  $R_a$ ,  $f$  ve  $r$  dışında  $a_p$ ,  $V_c$ , sıcaklık, takım aşınması gibi diğer işlem değişkenlerinden de etkilenmektedir [38, 41, 42]. İlerleme değerlerinin yüksek olması sonucu, kesici takım ucunun iş parçasında bıraktığı iz yüksekliği ( $R_{th}$ ), arka kesme kenarı açısına ( $C_e$ ) ve yan kesme açısına ( $C_s$ ) bağlı olarak artmakta ve  $R_a$  değerini de arttırmaktadır. İlerleme ve talaş derinliğinin artırılması durumunda  $R_a$  artmakta, kesme hızının artırılması ve ilerlemenin azaltılması ile azalmaktadır. Ayrıca kesici ucun aşınması sonucu da  $R_a$  değeri artış göstermektedir [43]. İlerlemedeki artış ile yüzey pürüzlülüğü de artış göstermekte fakat ideal şartların yakalanması durumunda yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyen koşullar azalmakta ve yüksek ilerleme değerlerinde düşük  $R_a$  değerleri de elde edilebilmektedir [40]. Şekil 2.17'de kesme hızı ve ilerlemenin, yüzey pürüzlülüğüne etkisinin her zaman doğrusal olmadığı görülmektedir [38]. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki olumsuz etkisi daha büyük kesici uç yarıçapı seçilerek azaltılabilmektedir.

$$R_a = \frac{1000 \cdot f^2}{8 \cdot r} \quad [\mu m] \quad (2.11)$$

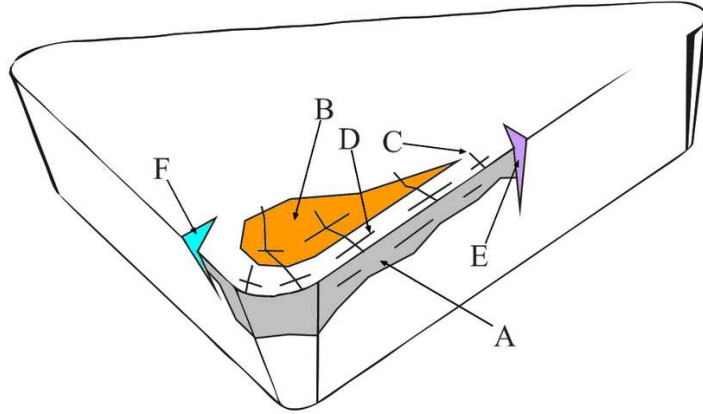
$$R_a = \frac{1000 \cdot f^2}{32 \cdot r} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.12)$$



Şekil 2.17. Kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi [38]

### 2.7.8. Takım Aşınması

Takım ömrünü belirleyen en önemli iki durum talaş kaldırma işlemi sırasında takımın kullanılmayacak seviyede aşınması ya da takımın erken kırılmasıdır. Takım aşınması türlerinin ve bu aşınmalara sebebiyet veren koşulların bilinmesi ve önlenmesi ile takım ömrü uzatılabilmektedir. Şekil 2.18’de bilinen takım aşınmalarından bazıları tek bir takım ucu üzerinde gösterilmiştir. Aşınmış takımlar işlem gerçekleştirilmesini ve başarımını olumsuz yönde etkilemektedir. Kırık uçlar ise değiştirme zamanları ve hiç istenilmeyen bir durum olan işlenen yüzeyde hasara sebebiyet verebilmeleri dolayısı ile çok daha önemli bir sorunu temsil etmektedirler. Bu tür sorunlar özel malzemelerin işlenmesi uygulamalarında daha da önem kazanmakta, özel kesici uçların veya yüksek kesme hızlarının kullanımını zorunlu kılmaktadır [44].



Şekil 2.18. Farklı takım aşınması türleri

Yan kenar aşınması, Şekil 2.18’de “A” harfi ile gösterilmiş bölgedeki kenarın iş parçası ile sürekli teması sonucu meydana gelen ve takım ömrünün tespit edilmesinde kullanılan temel aşınma türünü temsil etmektedir. Bu aşınmanın azaltılması için aşınma direnci yüksek kesici uç, düşük kesme hızları ve 0,1 mm’den küçük ilerlemelerin artırılması tavsiye edilmektedir [35, 45, 46]. Ayrıca yan kenar ile temas halinde olan iş parçası malzemesi kesici uçtan malzeme kopartarak farklı bir kenar aşınması oluşturabilmektedir [47]. İdeal kesme şartlarının elde edilmesi durumunda yan kenar aşınması diğer kesme değişkenlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerindekinden daha düşük değerler almaktadır [40].

Krater aşınması, kesici takımın ucu ile talaş temasının bittiği bölge arasında, yüksek sıcaklık ve talaş akışının aşındırıcı etkisinden oluşmaktadır. Talaş derinliğinin büyük olduğu durumlarda sıcaklığın artmasından dolayı krater derinliği de artış göstermektedir [37, 48]. Şekil 2.18’de “B” harfi ile gösterilen bölgede oluşan krater aşınmasının, kesme hızı düşürülerek, soğutma sıvısı kullanılarak, düşük sürtünme katsayılı, yüksek ısıl iletkenliğe sahip ve aşınma direnci yüksek kesici takım malzemesi tercih edilerek oluşması önlenmektedir [35, 45, 47]. Yüksek kesme hızlarda artan sıcaklık ile birlikte yayılım da artış göstermektedir. Nouari ve Molinari [49] kaplamasız kesici uç ile gerçekleştirdikleri çalışmada kesici takım ucundan 0,125 mm uzaklıkta 1500°C gibi yüksek sıcaklık değerleri ölçmüşlerdir.

Yüksek hızlı frezelemede yüksek kesme hızlarında küçük talaş derinliği kullanılarak oluşan ısı miktarı azaltılabilmekte ve temas süresi azaltıldığı için soğuma süresi de uzatılabilmektedir [50]. Feng ve ark. [47] silisyum karbür (SiC) destekli alüminyum (Al) kompozitin elmas kesici uçlar ile işlenebilirliklerini araştırdıkları çalışmalarında MMC'lerin ihtiva ettiği sert parçacıkların aşınmayı hızlandırdığını belirtmişlerdir. Krater aşınmasında aşındırıcı malzeme etkisi sonucu aşınma gerçekleşirken, yapışma aşınması olarak bilinen aşınmada talaşın kesici takım yüzeyine yapışıp terk etmesi sırasında gerçekleşen yayılım sonucu kesici malzeme özelliklerini değiştirmesi söz konusu olmaktadır. AISI 4340 çeliğinin işlenmesinde krater yüzeyinden aldıkları enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi sonuçlarını da inceledikleri çalışmada Asfour ve ark. [51] TiAlN ve TiN kaplamalı uçlarda difüzyon aşınması tespit etmişlerdir. Sıvanma bölgesinde Sharif ve ark. [52] yaptıkları EDS analizi sonucunda takım malzemesi tespit etmişlerdir. Yapışma aşınması, yığıntı kenar (BUE) gibi kaynaklanma sonucu oluşmaktadır. Yapışan iş parçası malzemesi kesici takım yüzeyinde oluşan çatlakları kapatarak kesici takım ve talaş arasında kaplama gibi davranarak kesici takımını koruyucu görev üstlenebilmektedir [53].

Şekil 2.18'de "C" harfi ile temsil edilen tarak çatlakları, kesici kenara dik büyüyen ve dinamik ısı yüklerinin etkisiyle derinleşerek takımın kırılmasında rol oynayan çatlaklar olarak bilinmektedir. Tarak çatlakları ya da diğer adıyla ısı çatlaklarının oluşmasının önlenmesinde soğutma sıvısı kullanılması durumunda ısı yükleri artacağından, soğutma sıvısı yerine basınçlı hava ile talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması önerilmektedir [35, 45]. Ayrıca soğutma sıvıları geri dönüşüm ve imha işleminden kaynaklanan sorunları dolayısıyla daha az tercih edilmektedirler. Frezelemede talaş kaldırma işleminin kesintili olması dolayısıyla ısı çevrimlerin, ısı çatlaklarının oluşumuna sebebiyet verdiği ve ayrıca kaplamanın erken kırılması ile aşınmanın hız kazandığı Stanford ve ark. [54] tarafından belirtilmiştir. Sharif ve ark. [52] kaplamalı karbür uçlar ile titanyum alaşımların frezelenmesi sırasında oluşan aşınmaları araştırdıkları çalışmada takım ucu çentiklenmesine sebep veren zarar verici düzeyde ısı çatlak tespit etmişlerdir.

Şekil 2.18’de “D” harfi ile temsil edilen, yan kenar boyunca dinamik yüklemeler sonucu gerçekleşen mekanik yorulma çatlakları, yüksek tokluklu kesici uç malzemesi, farklı kesici geometrileri ya da kenar geometrisi kullanılarak önlenebilmektedir. Kesici ve iş parçasının çarpışması ve ayrışması şiddeti hafifletilerek de engellenebilmektedir [35, 45]. Uygun olmayan talaş derinliği ve yüksek ilerleme değerleri, kesici ucun uç kısmında mekanik çarpışmalar sonucu erken çatlak oluşumlarına sebebiyet vermekte, yüksek hızlarda ortaya çıkan yüksek sıcaklıktan önce kesici ucun aşınmasını hızlandırmaktadır [55].

Yüksek hız ve ilerleme değerlerinde kesici ucun aşırı yüklenmesi sonucu plastik deformasyon olarak bilinen kesici ucun kalıcı olarak şekil değiştirmesi gerçekleşmekte ve ilerleme ve kesme hızı değiştirilerek engellenebilmektedir [35, 45]. Fakat devam etmesi durumunda tercih edilen işlem değişkenleri ile iş parçası işlenemeyeceğinden kullanılan kesici takım malzemesinin değiştirilmesi gerekmektedir.

Mikro kaynaklanma sonucu oluşan BUE yüzey kalitesini olumsuz etkilemekte ve kaynaklandığı kesici takımdan koparken takım malzemesinin bir kısmı ile birlikte koptuğu için kesici takıma da zarar vermektedir. BUE özellikle yüksek ilerlemelerde kesici uçtan parçalar kopartmaktadır [48]. Düşük kesme hızlarında BUE oluşması dolayısı ile kesme kuvvetleri de artmaktadır [56 - 60]. Ayrıca kesme kuvvetleri talaş ile kesici uç arasındaki sürtünme ile doğru orantılıdır [61]. Oluşan kuvvetler  $a_p$ ’nin küçük seçilmesi durumunda kesici takımın uç kısmının kırılmasına sebebiyet vermektedir. BUE düşük kesme hızlarında gözlemlendiğinden önlenilmesi amacıyla öncelikle kesme hızları arttırılmaktadır. Ayrıca ilerleme arttırılarak, pozitif açılı kesici uç kullanılarak ya da BUE oluşumunu engelleyici soğutma sıvısı kullanılarak da engellenebilmektedir [35, 45].

Kesici kenarın ucunda oluşan çentik aşınması Şekil 2.18’de “E” harfi ile gösterilmiştir. Meydana gelmesinde iş parçası sertleşmesi ve çapaklar etkili rol oynamaktadır. Genellikle paslanmaz çeliklerin işlenilmesinde ortaya çıkan çentik aşınması ilerleme düşürülerek ve eğer mümkünse  $Al_2O_3$  kaplamalı uç kullanılarak engellenebilmektedir [35, 45].

Yüzey pürüzlülüğünü arttırıcı etkisi olan oksitlenme oluşu Şekil 2.18’de “F” harfi gösterilmiştir. Bu aşınma türünün engellenmesi için yüksek ısı kararlılık ve oksitlenme direnci fazla kesici takım ya da  $Al_2O_3$  kaplamalı kesici takım kullanılması tavsiye edilmektedir [35, 45]

Kesici takım, iş parçası ve tezgâh-takım-iş parçası sisteminin özelliklerinin belirlediği aşınma ve temas şiddeti, kesici ucun kırılmasına sebebiyet verecek seviyeye çıktığında istenilmeyen bir durum olan kırılma gerçekleşmektedir. Önlenilmesi amacıyla yüksek tokluklu kesici takım malzemesi, yavaş ilerlemeli kesme, büyük uç yarıçapı ve farklı talaş oluşturucu geometrilerin kullanılması önerilmektedir [35, 45].



### 3. DENEYSEL YÖNTEM

Deneysel çalışmalara başlamadan önce mikro alaşımlı çeliğin kimyasal içeriğini belirlemek için spektral analiz yapıldı. Spektral analiz sonucunda çelik içerisindeki alaşım elementleri özellikle V ve Nb 'un yüzde ağırlık miktarları hakkında daha detaylı bilgi elde edildi.

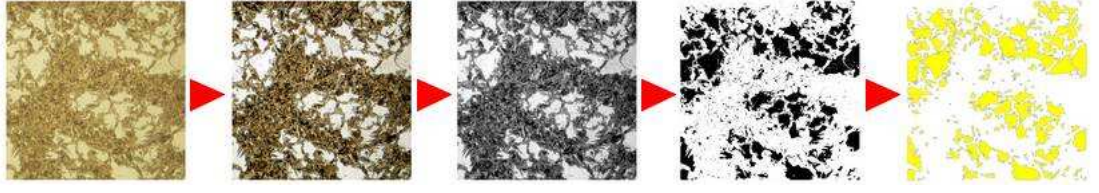
#### 3.1. Martensit Hacim Oranının Belirlenmesi

Her alaşım elementinin  $A_{c1}$  ve  $A_{c3}$  dönüşüm sıcaklıklarına farklı etkisi bulunmaktadır. Dönüşüm sıcaklıkların belirlenmesi için kullanılan denklemler sınırlı sayıda olduğundan, kullanılan çelik için uygun denklem bulunamadı. Martensit hacim oranının belirlenmesinden önce  $A_{c1}$  ve  $A_{c3}$  dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık değerlerinin belirlenmesi için Fe-Fe<sub>3</sub>C faz diyagramından yararlanıldı.

Isıl işlemler Protherm firmasına ait PLF 120/18 model numaralı elektrikli endüstriyel fırında gerçekleştirildi. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımının düzgün olmadığı tespit edildi ve yapılan deneysel çalışmalarda, sıcaklığın fırının sıcaklık göstergesi ile aynı olduğu ısıl çiftin altında kalan alan kullanıldı. Çift fazlı çelik elde edebilmek için ara kritik bölgedeki  $\gamma_{\text{demir}}$  'i martensite dönüştürmek gerekmektedir. Bu ısıl işlem için  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktan tekrar ara kritik bölgeye numune soğutulmalı ya da sadece  $A_{c1}$  sıcaklığının üzerine çıkarak,  $A_{c3}$  sıcaklığını geçmeden çeliğe su verilmesi gerekmektedir. Her iki yöntem de uygulanarak çift fazlı yapı elde edildi. Fakat  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerine çıkılarak yapılan çalışmalar, tekrar ara kritik bölgeye kontrollü soğutma gerçekleştirilemediği için terk edildi.

Martensit hacim oranını belirlemek için 730°C'dan başlayan ve 830°C'a kadar 10°C aralıklarla artan sıcaklıklardan çelik numunelere su verildi. Su verme ortamı olarak yüksek soğutma hızından dolayı %10 tuzlu su kullanıldı. Su verilecek numune boyutları, çalışma kolaylığı sağlaması açısından kenar uzunluğu 10 mm olan küp biçiminde belirlendi. Boyutların küçük tutulmasının diğer bir nedeni çift fazlı yapının sürekli olarak gözlemlenebilmesini sağlamaktır. Su verilen 11 adet numunenin her birinden x100, x500 ve x1000 büyütmelerde birer adet mikro yapı resimleri alındı. Resimleri kayıt altına alınan 11 adet numune arasında 730°C'dan su verilen numunede  $\alpha_{\text{demir}}$  ve  $\text{Fe}_3\text{C}$  yapı gözlemlenirken, martensit yapı gözlemlenemedi. 810°C'dan sonra su verilen numunelerin mikro yapılarında ise farklılık meydana gelmedi.

Sayısal ortama aktarılan resimler sayılarla ifade edildiği için, hangi sayının hangi renge karşılık geldiğini bilmek, bir resmin içindeki belirlenmiş bir rengin miktarını belirlemek için yeterlidir. Çift fazlı yapıda sadece iki fazın var olduğu kabul edilmektedir. Çift fazlı yapıya ait bir resmin siyah/beyaz ya da sayısal olarak sadece iki değer ile ifade edilmesi durumunda bu fazların birbirlerine olan oranları kolayca belirlenebilecektir. Hacim oranlarını belirlemek için Wayne Rasband tarafından geliştirilmiş ImageJ [62] yazılımının alan oranı belirleme fonksiyonu kullanıldı. Mikro yapı resimleri önce optik mikroskopta kullanılan ışıktan dolayı açık sarı renkte görünen  $\alpha_{\text{demir}}$  fazın beyaz ve diğer fazın daha belirgin olarak gözlemlenebilmesi için işlendi ve daha sonra siyah/beyaz resme dönüştürüldü. Gerçekleştirilen işlem aşamaları Şekil 3.1'de sırası ile resmedilmiştir.  $\alpha_{\text{demir}}$  fazın hacim oranını belirlemek için hazırlanan siyah/beyaz resmin renkleri ters çevrildi ve devamında  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinin ImageJ yazılımı yardımı ile miktar ve boyutları belirlendi.

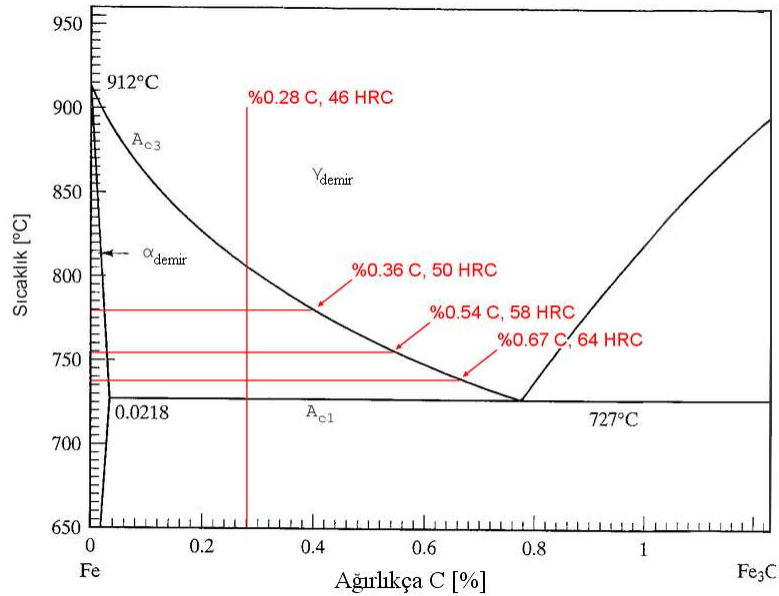


Şekil 3.1. Martensit hacim oranının belirlenmesi için resimlerin işlenilmesi aşamaları

Ferrit hacim oranının (FHO) belirlenmesi için izlenen nokta sayma yöntemi, ASTM E562-02 [63] standardı referans alınarak, nokta sayma işlemi gibi uzun yorucu ve tecrübe isteyen bir işin otomatik olarak gerçekleştirilebilmesi için hazırlanmıştır. Geliştirilen yöntem hacim oranlarını belirlemede kullanılmadan önce ASTM standardına uygun gerçekleştirilen bir ölçüm ile kıyaslandı ve daha hassas sonuç verdiği gözlemlendi. Resimlerin yapıyı en iyi şekilde temsil edebilmesi için, optik mikroskoplarından kaynaklanan odaklanma ve aydınlatma sorunlarının en az olduğu orta bölgeden kare şeklinde resimler alındı. Resimler, FHO belirleneceği için  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerin en net biçimde gözlemlendiği odaklanma kullanılarak, kayıt altına alındı. Alınan resimlerin tüm yapıyı temsil edebilmesi için, resim adedi 20 olarak belirlendi ve her bir resim büyük bir alanın bir parçasını temsil edecek şekilde kaydedildi. ASTM standardında bahsedilen ızgara kullanılmadı bu sayede çok daha hassas sonuçlar elde edildi ve ızgaradan kaynaklanan sorunlar ortadan kaldırıldı. Mikro yapı resimlerinin, x100 büyütmelerde küçük tanelerin gözlemlenmesi için, x1000 büyütmelerde ise yüksek büyütmeden dolayı hacim oranı belirlemek için uygun olmadığı gözlemlendi. Uygun büyütme oranı x500 olarak kabul edildikten sonra 740°C'dan 810°C'a kadar 10°C aralıklarla hazırlanan numunelerin her birinden 20 adet resim alındı. Toplam 160 adet resim işlendikten sonra her bir resim için 2220x2214 adet nokta saydılarak FHO'ları belirlendi ve MHO'larına dönüştürüldü.

### 3.2. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri Wilson Wolpert marka sertlik ölçüm cihazının 930N seri modeli ile gerçekleştirildi. Ölçümler Rockwell C Sertlik (HRC) değerinde alındı ve martensit hacim oranlarının belirlenmesinde kullanıldı. Tam tavllanmış ve normalleştirilmiş numunelerin sertlik ölçümleri 20 HRC değerinin altında ölçüldüğü için bu numunelerde HB değeri ile ölçümler gerçekleştirildi. Mikro sertlik ölçümleri Buehler marka Mikromet 5114 model numaralı mikro sertlik ölçüm cihazı ile 50 gf kuvvet kullanılarak gerçekleştirildi. Mikro sertlik ölçümlerinden önce Fe–Fe<sub>3</sub>C faz diyagramı kullanılarak  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisindeki karbon miktarları belirlendi ve martesite ait sertlik değeri yaklaşık olarak belirlendi. Şekil 3.2’de Fe–Fe<sub>3</sub>C faz diyagramı ve  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisindeki karbon miktarları ve bu değerlerin martensit sertlik değerleri karşılıkları gösterilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri yapılırken yapının pek çok farklı noktasından çok sayıda sertlik değerleri alındı. Sert faza ait sertlik değerleri ölçülen değerler arasındaki en yüksek değerlerin, yumuşak faza ait sertlik değerleri ise ölçülen en düşük değerlerin kayıt altına alınması biçiminde gerçekleştirildi.

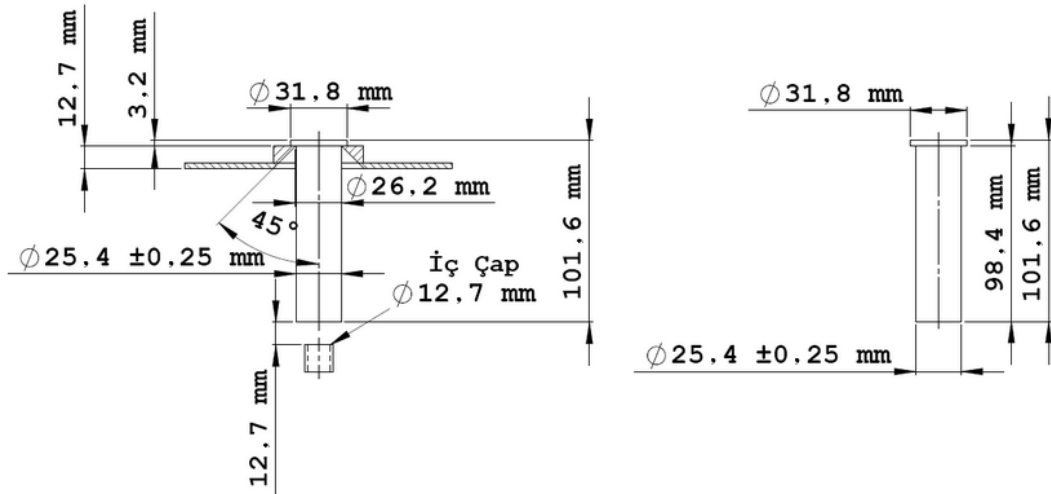


Şekil 3.2. Fe–Fe<sub>3</sub>C faz diyagramı ile  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisindeki karbon miktarının belirlenmesi

MHO'ları belirlendikten sonra bu numunelerden HRC değerleri alındı. Sertlik ile hacim oranı arasındaki ilişki belirlendi ve yapılacak ısıl işlemlerin kontrol edilmesinde kullanıldı.

### 3.3. Jominy Uca Su Verme Deneyi

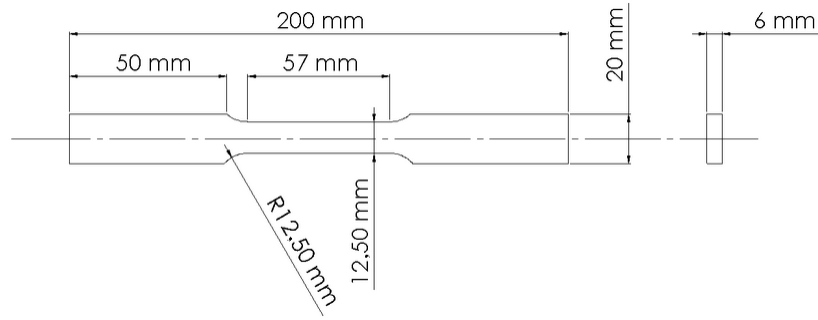
Sertleştirilebilir derinliğin belirlenmesi amacıyla Jominy uca su verme deneyi yapıldı. Jominy deneyleri için numuneler ASTM A255-02 [64] standardı kullanılarak, yine aynı standarda göre hazırlanmış deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Deney numunesi ve deney düzeneğindeki konumu Şekil 3.3'de verilmiştir. Toplam beş adet deney gerçekleştirildi. İlk yapılan deney ile sertleştirilebilir derinlik tespit edildi ve diğer dört deneyde ise farklı martensit hacim oranlarında malzemeye ait bu özelliğin değişiklik gösterip göstermediği incelendi. Çift fazlı yapının sürekli olduğu konum tüm martensit hacim oranlarına ait deney verileri kullanılarak tespit edildi ve sertleştirilebilir derinliğin belirlenmesinde ASTM [64] tablolarından yararlanılarak, %50 martensit gözlemlenen konum belirlendi.



Şekil 3.3. Jominy deneyi numunesi ve deney düzeneğindeki konumu [64]

### 3.4. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri Instron marka deney cihazının SATEC Lx serisi ile oran 2 mm/dakika olacak şekilde gerçekleştirildi. ASTM E8M-04 [65] standardı ve Jominy deneyinden elde edilen veriler kullanılarak çekme deneyi numunesi boyutları belirlendi. Deneylerde kullanılan çekme numunesi boyutları ile birlikte Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Çekme deneyleri tüm MHO'larında, normalleştirilmiş ve tam tavlanmış numunelerde gerçekleştirildi. Deney verileri ASTM [65] standardı kullanılarak tablo ve grafik olarak düzenlendi.



Şekil 3.4. Çekme deneyi numunesi

### 3.5. Mikro Yapı İncelemesi

Mikro yapı resimleri Olympus marka GX41F kodlu optik mikroskop ile x50, x100, x500 ve x1000 büyütmelerde gerçekleştirildi. Numunelerin dağlanması işlemi 20 saniye süre ile %3 nital (%3 Nitrik asit, %97 Etil alkol) çözeltisinde bekletme biçiminde gerçekleştirildi. x50, x100 ve x500 büyütmelerdeki resimler MHO belirlemede kullanılırken, x1000 büyütmelerdeki resimler yapının detaylı incelenmesinde kullanıldı. Uca su verme deneyi sonucu oluşan farklı mikro yapıların incelenmesinde Bilkent UNAM'da bulunan FEI firmasının Nova600 Nanolab odaklanmış iyon ışını (FIB) cihazı kullanıldı. Uca su verme deneyi sonucunda farklı soğuma hızları sonucu oluşan yapılara ait resimler x5000, x10000, x20000 ve x40000 büyütmelerde kaydedildi.



Talaş kaldırma işlemleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Anabilim Dalındaki, Bilgisayar Sayısal Denetim (BSD / CNC) laboratuvarında gerçekleştirildi. Frezeleme işlemleri için BSD laboratuvarındaki, Johnford Fanuc Serisi VMC-550 Marka CNC dik işleme merkezi, kesme parametreleri Çizelge 3.1’de verilen değişkenlerle talaş kaldırma işlemlerinde kullanılmıştır.

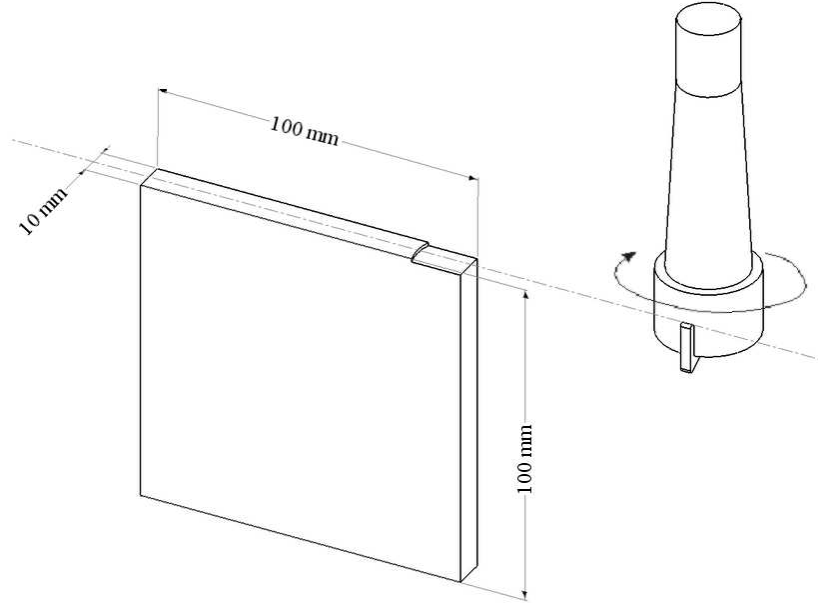
Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan kesme parametreleri

Freze Çapı, $D$ [mm]	Ø32
Yaklaşma Açısı	90°
Eğim Açısı	11°
Uç açısı	60°
Kesme Uzunluğu [mm]	100
Diş Sayısı, $z$	Tek
Talaş Açısı	0°
Kesici Uç Yarıçapı, $r$ [mm]	0,8
Kesme Hızı, $V_c$ [m/dak]	100, 160, 220
Diş Başına İlerleme, $f_z$ [mm/z]	0,2
Talaş Derinliği, $a_p$ [mm]	1

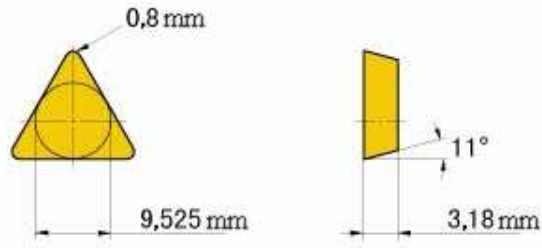
İlk talaş kaldırma işleminden sonra yapılan yüzey pürüzlülük ölçümleri Mahr marka Perthometer M1 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirildi. Kesici takımın yan yüzeyinde oluşan aşınma Mitutoyo marka takımcı mikroskobu kullanılarak ölçüldü.

Deneyleerde kullanılan numune boyutları ve tezgâha takılma biçimleri Şekil 3.6’da, kullanılan kesici uç geometrisi ise Şekil 3.7’de sunulmuştur. Kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlara ait teknik bilgiler Çizelge 3.2’de önerilen kesme hızları ile birlikte verilmiştir.





Şekil 3.6. İş parçası boyutları ve tezgahdaki konumu



Şekil 3.7. Kesici uç geometrisi [66]

Çizelge 3.2. Deneyleerde kullanılan kesici uçların teknik özellikleri [66]

Derece	Sınıf	ISO	Kaplama	Sertlik [HRA]	Tavsiye Edilen Kesme Hızları
UTi20T	Karbür	K20-K35	-	90	Alaşımli Çelik, Frezeleme, 120 m/dak
F620	Kaplamalı Karbür	P15-P35 M15-M35	TiN	89	Alaşımli Çelik, Frezeleme, 200 m/dak

Kesici uçlardaki aşınma türlerini incelemek için x100 büyütmede optik mikroskop kullanıldı. Optik mikroskop resimleri kullanılarak farklı türdeki aşınmaların gözlemlendiği kesici uçlardan da ODTÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü SEM Laboratuvarındaki NORAN Sistem 6 X-ray Mikro analiz sistemi ile donatılmış JSM-6400 elektron mikroskobu (JEOL) ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alındı.

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Kimyasal İçerik

Çizelge 4.1’de mikro alaşımlı çeliğin içerisinde bulunan alaşım elementleri yüzde ağırlık miktarları ile verilmiştir. Çizelge 4.1’e bakıldığında etkin alaşım elementlerinin sırasıyla V , Nb ve Cr olduğu görülmektedir. Ağırlıkça C miktarına bakıldığı zaman, çeliğin orta karbonlu çelik sınıfına girdiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. Mikro alaşımlı çeliğe ait spektral analiz sonuçları

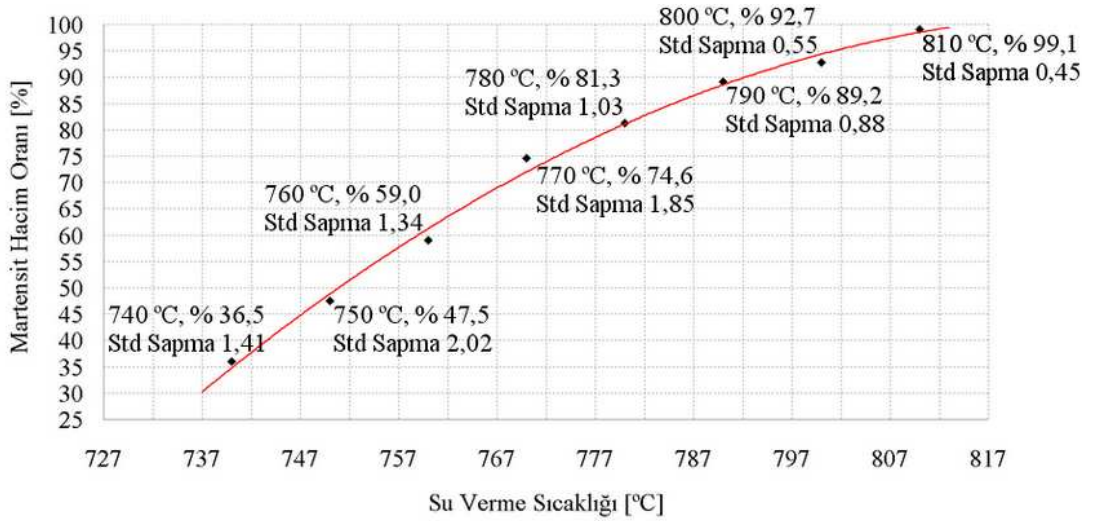
C	Si	Mn	P	S
0,28	0,20	1,45	0,02	0,02
Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0,21	0,04	0,09	0,02	0,07
Nb	Ti	V	Sn	Fe
0,01	0,00	0,13	0,00	97,50

### 4.2. Martensit Hacim Oranı

Su verme sıcaklığına karşılık martensit hacim oranındaki değişim, standart sapma değerleri ile birlikte Şekil 4.1’de verilmiştir. Değişimin doğrusal olmadığı, eğrisel bir davranış gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.1’de kırmızı renkte çizilen eğri, farklı su verme sıcaklıklarındaki martensit hacim oranının belirlenmesi amacıyla grafiğe eklenmiştir. Bu eğriye ait denklem, ikinci dereceden bir denklem ile ifade edilecek biçimde en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 4.1’de MHO’nun ( $M_{vf}$ ), su verme sıcaklığına ( $T_q$ ) göre değişen değerlerinin hesaplanıldığı eşitlik verilmiştir. Denklem 4.1’de dikkat edilmesi gereken husus, denklemin kullanım aralığının, mikro alaşımlı çeliğin faz diyagramındaki ara-kritik bölgesi ile sınırlı olmasıdır.

$$M_{vf} = -0,0083.(T_q^2) + 13,707.(T_q) - 5560,88 \quad [\%] \quad (4.1)$$

Şekil 4.1'deki martensit hacim oranlarına ait standart sapma değerleri incelendiğinde, Şekil 3.1'de işlem aşamaları anlatılan nokta sayma yönteminin, FHO'nun MHO'na en yakın olduğu 750°C'da daha yüksek hata verdiği ve  $\alpha_{\text{demir}}$  fazın hacim oranının azalması ile gözlemlenen hatanın azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, pörlit yapının bozulması sonucu oluşan  $\alpha_{\text{demir}}$  adacıkları içerisindeki küresel  $\text{Fe}_3\text{C}$  tanelerinin hacim oranı ölçümlerini etkilemesidir.

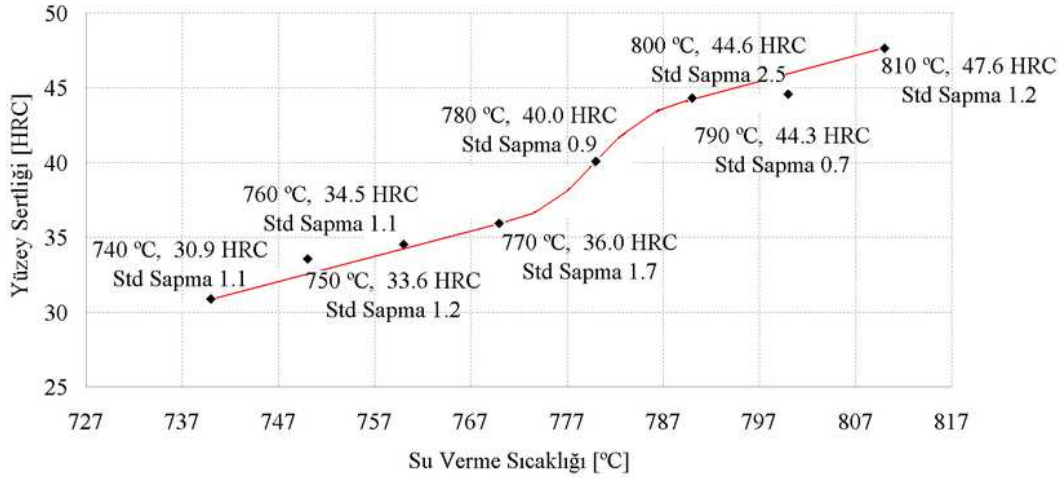


Şekil 4.1. Su verme sıcaklığına bağlı martensit hacim oranı değişimi

Sarwar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [22] elde ettikleri sıcaklık aralığı ve MHO'ları sonuçları, incelenen mikro alaşımlı çelik ile C miktarları yakın olduğu için benzerlikler göstermektedir. Ayrıca FHO ile mekanik özellikler ve ağırlıkça karbon miktarları incelendiğinde elde edilen sonuçların yapılan diğer çalışmalar [3, 12, 16, 22, 28] ile uyumlu olduğu görülmektedir.

### 4.3. Makro ve Mikro Sertlik

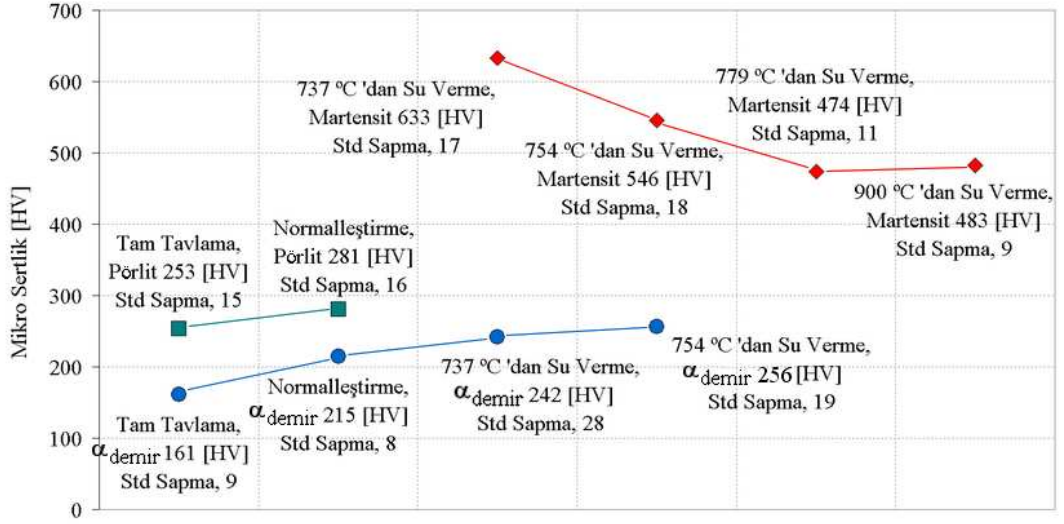
Gerçekleştirilen ısı işlemlerin kontrol edilmesi amacıyla, martensit hacim oranlarının belirlenmesinde kullanılan numunelerin yüzeylerinden alınan sertlik değerleri, su verme sıcaklıkları ve standart sapma değerleri ile birlikte Şekil 4.2’de verilmiştir. Sertlik ölçümlerinde 800°C’den su verilen numune dışında diğer tüm numunelerin yüzey sertlik değerlerine ait standart sapma değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca 770°C’a kadar sertlik değerlerinin değişimi 30 – 35 HRC aralığında, 790°C’dan sonra 45 – 50 HRC aralığında değiştiği görülmektedir. 770°C’dan itibaren yapı içerisindeki toplam FHO’nun %25’in altına indiği Şekil 4.1’de görülmektedir. Bu değişimin sebebi Şekil 4.2’de 770 – 790°C aralığındaki sertlik değişiminin incelenmesi sonucu  $\alpha_{\text{demir}}$  fazın makro sertlik ölçümleri üzerindeki etkisinin, hızlı bir biçimde azaldığı biçiminde yorumlanabilir.



Şekil 4.2. Su verme sıcaklığına bağlı değişen yüzey sertlik değerleri

Şekil 3.5’e göre gerçekleştirilen tüm ısı işlemlere ait mikro yapıların mikro sertlik değerleri HV biriminde, standart sapma değerleri ile birlikte Şekil 4.3’de verilmiştir. Normalleştirilmiş yapının mikro sertlik değerleri incelenildiğinde, pörlit yapının kaba pörlit yerine ince pörlit biçiminde oluşması sonucu sertlik artışı gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca normalleştirme ısı işleminin alaşım elementlerinden

etkilendiği ve Şekil 2.4’de verilen alaşım elementleri etkisinin  $\alpha_{\text{demir}}$  tane sertliğini arttırdığı görülmektedir.



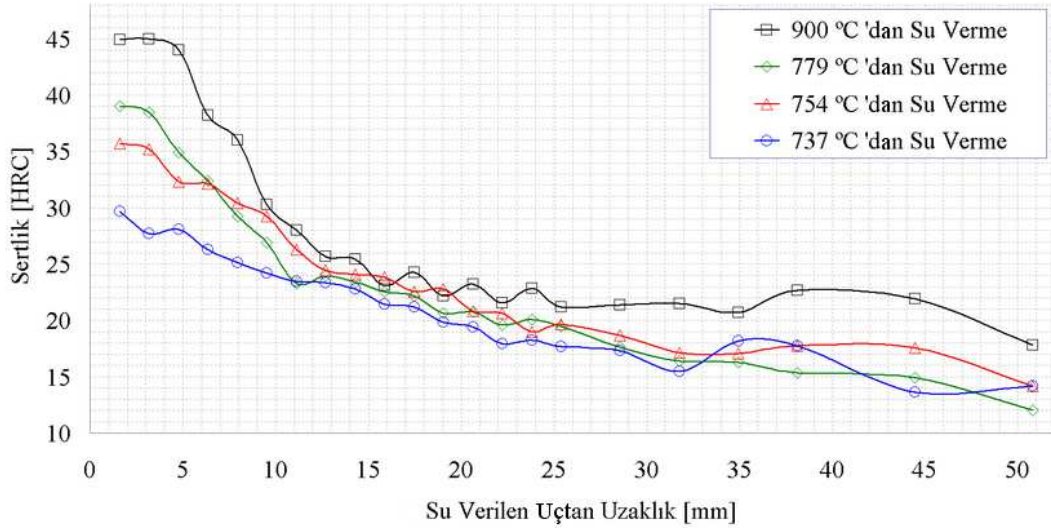
Şekil 4.3. Fazlara ait mikro sertlik değerleri

Martensit yapıya ait sertlik değerlerindeki değişim hacim oranı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.2’deki  $\gamma_{\text{demir}}$  içerisindeki C atomu miktarı kullanılarak, Şekil 2.7’den elde edilen martensit sertlik değerlerinin, Vickers sertliği (HV) ve HRC değerleri arasında yaklaşık 10’un katı seviyesinde bir oran olduğu bilgisiyile, beklenen aralıkta ölçüldüğü Şekil 4.3’de görülmektedir. 779°C’den su verilerek elde edilen yapının  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinin kullanılan mikro sertlik cihazının ölçebileceği boyutlardan küçük olmaları nedeniyle, bu tanelerin sertlikleri ölçülememiştir. Ayrıca 779°C’den su verilerek yüksek hacim oranlı martensit elde edilen yapıdaki martensit tanelerinin sertliğinin, tamamen martensit yapıdaki tanelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Martensit hacim oranının azalması ile artan standart sapma değerleri, mikro sertlik ölçümleri sırasında her iki fazın da diğer faza ait sertlik değerlerini etkilediğini göstermektedir. Çift fazlı yapıyı oluşturan her iki fazın da diğer faza ait mikro sertlik ölçümlerini etkileyeceğinin belirtildiği çalışmada [23] olduğu gibi ölçülen mikro sertliklerin diğer faz tarafından etkilendiği, standart sapma

değerlerinden ve martensitin sertlik değerinin beklenilenden düşük olmasından da anlaşılmaktadır.

#### 4.4. Jominy Uca Su Verme Deneyi

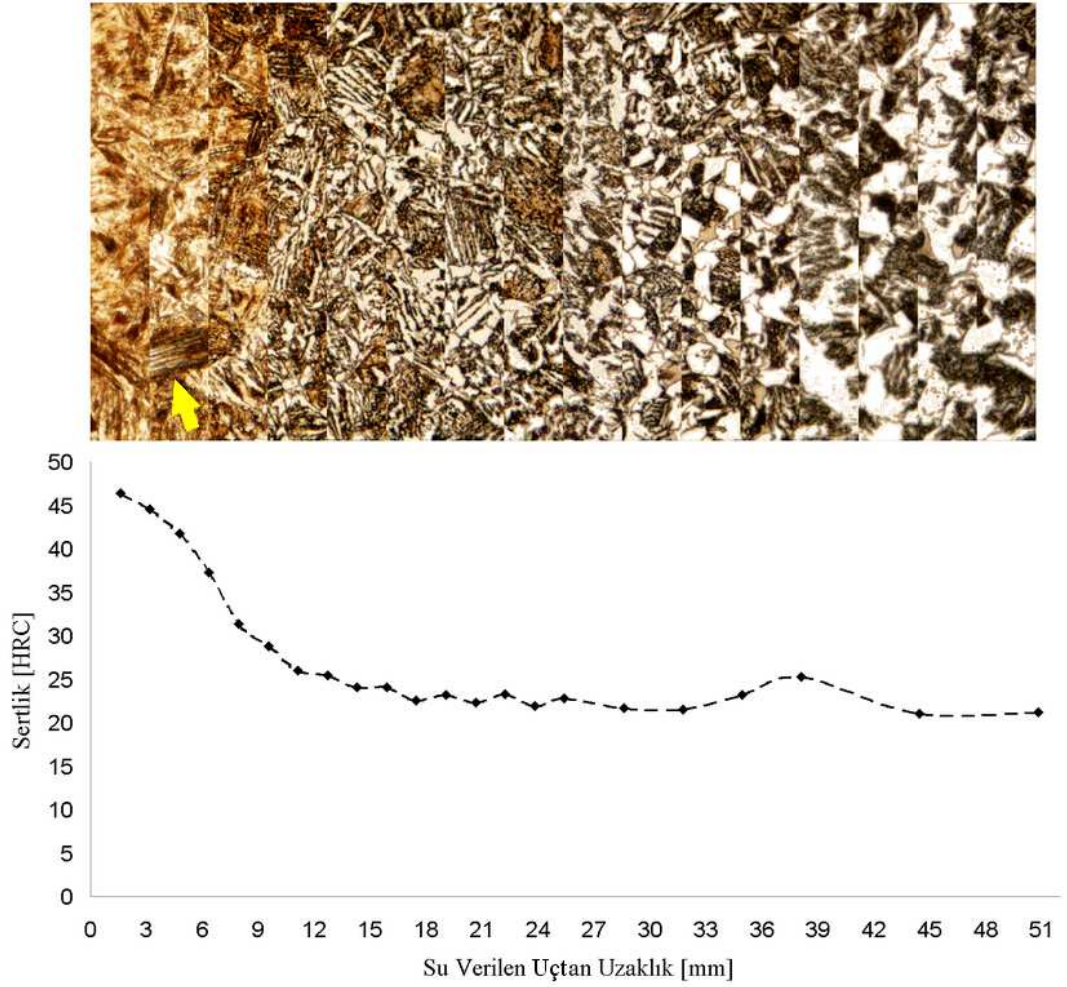
Şekil 4.4'de az, orta, yüksek MHO'ları elde edilen sıcaklıklardan ve  $\gamma_{\text{demir}}$  faz bölgesinden gerçekleştirilen Jominy deneylerine ait sertleşebilirlik eğrileri verilmiştir. Uçtan 35 ve 37 mm uzaklıkta Şekil 2.9'da gözlemlenen pörlit fazın diğer fazlara baskın gelmesi sonucu ortaya çıkan sertlik artışı görülmektedir. Ayrıca ASTM [64]'nin ilgili tabloları kullanılarak 900°C'dan yapılan uca su verme deneyi sonuçlarına göre mikro alaşımlı çeliğin sertleşebilir derinliğinin 8 mm olduğu, çift fazlı yapının ise alından itibaren sadece 3 mm'lik mesafe boyunca sürekli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı martensit hacim oranlarında elde edilen sertleşebilirlik eğrileri

Şekil 4.5'de ilk gerçekleştirilen alından su verme deneyine ait diyagram, oluşan mikro yapılar ile birlikte sunulmuştur. Mikro yapı resimleri x1000 büyütme

kullanılarak, ilk resim alından 1,5 mm uzaklıktan, diğer resimler ise 3'er mm aralıklarla tüm sertlik ölçümlerinin yapıldığı aralığı temsil edecek şekilde çekilmişlerdir. Sertlik düşüşünün hız kazandığı 3 mm'den sonra 4,5 mm'den çekilen resimde ok ile gösterilen yerde Widmanstatten ferrit ve beynit taneleri görülmektedir. 39 mm'den sonra çekilen resimlerde sadece ferrit ve pörlit faz ve sertlik değerinin 20 HRC'de sabit kaldığı görülmektedir.

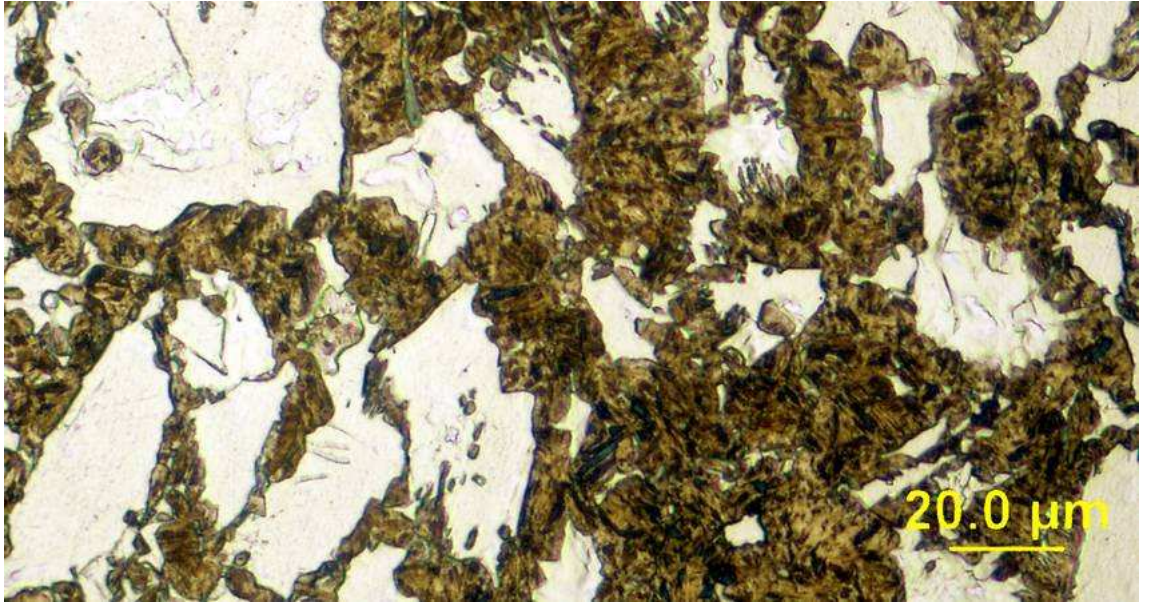


Şekil 4.5. Jominy eğrisi ve mikro yapı ilişkisi



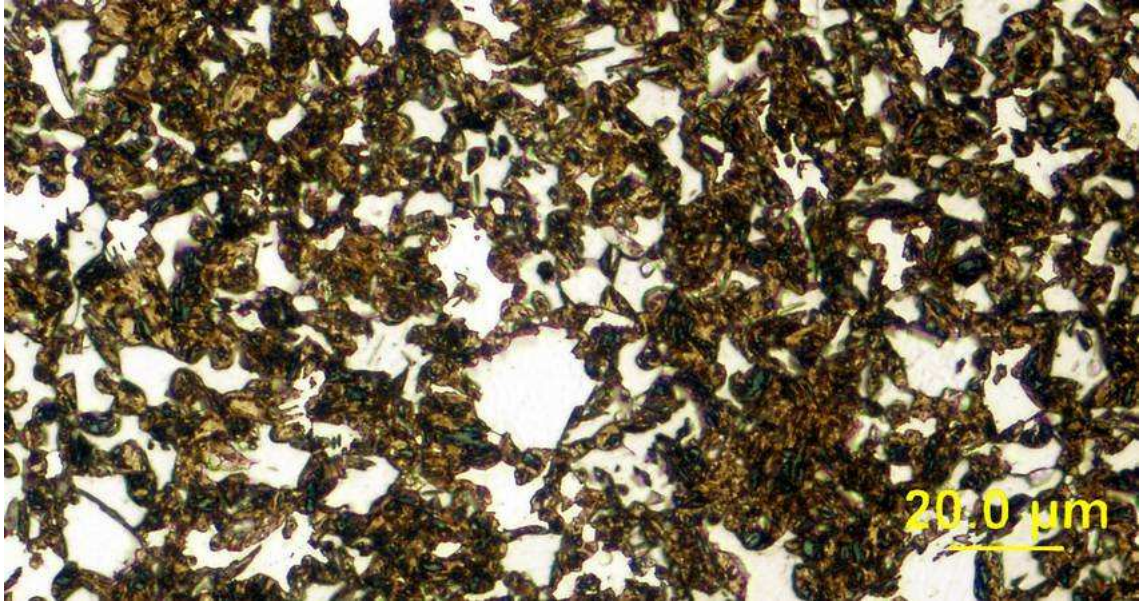
#### 4.5. Mikro Yapı

Şekil 4.6'da düşük MHO elde etmek amacıyla  $737^{\circ}\text{C}$ 'dan su verilen çeliğe ait mikro yapı resmi görülmektedir. Siyah renkte olan tane sınırları ile kolayca seçilebilen beyaz renkteki  $\alpha_{\text{demir}}$  taneleri arasında bulunan martensitin, diğer bölgelerdeki martensite kıyasla dağlayıcı ile daha az tepkimeye girdiği görülmektedir. Bu farklılığın açıklaması olarak, yayınının gerçekleşmek için yeterli süreyi bulamaması ve sıcaklığın düşük olmasından dolayı  $\alpha_{\text{demir}}$  taneleri kuşatan  $\gamma_{\text{demir}}$  'in, diğer bölgelerdeki  $\gamma_{\text{demir}}$  'den daha fazla C atomu ihtiva ettiği düşünülebilir.



Şekil 4.6.  $737^{\circ}\text{C}$ 'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)

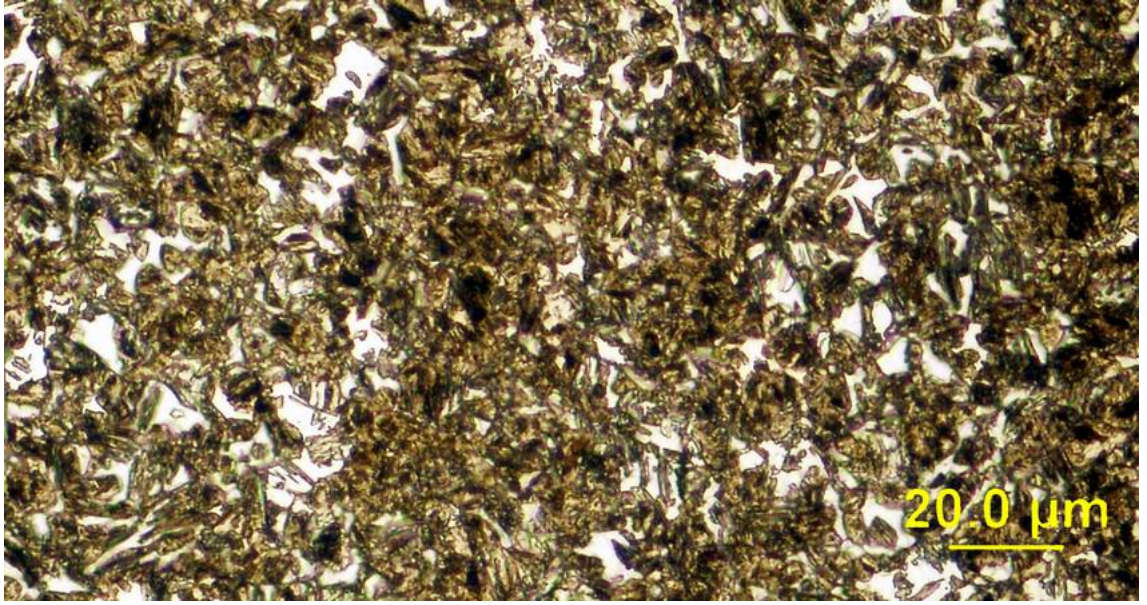
Mikro alaşımlı çeliğe  $754^{\circ}\text{C}$ 'dan su verilerek %55,5 MHO elde edilen yapının mikroskop görüntüsü Şekil 4.7'de görülmektedir. Şekil 4.7'de, Şekil 4.6'daki  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinin parçalanarak daha küçük taneler oluşturduğu ve oluşan ara bölgenin  $\gamma_{\text{demir}}$  faz tarafından doldurulduğu görülmektedir.



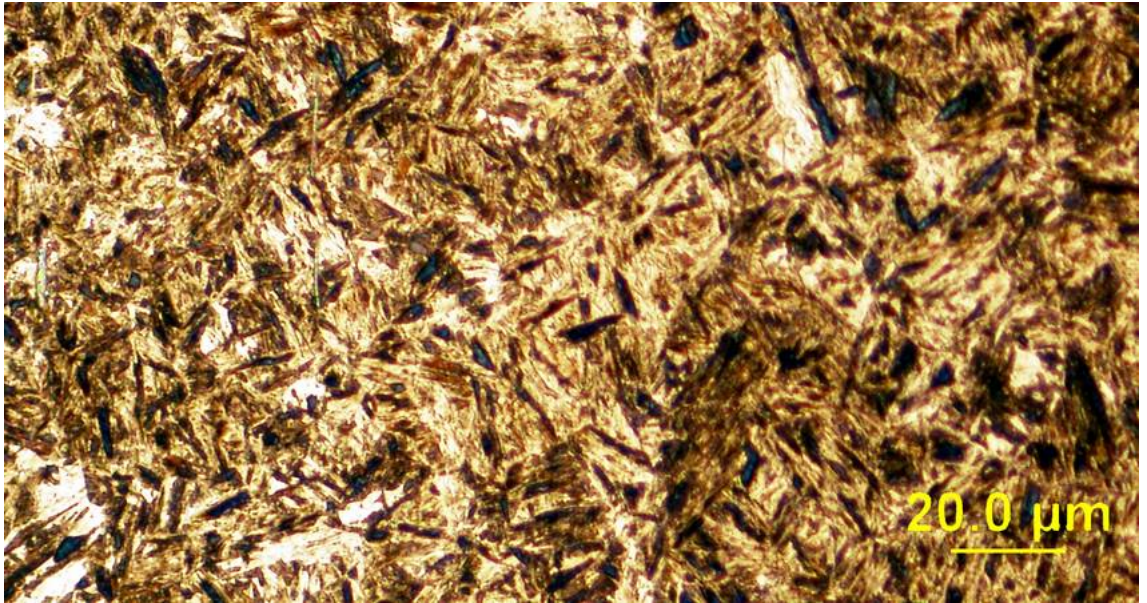
Şekil 4.7. 754°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)

$\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinin diğer iki MHO'na göre daha küçük oldukları, 779°C'dan su verilerek yaklaşık %80 seviyesinde yüksek MHO elde edilmesi sonucu oluşan yapının mikroskop görüntüsü Şekil 4.8'de görülmektedir.

Çeliğin  $\gamma_{\text{demir}}$  faz bölgesinden su verilerek tamamen martensitten oluşan mikro yapısına ait resim Şekil 4.9'da verilmiştir. Martensit plakaları dağlayıcı ile reaksiyona girmeleri eğilimlerine göre, en fazla eğilimli taneler siyaha yakın kahverengi tonda, en az eğilimli taneler beyaza yakın kahverengi ton biçiminde sınıflandırılabilirler.



Şekil 4.8. 779°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)



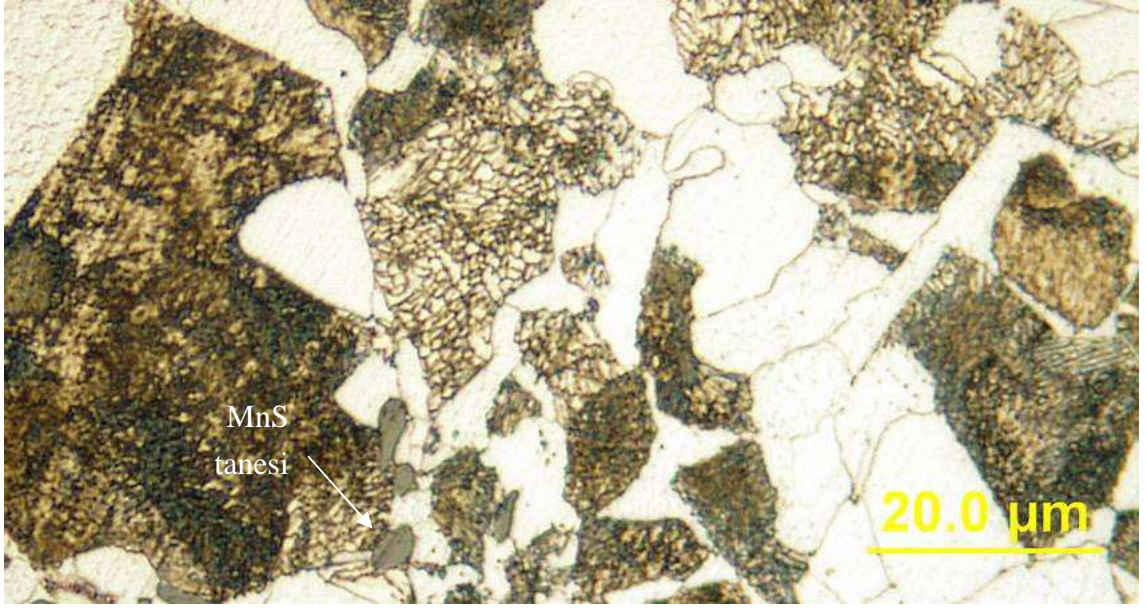
Şekil 4.9. 900°C'dan su verilmiş yapının mikroskop görüntüsü, (x500 büyütme)

Şekil 4.10'da  $\gamma_{\text{demir}}$  faz bölgesinden havada soğutulması gerçekleştirilen çeliğin normalleştirilmiş yapısının mikroskop görüntüsü görülmektedir.



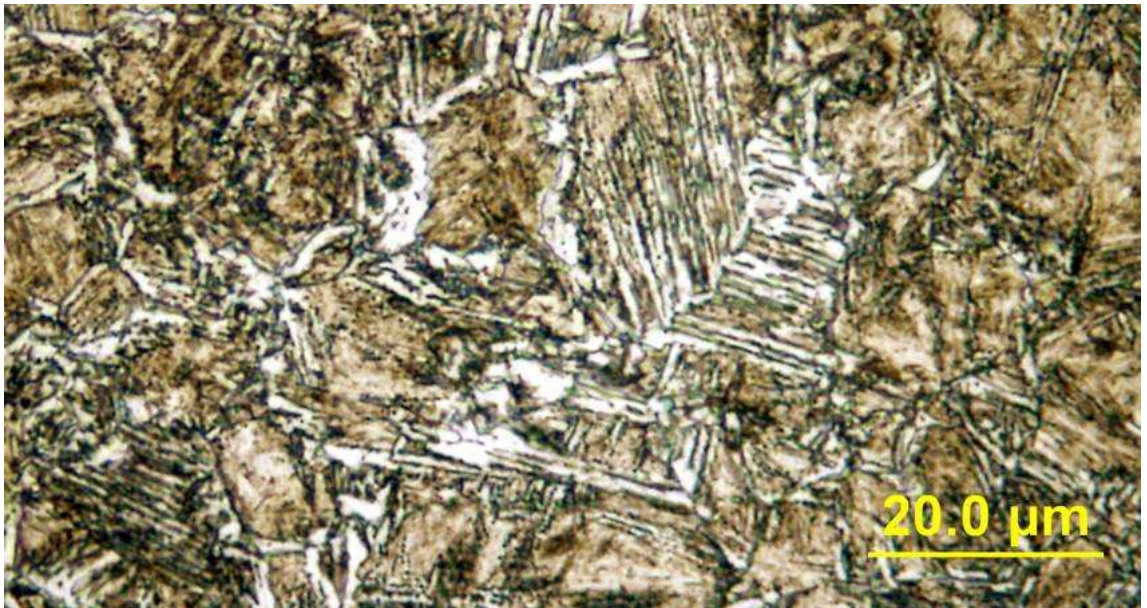
Şekil 4.10. Normalleştirme yapılmış yapının mikroskop görüntüsü, (x1000 büyütme)

Mikro alaşımlı çeliğin fırında soğutulması sonucu  $\alpha_{\text{demir}}$  ve pörlit fazların elde edildiği yapıya ait mikroskop görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir. Mn oranı yüksek çeliklerde sıkça rastlanılan küreselleşmiş mangan-sülfür (MnS) parçacıkları resmin alt kenarında gri renkte görülmektedirler. Ayrıca Şekil 4.10’dan farklı olarak  $\alpha_{\text{demir}}$  taneleri daha büyük ve pörlitin  $\alpha_{\text{demir}} - \text{Fe}_3\text{C}$ ’den oluşan lamelli yapısı x1000 büyütmede net bir biçimde gözlemlenebilmektedir. Havada soğutma düşük soğutma hızlarında gerçekleşen bir ısıl işlem olmasına karşın Şekil 4.10’daki  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinin Şekil 4.11’deki  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerden farklı olarak lekeli olduğu görülmektedir. Bu farklılık Şekil 2.4’de verilen alaşım elementlerinin düşük soğutma hızına rağmen karbür oluşturdıkları biçiminde açıklanabilir. Ayrıca bu iki  $\alpha_{\text{demir}}$  yapı arasındaki sertlik farkı 54 HV olarak Şekil 4.3’de verilmiştir.



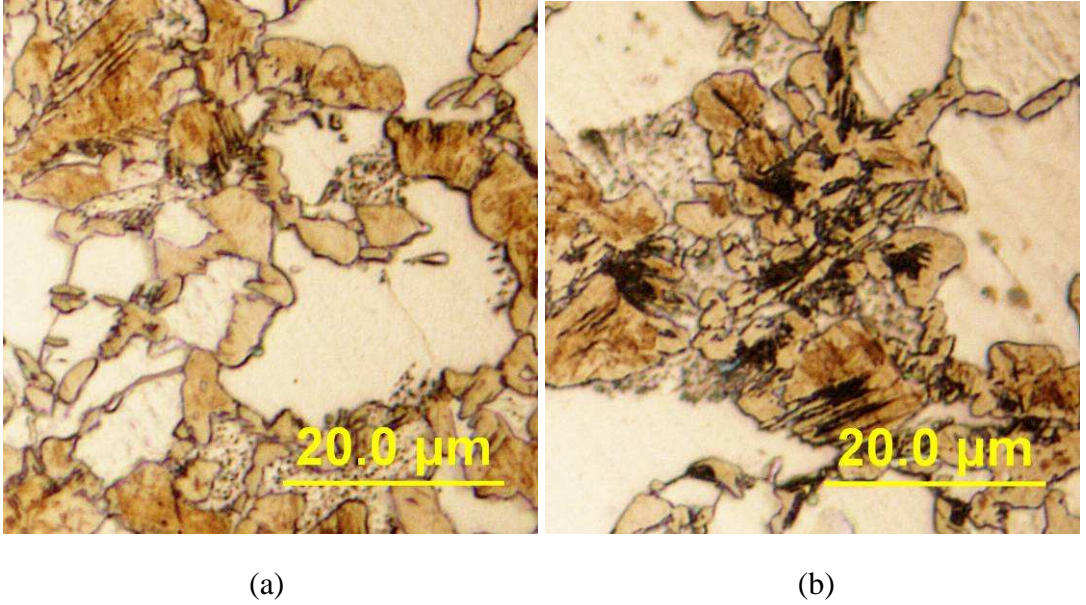
Şekil 4.11. Tam tavlanmış yapının mikroskop görüntüsü, (x1000 büyütme)

Şekil 4.12’de Jominy deneyi sırasında oluşmuş olan allotriomorfik ferrit ve Widmanstatten ferrit yapılar görülmektedir. Allotriomorfik ferrit tanelerin dizilişi dikkatle incelendiği zaman, martensite dönüşmüş  $\gamma_{\text{demir}}$  tanesinin allotriomorfik ferrit taneler tarafından kuşatıldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.12. Allotriomorfik ferrit ve Widmanstatten ferrit, (x1000 büyütme)

Şekil 4.13'de mikroskop resimleri bulunan alt beynit (a) ve üst beynit (b) taneleri, kahverengi tonda olan martensit yapıdan, siyah renkleri ile kolayca ayırt edilebilmektedirler. Alt beynit taneler  $\alpha_{\text{demir}}$  tane sınırlarında Widmanstatten ferrit ile birlikte görülürken, üst beynit tanelerin  $\alpha_{\text{demir}}$  taneler arasındaki martensit yapı içerisinde dağıldığı görülmektedir. Resimlerdeki martensitin açık kahverengi tonlarda görüntülenmesinin sebebi MHO %30 seviyesinde olan yapıda C atomu ile aşırı doymuş martensit bulunması ve bu martensitin dağlayıcı ile tepkimeye girmesinin beynite oranla çok daha fazla zamana ihtiyaç duymasındır.

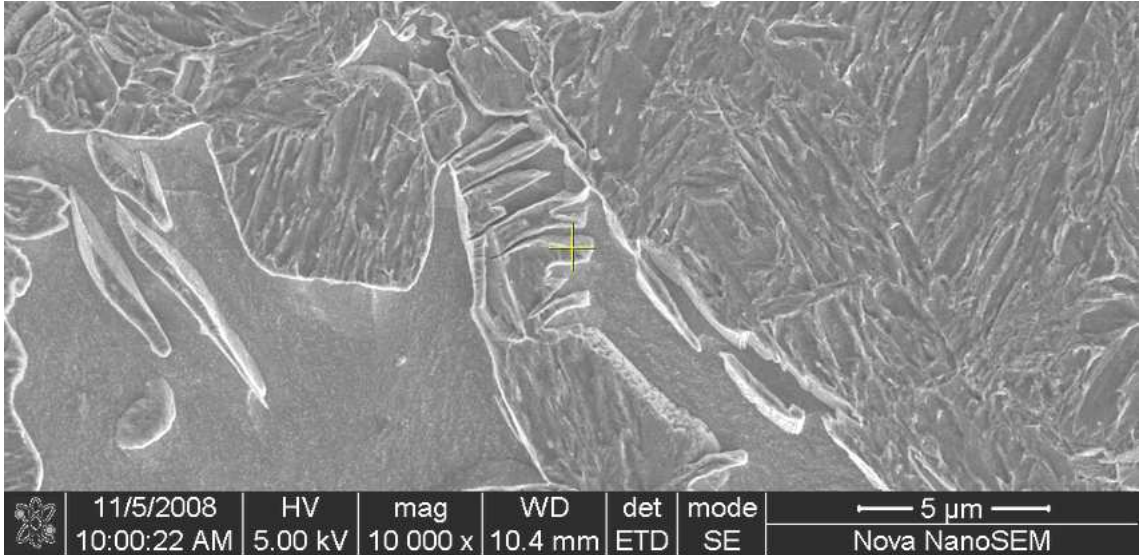


Şekil 4.13. Alt beynit (a) ve Üst beynitin (b) x1000 büyütmede çekilmiş resimleri

Ara-kritik bölgede tavlama süresinin kısa tutulması ve buna bağlı olarak faz dönüşümlerinin tamamen gerçekleşmediği Şekil 4.13'de görülmektedir. Ara kritik bölgede  $\alpha_{\text{demir}}$  ve  $\gamma_{\text{demir}}$  bulunması gerekirken mikro yapılar incelendiğinde ötektoid öncesi pörlit yapının tamamen bozulmadığı ve yüksek sıcaklığa rağmen  $\text{Fe}_3\text{C}$  tanelerinin varlığı Şekil 4.13'de benekli bir görünüşü olan  $\alpha_{\text{demir}}$  tanelerinden anlaşılmaktadır. Bu parçacıkların gözlenmesinin sebepleri,  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerine

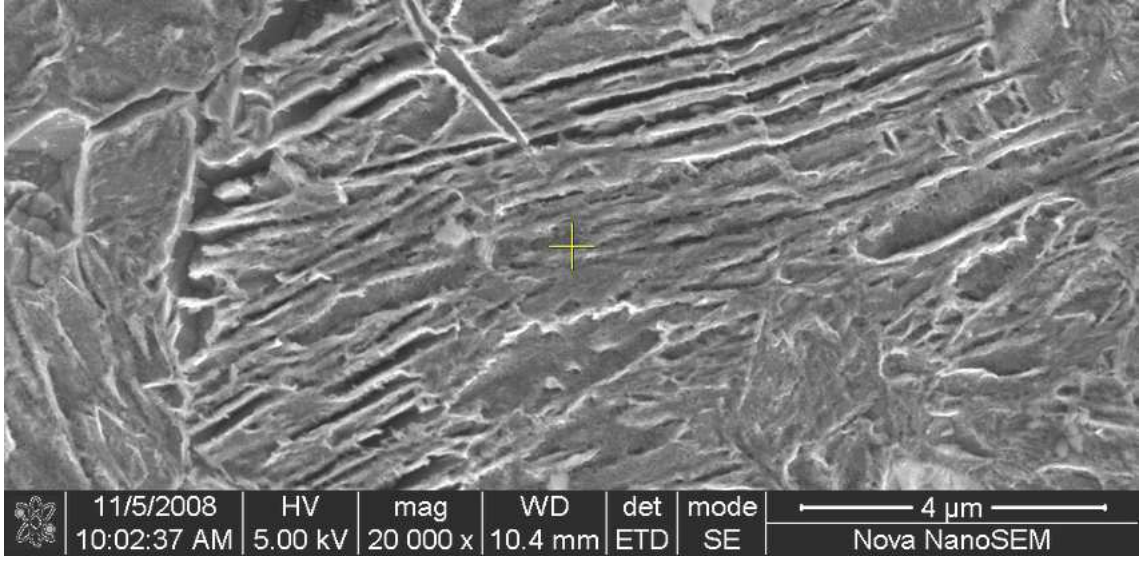
çıkılmaması ve yüzeyde meydana gelebilecek karbon yanmasını önlemek amacıyla tüm numunelerin ara kritik bölgede en fazla 30 dakika kadar bekletilmeleridir. Yüksek sıcaklıklardan su verilen numunelerde sıcaklığın artması ile birlikte, küresel Fe<sub>3</sub>C tanelerine daha az rastlanılmıştır.

754°C’da gerçekleştirilen Jominy deneyinde kullanılan numunenin uçtan itibaren 3 mm uzağından alınan FIB görüntüsünde tane sınırlarına dik olarak oluşmuş, testere dişi biçiminde gözlemlenen Widmanstatten ferrit taneleri Şekil 4.14’de görülmektedir.



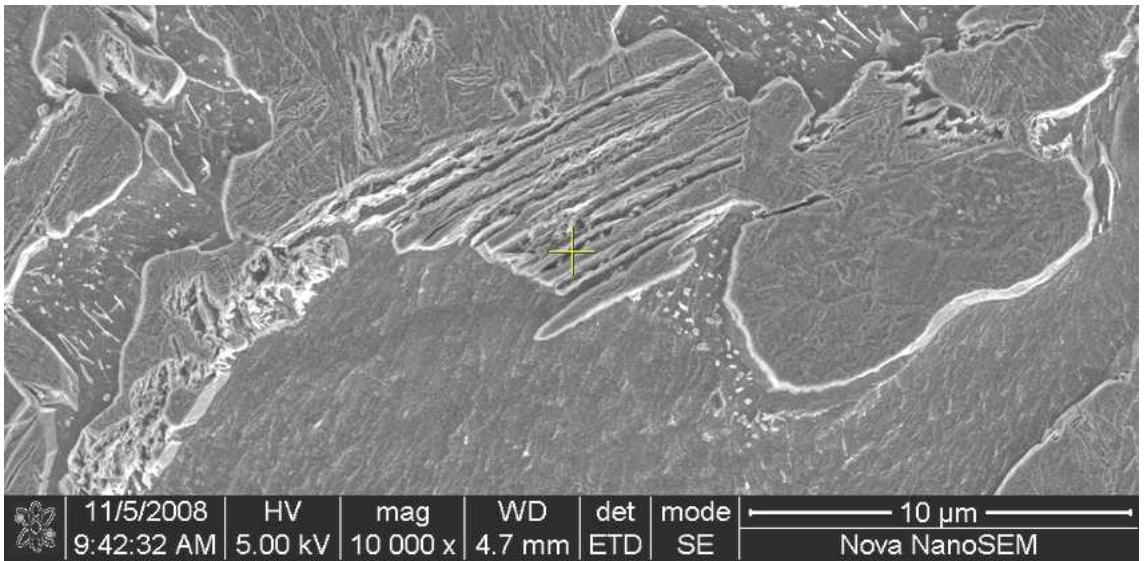
Şekil 4.14. Widmanstatten ferrite ait FIB görüntüsü

Şekil 4.15’de 754°C uçtan su verme deneyi gerçekleştirilen numunenin uçtan 6 mm uzağından alınan x20000 büyütmedeki FIB görüntüsü verilmiştir. Şekilde beyaz renkte görünen karbürlerce zengin sınırlar ile kuşatılmış siyah çubuklar biçiminde alt beynit taneleri görülmektedir. Benzer taneler Şekil 4.13’ün sol üst kenarında da görülmektedir.



Şekil 4.15. Alt beynite ait FIB görüntüsü

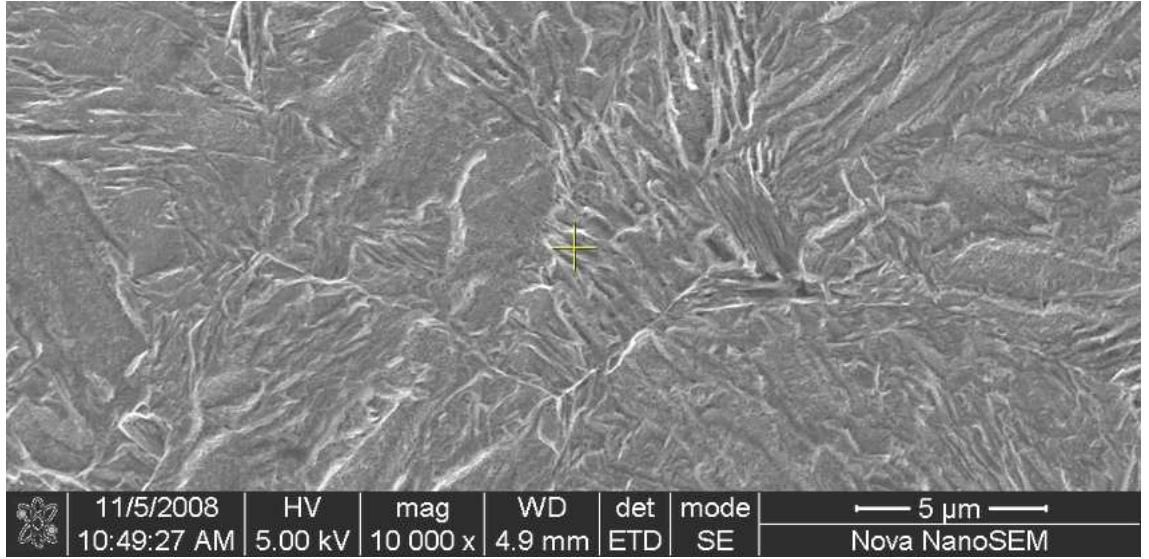
737°C'da gerçekleştirilen alından su verme deneyinde kullanılan numunenin alından 9 mm uzağından alınan x10000 büyütmedeki FIB görüntüsünde  $\alpha_{\text{demir}}$  tanesini kuşatmış üst beynit taneleri Şekil 4.16'da görülmektedir. Şekil 4.16'da ayrıca ara-kritik bölgeye çıkmadan önce pörlit yapı içerisinde olan, ara-kritik bölgeye çıkılması ile küreselleşen  $\text{Fe}_3\text{C}$  parçacıkları  $\alpha_{\text{demir}}$  adacıkları içerisinde küresel beyaz noktalar olarak görülmektedir.



Şekil 4.16. Üst beynite ait FIB görüntüsü

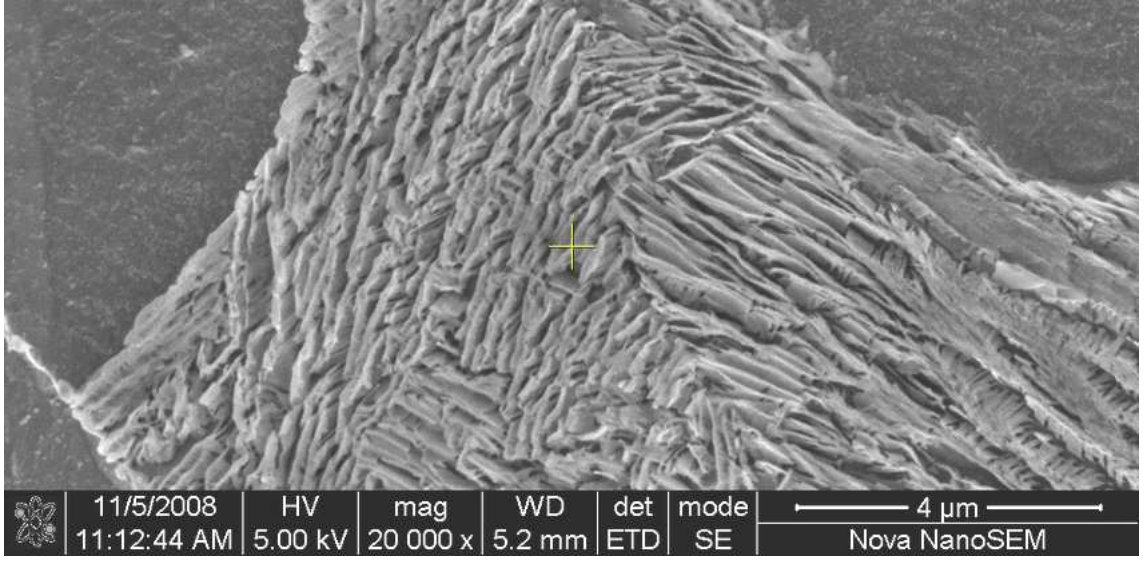


Şekil 4.17’de 900°C’da gerçekleştirilen Jominy deneyine ait numunenin alından 3 mm uzağından alınmış x10000 büyütmedeki FIB görüntüsünde martensit yapı görülmektedir. Şekil 4.17 dikkatle incelenirse Şekil 4.16’daki martensit plakalardan çok daha büyük plakalardan oluşan bir martensit yapı bulunduğu görülmektedir. Benzer biçimde Şekil 4.14’teki plakaların Şekil 4.16’daki plakalardan daha büyük oldukları fakat içerisindeki karbon miktarı en düşük  $\gamma_{\text{demir}}$ ’den elde edilen Şekil 4.17’deki martensit plakaların diğer tüm plakalardan büyük olduğu görülmektedir.



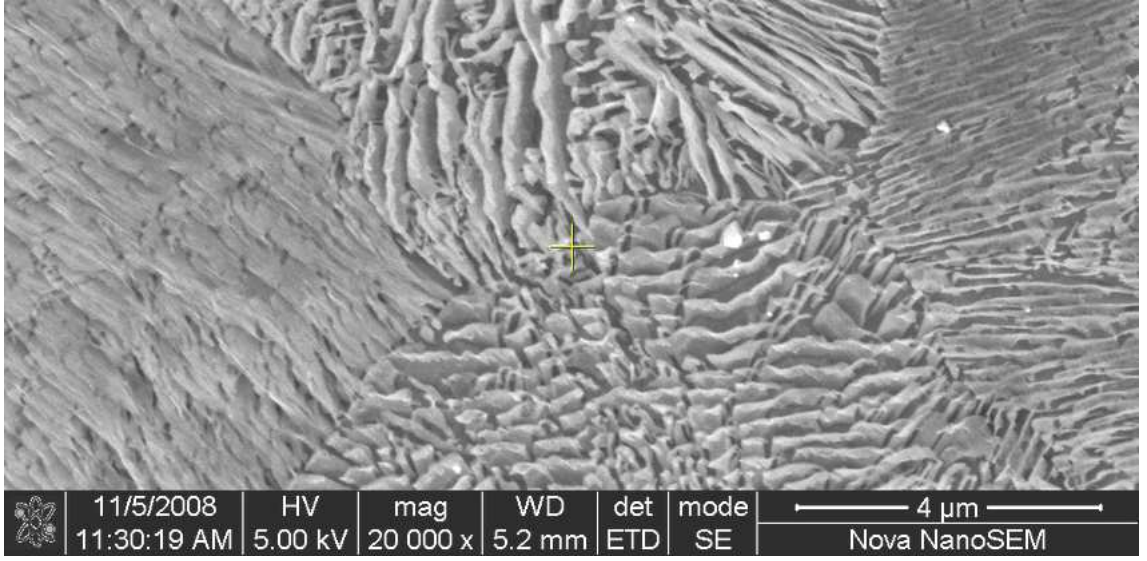
Şekil 4.17. Martensite ait FIB görüntüsü

Şekil 4.3’de pörlit ve  $\alpha_{\text{demir}}$  yapılarına ait sertlik değerleri verilen mikro alaşımlı çeliğin normalleştirme ısıl işlemi sonrasında oluşan pörlit yapısına ait x20000 büyütmedeki FIB resmi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Normalleştirilmiş çelikteki pörlite ait FIB görüntüsü

Şekil 4.19’da tam tavlama ısıl işlemi sonrasında oluşan pörlit yapının x20000 büyütmedeki FIB resmi görülmektedir.  $\alpha_{\text{demir}}$  ve  $\text{Fe}_3\text{C}$  tanelerden oluşan katmanlı yapının Şekil 4.18’deki ince yapısı ya da diğer bir ifade ile katmanlar arası boşluğun küçük olması, Şekil 4.19’daki katmanlar arası boşluğun ise büyük olması dolayısı ile Şekil 4.3’de verilen mikro sertlik değerlerinin farklı olması, katmanlar arası mesafenin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.19’da ayrıca düşük büyütmelerde Şekil 4.11’deki gibi tek bir pörlit tanesi gibi görünen yapının aslında birden fazla tanenin birleşiminden oluştuğu net bir biçimde görülmektedir. Benzer durum Şekil 4.18 ve Şekil 4.10’daki normalleştirilmiş yapıdaki pörlit tanelerde de görülmektedir.

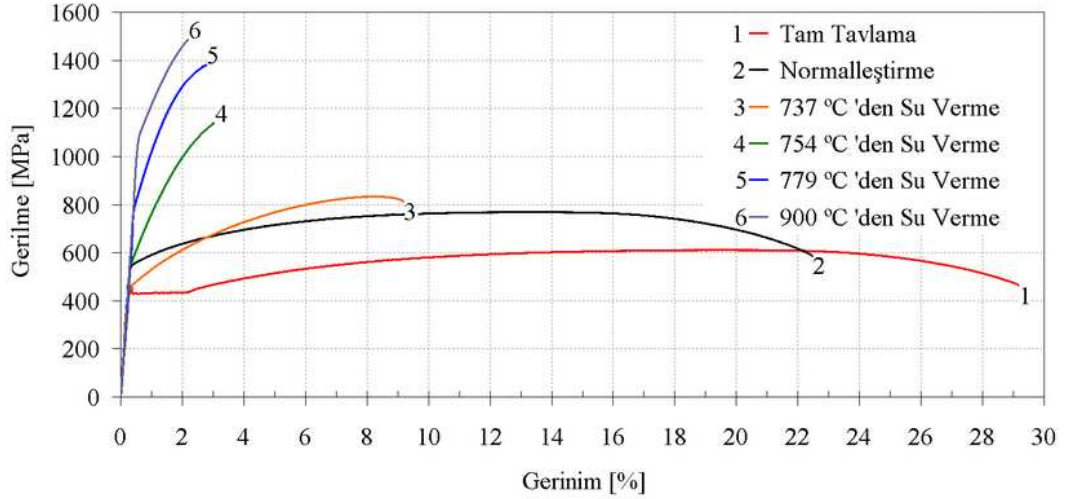


Şekil 4.19. Tam tavllanmış çelikteki pörlite ait FIB görüntüsü

#### 4.6. Çekme Deneyi

Toplam 6 farklı ısııl işlem sonucu elde edilmiş çeliklerle yapılan çekme deneyi sonuçları Şekil 4.20’de gerilme-gerinim diyagramları şeklinde verilmiştir. Tam tavlama ısııl işlemi sonucu deney numunesinde Lüder bantlarının oluştuğu, normalleştirme ısııl işlem ile de bu bantların kaybolduğu görülmektedir. Tam tavlama ısııl işlemi ile alaşım elementlerinin etkilerinin en alt seviyeye indirilmesi sonucu, çelik sade karbonlu çeliklerde gözlemlenen üst ve alt akma noktalarını sergilemiştir. Tam tavllanmış yapıda belirgin olarak gözlemlenen alt akma noktasının varlığı, V alaşım elementinin etkilerinin incelendiği çalışmada [20] normalleştirme ısııl işlemi yapılmış numunelerde V miktarının artması ile lüder bandı oluşumunun da gözlemlenebilirlik kazanması ile açıklanabilir. İncelenen mikro alaşımli çelikte ise normalleştirme ısııl işlemi sonucunda diğer alaşım elementlerinin etkileri ortaya çıkmış ve alt akma noktası gözlemlenmemiştir. 737°C’den su verilerek hazırlanan çekme numunesine ait gerilme gerinim eğrisinde, çift fazlı çeliklerde gözlemlenen düşük akma dayanımına karşılık yüksek çekme dayanımı değerleri ve menevişleme

ısıtıl işlemi yapılmadığı için tam tavlana ve normalleştirmeye kıyasla çok düşük olan düzgün yüzde uzama değeri görülmektedir.



Şekil 4.20. Çekme deneylerine ait gerilme-gerinim diyagramları

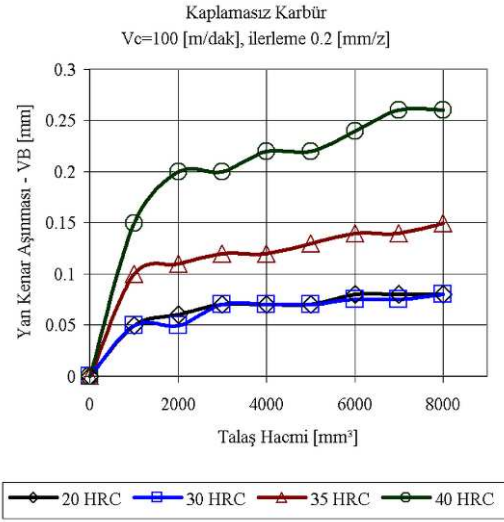
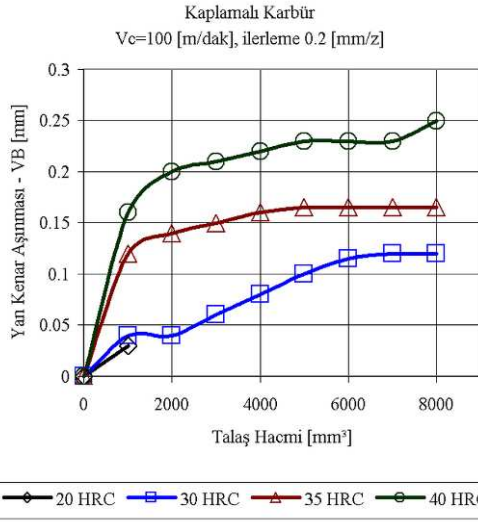
Çizelge 4.2'de Şekil 4.20'de verilen gerilme-gerinim eğrilerine ait verilerin ortalaması, uygulanan ısıtıl işlem ve yüzeyden alınan sertlik değerleri ile birlikte verilmektedir. Sertlik ve dayanım değerlerinin su verme sıcaklığı ile birlikte arttığı fakat yüzde uzama değerlerinin çok hızlı azaldığı okunmaktadır. 737°C'dan su verilerek elde edilen çift fazlı çeliğin, tam tavlana yapıdan yüksek çekme dayanımı değeri ile, normalleştirilmiş yapıdan ise düşük akma dayanımı değeri ile ön plana çıktığı bilgisi, ve yüzey sertliği olarak bu iki yapıdan daha yüksek değere sahip olduğu çizelgeden elde edilmektedir. Elde edilen akma ve çekme dayanımı sonuçları, gerçekleştirilen diğer çalışmalardan [3, 4, 9, 12, 13, 22, 27, 28] malzemenin ısıtıl geçmişinin, alaşım elementleri ve miktarlarının, su verme ortamının, oluşan diğer fazların miktarlarının, kalıntı östenit miktarının ve su verme sonrası gerçekleştirilen ısıtıl işlemlerin, farklı olmasından dolayı farklılıklar göstermektedir. Farklılıklar ferrit hacim oranı ve alaşım elementlerinden etkilenen akma dayanımı sonuçlarında daha az gözlemlenirken, alaşım elementleri ve ağırlıkça yüzdelerinin belirleyici olduğu çekme dayanımlarında daha fazla olmuştur.

Çizelge 4.2. Mikro alaşımlı çeliğin ısıt işlem ile değişen mekanik özellikleri

Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Düzgün Yüzde Uzama [%]	Toplam Yüzde Uzama [%]	Sertlik [HB]	Isıl İşlem
447,3	783,9	728,6	8,32	9,19	309	737 °C 'dan Su Verme
598,0	1137,3	1109,6	2,87	2,87	338	754 °C 'dan Su Verme
795,9	1370,7	1357,1	2,55	2,55	390	779 °C 'dan Su Verme
1074,1	1428,0	1420,7	2,23	2,23	434	900 °C 'dan Su Verme
541,3	762,1	586,6	13,04	22,47	201	Normalleştirme
450,4	615,5	461,1	19,92	29,19	181	Tam Tavlama

#### 4.7. İşlenebilirlik

Şekil 4.21’de 100 m/dak kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık oluşan yan kenar aşınması grafikleri kaplamalı ve kaplamasız uçlar için verilmiştir. Kaplamalı uç 20 HRC sertliğindeki iş parçasını işlerken kırılırken, kaplamasız uç ile 20 ve 30 HRC sertliğindeki iş parçalarının işlenmesinde oluşan yan kenar aşınmaları benzerlik göstermektedir.

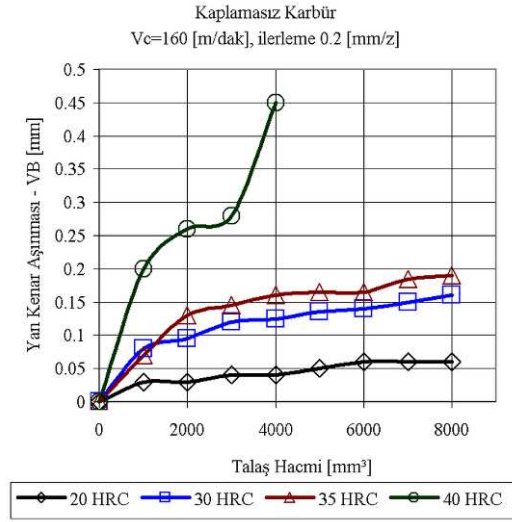
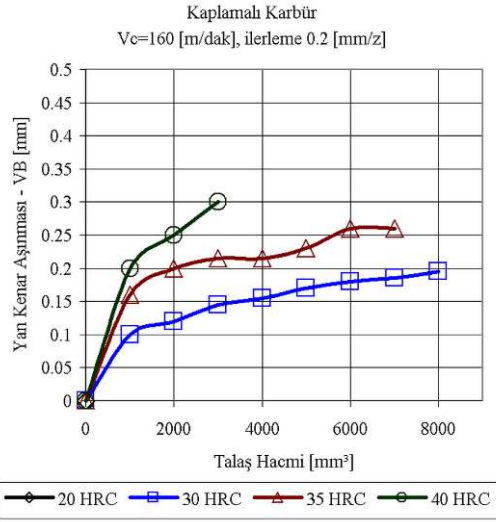


(a)

(b)

Şekil 4.21. Kaplamalı(a) ve kaplamsız (b) kesici uçların 100 m/dak kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri

Kesme hızının 160 m/dak olduğu kaplamalı ve kaplamsız uçlardaki yan kenar aşınmalarının verildiği Şekil 4.22 incelendiğinde 40 HRC değerindeki iş parçası işlenirken her iki ucun kırıldığı görülmektedir. Kaplamalı ucun ayrıca 20 HRC sertliğindeki iş parçası işlenirken ilk talaş kaldırma işleminde, 35 HRC sertliğindeki iş parçası işlenirken son talaş kaldırma işleminde kırıldığı görülmektedir.

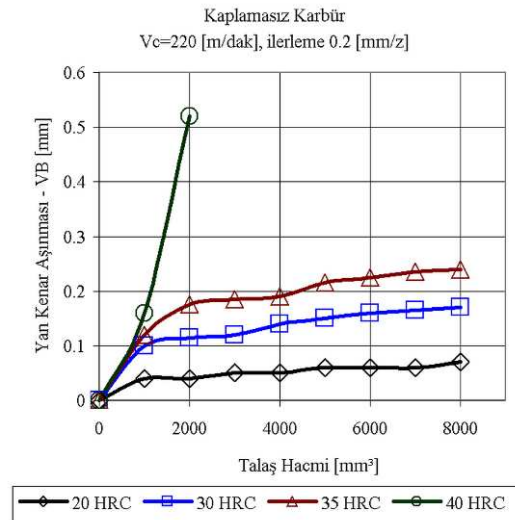
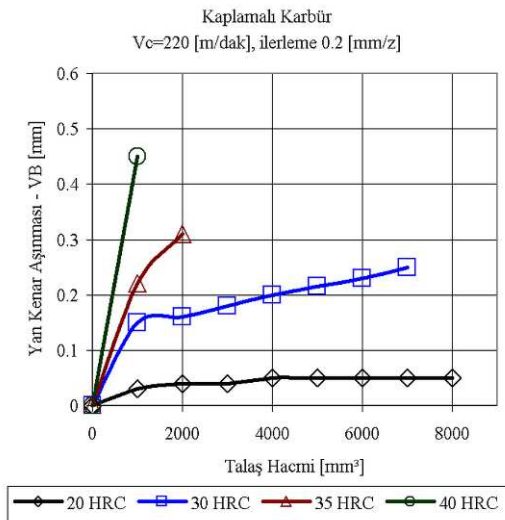


(a)

(b)

Şekil 4.22. Kaplamalı(a) ve kaplamsız (b) kesici uçların 160 m/dak'daki kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri

Şekil 4.23'de 220 m/dak kesme hızında meydana gelen yan kenar aşınmaları görülmektedir. Şekil 4.22'deki gibi 40 HRC sertliğindeki iş parçasının işlenilmesi sırasında her iki kesici uç da kırılmıştır.



(a)

(b)

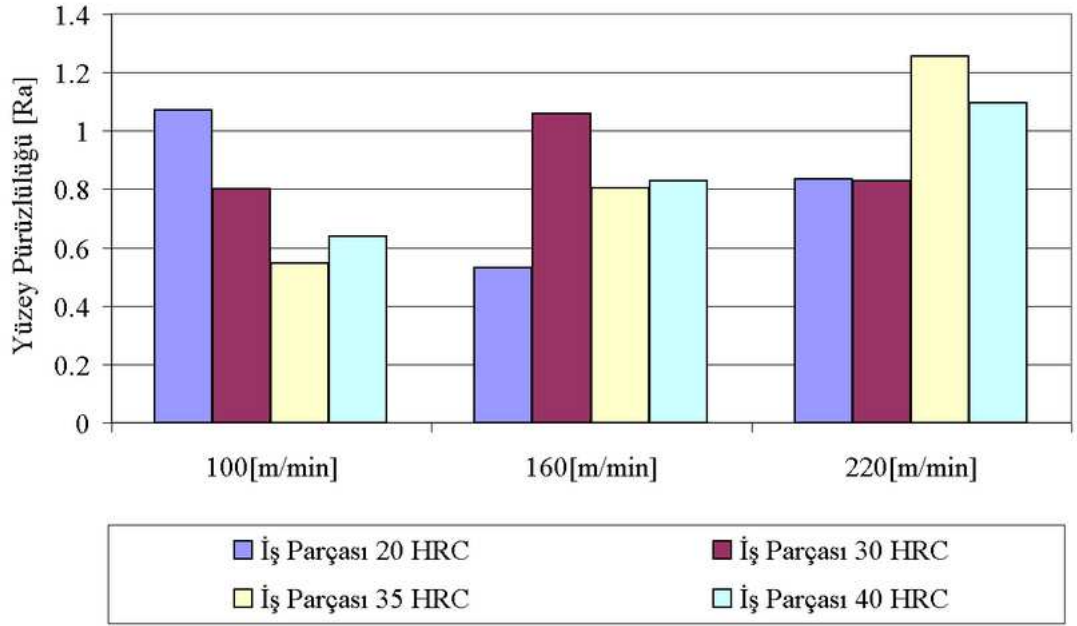
Şekil 4.23. Kaplamalı(a) ve kaplamsız (b) kesici uçların 220 m/dak'daki kaldırılan talaş hacmine karşılık yan kenar aşınması grafikleri

Kaplamalı ucun kaplamasız uca kıyasla daha hızlı bir aşınma sergilediği buna bağlı olarak 35 HRC ve 30 HRC sertliğindeki iş parçalarını işlerken kırıldığı da görülmektedir. Malzeme özelliklerinin kesme hızı ile birlikte yan kenar aşınmasına etki ettiği, Şekil 4.21 ve 4.22'den farklı olarak kaplamasız ucun aşınmasının 40 HRC sertliğindeki iş parçası hariç, Şekil 4.23'te eşit aralıklı aşınma eğrileri oluşturmasından anlaşılmaktadır.

İş parçası malzemesinin, yan kenar aşınmasında belirleyici olduğu farklı uçların kullanıldığı çalışmada [42] gösterilmiştir. Aynı iş parçası malzemesi işlenirse dahi kesici uçların farklı olması sonucu başlangıç yanak aşınması değerlerinin de farklılıklar gösterdiği Shao ve arkadaşları [46] tarafından da gözlemlenmiştir. 40 HRC değerindeki iş parçalarını işleyen kesici uçların kısa takım ömrü sergilemesi, Andrewes ve arkadaşlarının [47] belirttiği gibi sert iş parçalarının işlenilmesinde kesici uç malzemesinin yeteri kadar sert olmaması durumunda ortaya çıkan aşındırıcı aşınmasından kaynaklanmaktadır. Bütün deney sonuçlarında kaplamalı uçlar yüksek sertlikteki iş parçalarının işlenilmesinde kesme hızının artması ile daha hızlı aşınma sergilemişlerdir. Kesme hızının artması ile koruyucu katmanın azalacağı ve takım ömrünün kısılacağı Ti alaşımlarının işlenebilirliğinin incelendiği çalışmada da [53] belirtilmiştir.

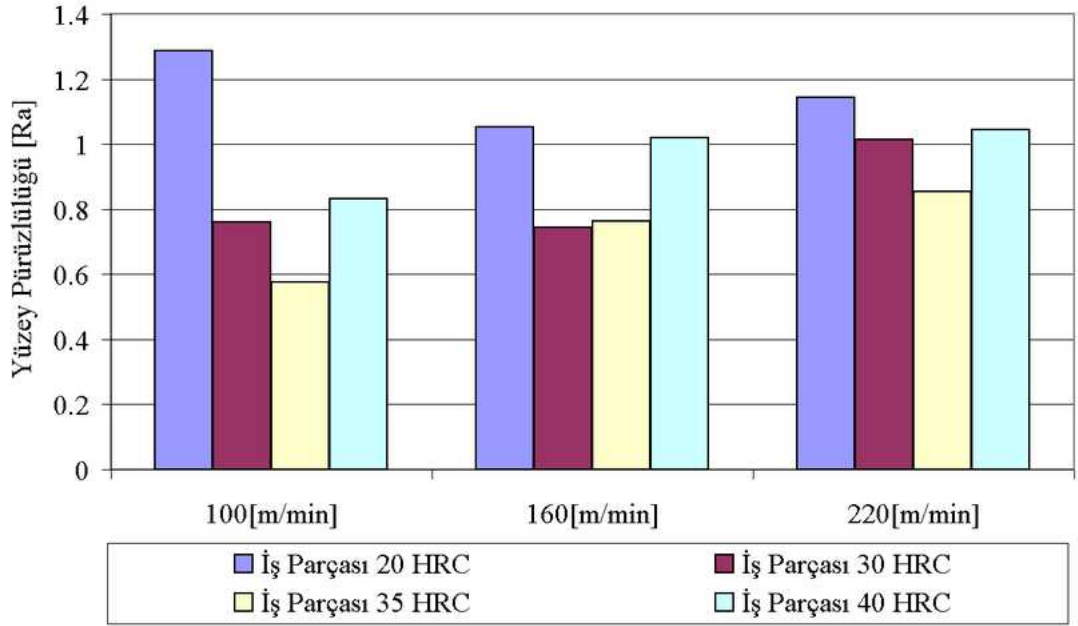
Kaplamasız kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 220 m/dak kesme hızlarında talaş kaldırılması sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Grafikte kesme hızındaki artışı ile yüzey pürüzlülüğünün tüm iş parçaları için arttığı görülmektedir. Grafikte ayrıca 30HRC değerindeki iş parçasının, 20 HRC iş parçasından tamamen farklı olarak 160 m/dak kesme hızında yüksek pürüzlülük değeri verdiği görülmektedir. Ayrıca düşük kesme hızında sert iş parçalarından daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.





Şekil 4.24. Kaplamasız kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 200 m/dak'daki kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri

Şekil 4.25'de kaplamalı kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 220 m/dak kesme hızlarında talaş kaldırılması sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinin 20 HRC sertliğindeki iş parçası hariç diğer tüm iş parçalarında hız artışı ile arttığı görülmektedir. 20 HRC sertliğindeki iş parçasının sert parçacıklar içermemesi ve iş parçasının kaplama yüzeyine diğer kesici uç ve iş parçalarından daha fazla yapışması ve sıvanması sonucu yüzey pürüzlülük değerleri de yüksek çıkmıştır. 30 HRC ve daha yüksek sertlikteki iş parçalarının yüzey pürüzlülükleri, sıvanmanın azalması ve sert parçacıkların işlenebilirliği artırıcı etkileri ile düşük seviyelerde kalmıştır.



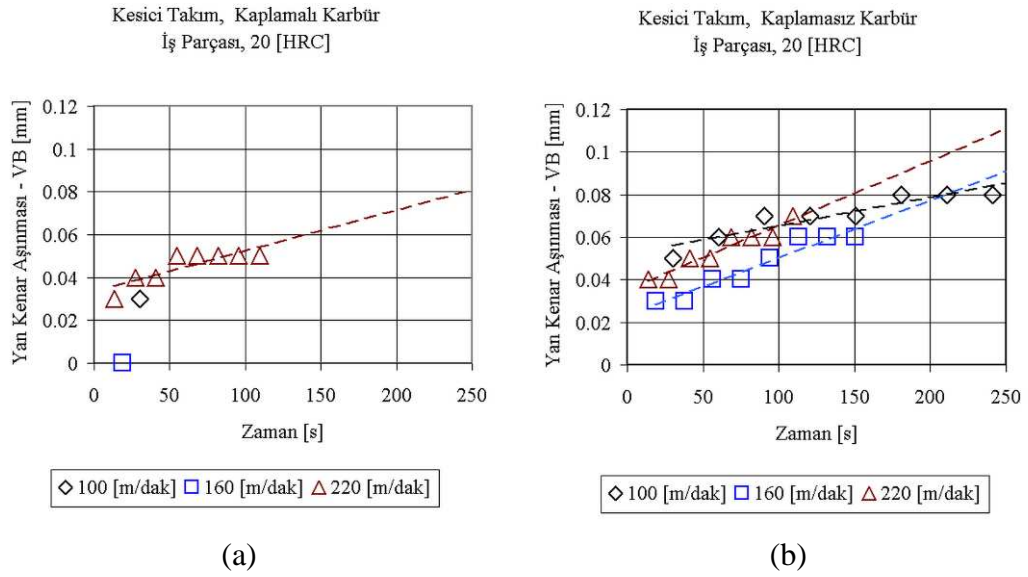
Şekil 4.25. Kaplamalı kesici uç kullanılarak 100, 160 ve 200 m/dak daki kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri

Kaplamalı karbür uçların talaş kaldırma başarımlarında incelendiği çalışmada [61] yüzey pürüzlülüklerinin kesme hızındaki artış ile azaldığı fakat kesici uçlardan TiAlN kaplamalı uç ile yüzey pürüzlülüğünün artış gösterdiği deneysel olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan farklı olarak kaplamalı ve kaplamasız uçların başarımlarının incelendiği çalışmada [34] kaplamalı uçlar ile elde edilen yüzey pürüzlülüğünün daha düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir. Uzun takım ömrü veren iş parçası ile yapılan çalışmada [38], bu tez çalışmasındakine benzer kesme hızı ve ilerleme değerleri tercih edilmiş fakat iş parçasının sünek olmasından dolayı yüzey pürüzlülük değerleri yüksek çıkmıştır. Sadece belirli bir ilerleme değerinde yüzey kalitesinin arttığı çalışmada [40] olduğu gibi bu tez çalışmasında da kesme hızındaki artış ile yüzey kalitesi bozulmuştur. Yumuşak ana yapı içerisindeki sert parçacıkların talaş kaldırma sırasında oluşan basınç ile yer değiştirmiş ve yüzey kalitesini bozmuş olabileceği yorumunun yapıldığı çalışmada [56] da kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Özçatalbaş [59] düşük hızlarda yıgıntı kenar oluşumuna bağlı olarak kötü yüzey kalitesi elde ettiğini ayrıca yapının homojenliğinin ve iş parçası

sertliğinin yüzey kalitesinde önemli belirleyiciler olduğunu belirtmiştir. Kaplamasız sement karbür kesici uç ile bu tezdeki takım ömrüne yakın değerlere ulaşılan çalışmada [60] kesici uç malzemesinin yüzey pürüzlülüğünü etkilediği görülmektedir.

#### 4.8. Takım Aşınması

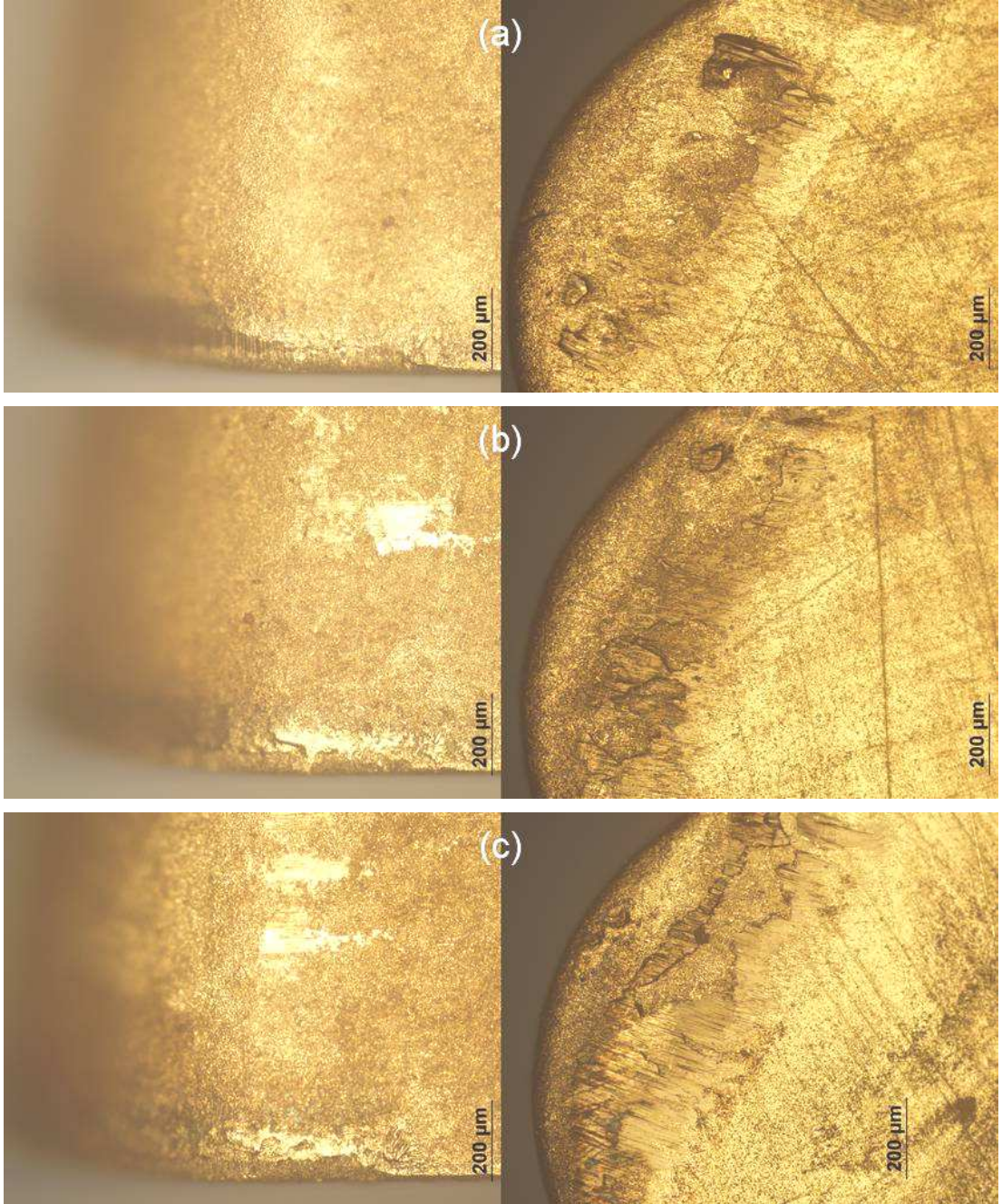
Şekil 4.26'da 20 HRC iş parçasının 100, 160, 220 m/dak kesme hızlarında kaplamalı ve kaplamasız uçlar ile işlenmesi sonucu, kesici takım uçlarında oluşan yan kenar aşınması değerlerinin zaman ile değişimi gösterilmiştir.



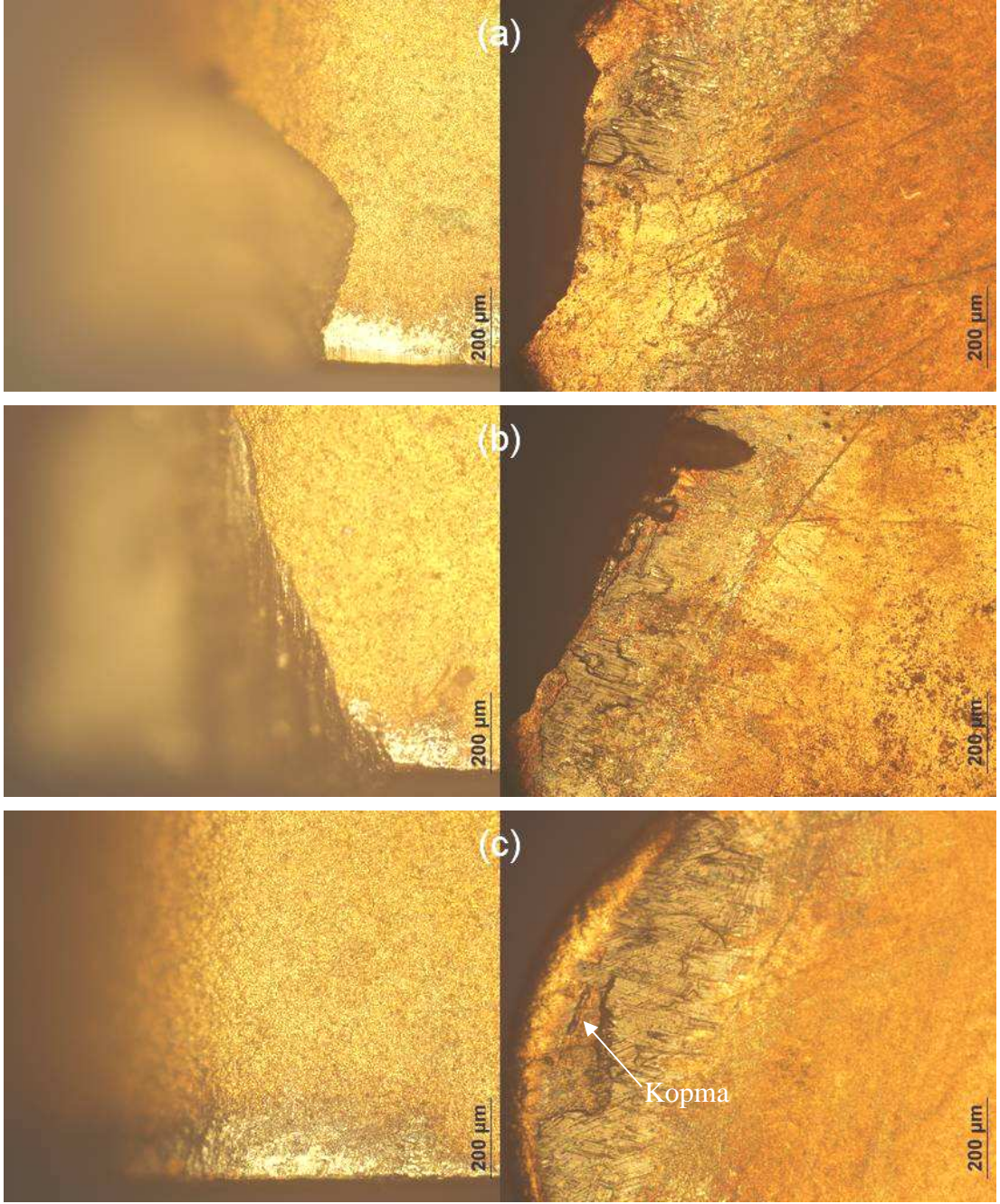
Şekil 4.26. Kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 20 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri

Grafiklerdeki kesikli çizgiler takım aşınmasının doğrusal olduğu aşınmayı temsil etmektedirler ve talaş kaldırma işlemine devam edilmesi durumunda gerçekleşebilecek aşınmanın ulaşacağı değerlerin tahmin edilmesinde kullanılmışlardır. Şekil 4.27'de 20 HRC değerindeki iş parçasının 100, 160, 220 m/dak kesme hızlarında işlenmesi sonrası kaplamasız kesici uçtaki aşınmaların mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kesici ucun krater bölgesinin hemen dışı

incelenildiğinde ince bir tabaka iş parçası malzemesi ile kaplanıldığı görülmektedir. Tüm kesme hızlarında kaplamasız kesici uçtaki baskın aşınmanın yan kenar aşınması olduğu görülmektedir. 20 HRC değerindeki iş parçasının 100 ve 160 m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kırılan, 220 m/dak kesme hızında ise krater bölgesinde kalın bir iş parçası tabakası ile sıvanmış kaplamalı kesici uç aşınmalarının mikroskop görüntüleri Şekil 4.28'de verilmiştir. Pek çok araştırmacı [47, 52, 53] kesici uç yüzeyini kaplayan iş parçası malzemesi tespit etmişlerdir. Düşük kesme hızlarında oluşan yığıntı kenardan kaynaklanan kesme kuvvetlerinin artması ve yığıntı kenarın kırılması sırasında kesici uçtan parça kopartarak kalıcı hasar vermesi sonucu kesici uç zayıflamakta ve işleme devam edilmesi durumunda kırılmaktadır. Andrewes ve arkadaşları [47] tarafından da gözlemlen iş parçası malzemesinin koparken kesici uçtan parçacık kopardığı durum Şekil 4.28 c'de görülmektedir.

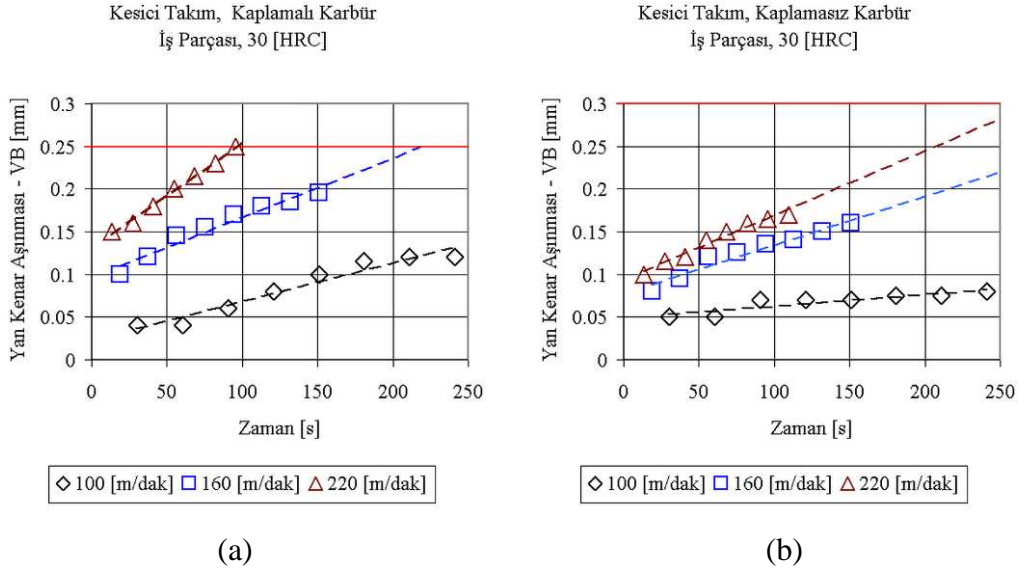


Şekil 4.27. 20 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri



Şekil 4.28. 20 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri

30 HRC değerindeki iş parçasının işlenmesine ait verilerin bulunduğu Şekil 4.29'da kaplamalı uçların kullanım dışı kaldıkları yan kenar aşınması değeri olan 0,25 mm'e çok kısa bir zaman aralığında ulaştığı görülmektedir. Kaplamasız uçların ise kullanım dışı kaldıkları yan kenar aşınması değeri olan 0,3 mm'e daha uzun bir zaman aralığında ulaşacakları bilgisi de Şekil 4.29'da görülmektedir. Kesici uç malzemesinin, iş parçasının aşınma başlangıç değeri ve artış eğrisinde belirleyici olduğu bilgisi, iş parçası sertliğinin artması ile aşınmanın daha yüksek değerden başladığı ve daha hızlı arttığı sonuçlarına ulaşılan araştırmada [58] da elde edilmiştir.



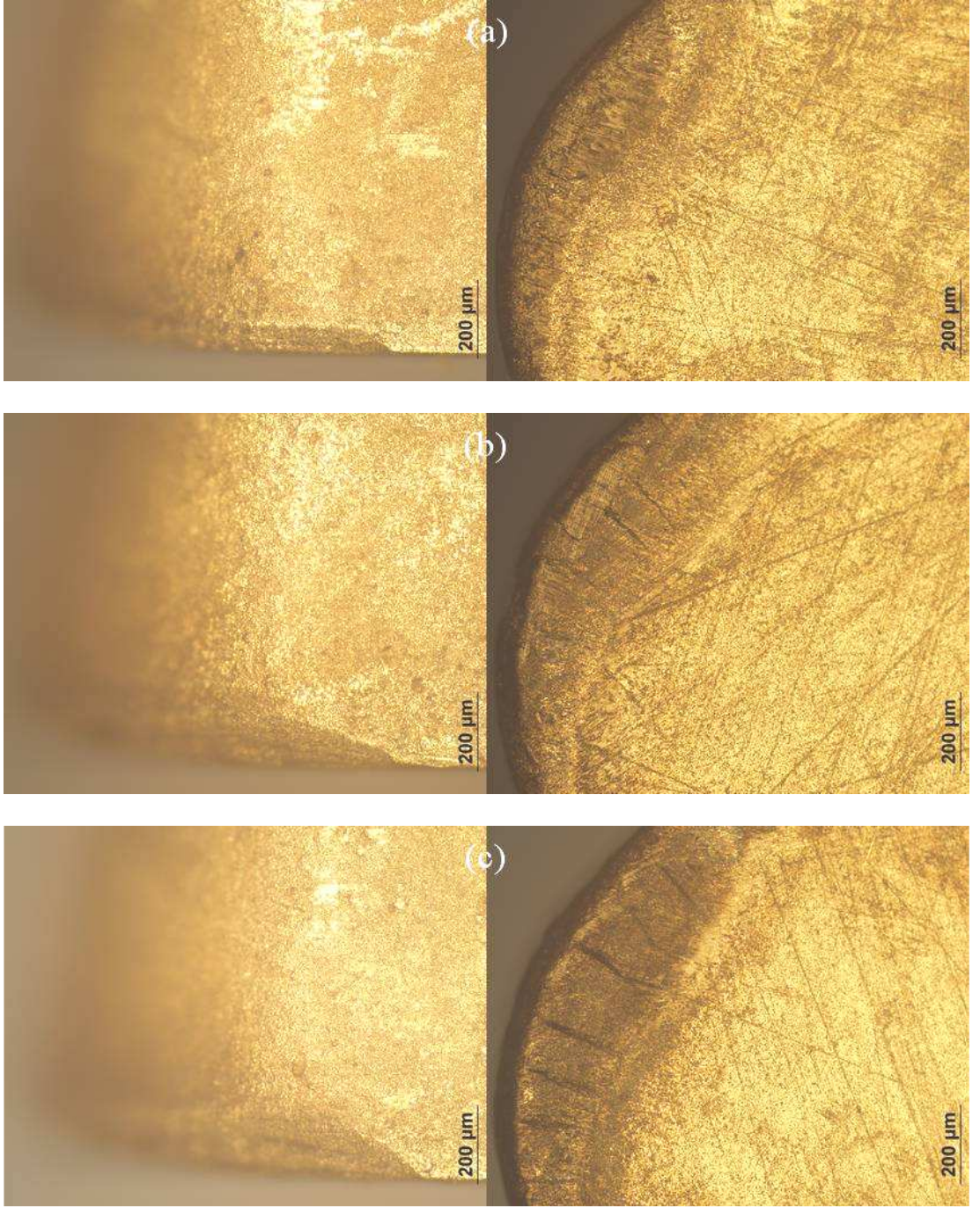
Şekil 4.29. Kaplamalı(a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 30 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yanak aşınması grafikleri

Artan kesme hızı ile kaplamasız ucun Şekil 4.30'da görüldüğü gibi yan kenar aşınmasında artış ve krater bölgesindeki ısıl çatlakların uzayıp derinleştikleri görülmektedir. Kaplamalı kesici uçların mikroskop görüntülerinin verildiği Şekil 4.31'de ise yan kenardaki kaplamanın aşınma bölgesi boyunca kırıldığı, krater bölgesinde ise oluşan ısıl çatlakların mekanik yorulma çatlakları ile birleşerek takım ucunun kırılmasına sebebiyet verdikleri görülmektedir. Ayrıca krater bölgesinde artan kesme hızları ile sıvanma oluşan bölgenin küçüldüğü görülmektedir.

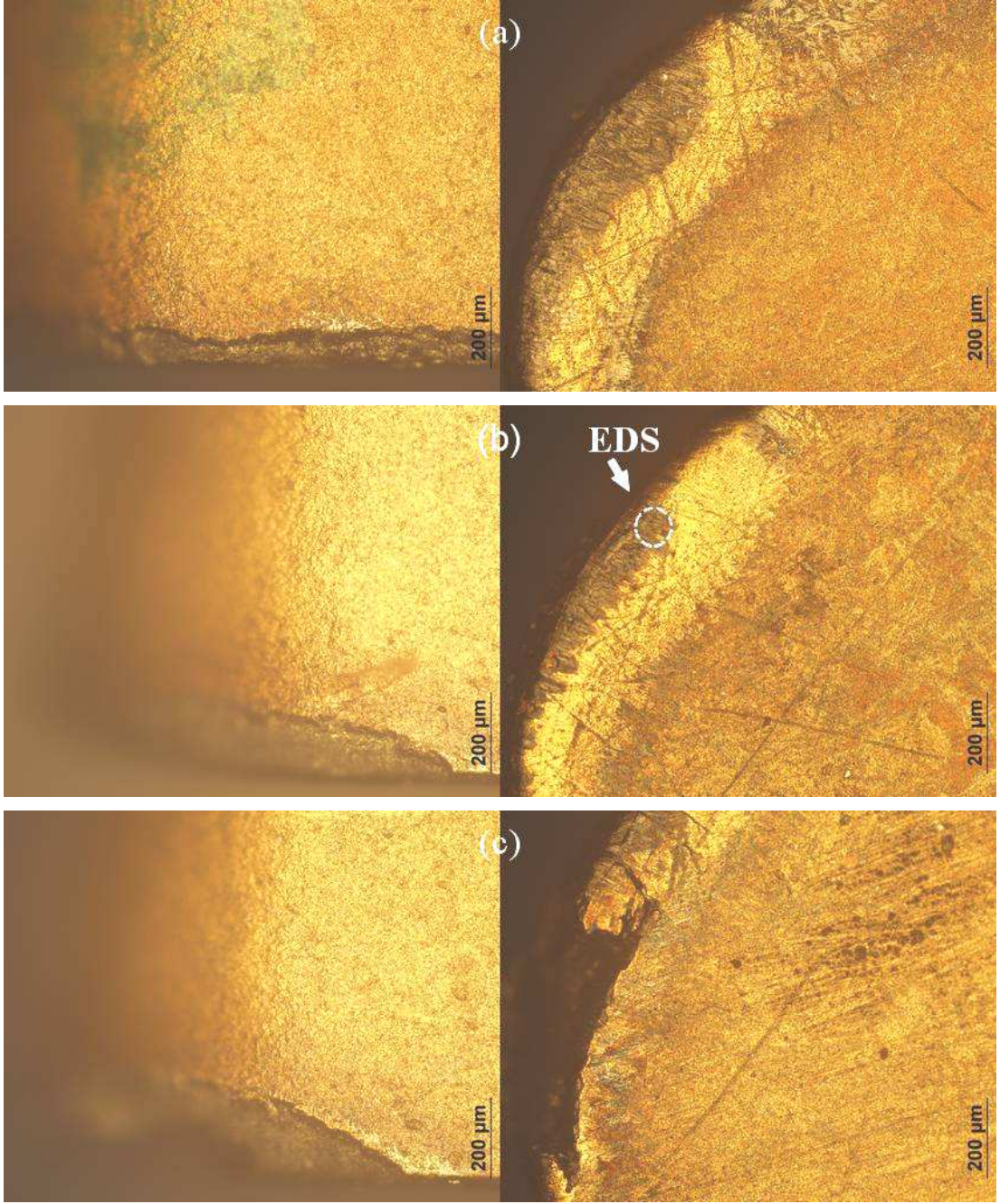
Sert iş parçalarının yüksek kesme hızlarında deneylerinin yapıldığı benzer takım ömürleri elde edilen çalışmada [55] takım ömrünü belirleyen yan kenar aşınması değerini 0,2 mm olarak kabul edilmiştir. Kaplamasız uçlar için sınır yan kenar aşınması değeri 0,3 mm'den sonra uçlar benzer çalışmalarda [36, 46] olduğu gibi hızlı aşınma sergilemişlerdir. 0,7 mm'e kadar yan kenar aşınma değerleri ölçülen araştırmadan [36] farklı olarak incelenen uçların büyük kısmı sınır aşınma değerini geçince kırılmıştır. Benzer kırılmaların gerçekleştiği çalışmalarda [34, 42] da yan kenar aşınması değeri 0,3 mm sınır değerini aşınca kesici uçların kırıldığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada [51] sınır değerini 0,40 mm olarak aldığı gibi, yan kenar aşınması sınır değeri iş parçası malzemesi, kesici uç malzemesi ve kaplamasına bağlı olarak her çalışmada farklı değerler alabilmektedir.

Kaplamalı uçlar ile kaplamasız uçların farklı aşınma davranışı sergilemesi, kesici uçta ısıl çatlak oluşumu tespit edilen araştırmada [54] kaplamanın hızlı biçimde kırılması durumunda uçtaki aşınmanın hızlanması ve MMC'lerin işlenebilirliğinin incelendiği araştırmada [56] sert parçacıkların aşındırıcı etkisi sonucu kesici uçta aşındırıcı aşınması oluşması, şeklinde açıklanabilir.



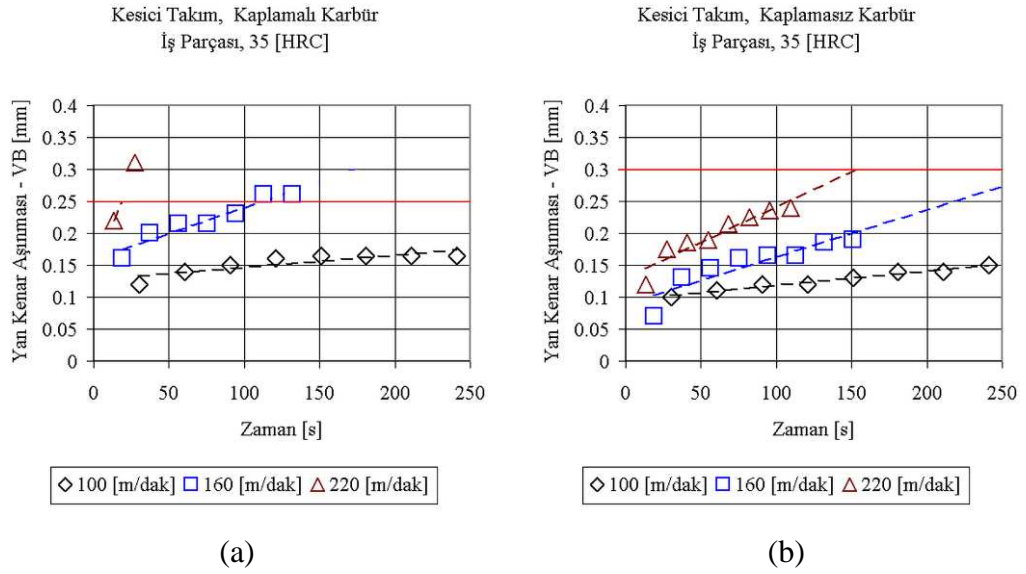


Şekil 4.30. 30 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri

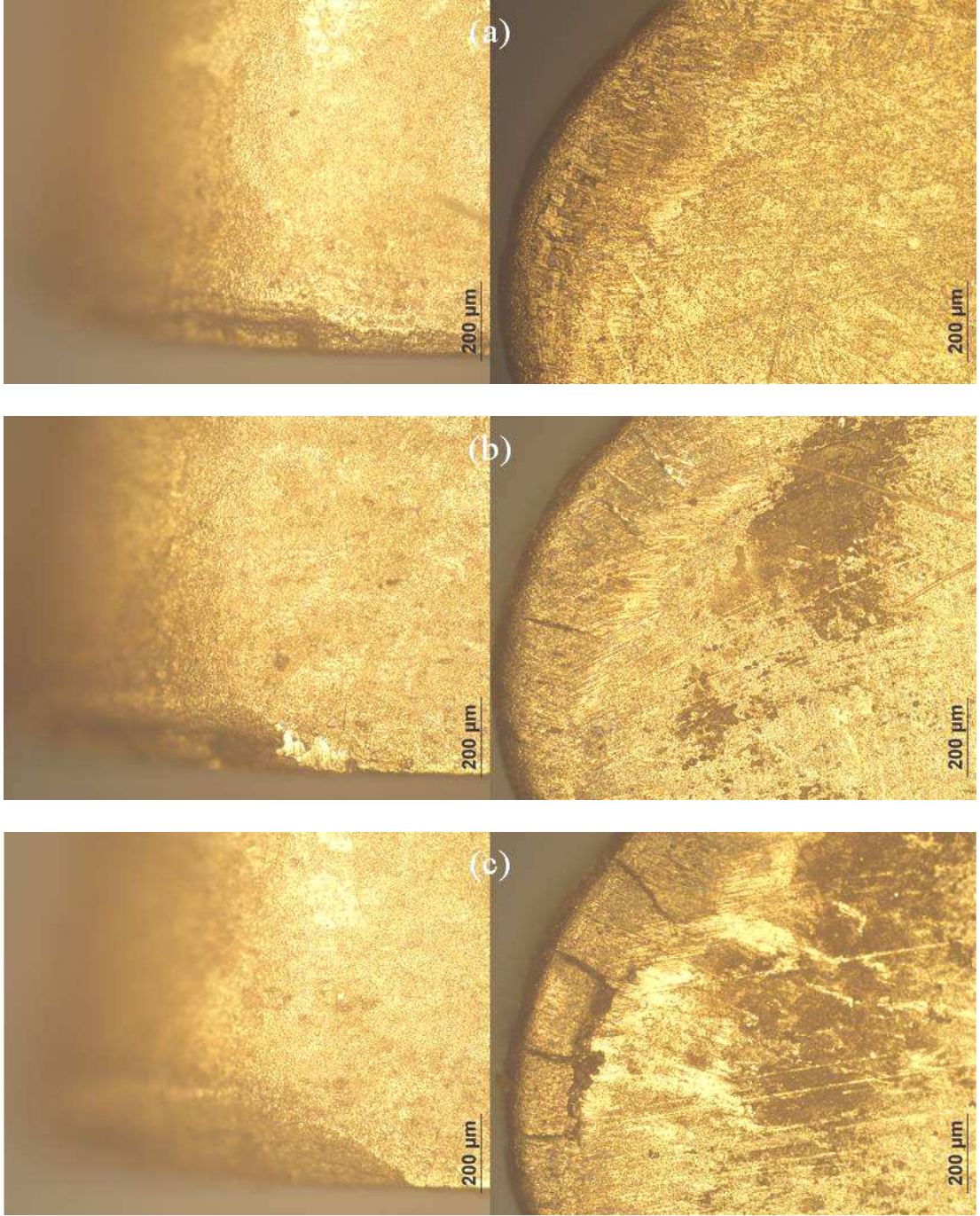


Şekil 4.31. 30 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri

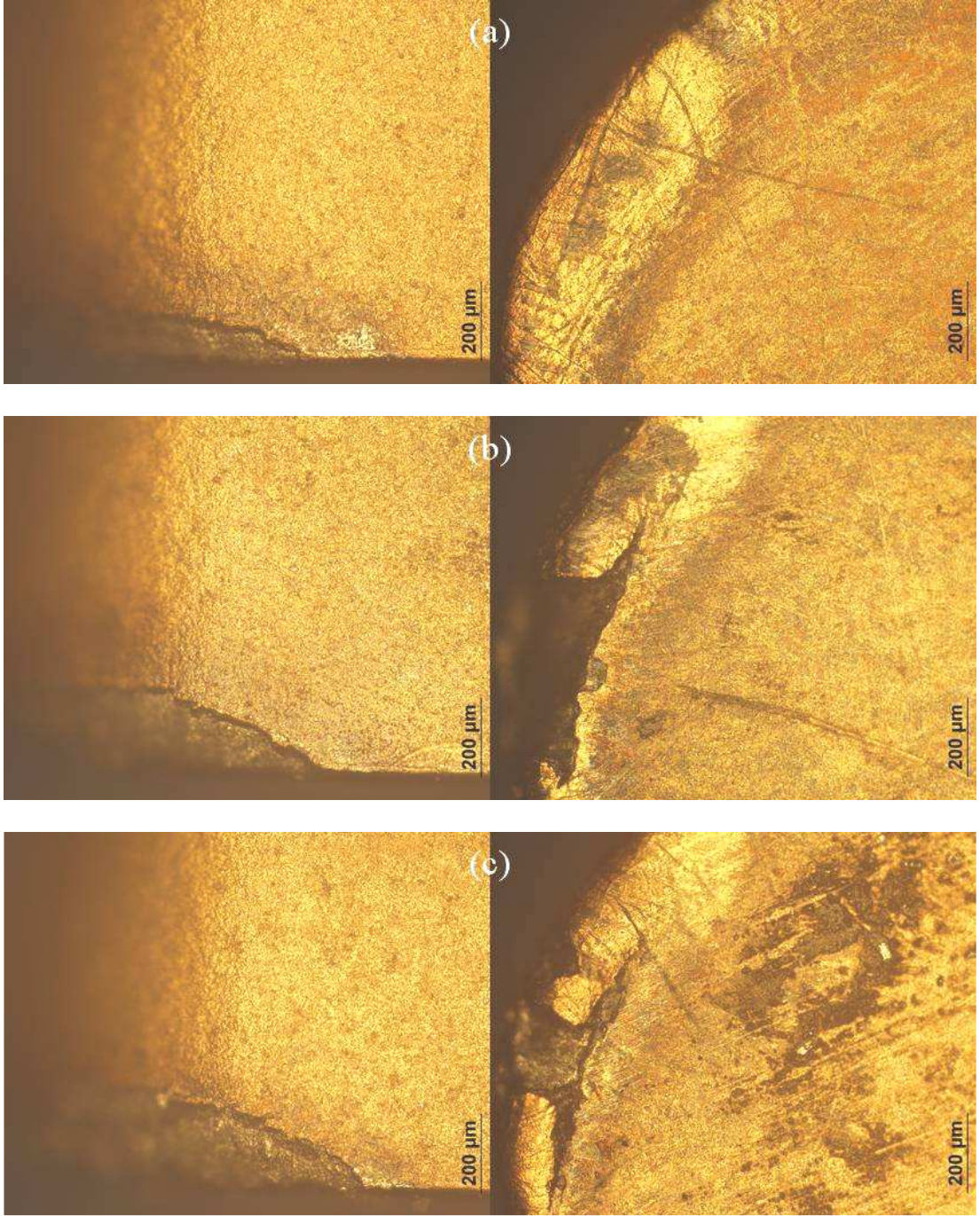
Şekil 4.32’de kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlara ait, 100 ve 160 m/dak kesme hızında gözlemlenen aşınmanın zamanla değişimini temsil eden doğruların eğimlerinin benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Ayrıca 220 m/dak kesme hızında meydana gelen aşınmanın zamanla değişimini temsil eden doğruların eğimlerinin farklı oldukları ve buna bağlı olarak takım ömürleri arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 4.33’de kaplamasız uçta kesme hızı ile artan yan kenar aşınmasının yanında büyüyen ısıl çatlaklarda görülmektedir. Ayrıca en yüksek kesme hızında kaplamasız ucun krater bölgesinin sonunda mekanik yorulma çatlakları ortaya çıkmıştır. Şekil 4.34’de ise mekanik yorulma çatlaklarının daha düşük kesme hızı olan 160 m/dak’da ortaya çıktıkları ve 160 ve 220 m/dak kesme hızlarında uçların kırıldıkları görülmektedir. Kırılma şekillerine dikkat edilmesi durumunda tüm kesici takım ucunun kırılmadığı sadece ısıl çatlak ve mekanik çatlaklarla sınırlanmış bölgede kırılmanın gerçekleştiği fark edilmektedir.



Şekil 4.32. Kaplamalı(a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 35 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yan kenar aşınması grafikleri

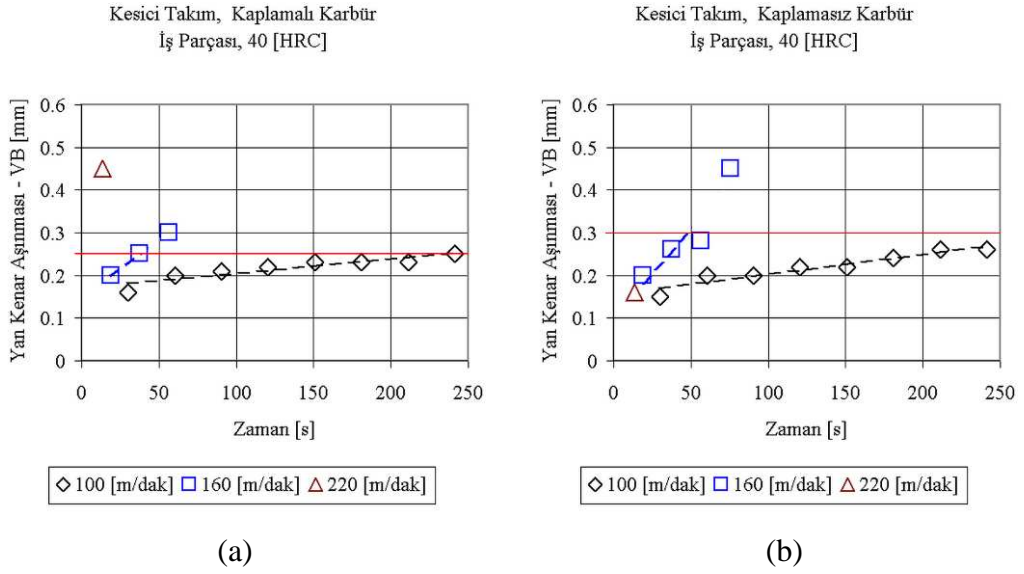


Şekil 4.33. 35 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri



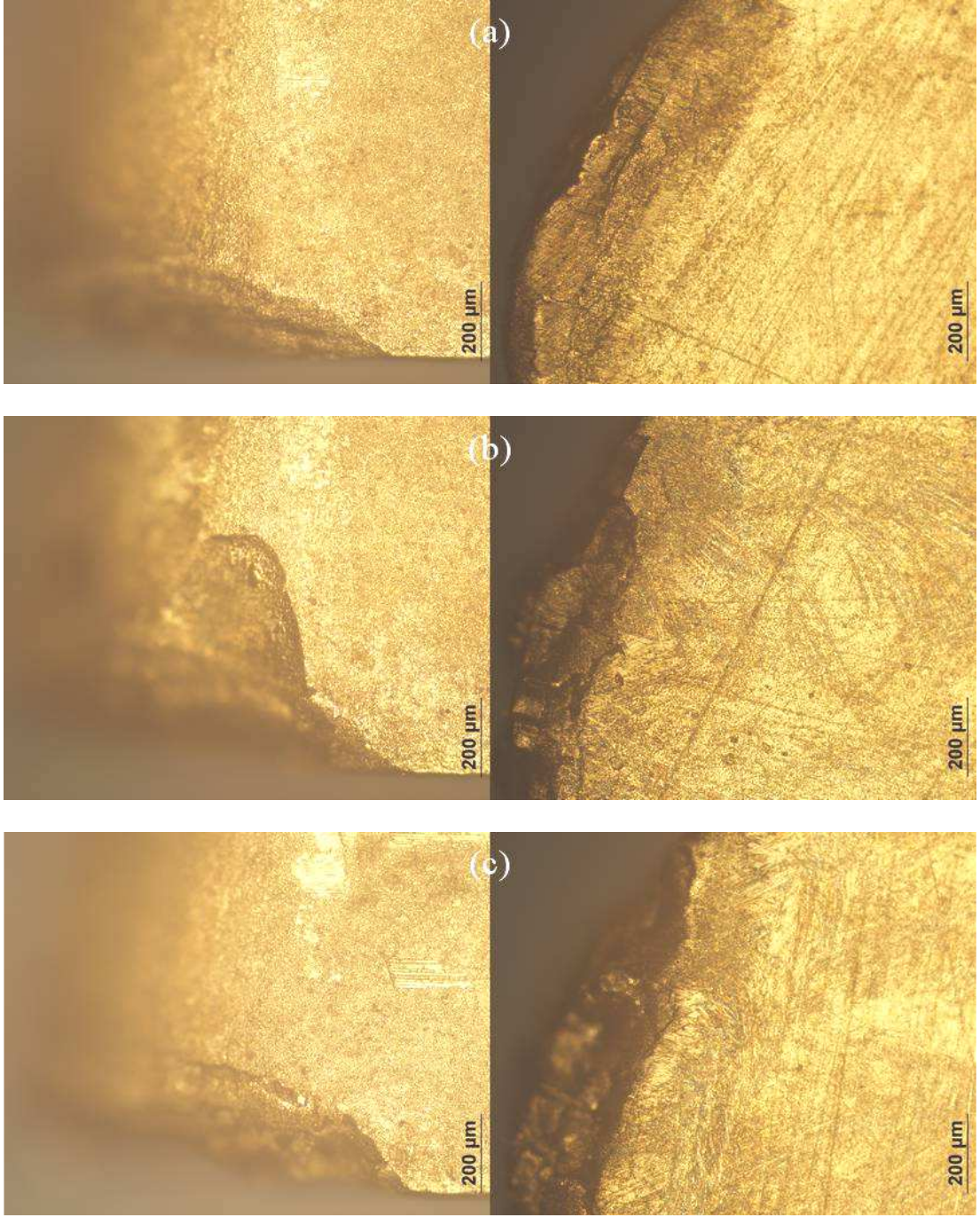
Şekil 4.34. 35 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri

Şekil 4.35’de 40HRC değerindeki iş parçasının 100, 160 ve 220 m/dak kesme hızlarında işlenmesi sonucu kaplamalı ve kaplamasız kesici takım uçlarının yan kenarlarında meydana gelen aşınmaların zamanla değişimleri görülmektedir. Şekil 4.35’de ayrıca yüksek kesme hızında her iki ucun da kırıldığı ve tek bir aşınma değerinin kayıt altına alınabildiği, 160 m/dak kesme hızında kaplamalı ve kaplamasız uçların aynı zaman aralığı boyunca talaş kaldırma işlemini gerçekleştirdikleri bilgisi de bulunmaktadır.

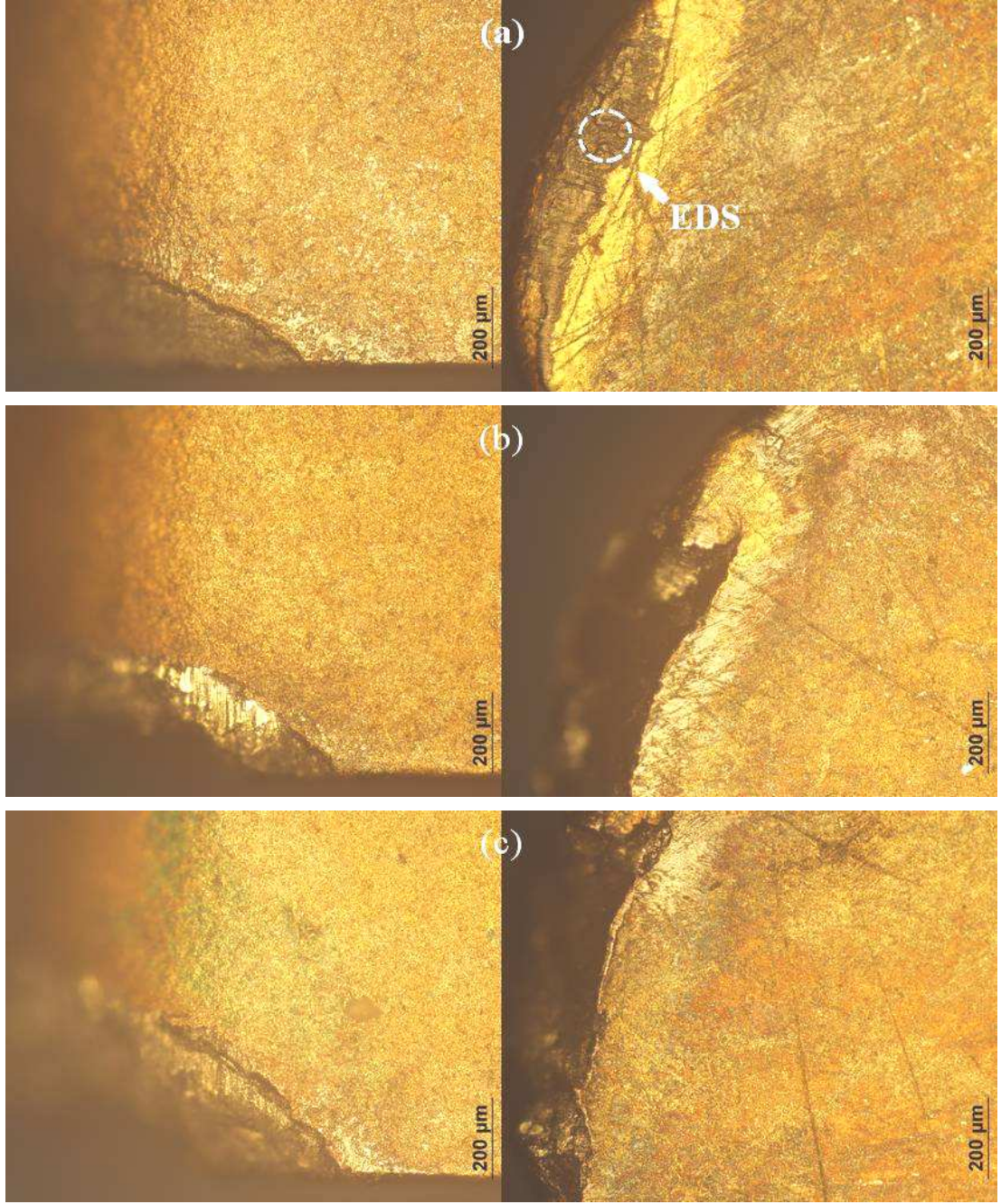


Şekil 4.35. Kaplamalı(a) ve kaplamasız (b) kesici uçların 40 HRC değerindeki iş parçasında işleme zamanına karşılık yanak aşınması grafikleri

Şekil 4.36’da 40 HRC değerindeki iş parçasını işleyen kaplamasız kesici uça düşük kesme hızında hem plastik deformasyon hem de kesici ucun uç kısmında kırılmaların gerçekleştiği, artan kesme hızı ile birlikte kırılan parçaların da büyüdüğü görülmektedir. Şekil 4.37’de ise kaplamalı ucun düşük kesme hızında yüksek yan kenar aşınması sergilediği ve kaplamasız uçtan farklı olarak 160 ve 220 m/dak kesme hızlarında gözlemlenen kırılmaların mekanik yorulma ve ısıl çatlaklar arasında sınır kaldığı görülmektedir. 40HRC değerindeki iş parçasını işleyen uçlardaki kırılmalara benzer kırılmaların olduğu çalışmada [57] da yüksek sertlikteki iş parçası işlenmiştir.



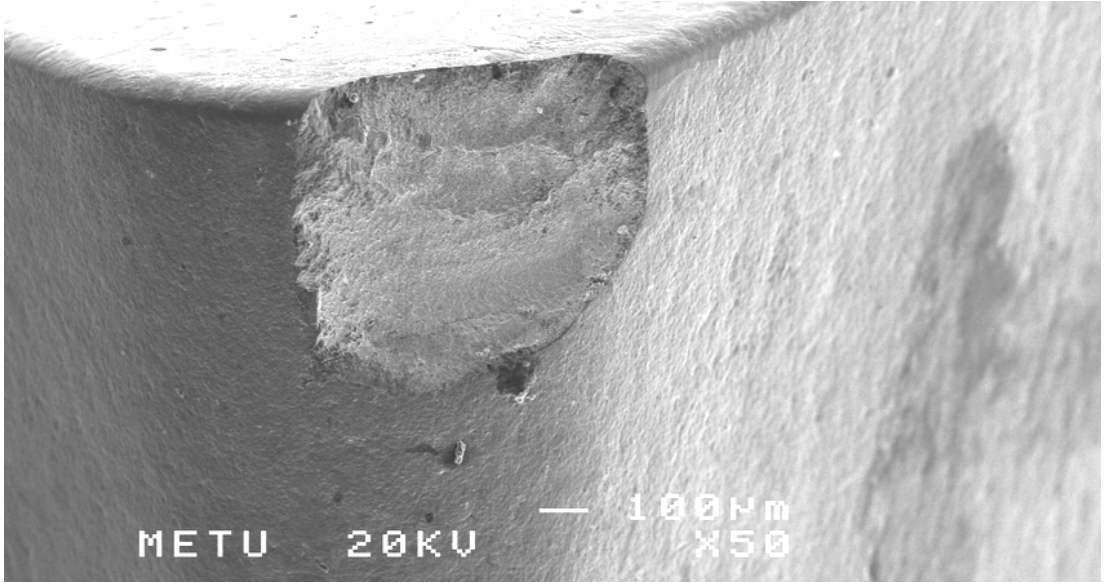
Şekil 4.36. 40 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenmesi sonucu kaplamasız kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri



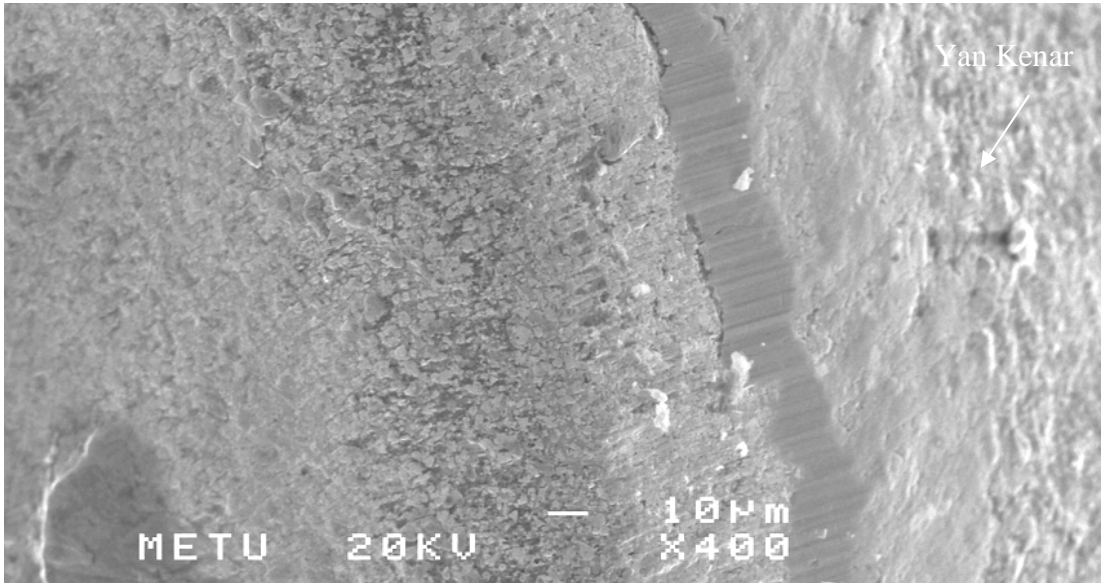
Şekil 4.37. 40 HRC değerindeki iş parçasının 100(a), 160(b), 220(c) m/dak kesme hızlarında işlenilmesi sonucu kaplamalı kesici takım ucunda oluşan aşınma resimleri

Şekil 4.38'de 100 m/dak kesme hızında 20 HRC sertlik değerindeki iş parçasını işlerken dört adet kırılma yüzeyi oluşturarak kırılan kaplamalı kesici ucun SEM resmi görülmektedir. Şekil 4.39 da ise aynı şartlarda talaş kaldıran kaplamasız uçta sadece yan kenar aşınması ve kesici uç kenarında bölgesel aşınmalar görülmektedir.





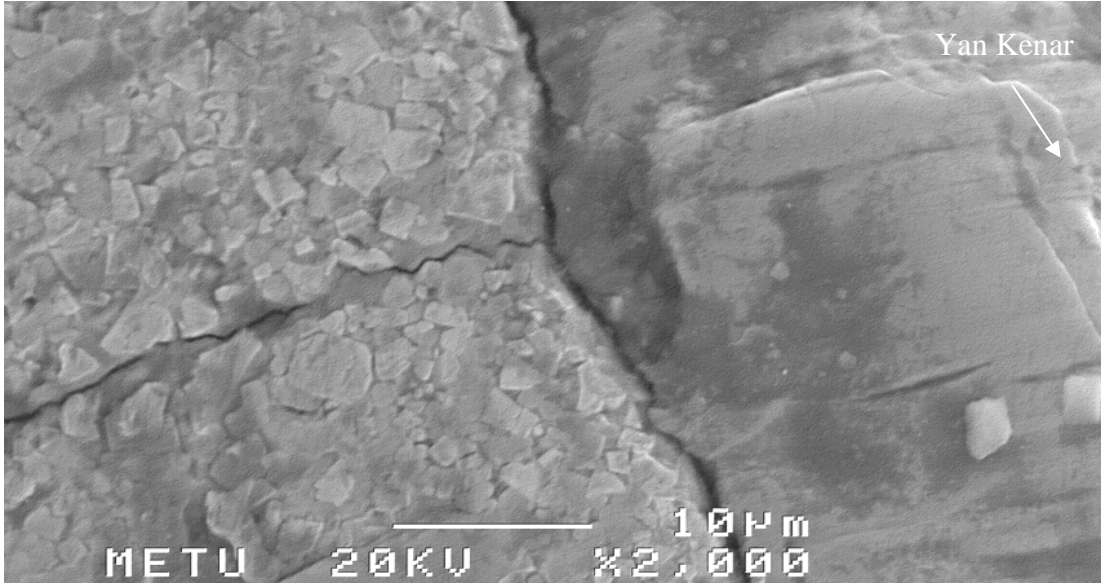
Şekil 4.38. 20 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen kırılmanın SEM görüntüsü



Şekil 4.39. 20 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü

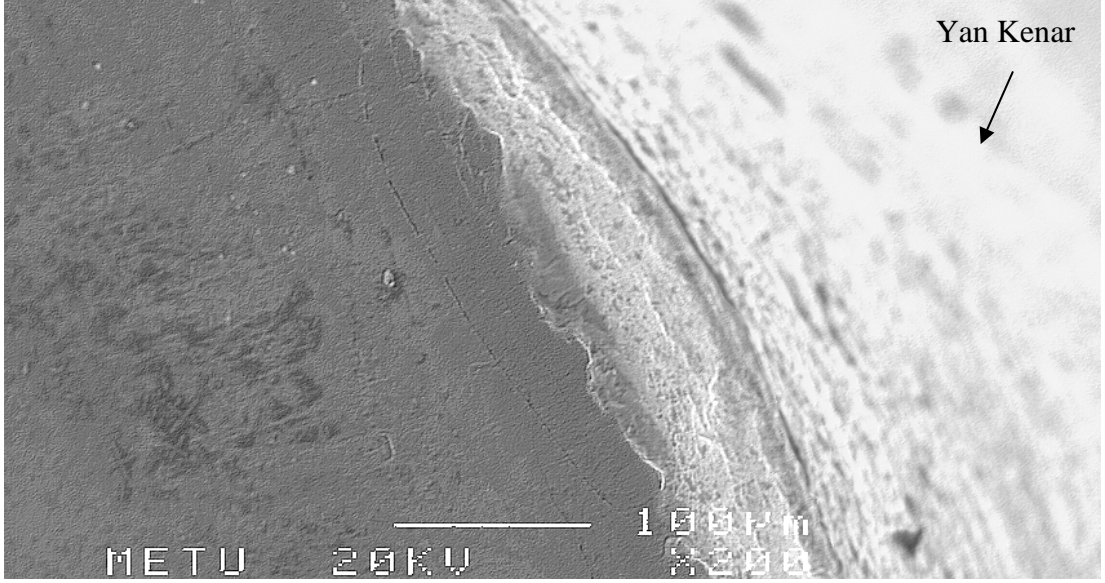
30 HRC değerindeki iş parçasının 220 m/dak kesme hızında kullanılan kesici uç kenarında oluşmuş mekanik yorulma çatlakları ve bu çatlaklara dik büyümüş olan ısıl çatlığa ait x2000 büyütme SEM görüntüsü Şekil 4.40'da görülmektedir. Ayrıca bu

ıslıl çatlağın Şekil 4.30'da görüldüğü gibi krater bölgesinde büyüyüp derinleŐtiđi görülmektedir. AŞınma mekanizmalarının incelendiği çalışmada [52] da ıslıl çatlağın hem bağlayıcı boyunca hem de karbür tane sınırları boyunca ilerlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı çalışmada [52] kesici uçların kırılması bu çatlağlara bađlanmıŐtır.



Şekil 4.40. 30 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü

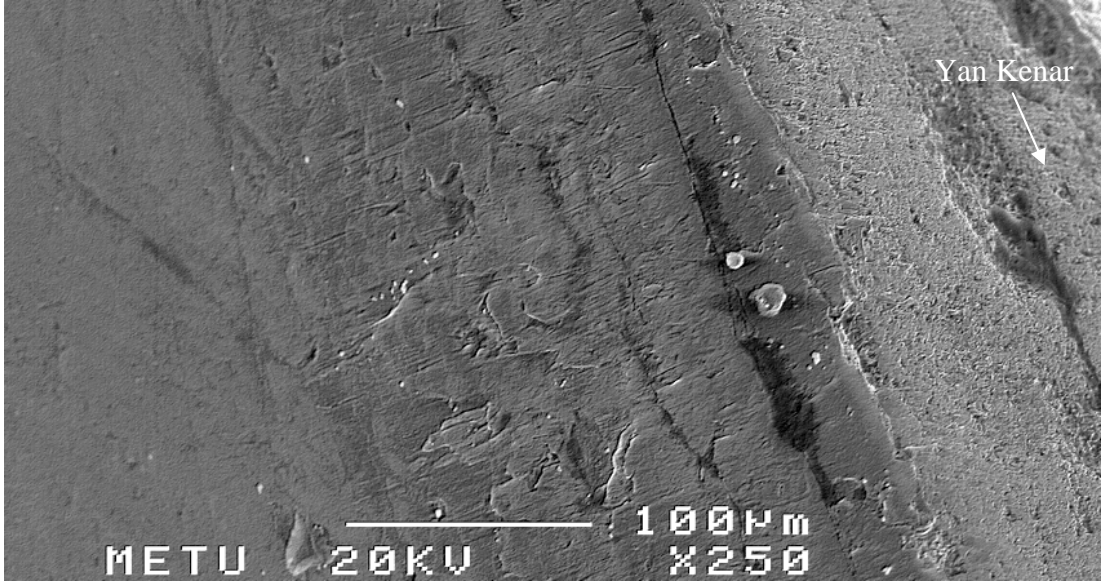
Kaplama malzemesinin kesici kenar boyunca kırıldığı ve kırılan kenarlardan krater bölgesi ile sınırlı mekanik çatlağlar oluştuğu Şekil 4.41'de görülmektedir. 30 HRC değerindeki iş parçasında elde edilen takım mrlarına benzer sonuçların elde edildiği çalışmada [57] oluşan ıslıl çatlağlar ve yayınım aşınması yüksek kesme sıcaklığıyla açıklanmıŐtır. Benzer işlem parametreleri ile benzer takım ömrü elde edilmesinin nedeni ise malzeme özellikleri farklı olduğu halde iş parçası sertliğinin yakın bir değerde olmasıdır.



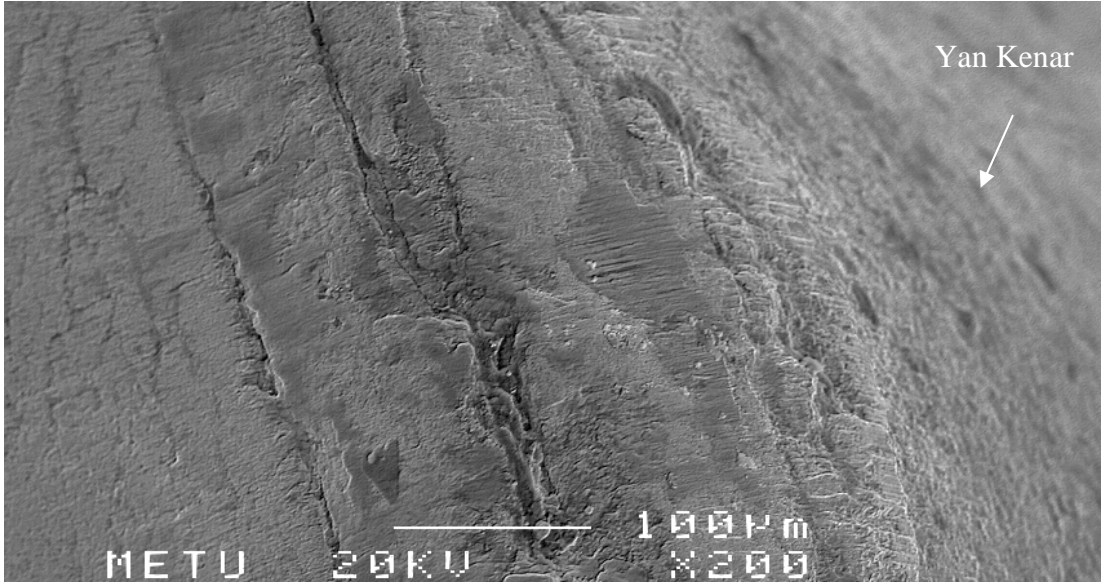
Şekil 4.41. 35 HRC iş parçasını 100 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü

Şekil 4.42’de Şekil 4.41’deki çatlaklara benzer mekanik yorulma çatlakları oluşmuştur. Ayrıca kesici kenardan uzaklaştıkça bu çatlakların ince bit tabaka halindeki iş parçası malzemesi ile örtüldüğü 250x büyütmedeki SEM resminde görülmektedir.

Şekil 4.43’de x200 büyütmede SEM resmi alınmış, 100 m/dak kesme hızında 40 HRC değerindeki iş parçasından talaş kaldırmak için kullanılan kesici ucun plastik deformasyon sergilediği ve Şekil 4.39, 4.41 ve 4.42’deki kesici kenarlardan farklı olarak geometrisinin bozulduğu görülmektedir. Ayrıca kesici kenara daha yakın olan çatlakların uçtan daha uzaktaki çatlaklara göre daha geniş ve derin oldukları görülmektedir.

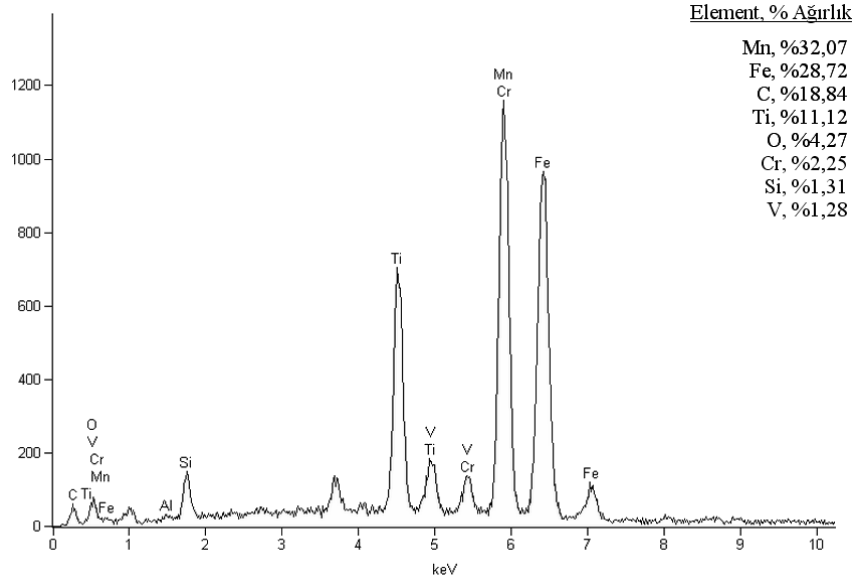


Şekil 4.42. 40 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamalı kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü



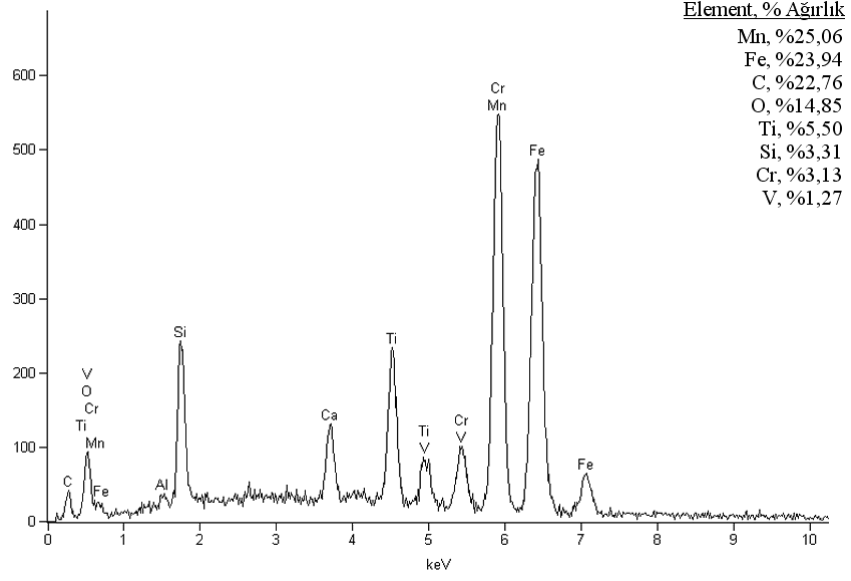
Şekil 4.43. 40 HRC iş parçasını 220 m/dak kesme hızında işleyen kaplamasız kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM görüntüsü

Şekil 4.37’de 100 m/dak kesme hızında kullanılan kaplamalı uçtaki sıvanmanın EDS sonuçları Şekil 4.44’de verilmiştir. Analiz sonuçları sıvanmış bölgedeki yapının karbür, oksit ve kaplama malzemesinden oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.44. Kaplamalı kesici takım yüzeyinin EDS analizi, iş parçası 40 HRC, kesme hızı 100 m/dak

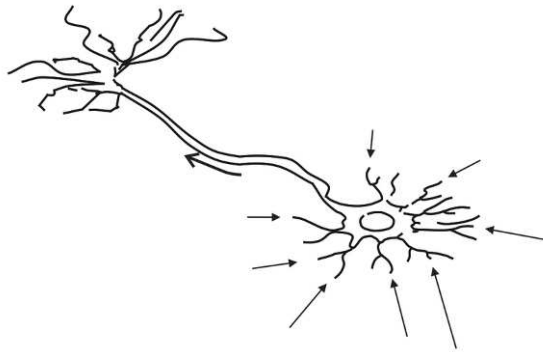
Şekil 4.45’de 160 m/dak kesme hızında 30 HRC değerindeki iş parçasından talaş kaldıran kesici ucun Şekil 4.31’de gösterilmiş sıvanma bölgesine ait EDS sonuçları verilmiştir. Şekil 4.44’deki verilere benzer biçimde sıvanmış bölgenin karbürlerden, oksitlerden ve kaplama malzemesinden oluştuğu anlaşılmaktadır.



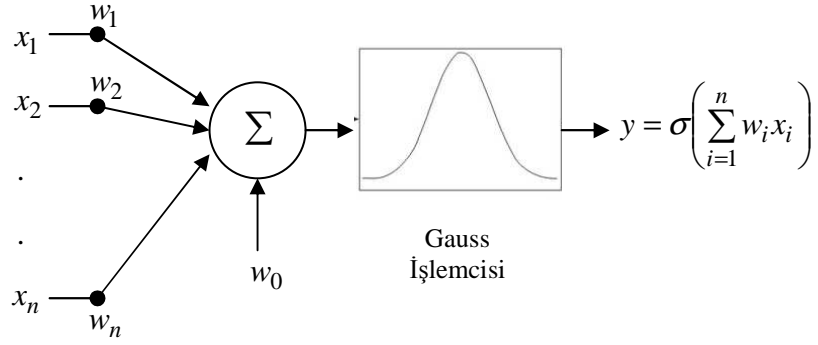
Şekil 4.45. Kaplamalı kesici takım yüzeyinin EDS analizi, iş parçası 30 HRC, kesme hızı 160 m/dak

## 5. YAPAY SİNİR AĞLARI

Beyin, içerisinde birbirleri ile bağlantılı olan ve bilgi işleyen sinir hücrelerinden oluşan bir sinir ağı bulundurmaktadır. Şekil 5.1’de verilerin akışının oklar ile gösterildiği, dentrit yapıda olan ve diğer sinir hücrelerinden gelen aksonlar ve bu aksonların sinir hücresine temas ettiği sinapslar bulunan tek bir sinir hücresi şematik olarak gösterilmiştir. Bir sinir hücresi soma, dentrit ve aksondan oluşmaktadır. Dentrit ile akson arasındaki bağlantı sinaps olarak isimlendirilmektedir. YSA, biyolojik sinir ağlarının modellenmesi çalışmasıdır [33]. YSA ile ilgili ilk çalışmalar yüzyıl öncesinde sinir biyolojisi çalışmalarına dayanmaktadır. Uzun yıllar boyunca biyologlar sinir sisteminin nasıl çalıştığı konusunda araştırmalar yapmış olmalarına rağmen, sinir sistemi ile ilgili çalışmaların büyük kısmı yirminci yüzyılın ortalarında sinirbilimdeki ilerlemelere kadar cevaplandırılmamıştır. İlk matematiksel model McCulloch ve Pitts tarafından 1943 yılında sunulmuş ve aynı yıl Landahl, McCulloch ve Pitts aritmetiksel ve mantıksal yöntemlerin bu modele uygulanabilirliğini gözlemlemişlerdir [67]. Şekil 5.2’de  $x_1$  ‘den  $x_n$  ‘e kadar olan verilerin giriş yaptığı bir ileri beslemeli yapay sinir hücresine ait şematik çizim verilmiştir.

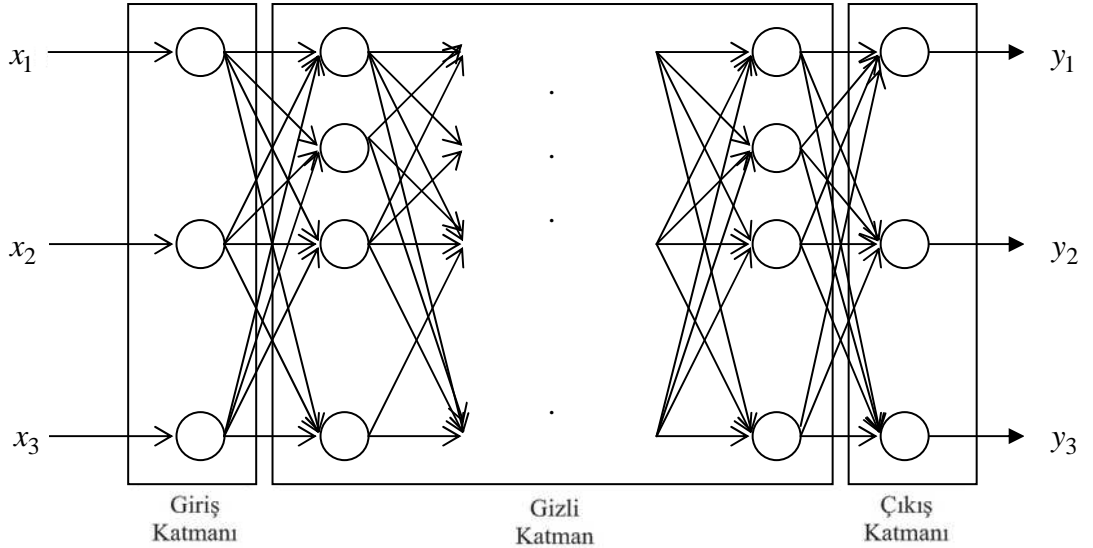


Şekil 5.1. Basit bir sinir hücresinin şematik gösterimi



Şekil 5.2. Gauss işlemcili ileri beslemeli sinir

YSA'larının sınıflandırılmasını tercih edilen eğitilme yöntemi ve yapıları belirlemektedir. İleri beslemeli sinir ağları, geri beslemeli sinir ağları ve özdüzenleyici sinir ağları yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çok katmanlı perseptron sinir ağları ve radyal tabanlı fonksiyon sinir ağları, en çok kullanım alanı bulmuş olan ileri beslemeli sinir ağını oluşturan iki grubu temsil etmektedirler [33]. Ardışık bağlantılara sahip, çok katmanlı sinir ağına ait şematik gösterim Şekil 5.3'de görülmektedir.



Şekil 5.3. Çok katmanlı sinir ağı şematik gösterimi



YSA'larındaki ilk katman giriş katmanı olarak isimlendirilirken, son katman çıkış katmanı, giriş ve çıkış katmanları arasında kalan katmanlar, buradaki bilginin dışarı çıkmamasından dolayı gizli katman olarak isimlendirilmektedirler. Çok katmanlı perseptron sinir ağlarında birden çok katman bulunduğu halde radyal tabanlı fonksiyon sinir ağlarında sadece tek bir gizli katman bulunmaktadır [33].

YSA'larının gelişimi incelendiğinde son 50 yıl içerisinde çalışmaların hız kazandığı görülmektedir. Hebb 1949 yılında günümüzde iyi bilinen, belirli bir sinaps üzerinden bir sinirin diğer bir siniri aktif hale getirmesini ve bu sayede sinirler arası iletişimin arttığı öğrenme kuralını tanıtmıştır. McCulloch ve Pitts'in modeli için Rosenblatt 1958 yılında perseptron adında bir öğrenme modeli geliştirmiştir. Rosenblatt ayrıca 1961 yılında çok katmanlı ağların eğitilmesi için geri yayılım şeması sunmuş fakat başarısız olunmuştur. Çok katmanlı ağlardaki ağırlıkların hesaplanması için Amari 1967'de bir matematiksel model sunmuş fakat bu model uzun yıllar önemsenmemiştir. Minsky ve Papert'in 1969 yılındaki basit perseptronların sınırlarının canlandırıldığı çalışmaları alandaki çalışmaların azalmasına neden olduğundan kabul gören bir çalışma olmamıştır. Son yirmi yılda değişik alanlarda uzmanlaşmış araştırmacıların çalışmaları ile YSA'larının uygulama alanlarındaki sınırlar genişletilmiştir [67].

YSA'larının gerçekleştirdiği uygulamalar denetleyicili ve denetleyicisiz öğrenme olarak iki kısma ayrılmaktadır. Denetleyicili öğrenmede, bir öğretici, ağın doğru işleyip işlemediğini, ya da ağı istenilen bir değere yönlendirilmesini, ya da ağın çıktılarının kabul edilebilirliğini kontrol edilmesini denetleyerek öğrenme işlemini yönetmektedir. Denetleyicisiz öğrenmede ise ağ, örnek verileri inceleyerek öğrenme işlemini kendisi gerçekleştirmektedir [67]. Denetleyicisiz öğrenmede, yorumların kişiden kişiye değişiklik gösterdiği gibi beklenen sonuçlardan çok farklı sonuçlar da elde edilebilmektedir.

Frezeleme diğerk geleneksel talaş kaldırma yöntemleri olan tornalama, delme vb. gibi çok bilinen bir yöntemdir. Her zaman ihtiyaç duyulan yüzey pürüzlülük değerleri deneyime dayanılarak ya da sınırlı olan deneysel veriler kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Bu ve benzeri sorunları aşmak için pek çok araştırmacı tornalama, frezeleme ve diğerk metal kesme işlemleri için YSA'larını kullanmışlardır [68]. YSA'larının talaşlı imalat uygulamalarında yer bulmasındaki en büyük etken sistemin modellenmesinde karşılaşılan zorluklar ve YSA'ları uygulamalarının çok etkili sonuçlar vermesi olmuştur. Kesici takım ucu yarıçapı, ilerleme, kesme hızı ve kesme işlemi sırasında oluşan sıcaklık ve titreşimler yüzey pürüzlülüğünü etkileyen temel etkenlerdir [68 - 70]. Talaş kaldırma işlemlerindeki diğerk en önemli maliyet belirleyici unsur olan takım aşınması da bu etkenlerden etkilenmektedir. Kesme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü veya talaş aşınması farklı kaynaklardan gelen veriler ile belirlenebilir. Tezgâh teknisyenleri kesme işlemi sırasında oluşabilecek sorunları geçmiş deneyimlerine dayanarak önceden ya da meydana geldiği anda fark edebilmektedirler. Fakat günümüzde bilgisayar sayısal kontrollü tezgâhların sayılarının artması ve bu tezgâhların çok yüksek hızlarda çalışmalarından dolayı teknisyen oluşacak aksaklıkların önlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla yoğun biçimde çevrimiçi ya da çevrimdışı kesici takım izleme uygulamaları geliştirilmektedir. Çevrim içi sistemler kesme işlemi sırasında teknisyene büyük avantaj sağlarken, çevrim dışı uygulamalar kesici stoklarının ve işlem değişkenlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çevrim içi sistemlerin en büyük dezavantajı tezgâha pahalı algılayıcılar takılmasını gerektirmesidir.

Giriş verileri olarak kesme kuvvetleri, ana mil akımı, ana mildeki titreşim ve ses basıncını kullanan sinir ağı tabanlı algılayıcı birleştirme modeli ile Ghosh ve ark. [71] kesici takım ucundaki aşınmayı belirleyebilmek için bir takım durumu izleme aracı geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu araç için algılayıcı olarak dinamometre yerine ucuz ve kolay takılabilir akım ve voltaj algılayıcıları kullanmışlar ve takımdaki aşınmayı 0,85 saniyede ve 0,25 µm 'nin altında bir hata ile hesaplayarak, aşınmayı önceden kestirmişlerdir.

Algılayıcılardan gelen verilerin birleştirilmesi yöntemi, işlem parametreleri ve algılanan sinyaller arasındaki doğrusal olmayan ilişkilerin söz konusu olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bilgisayar sayısal denetimli freze tezgâhında gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kesme kuvvetlerini belirlemek için bir adet kuvvetölçer ve ana mil hızını ölçebilmek için bir adet ivmeölçer kullanan Chen ve Jen [72] elde ettikleri verileri farklı veri birleştirme yöntemleri kullanarak işledikten sonra sinir ağlarının eğitiminde kullanmışlardır.

Farklı sinir ağı modellerinin kullanılması ile kestirim işlemi başarımlı arttırılabilmektedir. Talaş kaldırma işlemlerinde işleme ait verilerin etkileşim içinde olmaları, ağı eğitilmesinde bazı işlem değişkenlerinin ağ girdisi yerine çıktısı olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kesme kuvvetlerinin ağı eğitmek için kullanıldığı, geri yayımlı sinir ağı modeli yerine radyal tabanlı sinir ağı ile yaptıkları çalışmalarında El-Mounayri ve ark. [73] ağ girdileri olarak hız, ilerleme, yarıçapsal ve eksensel talaş kalınlığı değerlerini kullanarak işleme zamanını %36 oranında azaltmışlardır.

Ünüvar ve Sağlam [74] frezeleme işlemlerinde çok katmanlı sinir ağını, geri yayımlı öğrenme algoritmasını kullanarak eğitip devamında ileri besleme yöntemi ile çevrimiçi olarak test etmişlerdir. Makalelerindeki deneysel verilerin miktarını ve kullanılabilirliğini sorguladıkları sonuç bölümünde bu alandaki diğer makalelerden ayrılır biçimde aşınma ve yüzey pürüzlülük değerlerinde, %20 civarında hata tespit etmişlerdir.

Frezeleme işleminde çok farklı geometrilere sahip iş parçaları işlenilmektedir. Kesitin karmaşıklığı veya kesici yolunun iyi tayin edilememesi, talaş kaldırma sırasında talaş derinliğinin değişiklik göstermesine neden olacaktır. Kesme kuvvetlerini kestirebilmek için sinir ağı çıktı hata modeli kullanan Haber ve Alique [75] değişik geometrilerdeki iş parçalarında frezeleme ile gerçekleştirdikleri

çalışmalarında, ağ girdileri olarak sadece talaş derinliği ve ilerleme verilerini kullanmışlardır.

Pek çok talaş kaldırma işleminde yüzey pürüzlülük değeri kesici takım ömründen çok daha fazla önem arz etmektedir. Kesici uçtaki aşınma yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Kesici takım zamanında değiştirilmezse ya da aşırı aşınma sonucu hiç istenilmeyen bir durum olan kırılma gerçekleşirse yüzeyde geri dönüşü olmayan hasarlara sebebiyet verebilir. Lo [68] çalışmasında yüzey kalitesine en büyük etkinin ilerleme, daha sonra kesme hızı ve diğer değişkenlerle kıyaslandığında en az etkinin de talaş derinliğine ait olduğunu belirtmiştir.

Geri yayımlı sinir ağı modeli ile takım yan yüzey aşınmasını inceleyen Özel ve Nadgir [76], ağın eğitildiği aralığın dışında kestirim yapması durumunda hatalı sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Das ve ark. [77] TiN kaplamalı uç kullandıkları, 8-7-1 yapısındaki geri yayımlı sinir ağını çevrimiçi verileri kullanarak sınımlamışlardır. Lee ve Lee [78] çok katmanlı perseptron modeli kullandıkları çalışmalarında kesme kuvvetlerinin oranını kullanarak takım aşınmasını önceden kestirmişlerdir. Çok katmanlı ileri besleme sinir ağı kullanarak yaptıkları çalışmalarında Altıntaş ve Liu [79] ağın çevrimiçi kullanımı sırasında yapacağı kestirimlerin algılayıcı başarımı gibi donanımsal sınırlamalara bağımlı olduğunu belirtmişlerdir. Obikawa ve Shinozuka [80] öz-düzenleyicili yapay sinir ağı (ART2) ile kaplamalı kesici takım ucunda meydana gelen aşınmayı yüksek hızlarda incelediklerinde krater oluşumunun daha da derinleştiğini ve kesici takımın çok daha hızlı aşındığını gözlemlemişlerdir.

Chakraborty ve ark. [81] iki farklı YSA ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında geri yayımlı sinir ağının, radyal tabanlı fonksiyon ağından daha iyi kestirim yaptığını fakat ağın eğitiminin diğer modele göre yavaş olduğunu belirtmişlerdir. Erzurumlu ve Öktem [82], YSA'ları ile yanıt yüzey modelini kıyasladıkları çalışmalarında

YSA'larının daha az deneme hatası verdiğini fakat diğer yönteme göre çok daha fazla hesaplama gerektirdiğini belirtmişlerdir.

Dimla ve Snr [83] perseptron tipi sinir ağının tornalama işlemi sırasında kesici takım durumu sınıflandırılmasında kullanımını incelemiştir. Kesme şartları işlem parametreleri ile birleştirilmiş ve takım durumu tek ağ çıktısı ile tanımlanmıştır. Gizli katmandaki sinirlerin miktarının hassasiyeti fazla etkilemediğini, buna karşın sinirlerin miktarının arttırılmasının ağın eğitimi için gerekli olan süreyi uzattığını gözlemlenmiştir.

etinel ve ark. [84], AISI 1020 elik çubuklarının farklı soğutma hızları ile elde ettikleri mekanik ve mikro yapısal özelliklerini YSA'ları kullanarak kestirilebilirliğini araştırmışlardır.

Bu tez çalışması altında, normalleştirme ısıl işlemine tabi tutulmuş, ayrıca 3 farklı martensit hacim oranında çift fazlı yapı elde edilmiş mikro alaşımlı çeliğin kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlar ile üç farklı kesme hızında işlenebilirliğinin yinelenen sinir ağları (RNN) ile kestirimi gerçekleştirilmiştir.

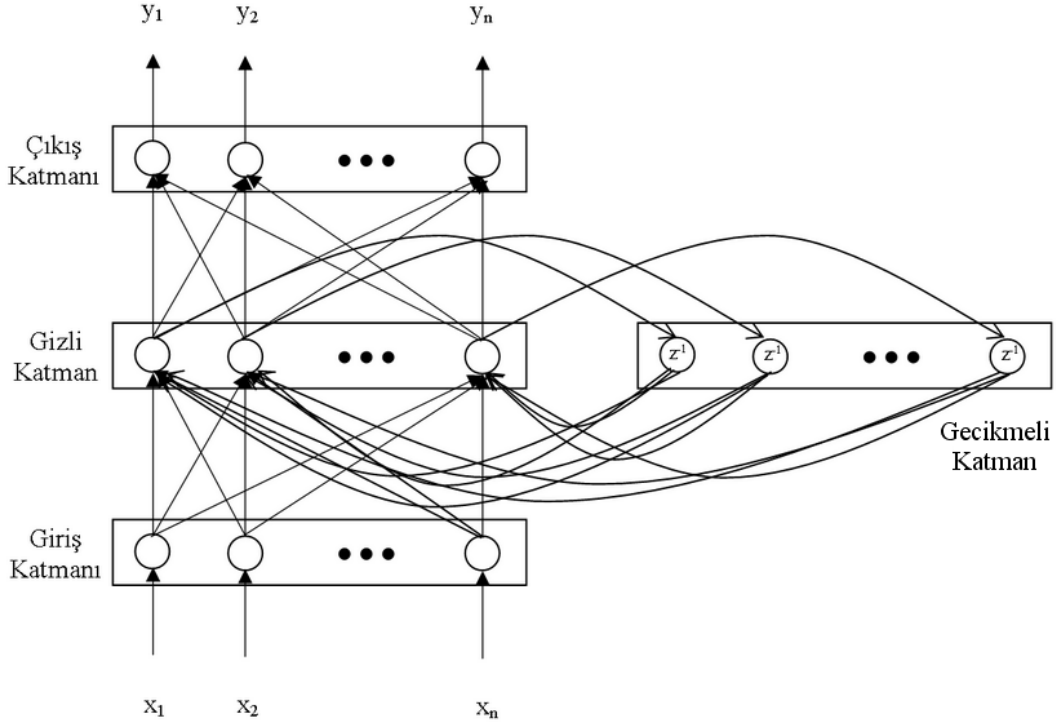
### **5.1. Yinelenen Sinir Ağları**

YSA'ları, büyük miktarlarda veri işleme amaçlı paralel hesaplama ve bilgi temsili yapabilen basit işleme elemanları (sinirler) ihtiva eden yoğun ve birbiri ile bağlantılı olan uyumlu sinirler ağı olarak tanımlanabilmektedir. Her bir bağlantıya ait ağırlığın uyarlanması ile YSA öğrenebilmekte, örüntü tanıyabilmekte ve geliştirdiği doğrusal olmayan örüntüler ile daha önce karşılaşmadığı örüntüler için sonuçları genelleştirebilmektedir.[85-87]

Bilinen bir yapı olan çok katmanlı yapı bağlantılarının yönüne bağlı olarak ileri beslemeli ve geri beslemeli olarak isimlendirilmektedir [85-87]. Çok katmanlı ileri beslemeli ağı durgun haritalama ile sınırlanmışken, anlık genişletilmiş uygulamaları olan RNN dinamik yüksek seviye doğrusal olmayan haritalamayı gerçekleştirebilmektedir [88, 89-91]. Anlık uzaysal örüntü tanımlama, kontrol, iyileştirme, tahmin, örüntü serilerinin genelleştirilmesi ve birleşik bellek uygulamalarını içeren pek çok sayıda ilgi çekici alanda RNN'ları kullanılmıştır [92-94].

Tamamen yinelenen ağlar, tamamen içsel bağlantılı serbest yapılar ve zamanla değişen giriş veya çıkış ile baş edebilen öğrenme algoritması kullanmaktadır. Öğrenme algoritmalarındaki değiştirmeler ile hesaplamalar azaltılmış olsa da, günümüzde karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmaları durumunda anlaşılabilirlik zorluklar içermektedir. Bu tür sorunların azaltılması amacıyla kısmi yinelenen ağlar ileri beslemeli biçiminde dikkatlice seçilmiş geri beslemeli bağlantılar ile kullanılmaktadırlar. Yinelenme öğrenmeyi aşırı karmaşıklaştırmadan, ağın geçmişten ipuçlarını hatırlamasına olanak vermektedir. Elman [91]'in kullandığı ağ bu tür bir yapı için örnek teşkil etmektedir. Yapılan kestirim çalışmalarında Elman'ın RNN'ı kullanılmıştır.

Elman'ın yinelenen ağı temelde ileri beslemeli ağ biçiminde, bir katmandaki tüm sinirlerin bir sonraki katmandakilerle bağlantılı olacağı şekilde oluşturulmaktadır. İleri beslemeli ağdan farklı olarak gizli katmanın özel bir durumu olan gecikmeli katman ihtiva etmektedir. Şekilde 5.4'de  $z^{-1}$  ile birim zaman gecikmeli adım biriminin gösterildiği Elman ağına ait ağ yapısı gösterilmektedir. Gecikmeli katmanındaki sinirler gizli sinirlerin çıktılarının bir kopyasını ihtiva etmektedir. Her bir gizli sinirin çıktısı gecikmeli katmanındaki özel bir sinire kopyalanmaktadır. Gecikmeli katmanındaki veriler bir adım geriden gizli katmandaki tüm sinirler için giriş olarak kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak Elman ağı arkadan gelen bir bellek ihtiva etmektedir.



Şekil 5.4. Elman yinelenen sinir ağının şematik gösterimi

Bilinen ileri beslemeli sinir ağlarında olduğu gibi, sinirler arasındaki tüm bağların güçleri bir ağırlıkla ifade edilmektedir. Başlangıçta, tüm ağırlıklar gelişmiş güzel seçilip, ağın eğitilmesi aşamasında ideal değerlerine getirilmektedirler. Gecikmeli katmanındaki sinirlerin değerleri birebir kopyalaması gerektiğinden, Elman ağında, gizli katmandan gecikmeli katmanındaki ağırlıkların hepsi, bir olarak belirlenmekte ve sabitlenmektedir. Ayrıca gecikmeli katman sinirlerinin başlangıç çıkış ağırlıkları ağdaki diğer sinirlerin çıkış aralığının yarısı miktarında olmaktadır. Elman ağı, ileri beslemeli sinir ağlarında olduğu gibi eğimli azalma geriye yayma ve iyileştirme yöntemleri ile eğitilebilmektedir [95]. Geri yayma ağı bazı uygulamalarda sorunlar yaşamaktadır. Algoritma, hata fonksiyonunun evrensel en azını eğimli azalma yerel en az da sıkışabileceği gibi belirsiz olarak kalacağı yerde bulmayı garanti etmemektedir. Buna ek olarak, uzun eğitim dönemlerine genellikle kabul edilebilir ağırlık çözümünde, eğimli azalma iyileştirmesinin doğasından kaynaklanan zorlukların varlığından dolayı ihtiyaç duyulmaktadır.[85-87] Bu nedenle, geriye yaymanın yakınsamasını iyileştirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. İkinci

dereceden iyileştirme yöntemleri (eşlenik eğim, yarı Newton, Levenberg Marquardt) sinir ağlarının eğitiminde son yıllarda kullanılmaktadırlar. Levenberg Marquardt algoritması Gauss Newton tekniğinin ve dik yokuş iniş algoritmasının en iyi özelliklerini birleştirmekte ve aynı zamanda sahip oldukları sınırlamaları da iptal etmektedir. Özellikle yavaş yakınsama sorunundan etkilenmemekte [96, 97] ve diğer eğitim algoritmaları ile kıyaslandığında iyi bir maliyet fonksiyonu sağlayabilmektedir.

## 5.2. Levenberg Marquardt Algoritması

Levenberg Marquardt algoritması en büyük komşuluk fikrine dayanan sonlu kareler tahmin algoritması olarak tanımlanmaktadır.  $E(w)$ 'nın  $m$  'den yapılmış hedef hata fonksiyonu olması durumunda, bağımsız hata terimleri  $e_i^2(w)$  denklem 5.1'deki biçimi almaktadır.

$$E(w) = \sum_{i=1}^m e_i^2(w) = \|f(w)\|^2 \quad (5.1)$$

Burada  $e_i^2(w) = (y_{di} - y_i)^2$  ve  $y_{di}$ ,  $i$  sinirinin arzulan çıkışını,  $y_i$  ise aynı sinirin asıl çıkışını temsil etmektedir.

$f(\ )$  fonksiyonunun ve  $J$  Jacobininin  $w$  noktasında bilindiği kabul edilmektedir. Levenberg Marquardt algoritması, ağırlık vektörü  $w$  'yı  $E(w)$  en az olacak biçimde hesaplayabilmektedir. Levenberg Marquardt algoritması kullanılarak yeni ağırlık vektörü  $w_{k+1}$ , bir önceki ağırlık vektörü  $w_k$  'dan denklem 5.2'deki gibi elde edilebilmektedir.



$$w_{k+1} = w_k + \delta w_k \quad (5.2)$$

Denklem 5.2'deki  $\delta w_k$  denklem 5.3'teki biçimde ifade edilmektedir.

$$\delta w_k = -(J_k^T f(w_k))(J_k^T J_k + \lambda I)^{-1} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3'teki,  $J_k$   $f$  'nin  $w_k$  'da türetilmiş Jacobinini,  $\lambda$  Marquardt parametresini,  $I$  ise özdeşlik matrisini temsil etmektedir [96, 97]. Levenberg Marquardt algoritması aşağıdaki adımlardaki gibi özetlenebilir.

Adım 1:  $E(w_k)$ 'yü hesapla

Adım 2:  $\lambda$  için küçük bir değer ile başla ( $\lambda = 0.01$ )

Adım 3: Denklem 5.3'ü  $\delta w_k$  için çözü ve  $E(w_k + \delta w_k)$ 'yü hesapla

Adım 4: Eğer  $E(w_k + \delta w_k) \geq E(w_k)$  ise,

$\lambda$  'yü 10'un katsayısı ile arttır ve 3. adıma git

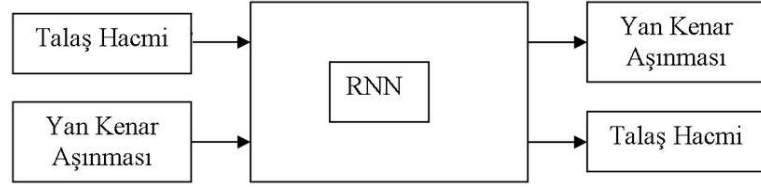
Adım 5: Eğer  $E(w_k + \delta w_k) < E(w_k)$  ise,

$\lambda$  'yü 10'un katsayısı ile azalt,  $w_k : w_k \leftarrow w_k + \delta w_k$  'yü güncelle ve 3. adıma git

### 5.3. RNN ile İşlenebilirlik Kestirimi

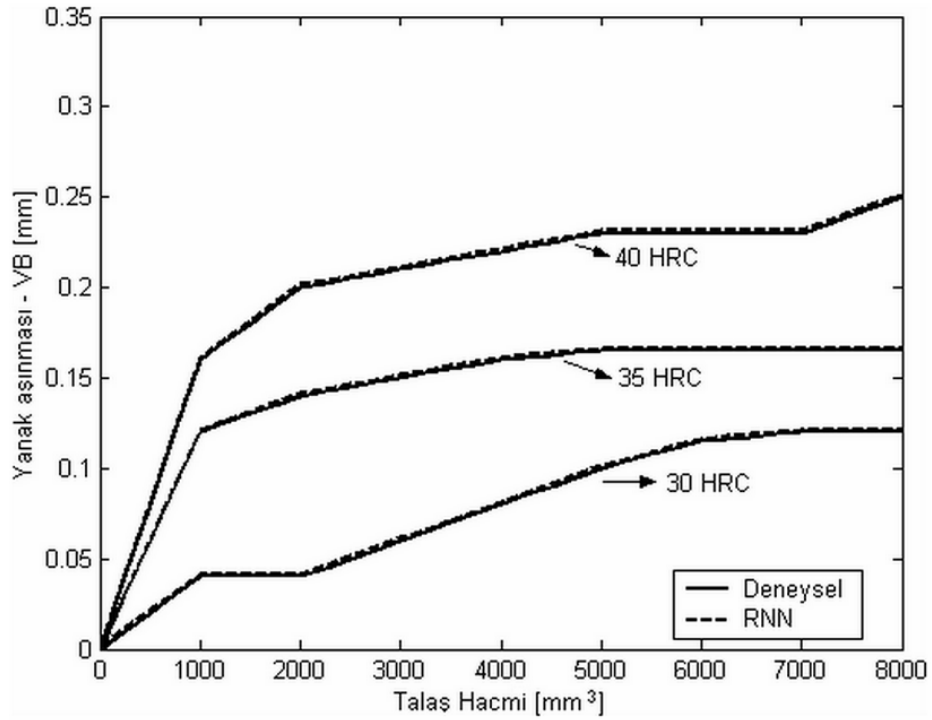
Kullanılan RNN Mathworks firmasına ait Matlab yazılımının sinir ağları takım setinde hazırlanmıştır. Giriş ve çıkışları ile RNN'ı şematik olarak Şekil 5.5'de görülmektedir. Talaş hacmi ve yan kenar aşınması değerleri RNN'larının girişleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca Yan kenar aşınması ve talaş hacminin kestirimlerinin

elde edilebilmesi için hazırlanan RNN'larının gizli katmanında 20 yinelenen nöron kullanılmıştır.



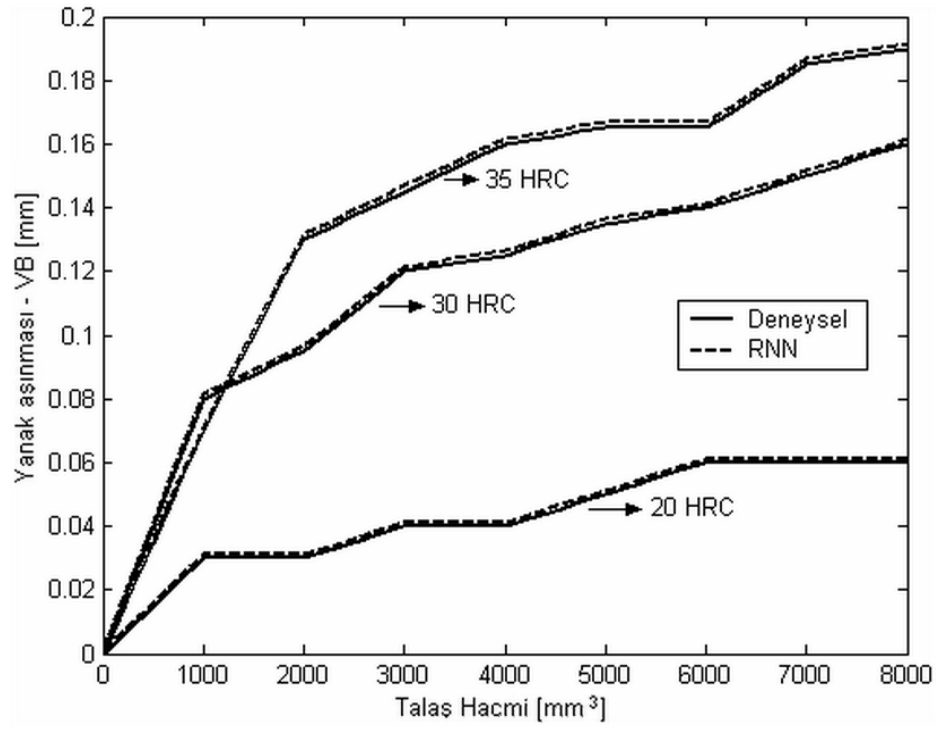
Şekil 5.5. RNN'nin giriş ve çıkışlar ile şematik gösterimi

İşlenebilirliğin kestiriminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla artan kesme hızlarında kaplamalı ve kaplamasız uçlardaki aşınmalar incelenmiştir. Düşük kesme hızında kaldırılan talaş hacmine karşılık kaplamalı kesici uçtaki yan kenar aşınması grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. 20 HRC sertliğinde iş parçasından talaş kaldırılması sırasında kesici uç kırıldığı için Şekil 5.6'da diğer sertlik değerlerindeki iş parçalarının işlenilmesi sırasında oluşan aşınmalar bulunmaktadır.

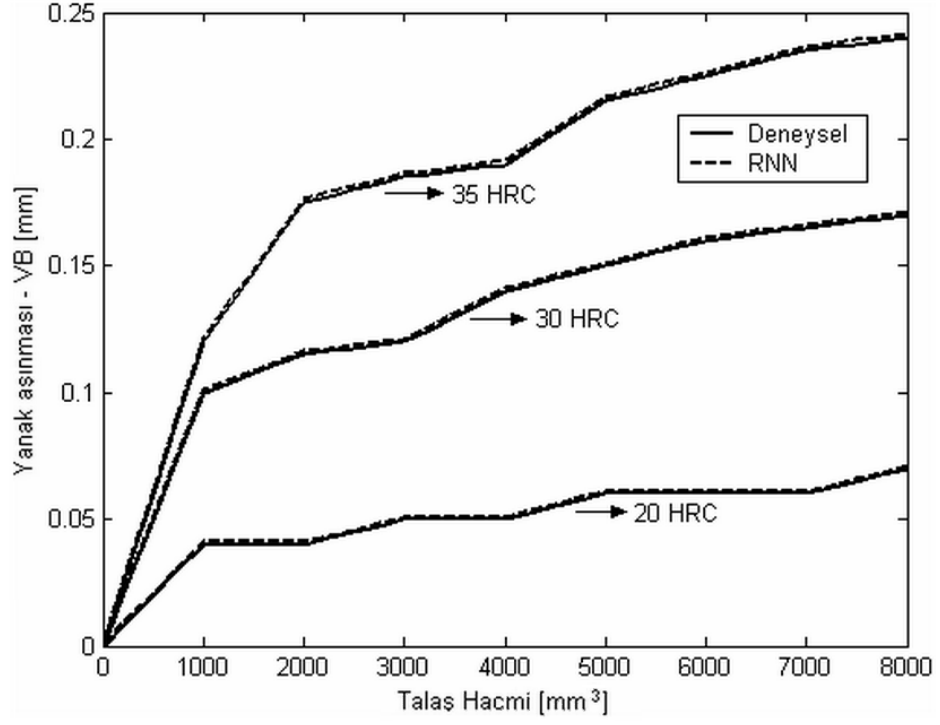


Şekil 5.6. RNN ile  $V_c=100$  m/dak için kaplamalı kesici uç aşınmasının kestirimi

Kesme hızı 160 m/dak olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kaplamasız uçlara ait yan kenar aşınması grafiği ve RNN ile kestirimi Şekil 5.7’de, Kesme hızı 220 m/dak olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kaplamasız uçlara ait yan kenar aşınması grafiği ve RNN ile kestirimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Yüksek sertlikteki (40 HRC) çift fazlı çeliğin işlenilmesi sırasında kaplamasız uç kırıldığı için Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilen kestirim uygulamalarında kullanılmamıştır.



Şekil 5.7. RNN ile  $V_c=160$  m/dak için kaplamasız kesici uç aşınmasının kestirimi



Şekil 5.8. RNN ile  $V_c=220$  m/dak için kaplamasız kesici uç aşınmasının kestirimi

Normalleştirilmiş ve düşük, orta, yüksek MHO'larında hazırlanan mikro alaşımlı çelik numunelerin, kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlar kullanılarak 100, 160, 220 m/dak kesme hızlarındaki yanak aşınmalarının kaldırılan talaş hacmi ile değişiminin RNN ile kestirimi başarılı olmuştur. Gerçekleştirilen YSA uygulaması ile gelecekte yapılacak çalışmaların sınırlı sayıda tutulması gerçekleştirilebilecek ve maliyetlerin azaltılması sağlanacaktır.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve tavsiye edilen öneriler aşağıda birlikte verilmiştir.

- ◇ MHO belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen yöntem, literatürdeki çalışmalarla örtüşen sonuçlar vermiş fakat östenitleme öncesi pörlit yapıya ait küresel  $Fe_3C$  tanecikleri sonuçları etkilemiştir. Ara-kritik bölgeye gelmeden önce  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerine çıkarak küresel  $Fe_3C$  parçacıklarının  $\gamma_{demir}$  'e dönüşmesi gerçekleştirilerek, bu tanelerden kaynaklanan hata ortadan kaldırılabılır.
- ◇ Mekanik özellikleri araştırılan mikro alaşımlı çeliğin, düşük, orta ve yüksek MHO'larında sahip olduğu akma ve çekme dayanımı değerleri HB değerleri ile birlikte elde edilmiş, en düşük akma dayanımını düşük martensit hacim oranı vermiştir. Mikro alaşımlı çeliğin en düşük akma dayanımı ve en yüksek çekme dayanımını vereceği su verme sıcaklığı tespit edilerek en ideal çift fazlı yapısı bulunabilir. Su verme öncesi tane iyileştirmesi gerçekleştirilerek mikro alaşımlı çeliğin menevişleme yapılmadan tokluğu arttırılabilir. Ayrıca su verme sonrasında farklı ısıl çevrimler gerçekleştirilerek, yapı içerisindeki kalıntı östenit miktarı azaltılabilir ve süneklik, sertlik değeri düşürülmeden arttırılabilir.
- ◇ Düşük, orta ve yüksek MHO'larının elde edildiği sıcaklıklardan alından su verme deneyi gerçekleştirilmiş, çift fazlı yapının sürekli olduğu derinliğin 3 mm ve sertleşebilir derinliğin tüm MHO'ları için sabit kaldığı tespit edilmiştir.
- ◇ Uçtan su verme deneylerinde 3 mm derinlikten sonra çift fazlı yapının üç fazlı yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Farklı soğuma hızları kullanılarak çift fazlı yapı dışında yapılar elde edilerek mikro alaşımlı çeliğe yeni kullanım alanları kazandırılabilir.

- ◇ İşlenebilirlik çalışmalarında farklı sertlikteki iş parçalarının TiN kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici uçlar ile işlenebilirlikleri araştırılmış ve kaplamasız uçlarda en uzun takım ömrü, 100 m/dak kesme hızında, 20 HRC değerindeki normalleştirilmiş ve 30 HRC değerindeki düşük MHO'lu iş parçasının işlenmesinde elde edilmiştir. Talaş derinliği ve ilerleme değerleri de deneysel çalışmalara dâhil edilerek araştırma derinleştirilebilir.
- ◇ TiN kaplamalı kesici uçlar, 220 m/dak kesme hızında 20 HRC değerindeki normalleştirilmiş çeliğin işlenmesi hariç kırılmış ya da çok kısa takım ömrü sergilemişlerdir. Kaplamalı uçlarda en uzun takım ömrü 220 m/dak kesme hızında 20 HRC değerindeki normalleştirilmiş çeliğin işlenmesi sırasında elde edilmiştir. Kaplamalı kesici uçların yüksek kesme hızlarında deneyleri tekrar edilerek, düşük kesme hızlarında BUE oluşumuna bağlı kırılmaları engellenebilir ve kaplamaya ait aşınma direnci özellikleri daha net gözlemlenebilir.
- ◇ Takım aşınmaları incelenmiş ve takım ömrünü kısaltan aşınmaların, sırası ile yan kenar aşınması, mekanik yorulma çatlakları ve kesme hızındaki artış ile mekanik yorulma çatlaklarına dik büyüyen ısı çatlaklara ait olduğu tespit edilmiştir. Yüksek tokluklu kesici takım malzemesi kullanılarak ve ideal kesme hızları tespit edilerek takım aşınmaları azaltılabilir.
- ◇ İşlenebilirlik uygulaması sırasında elde edilen veriler, yüksek martensit hacim oranındaki sert çeliklerin işlenmesi için karbür uçların yetersiz kaldığını göstermiştir. Yüksek sertlikteki bu çeliklerin işlenmesi için PCBN veya PCD kesici uçlar kullanılabilir.
- ◇ Yüzey pürüzlülüğü incelemesi sırasında iş parçası sertliğinin ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Yapı içerisindeki sert parçacık miktarındaki artış ile, özellikle kaplamalı uçlarla gerçekleştirilen 20 HRC ile 30 HRC değerindeki iş parçalarına ait deney sonuçları kıyaslandığında, sıvanma ve BUE oluşumunun azaldığı ve buna bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

- ◇ Kesme hızlarının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri de özellikle sert iş parçalarının işlenmesinde artış göstermiştir. İlerleme değeri düşürülerek yüksek kesme hızlarında kaliteli yüzey elde edilebilir.
- ◇ En düşük yüzey pürüzlülük değerleri her iki uç içinde 35 HRC değerindeki iş parçasının 100 m/dak kesme hızında ve 160 m/dak kesme hızında 20 HRC iş parçasının kaplamasız uç ile işlenmesi sırasında elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli iki parametre olan kesici uç yarıçapı ve ilerleme değerleri değiştirilerek en az pürüzlü yüzeyin elde edileceği durum tespit edilebilir.
- ◇ Kesici uç kaplaması olarak sadece TiN kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde iş parçası ile kaplama malzemesinin tepkimeye girerek yayılım aşınmasına neden olduğu, sıvanma bölgesinden alınan EDS sonuçları ile tespit edilmiştir. Fakat bazı sıvanmaların mekanik yorulma çatlaklarını kapatarak kesici ucu koruyucu etki gösterdiği de tespit edilmişlerdir. TiAlN , TiCN vb. kaplamalarla da deneyler yapılarak, kaplama türünün takım ömrüne ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılabilir.
- ◇ Takım ömrü çalışmaları sabit 8000 mm<sup>3</sup> talaş hacmi için gerçekleştirildiğinden dolayı sadece kısa ömür veren takımlar tespit edilebilmiştir. Araştırmalar 30 HRC değerindeki düşük MHO'na sahip çift fazlı çelik ve 20 HRC değerindeki normalleştirilmiş çelik için tekrar edilebilir ve çift fazlı yapının takım ömrüne etkisi tam olarak ortaya konulabilir.
- ◇ İşlenebilirliğin kestirimi için Elman'ın RNN'ları kullanılmış ve artan talaş hacmi ile değişen yan kenar aşınması değerlerinin YSA'ları ile kestirilebilir olduğu tespit edilmiştir. Farklı YSA modelleri denenerek ve YSA eğitiminde kullanılan veri çeşitliliği arttırılarak, en uzun takım ömrü veren iş parçası ve kesici takım için araştırmalar derinleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Asakura, S., Koshino, N., Iwasaki, N., Automotive Application of High-strength Cold-rolled Steel, Transactions ISIJ, 21, 767–771, 1981
- [2] Senuma, T., Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets, ISIJ International, 41, 6, 520–532, 2001
- [3] Blickwede, D. J., the New Look of Sheet Steels, Transactions ISIJ, 24, 687–701, 1984
- [4] Al-Abbasi, F. M., Nemes, J. A., Characterizing DP-steels using micromechanical modeling of cells, Computational Materials Science 39 402–415, 2007
- [5] Steiner, R., ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, United States of America, 2005
- [6] Lis, J., Lis, A. K., Kolan, C., Processing and properties of C–Mn steel with dual-phase microstructure, Journal of Materials Processing Technology 162–163 350–354, 2005
- [7] Sato, S., Yamazaki, K., Ujihara, S., Application of High Strength Steel Sheets to the Autobody, Transactions ISIJ, 21, 772–777, 1981
- [8] Klueh, R. L., Hashimoto, N., Buck, R. F., Sokolov, M. A., A Potential New Ferritic/Martensitic Steel for Fusion Applications, Journal of Nuclear Materials 283–287 697–701, 2000
- [9] Sakuma, Y., Matsumura, O., Akisu, O., Influence of C Content and annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 400°C Transformed Steel Containing Retained Austenite, ISIJ International, 31, 11, 1348–1353, 1991
- [10] Furukawa, T., Tanino, M., Morikawa, H., Endo, M., Effects of Composition and Processing Factors on the Mechanical Properties of As-hot-rolled Dual-phase Steels, Transactions ISIJ, 24, 113–121, 1984
- [11] Sun, S., Pugh, M., Manganese Partitioning in Dual-Phase Steel During Annealing, Materials Science and Engineering A276, 167–174, 2000
- [12] Koo, J. Y., Thomas, G., Thermal Cycling Treatments and Microstructures for Improved Properties of Fe-0.12% C-0.5% Mn Steels, Materials Science and Engineering 24, 187–198, 1976
- [13] Hashimoto, S., Ikeda, S., Sugimoto, K., Miyake, S., Effects of Nb and Mo Addition to 0.2%C–1.5%Si–1.5%Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets, ISIJ International, 44, 9, 1590–1598, 2004
- [14] Totten, G. E., Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies, Taylor & Francis Group, LLC., United States of America, 2006
- [15] Vander Voort, G. F., Metallography Principles and Practice, ASM International, United States of America, 1999
- [16] Endo, S., Nagae, M., Ferrite-Martensite Dual Phase Anti-Erosion Steel, ISIJ International, 36, 1, 95–100, 1996
- [17] Marder, A. R., Benschoter, A. O., Quantitative Microanalysis of Dual-Phase Steels, Metallography, 15, 73–85, 1982



- [18] Kaufmann, E. N., *Characterization of Materials*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2003
- [19] Zhang, J., Jiang, Y., Lüders Bands Propagation of 1045 Steel Under Multiaxial Stress State, *International Journal of Plasticity*, 21, 651–670, 2005
- [20] Karabulut, H., Gündüz, S., Effect of Vanadium Content on Dynamic Strain Ageing in Micro Alloyed Medium Carbon Steel, *Materials and Design*, 25, 521–527, 2004
- [21] Tomota, Y., Kuroki, K., Mori, T., Tamura, I., Tensile Deformation of Two Ductile Phase Alloys: Flow Curves of  $\alpha$ - $\gamma$  Fe-Cr-Ni Alloys, *Materials Science and Engineering*, 24, 85–94, 1976
- [22] Sarwar, M., Manzoor, T., Ahmad, E., Hussain, N., The Role of Connectivity of Martensite on the Tensile Properties of a Low Alloy Steel, *Materials and Design*, 28, 1928–1933, 2007
- [23] Pramanik, A., Zhang, L. C., Arsecularatne, J. A., Deformation Mechanisms of MMCs Under Indentation, *Composites Science and Technology*, 68, 1304–1312, 2008
- [24] Thelning, K.- E., *Steel and its Heat Treatment*, Bofors Handbook, Butterworths, England, 1978
- [25] Yoshinaga, N., Ushioda, K., Itami, A., Akisue, O.,  $\alpha$ + $\gamma$  and  $\gamma$  Phases Annealing In Ultra Low-carbon Sheet Steels, *ISIJ International*, 34, 1, 33–12, 1994
- [26] *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*, ASM International, United States of America, 1991
- [27] Furukawa, T., Morikawa, H., Endo, M., Takechi, H., Koyama, K., Akisue, O., Yamada, T., Process Factors for Cold-rolled Dual-phase Sheet Steels, *Transactions ISIJ*, 21, 812–819, 1981
- [28] Dzupon, M., Parilak, L., Kollarova, M., Sinaova, I., Dual Phase Ferrite-Martensitic Steel Micro-Alloyed With V-Nb, *Metabk*, 46, 1, 15-20, 2007
- [29] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y., *Metal Machining Theory and Applications*, John Wiley and Sons, London, 2000
- [30] Cheng, K., *Machining Dynamics, Fundamentals, Applications and Practices*, Springer-Verlag London Limited, United Kingdom, 2009
- [31] Astakhov, V. P., *Tribology of Metal Cutting*, Elsevier, Great Britain, 2006
- [32] Shao, H., Wang, H. L., Zhao X. M., A Cutting Power Model for Tool Wear Monitoring in Milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1503–1509, 2004
- [33] Davim, J. P., *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag London Limited, United Kingdom, 2008
- [34] Yiğit, R., Çelik, E., Fındık, F., Köksal, S., Effect of Cutting Speed on the Performance of Coated and Uncoated Cutting Tools in Turning Nodular Cast Iron, *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 80–88, 2008
- [35] Smith, G. T., *Cutting Tool Technology Industrial Handbook*, Springer-Verlag London Limited, United Kingdom, 2008

- [36] Richetti, A., Machado, A. R., Da Silva, M. B., Ezugwu, E. O., Bonney, J., Influence of the Number of Inserts for Tool Life Evaluation in Face Milling of Steels, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 695–700, 2004
- [37] Ning, Y., Rahman, M., Wong, Y. S., Investigation of Chip Formation in High Speed End Milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 360–367, 2001
- [38] Davim, J. P., Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Investigations into the Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness in Turning of Free Machining Steel by ANN Models, *Journal of Materials Processing Technology*, 205, 16–23, 2008
- [39] Çolak, O., Kurbanoğlu, C., Kayacan, M. C., Milling Surface Roughness Prediction Using Evolutionary Programming Methods, *Materials and Design*, 28, 657–666, 2007
- [40] Özel, T., Karpas, Y., Figueira, L., Davim, J. P., Modelling of Surface Finish and Tool Flank Wear in Turning of AISI D2 Steel with Ceramic Wiper Inserts, *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 192–198, 2007
- [41] Benardos, P. G., Vosniakos G. C., Predicting Surface Roughness in Machining: A Review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 833–844, 2003
- [42] Ferreira, J. R., Coppini, N. L., Miranda, G. W. A., Machining Optimisation in Carbon Fibre Reinforced Composite Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 135–140, 1999
- [43] Rocha, C. A., Sales, W. F., Barcellos, C. S., Abrao, A. M., Evaluation of the Wear Mechanisms and Surface Parameters when Machining Internal Combustion Engine Valve Seats Using PCBN Tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 397–406, 2004
- [44] Prickett, P. W., Johns, C., An Overview of Approaches to End Milling Tool Monitoring, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 105–122, 1999
- [45] Salak, A., Selecka, M., Danninger, H., *Machinability of Powder Metallurgy Steels*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge UK, 2005
- [46] Shao, H., Liu, L., Qu, H. L., Machinability Study on 3%Co–12%Cr Stainless Steel in Milling, *Wear*, 263, 736–744, 2007
- [47] Andrewes, C. J. E., Feng, H.-Y., Lau, W. M., Machining of an Aluminum/SiC Composite Using Diamond Inserts, *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 25–29, 2000
- [48] Lin, T.-R., Experimental Study of Burr Formation and Tool Chipping in the Face Milling of Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 12–20, 2000
- [49] Nouari, M., Molinari, A., Experimental Verification of a Diffusion Tool Wear Model Using a 42CrMo4 Steel with an Uncoated Cemented Tungsten Carbide at Various Cutting Speeds, *Wear*, 259, 1151–1159, 2005
- [50] Alberti, M., Ciurana, J., Casadesus, M., A System for Optimising Cutting Parameters when Planning Milling Operations in High-Speed Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 25–35, 2005

- [51] Chakraborty, P., Asfour, S., Cho, S., Onar, A., Lynn, M., Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 205, 190–202, 2008
- [52] Jawaid, A., Sharif, S., Köksal, S., Evaluation of Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools when Face Milling Titanium Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 99, 266–274, 2000
- [53] Arrazola, P.-J., Garay, A., Iriarte, L.-M., Armendia, M., Marya, S., Le Maitre, F., Machinability of Titanium Alloys (Ti6Al4V and Ti555.3), *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2223–2230, 2009
- [54] Stanford, M., Lister, P. M., Kibble, K. A., Investigation into the Effect of Cutting Environment on Tool Life During the Milling of a BS970-080A15 (En32b) Low Carbon Steel, *Wear*, 262, 1496–1503, 2007
- [55] Ghani, J. A., Choudhury, I. A., Masjuki, H. H., Performance of P10 TiN Coated Carbide Tools When End Milling AISI H13 Tool Steel at High Cutting Speed, *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, 1062–1066, 2004
- [56] Mana, A., Bhattacharayya, B., A Study on Machinability of Al/SiC-MMC, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 711–716, 2003
- [57] Ebrahimi, A., Moshksar, M. M., Evaluation of Machinability in Turning of Micro alloyed and Quenched-Tempered Steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 910–921, 2009
- [58] Lima, J. G., Avila, R. F., Abrao, A. M., Faustino, M., Davim, J. P., Hard Turning: AISI 4340 High Strength Low Alloy Steel and AISI D2 Cold Work Tool Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 388–395, 2005
- [59] Özçatalbaş, Y., Investigation of the Machinability Behaviour of Al4C3 Reinforced Al-Based Composite Produced by Mechanical Alloying Technique, *Composites Science and Technology*, 63, 53–61, 2003
- [60] Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J. R. S., Tan, D. C. G., Machinability Study of Carbon Fiber Reinforced Composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 89–90, 292–297, 1999
- [61] Grzesik, W., Rech, J., Zak, K., Claudin, C., Machining Performance of Pearlitic–Ferritic Nodular Cast Iron with Coated Carbide and Silicon Nitride Ceramic Tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 125–133, 2009
- [62] “National Institutes of Health USA, imageJ, “ erişim adresi: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, erişim tarihi: Ağustos 2008
- [63] Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, ASTM E562-02, ASTM International, USA, 2004
- [64] Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM A255-02, ASTM International, USA, 2004
- [65] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric], ASTM E8M-04, ASTM International, USA, 2004
- [66] Mitsubishi Carbide, MTAS100 Electronic Catalog ver E3.0, 2003

- [67] Mehrotra, K., Mohan, C. K., Ranka, S., Elements of Artificial Neural Networks, MIT Press, USA, 1996
- [68] Lo, S-P., An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling, Journal of Materials Processing Technology, 142, 665–675, 2003
- [69] Tsai, Y-H., Chen, J. C., Lou, S-J., An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 583–605, 1999
- [70] Krar, S. F., Gill, A. R., Smid, P., Technology of Machine Tools 6th Ed., McGraw Hill, USA, 2005
- [71] Ghosh, N., Ravi, Y. B., Patra, A., Mukhopadhyay, S., Paul, S., Mohanty, A. R., Chattopadhyay, A. B., Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion, Mechanical Systems and Signal Processing, 21, 466–479, 2007
- [72] Chen, S-L., Jen, Y.W., Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 381–400, 2000
- [73] El-Mounayri, H., Kishawy, H., Briceno, J., Optimization of CNC ball end milling: a neural network-based model, Journal of Materials Processing Technology, 166, 50–62, 2005
- [74] Sağlam, H., Ünüvar, A., Tool condition monitoring in milling based on cutting forces by a neural network ,International Journal of Production Research, 41, 7, 1519–1532, 2003
- [75] Haber, R. E., Alique, A., Intelligent process supervision for predicting tool wear in machining processes, Mechatronics, 13, 825–849, 2003
- [76] Özer, T., Nadgir, A., Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, 287–297, 2002
- [77] Das, S., Bandyopadhyay, P. P., Chattopadhyay, A. B., Neural-Network Based Tool Wear Monitoring in Turning Medium Carbon Steel Using a Coated Carbide Tool, Journal of Materials Processing Technology, 63, 187–192, 1997
- [78] Lee, J. H., Lee, S. J., One-step-ahead prediction of Flank wear using cutting force, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1747–1760, 1999
- [79] Liu, Q., Altıntaş, Y., On-line monitoring of Flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1945–1959, 1999
- [80] Obikawa, T., Shinozuka, J., Monitoring of flank wear of coated tools in high speed machining with a neural network ART2, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44, 1311–1318, 2004
- [81] Panda, S. S., Chakraborty, D., Pal, S. K., Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network, Applied Soft Computing, 8, 858–871, 2008

- [82] Erzurumlu, T., Öktem, H., Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts, *Materials and Design*, 28, 459–465, 2007
- [83] Dimla, D. E. ,Snr, Application of perceptron neural networks to tool-state classification in a metal-turning operation, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12, 471–477, 1999
- [84] Çetinel, H., Özyiğit, H.A., Özsoyeller, L., Artificial neural networks modeling of mechanical property and microstructure evolution in the Tempcore process, *Computers and Structures*, 80, 213–218, 2002
- [85] Haykin, S., *Neural networks: A comprehensive foundation*, Macmillan, New York, 1994.
- [86] Basheer, I. A., Hajmeer, M., *Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application*, *Journal of Microbiological Methods*, 43 (1), 3–31, 2000.
- [87] Chaudhuri, B. B., Bhattacharya, U., Efficient Training and Improved Performance of Multilayer Perceptron in Pattern Classification, *Neurocomputing*, 34, 11–27, 2000.
- [88] Saad, E. W., Prokhorov, D. V., Wunsch II, D. C., Comparative study of stock trend prediction using time delay, recurrent and probabilistic neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9 (6), 1456–1470, 1998.
- [89] Gupta, L., McAvoy, M., Phegley, J., Classification of Temporal Sequences via Prediction Using the Simple Recurrent Neural Network, *Pattern Recognition*, 33 (10), 1759–1770, 2000.
- [90] Gupta, L., McAvoy, M., Investigating the Prediction Capabilities of the Simple Recurrent Neural Network on Real Temporal Sequences, *Pattern Recognition*, 33 (12), 2075–2081, 2000.
- [91] Elman, J. L., Finding structure in time, *Cognitive Science*, 14(2), 179–211, 1990.
- [92] Petrosian, A., Prokhorov, D., Homan, R., Dasheiff, R., Wunsch II, D., Recurrent neural network based prediction of epileptic seizures in intra- and extracranial EEG, *Neurocomputing*, 30, 201–218, 2000.
- [93] Petrosian, A. A., Prokhorov, D. V., Lajara-Nanson, W., Schiffer, R. B., Recurrent neural network-based approach for early recognition of Alzheimer’s disease in EEG, *Clinical Neurophysiology*, 112 (8), 1378–1387, 2001.
- [94] Shieh, J-S., Chou, C-F., Huang, S-J., Kao, M-C., Intracranial pressure model in intensive care unit using a simple recurrent neural network through time, *Neurocomputing*, 57, 239–256, 2004.
- [95] Pineda, F. J., Generalization of Back-Propagation to Recurrent Neural Networks, *Physical Review Letters*, 59 (19), 2229–2232, 1987.
- [96] Hagan, M. T., Menhaj, M. B., Training feedforward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5 (6), 989–993, 1994.
- [97] Battiti, R., First- and second-order methods for learning: between steepest descent and Newton’s method, *Neural Computation*, 4, 141–166, 1992.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : TOPÇU, Okan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 24.01.1980 Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 292 40 00  
Faks : 0 (312) 292 40 91  
e-posta : [otopcu@etu.edu.tr](mailto:otopcu@etu.edu.tr)

### **Eğitim**

#### **Derece**

Lisans

#### **Eğitim Birimi**

Kırıkkale Üniversitesi  
Makine Mühendisliği

#### **Mezuniyet Tarihi**

2005

### **İş Deneyimi**

#### **Yıl**

2004-2005

2006-2007

2008-2009

#### **Yer**

Rona Şirketler Grubu

TSK, K.K.T.C.

TOBB E.T.Ü.

#### **Görev**

Mühendis Yrd.

Topçu Asteğmen

Araştırma Görevlisi

### **Yabancı Dil**

İngilizce

Japonca

### **Yayınlar**

O. TOPÇU, M. ÜBEYLİ, On the microstructural and mechanical characterizations of a low carbon and micro-alloyed steel, Materials & Design, Cilt: 30, No: 8, Sf: 3274-3278, 2009

O. TOPÇU, M. ÜBEYLİ, T. DEMİR, On the Hardenability of an Intercritically Treated Microalloyed Steel, Instrumentation Science & Technology, (Baskıda), 2009

### **Uluslararası Konferans Bildirileri**

O. TOPÇU, M. ÜBEYLİ, Effect of intercritical heat treatment on mechanical properties of a microalloyed steel, Fifth International Materials Symposium MATERIAIS 2009, 5-8 Nisan 2009, Lizbon Portekiz