



**R260 VE R350HT RAYLARIN ULTRASONİK
NANOKRİSTAL YÜZEY MODİFİKASYONU VE
TİTREŞİM DESTEKLİ BİLYALI DÖVME İLE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa ALTUN

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**R260 VE R350HT RAYLARIN ULTRASONİK NANOKRİSTAL YÜZEY
MODİFİKASYONU VE TİTREŞİM DESTEKLİ BİLYALI DÖVME İLE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mustafa ALTUN

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2024**

Mustafa ALTUN tarafından hazırlanan “R260 ve R350HT RAYLARIN ULTRASONİK NANOKRİSTAL YÜZEY MODİFİKASYONU VE TİTREŞİM DESTEKLİ BİLYALI DÖVME İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Programı Seçin olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Okan ÜNAL

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/11/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğretim Üyesi A. Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğretim Üyesi İbrahim KARADEMİR (BARÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa ALTUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

R260 VE R350HT RAYLARIN ULTRASONİK NANOKRİSTAL YÜZEY MODİFİKASYONU VE TİTREŞİM DESTEKLİ BİLYALI DÖVME İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mustafa ALTUN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç.Dr. Okan ÜNAL

Haziran 2024, 73 sayfa

Bu araştırmada, R260 ve R350HT kalite raylara mekanik yüzey işlemleri uygulanmıştır. Mekanik yüzey işlemleri olarak ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu işlemi (UNYM) ve titreşim destekli bilyalı dövme işlemi (TDBD) uygulanmıştır. İki farklı kalitedeki ray numunelere 4 saat, 10 saat TDBD işlemi ve UNYM işlemi uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonrasında numunelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini incelemek için aşınma, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve XRD testleri yapılmıştır. Aşınma testleri oda sıcaklığında kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır. Ayrıca yüzey işlemleri tamamlandıktan sonra etkilerini görmek için SEM görüntülerine bakılmıştır. Uygulanan yüzey işlemlerinin, malzeme yüzeyinde tane boyutunda değişiklikler meydana getirdiği, mikroyapıda aşırı plastik deformasyondan dolayı önemli değişimlere sebep olduğu ve malzeme yüzeyinde sertlik artışına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Aşınma, titreşim destekli bilyalı dövme, UNYM

Bilim Kodu : 91416



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF R260 AND R350HT RAILS USING ULTRASONIC NANOCRYSTAL SURFACE MODIFICATION AND VIBRATION ASSISTED BALL FORGING

Mustafa ALTUN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Doç. Dr. Okan ÜNAL

June 2024, 73 pages

In this study, mechanical surface treatments were applied to R260 and R350HT grade rails. The mechanical surface treatments included Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) and Vibration-assisted shot peening process (VA-SPP). Two different quality rail samples was applied to 4 hour VA-SPP, 10 hour VA-SPP, and UNSM. After the surface treatments, wear, surface roughness, microhardness, and XRD tests were conducted to examine the tribological and mechanical properties. Wear tests were carried out under dry friction conditions at room temperature.. In addition, SEM invesitgations were completed to see the effects of the surface treatments after they were completed. The applied surface treatments have been observed to cause changes in grain size on the material surface, significant alterations in microstructure due to excessive plastic deformation, and an increase in surface hardness of the material.

Key Word : Wear, vibration-assisted shot peening process, UNSM
Science Code :91416



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında büyük bilgi ve deneyimleriyle bana yardımcı olan, çalışmanın planlamasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini eksik etmeyen, yön gösteren, bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında yönlendiren sayın hocam Doç.Dr. Okan ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında desteklerini, çalışmalarını esirgemeyen Doç. Dr. M. Emre TURAN, Arş. Gör. Yusuf EFE'ye ve Arş. Gör. Turan DAŞ'a da teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Sevgili annem ve makine ustası babam Atalay ALTUN'a, eşim Beyza ve ailesine bu süreçte yanımda olup desteklerini esirgemedikleri için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
LİTERATÜR	2
BÖLÜM 3	7
RAY	7
3.1. RAY'IN TARİHİ	7
3.2. RAY GEOMETRİSİ VE ÖZELLİKLERİ	8
3.2.1. Oluklu Raylar.....	11
3.2.2. Çift Mantarlı Raylar.....	11
3.2.3. Vinyol Raylar.....	11
3.3. RAY BÖLÜMLERİ	12
3.4. KULLANILAN RAYLAR.....	12
3.5. RAYLARA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	15
3.6. RAYLARIN MİKROYAPI VE MEKANİK TESTLERİ	18
3.6.1. Çelik Kalitesiyle Rayların Mekanik Özelliklerinin İlişkisi	18
3.6.1.1. Aşınma Dayanımı	18

	<u>Sayfa</u>
3.6.1.2. Yorulma Dayanımı.....	19
3.6.1.3. Parçalanma Dayanımı	19
3.6.2. Numune Hazırlama	20
3.6.2.1. Numune Alma (Kesme)	21
3.6.2.2. Kalıba Alma	22
3.6.2.3. Zımparalama ve Parlatma	24
3.6.2.4. Dağlama	27
3.6.3. Mikroyapı İncelemesi	27
3.6.3.1. Optik Mikroskop Analizi	27
3.6.3.2. Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope- SEM) Analizi	28
3.6.4. Sertlik Deneyi	29
3.6.4.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	30
3.6.4.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi.....	31
3.6.4.3. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi.....	31
BÖLÜM 4	33
YÜZEY İŞLEMLERİ	33
4.1. YÜZEY İŞLEM TEKNİKLERİ.....	33
4.1.1. Yüzey Kaplamalar	33
4.1.1. Yüzey Modifikasyon İşlemleri	35
4.2. MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİ.....	36
4.2.1. Bilyalı Dövme.....	36
4.2.1.1. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri	38
4.2.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu	40
4.2.3. Ultrasonik Bilyalı Dövme İşlemi.....	41
4.2.4. Titreşim Destekli Yüzey Aşırı Plastik Deformasyon (TD-YAPD)	42
BÖLÜM 5	44
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
5.1. MALZEME SEÇİMİ.....	44
5.2. NUMUNE HAZIRLAMA	44

Sayfa

5.2.1. Mekanik Yüzey İşlemlerinin Uygulanması	45
5.2.1.1. Titreşim Destekli Bilyalı Dövme (Tdbd) İşlemi Parametrelerin Saptanması	45
5.2.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (Unym) Parametrelerin Belirlenmesi	47
5.3. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	47
5.4. X-IŞINI KIRINIM (XRD) ANALİZİ	48
5.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ	49
5.6. AŞINMA TESTİ	49
5.7. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ	50
 BÖLÜM 6	 52
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	52
6.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	52
6.2. MİKROSERTLİK SONUÇLARI	58
6.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ TESTİ	60
6.4. XRD SONUÇLARI	60
6.5. AŞINMA SONUÇLARI	62
 BÖLÜM 7	 68
SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	70
 ÖZGEÇMİŞ	 73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Sertlik ve aşınma oranı arasındaki ilişki [3].	3
Şekil 2.2.	a) Titreşim destekli SP ve b) UNSM süreçlerinin şematik görünüşleri [9].	6
Şekil 3.1.	(a) Oluklu Ray, (b) Vinyol Ray, (c) Çift Mantarlı Ray [16].	9
Şekil 3.2.	Ray profilinin geometrik gösterimi [16].	9
Şekil 3.3.	Ray bölümleri [15].	12
Şekil 3.4.	Tane sınırları içerisinde R350HT, R350LHT, R260 ve R260Mn kalite raylarda müsadde edilen ferrit miktarı için (a)500X’de referans mikroyapı fotoğrafı ve (b) diyagramı [3].	13
Şekil 3.5.	S-Q ve Q-T yöntemini gösteren sıcaklık soğuma zamanı grafiği [19].	17
Şekil 3.6.	Rayların sertlikleri ve çekme gerilmesi arasındaki ilişki [19].	18
Şekil 3.7.	Materyalda ki yönlenmeye bağlı çeşitli bakış açılarına bağlı başka görüntülerin ortaya çıkması [21].	20
Şekil 3.8.	Metalografik numune ayırma aygıtı [21].	22
Şekil 3.9.	Bakalite alma cihazı ve bakalite alınmış numuneler [21].	23
Şekil 3.10.	Soğuk kalıplama işlemi [21].	23
Şekil 3.11.	Testereyle ayırma işlemi sonrasında numune üstünde oluşan bozulma yüzeyi ve bu yüzeyin zımparalama esnasında eksilen zımpara yoğunluğu ile nasıl giderildiğini göstermektedir (A, B, C bozulmuş alanlar, D ise orijinal içyapıyı temsil eder) [21].	24
Şekil 3.12.	Cu numunesi ile doğru yapılmış zımparalama işlemi [21].	25
Şekil 3.13.	Mekanik parlatma diskleri [21].	26
Şekil 3.14.	Solda ki görsel doğru biçimde zımpara işlemi yapılmadan cilalatılmış gri dökme demir parçasını belirtmektedir. Sağdaki görsel özdeş parçanın doğru biçimde zımpara işlemi sonrası, dağlanmamış biçimini belirtmektedir [21].	26
Şekil 3.15.	Brinell sertlik deneyi [24].	30
Şekil 3.16.	Vickers sertlik deneyi [24].	31
Şekil 3.17.	Rockwell sertlik değerinin ikame edilmesi [24].	32
Şekil 4.1.	Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi [27].	36
Şekil 4.2.	Bilyalı dövme sonrası değişen özellikler [27].	37
Şekil 4.3.	Bilyalı dövme işlemi sonrası tane yapısı [25].	38
Şekil 4.4.	Farklı uygulamalarda kullanılan bilya tipleri [22].	39

Şekil 4.5.	Bilyaların büyüklüklerine göre sınıflandırılması [22]	40
Şekil 4.6.	Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyon işleminin şeması [28].....	41
Şekil 4.7.	TD-YAPD cihazı gösterimi [30].....	42
Şekil 4.8.	Malzeme tutucu parçanın hazne içerisindeki yeri [30].	43
Şekil 5 1.	(a) Ray geometrisi. (b) Numunelerin alındığı kısım. (c) Kesilmiş R260 ray numunesi. (d) Kesilmiş R350HT ray numunesi	45
Şekil 5.2.	TDBD işlemine tabi tutulan (a) İşlem Görmemiş R260 numunesi. (b) N1. (c) N2. (d) N5. (e) N3. (f) N4.	46
Şekil 5.3.	XRD cihazı.	48
Şekil 5.4.	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	49
Şekil 5 5.	Aşınma test ünitesi.....	50
Şekil 5.6.	Mikro sertlik cihazı.....	51
Şekil 6.1.	TDBD işlemi görmüş N1 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x	52
Şekil 6.2.	TDBD işlemi görmüş N1 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x	53
Şekil 6.3.	TDBD işlemi görmüş N2 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x	53
Şekil 6.4.	TDBD işlemi görmüş N2 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x	54
Şekil 6.5.	TDBD işlemi görmüş N3 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x	55
Şekil 6.6.	TDBD işlemi görmüş N3 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x	55
Şekil 6.7.	TDBD işlemi görmüş N4 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x	56
Şekil 6.8.	TDBD işlemi görmüş N4 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x	56
Şekil 6.9.	UNYM işlemi görmüş N5 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x, c)10000x	57
Şekil 6.10.	UNYM işlemi görmüş N6 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x, c)10000x	58
Şekil 6.11.	R260 kalite ray numunelerinin mikrosertlik ölçümleri.....	59
Şekil 6.12.	R350HT kalite ray numunelerinin mikrosertlik ölçümleri.	59
Şekil 6.13.	R260 Kalite Ray ; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri XRD grafiği. ...	61
Şekil 6.14.	R2350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri XRD grafiği.	61

Sayfa

Şekil 6.15.	10 N yük altında R260 Kalite Ray; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri sürütme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).....	63
Şekil 6.16.	15 N yük altında R260 Kalite Ray; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri sürütme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).	63
Şekil 6.17.	200 m kayma mesafesi için R260 Kalite Ray ; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri hacim kaybı grafiği	64
Şekil 6.18.	10 N yük altında R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri sürütme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).	65
Şekil 6.19.	15 N yük altında R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri sürütme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).	66
Şekil 6.20.	200 m kayma mesafesi için R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri hacim kaybı grafiği	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Rayların sınıflandırılması, sertlikleri ve ısıtım işlem özellikleri [5].	3
Çizelge 2.2. Farklı kavisli yarıçaplarda Avrupa demiryolları kuruluşları için ray kalitesi [7]	4
Çizelge 3 1. Ray profillerinin parametreleri [16].	10
Çizelge 3.2. Ray kalitelerinin sınıflarının sertlik değerleri ve tanımı [3].	14
Çizelge 3.3. Rayların kimyasal kompozisyonları [3].	14
Çizelge 3.4. Zımpara kâğıtlarının rakamları ve birim boyutu [21].	25
Çizelge 3.5. Işık ve Elektron mikroskoplarının özellikleri [23].	29
Çizelge 4.1. Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması [26].	34
Çizelge 4.2. Yüzey modifikasyon yöntemlerinin sınıflandırılması [26].	35
Çizelge 4.3. Bilya tiplerinin sınıflandırılması [22].	39
Çizelge 4.4. Bazı bilya çeşitlerinin standartları ve sertlik değerleri [22].	39
Çizelge 5 1. R260 ve R350HT raylarının kimyasal kompozisyonları (%) [31].	44
Çizelge 5.2. R260 ve R350 raylarının sertlik ve uzama değerleri [31].	44
Çizelge 5 3. TDBD yöntem değişkeni	46
Çizelge 5 4. UNYM işlem parametreleri.	47
Çizelge 6.1. Uygulanan yüzey işlemlerine göre yüzey pürüzlülükleri.	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cr	: krom
C	: karbon
Mn	: mangan
Al	: alüminyum
Ti	: titanyum
Si	: silisyum
Cu	: bakır
H	: hidrojen
O	: oksijen
Fe	: demir
N	: azot
V	: vanadyum
P	: fosfor
Hz	: frekans

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

UNYM: Ultrasonik Nanokristal Yüzey Modifikasyonu

TDBD : Titreşim Destekli Bilyalı Dövme

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

EN : European Norm (Avrupa Normu)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)

BSD : Brinel Sertlik Değeri

RSD : Rockwell Sertlik Değeri

HB : Sertlik

HV : Vickers Sertliği

GBD : Geleneksel Bilyalı Dövme

XRD : X-Işını Difraksiyon Spektrometresi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Malzemelerde sıkça gözlenen aşınma, korozyon, kırılma ve yorulma gibi hasarların birçoğu, özellikle malzemelerin dış katmanlarından veya yüzeylerinden kaynaklanır. Bu tür hasarlar arasında mekanik hasarların büyük bir bölümü aşınmayla ilişkilidir ve doğrudan malzemenin yüzey yapısıyla bağlantılıdır. Malzeme mekanik özelliklerinin ve aşınma performansının, yüzeyde artık gerilmelerin oluşturulması, yüzey sertliğinin artırılması, malzemenin yüzeyinde sert fazların oluşturulması ve tane boyutunun azaltılması gibi yöntemlerle geliştirilebileceği bilinmektedir.

Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı yüzey modifikasyon işlemleri uygulanır. Bu işlemler genellikle iki ana kategoriye ayrılır: yüzey kaplama ve termal-termokimyasal işlemler. Yüzey işlemlerinin seçimi, malzemenin sahip olması gereken yüzey özelliklerine göre belirlenir.

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan R260 ve R350HT kalite ray modifikasyonlarının ülkelerin bakım-onarım ve yenileme maliyetlerinin azalması, üretici ve kullanıcı firmaların dışa bağımlılığı azaltılarak düşük maliyetli ve yüksek kaliteli prosesler elde edebilmesi üzerine çalışılmıştır.

Dar dönemeç yarıçapları, makas bölgeleri ve araç ivmelendirmeleri gibi kritik bölgelerde, rayların 2-3 yılda bir değiştirilmesi önerilir. Bu belirtilen hatlarda aşınma ve yorulma kaynaklı hasarların risk taşıdığından dolayı, farklı kalitede ray üretimi ve kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Bu tür hasarlara karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla bazı ısıtma işlemleri (su verme gibi) kullanılarak sertleştirilmiş mantar rayları üretilmiştir. Geleneksel ısıtma işlemleri, yüksek sıcaklıklar nedeniyle malzemedeki çatlama ve bozulmalar gibi olumsuz etkilere yol açabileceğinden, yorulma ve aşınma kaynaklı hasarların ertelenmesi ve ray ömrünün uzatılması (sürekli ray

değişikliği maliyetini düşürmek amacıyla) için kullanıldığında bazen yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca, geleneksel ısıt işlemler sadece ray üretimi sırasında uygulanabilir ve servis koşullarındaki olası sorunlarda etkisiz kalabilir. Servis koşullarında belirli bir dereceye kadar özelliklerini kaybetmiş ve uzun süreli çalışma ömrünü tamamlamış rayların, yerinde yüzey mühendisliği uygulamalarıyla kullanım kalitesi ve ömrü artırılması büyük önem taşır. Bu tez çalışmasında, son yıllarda yeni yüzey sertleştirme işlemleri olarak öne çıkan ultrasonik yüzey nanokristal modifikasyonu (UNYM) ve titreşim destekli bilyalı dövmenin (TDBD) R260 ve R350HT kaliteli rayların sertlik ve aşınma gibi mekanik özelliklerine nasıl etki ettiği incelenecektir.



BÖLÜM 2

LİTERATÜR

Demiryolu taşımacılığı ve hızlandırılmış/hızlı tren uygulamalarındaki artış, kazaların artmasına, bunun da yüksek maliyetlerle sonuçlanabilmesine ve hatta ölümlere yol açabilmesine neden olmuştur[1]Bazı kaza raporları ve literatür çalışmalarından elde edilen veriler, bu sorunların özellikle maddi hasarlardan kaynaklandığını vurgulamaktadır. Özellikle hızlı tren uygulamaları raylarda daha fazla aşınmaya neden olduğundan ray aşınma problemlerinde artış olmuştur [2]. Raylar, kayma aşınması ve yuvarlanma teması yorulması gibi potansiyel hasarlara maruz kalır. Rayların bu tür hasarlara karşı direncini arttırmak için konvansiyonel ısıt işlemlerle iç yapı ince perlit ve beynit yapıya dönüştürülmeye çalışılmaktadır [3]. İç yapıdaki değişiklik sonucunda yeni tip raylarda mekanik özelliklerdeki iyileşme belirlenmeye çalışılmıştır. Taşıma süresinin ve kapasitesinin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi, genellikle malzeme kaynaklı sorunlardan kaynaklanabilecek kazaların ortadan kaldırılması hedeflenmiştir [4].

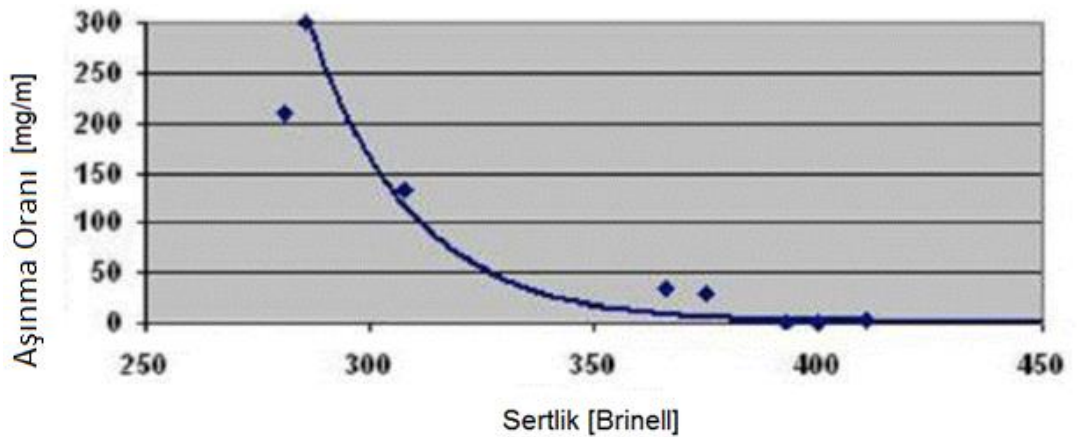
Aşınma ve yorulma hasarını geciktirmek için raylara ısıt işlem döngüleri uygulanır. Rayların soğuma hızı artırılarak ince perlit yapı oluşturularak sertleştirilmiş ray üretimi gerçekleştirilir. Sıcak haddelemeden sonra proses kaynaklı soğuma hızının yavaşlaması kaba taneli perlit oluşumuna yol açar. Bu durum mekanik özellikleri olumsuz etkiler. Alaşım elementlerinin eklenmesinin yavaş soğuma koşullarının olumsuz etkilerini ortadan kaldıracağı bilinmektedir. Ancak hem maliyet hem de FCGR-kırılma tokluğu açısından yeni dezavantajlar ortaya çıkmaktadır [3]. Bu sebeplerden dolayı iç yapı ve mekanik özellik dengesine bağlı olarak R260, R350HT, R370LHT, R320Cr vb. kalite raylar üretilebilmektedir. R200 kalite raylar, tane sınırlarında ferrit bulunan perlitik raylardır. Martensit ve beynit içermezler. Perlitik yapıya sahip R260 kalite çelik ısıt işlem uygulanarak katmanlar arasında dar ve ince

perlit yapılı R350HT haline dönüştürülür. Farklı kalitede rayların özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [5].

Çizelge 2.1. Rayların sınıflandırılması, sertlikleri ve ısıtılma özellikleri [5].

Ray Kalitesi	Sertlik (HB)	Isıl İşlem (HT)
R200	200-240	C-Mn/HTless
R220	220-260	C-Mn/ HTless
R260	260-300	C-Mn/ HTless
R260Mn	260-300	C-Mn/ HTless
R320Cr	320-360	Alaşımlı (%1 Cr)/HTless
R350HT	359-390	C-Mn/HT
R350LHT	350-390	Düşük Alaşımlı/HT

Çizelge 2.1'de gösterilen HTless koduna sahip raylar haddeleme sonrası herhangi bir ısıtılma işlemine tabi tutulmamaktadır. Ancak HT kalite raylar haddeleme işleminden sonra sertleştirme ısıtılma işlemine tabi tutulur. Özellikle demir esaslı malzemelerde sertlik karakterinin mukavemet ile doğrudan bir ilişkisi olduğu düşünüldüğünde, ısıtılma işlemi ve yüzey sertleştirmenin ray kalitesi ve kullanım ömrü üzerinde büyük önem taşıdığı açıktır. Yüzey sertliği özellikleri aşınma ve yorulma özelliklerini doğrudan etkiler [6]. Şekil 2.1, sertlik ile aşınma hızındaki değişim arasındaki ilişkiyi göstermektedir [3].



Şekil 2.1. Sertlik ve aşınma oranı arasındaki ilişki [3].

Demiryolu araçlarının hızlanma bölgelerinde, ray çapraz bölgelerinde ve eğri yarıçaplarında kullanılan ray kalitesi ve özellikleri değişebilir. Çünkü aynı hattaki ray

ve lokomotif elemanlarındaki aşınma ve yorulma hasarları oldukça değişkendir. Çizelge 2.2, Avrupa demiryolları kuruluşlarının farklı virajlı bölgelerde tercih ettiği ray kalitesini göstermektedir [7].

Çizelge 2.2. Farklı kavisli yarıçaplarda Avrupa demiryolları kuruluşları için ray kalitesi [7]

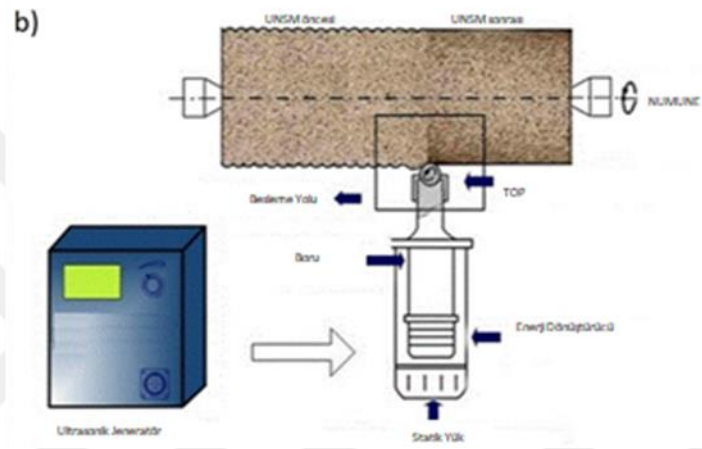
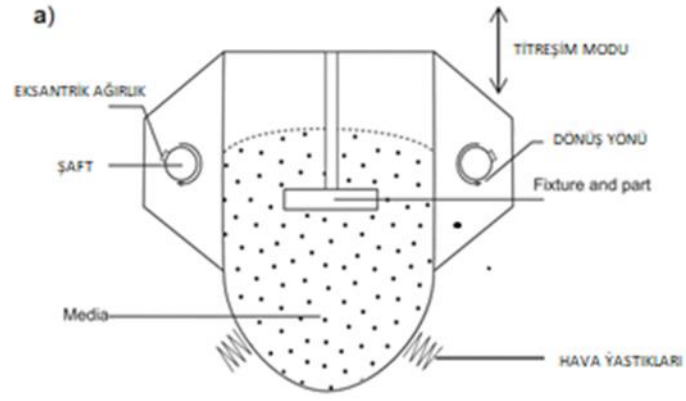
YARIÇAP (M)	<300	400	500	600	700	800	1200	1500	2500	<3000	>3000
UIC	R350 HT		R350HT/R260			R260					
Almanya	R350 HT(<30 MGT)					R260					
Almanya-New Track	R350HT (>50 MGT)										R260
İsviçre	R350HT		R320Cr/R350LHT				R260				
İsviçre (Trial)	370LHT		R350LHT		Beynitik						R260
Avusturya	R350HT		R260								
Avusturya (Yeni) Tek	R350HT		R260								
Avusturya (Yeni) Çift	R350HT										
İsveç	R350HT		R260								
İsveç(Malmbanan)	R350HT										R260
Norveç	R350HT					R260					
Birleşik Krallık	R260										
İrlanda	R260										
İtalya	R260										
Belçika	R350HT						R260				
Lüksemburg	R350HT						R260				
Hollanda	R350HT/400HB		370LHT/400HB								R260
Danimarka	R350HT						R260				
Polanya	R350HT						R260				
Macaristan	R350HT						R260				
Romanya	R350HT						R260				

Metal alaşımlı materyallerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için bilyalı dövme prosesi gerçekleştirilir. Bilyalı dövme işlemi, metal işleme yöntemlerinden biridir. Bu işlemde, metal parçalar yüksek hızda hareket eden küçük çelik bilyeler (genellikle çapları 0.2-2 mm arasında) ile etkileşime sokulur. Bilyalar, özel bir cihaz veya makine içinde parçaların yüzeyine püskürtülerek veya yuvarlanarak işlem görür. Bilyalı dövme prosesinde malzeme yüzeyinde oluşan çatlağın başlama zamanını iyileştirdiği çalışmalarda görülmüştür [8].

Tekrarlanan yükler, malzemenin mekanik özelliklerinde istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Bilyalı dövme prosesi, streslere bağlı olarak çatlak oluşumunu %16 ile %110 arasında geçiktirirken çatlak ilerlemesini %44 ile %162 arasında azaltır. Bunun yanı sıra gerilme yüklerinden dolayı yorulma mukavemetini %200 ün üzerinde arttırır [9,10]. Geleneksel bilyalı dövme işlemi, malzemenin yüzey pürüzlülüğünün arttırmakta ve yüzey kalitesini düşürmektedir. Ancak sertlik artışı ve artık basma gerilmesi açısından başarılı bir yüzey işlemi olarak uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğün artışı bazı uygulama alanlarında malzemenin yüzey sertliğini iyileştirmesine rağmen aşınma özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu yüzden malzemenin aşınma performansının iyileştirilmesi istendiğinde tek başına kullanımı uygun bulunmaz.

UNYM ve TDBD, geleneksel mekanik yüzey işlemlerine kıyasla daha etkili sonuçlar veren modern ve yenilikçi yüzey sertleştirme yöntemleridir. Malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirirken malzemenin üstünde ve hemen altında herhangi bir kimyasal değişikliğe sebep olmazlar.

TDBD, parçanın titreşimli bir odaya belirli çaplardaki çelik bilyalarla sabitlenerek dövülme işlemidir (Şekil 2.2a) [11]. Darbe hızının oldukça yüksek olduğu bu işlemde titreşim ile yaklaşık 550 µm kalınlığına kadar etki görülmektedir [11]. Bu işlem geleneksel bilyalı dövme işlemine benziyor olsa da, BD prosesinde deformasyon etkisi 210 µm kalınlığı geçmemektedir [12,13].



Şekil 2.2. a) Titreşim destekli SP ve b) UNSM süreçlerinin şematik görünümü [9].

BÖLÜM 3

RAY

Ray belirli standartlarda üretilen, demir yolu taşımacılığında taşıtın tekerleklerine en az direnci gösteren, iyi bir yuvarlanma yüzeyi sağlayan ve tekerleklerle kılavuz görevi gören, genellikle dökme çelikten imal edilen bir üstyapı malzemesidir.

3.1. RAY'IN TARİHİ

Demiryolu taşımacılığının başlangıç tarihi açısından birçok bilgi olsa da net bir başlangıç tarihi belirlemek oldukça zor. Bir kısım İngiliz mühendis Richard Trevithick tarafından 1804 yılında yapılan ilk buharlı lokomotifin demiryolu tarihinin başlangıcı olarak sayarken diğer bir kısım ise madenlerde kullanılmış demirden yapılan çubukların üstünde araçların çekildiğini sunarak demiryolu tarihinin başlangıcının bu tarih olduğunu savunur. Başka bir kısımda daha eskiye giderek Hz.İsa'dan 200 sene evvel 1680'lerde bulunmuş istimin Newton tarafından yürürlüğe sokmasını referans göstererek, demiryolu taşımacılığının başlangıcını bu zamana götürürler [14]

Arkeologlar, M.Ö. 2600 yıllarında inşa edildiği düşünülen bir Mısır piramidinin yakınında ray kalıntılarını keşfetmişlerdir. Bu rayların, piramidin inşasında kullanılan taşların ocaklardan taşınmasında kullanıldığı düşünülmektedir [14].

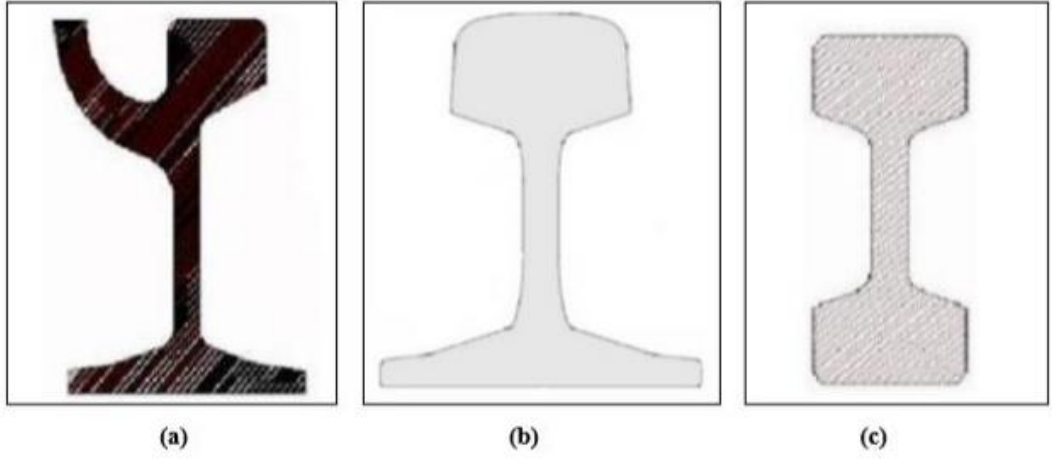
Taşıma yönteminin nasıl başladığı incelenecek olursa, ilk insan topluluklarının malzemelerini yerlerde sürüklemeye yöntemi ile taşıdıkları gözlemlenmektedir. Çekilen malzeme ile zemin arasında (f)sürtünme direnci oluşmaktadır. Bu değer malzeme ve zeminine göre farklılık gösterir. İnsanlar daha rahat ağırlık çekebilmek için sürtünme direnci değerini düşürme amacıyla girişimlerde bulunmuşlardır. Zeminde yapılan değişikliklerin zamanla etkisiz olduğu görülmüş ve zeminde

sürüklenen bir araç yerine tekerleklerin üzerinde yuvarlanarak hareket eden bir araç kullanılmıştır. Madenlerde kullanılan ağaçların sürtmeye karşı mukavemeti az olduğu için kısa sürede aşınmasına karşılık lama vekorniyerler kullanılarak kuvvetlendirilmiştir. Bundan sonra ise sürtünme direniminin daha küçük bulunduğu ray olarak adlandırılan çubuk şeklindeki fonttan madeni kullanılmıştır. 1808’de font madeni çubuk yerine dövülmüş demir, sonrasında 1820’de dökme demirin icadıyla döğme demirin yerine demirin haddeden geçirilerek elde edilen dökme çelik kullanılmaya başlanır [15].

Sonralarında ise 1830’lu yıllarda Avrupa kentlerinin bir çoğunda ilk demiryolları işlemeye başlar ve bugünlere kadar yüksek kapasite ile çalışmışlardır. Bunların yanı sıra demiryolu taşımacılığının gelişmesinin önemli nedenlerinden bir diğeri de oldukça yüksek hızlara varabilme imkanını sağlamasıdır [15].

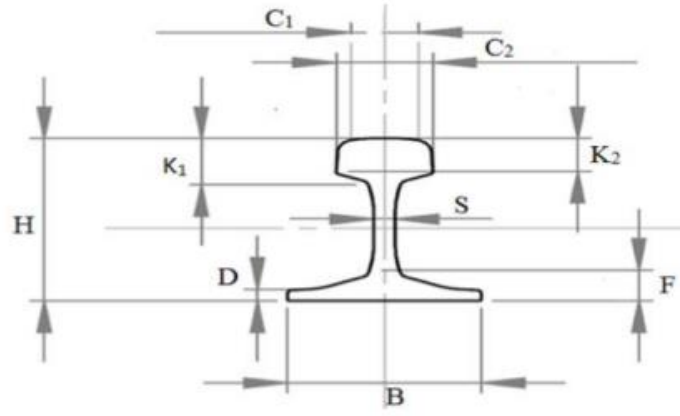
3.2. RAY GEOMETRİSİ VE ÖZELLİKLERİ

Şimdilere bakıldığında Şekil 3.3’de gösterilen ray tipleri kullanılmaktadır. Bunların arasında ise vinyol, oluklu ray tipleri daha çok kullanılmakta ve çift matar tipli raylar ise tercih edilmemektedir. Oluklu tipteki raylar daha çok tramvay yollarında kullanılırken vinyol tipi raylar daha çok geleneksel ve hızlı tren hatlarında tercih edilir. Metrede minimum 46 kg uzunluk kütesine sahip düz tabanlı vinyol tipi ray profilleri En 13674-1 standartlarında gösterilmiştir. Belirtilen bu standarda uygun 23 ray profili tanımlanmıştır [16].



Şekil 3.1. (a) Oluklu Ray, (b) Vinyol Ray, (c) Çift Mantarlı Ray [16].

10 farklı ray profili arasında yapılan bazı ölçümlerin ve rayda oluşan gerilmeler incelendiğinde UIC 60 Ray profili en iyisi olarak seçilmiştir. Çizelge 3.3’de önemli ray profil boyutları ve parametreleri gösterilmiştir [16].



Şekil 3.2. Ray profilinin geometrik gösterimi [16].

Çizelge 3 1. Ray profillerinin parametreleri [16].

		30	33	41	49	54	50	54	54	60	60
Parametre	Birim	E1	E1	E1	E1	E3	E4	E2	E1	E1	E2
Ray Yüksekliği	H(mm)	108,0	134,0	138	149	154	152	161	159	172	172
Taban	B(mmm)	108,0	105,0	125	125	125	125	125	140	150	150
Başlık Eni	C1(mm)	60,3	58,0	67	67	67	70	67	70	72	72
Başlık Eni	C2(mm)	60,3	58,0	67	70	70	72,2	69,5	72,2	74,3	74,3
Gövde Kalınlığı	S(mm)	12,3	11,0	12	14	16	15	16	16	16,5	16,5
Başlık Yüksekliği	K1(mm)	31,0	39,0	43	51,5	55	49,4	51,4	49,4	51	51
Başlık Yüksekliği	K2(mm)	24,0	31,8	31,8	39,8	43,3	36,3	38,7	36,3	37,5	37,5
Taban Yüksekliği	F(mm)	19,5	19,0	24	27,5	29	28	30,2	30,2	31,5	31,5
Taban Kalınlığı	D(mm)	7,0	9,5	9,5	10,5	12	10	12	11	11,5	11,5
Alan	A (mm ²)	3825,0	4264,0	5271	6297	6948	6392	6855	6934	7687	7687
Ağırlık	G(kg/m)	30,0	33,5	41,4	49,4	54,5	52,2	53,8	54,4	60,3	60,03
Nötral Eksen	YH(mm)	52,1	67,3	68,2	73,3	75	76	69,6	75	80,9	80,9
Atalet Moment	Ja(CM ⁴)	606,0	1040,0	1368	1819	2073	1940	2308	2127	3055	3021
Mukavvemet Momenti	Wa(cm ³)	104,0	155,0	196	240	262	253,6	276,4	279,2	3335,5	330,8

Ray profillerinin karşılaması gereken bazı temel özellikleri aşağıda verilmiştir;

1. Tekerlek ve ray arasındaki temas yüzeyi basıncını minimize etmek için yeterli hareket alanı bulunmalıdır.
2. Rayın uzun ömürlü olması gereklidir, bu nedenle ray mantarının aşınmaya izin verme kapasitesi yeterli olmalıdır.
3. Ray gövdesi, taşıyacağı yük miktarı ve esneme dayanıklılığı bakımından yeterli kalınlıkta olması gerekiyor.
4. Ray kesiti, üzerine gelebilecek yüklere karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmalıdır.
5. Uygun gerilme dağılımı sağlamak amacıyla geçiş bölgelerinin yeterli yarıçapa sahip olması gerekmektedir.
6. Statik sorunlar nedeniyle ağırlık merkezi, ray yüksekliğinin yaklaşık yarısı kadar konumlanmalıdır [15]

3.2.1. Oluklu Raylar

Bu tür raylar özellikle tranvay gibi hafif raylı sistem araçları için uygun demiryolu sistemlerinde kullanılır. Aynı zamanda, hemzemin geçitlerde yani demiryolu ve karayolunun kesiştiği, aynı seviyede olduğu bölgelerde ve rıhtım hatlarında da tercih edilirler. Ancak, bu ray tipinin olumsuz yanı, boden yataklarının çeşitli maddelerle dolması nedeniyle sık bakım ve temizlik gerektirmesidir; aksi takdirde boden yataklarının dolması deray gibi sorunlara yol açabilir [17].

BoSrab standartlarına göre oluk derinliği minimum 13 mm olmalıdır, ancak gövde ucu dairesinin yarıçapı 3 mm'den büyükse oluk derinliği aşırı derecede artırılmalıdır. Maksimum oluk derinliği oluklarda 45 mm, kavislerde 60 mm olmalıdır. Günümüzde tramvay hatlarının kesişim noktalarında düz rayların (Vinyol), sadece kavisli alanlarda ise oluklu rayların kullanıldığı örnekler bulunmaktadır [15].

3.2.2. Çift Mantarlı Raylar

Bu ray tipi simetrik bir yapıya sahiptir ve üst ile alt mantar olmak üzere iki çeşittir. Önemli bir özelliği ise, zaman geçtikçe yıpranan ve eğrilen mantarların değiştirilerek rayın diğer tarafının da kullanılabilmesidir. Ancak, rayın üst kısmında bulunan mantarın aşındığı gözlemlenirken, alt bölgede kalan mantarın kullandıkça korozyona uğradığı gözlenmiştir. Bu nedenle bu ray tipinin sınırlı kullanışlı olduğu anlaşılmıştır. İngilizlerin son olarak 1938'de kullanımını bıraktığı bu ray tipi, günümüzde Fransa'nın belirli yerlerinde ikinci dereceden hatlarda uygulanmaktadır [15].

3.2.3. Vinyol Raylar

Raylar, genişlemiş bir dayanma tabakasıyla tek yuvarlanma yüzeyine sahip olarak traverse bağlantısını sağlar. İlk olarak 1832'de Amerikalı Stevens tarafından üretilen tek mantarlı raylar, günümüzde hem ülkemizde hem de dünyada hala kullanılmaktadır. Bu ray tipi, geniş bir kullanım alanı sağlayan İngiliz mühendis Vinyol'un adını taşıdığı için "Vinyol" olarak adlandırılmıştır [15].

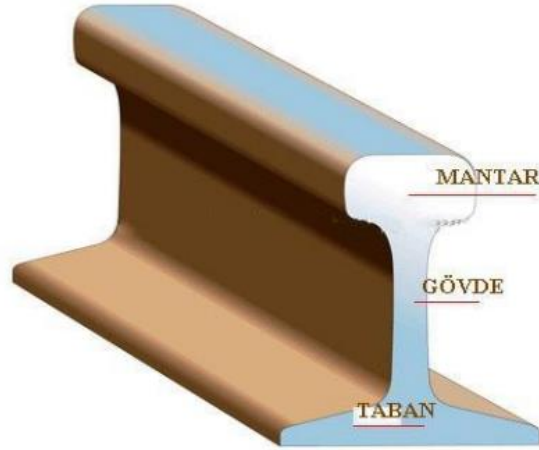
3.3. RAY BÖLÜMLERİ

Raylar mantar, gövde ve taban olarak 3 kısımdan oluşmaktadır.

Mantar; Rayın tekerlekle direk temas ettiği bölümdür. Mantarın bombeliği, yüksekliği ve yanak eğimi, yuvarlanma yüzeyinin özelliklerini ifade eder.

Gövde; Mantardan gelen yükleri tabana iletir.

Taban; Gövdenin alt kısmı taban olarak adlandırılır. Bu bölge, raya gelen yükleri geniş bir yüzeyde traverse iletmek için kullanılır. Ayrıca rayın travers ile bağlantısı buradan sağlanır.

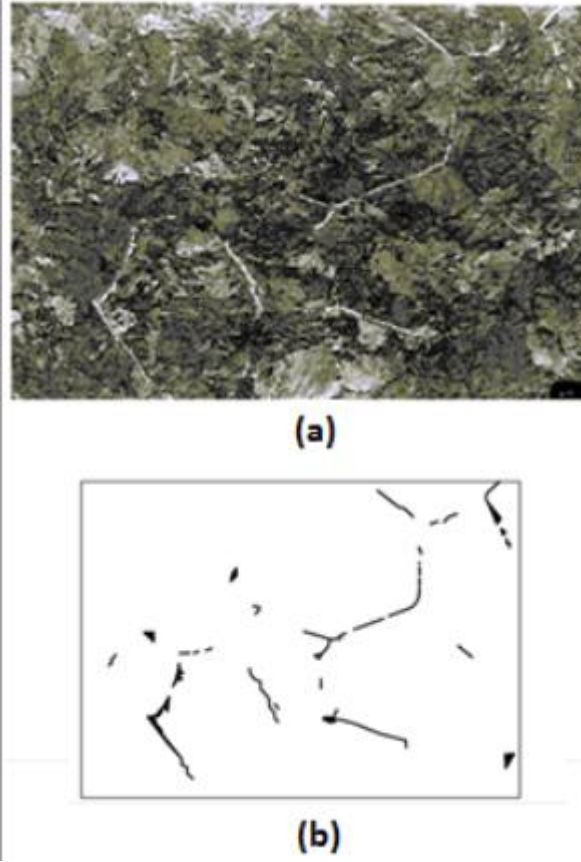


Şekil 3.3. Ray bölümleri [15].

3.4. KULLANILAN RAYLAR

Demiryollarında, kullanıldığı ülkenin, bölgenin standartlarına veya hat üzerindeki değişiklik gösteren koşullara bağlı olarak farklı ray sınıfları kullanılmaktadır. Bu seçimlerde çevresel faktörler (örneğin korozyon, yüksek sıcaklık veya soğuk), hat üzerindeki virajların eğrilik yarıçapı (kurp çapı), hat eğimi, taşıtların özellikleri gibi demiryolu hattının özgünlüğünden dolayı çıkan etkiler ve ekonomik faktörler önemli bir rol oynar. Kullanılan rayların sınıfları aşağıda açıklanmıştır;

1. R200 ve R220 sınıfı raylar, ferrit içeren perlitik mikroyapıya sahiptirler; martenzit, beyit veya sementit tanelerine izin verilmez.
2. R260Mn ve R260 sınıfı raylar; tane sınırları içinde perlitik yapıya sahiptirler, beyit, martenzit veya tane sınırlarında sementite izin verilmez.
3. R320Cr sınıfı raylar; tane sınırlarında tamamen perlitik yapıya sahiptir.
4. R350LHT, R350HT sınıfı raylar; bu raylar perlitik yapıya sahiptir. Martenzit, beyit ya da sınırlarında sementite izin verilmez [3].



Şekil 3.4. Tane sınırları içerisinde R350HT, R350LHT, R260 ve R260Mn kalite raylarda müsadde edilen ferrit miktarı için (a)500X’de referans mikroyapı fotoğrafı ve (b) diyagramı [3].

Ray kalitelerinin sınıflandırılmasına bakılarak kimyasal bileşimleri, mantar kesitindeki sertlik aralıkları, mantarın üst kısmının sertlikleri ve diğer tüm mekanik özellikleri farklılık gösterir. Gerekli sertlik değerlerini karşılamak için rayların Çizelge 3.4’de belirtilen değerlere sahip olmaları gerekmektedir.

Çizelge 3.2. Ray kalitelerinin sınıflarının sertlik değerleri ve tanımı [3].

Ray Sınıfı	Sertlik Değeri (HB)	Rayın Tanımı
R200	200-240	C-Mn / Isıl işlem görmemiş
R220	220-260	C-Mn / Isıl işlem görmemiş
R260	260-300	C-Mn / Isıl işlem görmemiş
R260Mn	260-300	C-Mn / Isıl işlem görmemiş
R320Cr	320-360	Alaşımlı/%1Cr) / Isıl işlem görmemiş
R350HT	359-390	C-Mn / Isıl işlemli
R350LHT	350-390	Düşük alaşımlı / Isıl işlemli

R350LHT ve R350HT kalite raylar dışındaki diğer ray türleri için, yalnızca mantar üst kısmının sertlik değerlerinin elde edilmesi yeterli olacaktır. Çünkü R350LHT ve R350HT kalite raylar özel bir ısıtma işlemi tabi tutularak elde edilir. Bu kalite rayların özellikleri detaylı olarak incelenmelidir, çünkü ısıtma işlemi bağli olarak farklılıklar ortaya çıkabilir. R350LHT ve R350HT dışındaki ray sınıflarına, haddeme işleminden sonra başka bir yüzey işlemi veya başka bir işleme tabi tutulmazlar. Bu nedenle, rayın mantar üst kısmının sertlik değeri yeterli sonuçlar sağlar [3].

Raylardaki sertlik değışiklikleri, çekme mukavemetlerini doğal olarak etkiler. Bu değışikliklerin bir kısmı kimyasal bileşimden kaynaklanırken bir kısmı da uygulanan ısıtma işlemlerinden kaynaklanır. Çizelge 3.5'te ray türlerinin kimyasal kompozisyonları ve çekme mukavemetleri verilmiştir [3].

Çizelge 3.3. Rayların kimyasal kompozisyonları [3].

Ray Sınıfı	%					Ppm				Rm (MPa)
	C	Si	Mn	P	Cr	Al	V	O	H	
				(max)		Max	Max.			
R200	0,38-	0,13-	0,65-	0,040	0,15	0,004	0,030	20	3,0	680
	0,62	0,60	1,25		Max.					
R220	0,50-	0,20-	1,0-1,25	0,025	0,15	0,004	0,030	20	3,0	770
	0,60	0,60			Max.					
R260	0,60-	0,13-	0,65-	0,030	0,15	0,004	0,030	20	2,5	880
	0,82	0,60	1,25		Max.					

R260Mn	0,53- 0,77	0,13- 0,62	1,25- 1,75	0,030	0,15	0,004	0,030	20	2,5	880
R320Cr	0,58- 0,82	0,48- 1,12	0,75- 1,25	0,025	0,75- 1,25	0,004	0,030	20	2,5	1080
R350HT	0,70- 0,80	0,13- 0,60	0,65- 1,25	0,025	0,15 Max	0,004	0,030	20	2,5	1175
R350LHR	0,70- 0,82	0,13- 0,60	0,65- 1,25	0,025	0,30 max	0,004	0,030	20	2,5	1175

3.5. RAYLARA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem, malzemenin istenen özelliklere uygun bir şekilde sıcaklığa getirilmesini, belirli sürelerde bu sıcaklıkta tutulmasını ve sonrasında doğru bir soğutma hızıyla ve belirli bir sıcaklığa kadar belirli bir soğutma ortamında soğutulmasını içerir. Isıl işlem sonrasında malzemenin iç yapısında değişiklikler meydana gelirken dış yapısında herhangi bir değişim olmaz [18].

Ray çeliklerine uygulanan ısıtma işlemlerin temel hedefi, yüzey sertliğini geliştirmektir. Bu işlemler, ray çeliklerinin yuvarlanma temasına karşı dayanıklılığını ve aşınmaya karşı direncini artırır. Ray çeliklerinin mantar bölgesini sertleştirmek için en sık kullanılan yöntem, östenit yapısının hızlı soğutma ile ince perlit yapısına dönüşmesidir. Malzeme yüzeyinde daha az kullanılan yaklaşımlar ise lazer kaplama, lazerle sertleştirme ve plazma kaplama gibi yöntemlerdir [18].

Perlitik yapının mekanik özellikleri, sementit (Fe_3C) lamellerinin arasındaki uzaklık, kalınlık ve tane boyutu gibi etmenlere bağlıdır. Perlitik yapı oluşurken, östenitik yapıdan farklı miktarda karbonun difüzyonu gerçekleşir. Difüzyon hızının kontrolünün sağlanması, alaşım elementlerinin miktarının kontrolüyle birebir etkiyi gösterir. Lameller arasındaki mesafe azaldıkça akma sınırı ve çekme mukavemeti artar. Sementit lamelleri arasındaki mesafe, çekme gerilmesinin artmasına bağlı olarak akma sınırını doğrudan etkiler. Tokluk ise genellikle sementit lamellerinin tane boyutu ve kalınlığı ile ilişkilendirilir [19].

Ray alaşımlarını artırarak kırılma mukavemetini artırmak mümkündür; bunun yanı sıra, raylara ısıtılma işlemleri uygulamak da bir başka yaklaşımdır. Bu yöntem sadece kırılma dayanıklılığını değil, aynı zamanda aşınma dayanıklılığını da artırmada büyük avantajlar sunar. Isıtılma işlemi, ya tüm rayı ya da sadece rayın üst kısmına, mantarına uygulanabilir. Yalnızca ray mantarına uygulandığında, rayın mantar bölümünde 1200-1350 N/mm² arasında yüksek kırılma dayanımı sağlanırken, rayın gövdesi ve tabanında 900 N/mm²'lik standart kırılma dayanımına ulaşılır [19].

Raylara yapılan ısıtılma işlemlerinde rayın bütünü ya da yalnızca mantar bölümü ısıtılma işlemine bırakılır. Rayın tüm bölümünün sertleştirme yöntemiyle çok ince perlitik bir yapı ortaya çıkarmak istenirse, bu amaçla ekonomik olmayan bir işletme kurmak ve işletmek gerekebilir. Fakat, sonrasında yapılacak kaynak işlemleri malzemenin yeniden yumuşamasına yol açabileceğinden, bu durum göz ardı edilmemelidir [19].

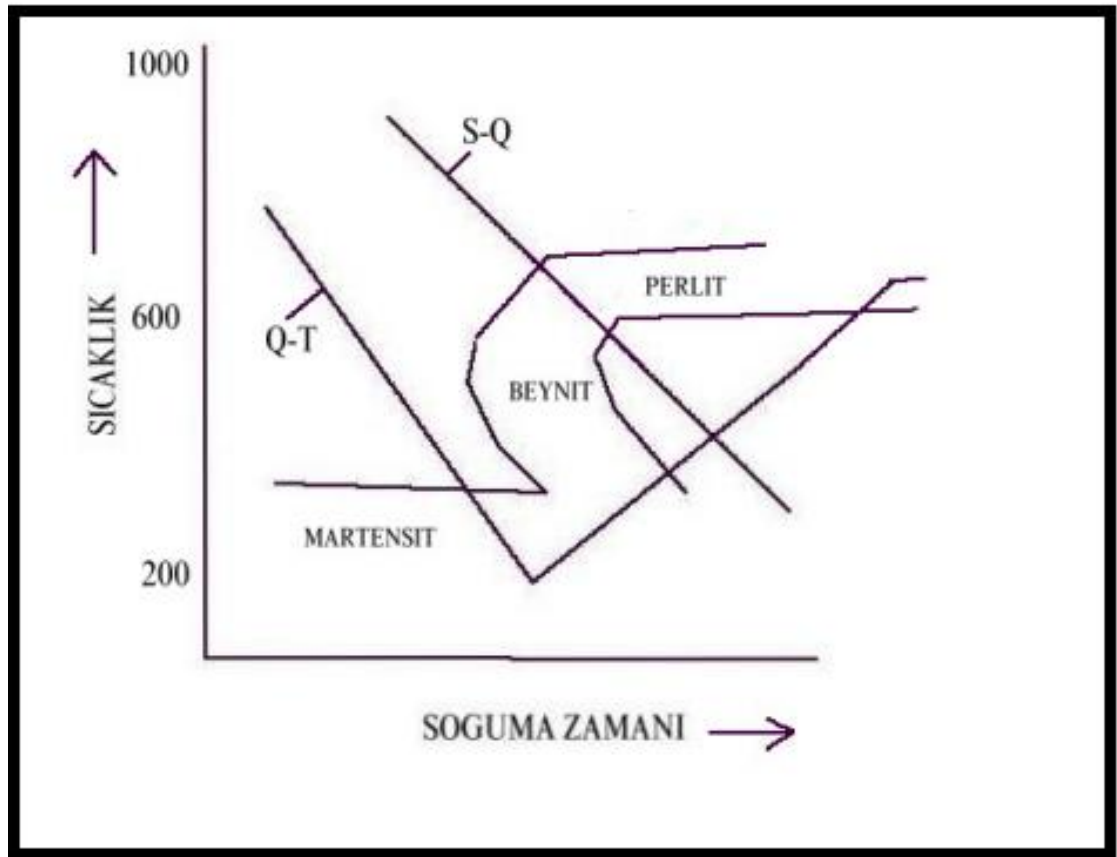
Bu bağlamda, raylara ısıtılma işlemi uygulamaktan ziyade denetimli soğutma yöntemi ile ince perlitik birim oluşturulması Cr-Mo eklenmesi ile gerçekleştirilir. Bu bileşimdeki raylar soğutulurken 560-600°C aralığında ince perlit (ya da üst beyrit) birimi oluşur. Standart C-çeliklerinde ise aynı dönüşüm 675-705°C arasında gerçekleşir, bu da daha büyük perlitik yapıya neden olur. Ray uçlarının sertleştirilmesi ise 1950'lerden beri yaygın bir uygulamadır. Bu nedenle ray uçları çoğunlukla gaz alevinde ısıtıldıktan sonra hızlı hava üflenerek hızlı soğutulur [19].

Rayın bütün kısmı yerine sadece mantar bölümüne ısıtılma işlemi uygulaması, günümüzde yaygın kullanılan yaklaşımdır. Bu yöntem çoğunlukla %0,60-0,75 C ve %0,70-1,10 Mn bulunan raylara uygulanmaktadır. Bu yöntem, "Q-T" ısıtılma yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemde rayın mantarı 815°C'de östenitleştirilir ve ardından su ile hızla serinletilerek martenzit yapı ortaya çıkarılır. Sonrasında ortalama 550°C'ye kadar ısıtılıp su ya da hava ile serinletilerek menevişlenir. Mantarın etkilenen birimi, çok ince perlitik bir birim olan sorbit yapısından oluşur [19].

Son yıllarda Japonya'da geliştirilen (S-Q) ısıtılma işlemi metodu, (Q-T) ısıtılma metoduna göre kolay bir yaklaşımdır. Bu yeni (S-Q) ısıtılma işlemi metodu, ray mantarının

500°C'ye kadar ön ısıtılmasını içerir. Sonrasında hızla diğer fırına transfer edilir ve alanı en az 1000°C'ye varana kadar ısıtılır. Sonrasında, fırından çıkarılan ray basınçlı hava ile soğutulur. Bu süreç sonucunda, işlemten etkilenen alanda ince perlitik 370 Vickers sertliğinde bir yapı oluşur [19].

(S-Q) yönteminde ki ön ısıtma fırını, basınçlı kok gazı ile 400-600°C kadar ısıtılmakta, hızlı ısıtma fırını basınçlı kok gazı ve oksijen karışımıyla uç brülör yardımıyla 1100-1200°C'ye kadar ulaşır. Soğutma aşaması ise yüksek hava basıncı ile gerçekleştirilir. Rayın işleme hızı 50 cm/dakika olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.7'de, (Q-T) ve (S-Q) yöntemine ait soğuma eğrileri görsel olarak sunulmuştur [19].

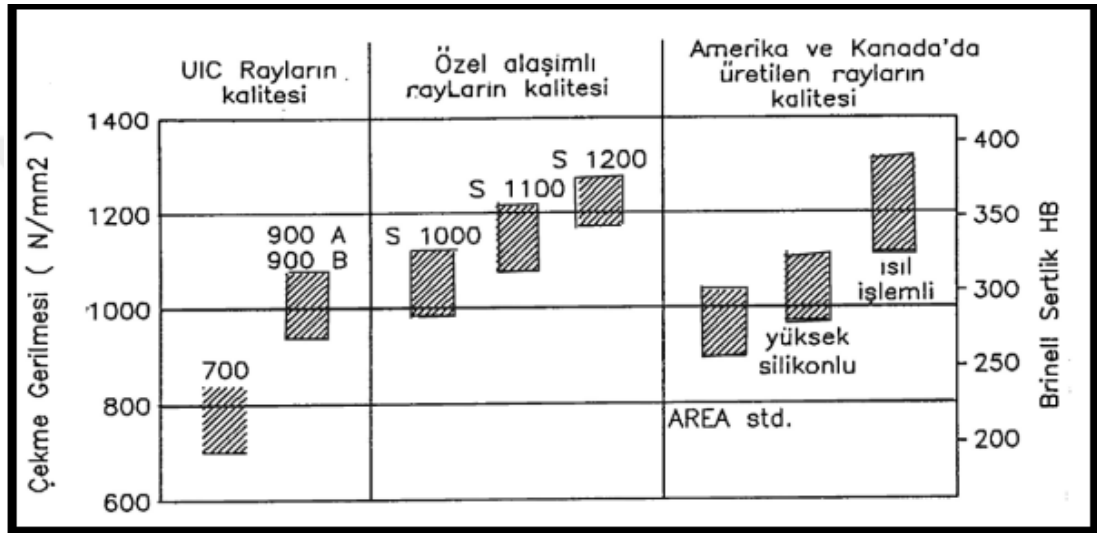


Şekil 3.5. S-Q ve Q-T yöntemini gösteren sıcaklık soğuma zamanı grafiği [19].

3.6. RAYLARIN MİKROYAPI VE MEKANİK TESTLERİ

3.6.1. Çelik Kalitesiyle Rayların Mekanik Özelliklerinin İlişkisi

Ray çeliklerinin gruplandırılmasında mukavemetleri değerlendirildiğinde, mukavemeti tesir eden etkenler, endirekt olarak kaliteler arasında önemli bir rol oynayabilir [19].



Şekil 3.6. Rayların sertlikleri ve çekme gerilmesi arasındaki ilişki [19].

Ray çeliklerinin çekme mukavemetleri ve sertlikleri arasındaki bağ Şekil 3.8'de görülmektedir. Bu duruma göre rayların dayanımları fiziksel özellikleri arasındaki durumlar şu şekilde ele alınabilir [19].

3.6.1.1. Aşınma Dayanımı

Aşınma, bir birleşme yüzeyi ile etkileşim içerisinde olan bir alandan malzemenin ayrılmasıyla oluşan bir hasar durumudur. Son senelerde yakışalık olarak tüm makineler, sağlamlıkları, aşınmayla ilgili olarak emniyet kaybı ve makinelerin aşınma sorunlarını yakından tanımak ve etkileyen faktörleri saptayarak aşınmayı düşük düzeyde tutup ekonomik kayıpları en aza indirmek için çalışılmaktadır [19].

Aşınma dayanımı, karbon içeriği ve diğer alaşım elementlerine en az mikro yapıya bağlı olduğu kadar bağlıdır. Genelleme yapacak olursak aşınma dayanımı normal koşullar altında kırılma gerilmesine tenasüp olan sertliğe göre çoğaldığı yargısı yapılabilir. Bunun yanı sıra sertlik ray kalitesi veya kırılma dayanımı hakkında bilgi sahibi olmamız için de kullanılır [19].

Benzer durum sağlandığında; R260Mn kalite rayın yanal aşınmasının R200 kalite rayın yanal aşınmasına kıyasla üç kat daha düşük olduğu görülmüştür. R260Mn kalitenin aşınması R320Cr kaliteden 2 ya da 3 kez daha fazladır. R260Mn, yağlama ile R320Cr dereceye denk gelmektedir. R320Cr kalitenin yağlanması yalnızca küçük iyileşmeler sağlar [19].

3.6.1.2. Yorulma Dayanımı

Yorulma; malzeme biliminde, bir malzemenin sürekli yükleme ve boşaltmaya maruz kalması sonucu yapısal hasar görmesi durumunu ifade eder. Malzeme, aşamalı olarak artan yük altında test edildiğinde belirli bir sınırdaki gerilime ulaştığında kopar. Bu yöntemle belirlenen parametreye malzemenin yorulma direnci denir. Lakin özdeş materyal, mazide devamlı gerilme koşullarına maruz kaldıysa, ayrılma değeri bu statik dayanım değerinden düşük olabilir. Bu durum malzemenin yorulmasından kaynaklanır [20].

Aşırı yüklere karşı direnç göstermek için yorulma dayanımı oldukça önemlidir. Bu parametre çok azsa, materyal kırıklar oluşturabilir ve yüzeyde kabuklanma meydana gelebilir. Haddelenmiş rayların yorulma dayanımı, parçalanma dayanımı ile doğrusal bir ilişki içerisinde. Rayın döşenip kullanımı sırasında, korozyon nedeniyle yorulma dayanımı tekrar azalabilir [19].

3.6.1.3. Parçalanma Dayanımı

Rayların parçalanmaya karşı sağlamlığı, tren yolu trafiği için kesinlikle hayati bir ehemmiyete sahiptir. Bu özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla kırılma mekanikleri kullanılabilir. Kırılma dayanımı ve çatlak uzama oranı, kritik gerilim yoğunluğu

faktörü olarak ifade edilen iki temel durumu içerir. Ayrıca, gerilme yoğunluğu faktörü dolu raylarda değerlendirilirken, kalıntı gerilmeleri de hesaba katılmalıdır. Bu gerilmeler testler sırasında ölçülebilir durumdadır [19].

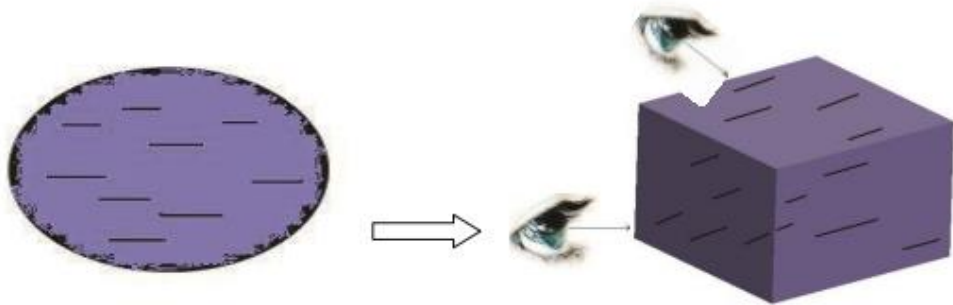
Çatlaklar genellikle dış hasarlardan veya içsel kusurlardan kaynaklanan çentiklerden başlar. Bundan dolayı üst düzey temizlik, yani düşük metal olmayan bileşen içeriği ve düşük hidrojen içeriği, önemlidir. Söz gelimi, kaynak işlemine tabi raylarda kaynak alanının mukavemeti, bükülme testleri ile takip edilmektedir [19].

3.6.2. Numune Hazırlama

Numune hazırlama sürecine, uygun bir numunenin seçilerek alınmasıyla başlanmaktadır. Metalografik hazırlama aşamasında, numune alma işlemi oldukça kritik bir adımdır ve bazı önemli noktaları bilmek gerekmektedir:

1. Numunenin esas malzemeyi fiziksel ve kimyasal olarak kapsaması
2. Numunenin inceleme amacına uygun özellikte olması
3. Numunenin anizotropik mi yoksa izotropik mi olduğunun bilinmesi
4. Numunenin geçmişinin bilinmesi

Sementasyon katmanı, korozyon, dekarbürizasyon, kaplama, katlama gibi hataların incelenmesi, inklüzyon değerlendirmesi ve kesit boyunca mikroyapı analizi gibi durumlarda, enine kesit hazırlama yöntemi uygulanmaktadır [21].



Şekil 3.7. Materyalda ki yönlenmeye bağlı çeşitli bakış açılarına bağlı başka görüntülerin ortaya çıkması [21].

Uzunlamasına kesit hazırlığı ise; tortu değerlendirmeleri, deformasyon yapılarının analizi ve katlama incelemeleri gibi durumlarda zorunludur. Bu tür çalışmalar için numune seçimi, yapılan analizlerin doğruluğu ve başarısı açısından büyük önem taşır. Özellikle haddelenmiş bir parçadan numune alınırken, haddelme işlemlerinin etkisi kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer hasar incelemesi yapılacaksa, hem hasarlı bölgelerden hem de hasarsız bölgelerden numune alınarak bu bölgeler arasında karşılaştırmalar yapılmalıdır [21].

3.6.2.1. Numune Alma (Kesme)

Malzemenin hangi bölümünden ve nasıl bir numune alınacağı belirlendikten sonra, numune kesme makinesinde kesilir. Kesme veya koparma işlemi sırasında malzeme üzerinde meydana gelebilecek yapısal değişikliklerin en aza indirilmesine özen gösterilmelidir. Bu işlem sırasında minimum ısınma ve deformasyon sağlanmalı, ayrıca malzeme kaybı olmamalıdır. Bu olumsuz durumların önüne geçmek için numune, kesme işlemi boyunca özel bir sıvı ile sürekli olarak soğutulmalıdır. Bu özel sıvı, genellikle organik sıvıların karışımı olan bor yağı gibi maddelerden elde edilir. Bu sıvı, kesici ile malzeme arasındaki sürtünmeyi azaltır, aşırı ısınmayı ve korozyonu önler. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra, malzemenin yüzeyinden çapaklar temizlenmeli ve daha sonra ayrılma esnasında ortaya çıkan deformasyon katmanını sert zımpara ile giderilmelidir [21].



Şekil 3.8. Metalografik numune ayırma aygıtı [21].

Numune alma işlemi, metalografik kesme makinelerinde özel diskler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu diskler metalografik kesit alma diskleri olarak adlandırılır ve genellikle Al_2O_3 , SiC, c-BN ve elmas aşındırıcı partiküllerinin metalik veya polimerik bağlayıcılarla birleştirilerek şekillendirilmesiyle üretilirler [21].

3.6.2.2. Kalıba Alma

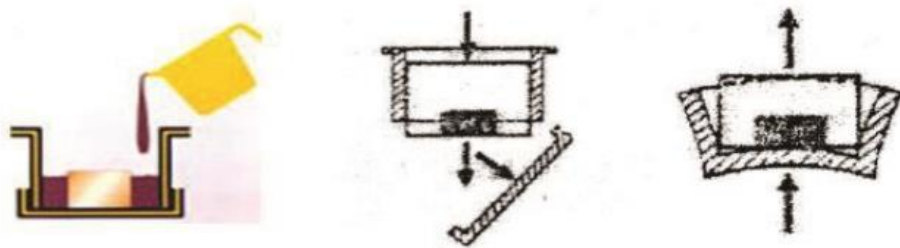
Kalıplamanın temel amacı, düzgün geometriye sahip olmayan veya elle tutulamayacak kadar küçük boyuttaki numuneleri sonraki yöntemde kolayca inceleyebilir ve gözlemlenebilir hale getirmektir. Bir polimer içine numunenin yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen biçimleme, zımparalama sırasında numunenin köşelerinin daireleşmesi ve numunenin paslanmasını önlerken, mikroskobik gözlemlene için düz yüzey ortaya çıkmasını sağlar. Aynı zamanda numuneyi kimyevi maddelerden bir tutar uzaklaştırarak koruma sağlar. Biçimleme metodu sıcak ve soğuk olarak iki farklı biçimde gerçekleştirilebilir ve kullanılan plastik türleri bu işlemlerde değişiklik gösterir [21].

Sıcak biçimleme için özel bir biçimleme aygıtı tercih edilir. Numune, yüzeyi alt zımba yüzeyi ile temas edecek şekilde yerleştirilir ve biçimleme aygıtının içine oturtulur. Üzerine gerekli miktarda termoset polimer tozu aktarılır. Sistem kapatılarak, polimer numune üzerinde 155-165 °C sıcaklıkta polimerizasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde polimerin tam olarak sertleşmesi önemlidir. Soğutma sonrasında, kalıba alınmış numune cihazdan çıkarılır. Bu süreçte genellikle akrilik, epoksi reçineleri veya en yaygın olarak bakalit reçinesi kullanılır. Bakalit reçinesinin sık kullanımı nedeniyle bu işlem "bakalite alma" olarak da adlandırılır [21].



Şekil 3.9. Bakalite alma cihazı ve bakalite alınmış numuneler [21].

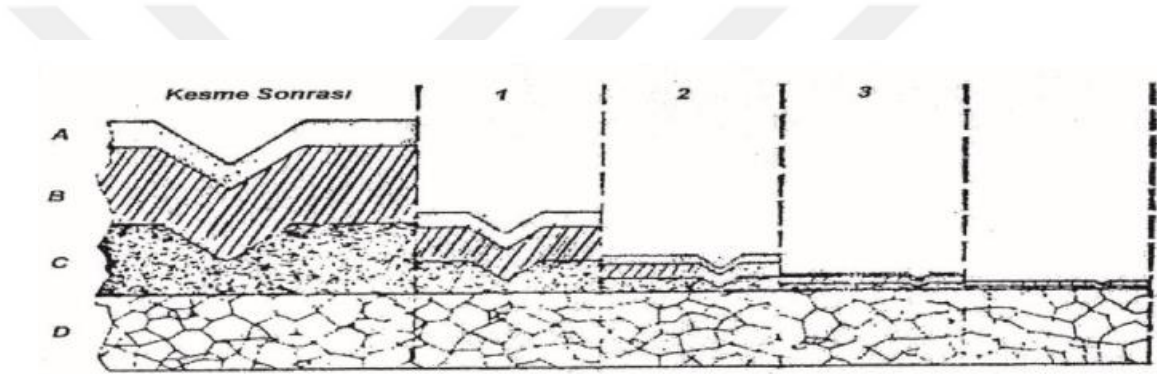
Soğuk kalıplama, oda sıcaklığında yine polimer esaslı malzemelerle gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu yöntemde sıcaklık ve basınç kullanılmaz. Genellikle akrilik, epoksi reçineler ve poliestere ile işlem gerçekleştirilir. Soğuk kalıplama sürecinde reçine sertleştirici ile sıvı biçimde harmanlanır ve kalıba konulan numunenin üstüne aktarılır. Şekil 3.12, soğuk biçimleme sürecini şematik olarak göstermektedir [21].



Şekil 3. 10. Soğuk kalıplama işlemi [21].

3.6.2.3. Zımparalama ve Parlatma

Numune incelenmeye alındığında, kesilmiş olduğu için yüzey oldukça pürüzlü hale gelir ve bazen deformasyon ve sıklıkla oksitlenme sonucu yüzeyde bir tabaka oluşur. Eğer ters/çevrilmemiş mikroskop kullanılmıyorsa, yüzeylerin düzgün olması gereklidir. Ayrıca mikroskopik inceleme için, numune yüzeyinin fazlasıyla düzgün olması gerekmektedir. Asıl iç yapının analizi için, yüzeyde oluşan deformasyonlu ve oksitlenmiş tabakanın uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla, öncelikle zımparalama işlemi yapılır. Çünkü yüzeydeki derin pürüzler sadece zımparalama ile hızla giderilebilir [21].



Şekil 3.11. Testereyle ayırma işlemi sonrasında numune üstünde oluşan bozulma yüzeyi ve bu yüzeyin zımparalama esnasında eksilen zımpara yoğunluğu ile nasıl giderildiğini göstermektedir (A, B, C bozulmuş alanlar, D ise orijinal iç yapıyı temsil eder) [21].

Zımparalama işlemi, işlem sırasında ısınmayı engellemek ve numuneden kopan parçacıkları uzaklaştırmak için su altında gerçekleştirildiğinde daha etkili olacaktır. Ayrıca, zımparalama işlemi kalın zımparadan başlayıp inceye doğru yapılmalıdır. Bu işlem, çevrilen diskler üzerinde otomatik sistemler yardımıyla veya hareketsiz camlar üzerine koyulan zımpara kağıtları ile manuel olarak gerçekleştirilebilir [21].

Çizelge 3.4. Zımpara kâğıtlarının rakamları ve birim boyutu [21].

Zımpara Tane Numarası	Uzun Yazılış Şekli	Kısaltılmış Yazılımı	Tane Boyutu (µm)
80	4	-	210-177
150	3	-	105-88
180	2	-	88-74
240	1	-	53-45
320	0	1/0	37-31
400	00	2/0	31-27
600	000	3/0	22-18
800	0000	4/0	15-11



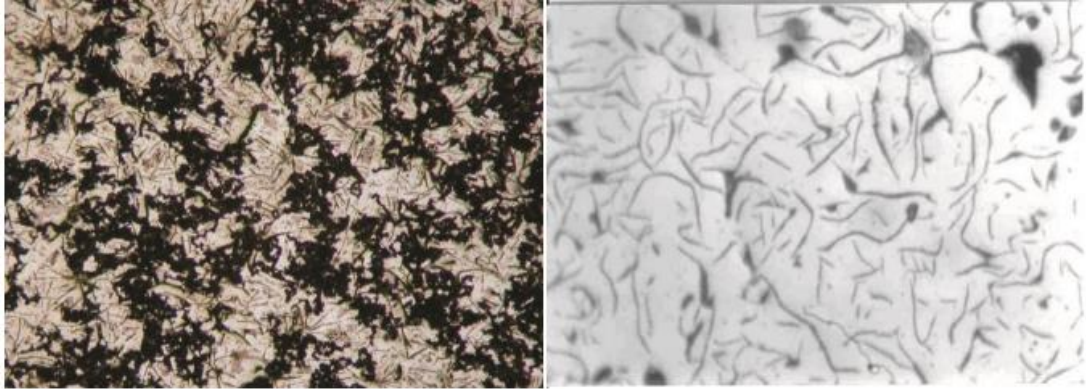
Şekil 3.12. Cu numunesi ile doğru yapılmış zımparalama işlemi [21].

Cilalama işleminin asıl hedefi, üst pürüzlülüğünü azaltarak doğru bir yansıtma özelliğine sahip alan ortaya çıkarmaktır. Cilalama işlemi mekanik, elektrolitik ya da

otomatik cilalama işlemlerinden biriyle gerçekleştirilebilir. Mekanik cilalama işleminde, genellikle 50-600 devir/dak hızında çevrilebilen mekanik cilalama diskleri kullanılır. Şekil 3.15'te gösterilen mekanik parlatma diskleri, parlatma aşamasına bağlı olarak çadır bezi, sert çuha, poplin, kadife, naylon gibi farklı örtülerle kaplanmış plastik malzemeden yapılmıştır. Cilalama yöntemi, zımparalama gibi kalın ve hafif cilalama aşamalarına ayrılabilir. Kalın cilalama, tüysüz kumaşlar ve benzeri malzemeler deneyimlenirken , ihafif cilalatma kısa tüylü çuha veya kadife bezler seçilir [21].



Şekil 3.13. Mekanik parlatma diskleri [21].



Şekil 3.14. Solda ki görsel doğru biçimde zımpara işlemi yapılmadan cilalatılmış gri dökme demir parçasını belirtmektedir. Sağdaki görsel özdeş parçanın doğru biçimde zımpara işlemi sonrası, dağlanmamış biçimini belirtmektedir [21].

3.6.2.4. Dağlama

Cilalanmış numunelerde, dağlama işlemi olmadan bir takım gözlemler yapılabilir; ancak cilalanmış alanlar bütün yönde ışığı denk şekilde aktardığından yapının ayrıntılarını görmek güçleşir. Bu durumu düzeltmek için yapıda kontrast yapmak gereklidir ve bunun için dağlama işlemi kullanılır. Parlatılmış yüzeyleri uygun bir kimyasal çözeltiye maruz bırakarak metalografik incelemelerin çoğunu yapabilir hale geliriz. Dağlama işlemi, deformasyon yapısı, tane boyutu, çökeltiler, mikroyapı, dekarbürizasyon, sementasyon-nitrasyon derinlikleri ve bu gibi parametrenin gözlemlenmesi için büyük öneme sahiptir [21].

3.6.3. Mikroyapı İncelemesi

En genel anlatımla malzemelerin içyapısını inceleyen bilim dalına Metalografi diyebiliriz. Metallerde malzemenin geçmişini açığa çıkarmak ve gelecekte ona ne gibi işlemlerin uygulanabileceğini saptamak, malzemenin içyapılarını inceleyerek özellikleri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Bundan dolayı metalografik gözlemlerde mm-µm arasında ki ebatlar değerlendirme için önemlidir. Öbür yandan nanometre ebattan cm veya m'ye kadar tüm karakteristikler, toplamda malzeme niteliklerini gösterdiğinden, metalografik gözlem için limit; kullanılan donanımlardan yararlanmaktadır [21].

Bazı durumlarda malzemede gerçekleşen hasarlar sonucu malzemenin niteliklerini etkileyen esas faktörlerin ve hasarların gözlemlenmesi gerekir. Bir takım faktörleri gözle görülebilecek makroskobik ebattadır. Örnek verecek olursak çok kristalli numunede belirlenen birimlerin biçim ve ebatı mühim yapısal özelliklerdendir. Bir diğer örnek ise yol kenarlarında bulunan ışıklandırma direkleri ve bariyerler. Bunlara yakın mesafeden bakıldığında makroskobik boyutta taneler görülebilir [21].

3.6.3.1. Optik Mikroskop Analizi

Mikroskobik inceleme, malzemeleri analiz etmek ve karakterize etmek için son derece yararlı bir araçtır. Mikroskobik incelemeler, malzemenin maruz kaldığı hasarı

tespit etme, mekanik kırılma türünü belirleme gibi önemli uygulamalar içerir. Ayrıca, malzemenin doğru ısıtma işlemine tabi tutulup tutulmadığını, yapısal ve kusursal bağlantıların doğru şekilde tespit edildiğinden emin olmak ve bu ilişkileri kurduğumuzda malzemenin özelliklerini tahmin etmek gibi önemli amaçlar da vardır [21].

Optik mikroskoplarla gerçekleşen gözlemlerde, esas bileşenleri görüntüleme ve aydınlatma yöntemi olarak ışık mikroskopları uygulanır. Mikro yapıdaki farklı bölgeler, ışığı farklı şekillerde yansıttığı için mikroskop altında iç yapı görüntülerinde farklı tonlarda (kontrastta) bölgeler gözlemlenir. Mikro yapıların ayrıntılı analizi için yüzey hazırlama işlemine özen göstermek önemlidir. Mikro yapı incelemesi, malzeme özellikleri hakkında birçok bilgi sağlar. Bir bölümünü şu şekilde sıralayabiliriz [21].

Malzemenin tane boyutu, geçmişte hangi işlemlerden geçtiği, uygulanabilir işlem türleri, mikro yapısı, deformasyon miktarı, türü, inklüzyon dağılımı ve yoğunluğu, çatlak, karbürizasyon/dekarbürizasyon, segregasyon durumu, katlama, sertleşme derinliği, nitrasyon, gaz, kaplama kalınlığı ve döküm boşlukları, kırılma türü ve mekanizması, grafit türü ve dağılımı [21].

3.6.3.2. Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope-SEM) Analizi

Gözle görülebilecek ayrıntıların sınırlı olması insan gözünün doğal bir kısıtlamasıdır. Bu nedenle, gözle görülemeyen ayrıntıları gözlemlemek için optik cihazlar tasarlanmıştır. Fakat, bu cihazlar genellikle alınan görüntüler yeterli işlem yapma yeteneğine sahip değildir ve büyütme kapasiteleri sınırlıdır. Bu eksiklikler araştırmacıları yeni çözümler arayışına yöneltmiştir. Elektronik ve optik sistemlerin bir araya getirilmesiyle yüksek büyütme seviyelerinde görüntü işleme ve analizi yapılabilen cihazlar geliştirilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), bu tür amaçlarla kullanılan cihazlardan biridir [22].

SEM analizi, yüksek voltajla hızlandırılmış elektron demetinin numune yüzeyine odaklanması ile başlar. Numune demetinin yüzeyini tarayan bu elektron, elektron ve malzemenin atomları arasında çeşitli etkileşimler oluşur. Bu etkileşimlerden doğan sinyaller kabul edilmiş alıcılar tarafından toplanır, ardından sinyal güçlendiricilerden geçirilir ve son olarak katot ışın tüpünün ekranına aktarılır. Böylece, SEM analiziyle yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir [23].

Çizelge 3.5. Işık ve Elektron mikroskoplarının özellikleri [23].

	Işık Mikroskobu	Elektron Mikroskobu
Aydınlatma Kaynağı	Görünür ışınlar(550nm)	Elektron demeti(=0.005nm)
Çözünürlük	0,25m	0,05nm
Max yakınlaştırma	1400X	300000X

3.6.4. Sertlik Deneyi

Malzeme hasar görmemesi için en sık uygulanan mekanik testlerden biri sertlik testidir. Bu yöntem, malzemeden elde edilen sertlik değeri diğer mekanik özellikleriyle ilişkili olduğundan, bize diğer özellikler hakkında da bilgi sağlar. Örneğin, çelik malzemelerde sertlik değeri ile çekme mukavemeti arasında bir orantı bulunur. Bundan dolayı, yapılan bir sertlik testi bize o malzemenin mekanik davranışları, mukavemet özellikleri hakkında da anlayış sağlar [24].

Sertlik değeri, malzemelerin plastik deformasyona, sürtünmeye, kesilmeye ve çizilmeye karşı gösterdiği direnci ifade eden izafi bir ölçüdür. Bilimsel olarak ise, malzemenin dislokasyon davranışına karşı gösterdiği direnci tanımlar.

Sertlik deneyi, konik ya da küresel geometriye sahip standart bir ucun malzeme üzerine batırıldığında malzemenin bu batırılmaya karşı gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir [24].

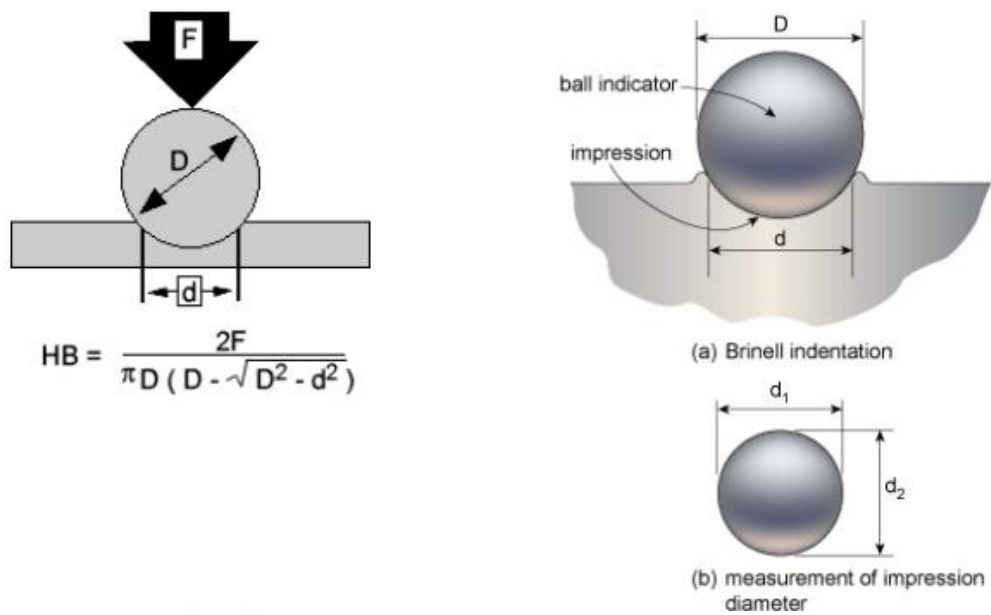
En yaygın kullanılan sertlik ölçüm yöntemleri aşağıda listelenmiştir. Sertlik ölçümleri yapılırken, hangi deney yöntemi kullanılırsa kullanılsın, malzeme numunesi üzerinde birkaç ölçüm yapılmalı ve bu ölçümlerin ortalamasına bakılmalıdır.

1. Brinell sertlik ölçme yöntemi
2. Vickers sertlik ölçme yöntemi
3. Rockwell sertlik ölçme yöntemi

3.6.4.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bir malzeme üzerinde belirli bir yük ve sert bir malzemeden imal edilmiş bir bilye kullanılarak belirli bir süre boyunca uygulanan bu yöntem, bilyenin malzeme üzerinde oluşturduğu iz bırakan çapın ölçülmesiyle gerçekleştirilir [24].

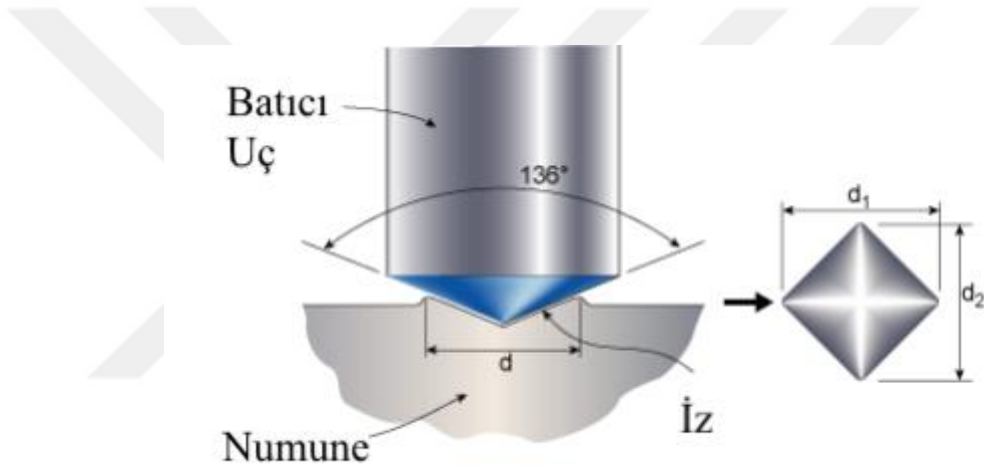
Brinell sertlik değeri (BSD), standart çaplara sahip bir bilye ile bir numuneye belirli bir zaman baskı yaparak oluşturulan izin büyüklüğüne bağlı bir ölçüdür. Bu sertlik değeri, bilyeye uygulanan yükün, malzeme yüzeyindeki küresel iz alanına bölünmesiyle hesaplanır [24].



Şekil 3.15. Brinell sertlik deneyi [24].

3.6.4.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemde, malzemenin sertliğini ölçmek için numunenin üstüne, ucu kare geometriye sahip olan piramit şeklindeki bir uç belirli bir yük altında bastırılır ve yük verme işlemi bittikten sonra numune yüzeyinde oluşan izin köşegen uzunlukları ölçülür. Oluşan iz, d köşegen uzunluğuna sahip batıcı ucun tepe açısı ile aynı tepe açısına sahip (136°) ve kare piramittir. Vickers sertlik değeri, deney yükünün (kg) iz alanına (mm^2) bölünmesiyle hesaplanır [24].



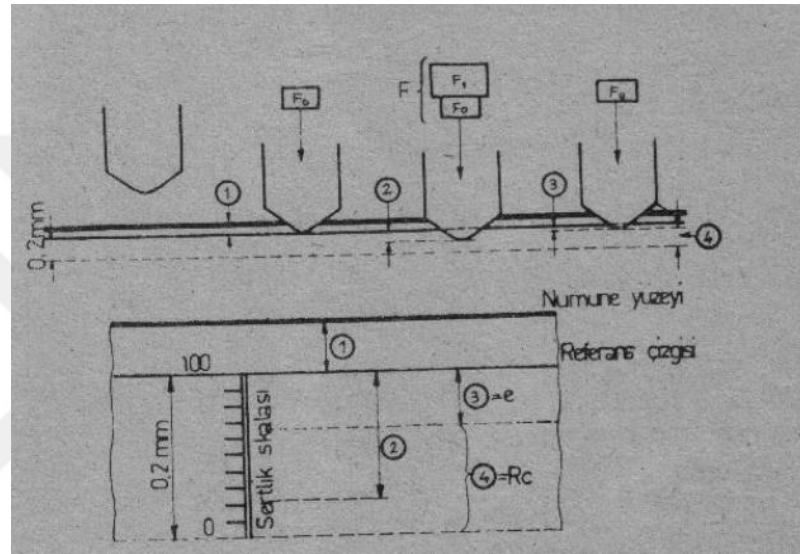
Şekil 3.16. Vickers sertlik deneyi [24].

3.6.4.3. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik değeri (RSD), bir malzemenin yüzeyine batıcı bir uç sayesinde önce sabit belirli bir düşük yük uygulanarak izin dip kısmının başlangıç notu alındıktan sonra, yük daha sonra daha yüksek bir baskı değerinde artırılıp tekrar önceki yüke dönülerek, başlangıçtaki iz derinliğine bakılarak oluşan iz derinliğindeki net yükselişle ters orantılı bir sayıdır [24].

Bu sertlik ölçme testi için öncelikle 10 kgf değerinde düşük bir ön yük uygulanarak ilk yükleme yapılır. Böyle yapılarak uç numune üzerine oturur ve hareket etmemesini sağlar. Cihaz üzerindeki gösterge bu durumda sıfıra ayarlanır. Bu işlem

yapıldıktan sonra daha büyük yük uygulanır. Uygulanan büyük yük, toplam yükü temsil eder ve sadece küçük yükten büyük yüke kadar olan yük artışına bağlı olarak derinlik ölçümü gerçekleşir. Batıcı uç ile büyük yük uygulayıp daha sonrasında ucu kaldırıldıktan sonra, normal prosedüre göre küçük yük hala uygulanırken, cihazın gösterdiği değer kaydedilir. Çelik bilye gibi batıcı bir uç kullanıldığında yüksek yük 100 kg olarak kabul edilir. Küresel konik elmas kullanıldığında ise bu değer 150 kg olarak belirlenir [24]



Şekil 3.17. Rockwell sertlik değerinin ikame edilmesi [24].

BÖLÜM 4

YÜZEY İŞLEMLERİ

Son yıllarda dünya nüfusunun hızla artması, teknolojik ürünlere olan talebin de yükselmesine neden olmuştur. Yüksek işçilik ve enerji maliyetleri, ham madde, üretim, makineler ve sistemlerin maliyetlerini artırmıştır. Bu nedenle, kullanıcılar ürünlerden en yüksek verimi elde etmek istemektedir. Mühendislik ürünlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken üç önemli faktör estetik, güvenlik ve ekonomidir. Makine bileşenleri, taşıdığı yükleri büyük ölçüde yorulma, korozyon ve aşınma gibi yüzey özellikleri ile karşılar. Bu nedenle, yüzey özelliklerinin hayati önem taşıdığı durumlarda, bir makine bileşeninin tümünü işleme tabi tutmadan sadece yüzey özelliklerini iyileştirerek hem maliyet hem de zaman açısından tasarruf sağlamak mümkündür. Bu nedenle, yüzey işlemleri ve yüzey mühendisliği gibi terimler ortaya çıkmıştır [25].

4.1. YÜZEY İŞLEM TEKNİKLERİ

Yüzey işlemleri kaplama ve modifikasyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

4.1.1. Yüzey Kaplamalar

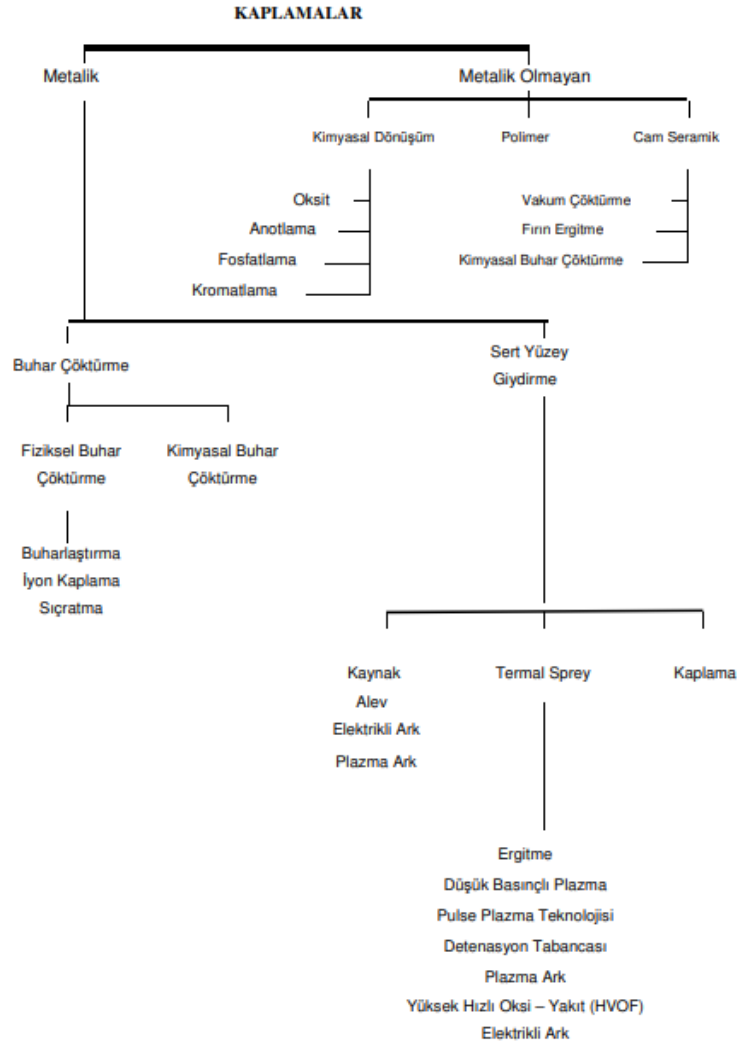
Herhangi bir malzemenin üzerine farklı bir malzemeyle kaplanması, bağlanması veya çöktürülmesi işlemine kaplama adı verilir. Yüzey kaplama yöntemleri, altlık malzemenin termodinamik özellikleriyle ilgili olmadığından geniş bir uygulama alanı sunar [26].

Düşük maliyetli malzemelerin yüzeyleri, üstün tribolojik, estetik ve çeşitli diğer istenen özelliklere sahip olurken, malzeme mukavemet özellikleri korunur. Bu

durum, aynı yüzey özelliklerine sahip ancak maliyeti daha yüksek kendisinden farklı maddelerden üretilen malzemelere göre malzeme ve enerji maliyetlerini büyük ölçüde düşürür. Aşınan makine elemanları ve iş ekipmanlarının yenilenme sıklığı azaldığı için, bu durum maliyetlerin düşmesine neden olur [26].

Yüzey kaplamaları, malzemenin çevresel faktörlere karşı korunmasını sağlamanın yanı sıra estetik bir görünüm kazandırmak amacıyla uygulanır. Bu hedefe ulaşmak için, Çizelge 4.8'da birçok farklı kaplama yöntemi sınıflandırılmıştır [26].

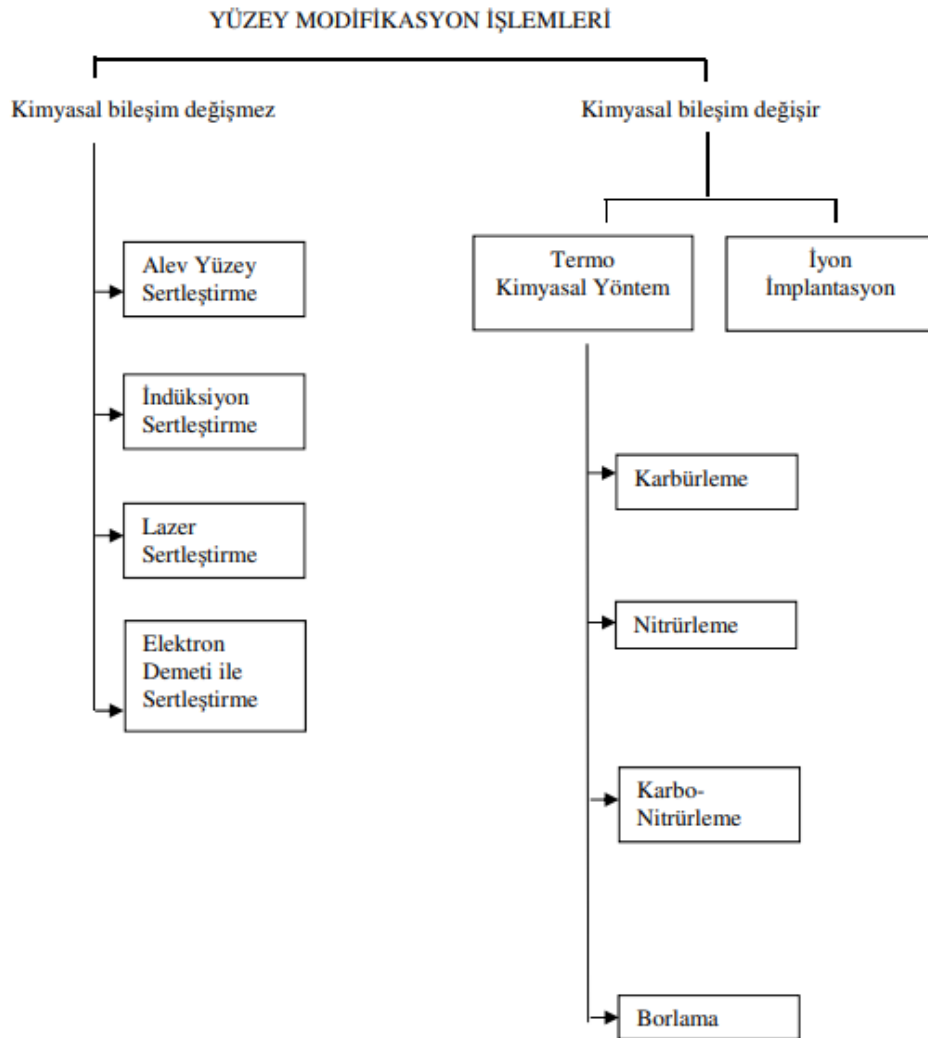
Çizelge 4.1. Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması [26].



4.1.1. Yüzey Modifikasyon İşlemleri

Yüzey sertliğini artırmak için temelde iki ana yöntem bulunmaktadır. Birincisi, malzemenin yüzey kimyasal bileşimini değiştirmeden gerçekleştirilen işlemlerdir. İkincisi ise malzemenin kimyasal bileşimini değiştirerek yapılan işlemleri içerir. Bu ana yöntemlerin dışında, çelik püskürtme, özel haddeleme ve soğuk şekillendirme gibi yöntemlerle yüzey sertliği artırılabilir. Bu tür yüzey modifikasyon işlemleri aynı zamanda termal işlem teknikleri olarak da adlandırılır [26].

Çizelge 4.2. Yüzey modifikasyon yöntemlerinin sınıflandırılması [26].

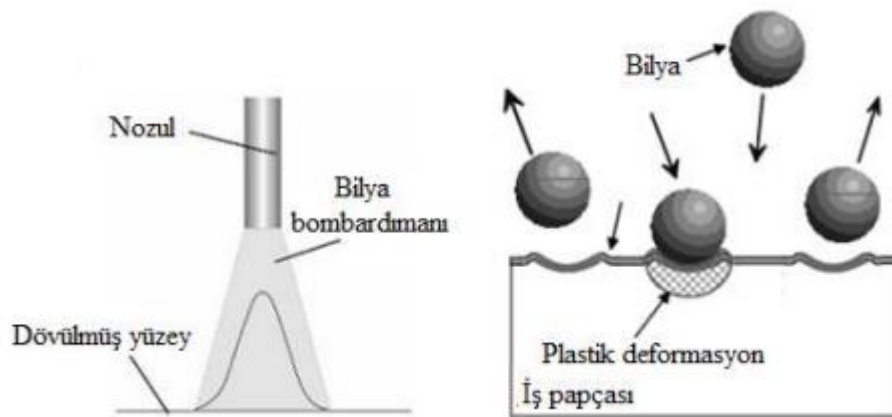


4.2. MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİ

Mekanik yüzey işlemleri, malzemenin üzerine harici işleme araçlarıyla uygulanmasıyla malzeme üzerinde plastik deformasyon oluşturan bir işlem türüdür. Bir malzemeye mekanik yüzey prosesleri uygulandıktan sonra parça yüzeyinde dislokasyonların çoğalmasıyla beraber yüzey yapısında değişmektedir. Malzemeye uygulanan bu yüzey prosesleri ile malzemelerin aşınma, korozyon ve yorulma davranışlarının arttırılması hedeflenmektedir [25].

4.2.1. Bilyalı Dövme

Bilyalı dövme, parçanın, malzemelerin yüzey üstü ve yüzeyin altı özelliklerini geliştirmek amacıyla sıklıkla kullanılan bir mekanik yüzey işleme prosesidir. Bilyalı dövme işlemi, yüksek hızlarda ve sürekli olarak malzeme yüzeyine çarpan bilyaların kullanıldığı bir yöntemdir ve bu sayede malzemenin yüzey ve yüzey altı özellikleri önemli ölçüde iyileştirilir [27]. Şekil 4.20 bilyalı dövme işleminin şematik bir gösterimini sunmaktadır.



Şekil 4.1. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi [27].

Bilyalı dövme işlemi, yüzeye yakın bölgelerde kalıntı basma gerilmeleri oluşturarak tane boyutunu geliştirir ve malzemelerin mikro sertliğini artırır. Bilyalı dövme işlemi

sırasında ortaya çıkan plastik deformasyon, yüzeyin altında ve üstünde tane incelmeye yol açar. Tane incilmesi, malzemenin mekanik özellikleri olan sertlik ve dayanıklılık gibi yönlerde gelişmeler sağlar [27].

Bilyalı dövme işlemi, mekanik özellikleri iyileştirmek için havacılık endüstrisinde kullanılır; uçak iniş takımları ve jet motorlarının kompresörlerinde malzeme kütlesi ve boyutunu değiştirmeden malzeme ömrünü ve dayanıklılığını artırmak amacıyla uygulanır [27].

Aynı zamanda bu yöntem makine dişlilerinde çatlak ilerlemesini ve diş kırılmalarını en aza indirmek ve yüzey kalitesini arttırmak için kullanılır. Bilyalı dövme işlemi sonrası meydana gelen değişiklikler Şekil 4.21’ te gösterilmektedir [27].



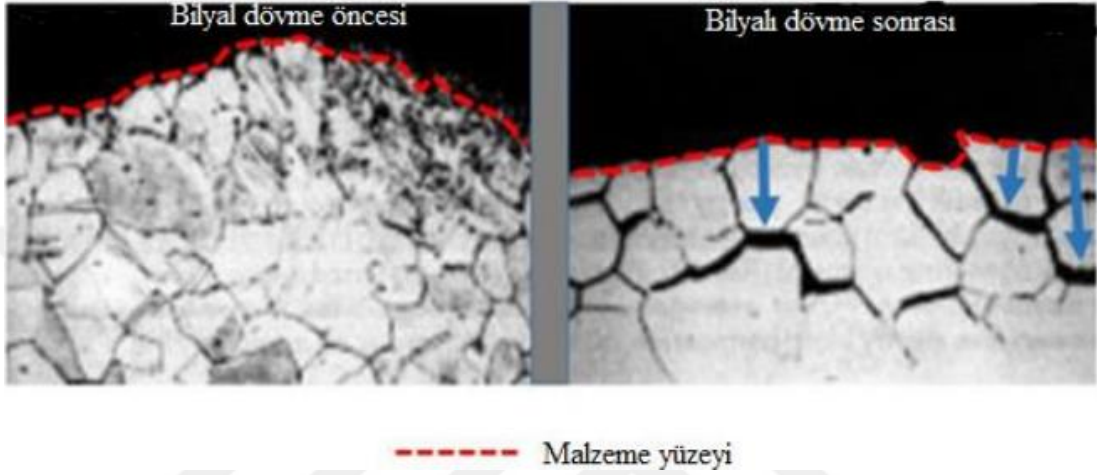
Şekil 4.2. Bilyalı dövme sonrası değişen özellikler [27].

Bilyalı dövme işlemi, malzemelerin mikroyapısını iyileştirmek ve yorulma, aşınma, korozyon gibi özelliklerini artırmak için kullanılır.

Malzeme üzerinde oluşan korozyon, aşınma ve yorulmanın olumsuz etkileri malzemenin üst kısmından iç kısmına doğru ilerler. Oluşan bu olumsuz etkilerin engellenmesi için işlenen malzemenin iç yapısındaki tane boyutlarının nano ölçekli yapıya dönüştürülmesi hedeflenir. Tüm malzeme yapısını nano taneli hale getirmek

yerine, sadece malzemenin yüzeyini nano taneli bir yapıya dönüştürerek dayanıklılığı artırmak mümkündür [25].

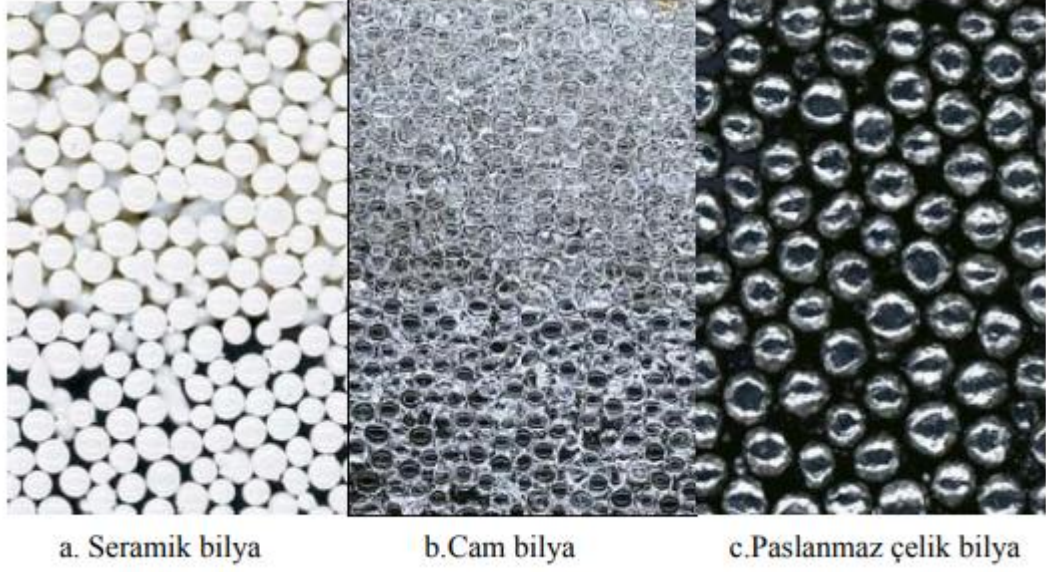
Şekil 4.22’de Bilyalı dövme işlemi uygulanarak yüzeyi işlem görmüş paslanmaz çelik numunenin yüzeyindeki tane yapısının değişimi gösterilmiştir [25].



Şekil 4.3. Bilyalı dövme işlemi sonrası tane yapısı [25].

4.2.1.1. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri

Bu işlem için farklı tipte bilya türleri mevcuttur. Kullanılan bilya türleri arasında seramik, dökme çelik, dökme demir, çelik, cam, paslanmaz çelik ve çelik teller mevcuttur. Şekil 4.23'da çeşitli bilya türlerinin resimleri görülmektedir. Çelik bilyalar, S70 ile S930 arasında değişen standart değerlere sahiptir. Standartın başında yazan "S" harfi, bilyanın hammaddesinin çelik olduğunu gösterir. Bu değerler, bilya çaplarını 10000 de bir inçlik bir hassasiyetle ifade eder. Çizelge 4.10, pratikte kullanılan bilya türlerini ve malzemelerini, Çizelge 4.11 ise bilyaların standartlarını ve sertlik değerlerini sunmaktadır [22].



Şekil 4.4. Farklı uygulamalarda kullanılan bilya tipleri [22].

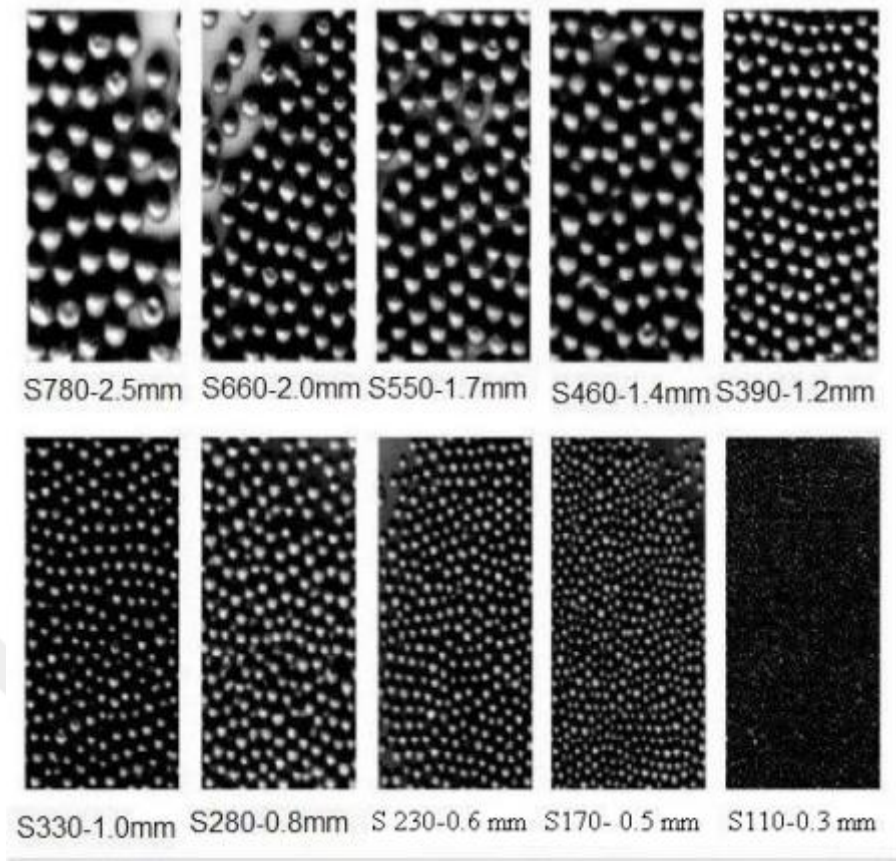
Çizelge 4.3. Bilya tiplerinin sınıflandırılması [22].

Bilya Tipleri		
Demir İçerenler	Yuvarlatılmış Kesme Tel, Çelik Bilya, Paslanmaz Çelik Bilya	
Demir Olmayanlar	Metalik Olanlar	Alüminyum, Çinko, Bronz, Bakır
	Metalik Olmayanlar	Kürecik Seramik Bilya, Cam

Çizelge 4.4. Bazı bilya çeşitlerinin standartları ve sertlik değerleri [22].

Bilya Tipi	Standart	Sertlik
Çelik Bilya	AMS 2431/1 veya AMS 2431/2	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Tel Kesme	AMS 2431/3 veya AMS 2431/8	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Cam Bilya	AMS 2431/6	48-52 HRC
Seramik Bilya	AMS 2431/7	58-63 HRC

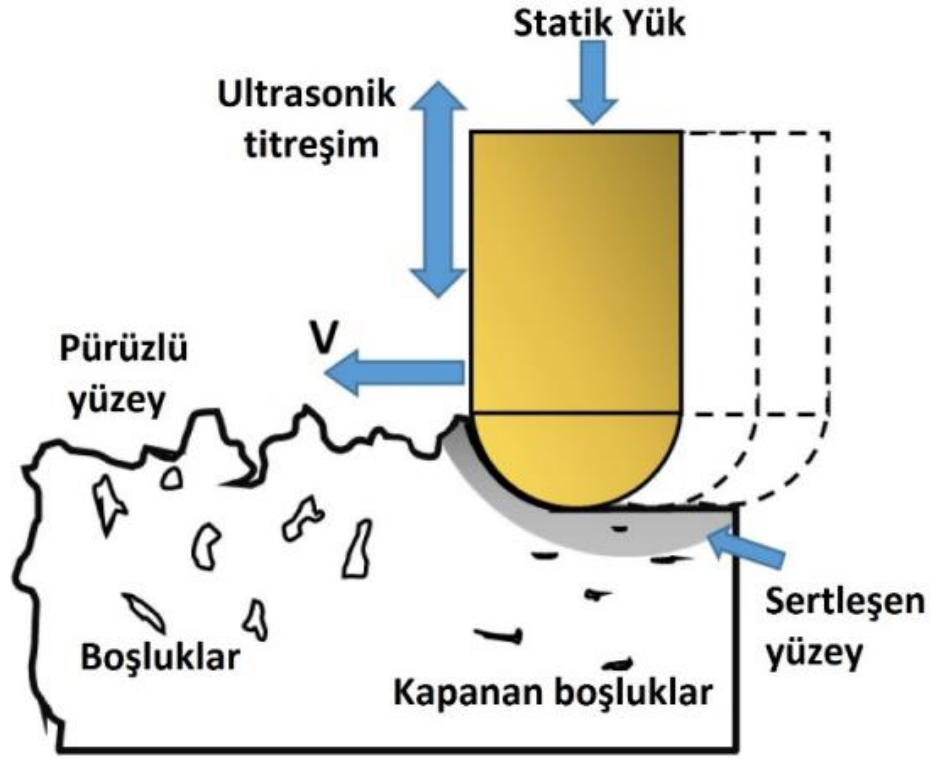
Bilya boyutları, parçaya uygulanan bilyalı dövmenin şiddetiyle birlikte artış gösterir. Bilyanın hızı boyunca taşıdığı kinetik enerji, yüzeye eksiksiz bir şekilde iletilir, bu nedenle bilyanın kütlesi kinetik enerji aktarımını belirlemede büyük bir öneme sahiptir. Bilya büyüklükleri, çaplarına dayalı olarak belirlenmiştir. Şekil 4.24, bilyaların boyutlarına bakılarak nasıl gruplandırıldığı açıklanmaktadır [22].



Şekil 4.5. Bilyaların büyüklüklerine göre sınıflandırılması [22]

4.2.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu

Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu (UNYM), malzeme yüzeyine yoğun plastik deformasyon uygulayarak nanoyapılı bir yüzey oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir; bu amaçla ultrasonik titreşim kullanılır. UNYM yöntemi, malzeme yüzeyinde basınçla kaynaklanan gerilim artışı ve yüzey sertliği artışı sağlayarak aşınma ve yorulma özelliklerinde geliştirmeler sağlayabilir. Bu yöntem, henüz yeni geliştirilmiş olmasına rağmen, farklı yüzey modifikasyon teknikleri arasında, malzemenin iç yapısını bozmadan büyük taneli yapılarından nanometre ölçekli yapılar elde etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. Farklı metalik malzemeler üzerinde uygulanan aşırı plastik deformasyon işlemi, malzemenin mekanik ve tribolojik niteliklerini olumlu şekilde etkilediği gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, malzeme yüzeyinde oluklu bir yapı ve istenilen sayıda mikro çukurlar oluşturmak da mümkündür [28].



Şekil 4.6. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyon işleminin şeması [28].

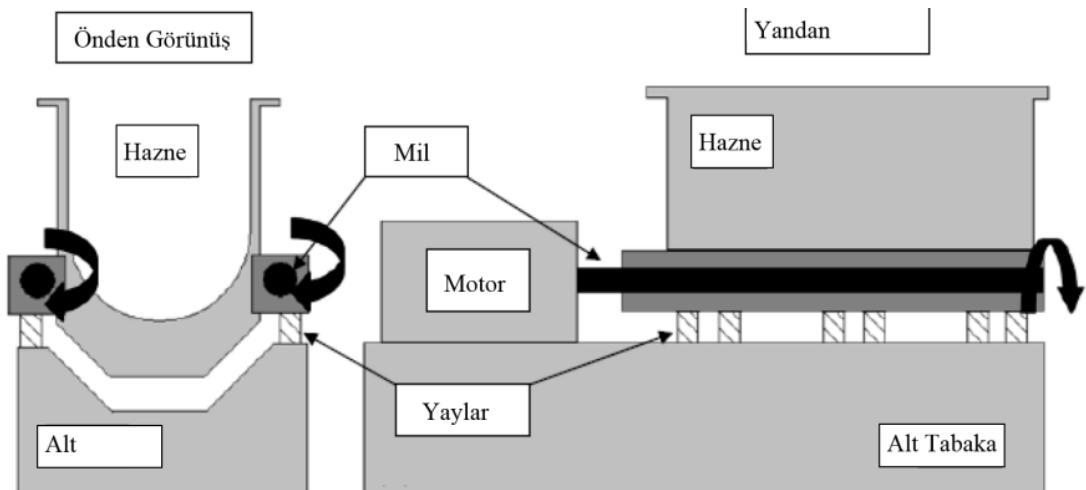
4.2.3. Ultrasonik Bilyalı Dövme İşlemi

Ultrasonik bilyalı dövme işleminde, bir ultrasonik dönüştürücü ile titreşimler oluşturularak atışlar sağlanır. Özel boyutlara sahip pürüzsüz çelik bilyeler, bir titreşim jeneratörü tarafından titreştirilerek kapalı bir odada ultrasonik titreşimlere neden olur. Oluşan bu titreşim genel olarak odada 50 Hz ile 20 kHz'lik titreşim frekansına sebep olur. Bu titreşimli ortamda gerçekleşen bilyalı dövme işlemi, malzeme yüzeyine yüksek gerinim oranlarına sahip, çok yönlü ve tekrarlanan darbelerle plastik deformasyonlara yol açar. Bu süreç, malzeme tanelerinin boyutunu kademeli olarak nanometre ölçeğine kadar iyileştirerek malzeme üzerinde olumlu etkiler sağlar [29].

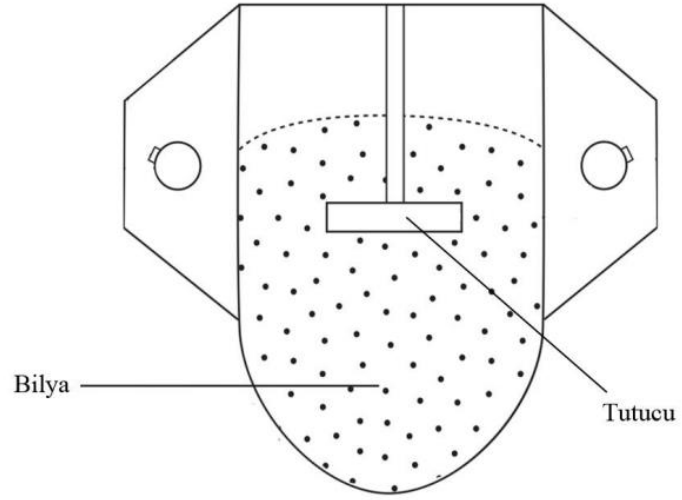
4.2.4. Titreşim Destekli Yüzey Aşırı Plastik Deformasyon (TD-YAPD)

Titreşim Destekli Yüzey Aşırı Plastik Deformasyon yöntemi, titreşen bir hazneye doldurulmuş bilyalar içerisine malzemenin sabitlenerek içerisine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir işlemdir. İşlem uygulanan numune ve bilyalar arasındaki hareket belirgin bir şekilde artar. İşlem, 400 mikronluk küçük bir alt tabakadaki yüzey deformasyonlarına sebep olur. Basma artık gerilmelere ve sertleşmeye sebep olan bu işlem geleneksel bilyalı dövme işlemiyle (GBD) benzerdir fakat GBD'den daha iyi bir malzeme yüzeyine yol açar [30].

Titreşim destekli yüzey aşırı plastik deformasyon cihazı, numunenin serbestçe bilyalarla titreşmesi yerine Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'da görüldüğü gibi numunenin tutucu vasıtasıyla hazne içine sabitlendiği, titreşimli bir tekne yüzey işlem cihazıyla benzerlik gösterir. Numunenin sabitlenmesiyle bilyalarla numune arasındaki hız kademeli olarak yükselir, bu da daha iyi sonuçlar ortaya çıkarır. Cihaz aşındırıcı ve küresel özelliği göstermeyen bilyalarla dolu bir süspansiyon sistemi (yaylar) ve bir titreşim sistemi içerir. Bir motor yardımıyla, dengesiz miller kullanılarak oluşturulan titreşim sistemi sayesinde hazneye ve bilyalara enerji iletilir, bu da makine içerisinde hareket sağlar. Ayrıca oluşan vibrasyonun genliği, millerin dengesi ve yay sertliği değiştirilerek ayarlanabilir [30].



Şekil 4.7. TD-YAPD cihazı gösterimi [30].



Şekil 4.8. Malzeme tutucu parçanın hazne içerisindeki yeri [30].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. MALZEME SEÇİMİ

Bu deneysel çalışmada R260 ve R350HT kalite raylar kullanılmıştır. Her iki kalite raydanda uygun numuneler alınarak, yüzey işlemleri uygulanmış ve bu işlemler sonucunda malzemelerin mikroyapı karakterizasyonu, sertlik değeri ölçümü, yüzey pürüzlülüğü ölçümü ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üzerine çalışılan R260 ve R350HT kalite rayların EN 13674-1 standardına göre kimyasal kompozisyonları Çizelge 5.12’de bazı mekanik özellikleri ise Çizelge 5.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 5 1. R260 ve R350HT raylarının kimyasal kompozisyonları (%) [31].

Ray Türü	C	Si	Mn	P Max.	S	Cr Max.	Al Max.	V Max.	N Max.
R260	0.60/ 0.82	0.13/ 0.60	0.65/ 1.25	0.030	0.008/ 0.030	0.15	0.004	0.030	0.010
R350HT	0.70/ 0.82	0.16/ 0.60	0.65/ 1.25	0.025	0.008/ 0.030	0.15	0.004	0.030	0.010

Çizelge 5.2. R260 ve R350 raylarının sertlik ve uzama değerleri [31].

Ray Kalitesi	Sertlik(HB)	Uzama(%)
R260	260-300	13,5
R350HT	359-390	9

5.2. NUMUNE HAZIRLAMA

Planlanan deneysel çalışmalar için R260 ve R350HT kalite raylardan Şekil 5.28’de görüldüğü gibi rayın mantar kısmından 4 er adet numune hazırlanmıştır. Bu numuneler titreşim destekli bilyalı dövme işlemi, ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu ve işlem görmemiş numune olarak kullanılmak üzere hazırlanmıştır.



Şekil 5 1. (a) Ray geometrisi. (b) Numunelerin alındığı kısım. (c) Kesilmiş R260 ray numunesi. (d) Kesilmiş R350HT ray numunesi

5.2.1. Mekanik Yüzey İşlemlerinin Uygulanması

Çeşitli tür mekanik alan yöntemlerin şahsi olarak yapılmasının R260 ve R350HT kalite raylarının mekanik ve mikroyapı niteliklerine olan tesiri uğraşın esas amacını oluşturmaktadır. Çalışmada TDBD ve UNYM işlemlerinin yapılması tasarlanmıştır.

5.2.1.1. Titreşim Destekli Bilyalı Dövme (Tdbd) İşlemi Parametrelerin Saptanması

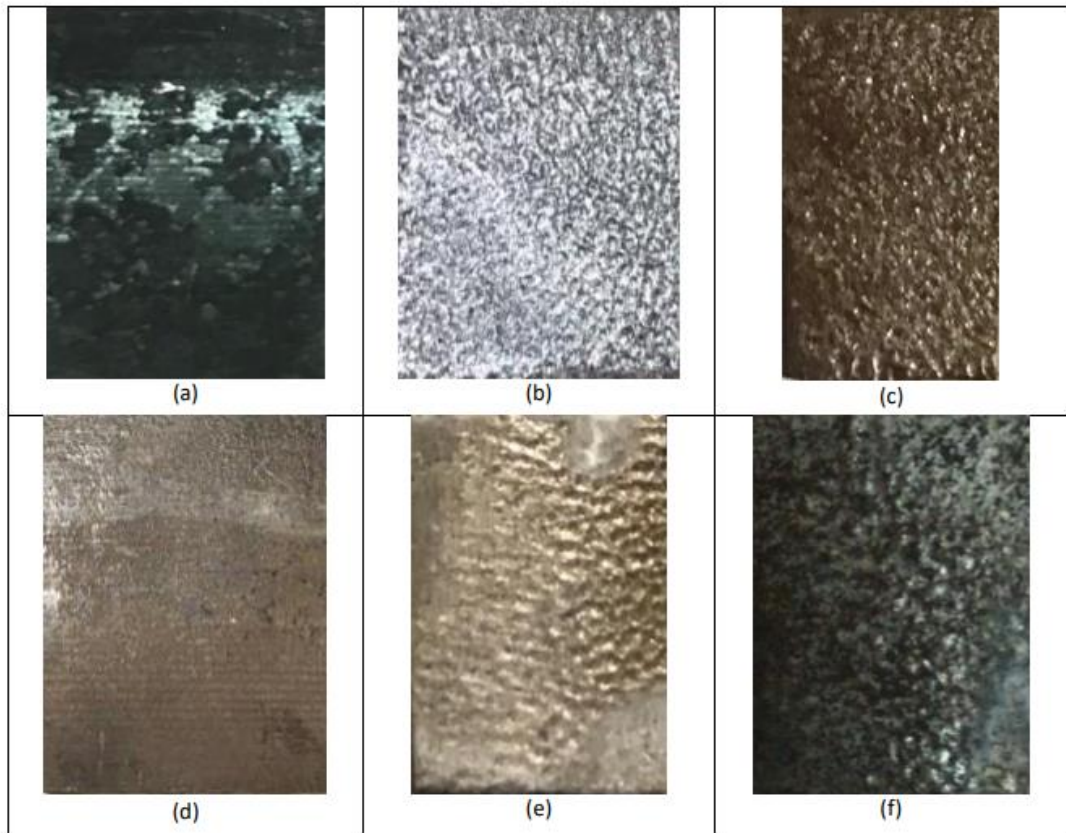
İşlem Titreşim Destekli Yüzey Aşırı Plastik Deformasyon (TD-YAPD) cihazında gerçekleştirilmiştir. TD-YAPD İç i bilya materyalı ile dolu sarsılan bir hazneye

oturtulmuş bir parçanın yerleştirilmesiyle oluşan bir yöntemdir. Bu işlem, yüzeyin altındaki tabakada mikroyapı ve mekanik özellik değişikliklerine sebep olur [30].

Bu çalışmada, uygulanan yüzey işleminin parametreleri Çizelge 5.14’de verilmiştir. Ayrıca İşlem gören ve işlem görmemiş numuneler Şekil 5.29’de gösterilmiştir.

Çizelge 5 3. TDBD yöntem değişkeni

Numune	Ray Kalitesi	Frekans (Hz)	Bilya Tipi	Bilya çapı (mm)	Zaman (saat)
N1	R260	40	Çelik	3	4
N2	R260	50	Çelik	3	10
N3	R350HT	40	Çelik	3	4
N4	R350HT	50	Çelik	3	10



Şekil 5.2. TDBD işlemine tabi tutulan (a) İşlem Görmemiş R260 numunesi. (b) N1. (c) N2. (d) N5. (e) N3. (f) N4.

5.2.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (Unym) Parametrelerin Belirlenmesi

Bu uğraşda, R260 ve R350HT kalite ray numunelerinin üst yüzeyinde deformasyon etkili ve yüzey pürüzlülüğü nispeten daha düşük bir yüzey tabakası oluşturmak için UNYM yöntemi kullanılmıştır. Ultrasonik bir ileticiye ait olan bir WC uç ile numune alanında saniyede 20.000 kez vurarak bir deformasyon oluşturulmuştur. Her bir numune elastik bir imalat sistemi taşıyıcısı üzerinde manyetik bir plakaya yerleştirilmiş ve bu plaka üzerinde 2000 mm/dak'lık bir suratle karşılıklı olarak hareket etmektedir. R260 kalite ray numunesi N5 ve R350HT kalite ray numunesi N6 numunelerinin ikisinde aynı işlem parametreleri uygulanmıştır. Çizelge 5.15'de UNYM işlem şartları gösterilmektedir.

Çizelge 5 4. UNYM işlem parametreleri.

Frekans (kHz)	Genlik (μm)	Hız (mm/dak)	Yük (N)	İlerleme Hızı(μm)	Bilya Çapı(mm)	Bilya Malzemesi
20	30	2000	30	70	2.38	WC

5.3. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Bu deneysel çalışmada TDBD ve UNYM işlemlerinin mikroyapısal olarak malzeme yüzeyinde ve işlem gören yüzeyin altında gerçekleşen değişiklikleri belirlemek hedeflenmektedir. Yapılan TDBD ve UNYM işlemleri sonucu malzeme yüzeyinde ve yüzeyin altında kalan kısımda deformasyon sonucu yapısal değişiklikler beklenmektedir. Mikroyapı karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile yapılmıştır.

Mikroyapı çalışmalarında standard metalografi prosedürleri uygulanmıştır. TDBD ve UNYM işlemleri uygulanan numuneler ilk olarak hassas kesme makinesinde kesildikten sonra bakalite edinilmiştir. Bakalite edinilen numuneler 100-2500 kalite silisyum karbür (SiC) zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve sırasıyla 6 μm , 3 μm ve

1 μm elmas süspansiyonlarıyla cilalama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri için Carl Zeiss Ultra Plus görüntülü electron mikroskobundan (SEM) faydalanılmıştır

5.4. X-IŞINI KIRINIM (XRD) ANALİZİ

XRD incelemesi Rigaku Ultima IV marka cihazda malzemenin yapısındaki değişiklikleri belirlemek nedeniyle yapılmıştır. XRD analizi 40 kV gerilim ve 40 mA ile, 10 °-90° açı mesafelerinde, 0.04°'lik etap büyüklüklerinde, dakikada 3 derece süratinde yapılmıştır. FWHM ölçüm verileri, MATLAB R2015b yazılım programıyla tekrar belirlenip ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.30'de XRD cihazı gösterilmiştir.



Şekil 5.3. XRD cihazı.

5.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ

İşlem görmemiş R260 ve R350HT kalite ray numunelerinin TDBD VE UNYM yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülük analizleri için Mitotoyo etiketli yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı denenmiştir. Numune yüzeylerinden 3 ayrı konumdan ölçüm yapılmış ve yapılan ölçümlerin aritmetik ortalamasıyla Ra, Rq ve Rt değerleri saptanmıştır. Şekil 5.31’de Yüzey pürüzlülük ölçüm makinesi görülmektedir.

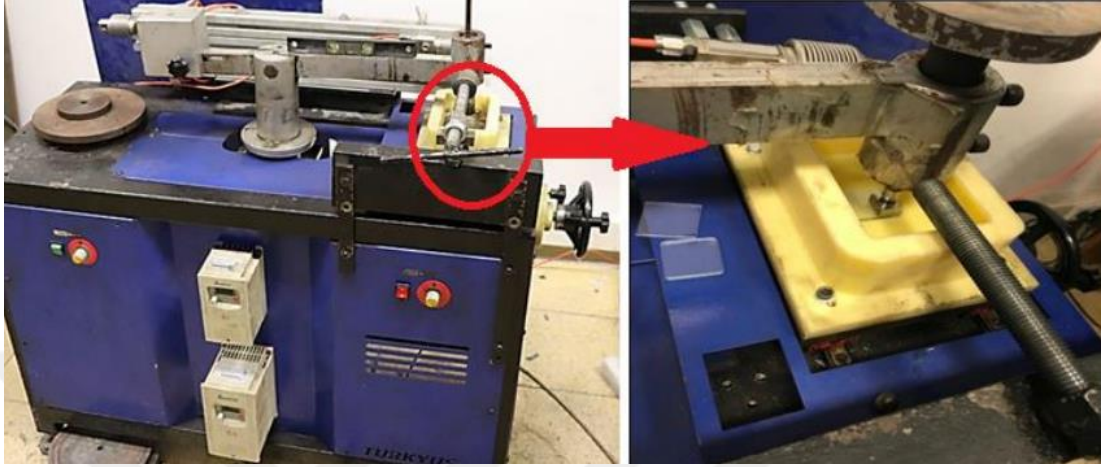


Şekil 5.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

5.6. AŞINMA TESTİ

İşlem görmemiş ve mekanik yüzey işlemleri yapılmış R260 ve R350HT kalite rayların aşınma tesleri Şekil 5.32’de gösterilen aşınma test ünitesinde, oda ısısında kuru kayma koşullarında yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerine 6 mm’lik çapa sahip çelik bilyeler sürterek, 50 hz durağan kayma hızında iki farklı yük (10 N ve 15 N)

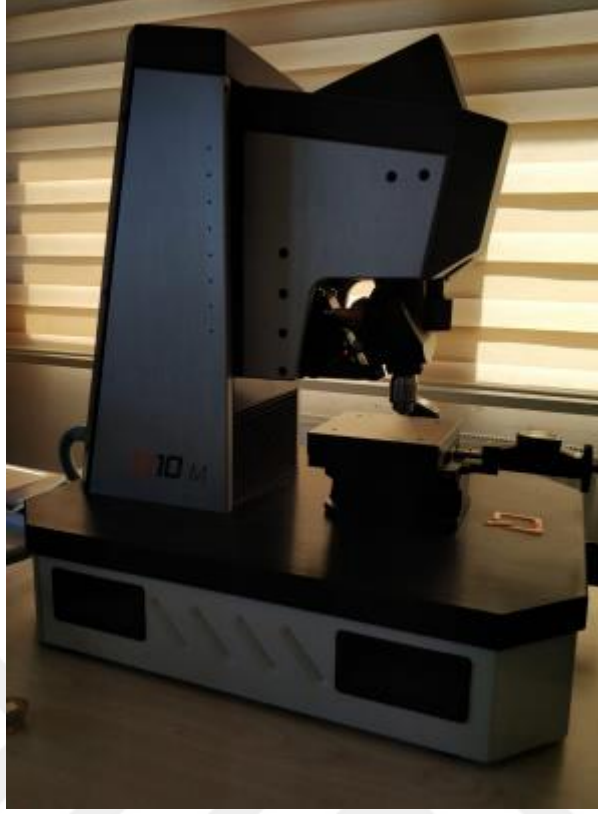
yapılmıştır. Tüm numuneler için 200 metre kayma mesafesi belirlenmiştir. Aşınma deneyinin sonunda aşınma izleri taramalı electron mikroskobu ile ayrıntılı bir şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 5 5. Aşınma test ünitesi.

5.7. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

TDBD ve UNYM işlemleri sonrasında sertlik değerlerini saptamak amacıyla numunenin yüzeyden dik kesit bölge 3 farklı noktadan 15 mikron aralıklarla ölçüm yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Qness Q10 M marka cihazda yapılmıştır. Ölçüm, Vizckers uç kullanılarak 20 gr yükleme, 10 saniye yükleme süresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.33’de mikro sertlik cihazı gösterilmiştir.



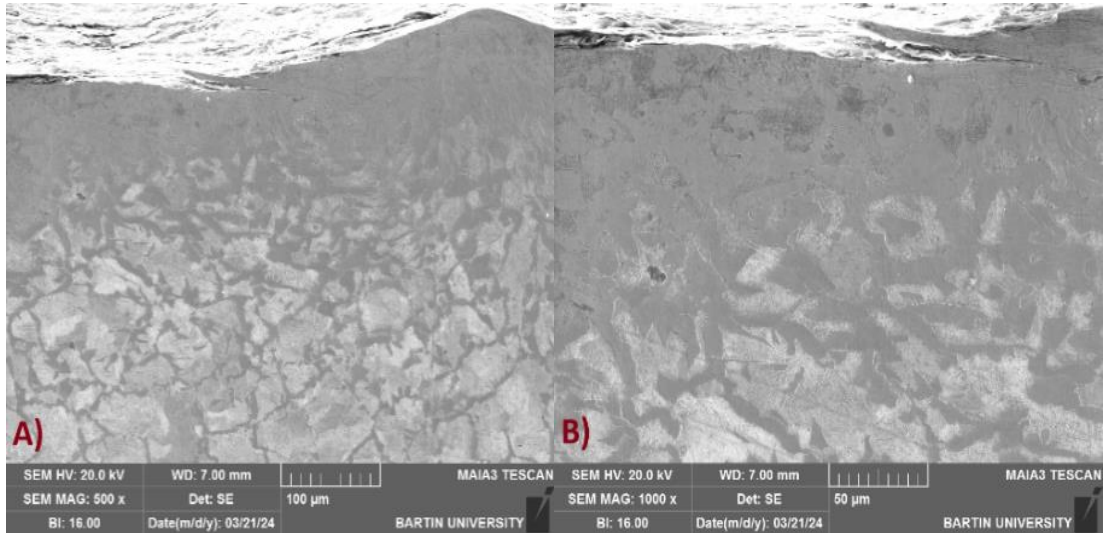
Şekil 5.6. Mikro sertlik cihazı.

BÖLÜM 6

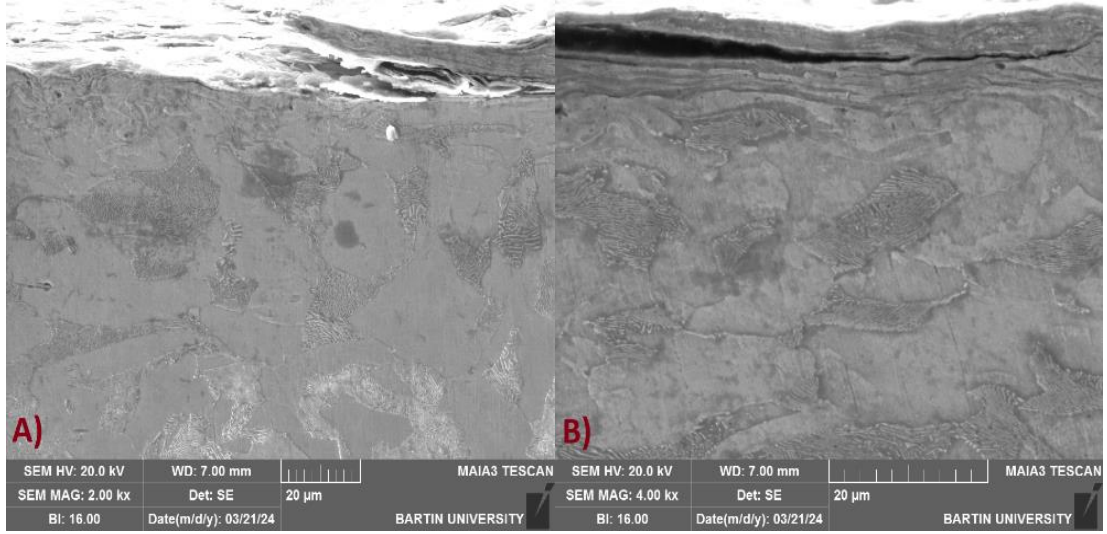
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Mikro yapı analizlerinin detaylı incelemesinden önce numunelere uygulanan yüzey işlemleri sonrası mikroyapı değişimlerinin belirlenmesi için N1,N2,N3,N4,N5,N6 ve R350HT UNYM numunelerinin taramalı elektro mikroskopta mikroyapı incelemeleri tamamlanmıştır. Numunelerin iç yapıları incelendiğinde TDBD işlemi ile düz olan yüzeyin işlem sonrası deforme olduğu ve yüzeyin hemen altında tane değişiminin olduğu gözlenmektedir. Deformasyon etkisinin ferlit ve perlit yapılarında değişime gittiği taneleri belirli bir düzende oluklandırdığı dikkat çekmektedir. Şekil 6.34 ve 6.35’de N1 numunesinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri mevcuttur.

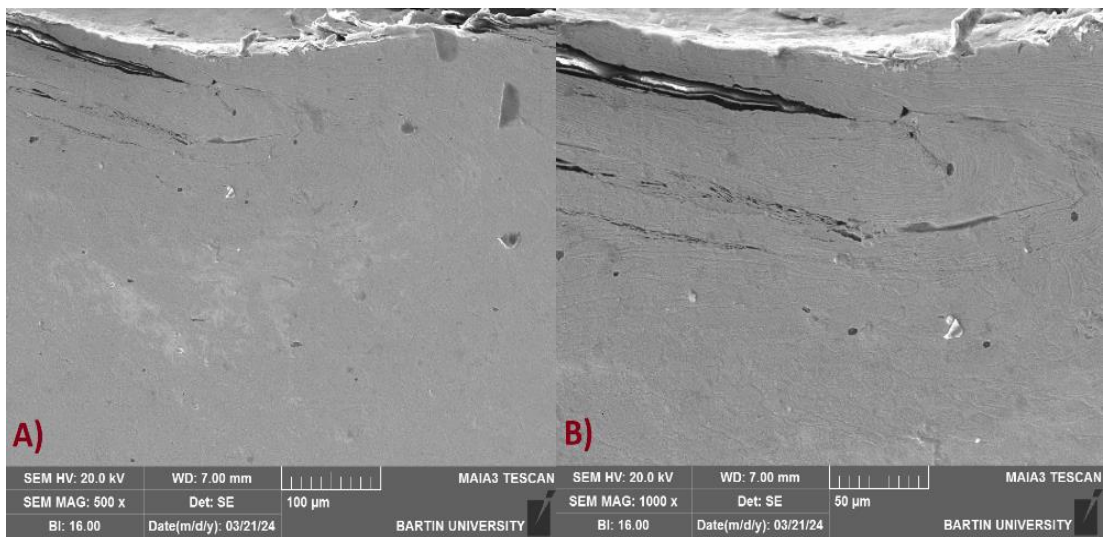


Şekil 6.1. TDBD işlemi görmüş N1 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x

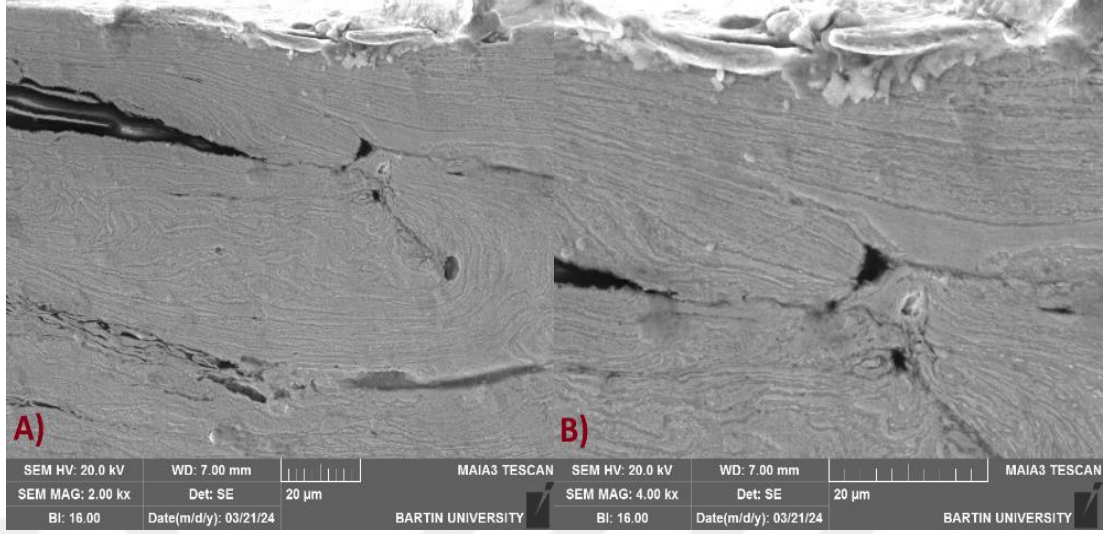


Şekil 6.2. TDBD işlemi görmüş N1 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x

Şekil 6.36 ve 6 37'de N2 numunesinin deformasyon sonrası farklı büyütmelerdeki mikro yapıları görülmektedir. Deformasyon süresinin artması yüzey bölgesinde klasik ferrit-perlit mikroyapı oluşumunu tamamıyla değiştirip deformasyon etkisine bağlı olarak ultra ince taneli belirli açı ve yönlenmelerle yönlendirilmiş tane yapılarının oluşmasına sebebiyet vermiştir. Mikro yapının belirgin bir şekilde değişmesi özellikle yüzey ve alt tabakada artık gerilme sertlik aşınma ve yorulma gibi yüzey bazlı etkilerin büyük ölçekte değişebileceği sinyali oluşturmaktadır.

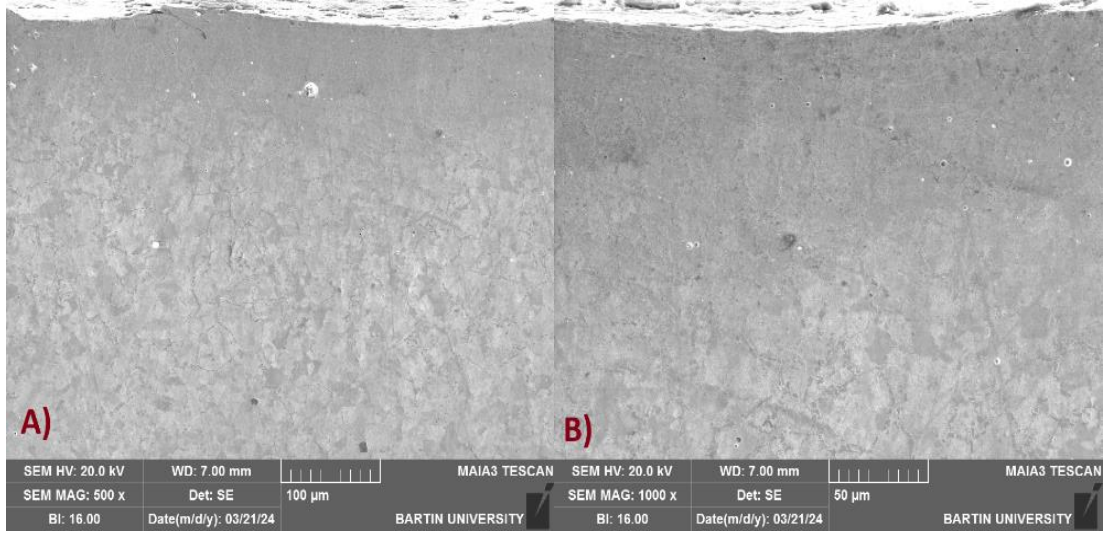


Şekil 6.3. TDBD işlemi görmüş N2 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x

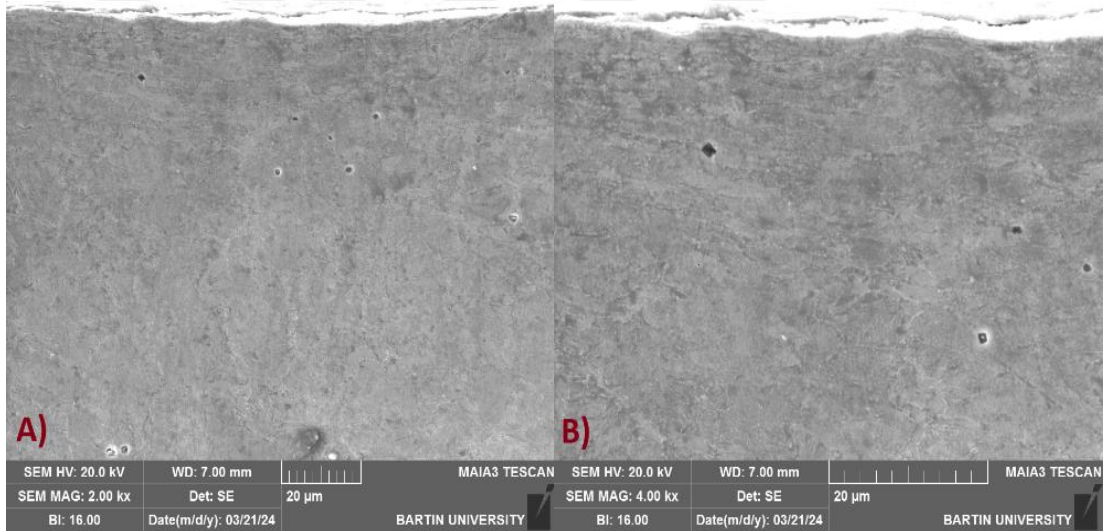


Şekil 6.4. TDBD işlemi görmüş N2 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x

Şekil 6.38 ve 6.39'da N3 numunesi yüzey bölgesinde rayın karakteri gereği mevcut olan sert tabaka, deformasyonun etki ve derinliğini belirli ölçüde durdurmuş ve yüzeydeki etkiyi sınırlandırmıştır. Ancak plastik deformasyonun sürekli olması, yüzeyin hemen altında oluşan deformasyonu engelleyememiş belirli ölçüde tane yapısının değişimine, tane boyutunun iç yapı ile kıyaslandığında oldukça küçülmesine neden olmuştur. Nispeten daha sert malzemelerde yüzey bütünlüğünün de korunması ile beraber tane incelmesi ve sertlik artışı gibi durumların birlikte gerçekleştirilmesinin malzemenin performansının arttırılmasında muhtemel katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.



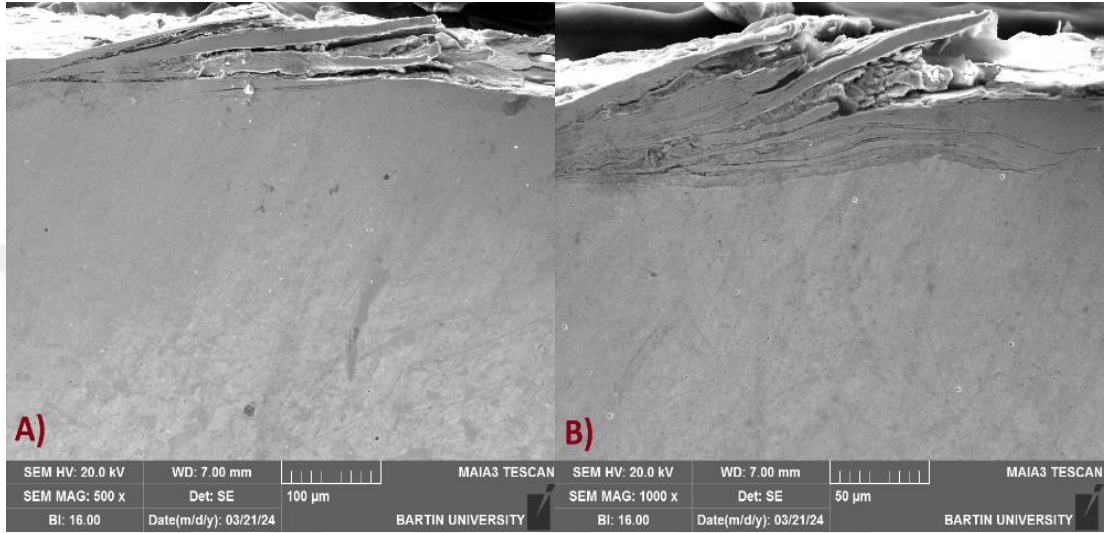
Şekil 6.5. TDBD işlemi görmüş N3 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x



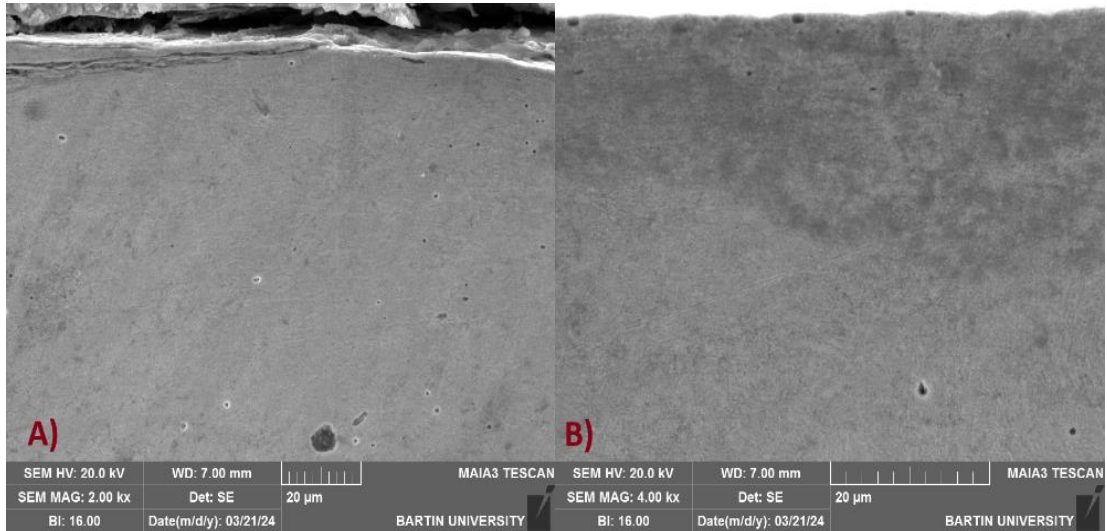
Şekil 6.6. TDBD işlemi görmüş N3 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x

Şekil 6.40 ve Şekil 6.41 incelendiğinde deformasyon süresi ve frekansın artırılması yüzey bölgesinde deformasyon etkisini belirginleştirmiştir. Deformasyon derinliğini arttırmıştır. Malzemenin sertliği yüzeydeki deformasyonun büyük olmasını engellemiştir. Ancak karşılıklı sert blokların yüksek frekanslarda ve uzun sürelerde birbirlerine teması sonucu oluşan gerilmeler yüzey bölgesinde çatlaklara sebep olmuş ve lokal olarak ayrılmalar gerçekleşmiştir. Özellikle yüksek frekans ve uzun sürelerde dövme işlemlerinde bu duruma mekanik performans açısından dikkat edilmesi gerekmektedir. Yorulma performansı incelemelerinde bu durum çatlak

başlangıcı oluşturmaya sebep olup yorulma ömrünü beklenenden daha kötü seviyelere çekebileceği öngörülmelidir. Şekillerde de dikkat çekildiği üzere bu etkiler lokal olup ilgili hasar analizleri belirli bölgeler için sebepleriyle birlikte irdelenerek mekanik performans analizleri ve değerlendirmeleri bu gözlemler ışığında gerçekleştirilmelidir.



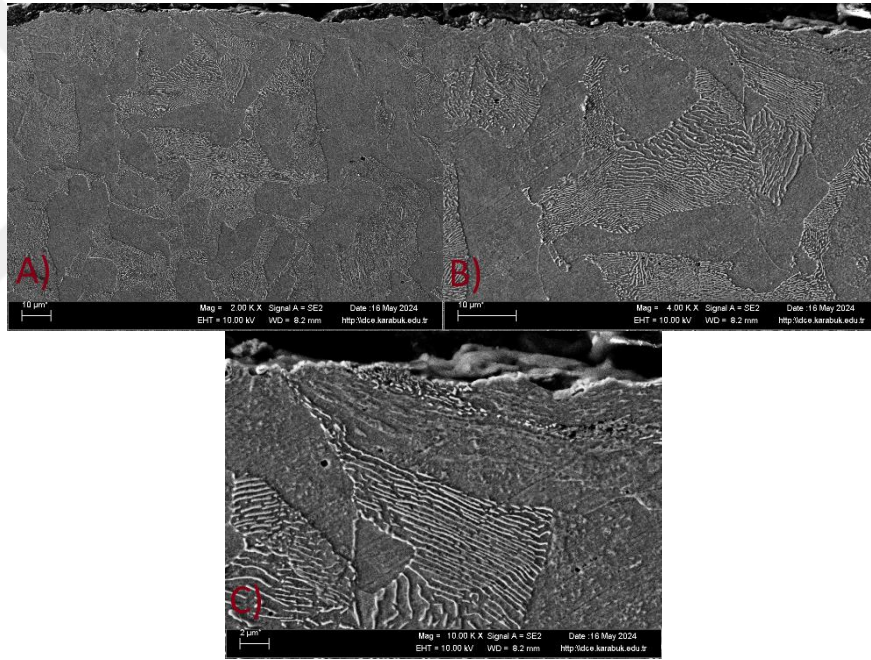
Şekil 6.7. TDBD işlemi görmüş N4 numunesinin SEM görüntüleri a)500X, b)1000x



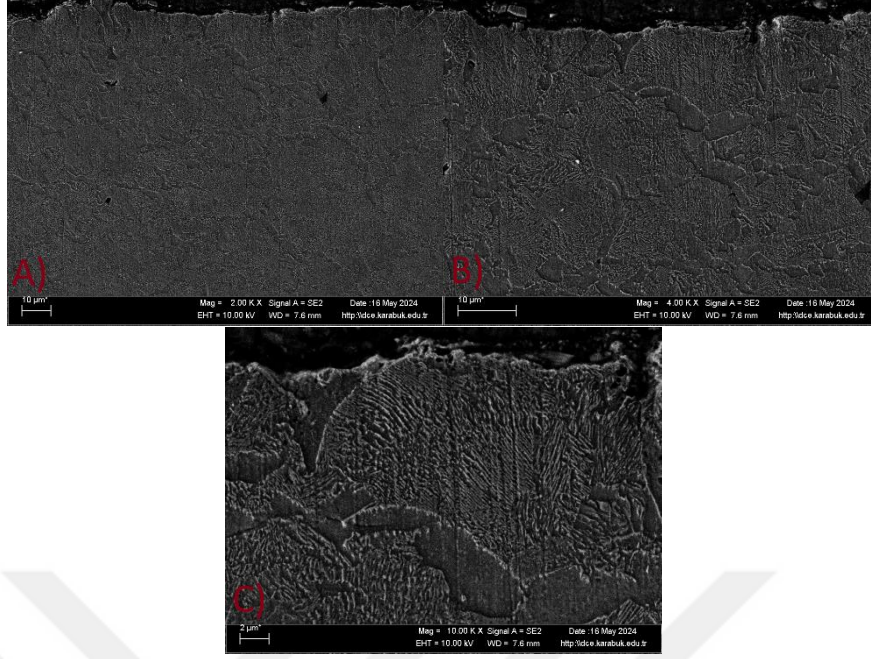
Şekil 6.8. TDBD işlemi görmüş N4 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x

Şekil 6.42'de R260 raya uygulanan UNYM işlemi sonrası yüzey bölgesindeki etkiler görülmektedir. UNYM işlemi sonrası yüzey bölgesinde bütünlüğün büyük ölçüde

korunduğu yüzeyde çukur ve tümsek diye adlandırılabilir yapıların kesitten net bir şekilde gözlemlenecek kadar belirgin olmadığı ancak deformasyonun da yüzeye yakın lokasyonlarda etkin olduğu izlenmiştir. Deformasyon TDBD işlemi kadar etkin olmasa da yüzey bölgesine pürüzlülük, artık gerilme, sertlik vb sac ayakları ile birlikte değerlendirildiğinde mekanik performans anlamında olumlu yönde etkileyebileceği kanaati SEM incelemeleriyle oluşmuştur. Tane yönlenmeleri ve tane incelemeleri belirgin bir biçimde izlenmiştir. Özellikle büyük yapılı perlit lokasyonlarına yüzey ve hemen altında rastlanmamaktadır. Şekil 6.43'te deformasyon etkileri N5 numuneye göre daha sınırlı kalsa da N6 numunede deformasyonun etkisi görülmektedir ve bu durum UNYM işleminin ray performansı üzerinde mikroyapısal olarak etkili olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.



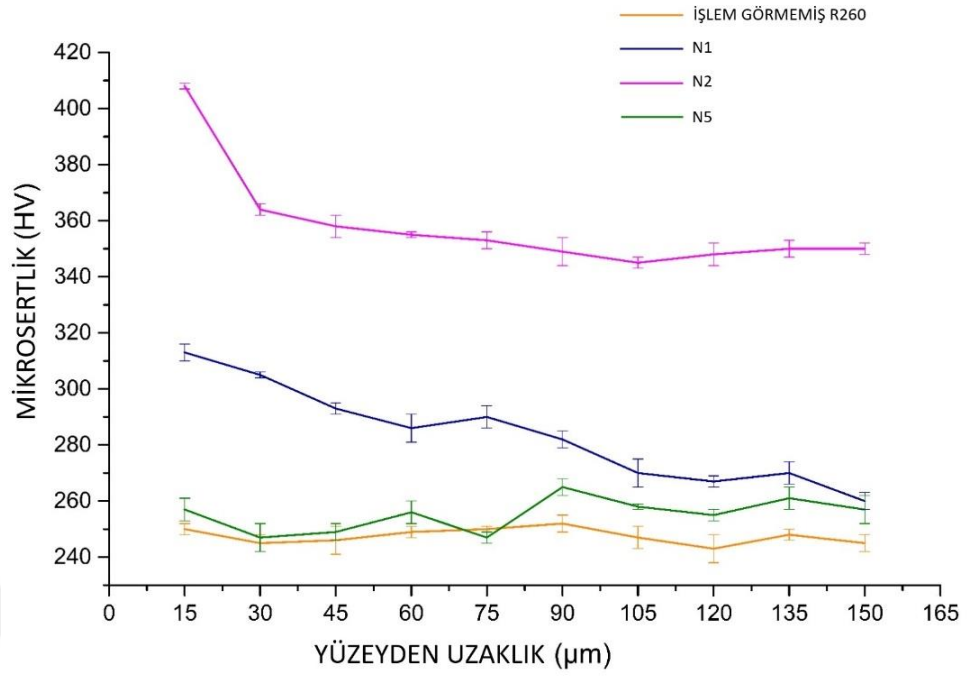
Şekil 6.9. UNYM işlemi görmüş N5 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x, c)10000x



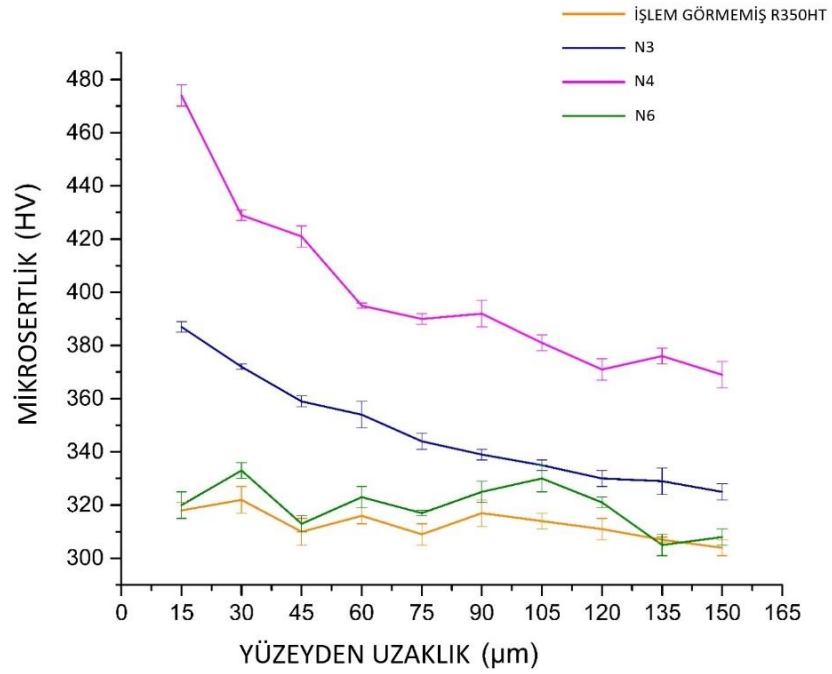
Şekil 6.10. UNYM işlemi görmüş N6 numunesinin SEM görüntüleri a)2000X, b)4000x, c)10000x

6.2. MİKROSERTLİK SONUÇLARI

Şekil 6.44’de R260 kalite ray numunelerinin, Şekil 6.45’de ise R350HT kalite ray numunelerinin mikrosertlik ölçümleri gösterilmiştir. R260 kalite ve R350HT kalite ray numunelerine uygulanan TDBD ve UNYM işlemlerinin malzeme yüzeyinde sertlik artışı sağladığı gözlemlenmiştir. 10 saat TDBD işlemi uygulanan N2 ve N4 numuneleri diğer numunelere karşılaştırıldığında daha etkili sertlik değerleri ortaya çıkmıştır. Genel olarak Şekil 6.44 ve Şekil 6.45’deki grafikler incelendiğinde sertlik bağlamında TDBD işleminin UNYM işlemine göre raylar üzerinde daha olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.11. R260 kalite ray numunelerinin mikrosertlik ölçümleri.



Şekil 6.12. R350HT kalite ray numunelerinin mikrosertlik ölçümleri.

6.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ TESTİ

Çizelge 6.16 de uygulanan yüzey işlemleri ve parametrelerine göre numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir. Numunelerin yüzey pürüzlüklerine ilişkin yapılan incelemeler, genel olarak bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlüğünü artırdığını göstermektedir. İşlem görmemiş ve yüzey işlemine maruz kalmış numuneler incelendiğinde UNYM işlemine maruz kalmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin en düşük olduğu gözlenmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerine sahip numune ise 10 saat TDBD işlemine maruz kalmış R260 kalite N2 numunesidir.

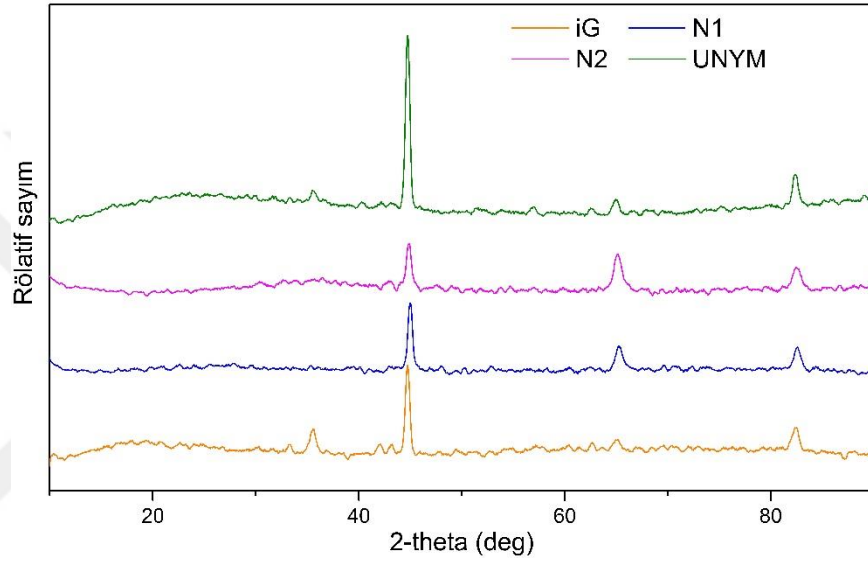
Çizelge 6.1. Uygulanan yüzey işlemlerine göre yüzey pürüzlülükleri.

Numuneler	Yüzey işlemi	Ra(μ m)
R260	İşlem görmemiş	2,460
N1	TDBD	6,039
N2	TDBD	10,454
N5	UNYM	0,408
R350HT	İşlem görmemiş	1,962
N3	TDBD	6,355
N4	TDBD	5,760
N6	UNYM	0,140

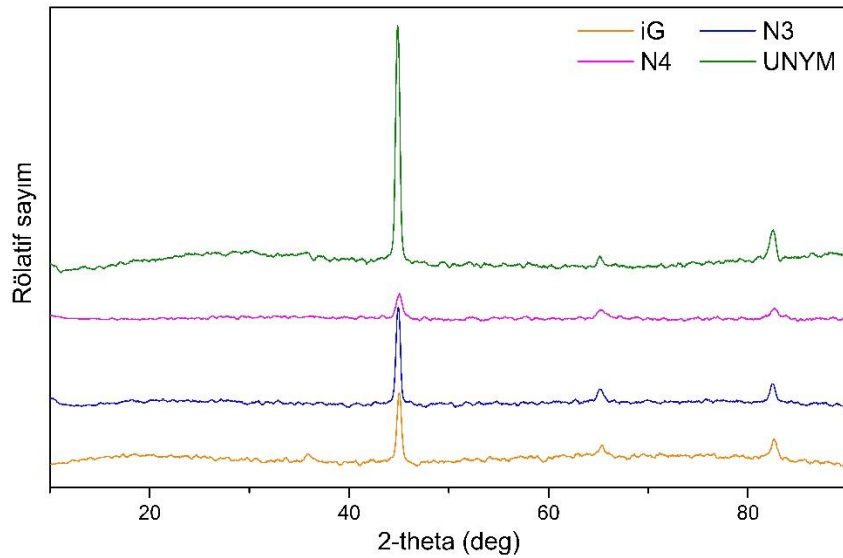
6.4. XRD SONUÇLARI

Şekil 6.46'de R260 kalite raylara uygulanan yüzey işlemleri ve parametrelerine göre İG, N1, N2 ve UNYM numunelerin XRD grafiği gösterilmektedir. Şekil 6.47'de ise R350HT kalite raylara uygulanan yüzey işlemleri ve parametrelerine göre İG, N3, N4 ve UNYM numunelerin XRD grafiği gösterilmektedir. Tüm numunelerde elde edilen standart piklerin ve bu piklerin karşılıdığı düzlemlerin eşit olması, işlemlerin mekanik tabanlı olduğunu ve herhangi bir yeni bileşiğin oluşumu için kimyasal bir değişimin gerçekleşmediğini doğrulamaktadır.

Plastik deformasyonun etkisiyle malzemenin yapısal özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler XRD analiziyle incelenebilir. Genellikle, plastik deformasyon tane boyutunu azaltır, bu da XRD analizlerinde piklerin genişlemesine yol açar. Pik genişlemesi, kristal yapıdaki tane boyutundaki azalmayı yansıtır ve genellikle pikin yarı yüksekliği ile ölçülür. Dolayısıyla, plastik deformasyon etkisi altında piklerin genişlemesi, malzemenin yapısal değişikliklerini belirlemek için XRD analizinin bir göstergesi olarak kullanılabilir.



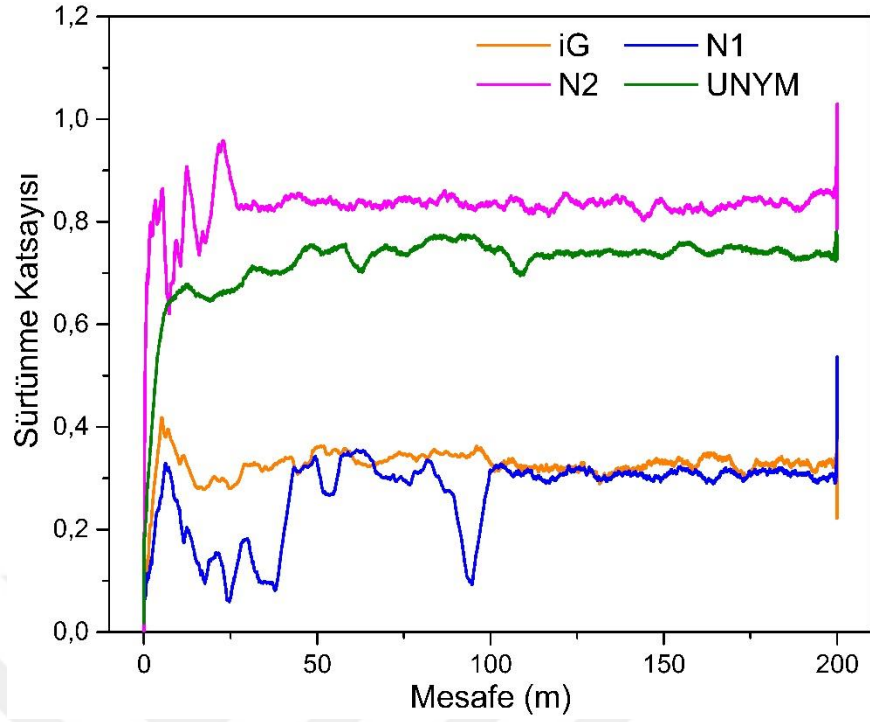
Şekil 6.13. R260 Kalite Ray ; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri XRD grafiği.



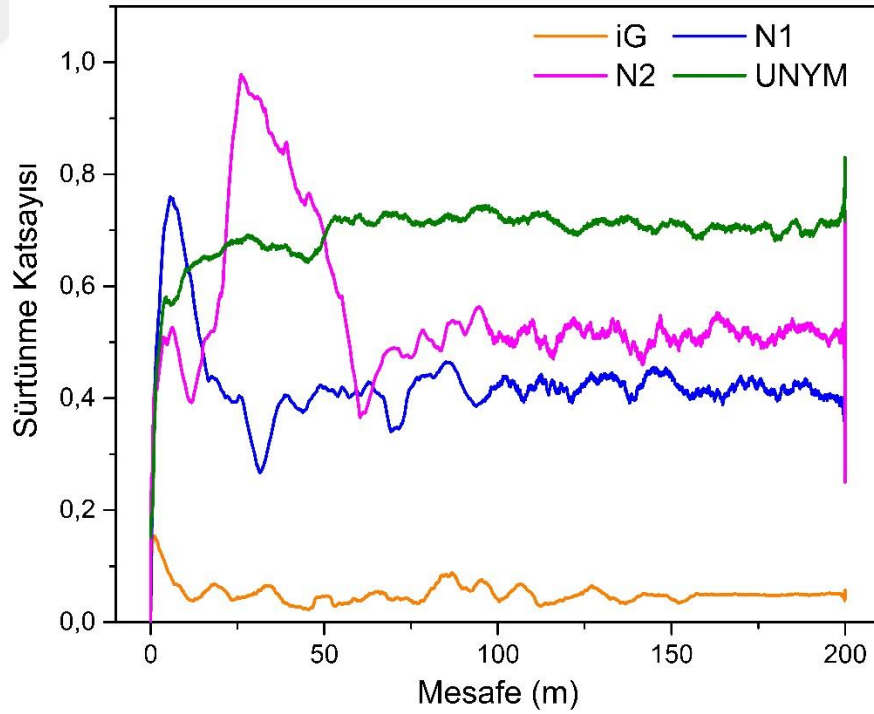
Şekil 6.14. R2350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri XRD grafiği.

6.5. AŞINMA SONUÇLARI

TDBD ve UNYM uygulanmış numunelerin aşınma davranışları 10N ve 15N yük altında 200m mesafede incelenmiştir. Şekil 6.48'te 10 N yük altında R260 kalite ray numunelerine uygulanan yüzey işlemleri sonrası sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. 10N yük altında 10 saat TDBD uygulanmış N2 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı en yüksekken 4 saat TDBD işlemi uygulanmış N1 numunenin ortalama sürtünme katsayısının işlem görmemiş numunenin biraz altında olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey sertliğinin artması, abrazif aşınmaya karşı direncin artmasını sağlar, bu da sürtünme katsayısının düşmesine neden olur. Sonuç olarak, malzeme daha az aşınır ve daha az sürtünmeye maruz kalır. Yüzey sertliğinin artmasıyla birlikte, malzeme yüzeyindeki çizilme ve deformasyon miktarı azalır, bu da sürtünme ve aşınma direncini artırır. Şekil 6.49'te 15 N yük altında R260 kalite ray numunelerine uygulanan yüzey işlemleri sonrası sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. N2 numunesinin 10N yüke göre ortalama sürtünme katsayısının azaldığı, N1 numunesinin 15 N yük altında ortalama sürtünme katsayısının arttığı ve UNYM numunesinin 10N ve 15N yük altında ortalama sürtünme katsayısının birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. Sürtünme katsayısındaki ani artış veya azalış, işlem sertleşmesi ve/veya aşınma yığılmalarının etkileşimleriyle ilişkilendirilebilir. Sürtünme katsayısındaki dalgalanmalar, transfer tabakasının yerel kırılmalara ve parçacıkların kayan arayüzeydeki etkileşimine dayanabilir [28].

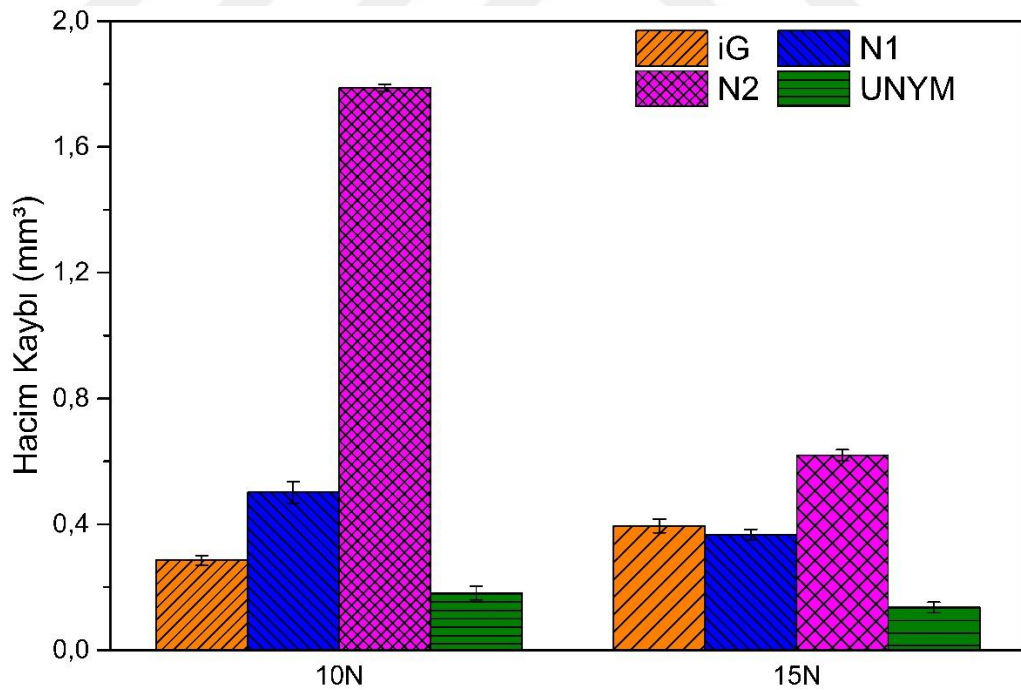


Şekil 6.15. 10 N yük altında R260 Kalite Ray; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m)



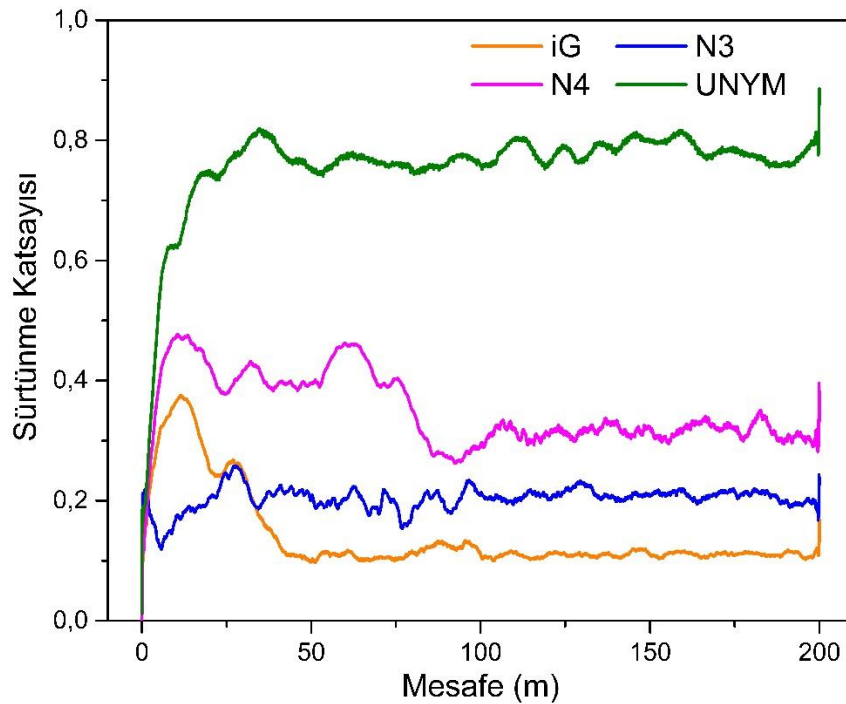
Şekil 6.16. 15 N yük altında R260 Kalite Ray; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).

Şekil 6.50’da R260 kalite ray numunelerinin 200 m kayma mesafesinde 10N ve 15N yükler altında hacim kaybı sütun grafiği gösterilmektedir. Hacim kaybı incelendiğinde genel olarak UNYM işleminin sonrası en az hacim kaybı yaşanmıştır. Diğer numuneler ile karşılaştırdığımızda 10 saat TDBD işlemine maruz kalmış N2 numunesinin hem 10N hemde 15N yük altında hacim kaybının fazla oluşu gözlemlenmiştir. Malzemenin yüksek aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğüyle birlikte değerlendirilmelidir. Yüzey pürüzlülüğündeki artış, hacim kaybında artışa neden olabilir. Aşınma direncindeki artış genellikle sertliğin artışıyla ilişkilendirilir, bu da daha yüksek sertlik seviyelerine sahip malzemelerin daha fazla aşınma direncine sahip olabileceği anlamına gelir. Sertlik değeri yüksek iken, sürtünme kabiliyetini azaltır ve plastik deformasyonu gösterirken, kalıntı gerilme durumu sürtünme ve aşınma davranışlarını büyük ölçüde etkileyebilir. Aşınma esnasında, eksenel gerilim, basma kalıntı gerilmelerini aşmaya çalışır. Yüksek yüzey sertliği ve düşük basma kalıntı gerilimi genellikle düşük sürtünme davranışını gösterir [23].

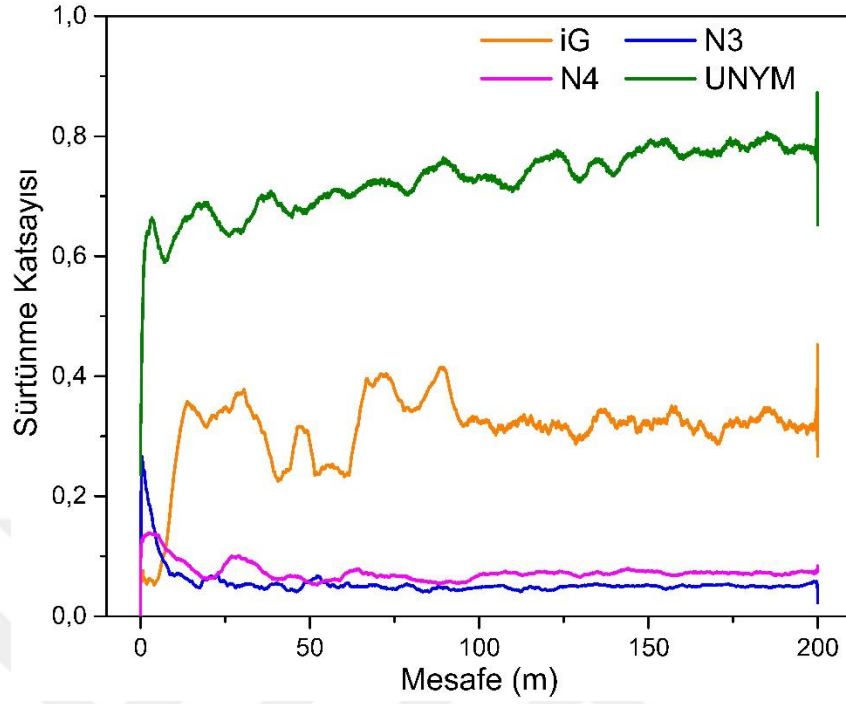


Şekil 6.17. 200 m kayma mesafesi için R260 Kalite Ray ; İG, N1, N2 ve UNYM numuneleri hacim kaybı grafiği .

Şekil 6.51’de 10 N yük altında R350HT kalite ray numunelerine uygulanan yüzey işlemleri sonrası sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. 10N yük altında UNYM işlemi uygulanmış R350HT numunesinin ortalama sürtünme katsayısı en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 10 saat TDBD işlemine maruz kalmış N4 numunesinin sürtünme katsayısının 60 m kayma mesafesinden sonra düştüğü görülmektedir. Genel olarak 10N yük altında R350HT kalite ray numuneleri incelendiğinde işlem görmemiş numuneye göre sürtünme katsayılarının arttığı gözlenmektedir. Sürtünme katsayısındaki ani artış veya azalış, işlem sertleşmesi ve/veya aşınma yığılmalarının etkileşimleriyle ilişkilendirilebilir. Sürtünme katsayısındaki dalgalanmalar, transfer tabakasının yerel kırılmaları ve parçacıkların kayan arayüzeydeki etkileşimine dayanabilir. Şekil 6.52’de 15 N yük altında R350HT kalite ray numunelerine uygulanan yüzey işlemleri sonrası sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde TDBD işlemi uygulanmış numunelerin sürtünme katsayılarının işlem görmemiş numunenin altında kaldığı görülmektedir. UNYM numunesinin sürtünme katsayısı ise 10N yüke göre daha düşük başladığı fakat kayma mesafesi ilerledikçe 10N yük altındaki ortalama sürtünme katsayı değerine yaklaştığı görülmektedir [23].

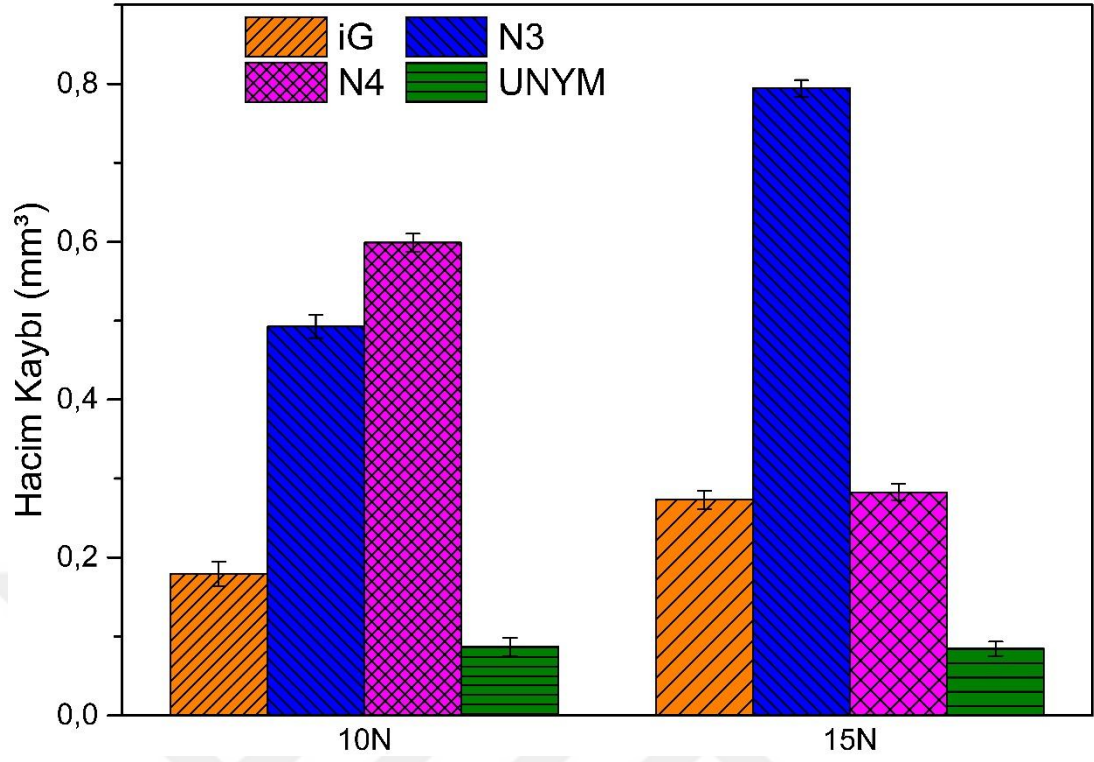


Şekil 6.18. 10 N yük altında R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).



Şekil 6.19. 15 N yük altında R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri sürütme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200 m).

Şekil 6.53’da R350HT kalite ray numunelerinin 200 m kayma mesafesinde 10N ve 15N yükler altında hacim kaybı sütun grafiği gösterilmektedir. Hacim kaybı incelendiğinde R260 kalite ray numunelerinde olduğu gibi R350HT numunelerinde de UNYM işlemi sonrası en az hacim kaybı yaşanmıştır. Grafik incelendiğinde uygulanan yük arttığında işlem görmemiş ve N3 numunesinin hacim kaybının arttığı, N4 numunesindeki hacim kaybının ise azaldığı görülmektedir. Malzemenin yüzey pürüzlülüğünün artmış olması hacim kaybında artışa neden olacağı düşünülmektedir.



Şekil 6.20. 200 m kayma mesafesi için R350HT Kalite Ray ; İG, N3, N4 ve UNYM numuneleri hacim kaybı grafiği .

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

R260 ve R350HT kalite raylar üzerinde yapılan yüzey işlemlerinin genel sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

1. Mikroyapı çalışmaları incelendiğinde TDBD işleminin malzeme yüzeyinin işlem sonrasında deforme olduğu ve yüzeyin altında tane değişiminin meydana geldiği gözlemlenmiştir. UNYM numunelerinde ise yüzey bölgesindeki bütünlüğü büyük ölçüde koruduğu ve bununla beraber deformasyonun yüzeye yakın bölgelerde etkili olduğu gözlenmiştir.
2. Sertlik değerleri, uygulanan yüzey işlemine ve süresine göre değişiklik göstermektedir. TDBD işleminde işlem süresi uzadıkça sertlik değerinin arttığı, R260 kalite rayda 250 HV değerinden 410 HV değerlerine ulaşıldığı, R350HT kalite rayda ise 320HV değerinden 470 HV değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. UNYM numunesinde ise sertlik değerinin R260 kalite rayda 250 HV değerinden 265 HV değerlerine çıktığı, R350HT kalite rayda ise 320 HV değerinden 340HV değerlerine çıktığı ve TDBD ile kıyaslandığında daha etkisiz olduğu gözlemlenmiştir.
3. Her iki kalite ray numunelerinde de yüzey işlemlerine maruz kalmış numuneler karşılaştırıldığında UNYM numunelerinin yüzey pürüzlülük değeri diğer işlem gören numunelere göre en düşük çıkmaktadır.
4. XRD analizlerinde her iki farklı kalitede ray numuneleri içinde uygulanan TDBD ve UNYM işlemleri sonrasında herhangi bir kimyasal değişim olmaması sebebiyle faz veya element farklılığına rastlanmamıştır.
5. Ortalama sürtünme katsayısına bakıldığında R260 kalite ray numunesi için 10 N yük altında 10 saat TDBD işlemi uygulanmış N2 numunesi en yüksek degree sahipken, N1 numunesi en düşüktür. 15 N yük altında ise N2 numunesinin 10N yüke göre ortalama sürtünme katsayısının azaldığı, N1 numunesinin arttığı ve UNYM numunelerinin 10 N yüke göre benzer ortalama sürtünme katsayılarına sahip olduğu görülmektedir.

6. R350HT kalite rayın ortalama sürtünme katsayısına bakıldığında hem 10N yük altında hemde 15N yük altında en yüksek değere sahip numuneler UNYM işlemine maruz kalmış numunelerdir.N3 ve N4 numuneleri ise 15N yük altında işlem görmemiş numunenin ortalama sürtünme katsayı değerinin altında bir değere sahipler. Bu değerler 10N yük altında işlem grmemil numunenin üzerinde.



KAYNAKLAR

1. Brandão, P., Infante, V., Deus, A. M., and Odanovic, Z., "ScienceDirect Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of PCF 2016. Thermo-mechanical modeling of a high pressure turbine blade of an airplane gas turbine engine Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of ESIS TC24. ESIS TC24 Workshop "Integrity of Railway Structures Analysis of the railway freight car axle fracture", **Procedia Structural Integrity**, 4: 24–25 (2017).
2. Zerbst, U., Klinger, C., and Klingbeil, D., "Structural assessment of railway axles – A critical review", **Engineering Failure Analysis**, 35: 54–65 (2013).
3. Özçelik, S., "Mantarı sertleştirilmiş raylarda yorulma davranışı incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Karabük (2013).
4. Zerbst, U., Beretta, S., Köhler, G., Lawton, A., Vormwald, M., Beier, H., Klinger, C., Cherny, I. C., Rudlin, J., Heckel, T., and Klingbeil, D., "Safe life and damage tolerance aspects of railway axles-A review", .
5. "Infrastructure / Railway Technology INNOTRACK Concluding Technical Report", .
6. Makino, T., Kato, T., and Hirakawa, K., "Review of the fatigue damage tolerance of high-speed railway axles in Japan", (2010).
7. "UIC Recommendation For The Use Of Rail Steel Grades", .
8. Unal, O. and Varol, R., "Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening", **Applied Surface Science**, 290: 40–47 (2014).
9. Majzoobi, G., Azizi, R., and Alavi Nia, A., "A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts", **Journal Of Materials Processing Technology**, 164: 1226–1234 (2005).
10. Majzoobi, G. H. and Ahmadkhani, A. R., "The effects of multiple re-shot peening on fretting fatigue behavior of Al7075-T6", (2010).
11. Canals, L., Badreddine, J., McGillivray, B., Miao, H. Y., and Levesque, M., "Effect of vibratory peening on the sub-surface layer of aerospace materials Ti-6Al-4V and E-16NiCrMo13", (2018).

12. Unal, O., Varol, R., Erdogan, A., and Gok, M. S., "Wear behaviour of low carbon steel after severe shot peening", *Materials Research Innovations*, 17 (7): 519–523 (2013).
13. Unal, O., Karaoglanli, A. C., Varol, R., and Kobayashi, A., "Microstructure evolution and mechanical behavior of severe shot peened commercially pure titanium", (2014).
14. "Demiryolu Hattı - Vikipedi", https://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu_hatt%C4%B1 (2024).
15. Yiğit, E., "Demiryollarında raylardaki aşınma hızının ve miktarının eşdeğer konikliğe etkisi ve bakım prosedürlerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük (2021).
16. Arık, G., ., "Raylı system araçlarında ray taker ilişkisi ve tekerde meydana gelen aşınmaların incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kayseri (2022).
16. İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı, "Raylar Ve Bağlantılar", https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Raylar%20ve%20Ba%C4%9Flant%C4%B1lar.pdf (2013) .
17. Tekgöz, M., "R260 kalite ray çeliğinin ısıtma işlem sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük (2021) .
18. Bay, K., "Raylı sistemlerde kullanılan alüminotermit kaynağının kalitesinin artırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı* . İstanbul (2011).
19. İnternet: Pamukkale Üniversitesi, "Yorulma", http://hun.pau.edu.tr/ders_notlari/malzeme_bilgisi (2007).
20. Nurbaş, F., "Farklı yüzey işlemleri uygulanmış 1.2344 iş takım çeliklerinin korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya (2022).
21. Ünal, O., "Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Bartın (2011).
22. İnternet: Wikipedia, "Taramalı elektron mikroskobu", https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramalı_elektron_mikroskobu ,
23. Ünal, O., "Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Bartın (2011).

24. Genççağa, P., "Metalik Malzemelerde Uygulanan Mekanik Deneyler Ders Notları", **Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Trabzon (2014).
25. Çelik, H., "Bilyalı dövme, plazma nitrüleme ve bilyalı dövme/plazma nitrüleme dubleks yüzey işlemi uygulanmış AISI 4140 çeliğinin manyetik alan altındaki tribolojik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Erzurum (2019).
26. Cenk Kumruoğlu, L., "Elektrolitik plazma teknolojisi ile çeliklere uygulanan yüzey modifikasyon işlemleri", Doktora Tezi, **Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**, Sakarya (2012).
27. Bahadır, M., "Bilyalı dövme ile Ti6Al4V alaşımına özel yüzey desenlerinin işlenmesi ve yüzey özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Kocaeli (2022).
28. Öztürk, M., "AISI 4140 düşük alaşımlı çeliklerin modern yüzey işlemleri sonrası yorulma çatlak ilerleme ve aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Karabük (2019).
29. Çağlar, H., "St 37 çeliğin mekanik ve termal yüzey işlemleri uygulamaları ile mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Karabük (2022).
30. Daş, T., "Titreşim destekli yüzey aşırı plastik deformasyon cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**, Karabük (2019).
31. Koymatçık, H., "R260 Kalite rayların optimum mantar sertleştirme parametrelerinin belirlenmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**, Karabük (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ALTUN 2011 yılında başladığı İstanbul Esenyurt Anadolu Lisesinden 2015 yılında mezun olduktan sonra aynı sene Karabük Üniversitesinde hazırlık öğrenimiyle Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenimine başladı ve 2020 yılında 3.28 diploma notuyla bitirdi. Lisans eğitimini tamamladığı 2020 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.