



# Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ümit Yardım

ORCID 0000-0002-2063-8306

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Onur Ertuğrul

Kasım 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Ümit Yardım** tarafından hazırlanan **Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**ONAYLAYANLAR:**

**Tez Danışmanı:** **Doç. Dr. Onur Ertuğrul**  
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

**Jüri Üyeleri:**

**Prof. Dr. Emre YALAMAÇ**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Doç. Dr. Onur ERTUĞRUL**  
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

**Doç. Dr. Esra DOKUMACI ALKAN**  
Dokuz Eylül Üniversitesi

**Savunma Tarihi: 04.11.2022**

# Yazarlık Beyanı

Ben, **Ümit Yardım**, başlığı **Borlama Yöntemiyle Yüzei Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih: 04.11.2022

---

# Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi

## Öz

Ulaşım ve taşımacılık açısından demiryolları kritik öneme sahiptir. Kesintisiz ve güvenli bir ulaşım/taşımacılık sağlanması gerekir. Güvenli ulaşım ve taşımacılığı riske atan rayların çatlaması, rayların kırılması, parça kopmaları, ezilme ve yığılmalar ile ray aşınmaları bazı üstyapısal sorunlar söz konusudur. Bu üstyapısal sorunlardan dolayı kullanım ömrü azalmakta, onarım maliyetlerini artırmakta ve zaman kayıplarına sebep olmaktadır.

Demiryollarında en fazla kullanılan ray tipi R260 kalite ray çeliğidir. R260 kalite ray çeliğinin üretimi kolay, maliyeti düşük ve istenilen mekanik özellikleri optimum düzeyde sağlamaktadır. Özellikle karma tren işletmeciliği (yolcu ve yük taşımacılığının aynı hat üzerinden yapılması) yapılan hatlarda kaba perlitik yapılı R260 kalitedeki ray çeliklerinin yüzeylerine etki eden yükler arttıkça ray-teker arasındaki gerilim artmakta, yuvarlanma yorulması artarken aşınma direnci düşmekte ve nihayetinde ray aşınmaktadır. Ray aşınmasını azaltmak adına demiryollarında R350HT kalite ray çeliği, yani ray mantarı indüksiyonla sertleştirilmiş ray kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; R260 kalite ray çeliğinin yüzeyi, termokimyasal ısı işlemlerden borlama (kutu borlama) ile sertleştirilmiş, metalografik yapısı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Yüzey sertleştirme işlemi 900 °C sıcaklıkta 2 – 4 – 6 saat bekleme süreleri ile uygulanmıştır. Numunelerin kaplama kalınlıkları ve oluşan yapılar optik

mikroskop altında incelenmiştir. Aşınma testleri 50 N ve 100 N yük altında, 3 Hz frekansında ve 200 m mesafesinde gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucunda SEM, XRD, EDX, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik analizleri yapılmıştır. Borlama ile yüzeyi sertleştirilen ray malzemesinin tekere verdiği zarar ise teker malzemesinin aşınma testi sonrasında malzeme analizi yapılarak incelenmiş, gerçek aşınma davranışı simüle edilmiştir.

Analizler ve testler sonucunda elde edilen verilere göre borür tabaka kalınlığı borlama işleminin süresi arttıkça arttığı ve tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasının yanı sıra sıcaklığın artmasıyla sert yapılarda çekirdeklenen ve daha koyu renkli FeB-Fe<sub>2</sub>B ikili faz tabakasının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, XRD sonuçlarına göre bor tabakasında Fe<sub>2</sub>B, FeB, MnB ve CrB yapılarından, referans malzemelerde (R260 ve R350HT) Fe ve Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> yapılarının varlığından söz edilebilir. R260 ray çeliğinin sertliği yaklaşık 290 HV iken borlama sonrasında oluşan yapının sertlik değerlerinin 1362 HV-1795 HV arasında değiştiği, bu değişime ana malzemeye yakınlığın ve Fe<sub>2</sub>B'ye kıyasla daha sert olan FeB fazlarının etkili olduğu söylenebilir. Borlama işlem süresinin artmasıyla tane büyümesine bağlı olarak yumuşadığı ve yüksek bekleme sürelerinde daha yumuşak kaplama elde edildiği tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri 900 °C sıcaklıkta 2 – 4 – 6 saat için sırasıyla 0,293 µm, 0,534 µm, 0,475 µm, Rz değerleri 2,451 µm, 4,172 µm, 3,678 µm şeklinde bulunmuştur. Aşınma deneyi verilerine göre diğer değişkenler sabit olacak şekilde 50 N ve 100 N yükler altında borlanan numunelerin referans numunelerine göre daha az aşındığı ve ER7 tren tekerinden yapılan pinleri ise daha az aşındırdığı, R260 kalite ray çeliğinin R350HT kalite ray çeliğine göre daha fazla aşındığı, buna karşın R350HT'nin ER7 tren tekeri pinini daha fazla aşındırdığı, yükün artmasının genel olarak aşınmayı arttırdığı, borlanan numunelerin yükün artmasından referans malzemelere göre daha az etkilendiği görülmüştür. Sonuç olarak; demiryollarında R260 kalite ray çeliğinin alternatifi olarak kullanılan R350HT rayın aşınmayı azaltmasına karşın tren tekerini daha fazla aşındırdığı, borlanan numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının metal-metal temasını keserek hem tren tekerinde hem de raydaki adhezif aşınmayı azalttığı görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** borlama, R260 ray çeliği, R350HT ray çeliği, aşınma, yüzey pürüzlülüğü

# Investigation of Wear Behavior of R260 Rail Steel Surface Hardened by Boronizing Method

## Abstract

Railways are of critical importance in terms of transportation. It must provide uninterrupted and safe transportation. There are some superstructural problems such as cracking of the rails, breaking of the rails, breaking of parts, crushing and piling up, and rail wear, which puts safe transportation at risk. Due to these superstructural problems, the service life decreases, increases the repair costs and causes time losses.

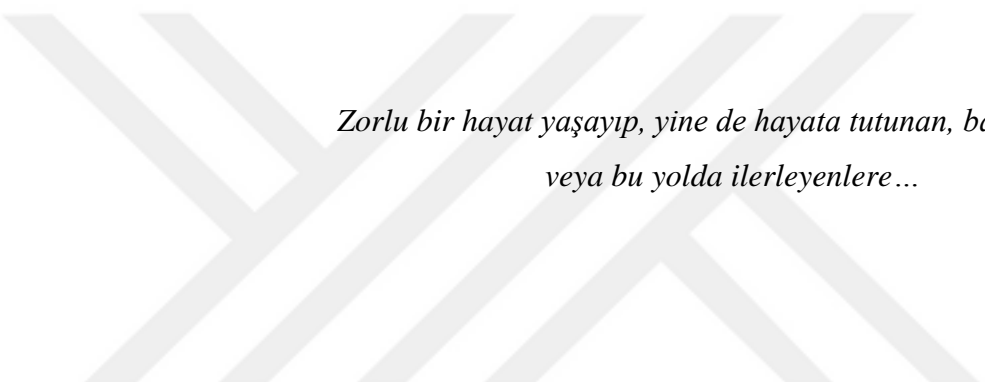
The most commonly used rail type in railways is R260 quality rail steel. R260 quality rail steel is easy to manufacture, low in cost and provides the desired mechanical properties at an optimum level. Especially in the lines where mixed train operations (passenger and freight transport are carried out on the same line), as the loads acting on the surfaces of the R260 quality rail steels with coarse pearlitic structure increase, the tension between the rail and the wheel increases, while the rolling fatigue increases, the wear resistance decreases and finally the rail wears out. In order to reduce rail wear, R350HT quality rail steel, that is, induction hardened rail, is used in railways.

In this study; the surface of the R260 quality rail steel is hardened by boronizing (box boronizing), which is one of the thermochemical processes, and its metallographic structure and wear behavior are investigated. The surface hardening process was applied at 900 °C with waiting times of 2 – 4 – 6 hours. The coating thickness of the samples and the resulting structures are examined under an optical microscope. The wear test is carried out under 50 N and 100 N loads and at a frequency of 3 Hz at a distance of 200 m. As a result of the process, SEM, XRD, EDX, surface roughness and microhardness analyses are made. The damage of the rail material, whose surface is

hardened by boronizing, to the wheel is examined by making material analysis after the wear test of the wheel material, real wear behavior simulated.

According to the data obtained as a result of the analyses and tests, it is observed that the boronized layer thicknesses increased as the duration of the treatment implementation increased, and in addition to the single-phase Fe<sub>2</sub>B layer, a darker colored FeB - Fe<sub>2</sub>B binary phase layer, which nucleated in hard structures with the increase in temperature. In addition, according to XRD results, Fe<sub>2</sub>B, FeB, MnB, and CrB structures is found in the boron layer, and Fe and Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> structures were found in the reference materials (R260 and R350HT). While the hardness of R260 rail steel is about 290 HV, the hardness values of the structure formed after boronizing vary between 1362 HV - 1795 HV, and it can be said that the proximity to the base material and FeB phases, which are harder than Fe<sub>2</sub>B, are effective on this change. It has been determined that with the increase of the boronizing treatment duration, it softens due to grain growth and a softer coating is obtained at high treatment duration. Surface roughness for 2 – 4 – 6 hours at 900 °C, Ra values respectively are found as 0.293 μm, 0.534 μm, 0.475 μm, Rz values of 2,451 μm, 4.172 μm, and 3.678 μm. According to the wear test data, the other variables being constant, the boronized samples under 50 N and 100 N loads are less worn than the reference samples and the pins made from ER7 train wheels are less worn, R260 quality rail steel is more worn than R350HT quality rail steel, on the other hand, It is observed that the ER7 train wheel pin is worn more while other sample is R350HT, the increase in the load generally increased the wear, the boronized samples are less affected by the increase in the load than the reference materials. As a result; it has been observed that the R350HT rail, which is used as an alternative to R260 quality rail steel in railways, reduces wear, but wears the train wheel more, and the boron layer formed on the surface of the boronized samples reduces the adhesive wear on both the train wheel and the rail by cutting the metal-metal contact.

**Keywords:** boronizing, R260 rail steel, R350HT rail steel, wear, surface roughness



*Zorlu bir hayat yaşıyıp, yine de hayata tutunan, başarılı olan  
veya bu yolda ilerleyenlere...*

# Teşekkür

Tezim için beni yüreklendiren, elinden gelen her desteği sunan TCDD 3. Bölge Müdürlüğü Demiryolu Bakım Servis Müdür Yardımcısı Şakir Kaya'ya ve bu süreçte bilgisiyle yol gösteren, maddi ve manevi her türlü desteği sunan 31 Demiryolu Bakım Müdürü Ferdi Karaduman'a, araştırmalarda bilgisiyle ve desteğiyle çalışmama katkı sağlayan iş arkadaşım Yüksek Raylı Sistemler Mühendisi Emre Yiğit'e ve diğer iş arkadaşlarıma, çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, yardımlarıyla ve katkılarıyla tez çalışmamın zenginleşmesini sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Onur Ertuğrul'a ve hayatımın her aşamasında bana destek olan abim ile ablama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, tez çalışmasına değerli katkılarından dolayı; Arş. Gör. Dr. Kadir Cihan Tekin'e, Doç. Dr. Tuncay Dikici'ye, Öğr. Gör. Dr. Saadet Güler'e, Arş. Gör. Bilgehan Kondul'a, Deniz Güler'e, Cem Bahadır Bayındır'a, Eda Turgut'a, Uğur Mencik'e, Ege Gülçiçek'e, M. Çağan Sarı'ya, Aşınmaz Yüzey Kaplama San. Tic. A.Ş. firmasından Güneş Erdoğan'a, Vezneli Aşındırıcı San. A.Ş. firmasından Hasan Vezneli'ye, TOTOMAK A.Ş. firmasından Oğuzcan Güzelipek'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını Bilimsel Araştırma Projeleri 2022-TYL-FEBE-0001 no.lu proje ile destekleyen İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne de teşekkürlerimi sunarım.

# İçindekiler

<b>Yazarlık Beyanı .....</b>	<b>ii</b>
<b>Öz.....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>v</b>
<b>Teşekkür .....</b>	<b>viii</b>
<b>Şekiller Listesi .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Tablolar Listesi.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Kısaltmalar Listesi .....</b>	<b>xviii</b>
<b>Semboller Listesi .....</b>	<b>xix</b>
<b>Bölüm 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Giriş.....</b>	<b>1</b>
<b>Bölüm 2 .....</b>	<b>6</b>
<b>Borlama İşlemi .....</b>	<b>6</b>
2.1 Genel Bilgi .....	6
2.2 Borlama Yöntemleri .....	7
2.2.1 Kutu Borlama Yöntemi.....	7
2.2.2 Sıvı Borlama Yöntemi .....	10
2.2.3 Pasta Borlama Yöntemi .....	11
2.2.4 Gaz Ortamda Borlama Yöntemi .....	11
2.3 Bor Elementi.....	12
2.4 Fe-B Denge Diyagramı .....	12
2.5 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları .....	14
2.6 Borlama İşlemi Uygulanabilen Çelik Yapılar .....	15
2.7 Borlama İşleminin Kinetiği .....	16
2.7.1 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması .....	16
2.7.2 Alaşım Elementlerinin Borür Tabaka Kalınlığına Etkisi.....	17

2.7.3 Borür Tabakasının Karakteristik Özellikleri ve Etki Eden Faktörler .....	19
2.7.4 Borlama Sonrası Sertlik, Aşınma Direnci ve İç Gerilmeler .....	22
2.8 Borlamanın Sektörel Kullanım Alanları.....	23
<b>Bölüm 3 .....</b>	<b>24</b>
<b>Ray Çelikleri.....</b>	<b>24</b>
3.1 Rayların Genel Özellikleri.....	24
3.2 Rayların Mikroyapısal Özellikleri .....	27
3.2.1 Perlitik Mikroyapı.....	27
3.2.2 Beynit Mikroyapı.....	28
3.2.3 Östenitik Mikroyapı.....	28
3.2.4 Temperlenmiş Martenzit Mikroyapı.....	28
3.3 Ray Çeliklerinin Kimyasal Yapısı.....	29
3.4 Rayların Mekanik Özellikleri .....	29
3.5 Ray-Teker İlişkisi .....	30
3.6 Rayların Aşınması .....	32
<b>Bölüm 4 .....</b>	<b>36</b>
<b>Aşınma.....</b>	<b>36</b>
4.1 Aşınma Hakkında Genel Bilgi .....	36
4.2 Aşınma Türleri .....	38
4.2.1 Adhezif (Yapışma) Aşınma .....	39
4.2.2 Abratif (Kazıma) Aşınma.....	41
4.2.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması .....	42
4.2.4 Oksidasyon Aşınması .....	42
<b>Bölüm 5 .....</b>	<b>44</b>
<b>Materyal ve Metot.....</b>	<b>44</b>
5.1. Kullanılan Malzemeler .....	44
5.2. Borlama İşlemi .....	48

5.3 Aşınma Testi.....	50
5.3.1. Ağırlık Kayıpları.....	51
5.3.2. Sürtünme Katsayısı.....	51
5.3.3. Aşınma Alanları.....	51
5.3.4. Aşınma Testi Sonrası SEM İncelemeleri.....	52
5.4 Karakterizasyon Çalışmaları .....	52
5.4.1. Optik Mikroskop Çalışmaları .....	52
5.4.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Çalışmaları ve EDX Analizi .....	53
5.4.3. Mikrosertlik Ölçümleri .....	54
5.4.4. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi.....	54
5.4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri .....	55
<b>Bölüm 6 .....</b>	<b>56</b>
<b>Bulgular ve Tartışma .....</b>	<b>56</b>
6.1 Karakterizasyon Çalışmaları Sonuçları .....	56
6.1.1. Optik Mikroskop Analizleri.....	56
6.1.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizleri.....	59
6.1.3. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizleri.....	62
6.1.4. Mikrosertlik Testi Sonuçları .....	63
6.1.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri .....	64
6.2 Aşınma Testi Sonuçları .....	67
6.2.1. Ağırlık Kayıpları.....	67
6.2.2. Aşınma Alanları.....	70
6.2.3. Aşınma Testi Sonrası SEM İncelemeleri.....	73
6.2.4. Sürtünme Katsayısı .....	80
<b>Bölüm 7 .....</b>	<b>82</b>
<b>Sonuçlar ve Değerlendirme .....</b>	<b>82</b>
<b>Kaynaklar .....</b>	<b>86</b>

<b>Ekler .....</b>	<b>90</b>
<b>Özgeçmiş .....</b>	<b>91</b>



# Şekiller Listesi

Şekil 1: Kutu borlamanın şematik gösterimi [8] ve borlama prosesi [2] .....	8
Şekil 2: Demir-Bor Denge Diyagramı [20].....	13
Şekil 3: Alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [7] .....	19
Şekil 4: 60 E1 Ray profili.....	26
Şekil 5: Farklı eğimlerde Ray-Teker temas noktaları [10].....	31
Şekil 6: Rayların yolun içine doğru eğimli olması (1/20) [27] .....	32
Şekil 7: Müselles yolundaki ray aşınma grafiği.....	33
Şekil 8: Aşınma türleri ve meydana gelme şekilleri [34].....	38
Şekil 9: Aşınma türlerinin şematik gösterimi [34].....	39
Şekil 10: Adhezif aşınmanın şematik gösterimi (FN: Normal Kuvvet, FT: Temas Kuvveti, $\alpha$ : Hareket Açısı) [14].....	40
Şekil 11: Çalışmada kullanılan raylar (R260 ve R350HT) .....	44
Şekil 12: Numunelerin a) kaba kesme ve b) hassas kesme görüntüleri .....	45
Şekil 13: Zımparalama aşaması sonrasında numuneler .....	45
Şekil 14: Borlama işleminde kullanılan kutu malzemesi (solda) ve üretim sonrasında ölçüleri (sağda).....	46
Şekil 15: Bor tozlarının 75 $\mu\text{m}$ ' nun altına eleme işlemi.....	46
Şekil 16: Aşınma deneyinde kullanılan tren tekeri malzemesi .....	47
Şekil 17: Tren tekerinden üretilen pin malzemesinin a) teknik çizimi, b) üretim sonrası .....	47

Şekil 18: Borlama işlemi a) Numunelerin yerleştirilmesi, b) Numunelerin bor tozu ile kapatılması, c) Numune yüzeylerinin alümina ile kapatılması, d) Kutuların fırına yerleştirilmesi ve üzerine ağırlık konulması, e) Numunelerin işlem sonrasında soğuması, f) Oda sıcaklığına soğumuş kutular, g) Numunelerin kutudan çıkarılması .....	49
Şekil 19: Borlama işlemi sonrasında elde edilen numunelerden bazıları .....	49
Şekil 20: Aşınma cihazı .....	50
Şekil 21: Aşınma numuneleri.....	50
Şekil 22: Aşınma alanlarının incelenmesinde kullanılan profilometre .....	51
Şekil 23: Optik Mikroskop.....	53
Şekil 24: SEM cihazı ve numunenin cihazdaki konumu .....	53
Şekil 25: Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	54
Şekil 26: XRD analiz cihazı.....	55
Şekil 27: Yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü cihaz .....	55
Şekil 28: 900 °C'de 2 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100).....	57
Şekil 29: 900 °C 'de 2 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x200).....	58
Şekil 30: 900 °C 'de 4 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100).....	58
Şekil 31: 900 °C 'de 4 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x200).....	58
Şekil 32: 900 °C 'de 6 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100).....	59
Şekil 33: 900 °C 2 saat borlanan (dağlanmış) numunenin SEM görüntüleri .....	59

Şekil 34: 900 °C 6 saat borlanan parlatılmış numunenin SEM görüntüleri .....	60
Şekil 35: 900 °C 2 saat borlanan ve dağlanan numunenin EDX ölçüm bölgeleri/noktaları a) yan yüzey b) alt yüzey .....	60
Şekil 36: 900 °C 6 saat borlanan parlatılmış numunenin çizgi (line) EDX ölçümü 61	
Şekil 37: Beş farklı kompozisyonun XRD analiz sonuçları a) 900 °C’de 2 saat, b) 900°C’de 4 saat, c) 900 °C’de 6 saat borlanan numune, d) R260 ve e) R350HT ..	62
Şekil 38: Sertlik ölçüm bölgeleri (aşağıdan yukarıya doğru 1 (kaplama yüzey bölgesi)-2-3-4-5-6 (ana metal bölgesi) no.lu ölçüm bölgeleri).....	63
Şekil 39: Sertlik değişim grafiği (900 °C’de borlanan numuneler ve R350HT için)64	
Şekil 40: 900 °C’de 2 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde).....	65
Şekil 41: 900 °C’de 4 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde).....	65
Şekil 42: 900 °C’de 6 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde).....	66
Şekil 43: Aşınma testi-1’den sonra numuneler.....	67
Şekil 44: Aşınma testi-1 pin aşınma grafiği.....	68
Şekil 45: Aşınma deneyi-2 pin ve numune aşınma grafikleri.....	70
Şekil 46: 900°C’de 2 saat (a), 4 saat (b), 6 saat (c), borlanan numunelerle, R260 ve R350HT (d) referans numunelerinin aşınma alanı grafiği .....	71
Şekil 47: 50 N yük altında beş aşınma alanının karşılaştırılması.....	72
Şekil 48: Aşınma hızı grafiği .....	73
Şekil 49: 900 °C’de 2 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi.....	74

Şekil 50: 900 °C'de 4 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının SEM'de incelenmesi .....	74
Şekil 51: 900 °C'de 6 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi.....	75
Şekil 52: R350HT referans numunesinin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi.....	75
Şekil 53: R260 referans numunesinin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi.....	76
Şekil 54: Aşınma testi sonrası EDX analizleri: a) 900 °C'de 2 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, b) 2 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge, c) 4 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, ç) 4 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge .....	76
Şekil 55: Aşınma testi sonrası EDX analizleri: d) 6 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, e) 6 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge, f) R350HT numunesinin 50 N altında aşınan bölgesi, g) R350HT numunesinin 100 N altında aşınan bölgesi ve h) R260 numunesinin 50 N altında aşınan bölgesi .....	77
Şekil 56: Sürtünme katsayıları grafiği (50 N yük altında) .....	81

# Tablolar Listesi

Tablo 1: Sıvı ortamda borlama için kullanılan bor kaynakları [19].....	10
Tablo 2: EN 13674 Standardına göre rayların sınıflandırılması .....	25
Tablo 3: R260 (60 E1) Kalite Rayın Bileşimi (%) [36] .....	44
Tablo 4: Aşınma testi parametreleri .....	51
Tablo 5: Borür Tabakası Kalınlıkları (900 °C ve 2-4-6 saat bekleme sürelerinde) .	57
Tablo 6: 900 °C 2 saat borlanan ve dağlanan numunenin EDX ölçüm sonuçları ....	61
Tablo 7: Elde edilen sertlik değerleri (HV).....	63
Tablo 8: Borlanmış R260 kalite çeliğin yüzey pürüzlük değerleri .....	66
Tablo 9: Aşınma testi-1 için pin aşınması ölçüm sonuçları .....	68
Tablo 10: Aşınma testi-2 için pin aşınması ölçüm sonuçları .....	69
Tablo 11: Aşınma testi-2 için alt malzeme aşınması ölçüm sonuçları.....	69
Tablo 12: Aşınma testi-1 (50 N) ve aşınma testi-2 (100 N) için hacim kayıpları....	72
Tablo 13: Aşınma sonrası numunelerin EDX analiz sonuçları .....	78
Tablo 14: Ortalama sürtünme katsayıları .....	80

# Kısaltmalar Listesi

Fe <sub>2</sub> B	Demir (İki)borür
FeB	Demir Borür
MnB	Mangan Borür
CrB	Krom Borür
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bor Oksit
HV	Vickers Sertliği
SiC	Silisyum Karbür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	Enerji Dağılım X-Işını
XRD	X-Işınları Difraksiyonu

# Semboller Listesi

$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\sigma$	Çekme Gerilmesi [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_y$	Akma Gerilmesi [N/mm <sup>2</sup> ]
$\delta$	Kırılma Sonrası Uzama [%]



# Bölüm 1

## Giriş

Demiryolları Türkiye’de ve dünyada en fazla kullanılan ulaşım ve taşımacılık sektörlerinden birisidir. İlk trenlerin icadından sonra demiryolları; yolcuların ulaşımı, sanayide kullanılan hammaddelerin ve üretilen ürünlerin taşınması, ağır sanayinin gelişmesi, savaş dönemlerinde mühimmat ve asker taşınması gibi tarih sahnesinde birçok kritik rol üstlenmiştir [1].

Demiryollarında farklı kalitede raylar kullanılmaktadır. En yaygın kullanımı olan ray tipi R260 kalite ray çeliğidir. Üretiminin kolay olması, düşük maliyetli oluşu, yüksek aşınma direnci ve dayanıklılığı gibi sahip olduğu mekanik özellikleri R260 kalite ray çeliğinin yaygın olarak kullanılmasındaki en önemli nedenlerdir [2]. Fakat bu özelliklerine rağmen ani hızlanmalar ve/veya kurplarda ray çelikleri farklı davranışlar sergilemekte, raylarda aşınmalar meydana gelmekte, aşınmalara bağlı olarak da ekartman hatası, ondülasyon, gergi kısıkaçlarının kırılması, rayların kırılması gibi çeşitli üstyapı hataları görülmektedir. Üstyapıda meydana gelen hatalar tren trafiğini olumsuz etkilemekte, ciddi maliyetlere neden olmakta ve yolcu taşımacılığında seyahat konforunu bozmaktadır. Bu nedenle ilave işlemlerle ray çeliğinin dayanımı artırılmalı ve aşınma miktarı azaltılmalıdır. Raylarda meydana gelen aşınmanın azaltılması için üstyapıda düzenlemeler ve/veya ray malzemesini ilgilendiren konularda çalışmalar yapılmaktadır. Üstyapıda yapılan düzenlemeler; kurplarda dış rayın deverini artırmak veya sürekartman vermek şeklindedir. Yine de dar kurplarda aşınmanın önüne geçmek zorlaşmaktadır. Bu nedenle kullanılan ray malzemesiyle ilgili bazı önlemler söz konusudur. Bunlar: dayanıklı malzeme seçimi, parça geometrisinin aşınmayı azaltacak şekilde ayarlanması, parçanın tamamının aşınmaya dirençli malzemeden üretilmesi yerine, maliyeti azaltmak açısından sadece aşınan yerlerin aşınmaya dirençli malzemelerden üretilmesi veya bu bölgelerin aşınmaya

dayanıklı malzemelerle kaplanması [3]. Ray aşınmasını azaltmak adına R350HT kalite ray çeliği, yani mantarı indüksiyonla sertleştirilmiş ray geliştirilmiştir. Bu ray çeliği mantarı sertleştirilmiş olarak belirtilmesine rağmen iki şekilde üretilmektedir: birinci yöntemde sadece mantar bölgesi sertleştirilmekte, ikinci yöntemde ise Rus tipi, yani malzemenin tamamının sertleştirilmesidir. Sektörde şu an Rus tipi R350HT kalite ray çeliği yüksek aşınma direnci ve sertliği nedeniyle kullanılmaktadır.

Ray çeliklerin dayanım ve sertliklerini artırılmakta kullanılan bir diğer yöntem termokimyasal yöntemler kullanılarak ray çeliğinin sertleştirilmesi işlemidir. Bu termokimyasal yöntemlerden birisi borlama ile yüzey sertleştirmedir. Katı, sıvı, gaz ve plazma şeklinde [4] uygulanabilen borlama ile yüzey sertleştirme yönteminin temel prensibi, yüksek sıcaklık altındaki bor atomlarının çelik yüzeyine belirli bir sürede yayılım sağlayarak tabaka meydana getirmesidir. Oluşan tabaka demir ve bor atomlarının etkileşimi sonucunda FeB ve/veya Fe<sub>2</sub>B fazlarının oluşmasıyla elde edilir [5] ve genellikle malzemedeki mikro hatalar (tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları vb.) yüzeyin daha reaktif olduğu bölgelerde (yüzey pürüzlülükleri, çizikler vb.) meydana gelir. Bu yapılar sayesinde yüzeyde meydana gelen sert tabaka malzemeyi dış etkilerden korurken, aşınmaya ve korozyona karşı direnç sağlar. Borlama ile yüzey sertleştirme işlemi alaşımlı ve alaşımsız çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, demir ve demir dışı metal ve alaşımları (nikel kobalt, molibden titanyum vb.), dökme demir gibi birçok malzemeye uygulanabilmektedir. Borlama işleminin tercih edilmesinde basit ekipmanlarla kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli bir yöntem olması, istenilen mekanik özelliklerin (çeliklere yüksek sertlik (1450 – 5000 HV sertlik aralığı), yüksek ergime sıcaklığı, düşük sürtünme katsayısı, korozif ortamlarda yorulma dayanımını sağlaması, kritik sıcaklık değerinde bile (550 °C – 600 °C) sertlik direncini kaybetmemesi gibi) kolaylıkla sağlanabilmesi gibi birçok avantajı söz konusudur [2].

Kutu borlama: Bu teknikte borlama işlemi uygulanacak malzeme bor tozları ile kaplanır. Bu düzenek bir fırın içinde 700 °C – 950 °C sıcaklıkları arasında belirli süre bekletilerek (1 – 8 saat arasında) yüzeyde bor tabakası oluşmasının sağlanması mantığına dayanmaktadır. Sıcaklık arttıkça bor tabakası kalınlığı artmaktadır. Tabaka kalınlığı hacminin artması malzemenin yüzeyini daha sert yapmaktadır [6]. Literatürde 950 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bor tabaka kalınlığının çok az olduğu,

950 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda ise bor tabakasının bozulduğu tespit edilmiştir. En ideal borlamanın 950 °C ve 4 saat bekleme süresinde elde edildiği belirtilmektedir [7].

Borlama işleminde demir dışı alaşım elementleri de önemlidir. R260 kalite ray çeliğinin iç yapısında Fe, C'un yanı sıra Si, Mn gibi demir dışı alaşım elementleri de mevcuttur. Borlama işleminde bu demir dışı alaşım elementlerin etkileri borür tabakası ve geçiş bölgelerindeki kristal yapının oluşmasında önem arz etmektedir. Alaşım elementlerinden Cr, Ni, V, Mn, Mo gibi elementler borür tabakasında bileşik oluşturabiliyorlarken, C, Cu, Si, Al gibi elementler ise borür tabakasında çözünemezler. Oluşan borür tabakasına alaşım elementlerinin etkisi atom numarası ve atom çapına bağlıdır. Fe'nin atom numarasından küçük olan Cr ve Mn elementleri baz malzemedan yukarıya hareket ederken, Ni ve C elementleri yüzeyden içeri yayılır. Bu durum da kaplama malzemesinde Cr ve Mn bileşiklerine, geçiş bölgelerinde ise Ni ve C bileşiklerine rastlanmasına neden olur.

Özellikle yarıçapı R187 ve daha dar olan kurplarda raylar yeni değiştirilmiş olmasına rağmen çok kısa bir zamanda ondülasyon ve ray aşınmalarının baş gösterdiği görülmekte, aşınan ray miktarının artmasıyla birlikte diğer üstyapı sorunlarına (ekartman hatası, headcheck, bağlantı elemanlarının kırılması, dever hatası vb.) sebep olmaktadır. Dolayısıyla rayların aşınmasını azaltacak alternatif yöntemlerin incelenmesi trenle ulaşım ve taşımacılığın sağlığı açısından elzemdir. Bu nedenle tez çalışmasının amacı R350HT'ye alternatif olacak yüzey sertleştirme işlemi ile aşınma direnci artırılmış malzeme geliştirilmesidir.

Literatür incelendiğinde; Burhan Uzbaş (2013) saha tecrübesine dayanarak hazırlanmış Demiryolu İltisak Hatlarında Aşınma Kayıpları konulu makalesinde, S39'luk olarak adlandırılan ve metre başına ağırlığı 39.520 kg/m olan raylar üzerinde ölçümler yapmış ve alınan numunelerdeki hacim kayıplarını incelemiştir. Saha araştırmalarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda, demiryolu hatlarındaki raylarda zaman içerisinde çeşitli nedenlerle oluşan sürtünme sonucunda aşınma kayıpları meydana gelerek çeşitli şekil değiştirmeler ve hasarlara neden olduğu, bu hasarların, demir yollarını geometrik ve fiziksel olarak bozmakta, vagon trafik seyrini etkilemekte, demir yolu taşıt ve yollardaki hasar oluşumlarını hızlandırmakta, kazalara, işletme maliyetleri ile çevreye olumsuz etkilerin artmasına neden olduğu belirtilmiştir [1].

Arzum Uluköy ve Ahmet Çetin Can (2006) tarafından hazırlanan makalede geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla, borlamanın pek çok avantajı olduğundan bahseder ve yüzeyde oluşan borür tabakası, yüksek sertlik değerleri ve yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruması yanında, iyi aşınma, oksidasyon ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahip olduğunu belirtir [8].

Bekir Sadık Ünlü ve Selim Sarper Yılmaz (2006) makalesinde demir esaslı malzeme yüzeyinde ferro-bor fazları oluşturarak malzemenin sürtünme katsayısı azaltılıp, aşınma dayanımını arttırdığı belirtilir. Borlama ile demir esaslı malzemelerin çekme ve akma değerleri %10-20, yorulma dayanımı %25 ve korozyonlu yorulma ömrünün %200 artmasına, plastisite özelliklerinin ise azalmasına neden olduğu bilgisine yer verilir [7].

Mehmet Ali Özden (2011) yüksek lisans tezinde demiryollarında kullanılan ray malzemesinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Tezinde incelenen mekanik özelliklerden birisi de aşınma davranışdır. Ray malzemesinin farklı bölgelerinden alınan (mantar kısmı, gövde, kaynak bölgesi) her bir numune 5 farklı aşındırıcı yük altında (10 N, 15 N, 20 N, 25 N ve 30 N) ve 4 değişik aşındırıcı kağıdında ( P80, P100, P150 ve P220 ) aşınmaya maruz bırakılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek aşınma miktarları P80’de en düşük aşınma miktarları ise P220 aşındırıcı kâğıtta görülmüştür. Her numunede aşındırıcı yük arttıkça aşınma miktarının da artmakta olduğu belirtmiştir [9].

Mehmet Zahid Hamarat (2015) yüksek lisans tezinde ray-tekerlek arasındaki ilişkinin non-lineer olması ve aşınmanın bu ilişkiye bağlı olması, çok uzun sürelerde gözlenebilmesi, aşınma sorununun ne denli zorlu bir sorun olduğunu ifade eder. Bu nedenle bilgisayar destekli aşınma tahminini, bu bilgiler ışığında tekerlek profilindeki değişimin incelendiği uygulamasını hayata geçirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; genel olarak “hollow wear” ya da oluklanma aşınması görüldüğü, aşınma hızının km artıkça arttığı, her tekerlekte farklı aşınma oranı ortaya çıktığı ve aracın gidiş yönüne göre tekerlek konumu ile aşınma arasında bir ilişkinin bulunmadığı belirtilmiştir.

Fatih Bozkurt (2017) yüksek lisans tezinde hızlı tren üstyapısında kullanılan ray malzemesine (R260), farklı karbon ve bor elementlerine sahip AISI 51B60H ve 30MnB5 kalitesindeki borlu çeliklerin alternatif olup olmayacağını sürtünme ve

aşınma yönünden incelemiştir. Bir lokomotif tekerinden (ER9 sınıfı) elde edilen disk şeklindeki numuneler ile borlu çeliklerden ve rayın mantar kısmından çıkarılmış disk şeklindeki numuneler, aşındırma çifti oluşturacak şekilde test etmiştir. Tez çalışmasının sonucunda 51B60H borlu çelik, 30MnB5 borlu çelik ve ER9 sınıfı teker numunelerinin sertlik değerleri sırası ile 35 HRC, 61 HRC, 55 HRC ve 31,5 HRC sertlik değerinde olduğu, kuru şartlar altında aşınma oranlarına göre ray numunesi 51B60H borlu çelik numunesine göre 3,86 kat, 30MnB5 borlu çelik numunesine göre ise 3,67 kat daha fazla aşındığı tespit edilmiştir [10].

Bilgehan Kondul (2020) yüksek lisans tezinde borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliğinin aşınma davranışını incelemiştir. Tez çalışmasında R260 kalite çelik 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda 4 saat bekleme süresinde borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Borlama sonucunda başlangıçtaki sertliği ~ 300 HV olan ray çeliğinin sırasıyla 1886, 2145 ve 2590 HV sertlik değerlerine ulaştığı görülmüştür. Numunelere aşınma deneyleri 2 farklı yük (30 N ve 50 N) ve hız koşulları (0,1 m/s ve 0,2 m/s) altında yapılmıştır. Sıcaklık arttıkça kaplama kalınlığı da artmış, sürtünme kaynaklı hacim kaybı ise azalmıştır [2].

Literatürde farklı çalışmalarda R260 kalite ray çeliği borlama ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanıp sonuçlar elde edilmiştir. Buna rağmen hali hazırda indüksiyon ile mantarı sertleştirilen R350HT kalite ray çeliği ile karşılaştırılması çalışmasına rastlanmamıştır. Ayrıca, detaylı bir aşınma testi çalışması yapılarak aşınma davranışları incelenmemiştir. Bununla birlikte, ray çeliğinin sertleştirilmesi ray aşınmasını azaltıcı yönde etki edecektir fakat ray-teker etkileşiminden dolayı teker üzerinde aşındırıcı etkisi olması olasıdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında aşınma testleri yapılırken aşındırıcı olarak tren tekeri çeliği kullanılmış, aşınma durumu gözlemlenmiştir.

# Bölüm 2

## Borlama İşlemi

### 2.1 Genel Bilgi

Borlama işlemi, bor atomlarının yüksek sıcaklıkta metal iş parçasının yüzeyine difüze olması, parça yüzeyinde borür tabakası meydana getirerek malzemenin korozyon, aşınma ve sertlik gibi özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, yüzey reaksiyonlarıyla ve difüzyon kontrolü ile gerçekleşen bir termokimyasal işlemdir [7, 11].

Borlama işleminin tarihte ilk defa Moisson tarafından 1895 senesinde yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır. Moisson araştırmaları sonucu bor atomlarının çeliklerin yüzeylerine difüze olarak daha sert bir yüzey elde edilmesini sağlayarak, çeliklerin borlanabileceği iddiasını ortaya atmıştır [11].

Rayların borla yüzeylerinin sertleştirilmiş çeliklerle kıyaslanması veya doğrudan rayların borlanarak yüzeylerinin sertleştirilmesi çalışmaları yeni yeni gündemde olan bir çalışmadır. Mevcut rayların farklı tren işletmeciliği ve altyapı koşullarında aşınması raylar için alternatif sistemlere yönelmeye teşvik edilmiştir. Kassfeldt ve Lundmark (2009)'ın [12] yaptığı çalışmada bu kıyaslamanın ilk olarak yapıldığı görülmüştür. Borlu çelik ile ray malzemesinin tren tekeri ışığında aşınma ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bir diğer çalışma ise yüksek hızlı tren rayıyla borlanarak yüzeyi sertleştirilmiş çeliğin kıyaslandığı Çakır, FH. ve arkadaşları (2016) çalışmasıdır [13]. Doğrudan rayların borlanarak farklı aşındırıcılarla aşınma testlerinin yapıldığı çalışmalar 2020 yıllarından sonra literatürde görülmektedir.

Borlama işleminde elde edilecek tabakaya borlamada kullanılan malzeme yapısı, borlanacak malzemenin türü [11], borlama işleminin süresi, borlama sıcaklığına ulaşana kadar sıcaklık artış hızı, işlem sıcaklığı etki etmektedir.

Borlama işlemi genellikle, bor yapısından ve çeşitli kısıtlılıklardan dolayı 700-1000 °C aralığında, tercihen 1-12 saat sürede bor verici katı toz, pasta, sıvı veya gaz

ortamlarda gerçekleştirilir [8]. Bazı kaynaklarda ise borlama işleminin genellikle 800-1000 °C sıcaklıkları arasında ve 1-8 saat süreyle yapıldığı belirtilmektedir [7, 11]. 950 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bor tabaka kalınlığının yeterli düzeyde olmadığı, belirtilen sıcaklığın üstünde ise tabaka kalınlığında bozulmaların meydana gelmesinden dolayı en iyi borlama işleminin 950 °C'de 4 saat süreyle yapılan borlama işlemi olduğu belirtilmektedir [7].

## 2.2 Borlama Yöntemleri

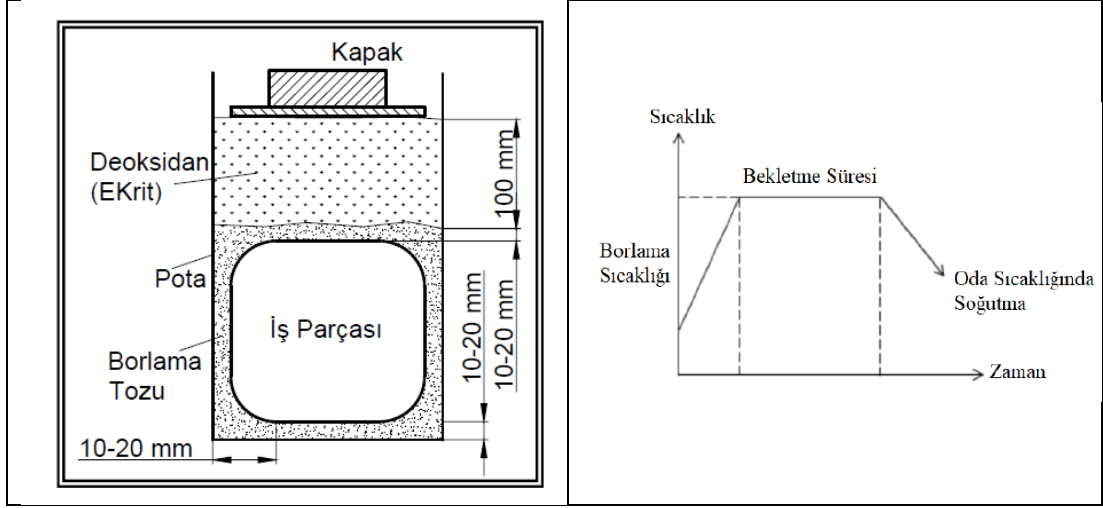
Borlama çalışması termokimyasal yöntemlerle (kutu borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve gaz ortamda borlama) ve termokimyasal olmayan yöntemlerle (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme) gibi yöntemlerle yapılmaktadır [14, 15].

Termokimyasal yöntemlerle malzemenin bor kaplanması sıcaklık ve zaman değişkenlerine bağlı olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır [2, 16, 17].

### 2.2.1 Kutu Borlama Yöntemi

Kutu borlama yöntemi, borlanacak malzemenin bor kaynağı olan toz bileşimi ile belirli sürede ve belirli sıcaklıkta bekletilmesi prensibine dayanmaktadır. Borlama işlemi, borlanacak malzemenin etrafı yeterli bor tozları ile kaplanarak bor tozlarının hava ile temasını kesecek şekilde, üstüne SiC veya Alümina gibi dolgu malzemeleri konular ve kutunun ağzı hava almayacak şekilde kapatılarak yapılır. Borlama işleminin sıcaklığı 850 °C – 1050 °C arasında ve süresi de 1-8 saat arasında borlanacak malzemeye ve istenilen katman kalınlığına göre belirlenir.

Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi ve borlama prosesi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Kutu borlamanın şematik gösterimi [8] ve borlama prosesi [2]

Borlama işleminde serbest kalan B'nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle  $B_2O_3$  oluşturma eğilimindedir. Bu nedenle bor tozlarının üzerine SiC veya  $Al_2O_3$  gibi bir dolgu malzemesi de konulur [14, 15]. Bu sayede işlem esnasında oksijenler bağlanır ve bor atomlarının malzeme yüzeyine difüze olması sağlanır.

İşlem yapılacak potanın hacminin, fırın hacminin %60'nı geçmemesi önerilmektedir. Çünkü borlama işlemi esnasında yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve potadan malzeme dökülmeleri gerçekleşebilir. Bunun önüne geçmek ve ayrıca borlama işlemine devam etmek için potaya toz ilavesi (%20-50) gerektiğinde tozlar için alan bırakmak adına gereklidir.

Sektörde yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri bor karbür ( $B_4C$ ), ferrobör ve amorf bördür [14, 15]. Kullanılacak olan borlama prosesine bağlı olarak, bor kaynağı  $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $H_2B_6$  [11], Aktivatör olarak  $NaBF_4$ ,  $KBF_4$ ,  $(NH_4)_3BF_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $BaF_2$  ve  $Na_2B_4O_7$  kullanılmaktadır [8].

Pota malzemesi olarak ise alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular borlama işlemi için uygun malzemelerdir. Pota malzemesinin seçiminde yüksek sıcaklığa dayanıklı olması, yüksek sıcaklıklarda bozunmaması ve işlem sonrasında rahat bir şekilde malzemelerin çıkarılabilmesi önemlidir.

Borlama için kullanılan bazı toz karışımları aşağıda verilmiştir (% ağırlıkça) [14, 15]:

- % 5 B<sub>4</sub>C, % 90 SiC, % 5 KBF<sub>4</sub>
- % 50 B<sub>4</sub>C, % 45 SiC, % 5 KBF<sub>4</sub>
- % 85 B<sub>4</sub>C, % 15 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- % 95 B<sub>4</sub>C, % 5 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- % 84 B<sub>4</sub>C, % 16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- Amorf bor (% 95–97), % (3-5) KBF<sub>4</sub>
- % (40–80) B<sub>4</sub>C, % (20-60) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- % 60 B<sub>4</sub>C, % 5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 5 NaF, % 30 demir oksit
- % 50 Amorf bor, % 1 NH<sub>4</sub>F.HF, % 49 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- % 100 B<sub>4</sub>C
- % 20 B<sub>4</sub>C, %5 KBF<sub>4</sub>, % 75 Grafit
- % 95 Amorf bor, % 5 KBF<sub>4</sub>

Ticari olarak temin edilebilen kutu borlama işlemi için bor kaynakları aşağıda özellikleri ile sınıflandırılmıştır [19]:

- Ekabor 1: Toz olarak temin edilir. Maksimum bor tabakasına ulaşmak için tercih edilir. Yüzey pürüzlülük değerleri bakımından, yüksek yüzey kalitesine ulaşmak için kullanılır. Genellikle demir esaslı malzemelerde kullanılır. Yoğunluğu 1,80 g/cm<sup>3</sup> ve tane boyutu 150 µm'nun altındadır.
- Ekabor 2: Granül yapıda temin edilir. Bu toz kullanımıyla birlikte yüksek yüzey pürüzlülüğü sonuçları elde edilir. Düşük karbonlu çelik alaşımlarında tercih edilir. Yoğunluğu 1,50 g/cm<sup>3</sup> ve tane boyutu 850 µm'nun altındadır. Ekabor2 toz karışımı %5 B<sub>4</sub>C %90 SiC %5 KBF<sub>4</sub> tozlarından oluşmaktadır [17].
- Ekabor 3: Granül yapıda temin edilir. Ekabor 2 tozuna göre yüzey pürüzlülüğü çok daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Kullanım alanları olarak yüksek alaşımları çelik malzemelerde tercih edilir. Yoğunluğu 0,95 g/cm<sup>3</sup> ve tane boyutu 140 µm'nun altındadır
- Ekabor HM: Çok sert metallerin borlama prosesleri aşamasında bor kaynağı olarak kullanılmaktadır. Küçük delik ve kalın tabakalar için kullanılır. Yoğunluğu 0,95 – 1,50 g/cm<sup>3</sup> ve Tane boyutu 150 µm'nun altındadır.
- Ekabor WB: Oksijensiz gaz atmosferinde ve akışkan yataklarda borlama işlemi için kullanılır. Yoğunluğu 0,95 g/cm<sup>3</sup> ve tane boyutu 220-350 µm arasında değişmektedir.

- Ekrit: Dolgu malzemesi olarak kullanılır. Borlama işlemi boyunca tozların arasına oksijen sızmasını önlemek amacıyla ilave edilir. Yoğunluğu  $1,55 \text{ g/cm}^3$  ve tane boyutu  $420 \mu\text{m}$ 'nin altındadır.

Borlama işleminde kullanılan farklı bor toz karışımları bor tabakası, kırılma tokluğu ve diğer yapıları etkilemektedir [18].

## 2.2.2 Sıvı Borlama Yöntemi

Borlama işleminin sıvı ortamda gerçekleştiği yöntemdir. İşlem sıcaklığı ve süresi borlanacak malzemeye ve istenilen katman kalınlığına göre  $800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ve 2-6 saat bekleme süresi aralığında seçilmektedir [19].

Sıvı ortamda yapılan borlama işleminde reaksiyonlar katı borlama yöntemlerine göre daha hızlı gerçekleşmekte ve koruyucu atmosfere ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sıvı borlama işleminin gerçekleşmesi için gerekli ekipmanlar basit ve ekonomiktir. Tek sorun borlama işlemi sonrasında malzemenin temizlenmesinin meşakkatli olmasıdır.

Sıvı borlama yöntemleri olarak daldırma, elektroliz ve derişik çözeltilerde borlama yöntemleri sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Tablo 1'de sıvı borlama yönteminde kullanılan bor kaynakları gösterilmektedir.

Tablo 1: Sıvı ortamda borlama için kullanılan bor kaynakları [19]

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (gr/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Erime Sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )	Açıklama
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10 \text{ H}_2\text{O}$	381.42	11.35	---	Su miktarından dolayı
Susuz Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	$741 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$ de $25,2 \text{ gr/lt H}_2\text{O}$ çözünür
Metabor Asidi	$\text{HBO}_2$	43.83	24.69	---	---
Sodyum Borflorit	$\text{NaBF}_4$	109.81	9.85	---	---
Borik Asit	$\text{B}_2\text{O}_3$	69.64	31.07	$450 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$ de $25,2 \text{ gr/lt H}_2\text{O}$ çözünür.
Borkarbür	$\text{B}_4\text{C}$	55.29	78.28	$2450 \text{ }^\circ\text{C}$	---

### 2.2.3 Pasta Borlama Yöntemi

Borlama işleminin pasta(macun) kıvamına getirilerek malzeme üzerine uygulanması ve daha sonra fırında bekletilerek bor atomlarının malzemeye difüzyonu prensibine dayanmaktadır. İlk önce borlama için kullanılacak tozlar pasta kıvamına getirilerek borlanacak malzemenin yüzeyine 2 mm kalınlığında sürülür ve hızlıca 150 °C sıcaklıkta kurutulur. Gerekli olursa bu işlem tekrarlanır. Kurutma tamamlandıktan sonra borla kaplanmış malzeme önceden işlem sıcaklığına getirilmiş ve koruyucu gaz atmosferindeki fırına konular ve belirlenen sürede fırında bekletilir. Belirlenen süre sonunda borlanan malzeme soğumaya bırakılır ve soğuduktan sonra yüzeyi temizlenir.

Bu yöntem malzemenin kısmi olarak borlanmasına olanak sağlar.

Bor karbür ( $B_4C$ ), kriyolit ( $Na_3AlF_6$ ) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karıştırılarak borlama işleminde kullanılacak pasta yapılır. Koruyucu gaz ortamını sağlamak için kullanılan gazlar ise Argon, Formier Gazı,  $NH_3$  ve saf azottur.

### 2.2.4 Gaz Ortamda Borlama Yöntemi

Borlama işleminin gaz bor kaynakları vasıtasıyla yapıldığı borlama yöntemidir. Borlanacak malzeme bir kutu içine konular ve bu kutu içine gaz ünitesinden bor içeren gaz verilir. Bor kaynağı olarak genellikle bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılmaktadır [19]. Borlanacak malzemenin bulunduğu kutu ısıtılarak borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu ünitenin tamamı gaz girişi ve çıkışının sağlandığı sistemlerde yapılır.

Gaz ortamda borlamanın üniform bor dağılımının sağlanması, tek fazlı katman oluşturulması ve katman kalınlığının daha hassas ayarlanabilmesi açısından önemli avantajları söz konusudur. Fakat bu avantajlarının yanı sıra Diboran gibi zehirli bileşiklerin kullanılması, Trimetilbor  $[(CH_3)_3B]$  ve trietilbor  $[(C_2H_5)_3B]$  ile yapılan borlama işlemlerinde karbürizasyonun söz konusu olması, bor halojenürlerin korozyona sebep olması gibi dezavantajları da söz konusudur.

## 2.3 Bor Elementi

Bor elementinin özellikle şu şekildedir:

Simgesi B,

Atom numarası:5,

Atom Ağırlığı (Ar): 10,81 g/mol,

Ergime sıcaklığı: 2092 °C,

Geçiş elementidir,

Doğada serbest halde bulunmaz, 230 çeşit bor minerali vardır.

Bor bileşikleri elektriği iletmez, fakat saf bor iletir [8].

Bor atomunun kristal yapısı rombohedral yapıdadır.

Bor alaşım elementi olarak kullanıldığında borun etkisi aşağıdaki şekilde görmek mümkündür [7].

\* Bor elementinin az alaşımlı çeliklerde kullanılması durumunda östenitin dönüşümünü yavaşlatması ve sertleşme kabiliyetini artırması beklenir, darbe direncini ise olumsuz yönde etkilemektedir.

\* Takım çeliklerin bor elementinin kullanılması ise sertleşme kabiliyetinin artması, paslanmaz çeliklerde çok az miktarda kullanılması durumunda bile kaynaklanabilirlik kabiliyetini, sürünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon artırması ve sıcak yırtılmaları önlemesi beklenir.

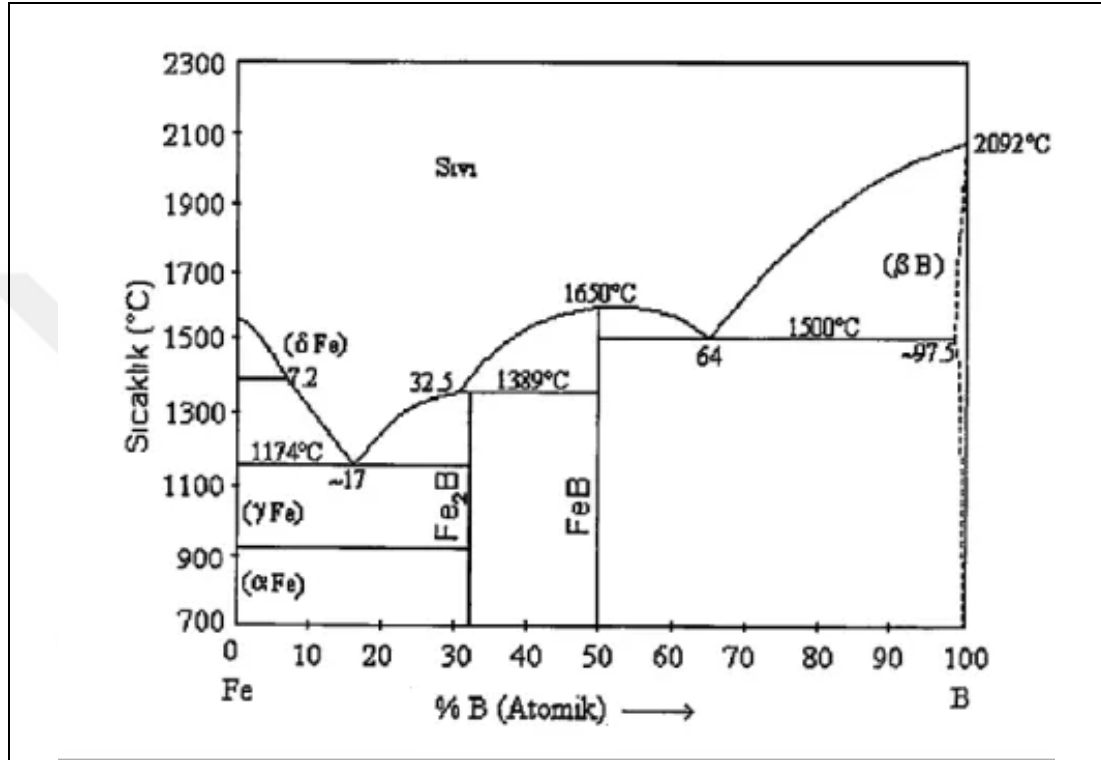
\* Yüksek hız çeliklerinde sertleşebilen ve ısıtılma işlemine uygun çeliklere bor ilavesi sürünme mukavemetini artırır.

## 2.4 Fe-B Denge Diyagramı

Bor amorf ve kristal (ortorombik (FeB) ve hacim merkezli tetragonal (Fe<sub>2</sub>B)) olarak iki şekilde bulunur [8].

Hume-Rothery kuralları baz alındığında, Fe alaşım sistemlerinde, alaşım elementleri için atom çap boyutları ile ara yer veya yer alan element olarak eriyebileceği ifade edilmektedir.

Bor atomunun demir ile meydana getirdiği yapıları gösteren demir-bor denge diyagramı Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2: Demir-Bor Denge Diyagramı [20]

FeB sistemi için en önemli kriter atomik boyut faktörüdür. Bor elementinin atom çapı, demir elementinin atom çapından %27 daha küçük olduğundan dolayı katı eriyik oluşturabilmektedir. Fe-B denge diyagramını incelendiğinde, 1394°C’de, %7,20 B konsantrasyonunda  $\gamma$ -Fe’den  $\gamma$ -sıvıya dönüşüm gerçekleştiren bir metatektik reaksiyon yer alırken, 911°C’ de ise  $\gamma$ -Fe+Fe<sub>2</sub>B’den  $\alpha$ -Fe-Fe<sub>2</sub>B’e dönüşen bir reaksiyon meydana gelmektedir. Diyagram üzerinde, 1174°C’de %17 B konsantrasyonunda  $\alpha$ -Fe ile Fe<sub>2</sub>B arasında ötektik reaksiyon, %33,3 B konsantrasyonunda Fe<sub>2</sub>B intermetalik bileşiğinin olduğu gözlemlenmektedir. Araştırılan birçok makalede ortaya çıkan sonuçlara göre, Fe<sub>2</sub>B fazına ait ergime sıcaklık aralığı 1389 °C ile 1410 °C arasında değiştiği, buna karşılık FeB fazının ergime sıcaklık aralığı ise 1540 °C ile 1675 °C aralığında olduğu belirtilmiştir [11].

## 2.5 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

Borlama yaparak malzemenin özelliklerinde değişiklik yapmak mümkündür. Bu değişiklikler sonucunda sağlanan avantajlar ve dezavantajlar şu şekildedir.

Malzemenin yüzeyinde oluşturulan borür tabakası, yüksek sertlik değerleri, yüksek sıcaklıklarda (kritik sıcaklık değerlerinde bile 550°C-600°C) sertliğini ve tribolojik özelliklerini koruması, iyi aşınma, oksidasyon ve korozyon dayanımı gibi geliştirilmiş özelliklere sahiptir [15, 21]. Buna ilave olarak, borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısı düşük, aşınma direnci yüksek hale gelir. Bu yüksek sertlikteki yüzeylerde teflonun sürtünme katsayısına yakın bir sürtünme katsayısı elde edilir. Bu sayede borlama işlemi uygulanmış yüzeylerde sürtünmeyi azaltmak adına yağlayıcı kullanma gereksinimi azalır [7].

Borlama işleminin demir esaslı malzemelere uygulanması neticesinde çekme ve akma dayanımlarının %10-20, yorulma dayanımının %25 ve korozyonlu yorulma ömrünün %200 artmakta olduğu, plastisite özelliklerinin ise azalmakta olduğu belirtilmektedir. Malzemelerin borlanması sonucunda en önemli avantajlardan birisi sertliktir. Çeliklerde 2000 HV sertlik değerleri söz konusudur [7].

Borlama işleminin bir diğer avantajı farklı yapıdaki birçok metal ve alaşımlarının borlanabilmesidir. Demir esaslı malzemeler, çelik ve dökme demir gibi alaşımlara ek olarak demir dışı metal ve alaşımları borlanabilen malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Borlama işlemlerinden kutu borlamanın da diğer borlama yöntemlerine kıyasla bazı avantajları söz konusudur. Bunlar [11];

- Hazırlanma aşaması diğer tekniklere göre daha kolaydır.
- Daha pürüzsüz ve homojen yüzeyler elde etmek mümkündür.
- Bor kaynağı bileşenleri işlem sırasında kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir.
- Borlama işlemi için prosesin hazırlanması, kurulumu kolay ve daha ekonomiktir.
- İşlemden sonra numune yüzeyi daha kolay ve basit bir şekilde temizlenir.

Avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da söz konusudur. Bunlardan birisi borlama işleminden sonra ısıl işleme (genellikle sementasyon veya temperleme)

ihtiyaç duyulmasıdır. Borla kaplanmış yüzeyin özelliklerini koruması adına inert atmosfer veya vakum ortamı gerekmektedir [11].

Borlama işlem süresi arttıkça tabaka kalınlığının artması beklenir fakat artan kalınlıkla birlikte oluşan porozite oranı da artmaktadır. Bu durum bor kaplama tabakasının gevrekleşmesine neden olur.

Yüzeyde meydana gelen borür tabakası sayesinde borlanmış malzemelerin korozyon direnci artmaktadır.

İşlemin manuel (elle) yapılması durumunda uygulayan kişiye bağlı olarak hataların meydana gelmesi de bu işlemin diğer bir dezavantajlarındanır.

Borlama işlemi süresince kullanılan malzemeler işlem sonrasında atık haline gelir ve bu atıklar doğaya karşı zararlıdır [22].

## 2.6 Borlama İşlemi Uygulanabilen Çelik Yapılar

Endüstriyel anlamda borlama işlemi, farklı yapıdaki demir alaşımlarına uygulanmaktadır. Uygulama alanı geniştir. Yapısal çeliklere (Sade karbonlu, paslanmaz ve takım çelikler), döküm çeliklerine, (ticari saflıktaki) Armco demirine, takım çeliklerine, gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sementasyon çeliklere, ıslah çeliklerine, sinterlenmiş metal tozlarına ve çeliklere borlama işlemi uygulanmaktadır. Bunlara ilave olarak bakır ve alaşımları, nikel, molibden, titanyum, kobalt, mangan, krom ve tantalyum gibi demir dışı metal ve alaşımları ile bazı seramiklere borlama işlemi uygulanır fakat düşük ergime sıcaklıklarından dolayı magnezyum, çinko ve alüminyuma uygulanamamaktadır [7]. Borlama işlemi östenit fazda meydana gelmektedir. Bu nedenle havada anında sertleşir. Bu nedenle suda soğutmayla sertleştirilen malzemeler borlama işlemine uygun değildir. Kükürtlü ve kurşunlu çeliklerin de yüzeylerinde çatlaklar oluşabileceği için borlama işlemine tabi tutulmamaktadır [9, 14, 23].

## 2.7 Borlama İşleminin Kinetiği

Borür tabakasının özelliklerini anlamak için borlama işleminin kinetiğine bakmak gerekmektedir. Borür tabakasının oluşma şekli ve bu tabakaya etki eden faktörleri incelemek gerekir.

### 2.7.1 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Borür tabakaları genellikle tane sınırları, yüzeylerdeki pürüzlülükler, çizik, çatlak, atom boşlukları ve dislokasyonlar gibi mikro hatanın olduğu yerlerde oluşur. Demir içeren malzemelere yapılan borlama işleminde demir-Bor reaktifliğinin düşük olduğu bölgelerde önce  $Fe_2B$  çekirdekleri rastgele oluşur ve buradan büyümeye başlar. Ortam şartlarına bağlı olarak bor konsantrasyonu çekirdeklenmenin başlaması ve bor tabakasının oluşması için belirleyici rol oynar. Bor konsantrasyonu yüksek olan bölgelerde yüzey reaktifliği daha düşük olsa da çekirdeklenmeler meydana gelebilir ve borür tabakası oluşur [11].

Bu büyümeler iki şekilde meydana gelmektedir: Difüzyon kanallı büyüme ve Uçtan büyüme mekanizması

#### 2.7.1.1 Difüzyon Kanallı Büyüme Mekanizması

Bu mekanizmada  $Fe_2B$  kristal sisteminde, [001] doğrultusu boyunca bir difüzyon kanalı meydana gelir, bor atomları bu kanaldan büyümeye başlar. Ortogonal prizma sisteminde, bor atomlarının difüzyonu için en yüksek ara bölme söz konusudur.

$FeB$  kristallerinin oluşumunda, bor atomların bor tabakasından yüzeyine dik yönde hareket etmesi (itilmesi) durumunda,  $Fe_2B$  kristallerinin kolonsal şekilde iç taraflara yönelenerek büyümesi şeklinde başlamaktadır.

#### 2.7.1.2 Uçtan Büyüme Mekanizması

Borlanacak malzemenin kompozisyona ve borlama işleminin proses faktörleri dikkate alınır, ilk olarak meydana gelen  $Fe_2B$  çekirdekleri iğnemi bir geometri biçiminde gelişerek büyüme göstermesi beklenir ve borun eğimine paralel yönde bir yönelme

davranışı sergiler, bu sayede Fe<sub>2</sub>B çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan yüksek gerilme kısımları ve kafes distorsiyonları tabakanın eş eksenli büyümesine yol açmaktadır.

## 2.7.2 Alaşım Elementlerinin Borür Tabaka Kalınlığına Etkisi

Borlama işleminde ana metalin yapısında bulunan veya dışarıdan borlama işlemine bir şekilde giren alaşım elementleri kaplama ile matris ara yüzeydeki kristalografik düzen ve faz bileşenleri üzerinde etkisi söz konusudur. Alaşım elementleri en önemli etkilerinden birisi borür tabakasının kalınlığını üzerindeki etkisidir [15, 21]. Saf demirde kaplama kalınlığı, alaşımlı çeliklerdekenden daha yüksektir. Alaşım elementleri, bor difüzyonunu düşürmekte, matris ve kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir. Aşağıda alaşım elementleri ve bu elementlerin borlama işlemine etkisi belirtilmiştir.

Borlama işleminde alaşım elementleri iki kategoride ele alınabilir: bor tabakasında çözünerek kararlı yapı oluşturan Cr, Ni, Mn, V, Mo gibi elementler ve borür tabakasında çözünmeyen C, Si, Al, Cu gibi elementlerdir [24].

**Nikel:** Kaplama kalınlığını azaltıcı etkisi vardır. Krom'a nazaran kaplama kalınlığındaki azalma daha az denilebilir. Borlu tabaka/matris ara yüzeylerinin yapısı nikel miktarı arttıkça kolonsal yapıyı bozar ve daha düz, düzenli hale gelmektedir. Nikelin ayrıca porozite oluşumuna ve mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olur. Yapıdaki nikel miktarının artması bor tabakasının sertliği üzerine de etki etmekte, Fe<sub>2</sub>B'nin sertlik değerinde de azalmaya neden olmaktadır.

**Krom:** Kaplama kalınlığını azaltıcı etkisi vardır. Morfolojiye de etki eder. Kromlu alaşımların karbon oranlarına da bağlı olarak borür tabakasının çok daha ince olduğu ve alaşım elementinin bor tabakasında yer alan demir atomlarının konumlarına yerleşmesine bağlı olarak oldukça düz yapıda olduğu incelenmiştir. Çeliklerin borlanmış tabakalarında bulunan (Fe, Cr)B ve (Fe, Cr)<sub>2</sub>B fazlarının sertliği krom miktarının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Kromun ayrıca kırılma tokluğuna olumsuz yönde etki ettiği düşünülmektedir. Artan krom miktarı tabaka kalınlığında ve arayüzeyde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmaya neden olmaktadır.

**Karbon:** Tabakanın sertliğini ve tabaka kalınlığı %0,4 karbon oranına kadar artar. Bu değerin üzerinde ise sertlik değerleri hemen hemen sabit kalmaktadır. Karbonun borür tabakasını düzleştirici etkisi vardır. Karbon oranı arttıkça borun difüzyonu azalacağından dolayı tabaka kalınlığı da azalan yönde davranış sergiler. Karbon atomları, borür tabakasını oluşturan  $Fe_2B$  ve  $FeB$  yapılarında homojen olarak dağılım (çözünmez) göstermez, bu nedenle borür tabakasının altında fazla karbonlar ( $Fe_3C$ ,  $Cr_3C$ ,  $Fe_6C_3$  şeklinde) sert bir tabaka olan bir difüzyon bölgesi meydana getirir. Düşük ve orta karbona sahip çelik malzemeler karbon oranındaki artış yapının iğne şeklinde bir morfoloji sahip olmasına neden olmaktadır.

**Silisyum:** Yapıya girdiğinde karbon gibi davranış sergiler, bor tabakasında çözünmez. Borür tabakasının sertliği üzerinde etkisi yoktur ama Si birikmesine neden olur. Bu nedenle yüksek miktarda (%1'in üzerinde) Si içeren yapılar borlamaya uygun değildir. Silisyum ayrıca bor tabakasının altında ferrit zonu oluşturur ve pullanma mukavemetini düşürür.

**Alüminyum:** Karbon gibi davranış sergiler, silisyum gibi bor tabakasında çözünmez. Yüksek miktarda Alüminyum olan malzemeler borlamaya uygun değildir. Silisyum gibi bor tabakasının altında ferrit zonu oluşturur ve pullanma mukavemetini düşürür.

**Mangan:** Krom ile benzer davranış sergiler ve yüzey kısımlarında yayılım gösterir. Kırılma tokluğuna olumlu etki etmektedir. Borür tabakasın sertliğine negatif yönde etkisi bulunmaktadır. Borür tabakasında manganın bulunması tabakanın yapısını düz bir form haline getirir.

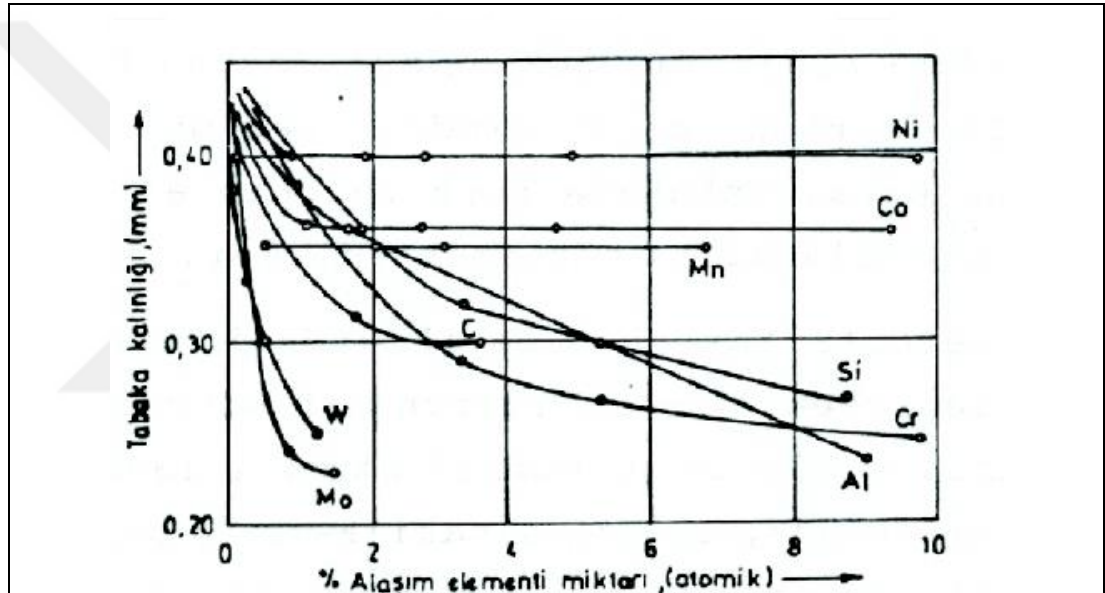
**Vanadyum:** Çelik yapıda vanadyum oranının artması tabaka kalınlığını azaltır, kolonsal yapıyı düzleştirir etkisi olur.  $VB$  ve  $V_2B_3$  gibi kararlı bor bileşikleri yapar. Yapının yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı özellikleri göstermesini sağlar.

**Tungsten:** Çelik yapıda tungsten oranının artmasıyla birlikte tabaka kalınlığı azalır, kolonsal yapı düzleşir. Tabaka ile geçiş kısımlarında konuşlanarak, yapının sahip olduğu mekanik performanslarına pozitif etki göstererek yapıyı iyileştirir.

**Molibden:** Çelik yapıda molibden oranının artmasıyla birlikte tabaka kalınlığı azalır, kolonsal yapı düzleşir. Tabaka ile geçiş kısımlarında konuşlanarak, yapının sahip olduğu mekanik performanslarına pozitif etki göstererek yapıyı iyileştirir.

**Titanyum:** FeB yapısında çözünür ve tabakanın sertliğini artırır. Geçiş bölgelerinde tane irileşmesini önleyici rol oynar.

Alaşım elementlerinin yapıdaki yayılma durumları hakkında: Krom ve mangan atomlarının borlanan malzemenin içinden yüzeye, nikel ve karbon atomlarının ise tersi yönde yayıldığı söylenebilir. Alaşım elementlerinin borür tabakasına etkileri Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3: Alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [7]

### 2.7.3 Borür Tabakasının Karakteristik Özellikleri ve Etki Eden Faktörler

Çeliklere uygulanan borlama işlemi ile FeB ve/veya Fe<sub>2</sub>B yapıları oluşmakta, bu yapılar borlama işlemi için bize yönlendiren bazı karakteristik özelliklere sahiptir.

Bor tabakasının üstün özellikleri;

- Yüksek sertlik değerlerine (1450-5000 HV) sahiptir.

- Yüksek sıcaklıklarda sertliğini korur (kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı ile sementasyonda sertleştirilmiş yapıların yumuşar, fakat borür yapısı sertliğini korur).
- Demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını (gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde) korur.
- 850°C'ye kadar oksidasyona dayanıklıdır.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır [15, 23].
- Borun oksijene afinitesi yüksek olduğundan malzeme yüzeyinde ince bir oksit tabaka oluşturur, bu tabaka da yüzeyde katı yağlayıcı vazifesi görür, sürtünmeli aşınma esnasında metal-metal temasını geciktirir, sürtünme katsayısını düşürür ve yüzeylerin birbirine kaynamasını engeller [25].

Borür tabakasının beraberinde getirdiği zayıf özellikler de söz konusudur. Bunlar;

- Karbürleşmiş/nitrürleşmiş çeliklerle kıyaslandığında, borlama işlemine tabi olan alaşımlı çeliklerin temas yorulma dayanımı (pullanma dayanımı) daha düşük kalır.
- İşlem sonucunda parçanın ölçülerinde (borlama tabakasında % 5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için) değişimler meydana gelir.
- Sertleşme sıcaklıkları 1100°C'nin üzerinde olan çelikler borlamaya uygun değildir (örneğin yüksek hız çeliklerinin sertleştirme sıcaklıkları genellikle 1150 °C'den fazladır ve borlamaya uygun değildir) [8].
- Özellikle çift fazlı ( $Fe_2B+FeB$ ) yapılarda kaplamanın kalınlığı arttıkça kırılma dayanımı da artmaktadır.

*Borür tabakasının kalınlığı* farklı etmenlere bağlıdır. Bu etmenler; malzemenin cinsi, malzeme kompozisyonu, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süredir. Teorik olarak işlem süresi ve sıcaklık arttıkça borür tabaka kalınlığının artması beklenir fakat bazı sınırlayıcı etmenler söz konusudur. Örneğin Fe-B Denge faz diyagramında belirtilen ötektik sıcaklığı (1149 °C) kısıtlayıcı etmenlerdendir. Bir diğer faktör ise kırılma dayanımıdır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılma dayanımı da artacaktır [10, 15, 21]. İdeal borür tabaka kalınlığı ise çelik esaslı malzemelerde kullanım alanına göre

20 - 200 µm arasında değişmektedir. Kırılğanlığın söz konusu olduğu durumlarda alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız çeliklerde 200 µm, darbeye maruz kalmayan ve su verilmeyen çeliklerde 400 µm tabaka kalınlığına çıkılabilir. Yüksek alaşımlı çeliklerde ise tercih edilen kalınlık aralığı 15-20 µm arasındadır [11].

*Borür tabakasının yapısı* da farklı değişkenlere bağlı olarak iki şekilde meydana gelebilir: Fe<sub>2</sub>B fazının baskın olduğu, testere dışı morfolojisine benzerlik gösteren bir yapı veya yüksek alaşım elementlerinin baskın olduğu çeliklerde sıklıkla karşılaşılan düz bir yapı. Alaşım elementleri bu yapıların oluşmasında en önemli faktörlerdendir. Bu yapılardan tercih edilen borür tabakası difüzyon yönüne de bağlı olarak tek fazlı testere dış yapısına benzeyen Fe<sub>2</sub>B yapısıdır. Çift fazlı FeB ve Fe<sub>2</sub>B bu yapıya göre daha az tercih edilmektedir. Bu durumun nedeni, borca daha zengin olan FeB (%16,23 bor içeriği olan ortorombik yapı) fazı, Fe<sub>2</sub>B (%8,83 bor içeren tetragonal yapı) fazına göre daha kırılğan olmasıdır.

Borür tabakasının *sertlik* değerleri karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV'lik yüzey sertliği elde edilebilir [25].

Borür tabakasını etkileyen bir diğer faktör *sıcaklıktır*. Tabaka kalınlığına sıcaklığın etkisi şu şekildedir:

- Genel olarak sıcaklık arttıkça tabaka kalınlığının arttığını söylememiz mümkündür. Burada sınırlayıcı faktör işlem sıcaklığının Fe-B faz denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olmasının gerekliliğidir [8].

- Tabaka kalınlığının artmasıyla yapının kırılğanlığının arttığı bahsedilmiştir. Borlama işlem sıcaklığının artması ise tabaka kalınlığını artırır fakat aynı şekilde poroziteyi de artırarak tabakanın gevrekleşmesine yol açar [21, 23].

- Borlama süre ve sıcaklığının artması neticesinde, elde edilen borür tabakasında gözeneklilik de göreceli olarak artar ve yüzey kalitesini azaltır [25].

Tabaka kalınlığına *karbonun* da etkisi söz konusudur. Az karbonlu çeliklerde daha kalın bor tabakası elde edilmektedir. Karbon oranı arttıkça tabaka kalınlığı azalır.

Katmanın özelliklerini etkileyen bir diğerk faktör ise *Faz durumu*dur. Borür katmanları  $Fe_2B$  ve  $FeB$  yapılarından oluşmaktadır. Bu fazlar arasında ısıl genişleme farklılıkları söz konusudur. Bu genişleme farklılıkları bor katmanının yüzeyinde çatlamalara neden olabilir. Bu nedenle çift fazlı yapıdan kaçınılmalı, katmalardan birinin ( $FeB$ ) azaltan veya ortadan kaldıran çalışmalar yapılması gerekmektedir [7].

#### 2.7.4 Borlama Sonrası Sertlik, Aşınma Direnci ve İç Gerilmeler

Borlama işlemi sonrasında oluşan tabakanın sertliği malzeme yüzeyinde meydana gelen  $Fe_2B$  ve  $FeB$  borür fazlarına bağlıdır. Bu fazlardan  $FeB$  fazı  $Fe_2B$  fazına kıyasla daha sert ve gevrekler. Bazı malzemelerin borlama sonrası elde edilen sertlik değerleri şu şekildedir: Karbon çelikleri: 1800 - 2000 HV, alaşımlı çelikler: 2500 - 2800 HV, titanyum: 3000 HV.

Aşınma birbirine temas ederek çalışan malzemeler için önemli bir sorundur. Borlama ile aşınmayı azaltarak malzemenin kullanım ömrünü artırmak mümkündür. Bunun için kaplanan malzemenin yüzeyi seramik ferro-bor ile kaplanır. Bu da adhezif aşınmayı azaltılır. Bor atomun oksijene afinitesi fazladır. Bu nedenle borlama işleminde yüzeyde koruyucu ince bir oksit tabaka meydana gelir. Bu tabaka yağlayıcı etki meydana getirir, sürtünme katsayısını azaltarak malzemenin daha az aşınmasını sağlar. Borlama işlemi ile hem sert (WC'ün sertliğine eşdeğer) hem de sürtünme katsayısı düşük (Teflon'un (PTFE) sürtünme katsayısına eşdeğer) bir yapı elde edilmesi mümkündür.

Borlama işlemi uygulanan malzemelerde meydana gelen iç gerilmeler kritik öneme sahiptir. Bu nedenle bor katmanının ideal yapısı tek fazlı ve girintili-çıkıntılı olan yapıdır. Yapı eğer çift fazlı olursa, bu fazlar birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri meydana getirecek, dolayısıyla iki faz arasında çatlaklar oluşması ve bunun sonucunda mekanik zorlamanın da etkisiyle zamanla malzeme yüzeyinden uzaklaşmalar, ayrılma ve kopmalar meydana gelecektir [11]. Bu iç gerilmeler malzeme içinde kalıntı gerilmeler olarak yer alır ve fazlar arası termal genişleme katsayılarının farkıyla birlikte borür tabakasının bazı bölgelerinde yüzeye paralel,  $FeB$  ve  $Fe_2B$  arayüzeyleri boyunca çatlak oluşmasına neden olabilir [25]. Bu çatlaklar düşük sıcaklıklarda daha az, yüksek sıcaklıklarda daha fazla meydana gelir.

Dolayısıyla bor ile kaplama işleminde kaplamanın yapısına etki eden faktörler şu şekilde özetlenebilir: - malzemenin kimyasal bileşimi, - borlama şartları, - uygulanan ısıl işlem, - Tabakanın faz yapısı (tek fazlı, çift fazlı oluşu), - düz veya girintili oluşu ve işlem sıcaklığı.

## 2.8 Borlamanın Sektörel Kullanım Alanları

Borun yaygın olarak demir esaslı malzemelerde alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacıyla kullanıldığı görülmektedir.

Bor ve ürünlerinin kullanıldığı sektörler şu şekildedir: Cam sanayi, seramik sanayi, nükleer sanayi, askeri zırhlı araçlar, elektronik-elektrik ve bilgisayar sanayi, iletişim araçları, inşaat-çimento sektörü, metalürji sanayinde enerji sektörü, otomobil sanayi, tekstil sektörü, ilaç ve kozmetik sanayi, tıp, kimya sanayi, temizleme ve beyazlatma sanayi, tarım sektörü, kâğıt sanayi, mıknatıslar, fotoğrafçılık, kompozit malzemeler, spor malzemeleri, manyetik cihazlar ve mumyalama [8].

Bu alanlarda üretilen bazı malzemeler ise şu şekildedir [22, 26]:

- Plastik sanayisinde; mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme ekipmanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıp malzemelerinde bulunan basma ve sürme matris sistemlerinde kullanılan takım çelikleri
- Demir-çelik endüstrisinde, haddehanelerde kullanılan merdanelerde, (105WCr6, X210XrQ12, X165CrVMo121)
- Yüksek performans özelliklerine sahip tekerleklerin imalatında ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida, helesel dişli sistemlerinde,
- Sıcak dövme işlemlerinde kullanılan alt ve üst kalıp malzemelerinde,
- Demir dışı malzemelerin döküm besleyici ekipmanlarında (AISI H11),
- Seramik tuğla ve ekipmanların kalıba alınması işleminde kullanılan kalıplarında (AISI 4140 çeliği),
- Vida ve silindirik dişliler, konik dişlilerde borlama işleminin kullanımı görülmektedir (AISI 4317 çeliği).

# Bölüm 3

## Ray Çelikleri

### 3.1 Rayların Genel Özellikleri

Demiryolu araçları ile direkt temasta bulunan tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan, aşınmaya dayanıklı ve yüksek mukavemetli çelikten özel profilde imal edilmiş üstyapı elemanına ray denir [27].

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber daha fazla ağırlıkta yük çekebilecek lokomotifler geliştirilmiştir. Artan taşıma gücü daha fazla dingil basıncı ile yüksek hızlarda işletmecilik yapma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu durum raydaki istenilen mukavemet değerinin ray kesitinin büyütülmesi ile sağlanabileceğini göstermiştir. Günümüzde kullanılmakta olan UIC standartlarına göre ray çeliğinin çekme mukavemeti en az  $880 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir.

Gelişen teknolojiye ve değişen şartlara uygun rayların üretilmesi rayların kimyasal yapısında değişiklik yapılması ile mümkündür. Rayların daha sert üretilmesi bazı sorunları çözerken beraberinde kırılma riskini de getirmekte ve/veya üzerinden geçen tekerleklerin daha çabuk aşınmalarına sebep olmaktadır. Daha yumuşak imal edilen raylar ise daha hızlı aşındığından ekonomik olmamaktadır. Bu yüzden, ray üretilirken aşınmayacak kadar sert ve kırılmayacak kadar esnek yapıda raylar önem arz etmektedir [27].

Zamanla ray, teker veya her iki malzemenin aşınması nedeniyle tekerlek ve ray profilleri ile temas noktaları (eşdeğer koniklik) zamanla değişir. Tekerlek ve ray profillerinde oluşacak en küçük değişiklikler, araç güvenliği üzerinde önemli etkiler ortaya çıkartabilir [28].

Tablo 2’de demiryollarında sıklıkla kullanılan EN 13674 standardına göre rayların sınıflandırılması, mikroyapıda yer alan alaşım elementleri ve mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2: EN 13674 Standardına göre rayların sınıflandırılması

RAY KALİTE TABLOSU		KİMYASAL ÖZELLİKLER										MEKANİK ÖZELLİKLER				
Standart	Kalite (Grade)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	H2 (ppm)	Rm (MPa)	Elongation (%)	BHN Hardness	Orta ekseninde		
	700	0.40/0.60	0.05/0.35	0.80/1.25	≤ 0.050	≤ 0.050					680/830	≥ 14				
UIC 860-C	900A	0.60/0.80	0.10/0.50	0.80/1.30	≤ 0.040	≤ 0.040					880/1030	≥ 10				
	900B	0.55/0.75	0.10/0.50	1.30/1.70	≤ 0.040	≤ 0.050					880/1030	≥ 10				
	R200	600.40/0.60	0.15/0.58	0.70/1.20	≤ 0.035	0.008/0.035	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 3.0	≤ 680	≥ 14.2	200/240			
	R220	0.50/0.60	0.20/0.60	1.00/1.25	≤ 0.025	0.008/0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 3.0	≤ 770	≥ 12	220/260			
	R260	0.62/0.80	0.15/0.58	0.70/1.20	≤ 0.025	0.008/0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 2.5	≤ 880	≥ 10	260/300			
EN 13674-1	R260Mn	0.55/0.75	0.15/0.60	1.30/1.70	≤ 0.025	0.008/0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 2.5	≤ 880	≥ 10	260/300			
	R350HT	0.72/0.80	0.15/0.58	0.70/1.20	≤ 0.020	≤ 0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 2.5	≤ 1175	≥ 9	350/390			
	R370CrHT	0.70/0.82	0.40/1.00	0.70/1.10	≤ 0.020	≤ 0.020	0.40/0.60	≤ 0.004	≤ 0.03	≤ 1.5	≤ 1280	≥ 9	370/410			
EN 13674-2	R260Cr	0.40/0.60	0.20/0.45	1.20/1.60	≤ 0.025	≤ 0.025	0.40/0.60	≤ 0.004	≤ 0.06	≤ 2.5	≤ 880	≥ 10	260/300			
IRS	880	0.60/0.80	0.10/0.50	0.80/1.30	≤ 0.030	≤ 0.030	.	≤ 0.015		≤ 1.6	≤ 880	≥ 10	≥ 260			
	1080HH	0.60/0.80	0.10/0.50	0.80/1.30	≤ 0.030	≤ 0.030	.	≤ 0.015		≤ 1.6	≤ 1080	≥ 10	340/390			

Raylar sınıflandırılırken birçok farklı faktör göz önünde bulundurulur. Bu faktörlerden bazıları: mikroyapısal özellikleri, mekanik özellikleri, ısıl işleme uğrama durumları, ağırlıkları ve boyutlarıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan raylar EN 13674-1 standardına göre üretilmektedir. Bu standarda göre üretilen raylar R200, R260, R260Mn, R260Cr, R350HT ve R370CrHT şeklinde sınıflandırılmaktadır [28]. Sektörde en fazla kullanılanlar ise R260 ve R350HT kalite ray çelikleridir.



rayların yorulma, sürtünme ve aşınma gibi meydana gelen dış etkenler rayın ömrünü etkilemektedir [29]. Bunun yanı sıra rayın üzerinden geçen trenin dingil basıncı, üzerinden geçen tren türü (yük treni, yolcu taşımacılığında kullanılan tren veya tamir (iş) treni) ve işletmenin karma olup olmaması da ray ömrünü belirleyen önemli faktörlerdendir. Karma hatlarda trenlere göre rayların belirlenmesinde ve tek tip rayın bütün taşımacılığa uygun olmaması neticesinde başta aşınma ve ondülasyon olmak üzere birçok üstyapı sorununa neden olmaktadır. Bu da rayların kullanım ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır.

Demiryolu raylarında ray-teker ilişkisinden kaynaklı sürtünme ve dolayısıyla aşınma kaçınılmazdır. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar aşınmanın meydana gelme süresini uzatmak ve/veya aşınmanın düzeyini azaltmak içindir. Rayın mikroyapısının değiştirilmesi (Cr, Mn gibi elementlerin artırılması), ısıl işleme tabi tutulması (mantarının sertleştirilmesi), ray mantar yüzeyinin kaplanarak sertleştirilmesi veya ray yüzeyinin yağlanması aşınma düzeyini azaltmak için yapılmaktadır.

## 3.2 Rayların Mikroyapısal Özellikleri

Demiryollarında; düşük maliyetli olması, düşük aşınma özelliklerine ve yüksek dayanıklılığa sahip olmaları nedeniyle genellikle %0,7 C oranında ve %90 oranında perlitik mikroyapıdaki ray çelikleri kullanılmaktadır [29]. Bunun yanı sıra beynitik, östenitik ve temperlenmiş martenzitik ray çelikleri de üretilmektedir.

### 3.2.1 Perlitik Mikroyapı

Perlitik yapılı ray çelikleri yumuşak ferritik yapı içinde ince, uzun ve sert sementitlere ( $Fe_3C$ ) sahiptir [2]. Perlitik yapılı ray çelikleri yüksek seviyede sertleşebilme özelliğine sahiptir [29].

Bu yapıdaki karbon oranı %0,50-1,00 arasında değişmektedir. Ayrıca karbon miktarı arttıkça çeliğin sertlik derecesi de artmaktadır.

Perlitik ray çeliklerinin sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin yüksek olmasıyla birlikte % uzama ve süneklik değerleri görece zayıftır. Yorulma ve aşınmaya karşı dayanımını arttırmak için; perlitik mikroyapı içerisindeki karbon miktarının

arttırılması, alaşım elementleri ilavesi ve rayların mantar kısmının sertleştirilmesi işlemleri yapılmaktadır [2]. Ayrıca aşınma dayanımını arttırmak için ısıl işlem de uygulanmaktadır.

### 3.2.2 Beynit Mikroyapı

Beynitik yapı, karbon miktarının %0,70-0,80 dolaylarında olduğu çeliklerde ferrit ve lamelli olmayan sementit ( $Fe_3C$ ) yapıdan oluşur.

eliğe eklenen alaşım elementleri ve uygun soğutma hızları beynitik yapının oluşmasını sağlar. Bu mikroyapı ile elde edilen rayların, tokluk değerleri ve suneelikleri iyidir, darbelere karşı dayanımlıdır [29]. Kaynak edilebilirliği perlitik yapılara gore daha iyi, akma dayanımı, yorulma direnci ve aşınma dirençleri de yüksektir.

### 3.2.3 Östenitik Mikroyapı

Östenitik yapıya sahip raylar 730 C sıcaklıkta üretilmektedir [29]. Bu yapıya sahip raylar, düşük akma dayanımlarına, dolayısıyla düşük kırılma dayanımına sahiptir ve aşınma davranışlarının iyi olmaları sebebi ile genellikle makaslar bölgelerinde kullanılır.

### 3.2.4 Temperlenmiş Martenzit Mikroyapı

Düşük alaşımlı östenitik mikroyapıda elik malzemenin 730C üzerinde bir seviyedeiken aniden oda sıcaklığına soğutulması neticesinde martenzit yapılar oluşur. Hızlı soğutmanın etkisiyle mikroyapı içindeki karbon atomlarının yapı içerisine yerleşecek fırsat bulamaz, bu nedenle sert ve gevrek yapı bir yapı oluşur. Dolayısıyla her ne kadar üstün özelliklere sahip olsa da martenzitik mikroyapıdaki ray çeliklerinin aşınma dayanımları kullanım koşulları göz önünde bulundurulduğunda istenilen seviyede değildir. Kullanılmadan önce ısıl işleme tabi tutulmaları gerekir.

### 3.3 Ray Çeliklerinin Kimyasal Yapısı

Ray çeliklerinin kimyasal yapısı içerisinde ana element olan demir elementine (Fe) ek olarak; karbon (C), silisyum (Si), manganez (Mn), krom (Cr) gibi elementler bu yapının dayanımını arttıran, faydalı elementler olarak adlandırılırken, kükürt (S) ve fosfor (P) elementleri ise bu yapıya zarar veren elementler olarak adlandırılır [28].

Rayların kimyasal bileşimiyle ilgili farklı kaynaklarda farklı değerler verilmiştir. Bu kaynakların işaret ettiği değerler yaklaşık olarak şu şekildedir:

- Karbon: Çeliğin dayanıklılığını arttıran etki yapar. Fakat yapıyı daha gevrek hale getirir. Ray çeliklerinin yapısında genellikle %0,4 ile %0,82 arasında karbon elementi bulunmaktadır. Tercih edilen karbon aralığı ise %0,4 ile %0,6 aralığındadır.
- Silisyum: Yapıdaki oksijeni tutarak çeliğin akıcılığını arttırır, bu sayede yoğun olmasını ve homojenliğini sağlar. Silisyum değeri %0,15 ile %0,60 değerleri arasındadır. Tercih edilen silisyum oranı %0,35 - %0,50 aralığındadır.
- Manganez: Çeliği yapının dayanımını ve sertliğini arttırır. Karbon miktarının yaklaşık 2-3 katı miktarında mangan elementi bulunmaktadır. Bu miktar 0,70 ile 1,70 arasında değişmektedir.
- Fosfor: Ray çeliği yapısında %0,035'in altında fosfor elementi bulunması istenilmektedir. Çeliğin daha sert ve dayanıklı olmasını sağlar. Yalnız elastikiyetini kaybetmesine neden olduğu için yapıdaki fosfor oranı sınırlandırılmıştır. Yapıya zarar verse de korozyon dayanımını arttıran özelliği de vardır.
- Kükürt: Demir atomları ile birleşerek yapıyı gevrekleştirir. Bu nedenle rayların yapısında istenen bir element değildir. Ray çeliği yapısı içerisinde çıkartılamadığı için yapıdaki kükürt miktarının %0,025'in altında olmasına göz yumulur.

### 3.4 Rayların Mekanik Özellikleri

Rayların mekanik özellikleri trenlerin güvenli bir şekilde seferlerini gerçekleştirmelerine olanak verecek şekilde belirlenmiştir.

EN 13674 standardına göre rayların mekanik özellikleri:

- Çekme gerilimi 680 ile 1280 MPa arasında değişmektedir.
- % olarak uzamaları 9 ile 14 arasında değişmektedir.
- Rayların sertlik değerleri HBW olarak 200 ile 410 aralığındadır. R260 kalite ray çeliğinin sertlik değerleri 260 - 300 HBW (yaklaşık 258 – 303 HV) aralığındadır.

Mikroyapısı bilinen rayların çekme ve akma gerilmesi ile kırılma sonrası uzamaları aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

Çekme Gerilmesi  $\sigma_u$  [N/mm<sup>2</sup>];

$$\sigma_u = 227 + (803\%C) + (87\%Si) + (115\%Mn) + (133\%Cr) + (891\%P) + (614\%V) \pm 19$$

Akma Gerilmesi  $\sigma_y$  [N/mm<sup>2</sup>];

$$\sigma_y = 101 + (469\%C) + (36\%Si) + (85\%Mn) + (116\%Cr) + (0\%P) + (634\%V) \pm 21$$

Kırılma Sonrası Uzama [%];

$$\delta_5 = 30.8 - (22.6\%C) - (1.7\%Si) + (0\%Mn) - (2.3\%Cr) + (0\%P) + (4.4\%V) \pm 0.9$$

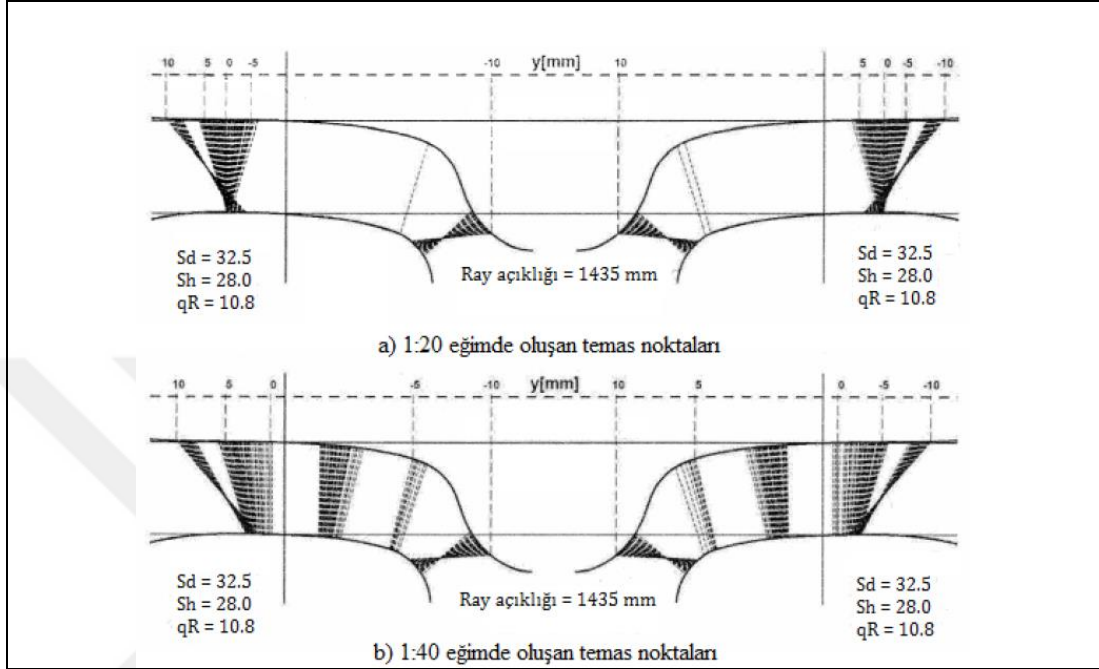
### 3.5 Ray-Teker İlişkisi

Demiryolu araçları, tren tekerlerinin rayların üzerindeki yuvarlanmaları ile hareket ederler. Ray aşınmalarının temel nedenlerinden birisi trenin, dolayısıyla tekerleğin ray üzerinde meydana getirdiği basınç ve sürtünme etkisidir [32]. Bu nedenle aşınmayı anlamak için tekerlek-ray ilişkisini anlamak gerekir. Kaliteli, güvenli ve konforlu tren seferleri için tekerlek-ray etkileşiminin optimum seviyede tutulması ve bakımlarının düzenli yapılması gerekir.

Tekerlek-ray arasındaki ilişki işletme güvenliği, deray durumu, kurplardan geçiş sırasında tekerlek ve ray arasında ortaya çıkan kuvvetlerin, sürüş konforunu ve ray yorulma riski gibi faktörleri etkilemektedir [27].

Doğrusal yollarda (aliyman) her iki tekerleğin beraber yuvarlanarak kat ettiği mesafeleri aynıdır. Ancak virajlarda (kurplarda) anı mesafede iç rayın uzunluğu dış rayın uzunluğuna göre daha kısa olduğundan, dış raya temas eden tekerlek iç ray

üzerinde giden tekerleğe göre daha uzun bir mesafeyi kat etmesi gerekmektedir. Bu nedenle tekerlekler konik şekilde imal edilmiştir. Aliymanda eğer yanal yönde hafif bir yer değiştirme olursa dingillere merkezci bir kuvvet uygulanır. Ray-teker temas noktaları Şekil 5’de şematize edilmiştir.

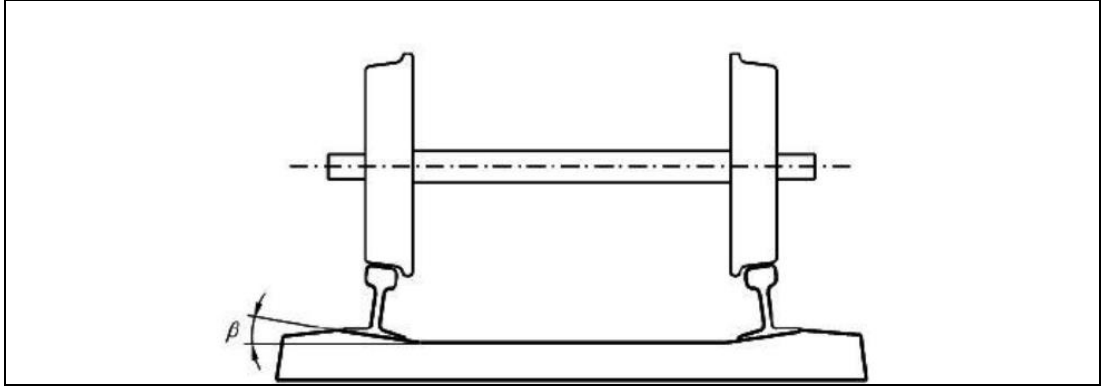


Şekil 5: Farklı eğimlerde Ray-Teker temas noktaları [10]

Kurplarda merkezkaç kuvvetiyle birlikte dış raya temas eden tekerleğin yuvarlanma yüzündeki koniklik sebebiyle konik kısmın büyük çapı üzerinde, kurbun iç rayına temas eden tekerlek ise konik kısmın küçük çapı üzerinde dönerek bu olumsuz davranışı ortadan kaldırmaya çalışmıştır.

Tekerleklerden iletilen yüklerin tam olarak ray mantarının orta eksenine gelmesini sağlamak için raya demiryolu hattının iç yönüne doğru eğim verilir. Tekerleğin rayla temas ettiği noktanın konik, rayların ise düşey durumda olması halinde tekerlek rayla çizgi teması yapacağından ray yüzeyine iletilen büyük basınçlar oluşur.

Tekerlek ray ilişkisini daha demiryollarına daha az zarar verecek bir noktaya çekme, yani ray-tekerlek temas yüzeyini artırmak için, Şekil 6’da görüldüğü gibi raylar yol içerisine doğru 1/20 eğimli olarak döşenmektedir. Bu sayede daha fazla yuvarlanma, daha az kayma ve daha az aşınma olur. Bir diğer ifade ile, ray üzerinde daha fazla yuvarlanma ve daha az aşınma elde edebilmek için, tekerler silindir değil konik şekilde imal edilir.



Şekil 6: Rayların yolun içine doğru eğimli olması (1/20) [27]

### 3.6 Rayların Aşınması

Ülkemizdeki demir yolu ağının %34,2'si dar yarıçaplı kurplardan oluşmaktadır. Bu kurplarda aşırı sürtünme etkisiyle iç taraftaki raylar daha kısa sürede aşınmakta ve kullanım ömürleri düşmektedir [30-32].

Ray aşınması günümüzde en önemli sorunlardan birisidir. Bu konuda müselles<sup>1</sup> yolunda yapılan ölçümlerle rayların aşınması incelenmiştir.

Müselles deniz yolu makastan makasa uzunluğu 700 metredir. Bu uzunluğun 400 metrelik kısmını R175 yarıçaplı kurp<sup>2</sup>, 300 metrelik kısmını ise aliymandan<sup>3</sup> oluşturmaktadır. Düşük yarıçaplı kurp nedeniyle dış ray dizisinde ray aşınması ve iç ray dizisinde ondülasyon gibi çeşitli ray kusurlarına neden olmaktadır.

Bu kapsamda 515 gün (1 yıl 5 ay 28 gün) süren incelemede; çeşitli periyotlarla toplamda 9 kez ray profil ölçümü gerçekleştirilmiş, ray aşınmaları kayıt altına alınmıştır. Ölçüm çalışmaları Calipri cihazı ile yapılmış olup veriler Excel formatında kaydedilmiştir.

---

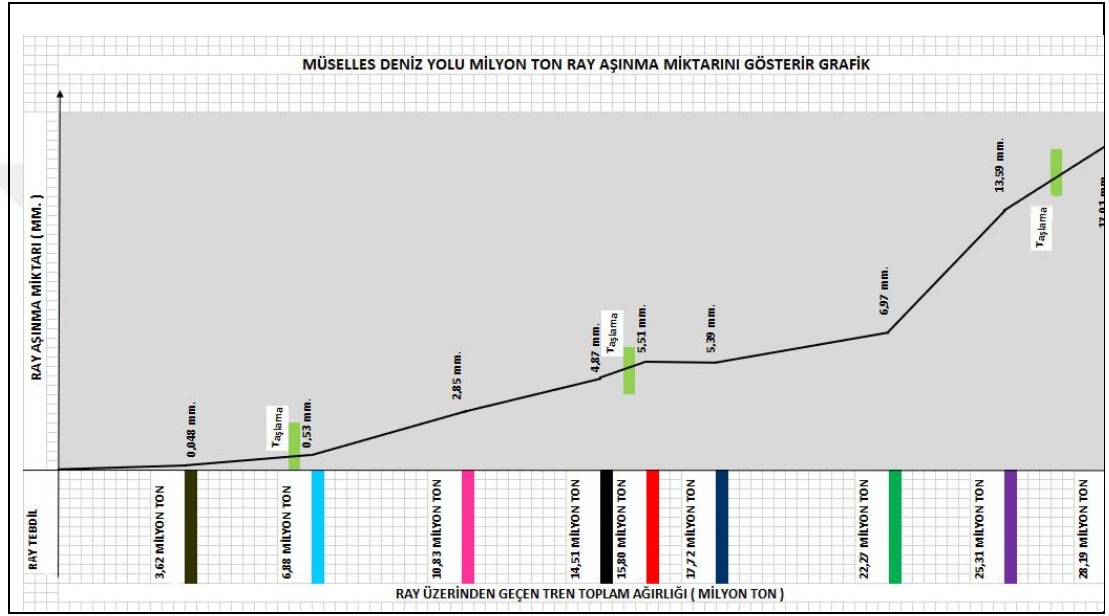
<sup>1</sup> Müselles: genellikle üç demiryolu hattının buluştuğu yerde bir yönden gelen treni diğer iki yönden herhangi birine gönderebilmek için kurulan üç makastan oluşan üçgen hat tertibatıdır [33].

<sup>2</sup> Kurp: Demiryolunun düz olmayan, sağa veya sola virajlarından her biri [33].

<sup>3</sup> Aliyman: Düz demiryolu.

Ölçümler süresince ölçüm yapılan hat 3 defa (105. gün, 284. gün ve 496. gün) taşlama işlemine tabi tutulmuştur.

Rayların aşınmasında en önemli etkenlerden birisi hattan geçen trenlerin sayısı, yani trenden rayın üzerine etki eden dingil basıncıdır. Bu nedenle ölçüm yapılan sürelerde rayın üzerinden geçen trenlerin milyon ton olarak verileri elde edilmiştir. Bu veriler y ekseninde rayın aşınma miktarı (mm) ve x ekseninde ray üzerinden geçen tren toplam ağırlığı (milyon ton) alınarak Şekil 7’deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 7: Müselles yolundaki ray aşınma grafiği

Ayrıca, iki ölçüm arasında geçen sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarları da hesaplanmıştır. Bu veriler;

- İlk 55 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 65.818 ton
- 55. günden sonraki 56 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 58.214 ton
- 111. günden sonraki 95 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 41.579 ton
- 206. günden sonraki 57 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 64.561 ton
- 263. günden sonraki 19 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 67.895 ton
- 282. günden sonraki 39 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 49.231 ton
- 321. günden sonraki 79 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 57.595 ton

- 400. günden sonraki 55 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 55.273 ton
- 455. günden sonraki 51 günlük sürede günlük ortalama çalışan tren tonaj miktarı: 56.471 ton şeklindedir.

Grafik incelendiğinde;

1. Müselles deniz yolu için ray aşınmasının kritik noktaya ulaşması için bir sene 6 aylık bir süreç geçmiştir. Bu süreçte taşlama çalışmalarıyla aşınmanın yavaşlatılması çalışması da yapılmıştır.

2. Ray tebdil edildikten sonra yaklaşık 4 ayda ray 0,5 mm aşınmış olmasına rağmen, sonraki 8. ayda 3 mm'ye yakın aşınma, 12. ayda 5,5 mm, 16. ayda ise 13,59 mm aşınma davranışı sergilemiştir. Buradan anlaşılacağı üzere ray aşınmaya başladıktan sonra aynı sürede ve benzer günlük ortalama tren tonajına maruz kalmasına rağmen aşınma hızı artmıştır.

3. Rayın aşınma hızını yavaşlatmak adına 3 farklı zamanda taşlama yapılmıştır.

a. Yapılan ilk taşlama biraz olsun aşınmayı yavaşlatmıştır. Bariz bir etkisinin olduğu grafik verilerinde görünmemektedir. Taşlamanın etkisinin grafik üzerinde 5 aylık süre içerisinde aşınmanın sabit devam edip sonrasında taşlamanın etkisinin kaybolduğu ve aşınma hızının arttığı görülmektedir.

b. Rayda yaklaşık 5 mm.lik aşınma meydana geldiğinde yapılan ikinci taşlama grafikte bariz bir şekilde görüleceği üzere 4 aylık süre içerisinde aşınma hızını önemli ölçüde azaltmıştır.

c. Rayın yaklaşık 15 mm aşındığı zamanda yapılan üçüncü taşlama ise ray aşınması çok fazla olduğu için bir etki yaratmamış ve aşınmayı yavaşlatmamıştır.

4. Hatta uygulanan üçüncü taşlama işleminin ray aşınmasını engellememesinin nedeni ray mantar yuvarlanma yüzeyinin taşlanmaması ve sadece ray üstünün taşlanmasından kaynaklı olabileceği veya ray aşınması sonrasında ekartmanın artması ve tren tekerinin bastığı yolun belli olması, sürekli aynı noktaya basması bunun da aşınmayı arttırması varsayımı yapılmaktadır.

Trenlerin dingil basıncı dolayısıyla tren tekeri ile ray etkileşiminin de ray aşınması kaçınılmaz bir durumdur. Ray aşınması başlı başına bir kusur olmakla birlikte demiryolu hattında diğer hatalara da (örneğin ondülasyon, ekartmanın artması vb.) neden olmaktadır. Aşınmayı tamamen durdurmak söz konusu değildir fakat alınacak önlemler ve bakım çalışmalarının planlanmasıyla ray aşınması hızı azaltılabilir, meydana getirdiği diğer sorunların önüne geçilebilir. Bu kapsamda;

- Etkili bir taşlama işlemi için ray aşınmasının 7 mm'den aşağı olması,
- Ray tebdilinden sonra 4. Ayda koruyucu taşlamanın yapılması,
- Bir sonraki taşlamanın da yaklaşık 4 ay içerisinde tekrarlanması,
- Aşınmayı engelleyici uygulamaların (örneğin ray yağlama, ray mantar yüzeyinin iyileştirilmesiyle sürtünmenin azaltılması gibi) bakım planına alınması ve sorunsuz çalışmasının sağlanması ray aşınma hızını azaltacak ve nihayetinde hat güvenliğini sağlayacaktır.

# Bölüm 4

## Aşınma

### 4.1 Aşınma Hakkında Genel Bilgi

Aşınmanın tanımı, birbirleri ile temas halinde olan yüzeylerin mekanik etkenlerden dolayı yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Temas halinde bulunan iki yüzey arasındaki bağıl hareket, cisimlerin yüzeyini etkileyerek aşınmayı meydana getirir. Aşınma ile malzeme yüzeyleri ilk formlarını kaybeder ve önceki işlevlerini yerine getiremez hale gelir [2].

DIN 50320 standardına göre aşınma şu şekilde tanımlanmıştır; “Cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir”.

Bir yapıda aşınmadan söz edebilmek için bir aşındırıcı bir de aşınan olması gerekir. Bir malzeme farklı ortamlarda hem aşındırıcı hem de aşınan olabilir. Bunun nedeni aşındırıcı ve aşınan yapıların sertlik ve diğer ortamsal faktörlere bağlı olmasıdır. Ortam koşulları ve malzemeler aynı ise benzer koşullarda aşındırıcı ve aşınan rolleri sürekli tekrar eder.

Metal parçaların kullanıldığı ortamlara göre aşınma durumları şu malzeme grupları arasında gerçekleşmektedir [14]:

1. Metal – Metal
2. Metal – Ametal
3. Metal – Sıvı

Burada belirtilen şartlar değişebilir, önceden metal – metal olan durum, metal – ametal haline dönüşebilir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında bu sınıflandırma kullanılabilirliğini yitirmiş durumdadır.

Aşınma kullanılan yapıların düzenini bozduğu için problem olarak addedilir. Bu aşınma problemini azaltmak adına yağlama, filtreleme, uygun bir malzeme seçilmesi ve tasarımda düzenlemeler yapılması gibi çalışmalar yapılabilir edilebilir fakat hiçbir zaman aşınma tamamen önlenemez.

Mühendislik alanında malzemelerindeki yıpranmanın aşınma olarak kabul edilebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlıyor olması gerekir [23];

1. Mekanik bir etkinin olması,
2. Sürtünmenin olması,
3. Yavaş fakat devamlı olması,
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5. İsteğimiz dışında meydana gelmesi gibi.

Bu şartlardan biri dahi sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma mühendislik anlamında aşınma olarak kabul edilmez.

Aşınma malzemeye, ortama, çalışma koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Literatürde aşınmayı etkileyen faktörlerin şu şekilde olduğu görülmüştür:

- |  |   |
|--|---|
| - Malzemenin kristal yapısı ve atom çapı           | - Ortamın korozyon yapısı ve malzemenin korozyon potansiyeli  |
| - Malzemenin ergime sıcaklığı                      | - Pürüzlülük  |
| - Malzemenin yüzey sertliği                        | - Sürtünme kuvveti  |
| - Malzemenin plastik akma mukavemeti               | - Aşındırıcı partikülün boyutu ve şekli (abrazif aşınma için)   |
| - Malzeme geometrisi                               | - Malzemenin kırılma tokluğu (abrazif aşınma için)  |
| - Uygulanan yük ve bu yükün sürekliliği            | - Temas basıncı   |
| - Kayma yolu (mesafesi) ve kayma hızı              | - (Oksidasyon aşınması için) Metalin oksijene afinitesi ve oksidasyon kinetiği  |
| - Maruz kalma süresi                               | - Yüzey kalitesi  |
| - Ortamın sıcaklığı                                | - Parçanın üretim aşamasındaki hataları (gözenek, cüruf, çatlak, kalıcı çekme gerilmeleri, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlülüğü vb.) |
| - Yüzeyin ıslak ya da kuru olması (yağlama)        |   |
| - Yağlayıcı olarak kullanılan yağın viskozitesi    |   |
| - Atmosferik koşullar (parçanın çalışma koşulları) |   |

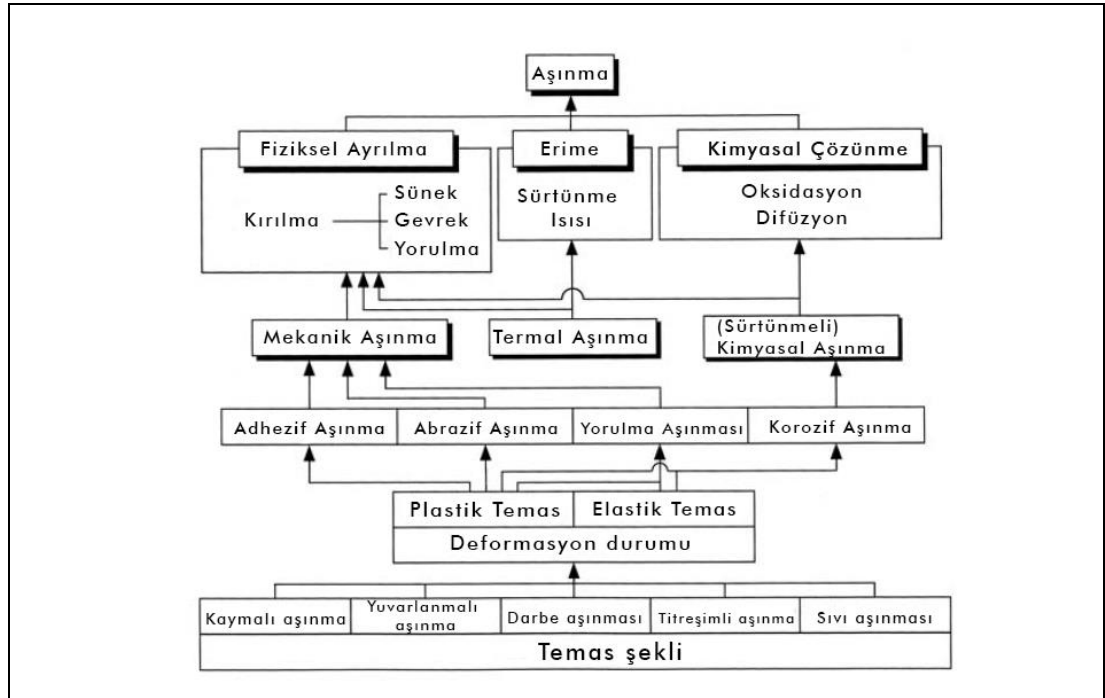
Aşınmaların meydana gelmesi malzemeye verdiği hasar kadar sisteme de hasar vermekte, ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle demiryollarındaki rayların aşınması sadece ray aşınmasından ibaret değil, trenlerin güvenli bir şekilde çalışması açısından bir tehdit unsurudur.

## 4.2 Aşınma Türleri

Aşınmaların daha iyi anlaşılması adına literatürde birçok farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılmıştır. Aşınmaların en genel sınıflandırılması aşağıdaki gibidir:

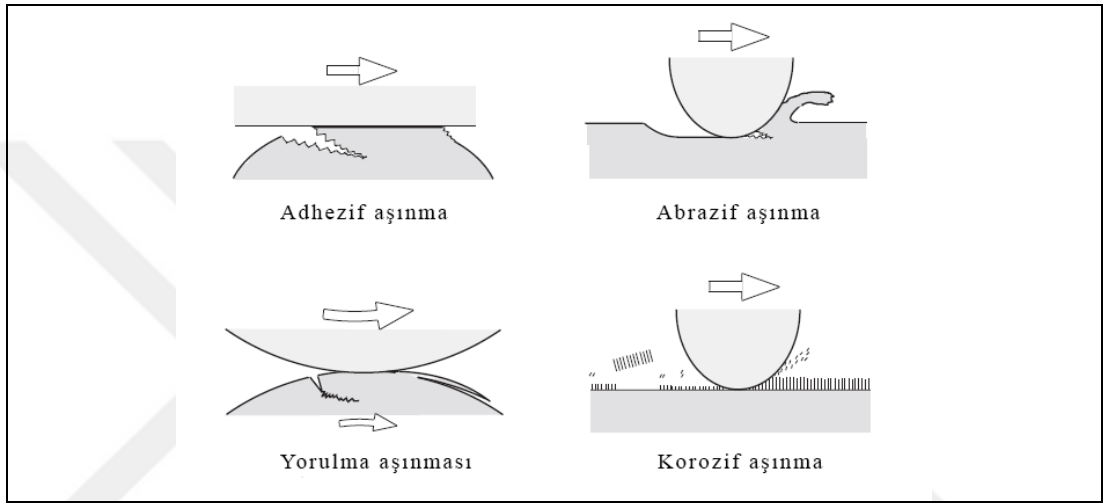
- Adhezif Aşınma
- Abrazif Aşınma
- Yorulma ve Delaminasyon Aşınması
- Oksidasyon Aşınması.

Bu aşınma türleri endüstride %50'i abrazif aşınma, %15'i adhezif aşınma, %8'i eroziv aşınma, %8'i korozyon aşınması, %5'i kimyasal aşınma ve %14'ü diğerleri şeklinde karşımıza çıkmaktadır. En çok karşılaşılan aşınma türü ise abrazif aşınmadır [14].



Şekil 8: Aşınma türleri ve meydana gelme şekilleri [34]

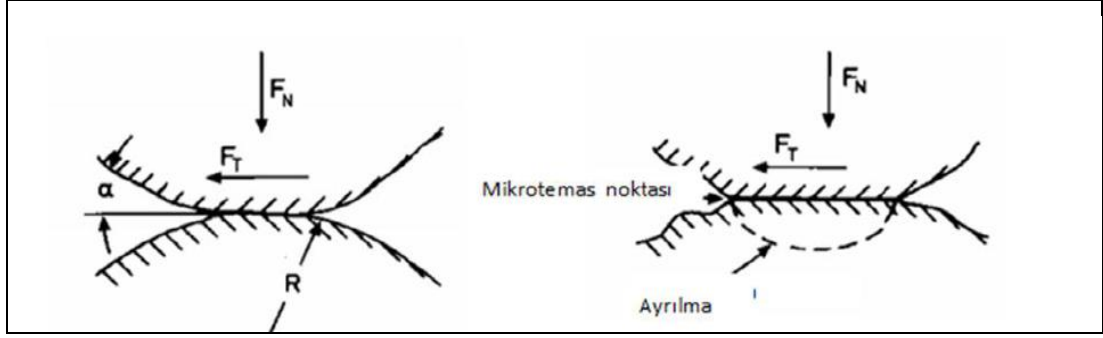
Şekil 8’de aşınma mekanizmaları, türleri ve meydana gelme şekilleri gösterilmektedir. Aşınmanın meydana gelmesi için öncelikli olarak temas şeklini anlamak gerekmektedir. Yapıda meydana getirdiği değişikliklere göre aşınmaların meydana geliş şekilleri de farklılaşmaktadır. Abrazif ve adhezif aşınmalar plastik deformasyon, yorulma ve korozyon aşınması hem plastik ve hem de elastik deformasyonda meydana gelir. Şekil 9’da görüldüğü üzere abrazif ve adhezif aşınmalarda deformasyon nedeniyle parçacıklar koparken, yorulma aşınmasında esneklik ve gevreklik nedeniyle aşınma mekanizması meydana gelir [34].



Şekil 9: Aşınma türlerinin şematik gösterimi [34]

#### 4.2.1 Adhezif (Yapışma) Aşınma

Adhezif (yapışma) aşınması, kayma ve yapışma aşınması olarak da bilinir [23]. Temas halindeki yüzeylerin bağıl hareketi sonucunda bir yüzeyden diğerine partiküllerin sıyrılarak yapışması ile yüzeyler arası malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [2]. Partiküllerin kopması bağ kuvvetinin zayıf olduğu noktalarda meydana gelir. Katı parçacıkların yüzeye zarar vermesiyle oluştuğundan dolayı genellikle malzeme hacminin ya da ağırlığının azalmasına neden olur [14]. Şekil 10’da adhezif aşınmanın oluşma şekli gösterilmektedir.



Şekil 10: Adhezif aşınmanın şematik gösterimi (FN: Normal Kuvvet, FT: Temas Kuvveti,  $\alpha$ : Hareket Açısı) [14]

Bağıl hareket eden sistemlerdeki kuru kayma yüzeylerinde meydana gelen adhezif aşınmanın diğer aşınma unsurları önlense bile daima mevcut olan bir aşınma türü olacağı ifade edilir.

Aşınmayı önlemek adına yüzey ne kadar hassas işleme tabi tutulsa da gerçekte olan temas alanı ile görünürde olan temas alanları farklı olacaktır. Gerçekte olan temas alanının daima küçük olacağı belirtilir. Temas durumuna yük faktörü de eklendiğinde temas noktalarında aşırı gerilmeler meydana gelecektir. Malzemelerin akma sınırı aşıldığında ise küçük kaynak bağları oluşur. Temas halindeki yüzeylerde kaynak veya yapışma söz konusuysa, hareket etkisiyle bu bağların kopması ve temas noktalarında kırılmaların meydana gelmesi söz konusudur. Genel olarak kırılma, yani kopma, zayıf olan metalde meydana gelir [23].

Adhezif aşınmayı önlemek adına temas eden yüzeylerin yağlamasının önemli etkisi vardır.

Adhezif aşınma ile ilgili incelemeler sonucunda [14];

- Adhezif aşınmanın, benzer veya kolay alaşımlanan malzemelerde meydana geldiği,
- Aşınmanın, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlı olduğu, günlük kullanımda yüksek hızlarda ve yüklerde görüldüğü,

- Sürtünmenin olduğu bütün kaynak birleşmelerinde meydana gelmediği belirtilmiştir. Kaynak noktalarının aşınmaya katılan kısmı  $k_a$  ile gösterilirse, aşınan malzeme hacmi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [34]:

$$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L \quad (4.1)$$

$V_a$  = Aşınan malzemenin hacmi

$k_a$  = Kaynak birleşim noktalarının aşınmaya katılan kısmı

$A_h$  = Yükü taşıyan alan

$L$  = Kayma mesafesi

Metallerde adhezif aşınma  $10^{-7} < k_a < 10^{-2}$  arasında olmaktadır.

- Temas eden yüzeylerden biri diğerine göre daha sert ise bağlarının kopması yumuşak malzemelerde meydana gelir, kopan malzeme sert malzemenin yüzeyine nüfuz eder.
- Adhezif aşınmanın önlenmesi için temas eden yüzeylerin yağlaması önemli etkiye sahiptir. Sürtünme bölgelerindeki yağ tabakası büyük ölçüde aşınmasını önleyecektir. Yüksek hız ve basınç altındaki sistemlerde yağlama işlemi katkılı bir yağ ile yapılabilir.
- Oksit ortam veya nemden kaynaklı olarak yüzeylerde oluşan doğal tabakanın aşınmaya etkisi büyüktür.

#### 4.2.2 Abrazif (Kazıma) Aşınma

Abrazif aşınma, birbirine temas eden iki yüzeyin sürtünme ve yüzey pürüzleri etkisiyle sert olan yüzeyin diğer yüzeyden parça kopması, dolayısıyla sistemi hasara uğratması olayıdır [23]. Aşınmanın meydana geldiği ortamda iki etken varsa iki elemanlı, üç etmen varsa üç elemanlı abrazif aşınma olarak değerlendirilir. Üç elemanlı abrazif aşınmada sisteme dışarıdan gelen veya aşınma sonucu kopan parçaların (metaloksit, metal parçacıkları, toz vb.) sürtünen yüzey arasında ara malzeme gibi davranmasıyla karşımıza çıkmaktadır [2, 14].

Bu aşınma türü, ayrıca birbirine temas ederek çalışan yüzeyler arasındaki yükü taşıyan yüzey pürüzlülüklerinde meydana gelen mikro kaynakların kesme olayı ile oluşmaktadır [14].

Abrazif aşınma sünek malzemelerde meydana geldiğinde oluk veya pullanma, gevrek malzemelerde meydana geldiğinde ise çatlak şeklinde karşımıza çıkar. Oluşan çatlak veya oluklar malzemeyi zayıflatır ve nihayetinde kırılmalara neden olur.

Abrazif aşınmadan kaçınmak için malzemelerin yüzeylerine ısıtma işlemi uygulanabilir veya sert kaplamalar yapılabilir. Ayrıca sisteme dışarıdan gelen sert partiküllerin malzeme yüzeyleri arasına girmesi engellenebilir veya aşınma kaçınılmazsa sistemin tasarımında aşınmaya maruz kalacak parçalar kolay değiştirilebilir parçalardan seçilebilir.

#### 4.2.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması

Temas halindeki iki yüzey, birbirleriyle sürekli yük altında periyodik olarak temas ettirildiği zaman, yüzeyler arasında sadece adhezif aşınma oluşmaz, burada yorulma aşınması da oluşabilir [34]. Dolayısıyla yorulma aşınmasından bahsetmek için, metal yüzeylerde değişken tekrarlı yüklemeler yarattığı bir aşınma olması gerekir [19, 35].

Malzemedeki gerilim, yüksek hızlarda çalışma koşulları metal üzerinde oyuk şeklinde boşluklar meydana gelmesine neden olur. Malzeme üzerine binen yüksek basınçlı yüklerin çok sayıda tekrarlanması malzeme yüzeyinde veya malzeme içerisinde meydana gelen çatlakların yüzeye paralel olarak yayılır veya diğer çatlaklarla birleşmesi sonucunda bu oyuklar meydana gelir. Yüzeye yakın bölgelerde maksimum gerilme ve dislokasyonların yoğunlaşması nedeniyle çatlak hızla ilerler ve malzemeyi hasara uğratar. Nihayetinde malzeme yüzeyinden plakalar halinde parça kopmasına neden olmaktadır. Yorulma aşınması “pitting” olarak da anılmaktadır [23].

Yorulma aşınması iyi yağlama koşullarında bile meydana gelmektedir.

#### 4.2.4 Oksidasyon Aşınması

Oksidasyon aşınması metallerde korozyon ve aşınmanın birlikte meydana geldiği kimyasal bir aşınma türüdür. Korozif ortamda malzemeyi oluşturan metal ve alaşımları bileşik oluşturmak için çevreyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerler. Oluşturulan bu bileşikler genellikle istenilen yapılar değildir ve metalin iç yapısını

zayıflatır. Ana metalle bağları zayıflayan bu yapıların metalden kopmaları söz konusu olur.

Metalik malzemelerin yüzeyleri, bünyesinde bulunan alaşım elementlerinin oranına bağlı olarak 0,1 µm'a kadar doğal bir oksit tabakası olur, zaman zaman bu tabaka dökülür ve hemen doğal olarak kendini yeniler. Bu tabaka malzemenin korozif ortamlara karşı direncini artırır. Malzemenin aşındırıcı ortama maruz kalması ile aşınan malzemeyle birlikte oksit tabaka da kalkar.

Koruyucu oksit tabaka kendini doğal olarak yenileyemediğinde ve metal savunmasız kaldığında, yapı hızla oksitlenir ve zamanla pul pul dökülerek yüzeyden malzeme kaybı gerçekleşir.

Oksidasyon aşınmasına ortamın koşulları da etkilidir. Ortamlar oksitleyici ya da redükleyici olabilir. Oksitleyici ortamlarda, yanmayı tetikleyen yüksek oranda moleküler oksijen (O<sub>2</sub>) girişi olur. Redükleyici ortam ise, oksijen girişinin söz konusu olmadığı, yanmanın oksijensiz koşullarda meydana geldiği ortamlardır [3].

Bu aşınma türünde temas eden yüzeyler arasında sürtünmeden dolayı ısı meydana gelir. Bu ısı metal yüzeylerdeki oksit tabasının kalınlığını artırmak için gerekli enerjiyi sağlayabilir. Oksit film tabakasının kritik değeri aşması neticesinde çıkıntılar (asperities), yani aşınma partiküllerini oluşturur ve akabinde ise kırılır. Meydana gelen bu yığıntılar (debris) abrazyonun başlamasına da sebep olmaktadır [2].

# Bölüm 5

## Materyal ve Metot

### 5.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında incelenmek üzere R260 ve R350HT kalite ray çelikleri kullanılmıştır. Şekil 11’de hali hazırda demiryollarında kullanılan ve kesilen raylar gösterilmektedir.



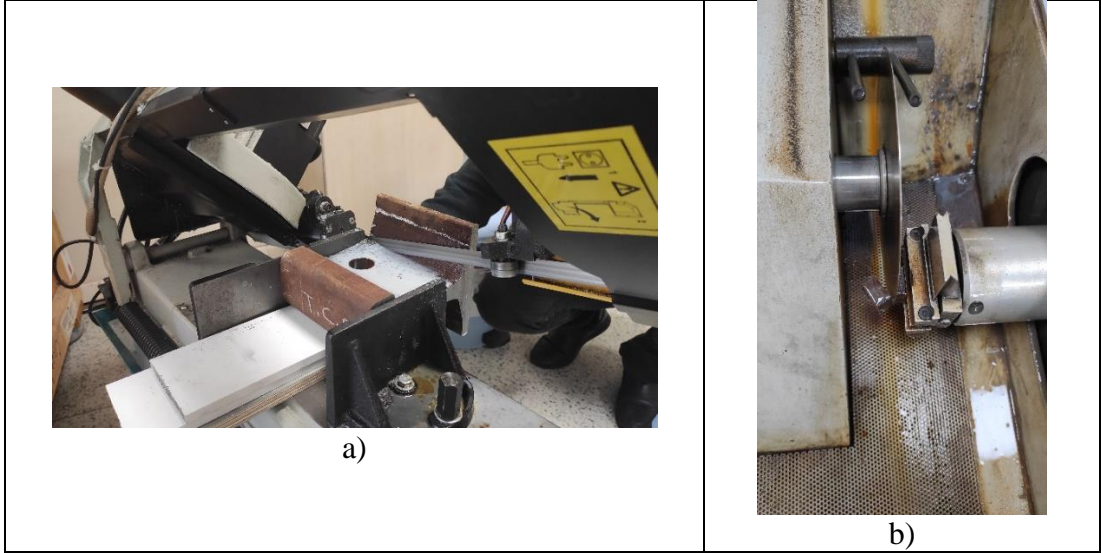
Şekil 11: Çalışmada kullanılan raylar (R260 ve R350HT)

Kullanılan R260 kalite ray çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 3’de gösterilmektedir.

Tablo 3: R260 (60 E1) Kalite Rayın Bileşimi (%) [36]

C	Mn	Si	P	S	Al	Ni	Cr	V	Mo
0,71	1,05	0,37	0,017	0,010	0,015	0,054	0,028	0,028	0,038

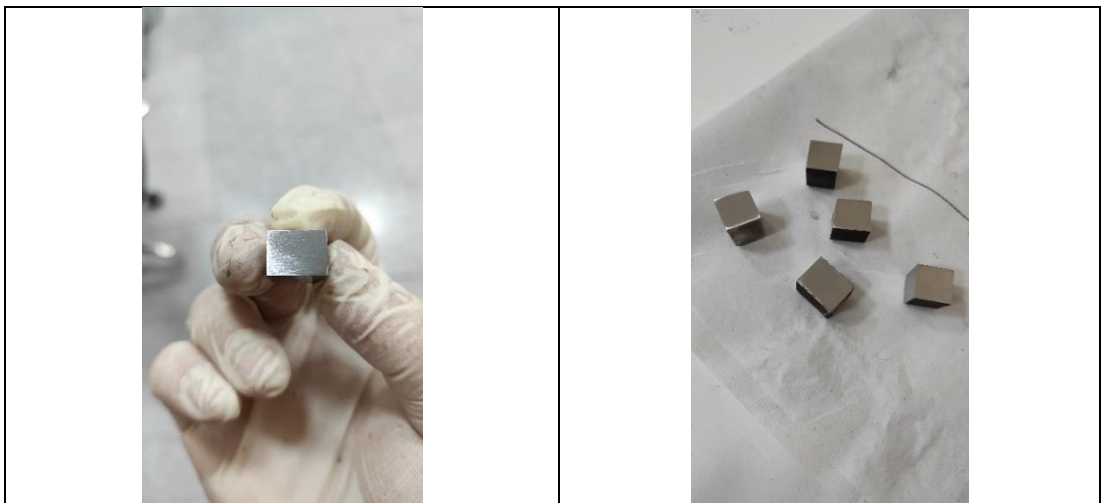
Kullanılan raylar TCDD’den tedarik edilmiştir. Öncelikli olarak kaba kesme ve sonra hassas kesme ile numuneler (yaklaşık) 20 mm x 10 mm x 10 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesme işlemleri Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12: Numunelerin a) kaba kesme ve b) hassas kesme görüntüleri

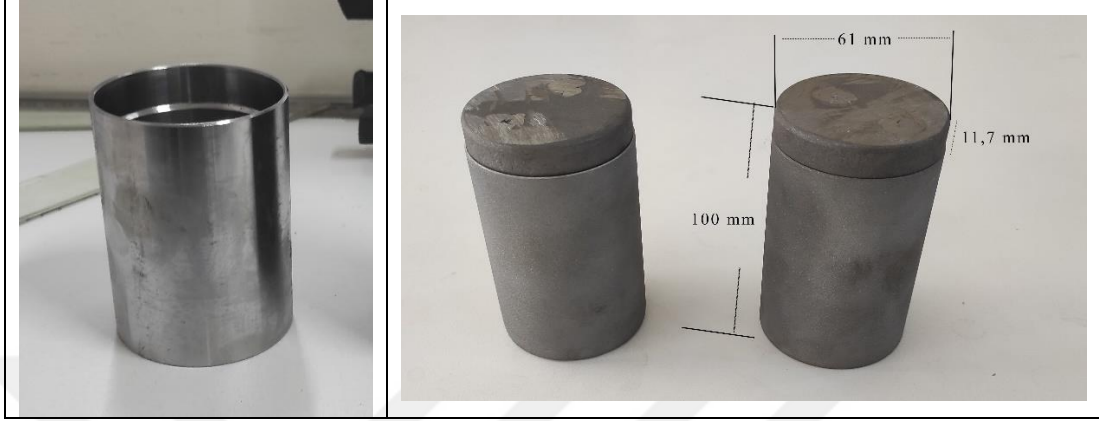
Numunelerin kesiminden sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla P240, P600 ve P800 gritli SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Aşınma deneylerinin gerçek davranışı yansıtması açısından bu zımparalama kağıtları tercih edilmiş ve parlatma yapılmamıştır. Zımparalama işlemi sonrası numuneler Şekil 13’de gösterilmektedir.

Çalışmada kullanılmak üzere 5 adet 900 °C’de 2 saat sıcaklıkta borlama işlemi için, 4 adet 900 °C’de 4 saat sıcaklıkta borlama işlemi için, 5 adet 900 °C’de 6 saat sıcaklıkta borlama işlemi ve 3 adet referans olması için toplamda 17 adet R260 kalite ray çeliği numunesi ile 3 adet referans numunesi olması amacıyla R350HT kalite ray çeliği numunesi, toplamda ise 20 adet numune hazırlandı. Numune sayıları belirlenirken yapılacak deneyler ile yedek numuneler göz önünde bulunduruldu.



Şekil 13: Zımparalama aşaması sonrasında numuneler

Borlama işlemi için kutuların (box) hazırlanması aşaması gerçekleştirildi. Kutu malzemesi olarak Şekilde 14’de gösterilen SD52 Boru malzemesi (Borusan Annesman kazan borusu) kullanıldı. Boru malzemesinin altına uygun altlık kaynatıldı ve kapak için ağır bir malzeme seçilerek kapak haline getirildi.



Şekil 14: Borlama işleminde kullanılan kutu malzemesi (solda) ve üretim sonrasında ölçüleri (sağda)

Borlama işleminde kullanılan ve toz karışımı %5 B<sub>4</sub>C, %90 SiC, %5 KBF<sub>4</sub> olan Ekabor2 bor tozları tedarik edildiğinde farklı boyutlardaydı. Bu nedenle bor tozları eleme sürecinden geçirildi. Eleme işlemi Şekil 15’de görülen Retsch AS 200 cihaz yardımıyla 75 µm elek ile gerçekleştirilerek deneyde kullanılan tozlarının boyutunun 75 µm’nun altında olması sağlandı.



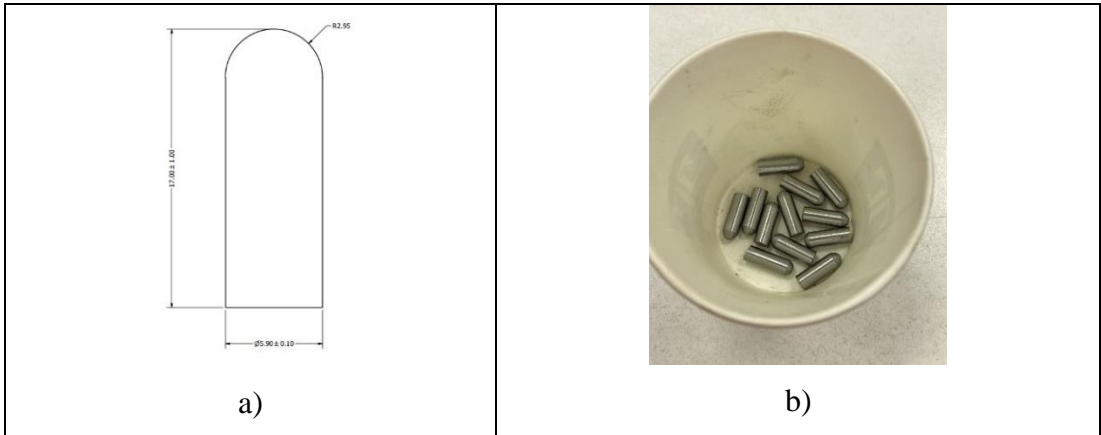
Şekil 15: Bor tozlarının 75 µm’ nun altına eleme işlemi

Borlama işlemi sonrası aşınma deneyi yapılmıştır. Aşınma deneyinin gerçekte ray-teker etkileşimini yansıtmaması için aşındırıcı olarak tren tekeri kullanılmıştır. Tren tekeri malzemesi olarak ER7 kalite malzeme kullanılmıştır (Şekil 16 ve Şekil 17).



Şekil 16: Aşınma deneyinde kullanılan tren tekeri malzemesi

Aşınma deneyinde aşındırıcı pin olarak kullanılan malzeme tren tekerinden imal edilmiştir.  $5,9 (\pm 0,1)$  mm çapında,  $17 (\pm 1)$  mm boyunda pin malzemesi CNC’de işlenerek üretilmiştir.



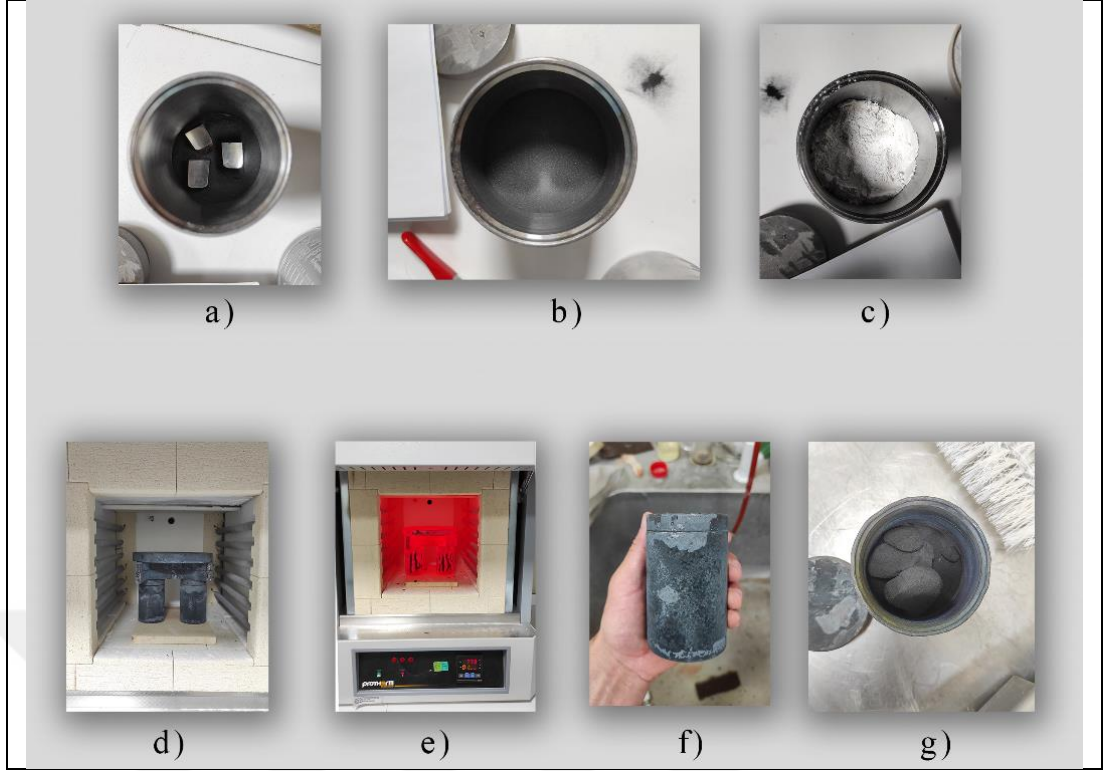
Şekil 17: Tren tekerinden üretilen pin malzemesinin a) teknik çizimi, b) üretim sonrası

## 5.2. Borlama İşlemi

Borlama işlemi için numune hazırlama aşamasında yapılacak çalışmalar tamamlanmış ve Protherm PLF 120/10 fırın kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi R260 kalite ray çeliklerine yapılmıştır. İşlem sıcaklığı olarak literatürde en iyi katman kalınlığının olduğu 900 °C, borlama işlemi için bekleme süresi olarak 2-4-6 saat süreleri belirlenmiş ve uygulanmıştır.

Borlama işleminde kullanılan toz miktarı borlama işleminin yapıldığı kutuya numune ve tozların eklenmesinden sonra toplam hacmin 2/3'ünü doldurmasına göre belirlenmiştir. Borlama işlemi yapılırken kutuya numuneler belirli bir düzene göre yerleştirilmiştir. Önce tabana numunelerle kutu malzemesinin temasını kesecek kadar bor tozu konulmuştur. Üzerine üç tane numune birbirine ve kenarlara değmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin üzeri tamamen kapanana kadar bor tozu ilave edilmiştir. Bor tozlarının en üstü alümina tozu ile tamamen kaplanarak, kutunun kapağı sıkıca kapatılmıştır. Oransal olarak bir kutuda toplamda 90 g elenmiş (75 µm'nun altında) toz karışımı %5 B<sub>4</sub>C, %90 SiC, %5 Ekrit olan Ekabor2 bor tozu ve 10 g alümina tozu kullanılmıştır. Bor tozu karışımlarının tekrar kullanımı durumunda borlama performansının düşeceği göz önünde bulundurularak her borlama işlemi için yeni bor tozu kullanılmış olup kullanılmış bor tozu tekrar kullanılmamıştır [37].

Çalışmada iki kutu aynı anda kullanılarak borlama işlemi yapılmıştır. Kutular, Şekil 18'deki gibi belirli bir düzene göre hazırlanmış ve fırına yerleştirilmiştir. İşlem sırasında meydana gelen basıncın kapağı fırlatmasının önüne geçmek adına kutuların üzerine ağırlıklar konulmuştur. İşlem sıcaklığına kadar numuneler 10 °C/dk hızla ısıtıldı ve numuneler işlem sıcaklığında belirlenen sürelerde tutulmuştur. Sonrasında kutular önce fırın içinden alınacak sıcaklığa kadar soğutulmuş, devamında fırından alınarak dışarıda soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğuyan kutular açılarak numuneler alınmıştır. Numunelerin yüzeyindeki yapılar basınçlı hava ve etanol ile temizlenerek test ve analiz işlemlerine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 18: Borlama işlemi a) Numunelerin yerleştirilmesi, b) Numunelerin bor tozu ile kapatılması, c) Numune yüzeylerinin alümina ile kapatılması, d) Kutuların fırına yerleştirilmesi ve üzerine ağırlık konulması, e) Numunelerin işlem sonrasında soğuması, f) Oda sıcaklığına soğumuş kutular, g) Numunelerin kutudan çıkarılması

Borlama işlemi 900 °C’de 2,4 ve 6 saat bekletme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonrasında yapılacak analizler ve testler göz önünde bulundurularak her numuneden yeterli sayıda borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonrasında numuneler Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 19: Borlama işlemi sonrasında elde edilen numunelerden bazıları

### 5.3 Aşınma Testi

Aşınma deneyleri öncesinde numunelerin yüzeyleri etanol ile temizlenmiş ve numune yüzeyinin paralelliğini sağlamak adına incelenecek yüzeyin tabanı zımparalama işlemine tabi tutulmuş, su terazisiyle paralelliğin sağlandığına emin olunmuştur.

Aşınma deneylerinde 5 farklı örnek 900 °C’de 2-4 ve 6 saat borlanmış numuneler, R260 ve R350HT alt malzeme test edilmiştir. Plint and Partners LTD TE88/8915 aşınma cihazında ‘Pin on Plate’ (düzlem üzeri çubuk) yöntemiyle, pinin aşındırıcı metalin üzerinde kayma hareketi yapacak şekilde ve aşağıdaki Tablo 4’de belirtilen parametrelerle aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir [38]. Deneyler süresince ağırlık ölçümleri RADWAG AS220.R2 hassas terazi ile yapılmıştır. Şekil 20’da aşınma cihazı, Şekil 21’de aşınma numunelerinin test düzeneği gösterilmiştir. Tablo 4’de ise aşınma test parametrelerine yer verilmiştir.



Şekil 20: Aşınma cihazı



Şekil 21: Aşınma numuneleri

Tablo 4: Aşınma testi parametreleri

	<b>Ağırlık (N)</b>	<b>Frekans (Hz)</b>	<b>Mesafe (m)</b>
<b>Aşınma testi-1</b>	50	3	200
<b>Aşınma testi-2</b>	100	3	200

### 5.3.1. Ağırlık Kayıpları

Aşınma testi-1 öncesinde ve sonrasında sadece tren tekerindeki meydana gelen aşınma hakkında bilgi vermesi amacıyla pinlerin ağırlığı ölçülmüştür. Alt malzemenin ise aşınma alanları incelenmiştir. Aşınma testi-2’de pinlerin ve alt malzemelerin ilk ve son ağırlıkları ölçülmüş, alt malzemenin aşınma alanları analiz edilmiştir.

### 5.3.2. Sürtünme Katsayısı

Aşınma testleri sırasında sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan numuneler ile R350HT ve R260 kalite ray çeliklerinin aşınma testi süresince belirli aralıklarla sürtünme katsayıları ölçülmüş ve bu ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

### 5.3.3. Aşınma Alanları

Aşınma testleri sonrasında aşınma alanları Şekil 22’de gösterilen Ambios Technology XP-2 profilometre cihazı yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 22: Aşınma alanlarının incelenmesinde kullanılan profilometre

Analizler sonucunda elde edilen aşınma alanlarının verileri OriginPro8 uygulaması aracılığıyla grafik haline getirilmiş, borlanan numuneler ile referans numunelerinin

aşınma alanları ile aynı numune için farklı yüklerde meydana gelen aşınma alanları grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır.

#### 5.3.4. Aşınma Testi Sonrası SEM İncelemeleri

Numunelerin aşınma testleri sonrasında aşınma alanında meydana gelen yapıların ve aşınma durumunun incelenmesi amacıyla ZEISS Sigma 300 VP mikroskobu kullanılmıştır. Bazı aşınma alanlarının EDX analizleri yapılmıştır.

### 5.4 Karakterizasyon Çalışmaları

Numunelerin incelenmesi aşamasında yapılacak teste göre numune hazırlama süreci gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskopta numunelerin incelenmesi, mikro-sertlik deneyi için zımparalama (P60 – P120 – P320 – P600 – P800 – P1200 gritli SiC kağıtları kullanılarak) ve sonrasında parlatma (3 µm ve 1 µm CT DiaTwin Mono marka solüsyon ve kayganlaştırmak için Lubercant solüsyon ile) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış numuneler incelendikten sonra dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi %2 Nital (98 cc Etanol, 2 cc Nitrik Asit) kullanılarak hazırlanan karışımda numunelerin 10-12 saniye bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

#### 5.4.1. Optik Mikroskop Çalışmaları

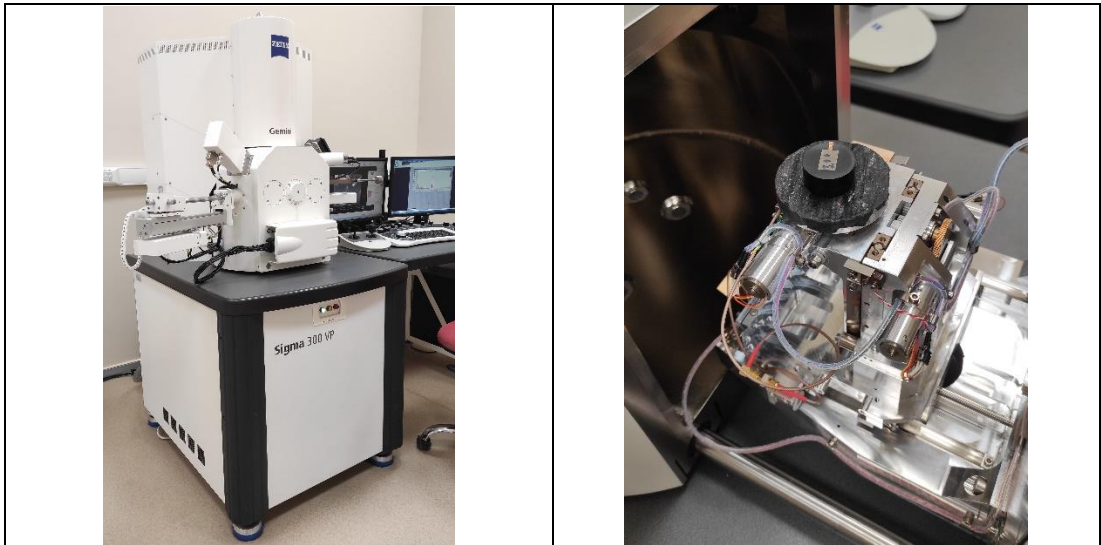
Borür tabakasında oluşan yapıların şekli, meydana gelen fazlar ve tabaka kalınlığı Şekil 24'de gösterilen Nikon Eclipse LV150N marka optik mikroskop yardımıyla 100x ve 200x büyütmelemlerde oluşan incelenmiştir.



Şekil 23: Optik Mikroskop

#### 5.4.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Çalışmaları ve EDX Analizi

900 °C'de 2 saat borlanmış ve dağlanmış numune ile 900 °C'de 6 saat borlanmış ve parlatılmış numuneler Şekil 23'de gösterilen ZEISS Sigma 300 VP mikroskobu yardımıyla SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 24: SEM cihazı ve numunenin cihazdaki konumu

### 5.4.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri, izler arasındaki mesafe her defasında 30  $\mu\text{m}$  olacak şekilde ayarlanarak 50 g (0,05 N) yük altında Şekil 25'deki Inpros Sinowon marka sertlik ölçüm cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 25: Mikrosertlik ölçüm cihazı

### 5.4.4. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi

XRD analizi, borlanan numuneler ve referans numunelerde oluşan fazların belirlenmesi için Cu K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak (Panalytical Empyrean, tarama hızı: 20/dk; voltaj: 45 kV, tarama açısı: 20°-90°) Şekil 26'da gösterilen Panalytical Empyrean XRD cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 26: XRD analiz cihazı

#### 5.4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Borlanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü Şekil 27’de gösterilen Mahr Marsurf SD 26 cihazıyla incelenmiştir. İnceleme öncesinde numunelerin alt yüzeyleri zımparalanarak paralel bir zemin elde edilmiştir. 900 °C 2 – 4 – 6 saat borlanan her numune için iki farklı yönden (yatay ve dikey) yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 27: Yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü cihaz

# Bölüm 6

## Bulgular ve Tartışma

### 6.1 Karakterizasyon Çalışmaları Sonuçları

Tez çalışması kapsamında borlama işlemine tabi tutulan ve referans malzemesi olarak kullanılan numunelerin malzeme karakterizasyonu gerçekleştirildi. Numuneler; SEM cihazı yardımıyla borlanan numunelerde oluşan fazlar ve yapılar, EDX analiziyle oluşan yapıların içeriği, optik mikroskop ile borür tabaka kalınlıkları, mikrosertlik cihazı ile borlanan malzemelerin sertlik değerleri, XRD analizi ile oluşan fazlar, yüzey pürüzlülüğü analizi ile borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir.

#### 6.1.1. Optik Mikroskop Analizleri

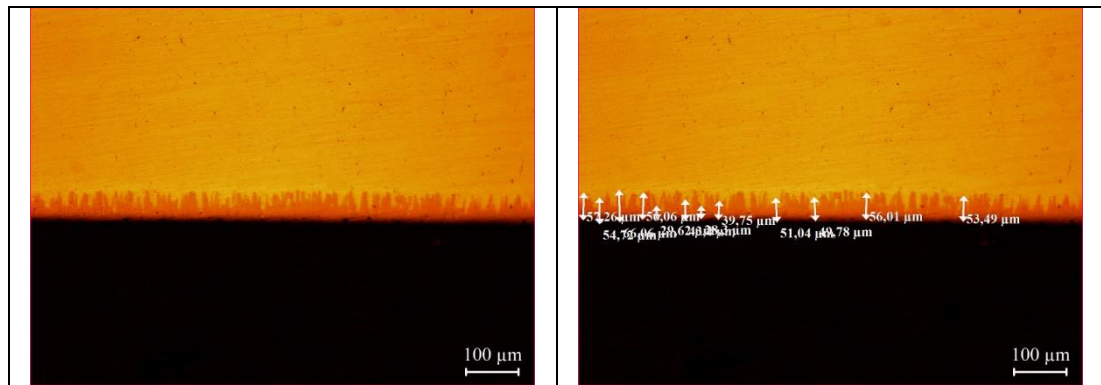
Borlanan numuneler optik mikroskop altında incelenerek, borür tabaka kalınlıkları ölçülmüş ve elde edilen veriler Tablo 5’de gösterilmektedir. Borür tabakalarının yapısı farklı büyütmelerde Şekil 28, 29, 30, 31 ve 32’de gösterilmektedir.

Tablo 5: Borür Tabakası Kalınlıkları (900 °C ve 2-4-6 saat bekleme sürelerinde)

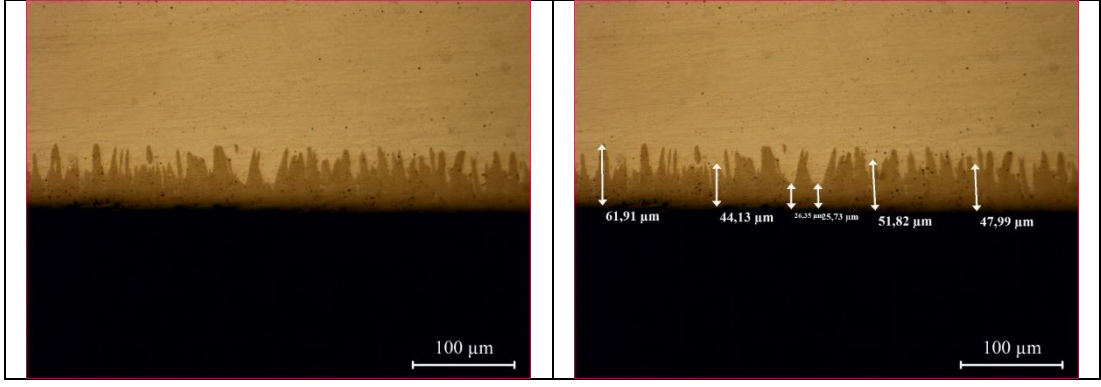
<b>Borür Tabakası Kalınlıkları</b>			
	<b>900 °C – 2 Saat (µm)</b>	<b>900 °C – 4 Saat (µm)</b>	<b>900 °C – 6 Saat (µm)</b>
1	57,26	80	115,10
2	66,00	96,25	98,76
3	54,72	101,9	103,78
4	33,72	93,81	93,73
5	56,08	112,7	103,80
6	43,40	64,81	101,30
7	39,75	83,92	110,1
8	47,35	87,48	103,2
9	51,04	84,13	121,7
10	44,69	83,76	111,30
11	49,78	76,10	102,50
12	56,01	79,69	109,10
13	53,49	94,97	97,58
14	55,56	106,4	115,3
15	65,71	95,56	117,1
<b>Ort.</b>	<b>51,64 (± 8,9)</b>	<b>89,43 (± 12,4)</b>	<b>106,96 (± 8,0)</b>

Borlanan numunelerin borür tabaka kalınlıkları 15 farklı bölgeden alınarak ortalama borür tabaka kalınlıklarına ulaşılmaya çalışılmıştır. Borür tabaka kalınlıklarının artan sıcaklıkla birlikte artış gösterdiği ve 900°C’de 2 saat borlama işlemi yapılan numunenin tabaka kalınlığı ortalama 51,64 (± 8,9) µm, 4 saat borlanan numunenin ortalama 89,43 (± 12,4) µm ve 6 saat borlanan numunenin ortalama 106,96 (± 8,0) µm kaplama kalınlıklarına ulaştığı görülmüştür.

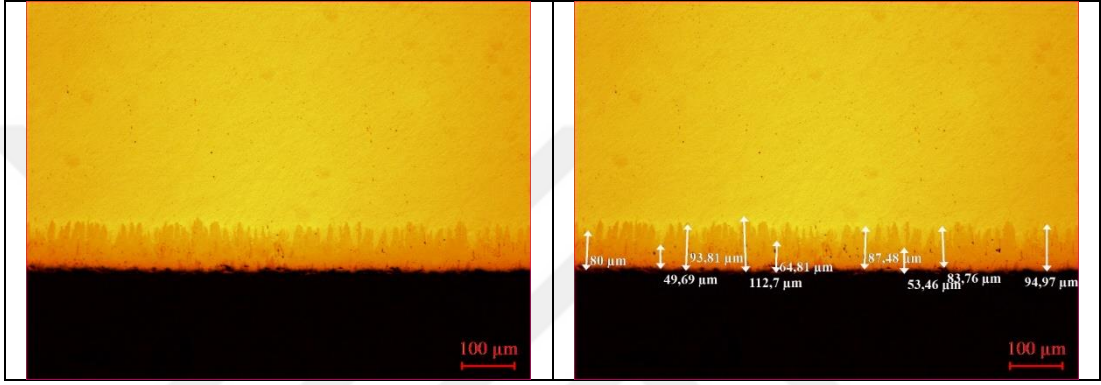
Literatürde, 900 °C’de 4 saat borlanan AISI P20 çeliği için 76 µm, AISI H13 çeliği için 45 µm, AISI D2 çeliği için 34 ve 50 µm ile AISI H13 çeliğini 24,45 µm kaplama kalınlığı elde edildiği, ray çeliği için bu değer ~66 µm olduğu belirtilmektedir [2].



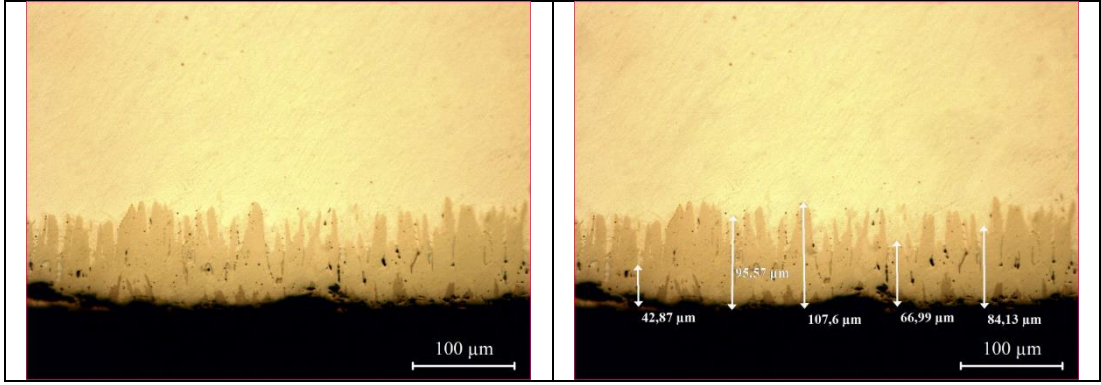
Şekil 28: 900 °C’de 2 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100)



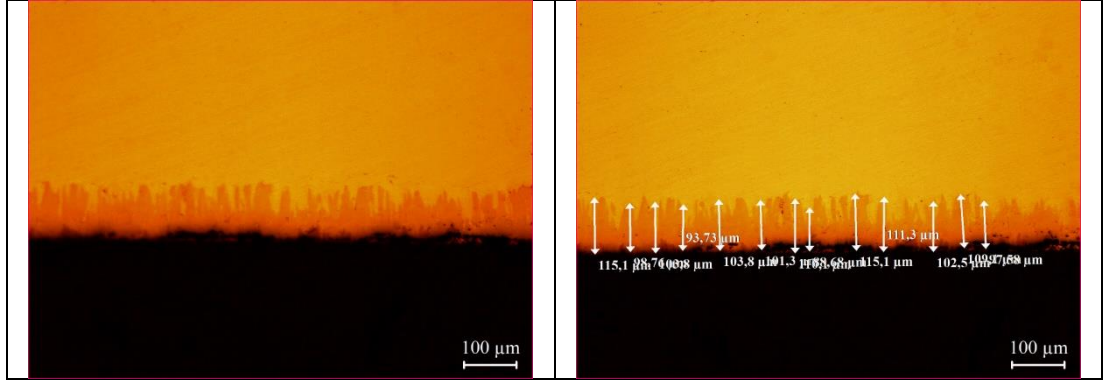
Şekil 29: 900 °C 'de 2 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x200)



Şekil 30: 900 °C 'de 4 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100)



Şekil 31: 900 °C 'de 4 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x200)

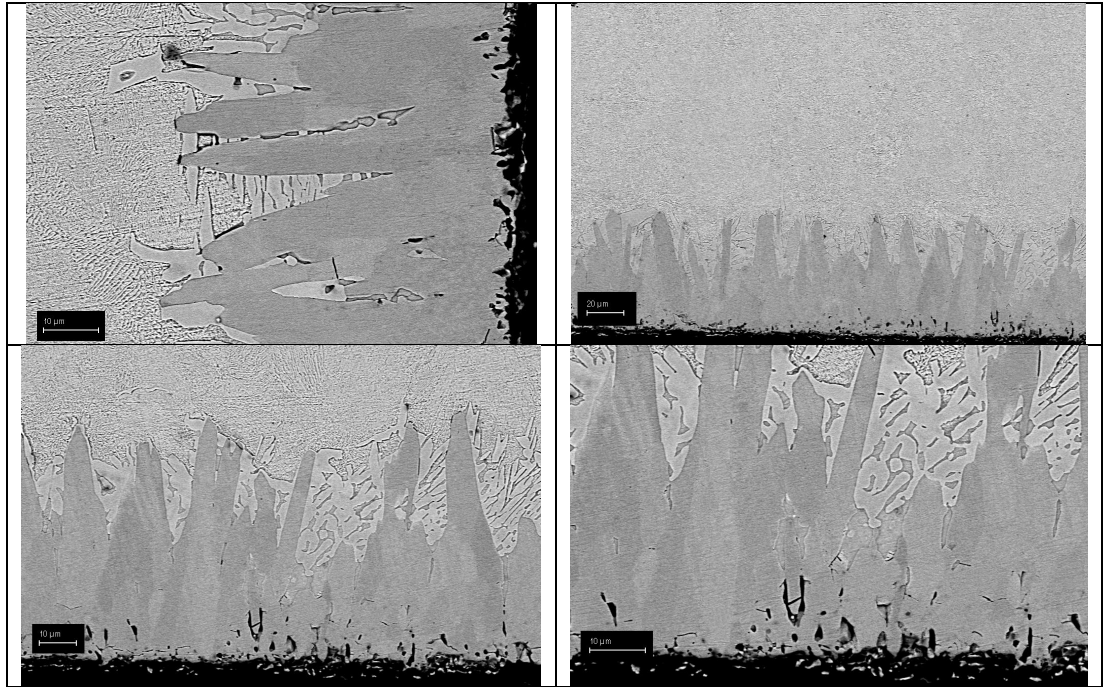


Şekil 32: 900 °C 'de 6 saat bekletilen numunenin incelenmesi ve oluşan tabaka kalınlığı (x100)

Optik mikroskop analizleri sonrasında elde edilen veriler borlama işlemi sonrasında oluşan bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana metal yapısından oluştuğu, geçiş bölgelerinin dar bir alan olduğu görülmüştür. Yüksek alaşımlı çeliklerde geçiş bölgesinin daha yumuşak bir geçiş sağlamasından dolayı geçiş bölgelerinin fark edilebilir boyutta olmadığı şeklinde yorumlanmıştır [39].

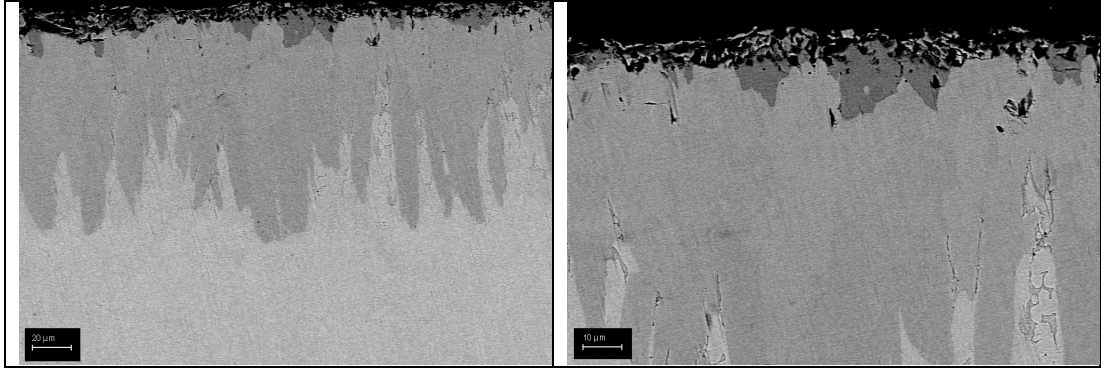
### 6.1.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizleri

900°C’de 2 saat ve 6 saat borlanmış numunelerin SEM görüntüleri Şekil 33 ve Şekil 34’de gösterilmektedir.



Şekil 33: 900 °C 2 saat borlanan (dağlanmış) numunenin SEM görüntüleri

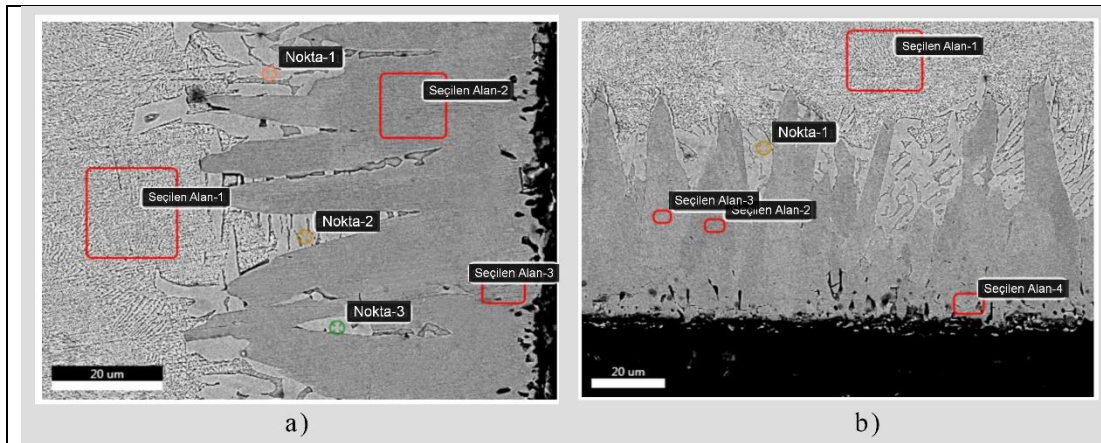
900 °C 2 Saat borlanan dağlanmış numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde ana metaldeki östenit fazı, kaplamadaki gri ve lamelli açık gri yapılar görülmektedir.



şekil 34: 900 °C 6 saat borlanan parlatılmış numunenin SEM görüntüleri

900 °C 6 saat borlanan parlatılmış numune incelendiğinde EDX ve XRD analizlerinde belirlenen tek fazlı Fe<sub>2</sub>B yapısının yanı sıra daha koyu renkli, daha sert olan yzeeye yakın, siyah renkli FeB-Fe<sub>2</sub>B ift fazlı yapılar görülmektedir. Borür tabakasının morfolojisininin 2 saat borlanan numunede sadece Fe<sub>2</sub>B (güçlü dişli yapı) içeren tek fazlı tabaka, 4 ve 6 saat borlanan numunelerde ise Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarını içeren yapıda daha ince bir FeB tabakası içeren iki fazlı tabaka oluştuğu söylenebilir [17].

EDX analizi iki farklı numune (900 °C’de 2 saat borlanan ve dağlanmış numune ile 900 °C’de 6 saat borlanan ve parlatılmış numune) için şekil 35’de belirtilen bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 900 °C 6 saat borlanan numuneye izgi EDX analizi yapılarak şekil 36’de gösterilmektedir.



şekil 35: 900 °C 2 saat borlanan ve dağlanan numunenin EDX lm bölgeleri/noktaları a) yan yüzey b) alt yüzey

Yapıda; Fe<sub>2</sub>B fazı teorik olarak yaklaşık ağırlıkça %8,83, FeB fazı ise teorik olarak ağırlıkça %16,23 B atomu içerdiği bilinmektedir [17]. Oluşan yapılarda Cr ve Mn’nin

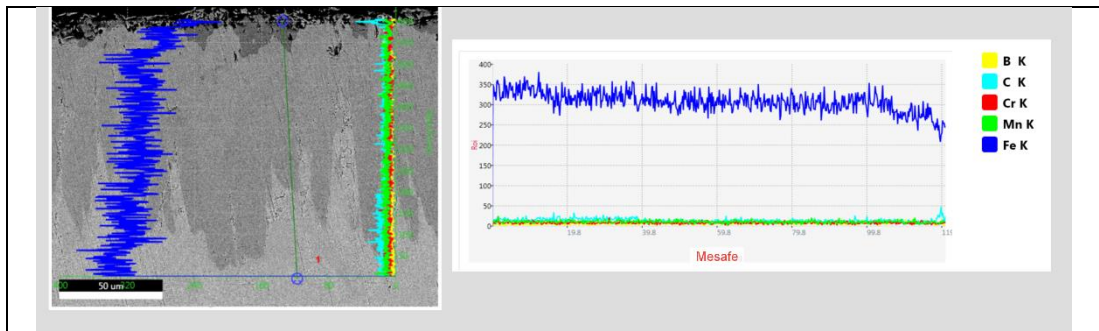
ana metalden bor tabakasına, C ve Ni'nin yüzeyden ana metale difüze olduğu bilinmektedir [2]. Bu bilgiler ışığında Şekil 35'de gösterilen alanların EDX sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: 900 °C 2 saat borlanan ve dağılan numunenin EDX ölçüm sonuçları

Şekil 35-a)'daki bölgelerin EDX sonuçları						
	B (%Ağırlık)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)
Alan -1	0,76	2,37	0,26	1,12	95,50	-
Alan -2	2,35	0,92	0,29	0,88	95,55	-
Alan -3	2,30	1,25	0,17	0,75	92,71	2,83
Nokta -1	1,15	2,31	0,27	0,84	95,43	-
Nokta -2	1,28	3,38	0,20	0,76	94,38	-
Nokta -3	2,57	3,42	0,24	1,10	92,67	-

Şekil 35-b)'deki bölgelerin EDX sonuçları

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)
Alan -1	0,80	2,79	0,38	0,82	95,20	-
Alan -2	2,78	0,96	0,22	0,79	95,25	-
Alan -3	2,73	1,05	0,22	0,82	95,18	-
Alan -4	2,93	1,50	0,29	0,98	94,30	-
Nokta -1	1,04	3,00	0,20	0,69	95,07	-

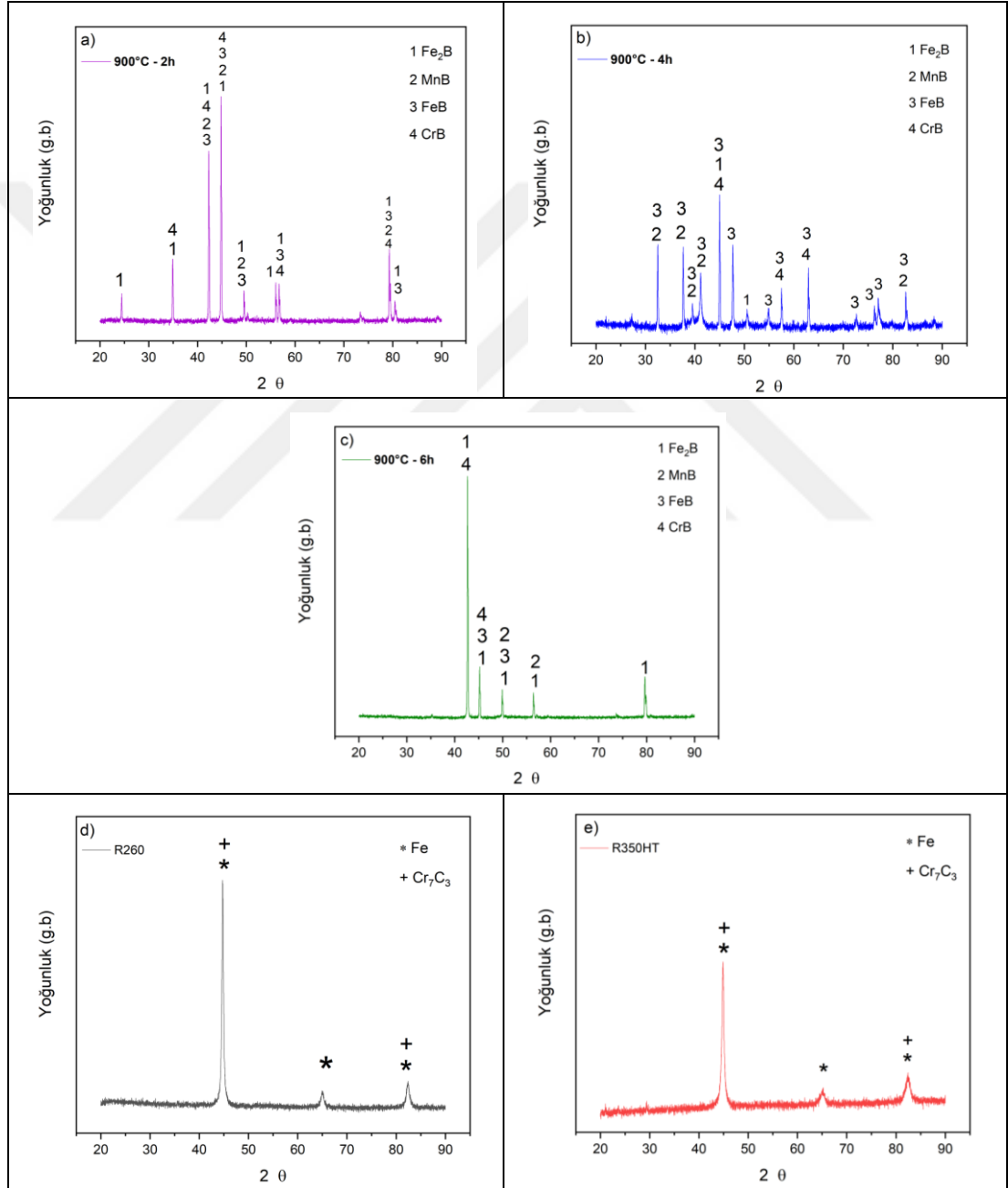


Şekil 36: 900 °C 6 saat borlanan parlatılmış numunenin çizgi (line) EDX ölçümü

EDX analizine göre bor tabakasında ağırlıklı olarak B ve Fe elementlerinin bulunduğu ve R260 kalite ray çeliğinin yapısında bulunan Cr ve Mn elementlerinin bor tabakasına çok düşük miktarda difüze ettiği için bu atomların ihmal edilebilir düzeyde olduğu düşünülmektedir. Numunenin yüzeyine yakın bölgelerde (en üst bölgeler) bakalite alınan numuneden kaynaklı olarak arttığı düşünülen C atomu gözlemlenmektedir.

### 6.1.3. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizleri

Borlama işlemi sırasında bor atomlarının sıcaklığın etkisi altında ve yeterli süre verilmesi durumunda difüzyonu ile borür tabakası oluşmaktadır [16]. Öncelikli olarak daha yumuşak yapılardan çekirdeklenen  $Fe_2B$  fazı, daha sonra daha sert yapılardan çekirdeklenen FeB fazları oluşmaktadır. Bu çalışmada borür tabakasının XRD analizi yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 37’de verilmektedir.

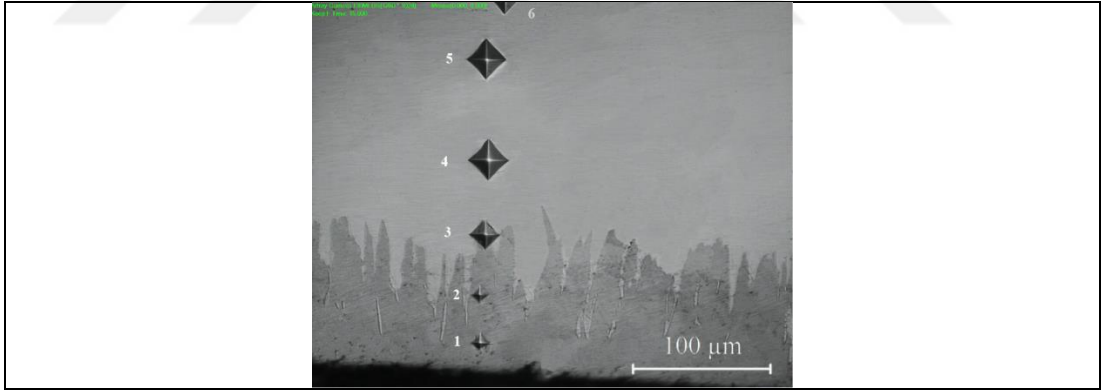


Şekil 37: Beş farklı kompozisyonun XRD analiz sonuçları a) 900 °C’de 2 saat, b) 900°C’de 4 saat, c) 900 °C’de 6 saat borlanan numune, d) R260 ve e) R350HT

Şekil 37’de verilen XRD grafiğine göre 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan R260 kalite ray çeliğinin borür tabakasında genel olarak demir borürlerin baskın olduğu, ayrıca CrB ve MnB fazlarının oluştuğu, referans malzemelerinin yapısında (R260 ve R350HT) ise Fe atomları ve baz malzemeye C atomunun yayılması sonucu oluşan [2] Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> yapılarının oluştuğu görülmüştür. Bununla birlikte XRD görüntülerinde yoğun FeB piklerinin oluştuğu görülmekte, 900 °C’de borlama süresinin artmasıyla birlikte FeB yoğunluğu da artmaktadır. Kondul ve Çetin’in (2022) yaptıkları çalışmada da 900 °C’de aynı fazların oluştuğu ve FeB yoğunluğun sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür [40]. Bu çalışmada elde edilen sonuçların literatür ile örtüştüğü görülmüştür.

#### 6.1.4. Mikrosertlik Testi Sonuçları

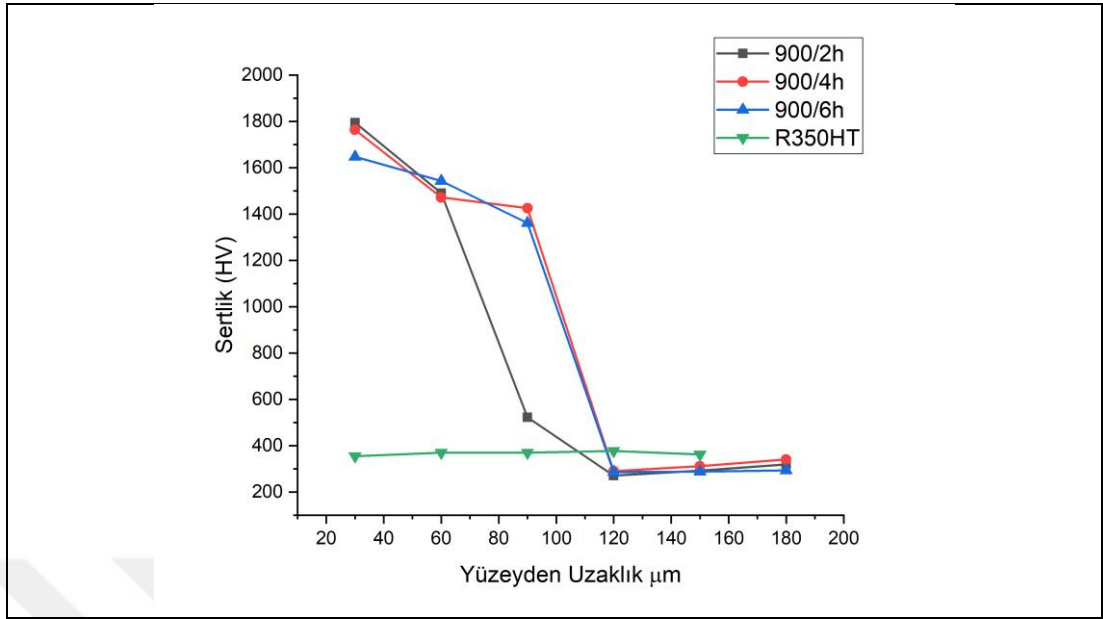
Borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana metaldeki sertlik değerlerinin ölçülmesi için mikro-sertlik testleri gerçekleştirildi. Şekil 38’de belirtilen bölgelerden, aralarında 30 µm mesafe olacak şekilde sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara Tablo 7’de tablo halinde ve Şekil 39’da grafik halinde yer verilmiştir.



Şekil 38: Sertlik ölçüm bölgeleri (aşağıdan yukarıya doğru 1 (kaplama yüzey bölgesi)-2-3-4-5-6 (ana metal bölgesi) no.lu ölçüm bölgeleri)

Tablo 7: Elde edilen sertlik değerleri (HV)

900 °C – 2 Saat	900 °C – 4 Saat	900 °C – 6 Saat	R350HT
1- 1795 HV	1- 1764 HV	1- 1648 HV	1- 355 HV
2- 1491 HV	2- 1472 HV	2- 1543 HV	2- 370 HV
3- 523 HV	3- 1426 HV	3- 1362 HV	3- 370 HV
4- 271 HV	4- 291 HV	4- 286 HV	4- 378 HV
5- 293 HV	5- 312 HV	5- 288 HV	5- 363 HV
6- 320 HV	6- 341 HV	6- 294 HV	



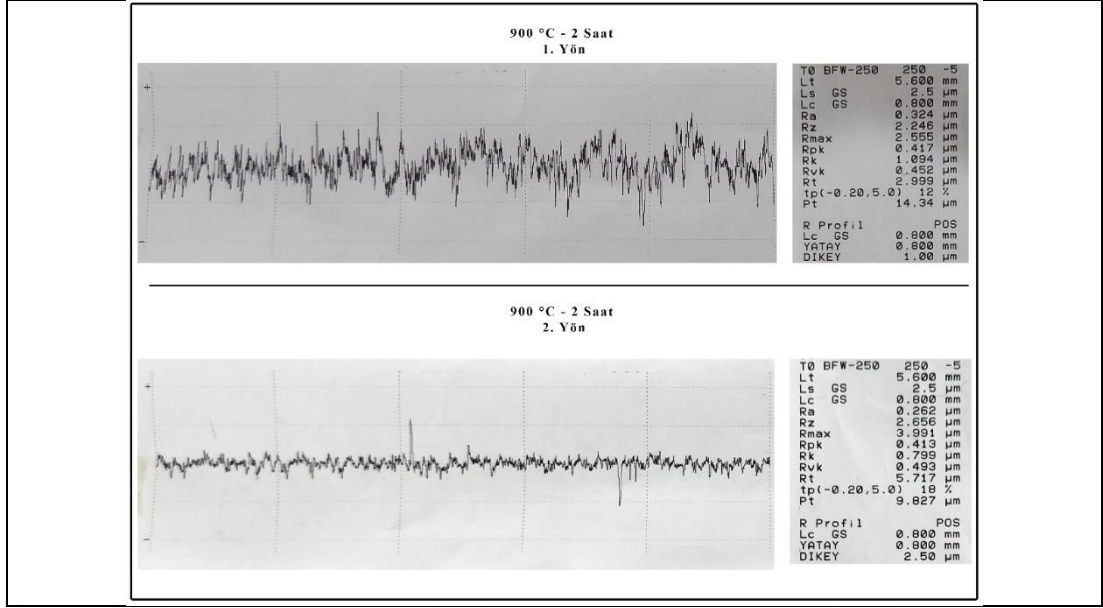
Şekil 39: Sertlik değişim grafiği (900 °C'de borlanan numuneler ve R350HT için)

Elde edilen sonuçlar; borlama işlemi sonrasında oluşan yapının demiryollarında sıklıkla kullanılan ve mantarı sertleştirilmiş ray çeliği olarak adlandırılan R350HT çeliğinden yaklaşık altı kat daha sert bir yapının meydana geldiğini göstermektedir.

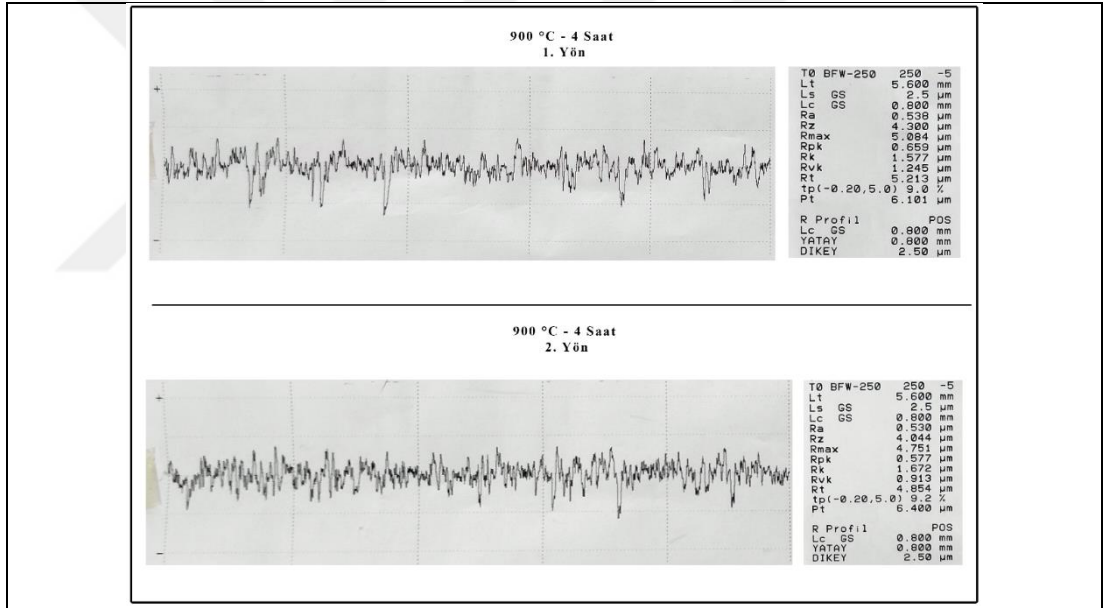
Literatür incelendiğinde sertlik değerlerinin 900 °C'de 4 saat borlanan numune için 2590 HV değerine ulaştığı, AISI P20, H13 ve D2 çeliklerinin 900 ve 950 °C'de 2,4,6 saat borlama işlemi sonrasında 408-532 HV'den 932-1989 HV'ye ulaştığı, AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat borlanması sonucunda yüzey sertliklerinin ise 1650 – 2487 HV'ye ulaştığı görülmüştür [2, 22, 24].

### 6.1.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

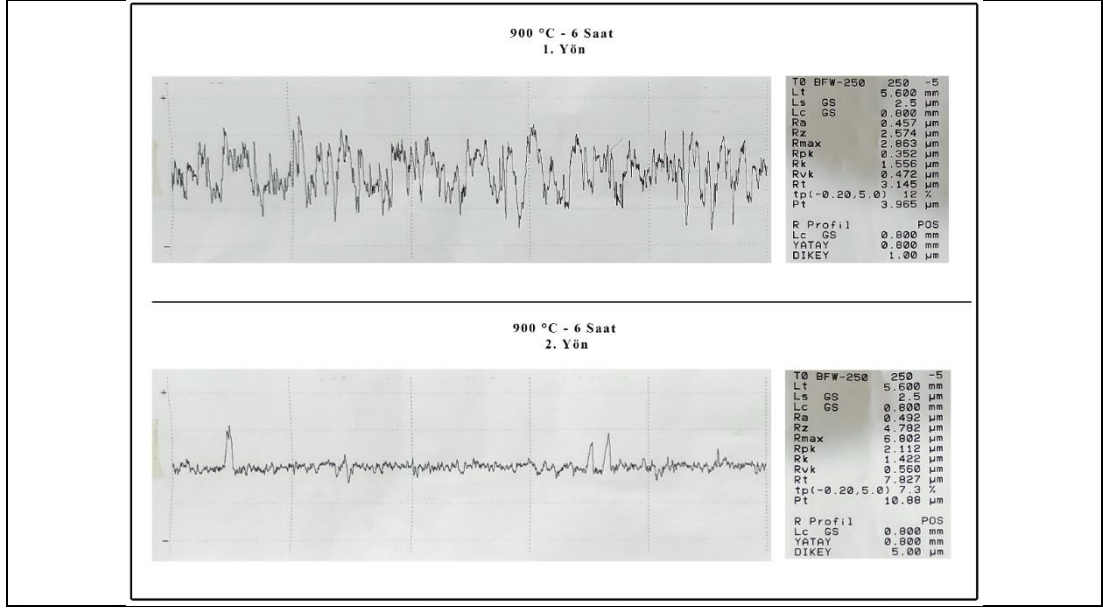
Borlama işleminden hemen sonra yüzeyi basınçlı havayla temizlenen numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçüldü, ölçüm sonucunda elde edilen veriler Şekil 40, 41 ve 42'de gösterilmektedir. Ayrıca ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 8'de verilmektedir.



Şekil 40: 900 °C'de 2 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde)



Şekil 41: 900 °C'de 4 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde)



Şekil 42: 900 °C'de 6 saat borlanan R260 ray çeliğinin yüzey pürüzlülük değerleri (yatay ve dikey yönlerde)

Tablo 8: Borlanmış R260 kalite çeliğin yüzey pürüzlülük değerleri

	900 °C – 2 Saat (ortalama)	900 °C – 4 Saat (ortalama)	900 °C – 6 Saat (ortalama)
Ra (µm)	0,293	0,534	0,475
Rz (µm)	2,451	4,172	3,678

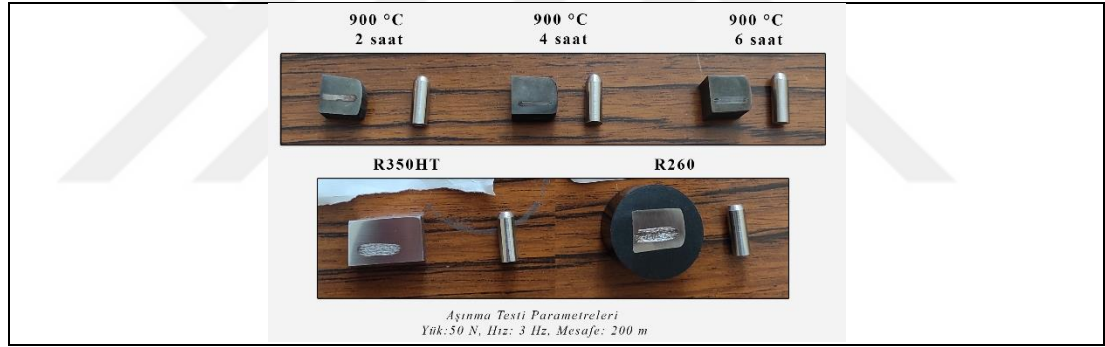
Literatür incelendiğinde 900 °C'de 2 – 4 – 6 saat borlanmış numuneler için yüzey pürüzlülüğü değerinin hesaplanmadığı görülmüştür. Farklı kaynaklarda 1000 °C'de borlanan ray çeliğinden farklı bir çeliğin Ra değerinin 4 saat borlanması durumunda 5 µm ( $\pm 0,5$ ), 6 saat borlanması durumunda 5 µm ( $\pm 0,5$ ), 8 saat borlanması durumunda 9 µm ( $\pm 4$ ) ve 10 saat borlanması durumunda 5 µm ( $\pm 0,5$ ) olduğu belirtilmiştir. Ayrıca 900 °C'de 4 saat Ekabor2 ile borlanan SAE 1020 çelik numunesinin Ra değeri 0,54( $\pm 0,02$ ) µm olarak belirtilmiştir [17]. Bu değer ile tez çalışmasında bulunan ortalama Ra değerinin paralellik gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, 900 °C 4 saat borlanan numunenin Ra değeri 0,37, işlenmemiş R260 ray numunesinin Ra değeri ise 1,30 olarak belirtilmiştir [2].

Yüzey pürüzlülüğü birçok farklı değişkene göre farklılık göstermektedir. Borlama süreci göz önüne alındığında bu değişkenler; numunenin borlama öncesinde yapılan işlemler, malzeme kalitesi, borlama işlem parametreleri (sıcaklık, bekleme süresi) ve borlama işlemi sonrasında numuneye uygulanan işlemlerdir. Bu çalışmada borlama

öncesinde numuneler P800 gritli SiC zımpara kağıdına kadar zımparalanmış ve o şekilde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrasında numune yüzeyi bor tozlarından arındırılmış ve bunun haricinde herhangi bir işlem uygulanmamıştır. İncelenecek numunenin tabanı paralel hale getirilmesi amacıyla zımparalanmış ve su terazisiyle paralellik kontrol edilmiştir. Borlama işlemi sırasında meydana gelen bor tabakasının homojen olmaması nedeniyle Ra sonuçlarında lineer bir değişim gözlenmemektedir.

## 6.2 Aşınma Testi Sonuçları

Aşınma testleri Tablo 3’de belirtilen test parametrelerine göre gerçekleştirildi. 50 N, 3 Hz ve 200 m parametrelerine göre yapılan Aşınma testi-1’den sonra numunelerin durumu Şekil 43’de gösterilmektedir. Şekilde numunelerin aşınma alanları arasındaki farklar gözle incelenebilir.



Şekil 43: Aşınma testi-1'den sonra numuneler

Aşınma testleri sonrasında pin ve numunelerdeki ağırlık kayıpları, testler süresince meydana gelen sürtünme katsayıları, aşınma alanları ve aşınma alanlarının SEM incelemeleri yapılmıştır.

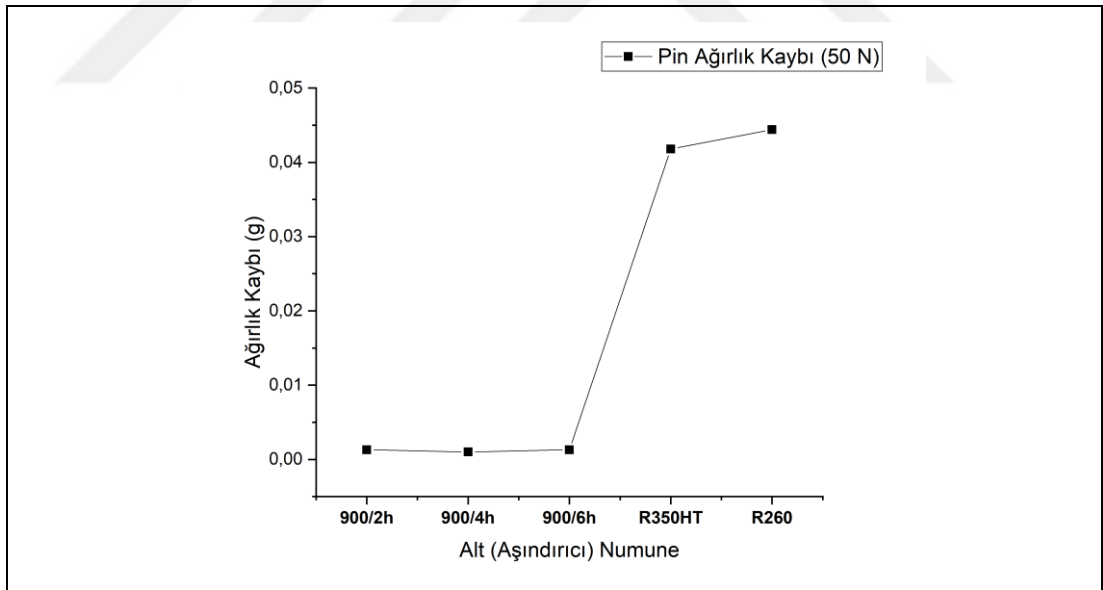
### 6.2.1. Ağırlık Kayıpları

Aşınma testi-1 aşamasında tren tekerinden imal edilen ER7 pinlerinin ilk ağırlıkları ve aşınma testi sonrası son ağırlıkları hassas terazi ile ölçüldü. Elde edilen ağırlık kaybı farkları (gram) ve yüzde ağırlık kayıpları Tablo 9’de, grafik olarak ise Şekil 44’de gösterilmektedir. Aşınma testi-2’de test öncesi ve test sonrası pin ağırlıkları ve ağırlık kayıpları Tablo 10’da, aşınma testinde kullanılan borlanmış ve referans numunelerinin

aşınma testi öncesindeki ve aşınma testi sonrasındaki ağırlıkları ile ağırlık kayıpları gram olarak Tablo 11’de, pin ve numunelerin ağırlık kayıplarının grafiği ise Şekil 45’de gösterilmektedir.

Tablo 9: Aşınma testi-1 için pin aşınması ölçüm sonuçları

<b>Aşınma Testi -1 Pin Aşınması</b> (Ağırlık: 50 N, Frekans 3 Hz, 200 m)				
<b>Pin Kullanılan Malz.</b>	<b>İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Son Ağırlık (g)</b>	<b>Pin Toplam Ağırlık Kaybı farkı (g)</b>	<b>Yüzde Ağırlık Kaybı (%)</b>
900 °C – 2h	3,4537	3,4524	0,0013	0,037
900 °C – 4h	3,494	3,493	0,0010	0,028
900 °C – 6h	3,6252	3,6239	0,0013	0,035
R350HT	3,5596	3,5178	0,0418	1,174
R260	3,5963	3,5519	0,0444	1,234



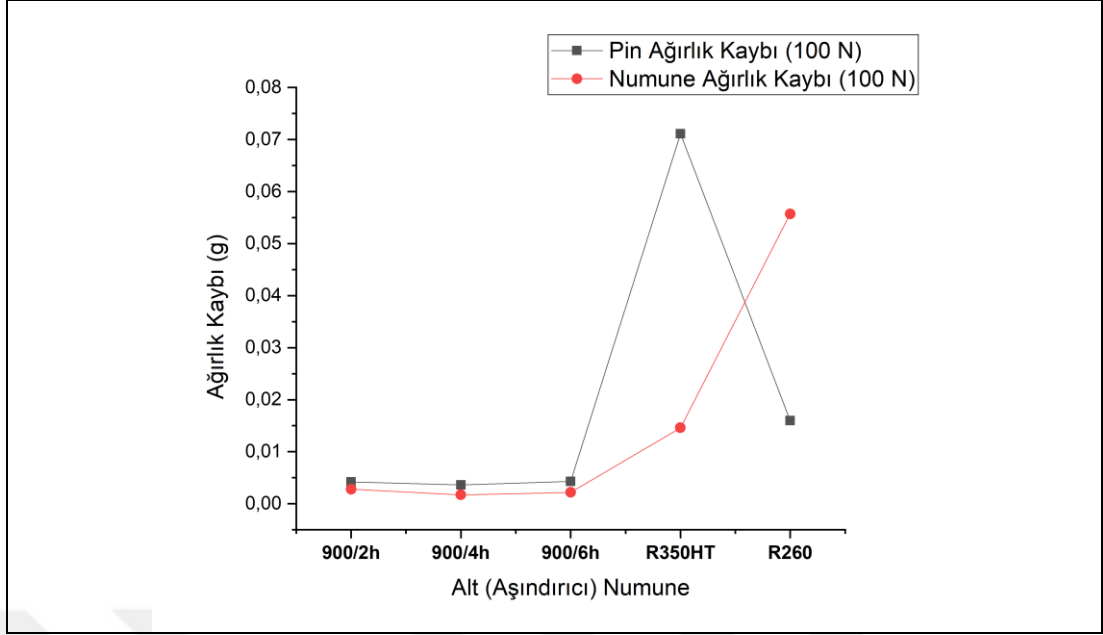
Şekil 44: Aşınma testi-1 pin aşınma grafiği

Tablo 10: Aşınma testi-2 için pin aşınması ölçüm sonuçları

<b>Aşınma Testi-2 Pin Aşınması</b> (Ağırlık: 100 N, Frekans 3 Hz, 200 m)				
<b>Pin Kullanılan Malz.</b>	<b>İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Son Ağırlık (g)</b>	<b>Pin Toplam Ağırlık Kaybı farkı (g)</b>	<b>Yüzde Ağırlık Kaybı (%)</b>
900 °C – 2h	3,3213	3,3171	0,0042	0,126
900 °C – 4h	3,497	3,4934	0,0036	0,102
900 °C – 6h	3,5495	3,5452	0,0043	0,121
R350HT	3,5787	3,5076	0,0711	1,986
R260	3,4359	3,4199	0,0160	0,465

Tablo 11: Aşınma testi-2 için alt malzeme aşınması ölçüm sonuçları

<b>Aşınma Testi-2 Numune</b> (Ağırlık: 100 N, Frekans 3 Hz, 200 m)				
<b>Numune</b>	<b>İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Son Ağırlık (g)</b>	<b>Numune Toplam Ağırlık Kaybı Farkı (g)</b>	<b>Yüzde Ağırlık Kaybı (%)</b>
900 °C – 2h	12,4458	12,4430	0,0028	0,022
900 °C – 4h	14,7696	14,7679	0,0017	0,011
900 °C – 6h	15,557	15,5548	0,0022	0,014
R350HT	33,2844	33,2698	0,0146	0,043
R260	36,4968	36,4411	0,0557	0,152

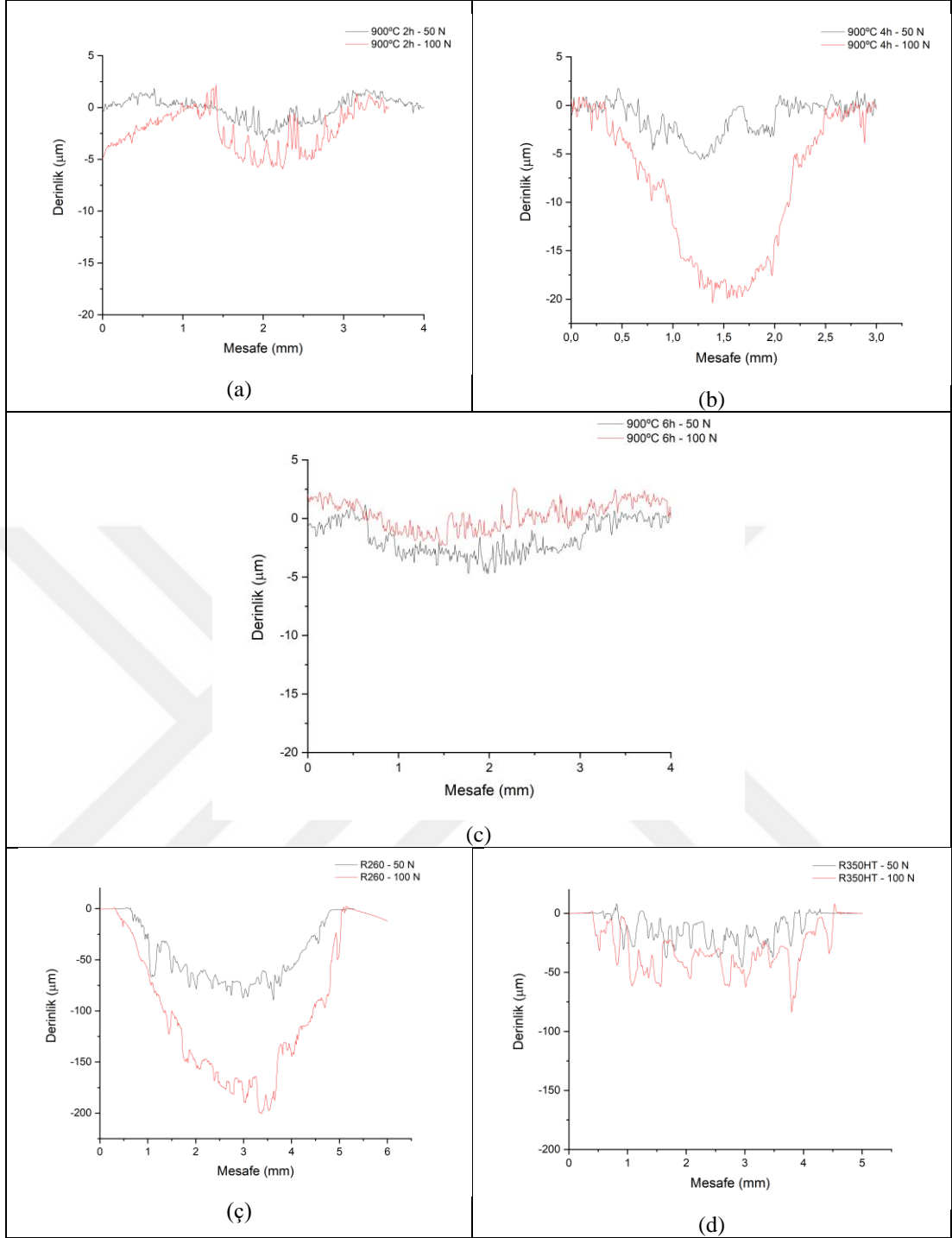


Şekil 45: Aşınma deneyi-2 pin ve numune aşınma grafikleri

Şekil 45 incelendiğinde; alt malzeme olarak kullanılan borlanmış numunelerin referans numunelerine göre daha az aşındığı ve kullanılan pinleri daha az aşındırdığı, referans malzemelerinden R260 kalite ray çeliğinin R350HT ile kıyaslandığında daha fazla aşındığı ve kullanılan pin malzemesini, yani tren tekerini daha az aşındırdığı, R350HT ray çeliğinin R260 ray çeliğiyle kıyaslandığında daha az aşındığı fakat kullanılan pin malzemesini, yani tren tekerini daha fazla aşındırdığı görülmektedir.

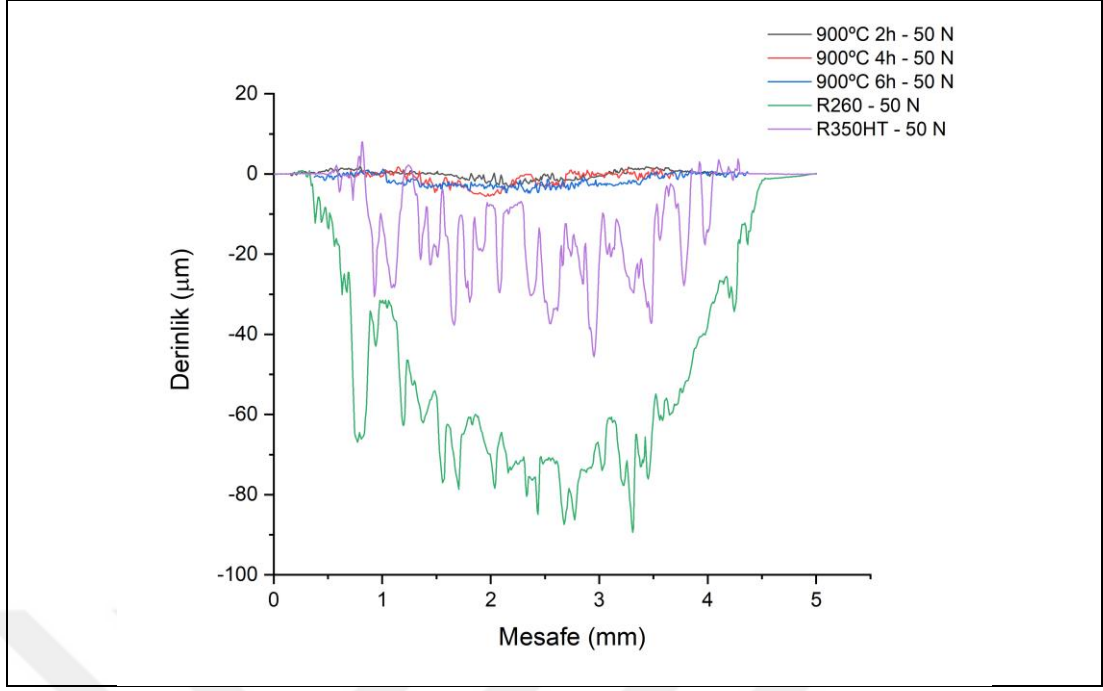
## 6.2.2. Aşınma Alanları

Aşınma testi-1 ve aşınma testi-2 sonrasında numunelerin farklı noktalarından profilometre yardımıyla alınan verilerin grafikleri Şekil 46'da verilmektedir.



Şekil 46: 900°C'de 2 saat (a), 4 saat (b), 6 saat (c), borlanan numunelerle, R260 ve R350HT (d) referans numunelerinin aşınma alanı grafiği

Şekil 46'deki grafikler incelendiğinde, Şekil 45'deki ağırlık kayıpları grafiğiyle paralellik gösterdiği, aşınma alanlarının referans numunelerinde daha fazla, borlanmış numunelerde ise daha az olduğu, yani borlanan numunelerin daha az aşındığı görülmüştür. 50 N altında beş aşınma alanının karşılaştırılması ise Şekil 47'de görülmektedir.



Şekil 47: 50 N yük altında beş aşınma alanının karşılaştırılması

Şekil 47'deki grafikler incelendiğinde; borlanan numunelerin 50 N ve 100 N yükler altında (3 Hz frekans, 200 m mesafe için) referans numunelerine göre daha az aşındığı, demiryollarında sıklıkla kullanılan R260 kalite ray çeliğinin R350H'ye göre daha fazla aşındığı görülmüştür.

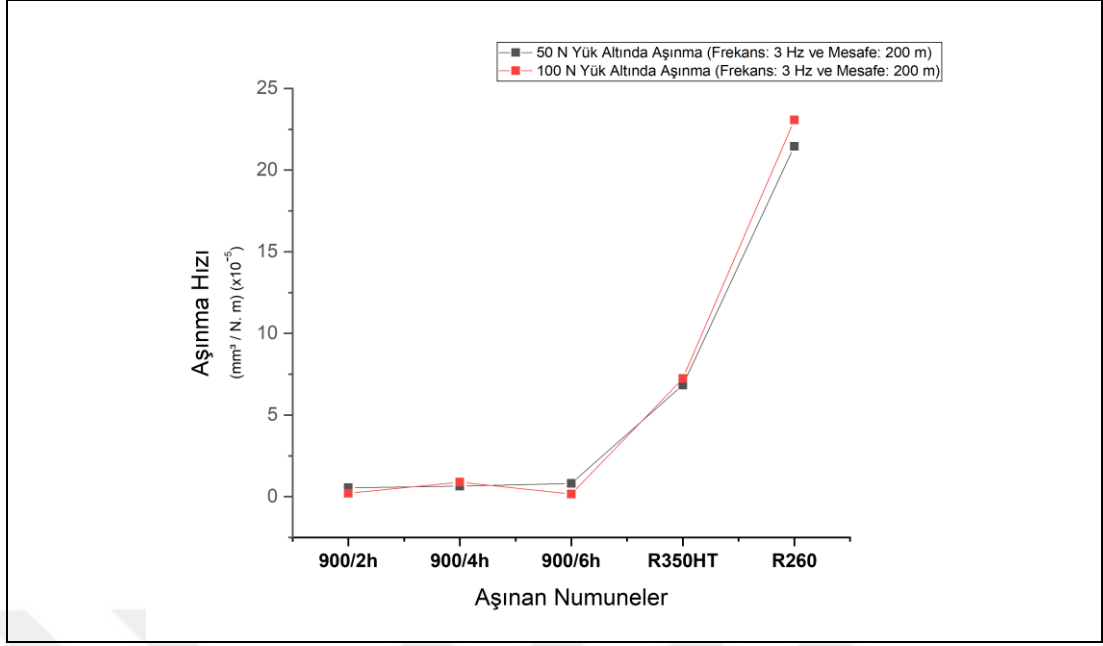
Aşınma deneyinde yükün artırılması numunelerin daha fazla aşınmasına neden olmuştur.

Aşınma deneyleri sonucunda ortalama aşınma alanları Tablo 12'de gösterilmektedir.

Tablo 12: Aşınma testi-1 (50 N) ve aşınma testi-2 (100 N) için hacim kayıpları

Numune	50 N için Ortalama Hacim Kayıpları (mm <sup>3</sup> )	100 N için Ortalama Hacim Kayıpları (mm <sup>3</sup> )
900 °C – 2h	0,05458	0,09268
900 °C – 4h	0,06486	0,2394
900 °C – 6h	0,08138	0,08158
R350HT	0,68288	1,62352
R260	2,14522	5,07898

Hacim kayıplarına bağlı olarak yük ve mesafe ekseninde hesaplanan aşınma hızları Şekil 48'de grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 48: Aşınma hızı grafiği

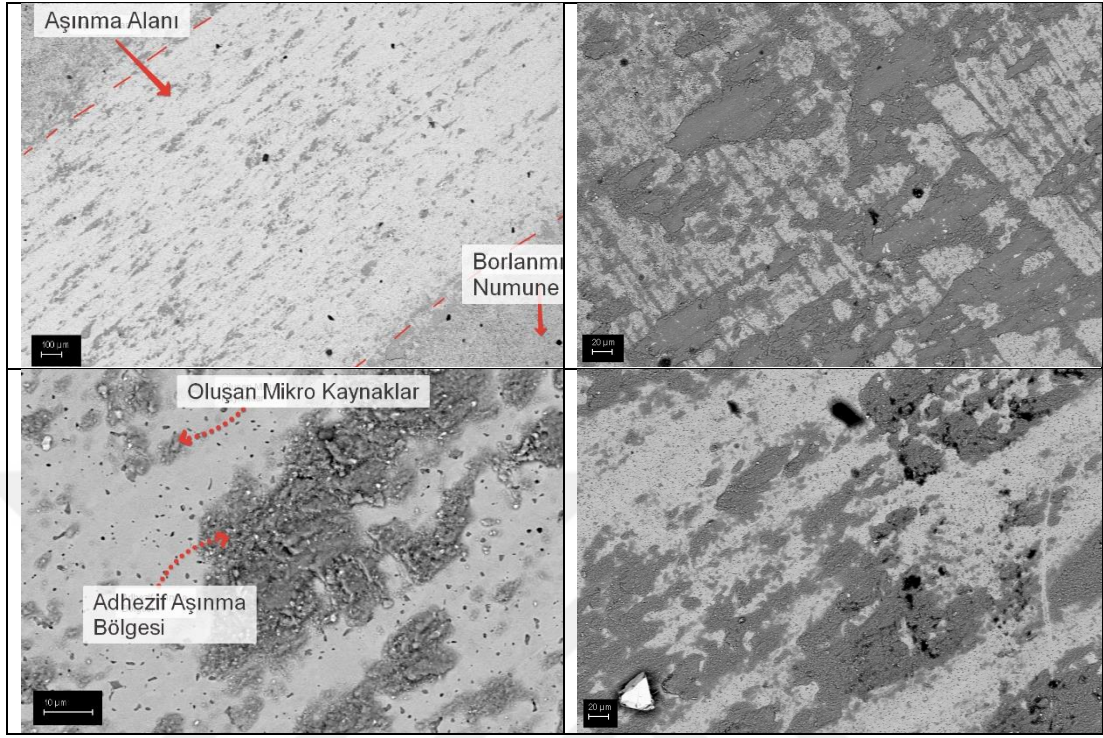
Şekil 48 incelendiğinde R350HT'nin borlan yüzeyi kaplanmış numunelerle kıyaslandığında yaklaşık 10 kat, R260'ın yaklaşık 32 kat daha hızlı aşındığı görülmektedir.

Birbirine sürtünen yüzeylerde aşınma, dolayısıyla hacim kayıpları kaçınılmazdır. Hacim kayıpları Archard'ın aşınma teorisine göre malzemenin sertliğine, uygulanan yüke ve kayma hızına bağlıdır. Sertliğin artması malzemeyi aşınmaya dirençli hale getirirken, yükün ve kayma hızının artması malzemenin daha hızlı aşınmasına neden olur [2].

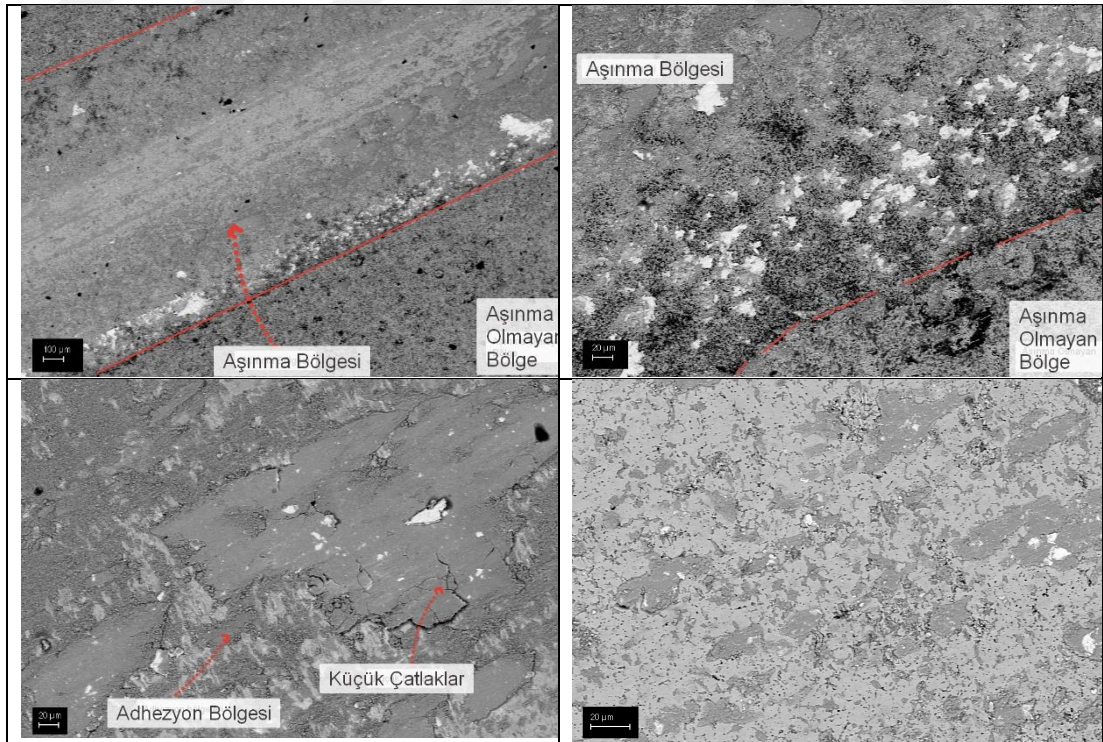
### 6.2.3. Aşınma Testi Sonrası SEM İncelemeleri

Aşınan bölgelerde meydana gelen yapıların incelenmesi adına SEM yardımıyla aşınma bölgeleri incelendi ve elde edilen sonuçlar Şekil 49, Şekil 50, Şekil 51, Şekil 52 ve Şekil 53'de gösterilmektedir. Görseller incelendiğinde borlanmış numunelerde genellikle adhezif aşınma bölgelerinin oluştuğu, bazı durumlarda Şekil 49'deki gibi abrazif ve adhezif aşınma bölgelerinin birlikte oluştuğu, yer yer çatlakların ve boşlukların oluştuğu görülmüştür. Referans numunesi olarak kullanılan R350HT ve R260'ın Şekil 52 ve Şekil 53'deki aşınma bölgelerinde ise genellikle abrazif aşınma bölgelerinin oluştuğu, yer yer adhezif aşınmaların görüldüğü, R260'da adhezif aşınma oranının R350HT'ye kıyasla daha fazla olduğu söylenilebilir. Ayrıca, borlanan

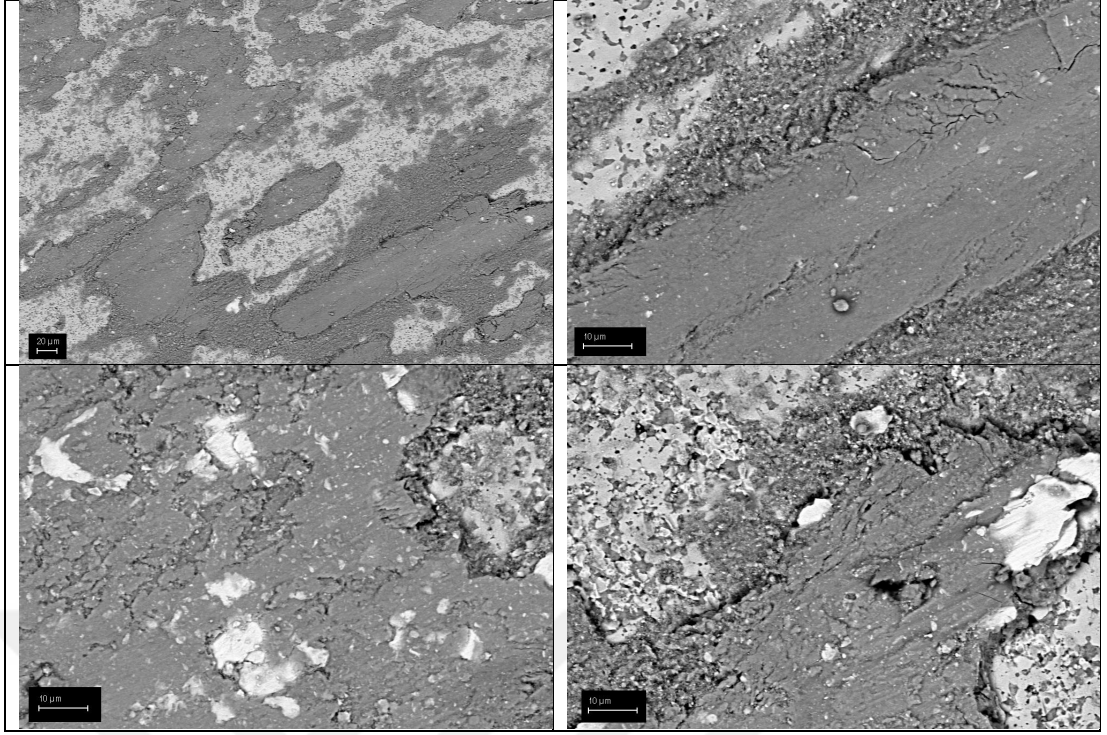
numunelerde yüzeyde oluşan oksit tabakası ( $B_2O_3$  yağlayıcı etki göstererek yüzeydeki basıncın belirli bir kısmını taşımış ve kaynak oluşumlarını engellemiş olabilir [2].



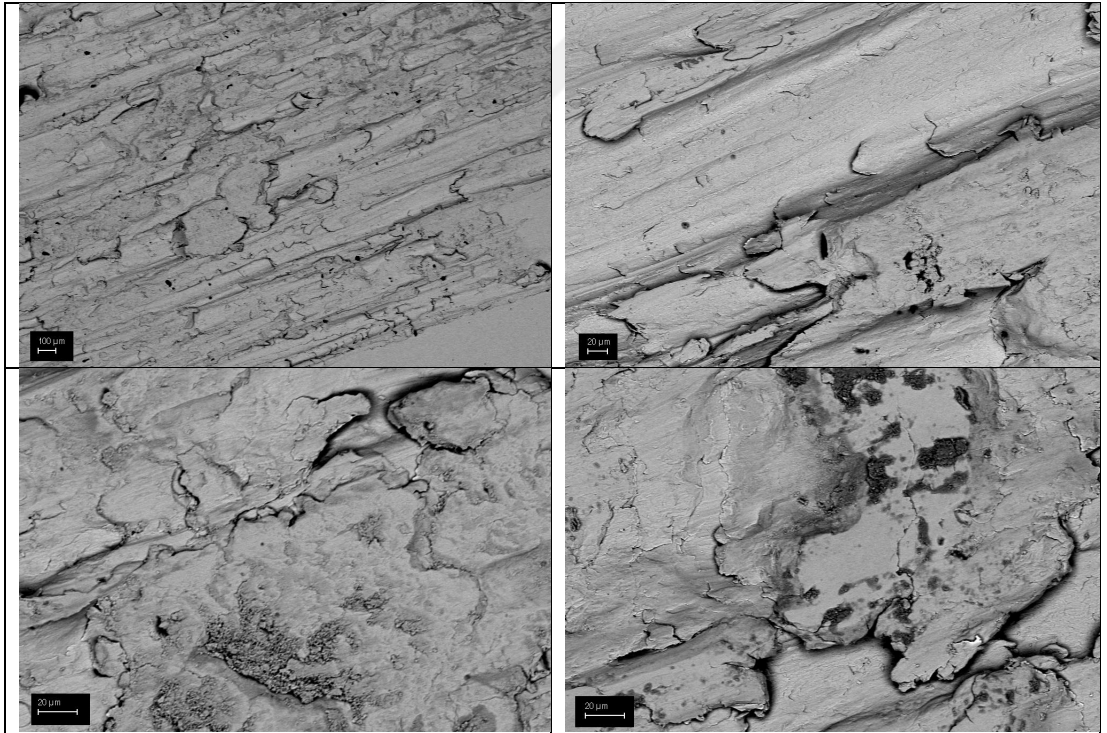
Şekil 49: 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi



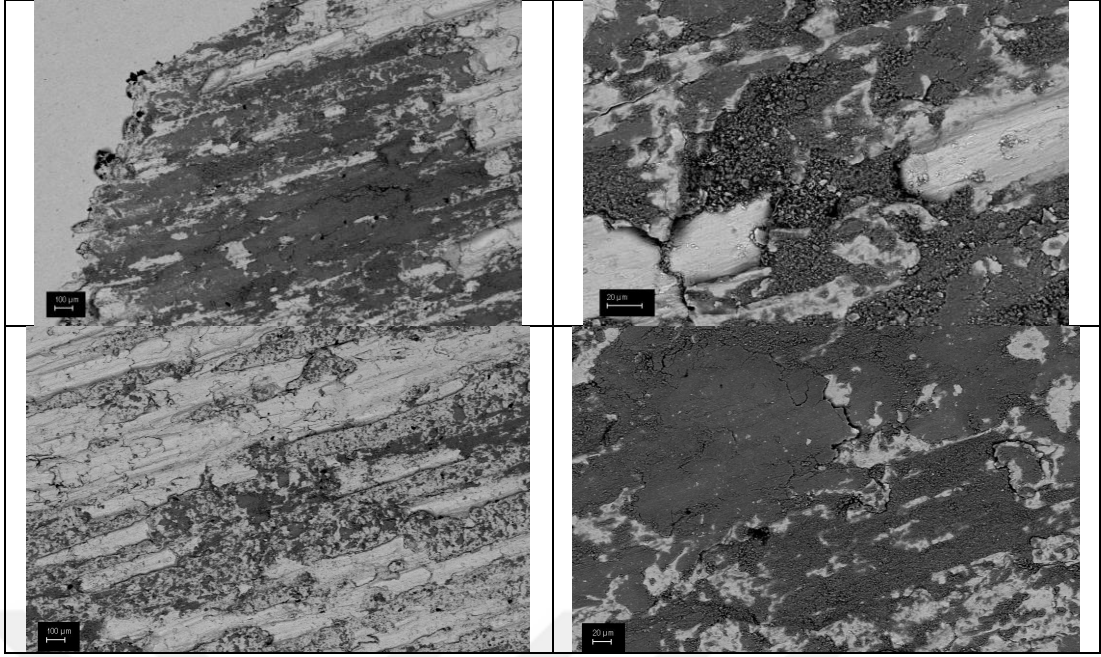
Şekil 50: 900 °C'de 4 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının SEM'de incelenmesi



Şekil 51: 900 °C'de 6 saat borlanan numunenin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi

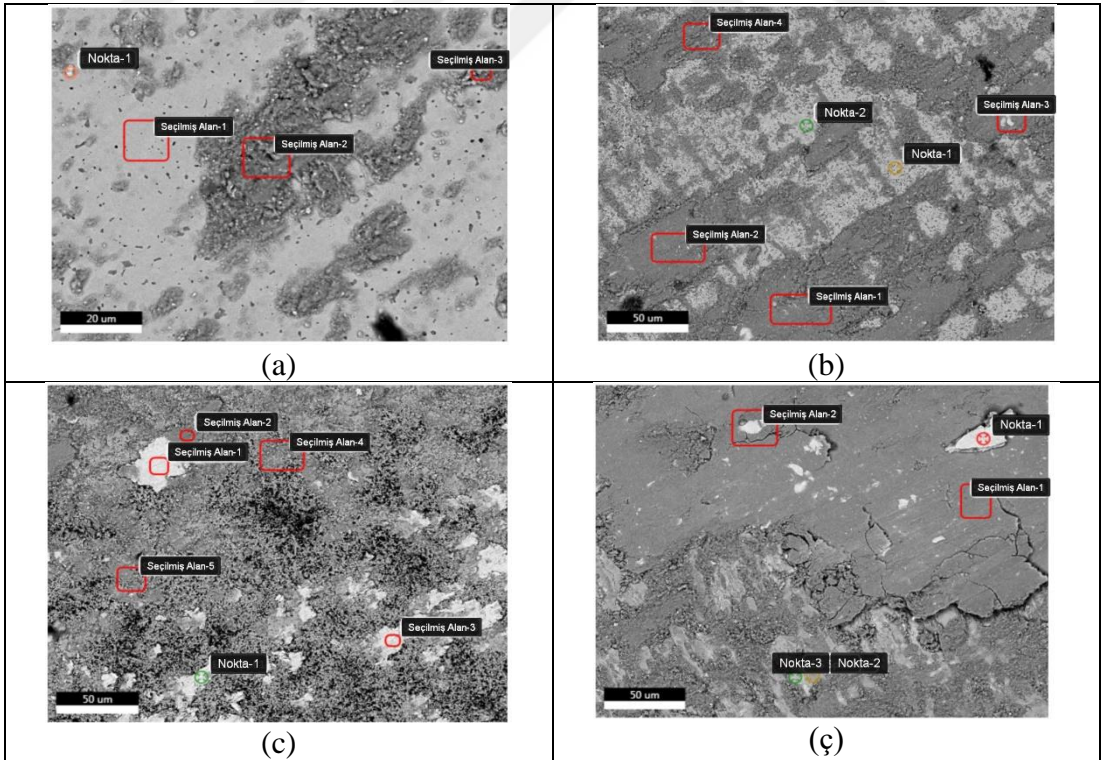


Şekil 52: R350HT referans numunesinin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi

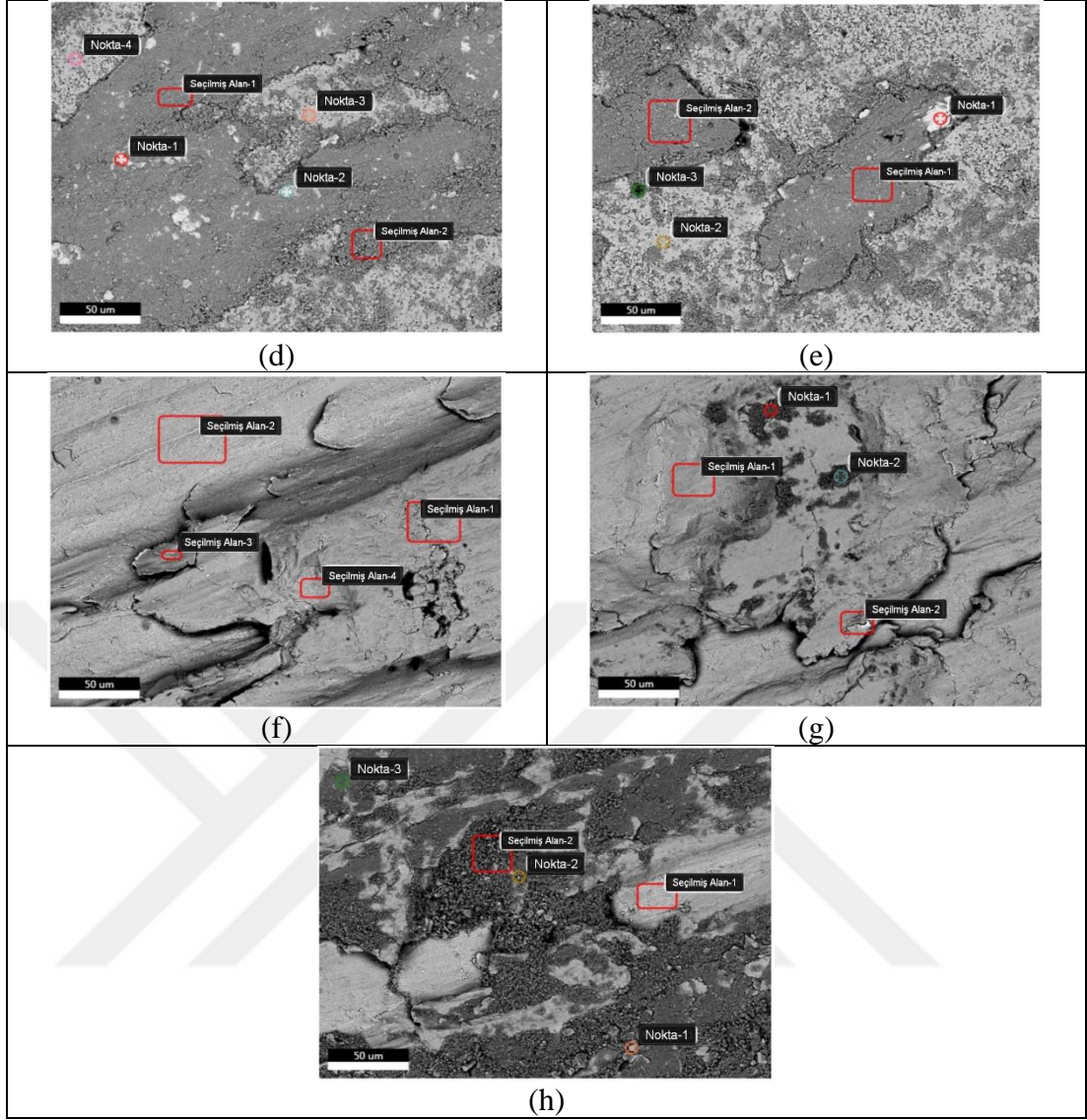


Şekil 53: R260 referans numunesinin aşınma testi sonrası aşınma alanının incelenmesi

Aşınma bölgelerindeki yapıların incelenmesi için Şekil 54 ve 55’de belirtilen bölgelere EDX analizleri yapılmıştır.



Şekil 54: Aşınma testi sonrası EDX analizleri: a) 900 °C'de 2 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, b) 2 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge, c) 4 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, ç) 4 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge



Şekil 55: Aşınma testi sonrası EDX analizleri: d) 6 saat borlanan ve 50 N altında aşınan bölge, e) 6 saat borlanan ve 100 N altında aşınan bölge, f) R350HT numunesinin 50 N altında aşınan bölgesi, g) R350HT numunesinin 100 N altında aşınan bölgesi ve h) R260 numunesinin 50 N altında aşınan bölgesi

Şekil 54 ve 55'deki EDX analizleri incelendiğinde yapıdaki atomların ağırlık dağılımı aşağıdaki Tablo 13'de verilmektedir.

Tablo 13: Aşınma sonrası numunelerin EDX analiz sonuçları

Aşınma Sonrası 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin (a) EDX Sonuçları  
(50 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	2,24	-	0,17	0,83	96,76	-	-	-
Alan -2	0,36	3,46	0,25	0,41	67,42	28,11	-	-
Alan -3	0,25	3,28	0,41	0,64	68,22	27,19	-	-
Nokta -1	1,17	-	0,24	0,60	93,89	3,81	0,30	-

Aşınma Sonrası 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin (b) EDX Sonuçları  
(100 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	3,53	-	0,18	0,51	67,11	28,67	-	-
Alan -2	2,69	-	0,19	0,51	67,59	29,02	-	-
Alan -3	2,39	-	0,20	0,59	69,86	26,96	-	-
Alan -4	4,71	-	0,56	0,73	68,81	25,18	-	-
Nokta -1	2,31	-	0,28	0,35	97,06		-	-
Nokta -2	3,70	-	0,23	0,73	93,42	1,92	-	-

Aşınma Sonrası 900 °C'de 4 saat borlanan numunenin (c) EDX Sonuçları  
(50 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	1,36	-	0,40	0,78	95,41	2,05	-	-
Alan -2	2,80	-	0,36	0,57	68,42	27,85	-	-
Alan -3	2,19	-	0,15	0,53	93,88	3,25	-	-
Alan -4	4,03	-	0,19	0,54	73,78	21,47	-	-
Alan -5	2,27	-	0,41	0,79	78,21	18,32	-	-
Nokta -1	1,58	-	0,19	0,60	95,65	1,98	-	-

Aşınma Sonrası 900 °C'de 4 saat borlanan numunenin (ç) EDX Sonuçları  
(100 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	1,06	-	0,25	0,40	69,68	28,61	-	-
Alan -2	2,98	-	0,23	0,44	69,14	27,21	-	-
Nokta -1	0,01	-	0,30	8,30	83,67	2,60	0,41	4,7
Nokta -2	7,76	-	0,15	0,68	87,73	3,68	-	-
Nokta -3	2,01	-	0,35	0,95	91,75	4,94	-	-

Aşınma Sonrası 900 °C'de 6 saat borlanan numunenin (d) EDX Sonuçları  
(50 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	2,29	-	0,26	0,40	69,69	27,36	-	-
Alan -2	4,69	-	0,17	0,55	70,09	24,50	-	-
Nokta -1	2,77	-	0,23	0,38	94,41	2,21	-	-
Nokta -2	1,38	-	0,15	0,71	95,50	2,27	-	-
Nokta -3	1,80	-	0,29	0,74	95,06	2,10	-	-
Nokta -4	0,33	-	0,44	0,46	94,13	4,64	-	-

Aşınma Sonrası 900 °C'de 6 saat borlanan numunesi (e) EDX Sonuçları  
(100 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	2,32	-	0,06	0,54	69,30	27,78	-	-
Alan -2	3,04	-	0,19	0,41	67,67	28,69	-	-
Nokta -1	3,84	-	0,20	0,56	93,55	1,85	-	-
Nokta -2	3,18	6,31	0,20	0,28	87,82	6,31	-	-
Nokta -3	-	8,69	-	-	48,27	43,03	-	-

Aşınma Sonrası R350HT numunesi (f) EDX Sonuçları  
(50 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	-	-	0,21	0,86	91,57	4,75	-	-
Alan -2	-	1,36	0,17	0,85	95,40	1,75	0,46	-
Alan -3	-	2,29	0,20	0,78	94,00	2,28	0,44	-
Alan -4	-	2,87	0,42	0,98	91,27	4,29	-	-

Aşınma Sonrası R350HT numunesi (g) EDX Sonuçları  
(100 N yük altında aşınma)

	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	-	2,99	0,18	0,77	92,51	3,24	-	-
Alan -2	-	-	0,38	1,06	95,11	2,72	0,18	-
Nokta -1	-	-	0,20	0,54	67,39	29,94	-	-
Nokta -2	-	-	0,21	0,37	70,67	27,86	-	-

Aşınma Sonrası R260 numunesi (h) EDX Sonuçları  
(50 N yük altında aşınma)

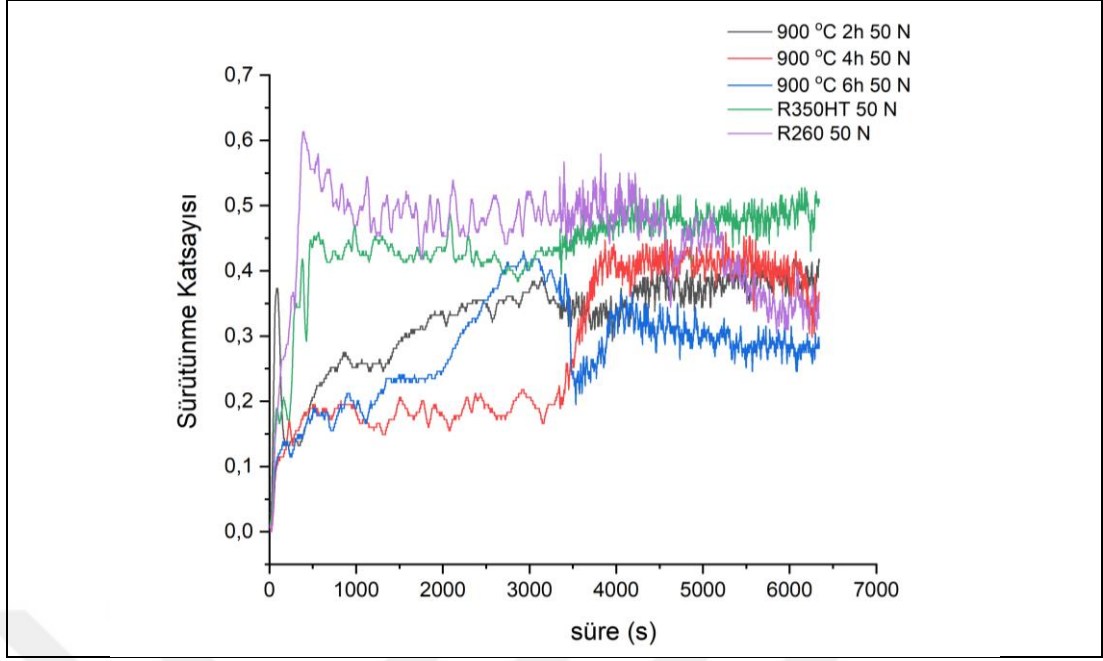
	B (%Ağ.)	C (%Ağ.)	Cr (%Ağ.)	Mn (%Ağ.)	Fe (%Ağ.)	O (%Ağ.)	Si (%Ağ.)	S (%Ağ.)
Alan -1	-	1,39	-	-	94,65	3,69	-	-
Alan -2	-	1,90	-	-	73,45	24,65	-	-
Nokta -1	-	1,75	-	-	93,71	4,22	0,32	-
Nokta -2	-	1,35	-	-	73,02	25,32	0,31	-
Nokta -3	-	-	-	-	71,29	28,71	-	-

#### 6.2.4. Sürtünme Katsayısı

Aşınma testleri süresince numunelerin sürtünme katsayıları ölçülmüş olup, ortalama sürtünme katsayıları Tablo 14’de, 50 N yük altında yapılan aşınma testi-1’deki numunelerin sürtünme katsayısı grafiği Şekil 56’de gösterilmektedir.

Tablo 14: Ortalama sürtünme katsayıları

Numune	Ortalama Sürtünme Katsayıları (50 N) ( $\mu\text{m}$ )	Ortalama Sürtünme Katsayıları (100 N) ( $\mu\text{m}$ )
900 °C – 2h	0,3279	0,4289
900 °C – 4h	0,2777	0,3713
900 °C – 6h	0,2763	0,4237
R260	0,4522	0,3894
R350HT	0,4361	0,3808



Şekil 56: Sürtünme katsayıları grafiği (50 N yük altında)

Sürtünme katsayılarının grafiği incelendiğinde referans numunelerinin (R260 ve R350HT) daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu, borlanan numunelerin sürtünme katsayılarının zamanla artış gösterip sonra düşüşe geçtiği görülmüştür. Ray çeliklerinin yüzeyinde meydana gelen gerilmeler mikro çatlak oluşumuna ve bu mikro çatlaklar plastik deformasyon yaratarak sürtünme katsayısının değişmesine neden olur. Literatürde 900 °C’de 4 saat borlanan ray çeliği numunesinin 50 N yük altında sürtünme katsayısının 0,2585 olduğu belirtilmektedir [2].

# Bölüm 7

## Sonuçlar ve Değerlendirme

Ulaşım ve taşımacılık alanında önemli olan demiryollarının güvenliği ve konforunu altyapı ve üstyapı bakım çalışmaları önemli ölçüde etkilemektedir. Yine de iki metalin (tren tekeri-ray ilişkisi) birbirine temas etmesinden kaynaklı aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınmanın tamamen ortadan kaldırılması söz konusu olmayacağı için yapılacak Ar-Ge çalışmalarıyla azaltılması mümkündür [2, 3, 10, 34].

Bu çalışmada demiryollarında en fazla kullanılan R260 kalite ray çeliğinin termokimyasal yöntemlerden kutu borlama yöntemiyle sabit sıcaklık ve aynı ortam koşullarında farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulup sonrasında aşınma performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. Borlama işlem süresince tek fazlı  $Fe_2B$  (borür) yapısı oluşmakta, bekleme süreleri arttıkça daha sert ve kırılgan olan  $FeB$ -  $Fe_2B$  ikili yapısı oluşmaktadır. Bu faz yüzeye yakın yerlerde ve daha koyu renkte görünmektedir. Bunun nedeni ise  $Fe_2B$  fazının sünek yapılar üzerinde meydana gelmesi ve  $FeB$  fazının ise daha sert yapıların üstünde büyümesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Borür tabakasında  $Fe_2B$ ,  $FeB$ ,  $MnB$  ve  $CrB$  yapılarına, referans malzemelerinin yapısında (R260 ve R350HT)  $Fe$  ve  $Cr_7C_3$  yapılarına rastlanmıştır. Borlama süresi arttıkça  $FeB$  yoğunluğu artmaktadır.
3. Borür tabaka kalınlıkları  $900\text{ }^{\circ}C$  sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat bekleme süreleri için sırasıyla ortalama  $51,64 (\pm 8,9)\ \mu m$ ,  $89,43 (\pm 12,4)\ \mu m$ ,  $106,96 (\pm 8,0)\ \mu m$ 'dur. Borlama işleminde bekleme süresi arttıkça borür tabaka kalınlıkları artmaktadır.
4. Borür tabakalarının ve referans numunelerin mikrosertlik değerleri ise  $900^{\circ}C$  sıcaklıkta 2 saat bekleme süresi için borür tabakasının sertliği 1491-1795 HV,

geçiş bölgesi 523 HV, ana metal 271-320 HV arasında değişmekte, 4 saat bekleme süresi için borür tabakasının sertliği 1426 – 1764 HV, ana metal 291 – 341 HV arasında değişmekte, 6 saat bekleme süreleri için borür tabakasının sertliği 1362-1648 HV, ana metal 286 – 294 HV arasında değişmekte ve referans malzemesi olan R350HT'nin sertlik değerleri 355 – 378 HV arasında değişmektedir. R260 kalite ray çeliğinin için sertliği 271-294 HV arasında bir değerdedir. Borlama işlemi sonucunda R350HT olarak kullanılan ve mantarı sertleştirilmiş raydan daha sert bir yapı elde edilmiştir.

5. Yüzey pürüzlülüğü incelemeleri sonucunda Ra değerinin 900 °C'de 2 saat, 4 saat ve 6 saat borlanan numunelerin sırasıyla 0,293 µm, 0,534 µm, 0,475 µm, Rz değerleri ise sırasıyla 2,451 µm, 4,172 µm, 3,678 µm değerlerinde bulunmuştur. Pürüzlülük değerleri borür tabakasının yapısına göre değişmektedir. Pürüzlülük değerlerinde doğrusal bir artış veya azalışa rastlanmamıştır. Bunun nedeninin ölçüm yapılan yüzeydeki yapının homojen olmamasına ve/veya uzun bekleme süresinde daha yumuşak yapı elde edilmesine bağlı olabileceği düşünülmektedir.

6. Aşınma verileri incelendiğinde;

a. Kurplarda aşınmayı azaltmak için R260 kalite ray çeliği yerine mantarı sertleştirilmiş R350HT ray çeliği kullanılmaktadır. Yapılan iki aşınma deneyi (50 N ve 100 N yükler altında, 3 Hz frekansı, 200 m mesafede) sonucunda malzeme (numune) aşınmaları aşınma alanları baz alınarak değerlendirildiğinde 50 N yük altında yapılan deneyde en az aşınmanın 900 °C'de 2 saat borlanan numune olduğu, en fazla aşınmanın ise R260 kalite ray çeliğinde meydana geldiği, borlanmış numunelerin aşınma alanlarının birbirine yakın değerlerde olduğu ve referans numunelerine göre düşük aşınmaya maruz kaldığı görülmüştür. 100 N yük altında yapılan deneyde en az aşınmanın 900 °C'de 6 saat borlanan numune olduğu, en fazla aşınmanın ise yine R260 ray çeliğinde meydana geldiği görülmüştür. Yükün artırılması aşınma miktarını artırmakta, R350HT ve R260 kalite ray çeliklerinde bu artış daha fazla olmaktadır. Bu durum aşınma süresince yük artırılrsa da kaplamanın yapısını aynen korunmasına yorulabilir.

- b. Malzeme kayıplarına göre aşınma durumları incelendiğinde, 50 N yük ile yapılan aşınma testi-1'de tren tekerinden üretilen pinlerdeki malzeme kayıpları borlanan malzemelerde birbirine yakın olurken R260 kalite ray çeliğinde %3300 kat, R350HT'de %3100 kat daha fazla olmuştur. Aşınma deneyi-2'de yükün artırılmasıyla önceki duruma göre borlanan numunelerinde pin aşınması yaklaşık %200 artış gösterirken yükün artmasıyla R350HT ray çeliğinde kullanılan pin önceki duruma göre %70 artış göstermiş ve borlanan numunelere göre %1500 daha fazla aşınmıştır. R260 kalite ray çeliğinde kullanılan pin incelendiğinde ise önceki duruma göre %60 daha az aşınmış fakat ikinci deneydeki borlanmış numunelerde kullanılan pinlere göre %280 daha fazla aşınmıştır.
- c. 100 N altında yapılan aşınma testi-2'de hem ağırlık kayıpları hesaplanmış hem de aşınma alanları incelenerek numunelerin aşınma durumları karşılaştırılmıştır. Borlanmış numunelerdeki aşınma oranları her iki hesaplamada da R260 ve R350HT ray çeliklerine kıyasla çok az aşınma göstermiştir. R260 kalite ray çeliği her iki ölçüm yönteminde en fazla aşınan malzeme, R350HT çeliği ise R260'dan sonra en fazla aşınan malzeme olmuştur.
- d. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde R260 kalite ray çeliği yerine kullanılan R350HT ray çeliğinin borlanan malzemelerle kıyaslandığında hala daha fazla aşınma davranışı sergilediği, bu aşınmanın sebebinin SEM görüntülerinde de görüldüğü üzere iki metalin birbirine teması sonucunda ağırlıklı olarak abrazif aşınma ortamının oluştuğu, borlama işleminin iki metalin doğrudan birbirine temas etmesi engellendiği için aşınma düzeyini azalttığı söylenebilir.
- e. Buna ilave olarak, R260 ve R350HT kalite ray çelikleri farklı oranlarda tren tekerini aşındırırken, borlanmış numunelerin hem daha az aşındığı hem de tren tekerini daha az aşındırdığı görülmüştür.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçların ortama, operatöre, ölçüm cihazlarının kalibrasyonuna ve diğer faktörlere bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca tren tekeri-ray ilişkisinin sabit bir yapı üzerinde dönen bir yapıda olduğu ve sürekli ileri yönlü gerçekleştiği, alt malzemenin üzerine binen yükün daire şeklindeki tekerde yayıldığı bilinmekte, yapılan aşınma deneylerinin sabit tabaka üzerine pinin ileri geri hareketi sonucunda elde edildiği, dolayısıyla gerçek durumu birebir yansıtmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Buna rağmen, aynı koşullarda farklı yapıların aşınma davranışları hakkında bize fikir verecek sonuçlar elde edildiği göz önünde bulundurulmalıdır.



# Kaynaklar

- [1] Uzbaş, B. Demir Yolu İltisak Hatlarında Aşınma Kayıpları, Mühendis ve Makine 2013; 54 (638): 39-45
- [2] Kondul, B. Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi; 2020
- [3] Onat, Ö. Mantarı Sertleştirilmiş R260 Kalite Rayların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Karabük: Karabük Üniversitesi; 2012
- [4] Ertürk, Ş. Termo-Kimyasal Yöntemle Kaplanmış Farklı Kesici Takım Malzemelerinin Talaşlı İşlem Kabiliyetinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 2010
- [5] Aydemir, T. Şen, U. Borlanmış Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışları. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2003, 7(3); 28-31
- [6] Şahin, S. Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714, Journal of Materials Processing Technology 2009: 1736–1741
- [7] Ünlü, BS. Yılmaz SS. Bor ve Borlamanın Kullanım Alanları. Mühendis ve Makine Dergisi 2006; 47 (552): 48-54
- [8] Uluköy, A. Can AÇ. Çeliklerin Borlanması. Mühendislik Bilimleri Dergisi 2006; 12(2): 189-198
- [9] Özden, MA. Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi; 2011
- [10] Bozkurt, F. Borlu Çeliklerin Ray Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Sürtünme ve Aşınma Özellikleri Açısından Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi; 2017
- [11] Öztürk, K. Plastik Kalıp Çeliklerinin Korozyona Karşı Korunmasında Kutu Borlama İşleminin Etkileri (Yüksek Lisans Tezi). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi; 2021
- [12] Kassfeldt E. Lundmark, J. Tribological Properties Of Hardened High Strength Boron Steel At Combined Rolling And Sliding Condition. Elsevier Journal, Wear 2009; 267: 2287–2293
- [13] Çakır, F. H., Bozkurt, F., Çelik O. N., Er, Ü. Tribological Examination of Hardened Two Types Boron Steel for Railway Applications, I. International

Workshop on Construction and Electricity Applications on Vocatioanl Education, 30 November-1 December 2015, TC Anadolu Üniversitesi Yayınları, No:3236, 563 – 572.

[14] Ghasemi Owsalou, R. Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi; 2012

[15] Olofsson U. Telliskivi T. Wear, Plastic Deformation And Friction Of Two Rail Steels—A Full-Scale Test And A Laboratory Study. Elsevier Science B.V. Wear 2003; 254: 80–93

[16] Aksöz, S. Bostan, B. Kaplan, Y. Borlama İşleminin T/M Tekniği İle Üretilmiş Niti Alaşımının Mikroyapı Ve Mikrosertliğine Etkilerinin İncelenmesi. Politeknik Dergisi, 2021, 24(2): 539-544

[17] Türkmen, İ. Farklı Bor Türevleri ile Alternatif Borlama Bileşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu (Doktora Tezi). Manisa: Celal Bayar Üniversitesi; 2018

[18] Günen, A. Çarboğa, C. Kurt, B. Orhan, N. Borlama İşleminde Kullanılan Bor Tozu Tane Boyutunun Kaplama Tabakası Üzerine Etkisi, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2013; Cilt 2(1): 12-19

[19] Gülsün, K. Yüzey Borlanmış ve Farklı Matriks Yapılı Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi; 2016

[20] Karataş, S. FeB Toz Boyutunun AISI 4140 Çeliğinin Borlama Parametrelerine Etkisinin Araştırılması (Doktora Tezi). Elâzığ: Fırat Üniversitesi; 2016

[21] Mellor, BG. Surface coatings for protection against wear, First Published. Woodhead Publishing and Maney Publishing; 2006

[22] Yapar, U. Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2003

[23] Onat, Ö. Özduman, A. Tozlu, İ. Cevik, E. Ahlatçı, H. ve Sun, Y. Mantarı Sertleştirilmiş R260 Kalite Rayların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. ISERSE'13 2. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu; 2013 Ekim 9-11; Karabük

[24] Özbek, İ. Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi (Doktora Tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 1999

- [25] Çelik, ON. Akbayır, Ö. Gasan, H. Er, Ü. Aydınbeyli, N. Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrazif Aşınma Özellikleri. Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi 2008, C.XXI, S.1; 71-85
- [26] Fichtl, W. Boronizing and its Practical Applications. Materials in Engineering, Vol. 2, 1981: 276-286
- [27] Yiğit, E. Demiryollarında Raylardaki Aşınma Hızının Ve Miktarının Eşdeğer Konikliğe Etkisi Ve Bakım Prosedürlerinin Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi; 2022
- [28] TCDD Hat Bakım El Kitabı (Üstyapı).
- [29] Orak, A. Tungsten Karbür Kaplanmış Perlitik Ray Çeliğinin Aşınma Ve Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi; 2021
- [30] Neala, MJ. The Triboloji Handbook. Second Edition, Butterworth-Heineman; 1995
- [31] Özçelik, S. Erdem, A. Atamer, S. Ahlatci, H. Sun, Y. Esen, İ. Kardemir A.Ş. de Yerli R350HT Kalite Rayların Üretimi. Journal of Steel Research and Development, 2020: 20-24
- [32] Zhu, Y. Adhesion In The Wheel – Rail Contact (Doctoral Thesis). Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, Department of Machine Design; 2013
- [33] Emiroğlu, K. Uzman, Ü. TCDD Demiryolu Sözlüğü
- [34] Bhushan, B. Modern Tribology Handbook. Volume one. CRC Press; 2000
- [35] Donzella, G. Faccoli, M. Mazzù, A. Petrogalli, C. Roberti, R. Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel–rail couple under cyclic contact. In. Grassie, SL. Magel, E. Mutton, PJ. editors. Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems; 2009 Florence, Volume 271, Issues 1–2: 1-492
- [36] Yazıcı, O. Lazerle Sertleştirme Yöntemiyle Demiryolu Raylarının Mantarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi (Doktora Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi; 2018
- [37] Kahyalı, Y. Yalçın, Y. Taktak, Ş. Ticari Ekabor-II Tozunun Borlama İşleminde Tekrar Kullanılma Sayısının Araştırılması. III. Uluslararası Bor Sempozyumu; 2006 Kasım 2-4; Ankara; 181-185
- [38] Karabaşoğlu, M. Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 2008

[39] Dokumacı, E. Özkan, I. Öney, B. Effect of Boronizing on The Cyclic Oxidation of Stainless Steel. *Surface & Coatings Technology* 232, 2013:22–25

[40] Kondul B. Çetin MH. Increasing the Wear Resistance of Railway Witches with Boron Coating and Analysis of Tribological Performance by ANOVA Method. Elsevier Science B.V. *Wear* 2022; 488-489



# Ekler

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

### **Konferans Bildirileri**

1. Yardım, Ü. Tekin, K.C. Güzelipek, O. Ertuğrul, O. Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi ve R350HT ile Karşılaştırılması. Uluslararası Bor Sempozyumu (BORON 2022), 5-7 Ekim 2022, İstanbul. Sözlü Sunum

2. Yardım, Ü., Gülçiçek, E., Yiğit, E., Ertuğrul, O. Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Karakterizasyonu ve R350HT ile Karşılaştırılması. 2nd Global Conference On Engineering Research (GLOB CER'22) 7-10 Eylül 2022; sayfalar: 406-407

# Özgeçmiş

Adı Soyadı: Ümit Yardım

Eğitim :

- 2020–2022 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Yüksek Lisans - Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Tezli)
- 2016–2018 Türkiye ve Ortadoğu Amme İdaresi Enstitüsü (TODAİE), Yüksek Lisans- Kamu Yönetimi (Tezsiz)
- 2012 Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Uluslararası Kaynak Mühendisliği
- 2005-2010 Kocaeli Üniversitesi, Lisans Eğitimi- Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

İş Deneyimi :

- 02/2021 – Halen İstanbul Sağlık Bilimleri Üniversitesi – Misafir Öğretim Görevlisi
- 06/2018 – Halen TCDD 3. Bölge Müdürlüğü–Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü - Mühendis
- 11/2011 – 06/2018 TCDD Genel Müdürlüğü- Satın Alma ve Stok Kontrol Dairesi Başkanlığı- Mühendis
- 01/2011 – 11/2011 TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası