

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RAYLI TAŞITLARDA TEKER BANDAĞI-RAY SİSTEMİNDE
DOLGU KAYNAĞI VE SABO PARÇALARIN AŞINMA VE
YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Uğur ÖZSARAÇ

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : KAYNAK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Salim ASLANLAR**

TEMMUZ 2005

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RAYLI TAŞITLARDA TEKER BANDAĞI-RAY SİSTEMİNDE
DOLGU KAYNAĞI VE SABO PARÇALARIN AŞINMA VE
YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Uğur ÖZSARAÇ

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : KAYNAK**

Bu tez 08 / 07 /2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. Mehmet DURMAN
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Ahmet OĞUR
Üye**

**Prof. Dr. Ali KALKANLI
Üye**

**Doç. Dr. C. Hakan GÜR
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Salim ASLANLAR
Üye**

ÖNSÖZ

Demiryolları bir ülkenin veya bir bölgenin ekonomik ve sosyal olarak gelişmesinde çok önemli rol oynarlar. Raylı taşıtlar, günümüzde kara taşımacılığının önemli bir unsuru haline gelmişlerdir. Bu taşıtlarda ray ile teker arasındaki etkileşmeden dolayı raylarda; aşınma, ezilme, eğilme gibi ulaşımı ve yolcuların konforunu olumsuz yönde etkileyecek istenilmeyen sorunlar meydana gelmektedir. Bunda oluklanma biçiminde açığa çıkan aşınmanın, trenlerin raylar üzerinde yüzlerce geçişinden sonra oluşması rol oynamaktadır. Ayrıca deneylerin laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmesi oldukça zordur.

Raylı taşıtların teker bandajı-ray-fren sisteminde aşınma ve yorulma hasarlarının karakterize edilmesi ve tamir amacıyla dolgu kaynağı uygulanması ile ilgili bu çalışmamın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında beni aydınlatan saygıdeğer hocalarımdan başta tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Salim ASLANLAR'a, Prof. Dr. Selahattin ANIK'a, Prof. Dr. Mehmet DURMAN'a, Prof. Dr. Ahmet OĞUR'a, Yrd. Doç. Dr. S.Can KURNAZ'a şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarıyla bana destek olan Arş. Gör. Met. Yük. Müh. Hüseyin ŞEVİK'e özellikle teşekkür ederim. Tez çalışmalarımda yardımlarını gördüğüm Arş. Gör. Dr. Özkan ÖZDEMİR'e, A. Şükran DEMİRKIRAN'a, Yıldız Yaralı ÖZBEK'e, Nuray CANIKOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım boyunca laboratuvar olanaklarından yararlandığım SAÜ Metalurji ve Malzeme Müh. ve Metal Eğitimi Bölümlerine, ODTÜ Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümüne, Türkiye Vagon Sanayi A.Ş'ne (TÜVASAŞ), 1. Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'na, ERDEMİR T.A.Ş'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan aileme, her zaman yanımda bana destek olan eşime ve oğluma da sevgilerimi sunarım.

Temmuz 2005

Uğur ÖZSARAÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2.

DEMİRYOLLARI, RAY, TEKER BANDAJI VE FREN SİSTEMİ.....	7
2.1. Mantar.....	8
2.2. Ray Tabanı.....	10
2.3. Rayların Kimyasal Bileşimleri.....	11
2.4. Teker Bandajı-Ray Etkileşimleri.....	12
2.5. Teker Bandajı-Ray Arasındaki Temastan Kaynaklanan Aşınma.....	17
2.5.1. Teker-Ray Aşınma Mekanizmaları.....	19
2.6. Teker-Ray Arasındaki Yuvarlanmalı Temastan Kaynaklanan Yorulma.....	21
2.7. Aşınma ile Yuvarlanma Temas Yorulması Arasındaki Etkileşimler.....	23
2.8. Trenlerde Kullanılan Fren Balataları.....	24
2.8.1. Dökme-Demir Fren Balataları.....	25
2.8.2. Kompozit Fren Balataları.....	26

BÖLÜM 3.

AŞINMA VE YORULMA.....	29
3.1. Aşınma.....	29
3.1.1. Aşınma Mekanizmaları.....	30

3.1.1.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma ve Yenme Aşınması).....	31
3.1.1.2. Abrasiv Aşınması (Yırtılma ve çizme aşınması).....	33
3.1.1.3. Tabaka aşınması.....	34
3.1.1.4. Titreşim aşınması.....	35
3.1.1.5. Ablativ aşınma.....	35
3.1.2. Aşınma Çeşitleri.....	35
3.1.2.1. Kayma Aşınması.....	35
3.1.2.2. Metal-Metal Aşınması.....	36
3.1.2.3. Püskürtme aşınması.....	37
3.1.2.4. Erozyon (Erosiv Aşınma).....	37
3.1.2.5. Yorulma aşınması.....	38
3.1.2.6. Oksidasyon Aşınması.....	39
3.2. Yorulma.....	39
3.2.1. S-N (Wöhler) Eğrileri.....	39
3.2.2. Parçanın Tasarımı ve Görünümü.....	41
3.2.3. Çalışma Koşulları.....	41
3.2.4. Malzeme.....	43
3.2.5. Kaynaklı Birleşmelerin Yorulma Davranışı.....	44
3.2.6. Yorulma Kırılmalarına Pratik Örnekler.....	48
3.2.7. Yorulma Deneyleri.....	51
BÖLÜM 4.	
DOLGU KAYNAKLARI.....	55
4.1. İşlemin Esasları.....	55
4.1.1. Tanımlama.....	55
4.1.2. İşlemin Prensipleri.....	55
4.1.3. Dolgu Kaynaklarının Yarattığı Sorunlar.....	58
4.1.3.1. Isıl Gerilmeler.....	58
4.1.3.2. Karışma ve Bulaşma.....	60
4.1.4. Korozyona Dayanım İçin Yüzey Dolgusu.....	62
4.1.5. Abrazyon Dayanımı İçin Yüzey Dolgusu.....	64
4.1.6. Abrasif Aşınma Durumlarında Kullanılacak Malzemeler	65
4.1.7. Darbeye Karşı Yüzey Dolgusu.....	69
4.1.8. Sert Dolgular İçin Esas Metaller.....	72

4.1.9. Sertlik Düzeyinin Saptanması.....	73
4.2. Perlitik Çelikler.....	76
4.3. Kaynak Sürecinin Seçimi.....	77
4.3.1. Genel Kriterler.....	77
4.3.2. Tek Bir Yüzeyi Korumak İçin Seçim.....	78
4.3.3. Temas Halindeki Yüzeyleri Korumak İçin Seçim.....	79
4.3.4. Seçimde Pratik Kriterler.....	80
4.3.4.1. İş Parçası Faktörü.....	80
4.3.4.2. Esas Metalin Özellikleri.....	81
4.3.4.3. Sert Dolgu Alaşımının Şekil ve Bileşimi.....	81
4.3.4.4. Dolgu Metalinin Nitelik ve Kalite Gereklere.....	82
4.3.4.5. Kaynakçının Becerisi.....	82
4.3.4.6. Seçim Faktörlerinin Birbirleriyle İlişkileri.....	82
4.3.5. Niteliklerin Denetlenmesi.....	83

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	84
5.1. Genel.....	84
5.2. Kullanılan Malzemeler ve Spektrometrik Analiz.....	86
5.3. Uygulanan Dolgu Kaynak İşlemleri.....	87
5.3.1. Numune Hazırlama ve Ön- tavlama.....	88
5.3.2. Elektrik Ark Dolgu Kaynak İşlemleri.....	91
5.3.3. Boden Dolgu Kaynak İşlemleri.....	96
5.4. Sertlik Ölçümleri.....	97
5.5. X- Işını Analizleri.....	98
5.6. Mikroyapı.....	98
5.6.1. Optik Mikroskop.....	98
5.6.2. Makroyapı İncelemeleri.....	99
5.6.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM).....	99
5.7. Aşınma Deneyleri.....	99
5.8. Yorulma Deneyleri.....	112
5.9. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	114

BÖLÜM 6.

DENEYSEL SONUÇLAR.....	117
6.1. Genel.....	117
6.2. Sertlik.....	117
6.3. Aşınma Sonuçları.....	121
6.3.1. Kuru Aşınma Sonuçları.....	121
6.3.1.1. Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	121
6.3.1.2. Ağırlık Kaybı Değerleri.....	126
6.3.1.3. Hacimsel Azalma Değerleri.....	131
6.3.1.4. Spesifik Aşınma Oranı Değerleri.....	136
6.3.2. Yaş Aşınma Sonuçları.....	140
6.3.2.1. Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	140
6.3.2.2. Ağırlık Kaybı Değerleri.....	145
6.3.2.3. Hacimsel Azalma Değerleri.....	151
6.3.2.4. Spesifik Aşınma Oranı Değerleri.....	155
6.4. Yorulma Sonuçları.....	163
6.5. Mikroyapı.....	169
6.5.1. Optik Mikroskopü.....	170
6.5.2. Makroyapı İncelemesi.....	175
6.5.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri ve EDS-Analizleri.....	176
6.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	182
6.7. X-Işını Analizleri.....	197

BÖLÜM 7.

GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	198
KAYNAKLAR.....	210
ÖZGEÇMİŞ.....	218

ÖZET

Anahtar kelimeler: Aşınma, Yorulma, Teker/Ray Teması, Dolgu Kaynağı

Çelik raylar üzerinde yuvarlanan çelik tekerler, demiryollarını diğer ulaşım türlerinden ayıran temel özelliktir. Etkin ve ekonomik bir demiryolu taşımacılığı yapabilmek için, teker/ray ara yüzeyinde oluşacak etkileşimleri ve tribolojik oluşumları bilmek önemlidir. Teker ve ray arasında çok küçük bir temas alanı vardır ve bu temas çok şiddetli gerilmeler ve çevresel koşullar altında yapıyı etkiler, bazen bu gerilmeler çekme veya kayma kuvvetlerinin çok üstünde değerlere çıkabilmektedir. Aşırı sıcaklık artışları da işin içine girince aşınma kayıpları kaçınılmaz olmaktadır. Teker ve raylarda oluşacak bu hasarların tahmin edilebilmesi, gerekli önlemlerin önceden alınması malzeme kayıplarını azaltacak, ray bileşenlerinin servis ömürlerinin uzamasına neden olacaktır. Henüz aşınmaya ve yorulmaya tamamen karşı koyabilecek malzemeler üretilmemiştir.

Demiryolları için yapılan yenileme, bakım ve tamir masrafları, diğer karayolları ve bunların köprü vb. bileşenleri için yapılan harcamalardan çok daha fazladır. Bundan dolayı, eğer ray ve tekerlerin kullanım ömrü uzatılmak isteniyorsa, ray/teker sisteminin tribolojisi iyi anlaşılmalıdır. Bu sistem karmaşıktır, ray ve tekerin yanında yağlayıcı veya aşınma ürünü gibi üçüncü bir bileşenin birbirlerine göre olan davranışlarını ve bunun yanında yağmur, kar ve buz gibi çevresel koşulların etkilerini inceler. Bu ağır koşullar yüksek oranlarda teker, ray, teker bandajı gibi bileşenlerden malzeme kayıplarına neden olur. Ayrıca trenin raylar üzerinden defalarca geçişi sırasında tekrarlı yükler ray/bandaj ara yüzeyinde yorulma hasarına yol açar.

Bundan dolayı, sistemi oluşturan bütün elemanların aşınma ve yorulma deneyleri laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. İki farklı dolgu kaynağı elektrotu alınarak elektrik ark kaynağı yöntemiyle dolgu kaynağı işlemi yapılmıştır. Endüstriyel olarak uygulanan Boden kaynak yöntemi ile de hiç kullanılmamış bir tekerin bandajının çevresine açılan 10 mm derinliğindeki bir oluğa dolgu kaynağı uygulanmıştır. Yapılan bu yüzey dolgusu işlemlerinin yanında, yorulma numunesi elde etmek amacıyla aynı malzemelerle alın kaynağı işlemleri de gerçekleştirilmiş, bu kaynaklı yüzey ve bağlantılarda disk-üstü-pim (pin-on-disc) aşınma deneyi numuneleri ve DIN normlarına uygun yorulma deney numuneleri çıkarılmıştır. Aşınmış bandaj yüzeylerine atılan dolgu kaynağının her yönde de aynı özellikler gösterip göstermediğini, yani izotropi olup olmadığını araştırmak, anizotropik özellik varsa hangi yönde kaynak çekmenin en iyi sonucu vereceğini saptamak için üç farklı doğrultuda kaynak işlemi yapılmıştır. Aşınma deneyleri 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, 1 m/s sabit kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin her birinde 3600 m yol alınmıştır. Deney sonuçlarının ışığında, numunelerin sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı (mg), hacimsel azalma (mm^3) ve spesifik aşınma oranı (g/N.m) değerleri hesaplanmıştır, kullanıcılara önerilerde bulunulmuştur. Ayrıca 300, 400 ve 500 MPa gerilme genliklerinde yorulma deneyleri yapılarak numunelerin yorulma dayanımları ile yorulma dayanım sınırı değerleri tespit edilmeye çalışılmış, Wöhler eğrileri çıkarılmıştır. Numunelerin SEM ve optik mikroskopta mikro yapıları incelenerek, EDS-analizleri alınarak sonuçlar desteklenmiştir.

Sabo olarak adlandırılan tren fren balatası numunelerinin de aynı yüklerde ve aynı koşullarda aşınma ve yorulma deneyleri yapılarak sonuçlar diyagramlarla, tablolarla ve mikroyapı fotoğraflarıyla desteklenerek üretici şirketlere önerilerde bulunulmuştur.

THE WEAR AND FATIGUE BEHAVIOUR INVESTIGATION OF FILLET WELDING AND BRAKES IN WHEEL TYRE-RAIL SYSTEM OF RAILWAY VEHICLES

SUMMARY

Keywords: Wear, Fatigue, Wheel/Rail Interactions, Fillet Welding

Steel wheels rolling on steel rails are the principal characteristic that distinguishes railways from other forms of transport. For effective and economical railway operation, important tribological issues must be addressed at the wheel/rail interface. Wheel and rail meet at a contact patch that is small and carries the full wheel load through which all steering, traction and braking forces are transmitted. This contact patch sees a severe working environment. Stresses normal to the plane of contact can reach values several times the wheel or rail tensile strength and sometimes shear stresses in the plane of contact can exceed the shear yield stress. Rapid temperature rises, caused by relative slip between the wheel and rail, can reach several hundred degrees Celsius in routine operation, and over 1000 °C in extreme circumstances.

These stress and temperature conditions inevitably lead to wear, deformation and damage to the wheels and rails and a major goal of railroads is to arrange service conditions and maintenance procedures to minimize deterioration and hence extend component life. This is important, because rails-and to lesser extent wheels- constitute a large part of a railroad's asset base. Railways have more money invested in rail than in any other asset. Extending the life of these components and especially that of the rail, has a major impact on railroad profitability.

An understanding of the tribology of the wheel/rail system is essential if wheel/rail life is to be extended. This system is complex and its behaviours depends on interactions between the materials (wheel, rail and any third body introduced, such as lubricant/debris mixtures) and environmental factors such as rain, snow, ice, etc. The material in and around the contact area is therefore highly stressed. High rates of wear might be expected for such a contact but, in addition, because the load is applied and removed many times during the passage of each train, there is the possibility of fatigue of the rail surface. The ideal material, which does not wear or suffer fatigue and yet is economically viable as a rail or wheel material, has not yet been found. However, service life extension of railroad components such as rail, wheel, wheel tyre and brake pads becomes an important achievement for engineers dealing with railways.

Therefore, the wear and fatigue behaviour investigations of rails, wheel tyres and brake pads were performed and occurred damages were characterized in this study. Then fillet welding operation was applied to worn surfaces of wheel tyres with two different electrodes by electric arc welding technique and by Gas Metal Arc welding method used in industry called Boden welding. After that wear and fatigue tests of specimens obtained from welded surfaces and joints were done. For wear tests, pin-on-disc testing method was used and the experiments were performed at four different loads as 10N, 20N, 30N and 40N with 1 m/s constant sliding speed. The total sliding distance was 3600 m for every experiment. In the light of results of wear experiments, coefficient of friction, weight loss (mg), volumetric loss (mm³) and specific wear rate (g/N.m) values of specimens were calculated and advices were submitted to users. In addition, fatigue strengths and endurance limits of specimens were tried to detect during the fatigue tests performed for 300, 400 and 500 MPa stress amplitudes.

SİMGELER LİSTESİ

ds_x/df_x	Doğrusal sürünme/Çekme katsayısı Oranı
s_x	Doğrusal Sürünme Katsayısı
f_x	Doğrusal Çekme Katsayısı
R_p/R_z	Maksimum Düzgünlük Derinliğinin Ortalama Pürüzlülüğe Oranı
ρ_0	Temas Sırasındaki Maksimum Basınç
a, b	Temas Yörüngesinin Yarı Eksenleri
x, y	Temasın Merkezinden Olan Koordinat Düzlemleri
WR	Aşınma Oranı
T	Teğet Kuvveti
A	Temas Alanı
T_{S_x}	Sürünme Sırasında Yayılan Enerji Miktarı
M_3	Çevrimsel Moment
ω_z	Açısal Hız
H_w	Tekerin Sertliği
H_r	Rayın Sertliği
S_w	Tekerin Metal Yapı Parametresi
S_r	Rayın Metal Yapı Parametresi
P	Yük
σ	Temas Basıncı
Π	Kayma Oranı
T°	Sıcaklık
V	Kayma Hızı
Ψ	Yüzey Durum Parametresi
N	Döngü Sayısı
σ_A	Akma Sınırı
σ_K	Çekme Dayanımı
σ_{eD}	Eğme Değişken Yorulma Dayanımı
σ_{min}	Minimum Gerilme
σ_{max}	Maksimum Gerilme

KISALTMALAR

UIC	Uluslararası Demiryolları Birliği
ORE	Araştırma ve Deney Ofisi
ERRI	Avrupa Demiryolları Araştırma Enstitüsü
EHL	Elasto-hidrokinamik Yağlama
ITAB	Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
IIW	Uluslararası Kaynak Enstitüsü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Yuvarlanmalı temasta malzeme ve sistem özelliklerinin sürünme/çekmeye etkisi.....	4
Şekil 2.1	Tekerlerin rayla teması.....	7
Şekil 2.2	Önemliyollarda kullanılan son ray kesitleri.....	10
Şekil 2.3	Bütün demiryolu sistemlerinde bir çelik ray ve üzerinde yuvarlanan çelik tekerbulunur	14
Şekil 2.4	Rayın aşınan bölgesi.....	17
Şekil 2.5	Tekerin geçişi sırasında raydaki açılmal bir çatlağın durumu.....	21
Şekil 3.1	Tipik bir S-N (Wöhler) eğrisi.....	40
Şekil 3.2	Sık rastlanan çentik etkileri: (a) ani kesit değişmesi, (b) delinmiş delik, (c) dik köşeli kama yuvası ve(d) dişli civata.....	42
Şekil 3.3.	Çekiçlemenin etkisi.....	44
Şekil 3.4	Kaynaklı birleşmede çentik etkisi: (a) enine alın kaynağında yorulma kırılması, (b) köşe kaynaklarında kenar ve kök kırılması.....	46
Şekil 3.5	Birinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) aşırı çalışma yüklemesi, (b) fena tasarım ve (c) tali takviye veya fittings.....	49
Şekil 3.6	İkinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) titreşim ve (b) korozif çevre.....	49
Şekil 3.7	Üçüncü grup yorulma kırılmalarına ait örnekler.....	50
Şekil 3.8	Çeşitli ortalama gerilme düzeyleriyle yorulma gerilimi çevrimleri.....	53
Şekil 3.9	Değiştirilmiş Goodman diyagramı.....	54
Şekil 4.1	Korozyon, darbe ve abrazyona maruz motor supaplarına uygulanan tipik dolgular.....	58
Şekil 4.2	Isınma sırasında dışbükey oluşum.....	59
Şekil 4.3	Soğuma sırasında içbükey oluşum.....	59
Şekil 4.4	Gaz kaynağı için deney parçası.....	74
Şekil 4.5	Ark kaynağı için deney parçası.....	74
Şekil 5.1.	Boden seviyesi ve bandajın tekere montajı.....	85
Şekil 5.2.	Temizlenmiş ve kaynak işlemine hazırlanmış numuneler.....	89
Şekil 5.3.	Bandaj numunesinin ön-tavlama.....	91
Şekil 5.4.	Ön-tavlamada kullanılan hamlaçlar.....	91
Şekil 5.5.	Kaynak yapılmış numuneler. (En sağdaki parçanın ilk hali).....	91
Şekil 5.6.	Dikişlerin yandan görünüşü.....	92
Şekil 5.7.	Doğru akımla yapılan dolgu kaynağı işleminde kullanılan redresör tipi kaynak makinesi.....	92
Şekil 5.8.	Dolgu kaynağı uygulanan doğrultular.....	93
Şekil 5.9.	Radyografik muayene raporu.....	95
Şekil 5.10.	Boden kaynak işlemlerinin yapıldığı sistem.....	96
Şekil 5.11.	Dolgu kaynaklı numunelerde sertlik alınan bölgeler.....	97
Şekil 5.12.	Aşınma ve yorulma numuneleri elde etmek için hazırlanan parçada sertlik alınan noktalar.....	97
Şekil 5.13.	X-ışınları analizi yapılan bölgeler.....	98
Şekil 5.14.	Aşınma cihazının şematik olarak önden görünüşü.dP; Pimin mesnet noktasına olan uzaklığını ve dN; Yükün mesnet noktasına olan uzaklığını göstermektedir.....	101
Şekil 5.15.	Aşınma cihazındaki yanal kuvvetlerin, F_t , hesaplanmasında kullanılan yük	

	transdüser arasındaki değişimi gösteren grafik.....	102
Şekil 5.16.	Aşınma deney cihazı.....	103
Şekil 5.17.	Kuru sürtünme koşullarında Bandaj numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	104
Şekil 5.18.	Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-A ile “xy-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 30 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	104
Şekil 5.19.	Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile “x-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 20 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı. Pasolar arası geçiş sürtünme mesafesi eğrisinin değişiminden anlaşılmaktadır.....	105
Şekil 5.20.	Kuru sürtünme koşullarında Kompozit sabo numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	105
Şekil 5.21.	Kuru sürtünme koşullarında dökme demir sabo numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	106
Şekil 5.22.	Yaş sürtünme koşullarında Bandaj numunesinin 30 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	106
Şekil 5.23.	Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-A ile “z-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 40 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	107
Şekil 5.24.	Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile “xy-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 40 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	107
Şekil 5.25.	Yaş sürtünme koşullarında Kompozit sabo numunesinin 20 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	108
Şekil 5.26.	Yaş sürtünme koşullarında Dökme demir sabo numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı.....	108
Şekil 5.27.	Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneyle 40 N'da yapılan aşınma deneyinde boyca azalma-Kayma mesafesi grafiği.....	109
Şekil 5.28.	Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneyle 40 N'da yapılan aşınma deneyinden elde edilen grafik.....	110
Şekil 5.29.	Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneyle 40 N'da yapılan aşınma deneyinden elde edilen Sürtünme Katsayısı-Kayma Mesafesi grafiği.....	110
Şekil 5.30	Yorulma deney cihazı	112
Şekil 5.31.	Alın kaynak pozisyonu ile kaynak edilmiş parça.....	113
Şekil 5.32.	Yorulma deney numunesi.....	113
Şekil 5.33.	(a) Karbon-karbon kompozit fren balatasının 30 N'da yapılan aşınma deneyinin sonrasında alınan yüzey pürüzlülüğü değerleri, (b) Elektrot-A ile “z-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılan numunenin disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrasında alınan yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	115
Şekil 6.1.	Elektrot-A ile kaynak yapılmış numunelerde sertliğin bölgelere göre değişimi.....	118
Şekil 6.2.	Elektrot-B ile kaynak yapılmış numunenin kaynaklı bölgesinde soldan sağa doğrultuda ölçülen sertlik değerlerinin gösterimi.....	119
Şekil 6.3.	Boden kaynaklı numunede sertliğin esas metalden dolgu kaynağı bölgesine doğru değişimi.....	120
Şekil 6.4.	Ray ve teker bandajının kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	121
Şekil 6.5.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	122
Şekil 6.6.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru	

	aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	124
Şekil 6.7.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	125
Şekil 6.8.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	125
Şekil 6.9.	Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	126
Şekil 6.10.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	127
Şekil 6.11.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	129
Şekil 6.12.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	130
Şekil 6.13.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	131
Şekil 6.14.	Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	131
Şekil 6.15.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.	132
Şekil 6.16.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	134
Şekil 6.17.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	135
Şekil 6.18.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.	135
Şekil 6.19.	Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	136
Şekil 6.20.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi...	137
Şekil 6.21.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	138
Şekil 6.22.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	139
Şekil 6.23.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi...	140
Şekil 6.24.	Ray ve teker bandajının yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	141
Şekil 6.25.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre	

	değişimi.....	142
Şekil 6.26.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	143
Şekil 6.27.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	144
Şekil 6.28.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	145
Şekil 6.29.	Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	146
Şekil 6.30.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	147
Şekil 6.31.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	148
Şekil 6.32.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	149
Şekil 6.33.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	150
Şekil 6.34.	Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	151
Şekil 6.35.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	152
Şekil 6.36.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	153
Şekil 6.37.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	154
Şekil 6.38.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	155
Şekil 6.39.	Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	156
Şekil 6.40.	Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi...	157
Şekil 6.41.	Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	158
Şekil 6.42.	Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.....	159
Şekil 6.43.	Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi....	160
Şekil 6.44.	Orijinal bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	163

Şekil 6.45.	Elektrot-A ile kaynak yapılmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	164
Şekil 6.46.	Elektrot-B ile kaynak yapılmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	165
Şekil 6.47.	Boden kaynak yöntemi ile hazırlanmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	166
Şekil 6.48.	Kullanılmamış dökme demir sabolardan hazırlanmış numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	167
Şekil 6.49.	Kullanılmamış kompozit sabolardan hazırlanmış numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	168
Şekil 6.50.	Numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı.....	169
Şekil 6.51.	Ray malzemesinin iç yapısı.....	170
Şekil 6.52.	Esas Metal (Bandaj) Perlitik-ferritik matriks.....	171
Şekil 6.53.	Esas Metal (Bandaj) Karbürler görülmektedir.....	171
Şekil 6.54.	Esas Metal – Kaynak arası geçiş bölgesi.....	171
Şekil 6.55.	Kaynaklı bölge.....	172
Şekil 6.56.	Kaynak Geçiş Bölgesi.....	172
Şekil 6.57.	Kaynaklı Bölgenin son pasosu (Kapak Paso).....	172
Şekil 6.58.	(a). Boden kaynağı ile yüzey dolgusu yapılan tellerin mikroyapıları, (b) x100 büyütmede.....	173
Şekil 6.59.	Pik demir fren balatasının mikroyapısı.....	173
Şekil 6.60	Boden kaynaklı numunelerin mikroyapıları.....	174
Şekil 6.61	Elektrot-A ile kaynak yapılan numunelerde kaynak bölgesi- Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve esas metal bölgelerinin değişimi.....	175
Şekil 6.62.	Elektrot-B ile kaynak yapılan numunelerde kaynak bölgesi- Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve esas metal bölgelerinin değişimi.....	175
Şekil 6.63.	Elektrot-A ile kaynak yapılan numunenin 400 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırık yüzeyde bir impurite (a ve b).....	176
Şekil 6.64.	Şekil 6.63'te görülen impuritenin EDS analizi.....	177
Şekil 6.65.	Boden kaynaklı yorulma numunesinin 400 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırık yüzeyinin görüntüsü.....	178
Şekil 6.66.	Aynı numunenin yüzey topografisi.....	178
Şekil 6.67.	Boden kaynaklı numunede 500 MPa'da yorulma kırıkları.....	178
Şekil 6.68.	Boden kaynaklı numunede 400 MPa gerilme genliğinde yapılan yorulma deneyinde kırılma yüzeyinin kenarından alınan SEM görüntüsü. Hasar sağ üst köşeden başlamış, orta bölgeye doğru ok yönünde ilerlemiş.....	179
Şekil 6.69.	C-C kompozit fren balatalarının mikroyapılarının SEM görüntüleri.....	180
Şekil 6.70.	C-C kompozit fren balatasının 30 MPa'lık gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	180
Şekil 6.71.	Karbon-karbon kompozit fren balatasının mikrografi.....	181
Şekil 6.72.	Şekil 6.71'deki mikrografın ortasından alınan çizgisel EDS-analizi sonuçları.....	181
Şekil 6.73.	Kuru sürtünme koşullarında ray malzemesinin 30N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	183
Şekil 6.74.	Kuru sürtünme koşullarında bandaj numunesinin 30N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	184

Şekil 6.75.	Yaş sürtünme koşullarında bandaj numunesinin 40N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	185
Şekil 6.76.	Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	186
Şekil 6.77.	Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-A ile xy-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	187
Şekil 6.78.	Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	188
Şekil 6.79.	Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	189
Şekil 6.80	Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	190
Şekil 6.81	Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 30N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	192
Şekil 6.82.	Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	193
Şekil 6.83	Kuru sürtünme koşullarında dökme demir fren balatası numunesi ile 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	194
Şekil 6.84.	Yaş sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 10N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	195
Şekil 6.85.	Kuru sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 30N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	196
Şekil 6.86.	Kaynaklı bölgenin kapak pasosundan alınan X-ışınları analizi.....	197

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1	Ray, yolcu tekeri ve çekici tekerinin tipik kimyasal ve sertlik değerleri.....	16
Tablo 3.1	Genel yapı çeliklerinin mekanik özellikleri.....	45
Tablo 4.1	Abrazif olarak kullanılan malzemeler.....	67

Tablo 4.2	Abrazyona dayanıklı malzemeler.....	68
Tablo 4.3	Yataklar için tavsiye edilen yumuşak malzemeler.....	68
Tablo 4.4	Sertlik deneyinde deney parçasının kaynağı için dolgu metali çapı.....	75
Tablo 5.1.	Ray Numunelerinin Spektrometrik Analiz Sonuçları.....	86
Tablo 5.2.	Bandaj Numunelerinin Spektrometrik Analiz Sonuçları.....	87
Tablo 5.3.	Dolgu kaynağı yapımında kullanılan elektrotların kimyasal kompozisyonları..	88
Tablo 5.4.	Kaynak bölgesinin kimyasal içerikleri.....	88
Tablo 5.5.	Karbon eşdeğeri ile ön-tav sıcaklığı arasındaki ilişki.....	90
Tablo 5.6.	Kaynaklı numunelerin farklı bölgelerindeki spektrometrik analiz sonuçları.....	93
Tablo 5.7.	Isının tesiri altındaki bölgeden (ITAB) alınan spektral analiz sonuçları.....	94
Tablo 5.8.	Boden kaynağında kullanılan özlü kaynak telinin spektrometrik analizi.....	96
Tablo 5.9.	Aşınma deneylerinde kullanılan disklerin kimyasal kompozisyonu.....	100
Tablo 5.10.	Yağmur suyunun kimyasal analizi.....	111
Tablo 6.1.	Ray ve teker bandajı numunelerinin sertlik değerleri.....	118
Tablo 6.2.	Kuru sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, ağırlıkça aşınma hızı, spesifik aşınma oranı, hacimsel azalma ve hacimsel azalma hızı değerleri.....	161
Tablo 6.3.	Yaş sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, ağırlıkça aşınma hızı, spesifik aşınma oranı, hacimsel azalma ve hacimsel azalma hızı değerleri.....	162
Tablo 6.4	Şekil 6.63'te verilen yapının kimyasal içeriği.....	177
Tablo 6.5	C-C kompozit fren balatasının kimyasal kompozisyonu.....	182

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Teker flanşları ile ray kenarları arasında meydana gelen aşınma önemli bir maliyet getirmektedir. Bu kaybı azaltmak demiryolu mühendislerinin amacıdır. Aşınan bir parçanın yenisiyle değiştirilmesi pahalı bir işlemdir, ayrıca demiryolu trafiğinin bir süreliğine kesilmesine neden olur. Tamir kaynağı teknikleri bunun yanında hızlı, basit ve ekonomik avantajları hayli fazla olan tekniklerdir [1-3]. 1970lerden beri çekicilerde tamir ve bakım işlerinde kaynak yönteminin kullanımının önem kazandığı, kaynaklı taşıtların sayısındaki artıştan anlaşılmaktadır [3].

Ray çeliklerinin büyük bir çoğunluğu % 0.7 C içeren neredeyse tamamen perlitik yapıda olan çeliklerdir. Bunlar yüksek pekleşme oranları nedeniyle demiryolu uygulamalarında özellikle tercih edilirler. Bununla beraber, servis ihtiyaçları arttıkça yeni özellikte çelikler ele alınmıştır. Bu alternatiflerin başında beynitik çelikler gelmektedir [4].

Bugün modern ulaşım sistemlerinde aksenal yükler ve hızlar oldukça artmıştır. Bunun sonucu olarak aşınmaya daha dayanımlı alaşımlar geliştirme gerekliliği doğmuştur, bu da aşınma mekanizmalarını iyi analiz etmeyi gerekli kılmaktadır. Ray bileşenleri arasındaki aşınmanın oluşumunu, malzemelerin mikroyapısıyla kullanım performansları arasındaki ilişkileri bilmek, tamir amacıyla kaynak yöntemini tasarlamada önemli ön-bilgiler elde etmemizi sağlayacaktır.

Tekerin ray üzerindeki hareketi yuvarlanmalı-kaymalı hareket olarak tarif edilebilir. Tekerin ve rayların sürtünme ve aşınmaları, çalışma sırasında karşılaşılan temas gerilmelerinin şiddetiyle doğru orantılıdır [1,5,6]. Adhezyondan dolayı raylarla tekerler arasında elastik-plastik deformasyon, kalıntı gerilmeler, pekleşme ve malzeme transferi oluşabilir. Esas malzeme kaybı muhtemelen; yüzey veya alt-yüzey çatlakları, teker ve ray arasında reaksiyon tabakalarının oluşumu ve bunların plastik deformasyona uğramaları yüzünden meydana gelir. Bu mekanizmalar arasında, yuvarlanma/kayma eylemi sırasında çevrimsel yorulmadan kaynaklanan alt-yüzey çatlakları en sık ve yaygın olarak görülenidir [7,8]. Tekrarlı yüklemelerden ve yüzeyler arasında yağlayıcı film olmamasından dolayı çatlak yüzeyde veya yüzeyin hemen altında başlar. Çatlakların başlangıcı, yapıda bulunan inklüzyon, impurite vb. yabancı katışkıların bulunmasıyla daha elverişli bir ortam bulur; bunlar ayrıca yüzeyde lokal biçimde gerilim artırıcı unsurlar olarak çatlak ilerlemesine olanak tanırırlar. Oluşan çatlak yüzeyden ana metale doğru ilerlemeye başlar. Yuvarlanma/kayma teması sırasında yapılan gerilme-şekil değiştirme analizlerine göre maksimum gerilme değeri

yüzeyin hemen altındadır [9,10] Sonrasında çatlaklar, bir plastik bölge içinde altlık malzemede oluşabilirler veya yüzeye paralel olarak yahut yüzeyi, oluşan küçük oyuklarda keserek ilerleyebilirler [11]. Yorulma çatlaklarının temeli, basma yüzeylerinde, 20-40 mm çapında oluşan sıcak yırtılmaların oluşumuyla atılır. Tren fren yaptığında bu yüzeylerde sıcaklık 300-400 °C'ye ulaşır, bu sıcak yırtılma havuzcuklarının sıcaklığı ise 1100 °C'lerden daha yüksektir. Bunlar oda sıcaklığına soğurken, iç yapıda hayli kırılğan martenzit yapısına dönme eğilimi gösterirler [12]. Bu sırada oluşan artık gerilmeler de yorulma çatlağı başlatır. Düşük karbon oranına sahip olan beynitik çelikler, perlitik çeliklere kıyasla bu duruma daha dayanıklılık gösterirler. Bunun nedeni sıcak yırtılmalarda oluşan martenzitin daha az gevrek olmasıdır [1,9,13-21].

Yorulma çatlamlarının yanı sıra, aşınma diğer pek çok mekanizmayla da meydana gelebilir [7,17,22-25]. Sürtünme katsayısının oldukça düşük olduğu düşük temas gerilmelerinde, sürekli oksit filmlerinin mekanik olarak kırılıp ayrılması yaygın olan bir aşınma mekanizması biçimidir. Bu ayrıca oksidatif aşınma olarak da bilinir ve malzeme kayıplarının esas olarak yüzeyde mangan-sülfür inklüzyonlarının yüksek oranda deformasyonu sonucu meydana gelir [26-28].

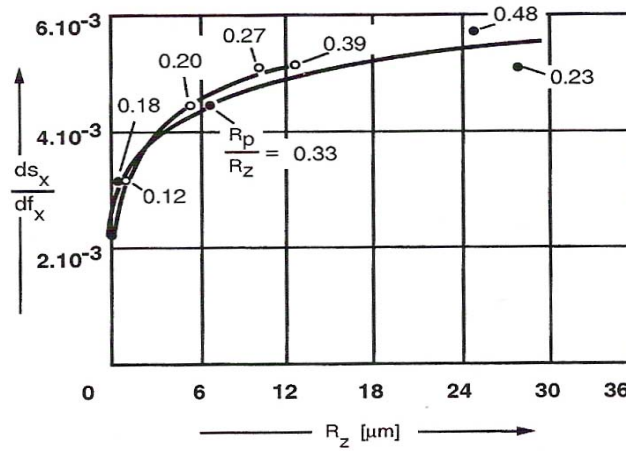
Kayma kırılmaları, özellikle yüzey-altı çatlaklarının oluşmasının güç olduğu yüksek lokal gerilmelerin varlığında meydana gelir. Bu yüksek gerilmeler esas metalde pekleşmeye neden olur. Daha yüksek lokal gerilmelerde malzeme yüzeyden kayar, pek çok çevrimsel yük nedeniyle kesme biçiminde bir hareketle aşınmaya neden olur. Bu tip bir aşınmanın karakteristik özellikleri uniform olmayan iz derinliği ve yüksek miktardaki malzeme kaybıdır. Deneyleri yapılmış perlitik alaşımlar arasında Cr içeren alaşımlar en yüksek aşınma dayanımı göstermişlerdir; bu durumun katı-çözelti sertleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [29,30].

Markov 1997 yılında yaptığı çalışmasında ray ve teker bandajı malzemelerinin laboratuvar koşullarında gerilim analizlerini yapmıştır [31]. Sertlik, basınç, kayma kayıpları ve hızı ve koşullarının sınır değerlerini tespit etmiştir. Bu çalışmaların, Danks ve Clayton [32] ile Rozeanu [31] tarafından yapılan ve teker bandajı-ray ikilisinin Amsler aşınma hızına kayma ve basıncın etkilerini araştıran çalışmalarla paralellikler içerdiği görülmüştür. Bunlar, rayın yüzeyinde ve teker flanş kenarlarında (ray ve tekerin yan tarafları) meydana gelen aşınmayı, oyuk ve yarıkların oluşumuyla ve yüzey topografisinde oluşan bozulmalarla açıklamışlardır.

Ohyama 1987 yılında yaptığı çalışmayla Hertz basıncı ve adhezyon katsayısının, yüzey pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olduğunu tespit etmiştir [33]. Adhezyon katsayısının artan Hertz

basıncıyla azalma eğilimi gösterdiğini bulmuştur. Genel olarak, kuru sürtünme koşullarında, sürtünme katsayısı yüklemeye kuvvetine bağlı değildir, bu Amontons-Coulomb kanunu olarak bilinir. Bununla beraber, Shaw 1960 yılında karbon çelikleriyle yaptığı deneylerin sonuçlarına dayanarak, Amontons ve Coulomb'un bulgularının düşük yüklemeler için geçerli olduğunu, daha yüksek yüklerde sürtünme katsayısı değerinin düşeceğini söylemiştir [34]. Ayrıca eski adı Araştırma ve Deney Ofisi (ORE) olan, 1978 yılından beri ise Avrupa Demiryolları Araştırma Enstitüsü olarak bilinen ERRI, aks yükleri arttığında adhezyon katsayısının nasıl düşeceğini tanımlamıştır, bununla beraber kuru sürtünme koşullarında yüzey pürüzlülüğünün adhezyon katsayısına etkisi çok açık ve belirgin olarak bildirilmemiştir.

Krause ve Poll 1982 yılında yaptıkları bir çalışmada [34], başlangıçtaki doğrusal sürünme ve çekme katsayılarının oranı, ds_x/df_x ile ortalama yüzey pürüzlülüğü, R_z ve R_p/R_z parametreleri arasında bir ilişki kurmuş, bunu aşağıda Şekil 1.1'deki gibi grafiğe uyarlamıştır. Burada; s_x doğrusal sürünme katsayısı, f_x , doğrusal çekme katsayısı, R_p/R_z ise maksimum düzgünlük derinliğinin ortalama pürüzlülüğe oranıdır.



Şekil 1.1. Yuvarlanmalı temasta malzeme ve sistem özelliklerinin sürünme/çekmeye etkisi [34]

R_z 'nin artan değerleriyle, yüksek sürünme oranlarında, sürtünme kuvvetinin belirgin bir artış içine girme eğiliminde olduğu görülür ki bu da Ohyama'nın çalışmasıyla örtüşmektedir [33].

Trenin hareketi sırasında tekerlerle ray arasında sadece kuru koşullarda sürtünme olmaz, yağışlı hava şartları meydana gelen aşınmanın ve elde edilen adhezyon katsayılarının büyüklüğünü ve biçimini değiştirir. Çünkü demiryolu sistemi atmosfere açık bir sistemdir, bundan dolayı şartları değiştirebilecek pek çok faktör vardır. Bunlar sıcaklık değişimlerini ve su kaynağını (yağmur, kar

ve buz) içine alır. Yağmur yağışı sırasında rayların üzerine düşen su miktarının büyüklüğü bile sonuçları etkileyebilecektir; çünkü deneyimler göstermiştir ki hafif yağan yağmur mükemmel bir yağlayıcıdır; halbuki, şiddetli yağmur altında raylar temizlenirler, çelik-çelik teması yeterince büyük olur, bu da yüksek adhezyon değerleri elde edilmesine neden olur, trenin raya iyi tutunması beklenir. Bununla beraber, elde edilen verilerde genel eğilim, tren hızının artmasıyla adhezyon katsayısının düştüğü şeklindedir. Bu konuda Japonya’da Shinkansen hattında hızlı trenlerle, ıslak koşullarda deneyler yapılmış, 270 km/saat hızlara kadar, artan tren hızıyla adhezyon katsayısının düştüğü görülmüştür [34]. Bu gerçek saha çalışmasıyla, yukarıda bahsedilen Ohyama ve Maruyama [34] ile Krause ve Poll’ün laboratuvar ölçekli çalışmaları birbirine paralellik göstermektedir.

Johnson 1970 yılında elasto-hidrokinamik yağlama (EHL) teorisini ortaya atmıştır [34]. Ohyama ise daha sonraları Johnson’un bu teorisine odaklanmış, elasto-hidrokinamik yağlayıcı rejimini tespit ederek bu teorinin teker ve ray arasındaki suyun yağlayıcılığı olayına uygulanabilirliği ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Ardından yine EHL teorisini kullanarak Chen ve arkadaşları 1998’de, su sıcaklığının bir fonksiyonu olarak yuvarlanma hızının ve basıncının su-film kalınlığına etkilerini araştırmışlardır [34]. 800 MPa’lık bir Hertz basıncı için su-film kalınlığı, artan yuvarlanma hızıyla birlikte artar. Su sıcaklığındaki düşüş de su-film kalınlığını artırmıştır. Temel EHL teorisini kullanarak yapılan sayısal hesaplamalar, su-yaglması koşulları için adhezyon katsayılarının tahmin edilebilmesine olanak tanıyacaktır. Yuvarlanma hızının artmasıyla adhezyon katsayısı düşmeye başlayacak ve su-film kalınlığı artmaya başlayacaktır, dolayısıyla bu da gerçek temas alanının azalmasına yol açacaktır.

Endüstriyel uygulamalarda statik zorlamalara nadiren rastlanır. Makinalara ve makine parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile eğme ve burma momentleri etki ederler. Değişen zorlamalardan dolayı kırılma, söz konusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir [35].

Tasarım mühendisleri malzemelerin ekonomik olarak kullanımını dikkate almak zorundadırlar. Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilebilmesi ile malzeme değişikliğine gitmeden de makine ve yapı elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme sırasında makine parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlamıştır. Bu gözlemlere dayanarak kısa bir süre

sonra yüklerin ve momentlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin söz konusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemede yetersiz kaldığı anlaşılmıştır [36].

Böylece bütün bu deneyimler yorulma dayanımı kavramının doğmasına neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının, statik dayanım değerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır [37].

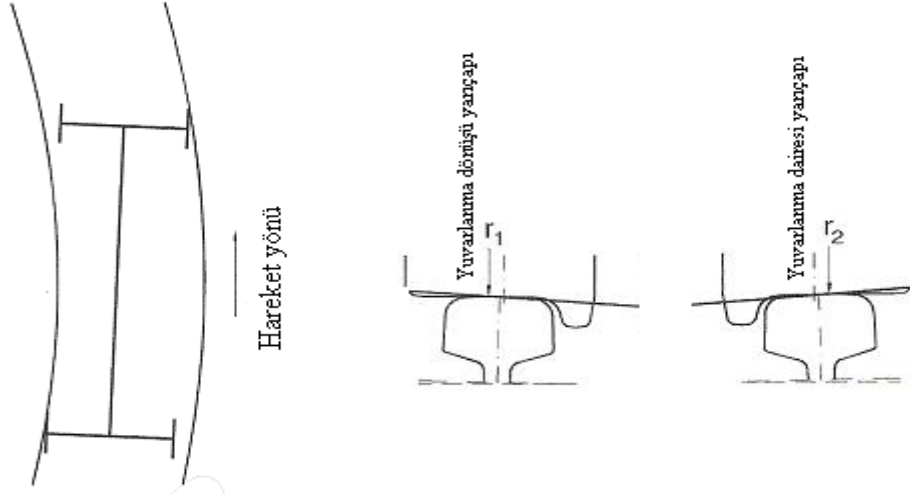
Yorulma dayanımı deyiminden düzgün veya çentikli parçalarda, belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliği anlaşılır [38]. Kabul edilebilir şekil değiştirmenin miktarı yorulma deneyinin yapıldığı şartlara veya deney malzemesine bağlıdır.

Raylı taşıtlarda teker bandajı-ray sisteminde tamir amacıyla yapılan dolgu kaynağının aşınma özelliklerinin belirlenmesi hedeflenerek bu tez çalışmasına başlanmıştır; daha sonra dolgu yapılan bu kaynaklı bağlantılarda tekrarlı yüklemelerden dolayı (özellikle frenleme anlarında) bir yorulma olayının olabileceği ve de meydana gelen teker parçalanmalarının yorulma çatlaklarının bir sonucu olabileceği olasılığından hareketle yorulma deneyleri yapılması ve bunun da tez kapsamında ele alınması kararlaştırılmıştır.

BÖLÜM 2. DEMİRYOLLARI, RAY, TEKER BANDAĞI VE FREN SİSTEMİ

Bir yerden bir yere madeni bir yol üzerinde mekanik bir güçle hareket ettirilen araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin hepsine birden “demiryolu” denir. Demiryollarını karayollarından ayıran farkların başında arabaların takip ettikleri izin sabit olması gelir. Karayolunda tekerlekle yol arasındaki sürtünme direnci büyük olduğu için arabanın yana kayması sıfır sürtünme direnci ile önlenemez. Ayrıca yol da çok geniştir. Demiryolunda durum tamamen farklıdır. Tekerlekler, genişlikleri 6 cm civarında bulunan rayla üzerinde yuvarlanmak

durumundadırlar. Dingillerin sabit doğrultuda oluşu ve şeridin çok dar olması nedeniyle bu zorunluluk sırf sürtünme direnci ile sağlanamaz. Bu nedenle tekerler, iç taraflarda Şekil-2.1'deki gibi Boden denilen çıkıntılar içerirler. 3 cm yüksekliğinde, 4 cm genişliğinde olan bu çıkıntı tren 160-250 km/saat hızlarda gitse bile yoldan çıkmaya (dray) karşı güvenlidir. İşte takip edilen bu yolun tamamen belirli oluşu, matematiksel deyişle, hareketin verilen bir eğri üzerinde olması, demiryolunun en başta gelen karakteristiğidir [39,40].



Şekil 2.1. Tekerlerin rayla teması [41]

2.1. Mantar

Tekerlek ile doğrudan doğruya temasta bulunan mantar, yuvarlanma yüzeyinin bombeliği, genişliği, yüksekliği ve yanakların eğimi ile belirlenir ve şu özelliklerde olmalıdır [39]:

1. Tekerleğin raya oturduğu noktanın, eksen üzerinde bulunmaması sebebiyle bombeliğin, sadece temas noktasında değil, bütün ray kesitinde, oluşan olan gerilmelerin dağılışı üzerinde önemli etkileri vardır. Genel olarak bombelik yarıçapı 200 ile 500 mm arasında değişir.
2. Mantarın genişliği, tekerlerin dar bir bölgede gerilme yığılmalarına neden olmayacak, yüklerin etkisiyle, yuvarlanma yüzeyinde meydana gelecek eğilme ve maden kaymalarının azalmasını sağlayacak ve mantarla gövde arasındaki bağlantıyı uygun bir tarzda sağlayacak

şekilde olmalıdır. Deneyimler, mantar genişliğinin 60–70 mm olmasının uygun bulunduğunu göstermiştir.

3. Raydan uzun müddet faydalanmayı sağlaması bakımından, mantar yüksekliği ile limit aşınma arasında yeteri kadar bir fark bulunmalıdır. Yuvarlanma yüzeyinde düşey aşınması genel olarak 150–200 bin tren/mm, daha doğrusu 40 milyon brüt ton/mm hızı ile meydana gelir. Gerek bu hızın düşük olması, gerekse daha yüksek olması, gerekse daha yüksek mantarın haddeden çıkan sıcak rayın, soğuması esnasında, içsel deformasyonlara yol açması sebebiyle mantar yüksekliği genel olarak 50 mm dir. Bununla beraber, aşınmaların normalden daha hızlı olduğu bazı rutubetli tünellerde mantar yüksekliği 60 mm olan ağır raylar kullanılmaktadır.
4. Ray ile bodenin temas ettiği alanın geniş olması, rayın yanal aşınmalarını azaltacağından yanakların 1/20 eğiminde yapılması, dolayısıyla ray yuvalarının büyütülmesi faydalıdır.
5. Mantarı tabana bağlayan gövde, kalınlığı, ray yuvalarının eğimi ve gerek tabana, gerekse mantara bitiştiği kısımlardaki bağlantı yüzeyleriyle belirtilir.
6. Kesme kuvvetlerinin bulunduğu, gövdede bilhassa ray delikleri civarında, yüksek gerilmeler meydana gelir. Kalınlık zamanla meydana gelecek korozyon tesiriyle zayıflamalara rağmen kesitin, bu gerilmeleri karşılayabileceği tarzda ve ray delikleri civarında çatlamlar meydana gelmeyecek şekilde seçilmelidir. Bu durumlar düşünülerek, yeni profillerde gövde kalınlığı en az 15 mm olarak tespit edilmiştir.
7. Contaların yerleşimi ve bakımı yönünden ray yuvaları eğimi büyük bir öneme sahiptir. Eğimin fazla örneğin, ½ olması halinde aşınma sebebiyle sıkıştırılması gerekince, rayların birbirine kıyasla az miktarda yaklaşmalarına karşın, bunları açmaya zorlayan kuvvet dolayısıyla bulonlardaki çekme gerilmeleri çok büyük olur. Yuvaların eğimi az olursa, bulonların maruz kalacağı kuvvet azalır, bu nedenle aşınmayı karşılamak için rayların hareket sahası büyür. Bu ise rayların rijitliği ve üniform aşınmamaları sebebiyle conta bakımı esnasında bir hayli zorluk çıkarır.
8. Özellikle trafiğin çok ve ağır bulunduğu hatlarda, bağlantı yüzeyleri rayın en önemli kısımlarından biridir. Amerikan Demiryollarında rayların bu kısımlarında çok sayıda

çatlamlar meydana gelmesi sonucunda, foto-elastisite metotlarıyla yapılan araştırmalardan, sebebin mantara binen yüklerin eksantrisiteden dolayı meydana gelen gerilme yığılması olduğu anlaşılmıştır. Bunun üzerine bağlantı yüzeylerinde kullanılan birleştirme eğrileri yarıçapları arttırılarak 7–8 mm den 19 mm ye çıkarılmıştır. Ray yuvalarının genişliğini azaltan bu değişikliğin ancak dingil basıncı 30–35 ton olan hatlarda gerekli olduğu bildirilmiştir [39].

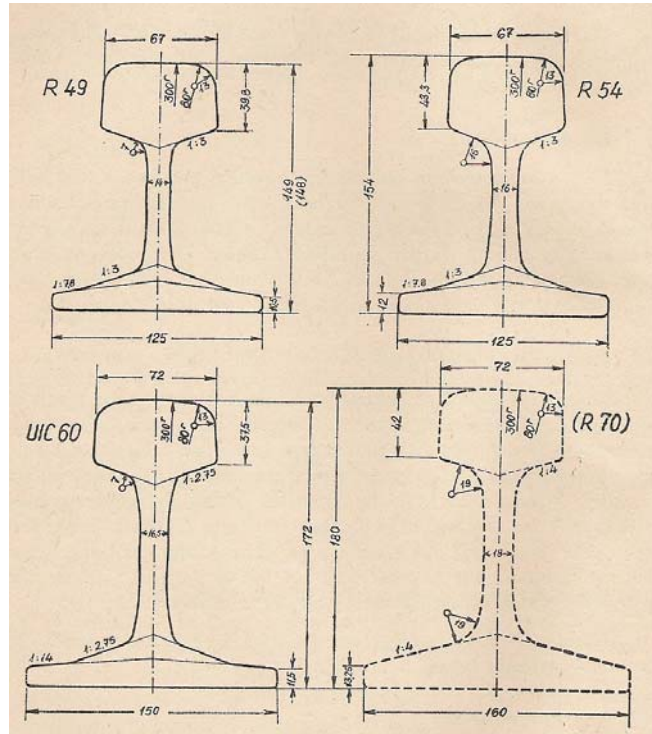
2.2. Ray Tabanı

Rayın tabanı; genişliği, kalınlığı ve şekli ile tanınır. Tabanın genişliği, rayın traverse sağlamca oturmasını ve devrilmeye karşı stabilitesini sağlar. Geniş bir tabandan traverse ulaşan gerilmeler az olacağından, traversler daha az yorulur.

Bununla beraber, gerek haddeleme tekniği, gerekse rayların küçük kurlara (virajlara) uyumunu sağlayabilmek için yanal doğrultudaki mukavemet momentinin belli bir değerden daha büyük yapılmaması için, taban belli bir değerden daha geniş yapılamaz. 50 kg/m'lik tipleşmiş raylarda ray yüksekliğinin, taban genişliğine oranı 1.10 olarak tespit edilmiştir. Taban kalınlığı ve kollarının şekli haddeleme olanakları ve tabanla mantar arasındaki denge ve yıpranma sebebiyle meydana gelecek zayıflama düşünülerek belirlenir. Mantar, gövde ve tabana ait olan bu özelliklerden başka rayın kesiti aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır [39]:

1. Düşey yüklere karşı mukavemet momenti büyük olmalı, taban ve mantarların kesit alanı, gövdeye nazaran daha büyük olmalıdır.

2. Ray kesitinin ağırlık merkezi, yüksekliğin yarısı civarında bulunmalıdır.



Şekil 2.2. Önemli yollarda kullanılan son ray kesitleri [39]

Ray profili düşünülürken statik değerler ile yetinmek doğru bir çözüm olmaz. Tekerleklerden gelen conta vuruntularının etkisi de göz önüne alınmalıdır. Hartwick tarafından, sırf bir kiriş gibi düşünülerek yapılan yüksek ray, rijitliği dolayısıyla elastisitesi sağlamaması, gerek üst yapı gerekse arabalar için tahrip etkiler meydana getirdiğinden rağbet görmemiştir [39].

Ray kesitinin istenildiği kadar büyütülemeden, taşıma gücünü artırarak, daha ağır taşıtları büyük hızlar ile işletmek ihtiyacı, demiryolcuları, ray özelliklerinin yükseltilmesi konusuna itmiştir. Özellikle Amerika'da, dingil basınçlarının 30–35 tona yükselmiş olması, aslında büyük ray profilleri (75–80 kg/m) kullanılması, bu durumun doğmasına yol açmıştır. Bu nedenle, kopma mukavemeti yüksek çelik daha büyük gerilmelere dayanabileceğinden kesiti büyütmeden gelen yükleri karşılamak mümkün olur.

Bu çözümün de bazı dezavantajları olduğu ve belli bir limiti aşamayacağı anlaşılmıştır. Şöyle ki:

1. Rayla bandaj devamlı temas halinde olduklarından, birbirlerini sürekli aşındırmaktadırlar. Rayın yüksek mukavemetli olması bandajın fazlaca aşınmasına sebep olur. Oysa ki amaç sadece rayın aşınmasının önlemek değil, ray ve bandajın beraber aşınmalarının minimum olmasıdır.

2. Ray mukavemetinin yükseltilmesi çeliğin kimyasal bileşimini değiştirmekle, karbon miktarını yükseltip ayrıca manganez karıştırmak ile sağlanmaktadır. Bu ise çelikte kopma uzamasının azalmasına, rayın daha gevrek olmasına yol açar. Raydan istenen kopma ve aşınma mukavemetinin yüksek olması kadar kopma uzamasının da belli bir değerden daha fazla olmamasıdır.

2.3. Rayların Kimyasal Bileşimleri

Ray çeliğinin bileşiminde demirden başka karbon, silis ve manganezin belli miktarda bulunması, rayı daha mukavemetli yapması sebebiyle faydalıdır. Fosfor ve kükürt ise çelik bünyesinden tamamen çıkarılamayan zararlı elementlerdir [39].

Çelik içinde karbon bulunması, mukavemeti arttırırsa da malzemenin daha kırılğan olmasına neden olur. Bu bakımdan çeliğin üretildiği sisteme göre içinde bulunması gereken karbon miktarı % 0.37–0.60 arasındadır.

Silisyum çeliğin oksidasyonunu zorlaştıran bir elementtir; ayrıca malzemenin daha akıcı, yoğun ve ince taneli, homojen olmasını sağlar. Rayın türüne göre miktarı % 0.30-0.50 arasında değişir.

Pahalı bir malzeme olan manganez, çeliği sert ve mukavemetli yapar, genel olarak ray çeliğinin içinde bulunan karbonun 2-3 katı miktarlarında bulunur. Buna göre raylarda mangan içeriği yaklaşık olarak % 0.70-0.21 arasındadır.

Fosfor çeliğin daha sert olmasını sağlamasına rağmen, elastikiyetin azalmasında, karbondan daha etkilidir. Bu sebeple, rayın cinsine göre % 0.03-0.08'den daha fazla olmaması istenir.

Ray üretilecek çelikte kükürtün bulunması istenmez. Bununla beraber, tamamen çıkarılmasındaki zorluk nedeniyle en fazla % 0.03-0.06 miktarında bulunması gerekir.

2.4. Teker Bandajı-Ray Etkileşimleri

Demiryolu taşımacılığı bugünkü haline gelmeden çok önce basit ve karmaşadan uzaktı. İlk kez 1767 yılında demir raylar kullanılmaya başlanmıştır. 19. yüzyılın başlarında ise demiryolu taşımacılığı mekanik olarak yapılmaya ve gelişmeye başlamıştır. Bunda o dönemde her yerde

yaygın olarak kullanılmaya başlayan buhar makinelerinin geliştirilmesi ve taşıtlara uygulanması etkili olmuştur. Makine tasarımı başlangıçta sabit buhar makineleri içine yerleştirilen yürütücü silindirlere esinlenilerek yapılmıştır. Bununla beraber, zaman içinde tasarımlar demiryolu ulaşımının ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde geliştirilmiştir. Lokomotif ve vagonların üzerinde yürümelerini sağlayan çelik çubuklara ray denir. Günümüzde kullanılan geniş tabanlı ray 1832 yılında Amerikalı Stevans tarafından yapılmıştır [34].

Son yıllarda şebekelerde dizel ve elektrikli lokomotiflerin çalışmaya başlaması ile dar yarıçaplı kurplarda (virajlarda) ray aşınmaları önemli bir şekilde hızlanmış bulunmaktadır. Bunun nedeni lokomotif bandajlarının, ray çeliğine oranla vagon bandajlarından daha sert olmasıdır. Raylarda görülen aşınma şu nedenlerden kaynaklanmış olabilir:

1. Ray çeliğinin sertliğinin düşük olması,
2. Rampalardaki fren ve patinajın etkisi,
3. Bu patinajı önlemek için dökülen kum,
4. Kurplardaki yapısal hatalar,
5. Yoldaki eğimli veya düz düşükler,
6. Doğru yolda her iki rayın aynı seviyede olmaması,
7. Tren hızlarının kurplardaki dever ve fleşlere uymaması,
8. Aşırı dingil basıncı.

1800lerin ortalarında ray ve teker, bugün de kullanılan biçimine yakın bir formda üretilip kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzyılın sonlarına doğru ise Hertz, teker ile ray arasındaki temasın ilk bilimsel ifadesini ortaya koymuştur. Üç boyutlu eğri biçimindeki yapılar arasında Hertz temasları meydana gelir, bunlar elips biçimli bir basınç dağılımı gösterirler. Bu dağılım aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir [34]:

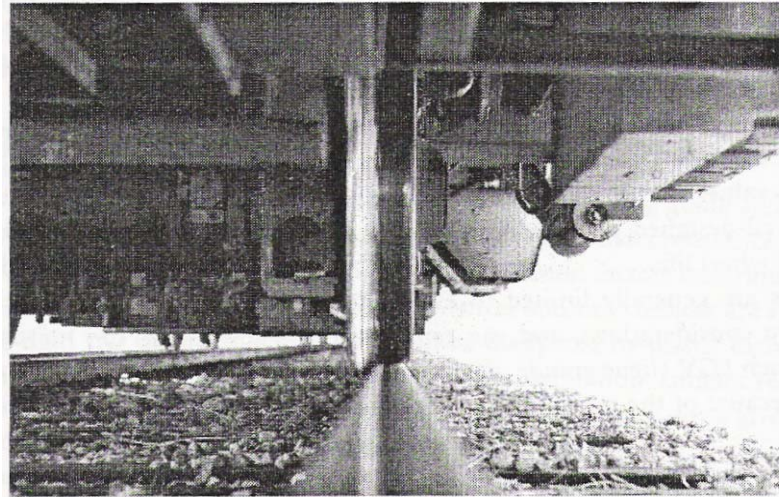
$$\rho = \rho_0 (1 - x^2/a^2 - y^2/b^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada ρ_0 , temas sırasındaki maksimum basınç, a ve b temas yörüngesinin yarı-eksenleri, x ve y de temasın merkezinden olan koordinat düzlemleridir. Bazı ilavelerle beraber bu teori günümüzde de hala kullanılmaktadır.

Çeliğin ray malzemesi olarak demir yerine tercih edilmeye başlanmasıyla teker/ray sisteminde çok önemli bir değişiklik yaşanmamıştır. Fakat bu, sistemin ideal olduğu anlamına gelmez. Bir vagonu sekiz adet teker desteklemekte olup bu sistemin ağırlıkları 30 tondan 140 tona kadar olabilir. Malzemenin içinde ve çevresinde bundan dolayı oldukça yüksek gerilim mevcuttur. Böyle bir temasta şiddetli aşınma kayıpları beklentisi yanında, her trenin gelip geçişi sırasında yük uygulanıp kalkması ve bunun tekrarlanması sonucu ray yüzeylerinde yorulma hasarı olasılığı da artmaktadır. İdeal olarak aşınmaya maruz kalmayacak hem de yorulma hasarına karşı koyabilecek bir ray ve teker malzemesi henüz bulunamamıştır.

Tren sabit duruyor konumda iken statik yükler temas yörüngesinde etkilidir. Dinamik yükler ise daha yüksek değerlerde olup ray birleşim yerlerinde, dönemeçlerde (kurup) etkili olmakta, dikey ivmelenmeyle 1000m/s^2 değerlerine erişebilmektedirler. Bu teker/ray ara yüzeyinin yüksek rijitlik değerine sahip olmasının bir sonucudur. Çekici ve tekerin kullanım ömürlerinin uzatılması açısından bu darbeli yüklerin minimize edilmesi, bunun için de iyi tasarlanmış süspansiyonların uygulanması gerekmektedir [42].

Çelik raylar üzerinde yuvarlanmalı hareket yapan çelik tekerler, demiryolu taşımacılığını diğer ulaşım türlerinden ayırmaktadır. Şekil 2.3'te bir teker ve üzerinde gittiği ray görülmektedir.



Şekil 2.3: Bütün demiryolu sistemlerinde bir çelik ray ve üzerinde yuvarlanan çelik teker bulunur [34]

Teker ve ray küçük ama tekerin bütün ağırlığını taşıyan bir temas alanında karşılaşırlar. Bu alanda bütün yürütücü, çekici ve frenleyici kuvvetler iletilir; çünkü burası ağır çalışma şartları altında kalan bir bölgedir. Temas alanına dik doğrultudaki gerilmeler, tekerin veya rayın çekme ve bazen de

kayma gerilmelerinin birkaç kat üzerine çıkabilir. Teker ve ray arasındaki göreceli kayma hareketinden kaynaklanan sıcaklık artışları birkaç yüz dereceler mertebesine çıkabilmekte hatta bazı istisnai durumlarda 1000 °C'yi geçebilmektedirler [1,12,24,34,43].

Bu gerilme ve sıcaklık koşulları teker ve rayda, aşınma, deformasyon ve hasarın oluşmasını kaçınılmaz kılmaktadır; dolayısıyla bu bozulmaların en aza indirgenmesi, parça ömürlerinin artırılması için servis koşulları ve bakım prosedürleri yeniden gözden geçirilmelidir. Bu önemlidir çünkü tekerler, daha da önemlisi raylar demiryolu maliyetlerinin en önemli kısmıdır. Diğer önemli bir husus da teker/ray sisteminin tribolojisini anlamaktır. Bu sistem karmaşıktır ve bu sistemin davranışı teker, ray ve herhangi bir yağlayıcı, aşınma ürünleri veya bunların karışımı gibi üçüncü bir unsur arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Ayrıca bunların haricinde taşıtın ağırlığı, taşıt/çekici etkileşimi, teker, ray profili, teker/ray adhezyonu ve hızı gibi faktörlerde teker ray sisteminin aşınma davranışlarına etki eder [9,44,45].

Trenin yuvarlanma hareketine karşı koyan birçok bileşeni vardır. Bunlar ivmelenme direnci, aerodinamik ve rüzgar sürüklenmesi, dayanma direnci ve teker/ray temas direncidir. Bunlar içinde sadece teker/ray direnci seçilen malzemenin türü ile etkilenir. Teker/ray temas dayanımına çeşitli faktörler etki eder. Birincisi, yuvarlanma sırasında teker ve ray yüzeyleri birbirlerini elastik olarak saptırır ve birbirlerine karşı göreceli hareket meydana getirir. İkincisi, enerji plastik deformasyon ile dağıtılır. Üçüncü olarak yüzey adhezyonu olgusu enerjiiyi yok edebilir. Bir yaklaşım yapmak gerekirse, temas direncinin temas yolunun uzunluğu ile doğru orantılı olduğu ve bundan dolayı verilen bir geometride direncin minimize edilmesi için temas alanının küçük tutulması gerektiği söylenebilir. Bunun içinde yüksek elastik modüle sahip malzemeler seçilmelidir. Yaygın olarak bulunan ve pahalı olmayan metaller arasında çelik en yüksek elastik modüle sahip malzemelerden bir tanesidir. Mukavemet, süneklik ve aşınma dayanımına sahip olması nedeniyle dünya genelinde bütün tekerler ve raylar yalın karbon-mangan içeren perlitik çeliklerden üretilir. Bu çeliklerde demir ve demir karbür lamelli yapıda birbiri üzerinde sıralanır. Tablo 2.1'de tipik yolcu vagon tekerlerinin ve çekici tekerlerinin kimyasal içerikleri ve sertlik değerleri verilmiştir. Genel olarak, yolcu vagon tekerleri ağır akslı çekici tekerlerine göre daha düşük karbon içeriğine ve sertlik değerine sahiptirler. 300 brinell sertlik değerine sahip çelikler çekicilerin üzerinde gittiği rayların yapımında kullanılırken, 340–390 brinell sertlik değerlerine sahip çelikler gerilim ortamının daha yoğun olduğu virajlı, eğimli yol güzergâhlarında kullanılırlar. Beynitik ve martenzitik çelikler gibi daha yüksek sertlik değerlerine sahip malzemeler ile ilgili çalışmalar yapılmış olmasına rağmen çok az malzeme perlitik çelikler gibi iyi aşınma davranışı sağlamıştır [34,46-48].

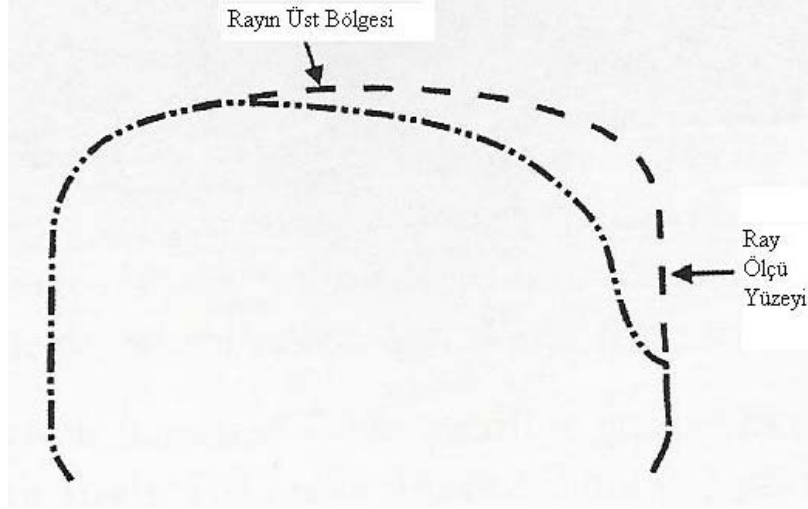
Tablo 2.1. Ray, yolcu tekeri ve çekici tekerinin tipik kimyasal ve sertlik değerleri [34]

		C (ağırlıkça%)	Mn (ağırlıkça%)	S (ağırlıkça%)	P (ağırlıkça%)	Sertlik (Brinell)
Ray	Standart	0.75	0.90	0.02	0.02	290
	Sertleştirilmiş	0.75	0.90	0.02	0.02	370
Yolcu Teker	Standart	0.50	0.80	0.04 maks.	0.04 maks.	260
	Sertleştirilmiş	0.55	0.80	0.04 maks.	0.04 maks.	270
Çekici Teker	Standart	0.62	0.72	0.05 maks.	0.05 maks.	300
	Sertleştirilmiş	0.72	0.72	0.05 maks.	0.05 maks.	340

Demiryolu sistemlerinde taşıtın hareketi yönünde, teker/ray temas bölgesinde etki eden kuvvete çekme kuvveti veya frenleme kuvveti adı verilir. Çekme kuvvetinin uygulanan normal yüke bölünmesiyle “çekme katsayısı” elde edilir. Çekme katsayısının değişimi ile Johnson ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalar sonucu, tekerin kaymalı hareketiyle birlikte çekme katsayısının arttığı tespit edilmiştir [34]. Demiryolu taşımacılığında çekme katsayısının maksimum değerine “adhezyon katsayısı” adı verilmektedir. Adhezyon katsayısı, bir taşıtın frenleme performansını tahmin etmede kullanılır; dolayısıyla çelik tekerlerle çelik raylar arasında oluşan adhezyon olgusunu tanımlamada yararlıdır. Raylar üzerine düşen yağmur, kar, buz ve yaprak yığınları, adhezyon seviyelerini güvenli ivmelenme ve frenleme için gerekli limitlerin altına indirirler. Frenleme anındaki kayma, daha uzun durma mesafeleri doğurur. İvmelenme hareketi sırasında teker-kaymasının yüksek seviyelerde olması ise ray yüzeyinde kazınmalara, lokal abrazyona ve hatta rayların kırılma riskinin oluşmasına neden olur. Bundan dolayı ray yüzeyleri mekanik olarak çalışan fırçalarla, su jetiyle ve yüksek basınçlı havayla temizlenirler [34,47,49-51]. İvmelenme sırasında rayın zarar görmemesi için ise rayların üzerine kum serpiştirilmektedir, bu kumun, teker bandajı-ray adhezyonunun artırırken yüzeylere de hasar vermeyecek tane boyutunda olması gerekmektedir. Hafif raylı sistemlerde frenleme amacıyla manyetik fren diskleri güvenle kullanılmaktadır. Bu fren sisteminde balatalar kalıcı magnetiklenmeyle ray yüzeylerine bastırılır, yüksek düzeyde sürtünme sağlandığı için güvenli mesafede durma sağlanır.

2.5. Teker Bandajı-Ray Arasındaki Temastan Kaynaklanan Aşınma

Demiryollarında rayların yenileriyle değiştirilmesinin ana nedeni ray aşınmalarıdır. Aşınma yoğun olarak rayın yüksekte kalan kısımlarında görülür. Burası Şekil 2.4'te görüldüğü gibi teker flanşıyla temas eden bölgedir.



Şekil 2.4. Rayın aşınan bölgesi [34]

Düz ray yollarında ve geniş eğrilik yarıçapına sahip demiryollarında kafa bölgesinin dikey doğrultuda aşındığı görülür. Eğer ray aşınmaları şiddetli boyutta ise, raylardaki özellikle de kafa bölgesindeki gerilme artar, rayların değiştirilmesi gerekir. Bütün demiryolu hatlarının ray değişimi için kendilerine özgü değişim kriterleri vardır; fakat genellikle kafa alanının % 30-50 arasında bir bölgesi aşınmaya uğradığında raylar yenileriyle değiştirilir.

Teker bandajları için durum daha farklıdır; bunlar aşınmaya uğradıklarında tornadan geçirilerek yeniden eski profillerine getirilebilirler. Bu işlem, teker flanşları çok ince olsa bile başarılı bir biçimde yapılır. Eğer tekerlerdeki aşınmanın miktarı, sürüş güvenliğini zorlaştıracak düzeye gelmişse de tornalama işlemi uygulanır. Raylarda olduğu gibi tekerlerde de, gerilme miktarı kabul edilebilir değerlerin üzerine çıkmışsa tekerler kullanımdan çekilir [34,48].

2.5.1. Teker-Ray Aşınma Mekanizmaları

Aşınma birkaç hasar mekanizmasını kapsayabilen karmaşık bir olgudur. Adhezyon, abrazyon ve yorulma, tekerle ray arasındaki aşınmaya neden olan mekanizmalardır; yüzey gerilmeleri kümülatif bir plastik deformasyona neden olurlar. Bir müddet sonra malzeme deformasyona daha fazla dayanamaz, sünekliği kaybolur ve ince aşınma partikülleri oluşur [14,52].

Bu farklı mekanizmalardan hangisinin aşınma olayında tek başına etkili olduğu bilinemesi de; bazı küçük-ölçekli, kuru sürtünme koşullarında yuvarlanma/kayma eylemi içeren şartlarda aşınma deneyleri gerçekleştirilerek aşınma prosesi hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu konuda 20. yüzyılın başlarında silindir-üstü-silindir aşınma deney yöntemi kullanılmakta idi. Günümüzde artık, disk-üstü-pim gibi ya da Fletcher ve Beynon'un [53] tasarladığı kontrollü, yuvarlanma temasının meydana getirdiği yorulma ve aşınmayı ölçebilen aşınma deney cihazları kullanılmaktadır. İkiz-disk (silindir-üstü-silindir) yaklaşımını kullanarak Bolton ve Clayton 1984 yılında rayların kafa kısımlarında üç türde (mod) aşınma meydana gelebileceğini bulmuştur [27]:

1. Tip-I Aşınma: Düşük temas gerilmelerinde meydana gelir; büyük, ince yassı taneli, metalsel ve oksitli aşınma ürünleri ile karakterize edilir. Aşınma mekanizması bağımsız olarak işler; önce sürtünme katsayısının limit değerlerine erişilir ve bu değer, yuvarlanma olan mesafe ile temas gerilmesinin çarpımıyla doğru orantılıdır.
2. Tip-II Aşınma: Orta şiddetteki temas gerilmelerinde meydana gelir. İnce, yassı taneli aşınma ürünleri Tip-I aşınmasındakilere göre daha küçük, daha düzensiz yapıda, metalsel ve sıkıştırılmış yapıdadır.
3. Tip-III Aşınma: Yüksek temas gerilmelerinde meydana gelir. Yüzey, birinci ve ikincidekinden daha pürüzlüdür; çünkü yüzey pullukla sürülmüş veya yırtılmış gibidir, yüzey partiküllerinin saçılmış olmasından anlaşılır. Aşınma partikülleri düzensiz morfolojidedirler, bazıları gözle bile seçilebilirler. Aşınma oranları diğer ikisinden çok daha fazladır.

Laboratuar sonuçları göstermiştir ki aşınma oranları, Tip-I, Tip-II ve Tip-III sırasıyla ilerlemektedir. Kullanım sırasındaki durumlarına bakılarak rayların en üst kısmından ölçü köşesine kadar olan yerlerinde Tip-II aşınmasının; ölçü yüzünde ise Tip-III aşınmasının etkin olduğu söylenebilir.

Bolton ve Clayton'un [27] çalışmaları ayrıca Tip-II aşınma modu için aşınma oranı, WR 'nin, yuvarlanma mesafesi başına düşen temas alanında meydana gelen ağırlık kaybı ile orantılı olduğunu göstermiştir; bu, temas alanındaki T , teğet kuvvetine, sürünme miktarına ve A , temas alanına bağlıdır:

$$WR = T_{s_x} / A \quad (2.2)$$

Burada; T_{s_x} sürünme sırasında yayılan enerji miktarını belirtmektedir. Genel olarak, ray üzerinde yuvarlanan tekerin gerçek koşulları için aşınma, her üç türdeki sürünme (boyuna, yanal ve çevrimsel) sonucu açığa çıkan enerji ile ilgilidir:

$$WR = T_1 s_x + T_2 s_y + M_3 \omega_z \quad (2.3)$$

Burada M_3 çevrimsel momenttir.

McEwen ve Harvey kuru sürtünme koşullarında meydana gelen aşınma sırasında açığa çıkan enerji arasında bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir[34]. Bu ilişkiyi kullanarak Wilson ve arkadaşları [34] teker-ray teması sırasında açığa çıkacak enerjiyi ve meydana gelen aşınma miktarını tahmin etmek için taşıt dinamiği üzerine simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Tyfour ve Beynon[14] ikiz-disk temas simülasyonu sırasında rayın diskin dönme yönüne ters yönde döndüğünü ve bunun da, diske verilen enerji miktarının yuvarlanma yönünden etkilenmemesine rağmen ray çeliğinin aşınma oranını düşürdüğünü bulmuştur.

Küçük ölçekli laboratuvar koşullarında yapılan aşınma deneylerinde teker-ray sistemi için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Kuru sürtünme koşullarında belirli bir sertlik değeri için; perlitik çeliklerin bey nitik veya martenzitik çeliklerden daha iyi aşınma dayanımı sağladıkları bildirilmiştir. Bunun nedeni bilinmemekle beraber aşınma sırasında perlitik çeliklerde karbürce zengin sert yüzeyler oluştuğu düşünülmektedir. Bu tabaka esas malzemenin sertliğinin iki katı kadar sertliğe sahip olabilmektedir. Bey nitik ve martenzitik çelikler genellikle daha düşük karbon içeriğine sahiptirler. Bunlar perlitik çeliklerin ki kadar yüksek sertliğe ve karbür yoğunluğuna sahip olamazlar.
2. Perlitik çelik için karbon oranı arttıkça sertlik ve lamelli karbürlerin hacim oranları da artar bu da aşınma oranını düşürür.
3. Perlitik çelikler için perlit tabakaları arasındaki mesafe alaşımlama yapılarak düşürülebilir. Bu da sertlik değerini arttırırken aşınma oranını azaltır. Bunun karbür lamellerinin kalınlığı

ile gevreklik arasındaki ilişkiden dolayı olduğu düşünülmektedir. 0.1 mikronun üzerindeki kalınlıklarda karbür tabakaları deforme olamaz ve kırılma eğilimi gösterirler, 0.01 mikron kalınlığın altında ise deformasyon kolayca meydana gelebilir. Bundan dolayı perlitin iyileştirilmesi aşınma yüzeylerinde karbür kırılmasını tetikler ve bundan dolayı aşınma oranı azalır.

4. Bütün çelikler için sıvı veya katı yağlama aşınma miktarını çok büyük oranlarda düşürür.
5. Küçük ölçekli kuru sürtünme deneyleri malzemelerin kullanım performanslarını belirlemede sıklıkla kullanılırlar.

Bundan dolayı laboratuvar koşullarında yapılan disk-üstü-pim veya silindir-üstü-silindir aşınma deney yöntemleri kullanım sırasındaki aşınma performanslarını karakterize etmede önemli rol oynar.

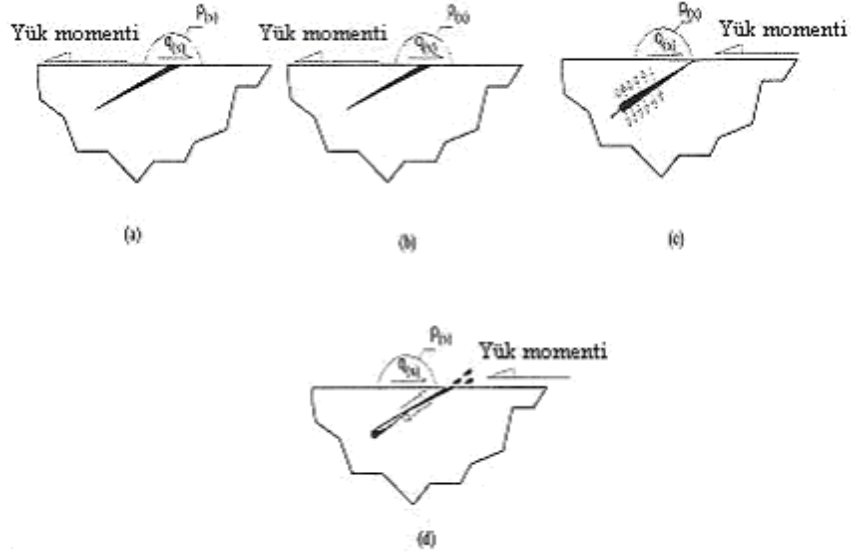
Markov [31] teker ve rayların aşınma oranlarına 10'dan fazla faktörün etki ettiğini bildirmiştir. Bunu Eşitlik (2.4) ile belirtmiştir:

$$W = f (H_w, H_r, S_w, S_r, P, \sigma, \Pi, T^o, V, \psi) \quad (2.4)$$

Burada; H_w , H_r , S_w , S_r , teker ve rayın sırasıyla sertliği ve metal yapı parametresidir. P , yük; σ , temas basıncı; Π , kayma oranı; T^o , sıcaklık; V , kayma hızı ve son olarak ψ , yüzey durumu parametresidir.

2.6. Teker-Ray Arasındaki Yuvarlanmalı Temastan Kaynaklanan Yorulma

Yuvarlanmalı temas yorulması, raylar üzerinde tekrarlı yüklemekten dolayı oluşan çatlağın ilerlemesi olayıdır. Normal yükler, boyuna ve enine kayma yüklemeleri yuvarlanmalı temastan kaynaklanan yorulmayı arttırıcı etki yaparlar. Rayların yüzeylerinde ve alt kısımlarında çatlaklar oluşur ve buralardan metal kayıpları meydana gelir.



Şekil 2.5. Tekerin geçişi sırasında raydaki açısall bir çatlakın durumu [34]

Şekil 2.5'te bir rayın yüzeyinde içeri doğru açı yapan ve yuvarlanmalı temas yorulması sonucu oluşan bir çatlakın üzerinden tekerin geçmesi görülmektedir. Şekil 2.5'te teker tarafından yüzeye uygulanan çekmenin ok ile gösterilen doğrultuda olduğu kabul edilmiştir. Teker yaklaşırken çekme etkisiyle çatlak ağzı açılır. Eğer ortamda bir sıvı var ise bu açıklıktan çatlakın içine doğru girer (Şekil 2.5a). Teker çatlak ağzına geldiğinde içerdeki sıvı kapalı kalır (Şekil 2.5b). Sıvının preslenebilir olmadığı kabul edildiği için çatlak içindeki basınç çatlak açıklığı içinde korunur. Yük artmaya devam ettikçe sıvı çatlak ucuna doğru itirilir bu sırada çatlak basıncı yük artmasından kaynaklanan basıncı dengeleyebilmek için yükselir ve sonuçta çatlak içindeki basınç çatlak ucunda gerilim arttırıcı etki gösterir (Şekil 2.5c). Çatlak ağzından yük uzaklaştığında çatlak içindeki sıvıyı bırakmak için açılır ve Mod II türündeki çatlak ilerlemesi meydana gelmiş olur (Şekil 2.5d). Bundan dolayı ray üzerindeki yüzey çekimi tekerin ilerleme yönüne zıt olduğunda su veya diğer düşük vizkoziteli yağlayıcıların çatlak içine girerek düşük çatlak yüzeyi sürtünmesi ve çatlak ucunda hidrolik yüklemeye yapması beklenir. Bu modelde, yükün karşı yönden gelmesi durumunda çatlak ilerlemesinin olmayacağı tahmin edilir. Bu durumda sıvı yük geçişi sırasında çatlak ağzından dışarı çıkma eğilimi gösterecektir. Geçmişte Tyfour ve Beynon [14] tarafından yapılan çalışmalar, yuvarlanma yönü ters döndüğünde çatlakın ilerleyebileceği fakat bu çatlakların kritik bir derinliğe inmeden önce daha uzun bir kullanım ömrü sağlamak için yönlerini değiştirme eğiliminde olduklarını göstermiştir.

Burada tartışılan çatlak ilerlemesi modeli raylardaki yuvarlanma temas yorulmalarından kaynaklanan çatlakların ilerlemelerini açıklarken aşınma içinde aynı mekanizmanın aşınma

başlangıcı için kabul edildiği düşünülmektedir. Hearle ve Johnson, Bower, Fletcher ve Beynon, Sheppard ve arkadaşları, Keer ve Bryant, Murakami ve arkadaşları ve Makita ve arkadaşları bahsedilen bu mekanizma ile çatlakların ilerlemesi konusunda kantitatif çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar neticesinde ray yüzeyleri ve teker bileşenlerindeki plastik deformasyonun yayılımının çatlak ilerlemesine olan etkileri hesaplanmış olup bu veriler hala geçerliliğini korumaktadır [34].

Yuvarlanmalı temas yorulmasından kaynaklanan çatlakların ilerlemesi ile ilgili kantitatif tanımlamalar ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Özellikle ray yüzeyinin biraz altında açılarak meydana gelmiş çatlakların kırılma riskini tahmin etmek ile ilgili Cannon' un çalışmaları vardır [34]. Bununla beraber yuvarlanmalı temas yorulması oldukça karışık bir olgudur ve çatlakların ilerlemeye başlamasından önce çözülmesi gereken bazı teorik ve pratik problemler vardır. Bunlar:

1. Detaylı teker ve ray profil şekilleri için yuvarlanmalı temas gerilmesi alanı karmaşıktır.
2. Üretim sırasında oluşan kalıntı gerilmeler veya bükme ve termal genişleme/büzülme gibi diğer gerilmelerin sisteme etki etmesi.
3. Ray malzemesi özelliklerinden kaynaklanan yüzey sertleştirilmesi farklılıkları, yüksek anizotropik oluşumlar veya yüksek düzeyde yüzey kayması gibi durumlar.
4. Şekil 2.5'teki gibi ideal şekilde tanımlanamayan farklı çatlak morfolojileridir.

2.7. Aşınma ile Yuvarlanma Temas Yorulması Arasındaki Etkileşimler

Aşınma ile yüzeyden başlayan yuvarlanma temas yorulması arasında bir ilişki olduğu düşünülmektedir. Eğer teker ya da rayın aşınması, yuvarlanmalı temastan kaynaklanan yorulmanın neden olduğu çatlakların büyüme oranından yüksek olsaydı, çatlaklar hiç ilerlemez ve ray veya tekerlerin yüzeyinden veya hemen alt kısımlarından malzeme kaybı meydana gelmezdi. Bunun sağlanması için bir yöntem, her iki malzemenin de sertlik değerlerinin düşürülerek aşınma oranlarının azaltılmasıdır. Bunun peşinden gelecek süneklik artışı, yorulma hasarlarının zararlı etkisini azaltacaktır.

Malzemeleri yorulmaya karşı korumak için küçük çatlakların giderilmesi, yok edilmesi fikri, raylardaki çatlak ve yarıklardan malzeme kopmasının dolayısıyla ray aşınmasının önlenmesi açısından çok çabuk kabul görmüştür ve büyük demiryolu hatlarına adapte edilmiştir. Bu ağır raylı sistemlerde ray bakım teknikleri uygulanmaktadır. Uygun makinelerle raylar hem aynı oranda aşınmaktadır, hem de istenen ray profillerinde çalışabilmektedir.

Kalousek, başarılı bir şekilde, en az maliyetle, en iyi ray yüzeyi koşullarını elde etmeyi sağlayacak metal kaybı miktarlarını ve bunların aşınma aralıklarını tanımlamıştır [54]. Sawley ise aşınma miktarı ile temas yorulması miktarlarının dengelenmesinde etkili olan parametreleri; ray yolunun eğikliği ve yapısı, yere döşenen rayın tipi, hattın trafik yoğunluğu ve yol boyunca konulmuş bulunan sinyalizasyonun yoğunluğu olarak belirlemiştir [34]. Çok sayıda trafik ışığı bulunması, trenin durmak için fren yaptığı ve tekrar kalkış anında ivmesi sırasında aşınma hızını artırıcı etki yapar. Ray aşındırmasının doğru uygulandığı durumlarda yuvarlanmalı temastan kaynaklanan yorulmanın etkileri azaltılabilmekte ve ray ömrü uzatılabilmektedir.

2.8. Trenlerde Kullanılan Fren Balataları

Frenlerde karşılaşılan aşınma kuru kayma aşınması diye bilinir. Bu aşınma sırasında birbirleriyle eşleşen yüzeylerde sürtünmeden dolayı ısı oluşur. Bu ısının yayılması sırasında parça enerji soğurur. Bu da hareket eden parçanın sonuçta yavaşlamasına ya da durmasına neden olur [55]. Trenlerde tekerlek üzerinde frenleme, monoblok balatalar (sabolar) veya pabuçlarla sağlanır. Günümüzde üç tür frenleme malzemesi kullanılmaktadır; dökme demir (pik), kompozit ve cam hamuru (sinter) [56].

Trenlerde, frenleme sırasında oluşan yüksek ısının fren pabuçları tarafından dağıtılması gereklidir. Genellikle fren pabuçlarında şu özellikler aranır [55]:

1. Yüksek ısı iletkenlik
2. İyi sürtünme özelliği
3. Kırılmaya karşı direnç
4. Kabul edilebilir bir dayanç yüzeyi
5. Evre dönüşümlerinden oluşabilecek hacimsel büyümeye karşı direnç
6. Düşük esneklik katsayısı

2.8.1. Dökme-Demir Fren Balataları

Dökme demir fren pabuçları çok az masraflı, hazırlanması ve şekillendirilmesi kolay ve tekerlek malzemesine en az zararı olan bir sürtünme malzemesidir. Ayrıca kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle tüm dünya demiryollarında geçmişten bugüne yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bununla beraber, aşınması oldukça hızlıdır ve sürtünme özellikleri tamamen istenilen düzeyde değildir. Aslında sürtünme katsayısı oldukça düşüktür ve bir taraftan hıza, diğer taraftan uygulama basıncına bağlı olarak çok büyük farklılıklar gösterebilir.

UIC Frenleme Alt Komisyonunun demir-döküm (pik) fren pabuçlarının standardizasyonu ile ilgili olarak yaptığı araştırmalar sonucu, fren pabuçlarından istenilen özellikleri en iyi biçimde sağlayacak alaşımın kır dökme demir olduğunu bildirmiş ve fosfor içeriğini % 1'ler mertebesine indirerek daha az kırılabilir olan fosforlu bir döküm seçmiştir. (P 10 dökme demir)

Pik fren pabuçları hızla aşındıklarından bazı şebekelerde, özellikle çok sık duruş yapan banliyö trenlerinde, P 10 dökme demir (pik) fren pabuçlarından yaklaşık 2 kat daha az aşınan P 30 dökme demir (pik) fren pabuçları (% 3 fosfor içeren) kullanılmaktadır. Ancak fosfor, demir dökümün kırılabilirlik oranını arttırmaktadır ve bu nedenle fren pabucunun mekanik dayanıklılığı, demir dökümün içine, kafesli demir levhadan özel bir demir iskelet gömerek elde edilmektedir [56].

Bu amaçla Türkiye'de halen % 1.2-1.3 fosfor katımlı ve % 0.4-0.5 krom katımlı kır dökme demirlerden üretilen fren pabuçları kullanılmaktadır.

2.8.2. Kompozit Fren Balataları

Teknolojideki gelişmeler cer araçlarının yenilenmesi, mevcut cer araçlarının daha fazla kapasiteyle daha hızlı ve daha etkili çalışmasını da beraberinde getirmektedir.

Fren pabuçları için, demir döküm dışında başka bir malzemenin araştırılmasının kökeninde, pik sabonun sürtünme özelliklerinin yetersizliğini giderme gerekliliği vardır. Bu durumda, daha yüksek bir sürtünme katsayısı sunan ve hıza bağımlı olmayan bir malzemenin hazırlanmasına çalışılmıştır. Organik pabuçlar diye de adlandırılan bu pabuçlar, otomobillerdeki fren balatalarının hazırlanmasında kullanılan karışımlara oldukça yakın karışımlardan üretilmektedirler.

Karbon içeren malzemeler, triboloji uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptirler. Örneğin grafit, hekzagonal olarak dizilmiş karbon tabakalarından oluşur ve bunlar zayıf Van der Waals bağlarıyla tutulurlar, bundan dolayı iyi bir katı yağlayıcı olarak bilinir. Triboloji uygulamalarında kullanılmaları, karbon matrisi içine karbon fiberlerinin güçlendirici olarak katılmaları suretiyle olur. Bu biçimde imal edilen kompozitlere karbon-karbon kompozitleri (C-C kompozitleri) adı verilir [57,58]. Bunlar otomotiv endüstrisinde özellikle fren uygulamalarında fren balatası olarak kullanılırlar [59-61]. C-C kompozit malzemelerin ilk çıkışlarındaki kullanım alanları ise havacılık ve uzay sanayii olmuştur. Nedeni bu malzemelerin düşük yoğunluklu, yüksek ısıl iletkenliğe sahip, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında üstün mekanik özellikler göstermeleridir [62-64]. Yüksek termal kararlılık ve ısı kapasiteleri, bu kompozitlerin geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmalarına olanak tanır [65]. Hava taşıtlarının frenleme mekanizmalarında da bu malzemeler kullanılır; çünkü bu tip malzemeler için temel gereklilik yüksek termal kapasite, iyi mukavemet, aşınma dayanımı ve yüksek termal iletkenliğe uyumlu yeterli sürtünme katsayısıdır [66-68].

Kısaca fren malzemeleri ısıyı iyi bir şekilde emebilmelidir. Bu sayede sürtünmeden dolayı zaten aşırı ısınmış olan frenleme yüzeyinin sıcaklığının daha da yükselmesini engelleyebilirler. C-C kompozitleri yüksek kayma hızlarında bile kararlı sürtünme katsayısı değerleri verirler, bu üstün özelliklerinden dolayı metalik fren balatalarının yerlerine kullanılmaya başlamışlardır. Bu uygulamalardan biri de trenlerde fren balatası olarak tercih edilmeleridir. Daha önce dökme demirden imal edilen bu balatalar, artık demiryolu endüstrisinin gelişip çağa ayak uydurmasıyla, C-C kompozit malzemedan üretilen çok hafif, mükemmel mekanik ve ısıl özellikler gösteren fren balatalarıyla değiştirilmiştir. İçeriğinde yüksek oranda karbon bulunan, bu pabuçlar, reçineli lifler ve sürtünmeyi belirleyen katkı malzemelerinden oluşmaktadır. Pabuçların üretimi, kalıba koyma (pres altında kalıp) ve pişirme yoluyla yapılmaktadır [56].

İlk üretilen kompozit pabuçlar çok çabuk aşınıyor iken üreticiler tarafından yapılan sürekli araştırmalar sonucu yapılan iyileştirmeler, uygun bir aşınma/maliyet oranı elde edilmesini sağlamıştır.

Kompozit fren pabuçlarının dökme demir pabuçlara oranla avantajları şu şekildedir:

- 1. Ortalama 5-10 katı daha fazla aşınma ömrüne sahiptir.**
- 2. Pik ağırlığın sadece ¼ oranında bir ağırlığa sahiptir.**

- 3. Daha kolay ve daha hızlı sökölüp takılır.**
- 4. Kullanımı güvenlidir.**
- 5. Daha rahat stoklama olanağı vardır.**
- 6. Daha az termal çatlak oluşumu.**
- 7. Tekerleğı iyi kavraması.**
- 8. Bakım aralığının daha uzun olması.**
- 9. Daha fazla aks yüküne dayanması.**
- 10. Daha hızlı kavraması.**
- 11. Boji veya demiryolu hattında yangına neden olmaz.**
- 12. Sessiz olması.**
- 13. Düzensiz ve ani hareketi yoktur.**
- 14. Tehlikeli parçalar içermez.**

Nispeten sabit olan sürtünme katsayıları, demir döküm pabuçlarda olduğu gibi, kuvvet varyasyonları doğuran ve hıza bağımlı organlara başvurmadan, araçlardaki yüksek güçlü frenlemeyi gerçekleştirmeyi sağlamaktır. Bu durum, araçlar üzerindeki kumanda sistemlerinde bir hafifletme ve basitleştirmeye yol açmaktadır.

Sürtünme katsayısının yüksek değeri, pabuç sayısını azaltmaya ve dolayısıyla boji (trenin sekiz adet tekerinin takılı olduğu yürüyüş takımı) yapılarını ve kumanda kollarını kolaylaştırmaya olanak vermektedir ve hatta boji üzerine kolayca adapte olan fren blokları kullanmayı da mümkün kılmaktadır. Nem altında sürtünme katsayısında önemli düşüşe rastlanmaktadır.

Kompozit balatalar, dökme demir olanlardan çok daha az aşındığı için, bunların kullanımı, ilk maliyetleri pik sabolara göre daha pahalı olmasına rağmen, bakım yönünden düşünülürse daha karlıdır.

Bu pabuçların tekerlek üzerinde gerçekleştirdiğı sürtünme, gerek frenleme sırasında gerekse yuvarlanma sırasında, dökme demir balatalarla frenlenen tekerleklerden daha küçük bir gürültü çıkarmaktadır.

Bu kompozit fren balatalarının bir dezavantajı; özellikle düşük hızla “tek makine” olarak seyreden lokomotifler açısından ciddi bir sıkıntı oluşturmaktadır [56].

BÖLÜM 3. AŞINMA VE YORULMA

3.1. Aşınma

Aşınma denilince akla ilk gelen şey, katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır [69-72]. DIN 50320 ve ASTM G 40-93 standartlarına göre aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır[73-77]. Katı cisim yüzeyleri oksit filmleriyle ve yağlayıcılarla korunsalar bile, oksit filmlerinin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonun zayıf olduğu yerlerde yer yer katı-katı teması oluşur. Bu temaslar ise, aşınmaya neden olur [78,79].

Aşınma olayı sırasında meydana gelen mekanik enerji ve bunun ısı enerjisine dönüşmesiyle malzemenin aşınma yüzeyinde daha çok kimyasal cinsten sekonder reaksiyonlar meydana gelerek sınır tabakası çözünür [80]. Aşınma nedeniyle meydana gelen hasar daha çok parçanın şeklinin veya ölçülerinin değişmesi, ısınmadan dolayı yüzeyinde yapı değişmelerinin oluşması şeklindedir.

Metallerde aşınma sonucunda aşağıdaki olaylar meydana gelmektedir:

Metalin Yüzeyine Nüfuz veya Yüzeğe Kaynama: Metal parçacığın yüzeyden kopmasında ilk safha, aşındırıcı metalin yüzeye batması veya atomsal

mesafedeki çok sıkı temas neticesinde yüzeyde kısmen kaynamaların oluşmasıdır. Yüzeyin sertliği yüksek ise, gerek bakma yolu ile nüfuz ve gerekse geniş bölgeler üzerinde temas için lüzumlu olan kısmi plastik şekil değiştirmeye, sertliğin yüksekliği oranında engel olunur. Sertlik ile aşınmaya dayanıklılık arasında çok mükemmel ve karşılıklı bir ilişki vardır [74].

2. **Metalin Şekil Değiştirmesi:** Aşınmanın oluşabilmesi için küçük metal parçalarının şekil değiştirmesi ve kopup ayrılması lazımdır. Tok metaller bu hususta böyle bir eğilim göstermediklerinden aşınma mukavemetleri iyidir. Pratikte genellikle sertliğin yüksek olması tokluğun yüksek olmasına tercih edilir.
3. **Metal Yüzeyinin Korozyonu:** Aşındırıcı cisim, yüzeyde oluşabilecek oksit veya sülfat gibi bir korozyon ürününü kolaylıkla aşındırıp atabilir. Bu sebepten korozyona dayanıklı metallerin aşınma dayanımları genellikle iyidir.
4. **Metal Yüzeyinin Isınması:** Her ne kadar aşınma sırasında metal yüzeyinin kısmi olarak ergimesi ender olarak görülse de daha az şiddetli olan sürtünme ısılarında korozyon reaksiyonlarının hızlanmasından ve metalik özelliklerin kötüleşmesinden dolayı aşınma dayanımı düşer. Bu sebeple, ergime noktası yüksek olan metallerin aşınma dirençleri yüksektir [74].

3.1.1. Aşınma Mekanizmaları

3.1.1.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma ve Yenme Aşınması)

Adhesiv aşınma, özellikle birbirleri ile kayma sürtünmesi yapan metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan teknik yüzeylerin pek küçük bir kısmı temas halindedir. Bu küçük temas halindeki yüzeylerde gerilmeler çok küçük yüklemelerde dahi akma gerilmesi sınırına erişirler veya geçerler. Böylece moleküller yapışma

kuvvetleri etkisini gösterir. Bu nedenle bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçacıkların kesilmesi olayı meydana gelir [35,70,71].

Temas halinde bulunan bu cisimlerde bu tip aşınmadan kaçınmak mümkün değildir. Bu olayda yüzeylerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileri önemli rol oynar. Adhezyon teorisi metal transferini açıklamakla beraber aşınma partiküllerinin oluşumu için yeterli değildir. Bu konuda plastik pürüzlenme teorisi açık bir fikir verebilir.

Adhezyon teorisine göre temas halindeki yüzeylerde temas noktalarındaki lokal basınçların çok yüksek olması dolayısıyla küçük kaynak bağlar oluşur. Normal olarak yüzeylere absorbe edilmiş olan gaz veya sıvı molekülleri ile oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır, malzemenin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel kaynak bağlar meydana gelir. Bu kaynak bağların oluşturduğu malzeme kaybı, adhezyon aşınmasını açığa çıkarır.

Adhezyon aşınmasıyla ilgili yapılan çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar kısaca şu başlıklar altında toplanabilmektedir [71,73]:

- 1- Adhezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
- 2- Olay, yüzeylerin göreceli hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.
- 3- Adhezyon aşınması sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmektedir.
- 4- Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür.
- 5- Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemedede olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.

Adhezyon aşınmasını önlemek için gereken önlemler şu şekilde sıralanabilir [70,74]:

1. Eş çalışacak malzeme çiftleri uygun seçilmelidir, mesela çelik ile eş çalışan yatak malzemeleri.

2. İyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır.

Kuru veya sınır sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbirleriyle değme halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adhesif veya sıcaklık etkisiyle de teşvik edilen kohezif bir bağ meydana gelmektedir. Bu bağ, metalsel değme yüzeylerine kadar kuvvetli kalmaktadır. Pürüz tepecikleri arasında bu tür bağlar oluşmuş olan iki yüzeyi birbirine karşı kaydırduğumuz zaman, bağlanmış tepeciklerin birbirlerinden ayrılmaları üç şekilde olabilir:

1. Bağ ara yüzeyinin kesme direnci, her iki yüzeye ait malzemelerin iç kesme direncinden daha küçüktür. Bu tür adhesiv aşınmada, aşınma miktarı en azdır.

2. Ara yüzeyin kesme direnci, yüzey malzemelerin birinden küçük, diğerinden ise çok az farklı, heterojen yapıda olan ikinci malzemeye ise yer yer eşit olabilir. Bu takdirde gene yumuşak malzemeden sert malzemeye bir madde geçişi vardır. Ancak bazı noktalarda parçacık kopmaları kendini gösterecektir. Madde geçişi yanında madde ayrılmaları suretiyle daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır.

3. Ara yüzeyin kesme direnci her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Ayrıca kuvvetli bir plastik şekil değişmesi sonucu pekleşmiş ve kırılğan hale gelmiştir. Belirli bir kayma mesafesinde yüzeyden kopup ayrılacak, kuvvetli bir aşındırıcı olarak, yüzeyler arasında adhezif aşınmaya ek olarak abraziv aşınmaya da neden olacaktır. Bunun sonucu olarak her iki yüzeyde de kuvvetli bir aşınma hasarı meydana gelecektir. Mukavemet özellikleri birbirine yakın malzemeler arasında (örnek olarak çelik-çelik) bu tip adhesiv kökenli şiddetli aşınma hallerine rastlanmaktadır

Bu üç eşit adhesiv sürtünme şeklinde ölçülen sürtünme katsayıları arasındaki fark çok azdır. Kısaca sürtünme direnci hemen hemen aynı kalır. Buna karşın 1 ve 3 arasındaki aşınma miktarı eşit koşullarda bir ile yüz kat arasında değişir. Görülmektedir ki, adhesiv bağ, sürtünme direncinin tanımlanması bakımından yeteri kadar güvenilir bir bilgi vermektedir [73,74].

Buna karşılık aşınma bakımından adheziv bağa bağlı olarak kesin bir şey söylemek mümkün olmamaktadır.

3.1.1.2. Abrasiv Aşınması (Yırtılma ve çizme aşınması)

Bu tip aşınma, sert bir cismin yumuşak bir cismi kazıyıcı bir etki göstererek tahrip etmesidir. Bu olay genel olarak iki şekilde meydana gelir. Birinci halde sert bir metal yumuşak bir metali egeleyerek tahrip eder. İkinci halde ise dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğelemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olurlar. Sert partiküllerin abrasif aşındırmasına endüstride geniş ölçüde rastlanır [70-74].

Saf metallerin abrasiv aşınma miktarları sertlikleri ile orantılıdır. Sertleştirilen fakat normalize edilmeyen çeliklerde de aynı davranış görünmektedir. Normalize edilmiş çeliklerde aşınma karakteristiği değişmekle beraber, sertlik ve aşınma sırasında bir lineerlik görülmektedir.

Sertlikten ayrı olarak bir yüzeyin yapacağı elastik deformasyonda abrasyon aşınmasına karşı önemli bir özellik olarak ileri sürülmektedir. Göreceli hareket sırasında sert ve yumuşak metallere oluşan bir yüzey çifti arasına sert bir toz parçası girmesi halinde yumuşak yüzey elastik deformasyon yaparak aşınmadan kurtulabilir. Yatak malzemelerinden bilhassa istenen bu özellik için elastik modülün küçük olması gerekir. Bu halde çeşitli maddeler için elastik sınırında uzama oranı bu aşınma hakkında yol gösterici olarak fikir verir.

Partiküllerin Vickers sertliği aşındırıcı yüzeyin Vickers sertliğinden 1.5 kat büyükse ve partiküller keskin köşe ve kenarlara sahiplerse bu şartlar için, abrasif aşınma hızı oldukça yüksektir.

Isıl işleme sertleştirme abrasyon direncini geliştirebilir. Diğer taraftan abrasyondan önce işlem sertleşmesi aşınma direncinde gelişmeyle sonuçlanmaz. Abrasyon aşınması sonucunda faz değişimleri de meydana gelir. Tamamıyla soğuk işleminde abrasyon direnci ile sertlik arasında doğrusal ilişkinin bir sonucu olarak metallerin çok sert yüzey tabakalarıyla kaplanması aşınma direncinin artmasında büyük rol oynamaktadır [70,74].

Abrasyon aşınmasını önlemek için alınan önlemler de şöyle özetlenmektedir:

1. Yüzeyler sertleştirilmelidir.
2. Dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmesi iyi bir sızdırmazlık düzeneğiyle önlenmelidir.

3. Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir.

Abrasif aşınmayı iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar:

1. İki elemanlı abrasif (oymalı sürtünme)
2. Üç elemanlı abrasif (öğütmeli sürtünme)

Karşıt yüzeylerden birisinin üzerindeki mikro boyutlu sert pürüzlerin neden olduğu iki elemanlı abrasif aşınmada yüzeyin aşırı deformasyonu söz konusudur. Üç elemanlı abrasif aşınma ise, ağır yükler altında aşınma parçalarının kırılarak küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeyi delerek ve çizerek malzeme kaybına neden olması sonucu meydana gelir.

3.1.1.3. Tabaka aşınması

Abrasif aşınma olayında aşınma yüzeyinde malzemenin yüzeye yakın yerinin (sınır yüzeyinin) özelliğinin pek önemi yok iken, tabaka aşınmasında önemi çoktur. Çevredeki gazların ve ara malzemenin etkisiyle meydana gelen aşınma yüzeyi sınır tabakası, tabaka şeklindeki aşınma parçacığı olarak (yassı çizilme ile) sıyrıldığında, daima yeniden meydana gelir. Bunun için en önemli özellik, aşınma yüzeyinde meydana gelen tabaka olup, malzemenin rolü ikinci derecededir. Bu aşınma türüne örnek olarak sürtünme oksidasyonunu verebiliriz [74].

3.1.1.4. Titreşim aşınması

Titreşim aşınması, titreşen zorlanmalarda zaman ve yorulma kırılması hasarı olarak meydana gelir. Bu aşınmada, içyapı tahribatı, çatlamlar ve bölgesel ayrılma meydana gelir. Örneğin; dişliler veya rulmanlarda meydana gelen çukurlaşma (pitting) olayı.

3.1.1.5. Ablativ aşınma

Ablativ aşınma, aşırı zorlanan ve fiziksel ya da kimyasal değişmeler nedeniyle ısınan yerlerde meydana gelir. Bu aşınma türü en yaygın olarak, uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı dış yüzeylerinde ve fren balatalarında görülür.

3.1.2. Aşınma Çeşitleri

Çeşitli şekillerdeki enerji iletimi veya aşınma olayına etkiyen büyüklüklerin çeşitli birleşimlerine göre ayrıca kinematik görüşle aşınma şekilleri sınıflandırılabilir:

3.1.2.1. Kayma Aşınması

Taneli mineraller tarafından meydana getirilen kayma aşınması mineral sertliğine bağlı olarak belirlenir. Metaller yüksek ve alçak aşınma bölgeleri gösterirler.

Geçiş bölgesi, mineral sertliğinin metal sertliği oranına bağlıdır. Eğer mineral sertliği, metalin sertliğinden fazlaysa, aşınma miktarı da artar. Ayrıca yüksek aşınma bölgesinde, tane keskinliği aşınma miktarını artırıcı yönde rol oynar.

Metal olmayan sert malzemelerde aşınma, metallere farklı olarak, mineral tanelerin sertliği ile artar. Sert malzemelerin aşınma yüzeylerinde gevrek kırılmalar meydana gelir. Saf metaller, normalize tavlama yapılmış çelikler ve metal olmayan sert malzemelerin yüksek aşınma bölgesinde aşınma dirençleri ile malzeme sertliği arasında lineer bir bağlantı vardır. Yani malzeme sertliği, aşınma direncinin büyüklüğünü tayin eden bir faktördür.

Çeliklerin ısı işlemleriyle sertliklerinin artırılması, saf metallerin sertliklerine göre aşınma direncine daha az etki yaparlar. Soğuk şekil değiştirme veya içyapı ayrışması sonucu meydana gelen malzeme sertliğindeki artışla, aşınma direncinde hiçbir artma görülmez. Aynı sertlikte fakat deformasyon kabiliyeti fazla olan malzemelerin aşınma direnci daha fazladır. İçyapısında kalıntı ostenit bulunan çelikler için, malzeme içyapısı aşınma direncine önemli şekilde etki eder [74].

3.1.2.2 Metal-Metal Aşınması

Hidrodinamik sürtünmede genellikle hiçbir aşınma olmaz ve malzeme çiftinin de önemi yoktur. Çünkü bu halde malzemeler birbirlerine temas etmemektedirler. Fakat burada tam yağlama için minimum bir hız gereklidir. Yani harekete başlama ve durma anında malzeme çiftleri birbirlerine temas ettiklerinden buralarda istenen bazı özelliklerin bulunması gereklidir.

Karışık yağlama kuvveti kısmen hidrodinamik, kısmen katı cisimlerin temasıyla tanışır. Bu temas noktalarında malzemelerin özellikleri ve kayma yapan malzeme çiftleri ile yağlayıcı maddenin etkisi vardır.

Özellikle yağsız yüzeylerin sürtünmesinde aşınma durumu malzeme çiftinin yüzeyine bağlıdır. Çünkü çevrede bulunan gazlar ve buharlar bir oranda yağlayıcı madde gibi etki yaparlar. Vakum içinde yapılan sürtünme deneyinde de (kuru sürtünme) daha ziyade yumuşak metallerin temas noktalarında sarma ve kaynaklaşma olayı görülür.

Aşınma miktarları yükü devamlı şekilde artarken karışık aşınma bölgesinde birdenbire bir sıçrama ve aşınma yüzeyinde parlak noktalar görülür. Karışık aşınma yalnız sünek çeliklerde metalik temas sonucu çizilen yüzeyler ve büyük metalik aşınma sonucu meydana gelir. Aşınma yüzeyinde sürtünme martenziti parlak noktalar şeklinde meydana geldiğinde (oksidasyon) aşınma olmaktadır ve aşınma miktarı da azalmaktadır. Bu noktalar, yüzeyin taşınma noktalarıdır ve yükselen enerji yoğunluğu ile yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve sertleşebilen çeliklerin kristallerinde dönüşüm olmakta ve kendiliğinden ani soğuma sonucu martenzit yapı meydana gelmektedir.

3.1.2.3. Püskürtme aşınması

Püskürtme aşınmasında, püskürtme açısının önemi büyüktür. Kayma, eğik çarpma, püskürtme aşınması olarak sınıflandırılırlar.

Püskürtme aşınması malzeme ve onun özelliklerine çok bağlıdır. Her malzemenin püskürtme aşınmasına karşı dayanıklılığı farklıdır. Verilen deney şartlarında yumuşak ve deforme olabilen malzemeler küçük püskürtme açısında (kayma püskürtmesi) büyük aşınma gösterirken, sert ve gevrek malzemelerde büyük püskürtme açılarında (çarpma püskürtmesi) aşırı zorlanarak maksimum bir aşınma göstermektedirler.

3.1.2.4. Erozyon (Erosiv Aşınma)

Erosiv aşınma veya daha yaygın kullanıldığı şekliyle erozyon, bir gaz akımı veya bir akışkan sıvı vasıtasıyla taşınan sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpmasıyla meydana getirdikleri bir aşınma mekanizmasıdır. Bazı yönleriyle abrasiv aşınmaya benzeyen erozyon pulverize kömür, ısı üretim ve sentetik yakıt santralleri, dizel motorları, gaz, buhar ve dizel türbinleri, akışkan yataklar ve

madencilikte kum/su çamur taşınma sistemleri gibi alanlarda oldukça yüksek tamir ve değiştirme maliyetlerine yol açmaktadır.

Erozyon genellikle sert ve aşındırıcı partiküllerin mevcut olduğu ortama ve aşınan malzemenin erozyon hızının çarpma açısıyla değişimine bağlı olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

Partiküllerin mevcut olduğu ortama göre erozyon;

1. Katı partikül erozyonu,
2. Sıvı partikül erozyonu,
3. Kavitasyon erozyonu,
4. Kıvılcım (spark) erozyonu

şeklinde dört grupta toplanmaktadır. Pratikte en fazla rastlanılan erozyon tipi, katı partikül erozyonudur. Erozyonda hasara neden olan partiküller, değişik kaynaklar tarafından üretilirler. Ziraat aletleri ve madencilikte kullanılan kum/su karışımı taşıma sistemleri gibi alanlarda sert partiküller, zaten doğal olarak mevcuttur. Diğer bazı durumlarda ise partiküller, giderilmesi oldukça zor olan yabancı maddeler şeklinde bulunabilir. Bu durum özellikle kumlu ve paslı ortamlarda kullanılan motorlarda yaygındır. Fe_2O_3 gibi sert partiküller, tribolojik sistem bileşenlerinin aşınması veya oksidasyonu ile da üretilmektedirler.

3.1.2.5. Yorulma aşınması

Değişken ve tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkan yorulma aşınması, temas yüzeylerinde çok küçük çukur ve oyukların meydana gelmesi şeklinde kendini gösterir. Bu tip aşınma özellikle rulmanlar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan parça yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bu durum bir malzeme yorulmasının sonucudur. Zira yukarıda bahsedilen parçalarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde meydana gelen Hertz basınçları, temas yüzeylerinin hemen altında kayma gerilmeleri oluşturur [23,34,82,83]. Böylece değişken zorlanma nedeniyle malzemede bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket eder, büyür ve yüzeyde küçük çukurcuklar oluşturur. Yorulma aşınmasını önlemek için alınacak en önemli tedbir, temas yüzeylerini sertleştirmektir.

3.1.2.6. Oksidasyon Aşınması

Temas yüzeyleri genellikle hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, kimyasal maddelerin mevcut olduğu ortamlarda kullanılan makine parçalarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar aşınmaya neden olurlar. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar sert bir tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder [84].

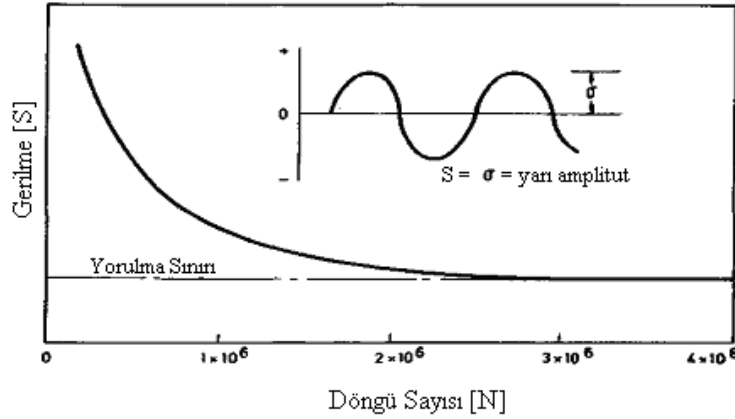
3.2. Yorulma

En geniş anlamıyla "yorulma" terimi, tekrarlanan ya da artıp azalan gerilmelere maruz metalik malzemelerde meydana gelen değişmelerle ilgilidir; özellikle, bu tür gerilmelerin uygulanmasının sonucu olarak bir kırılma şeklini ifade kullanılır [7,18,30,82-84]. Yorulma kırılması hiç kuşkusuz bir metalik malzemenin koşullarında bir kesin değişmeyi temsil eder ve dolayısıyla pratik amaçlar açısından yorulma davranışının en önemli görünümü olmaktadır [85-88]. Kırılmaya götüren mekanizma bir yük ya da gerilme döngü sayısı birikimine bağlıdır. Aynı şekilde, kırılmanın kendisi de ilerleyen bir karakter arz eder ve bu açıdan öbür tür kırılmalardan, özellikle pratik olarak ani sayılan gevrek, klivaj kırılmasından farklıdır. Birçok durumda yorulma yüklemesi tek bir çatlak gelişmesinin sonucu olmakta, ancak, çatlak dolayısıyla kesitte meydana gelen alan küçülmesi veya çatlak doğurduğu gerilme yoğunlaşması ya da "çentik" etkisi, ya plastik şekil değiştirme ve sünek ya da klivaj yoluyla kırılmaya götürebilir. Yorulma kırılması meydana getiren gerilmeler ya çekme, basma, eğme, burma gibi basit, ya da bu basit gerilmelerin bir birleşimi olabilir.

3.2.1. S - N (Wöhler) Eğrileri

Bir malzemenin dayanıklılığının, yani yorulma yoluyla kırılma meydana getirmek için gerekli döngü sayısının, uygulanan gerilmenin büyüklüğüne bağlı olduğu açıkça saptanmıştır. İlişki genel olarak S - N, ya da Wöhler eğrisiyle karakterize edilip bu eğri, birbirinin eşi deney parçalarının deney sonuçlarını grafiğe işleyip bu deneysel noktalar arasında bir ortalama eğri çizerek elde edilir. Eğrinin gösterdiği ilişki, doğal olarak, sadece her bireysel deneyde tüm gerilme döngü sayılarının da birbirine eş olması koşuluyla geçerlidir. Yatay ekseninde geniş bir dayanıklılık alanını kapsamak gerektiğinden; N, döngü sayıları genellikle bir logaritmik ölçekle işlenir; dikey ekseninde gerilme değeri lineer ya da logaritmik ölçekle gösterilebilir [81].

Tipik bir S - N eğrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Eğriye yatay asimptota karşılık gelen gerilme düzeyi yorulma sınırı olarak bilinir. Yorulma sınırının üstündeki gerilmeler, bir uygun döngü sayısı biriktiğinde, hasara yol açar, oysaki yorulma sınırının altındaki alan, deney parçalarının kırılmadan kaldıkları koşulları gösterir. Bununla birlikte yorulma sınırının malzemenin bir genel niteliği olmadığı bilinmelidir. Alüminyum alaşımları görünür yorulma sınırı göstermeyebilirler; aynı şey yorulma gerilmelerinin yüksek sıcaklık veya korozif ortamla birlikte bulunması halinde, çeliklerde de olabilir. Bunların dışında, belli bir malzeme, deney yöntemi ve başka etmenlere bağlı olarak, bir yorulma alanı oluşabilir. Pratik amaçlar için σ_N yorulma mukavemetinde σ , belli bir N yükleme döngü sayısı için ele alınmış gerilme kademesidir. Örneğin kaynaklı çelik parçalarda farklı birleşme şekillerinin yorulma mukavemetlerinin kıyaslanmaları çoğu kez $N = 2 \times 10^6$ döngü sayısı için saptanmış σ_N değerleri olarak yapılır. Yorulma ile kırılmaya götüren etmenler incelenmelidir.



Şekil 3.1. Tipik bir S - N (Wöhler) eğrisi [35,81]

Yorulmayı etkileyen genel etmenler üç grupta toplanır:

1. Parça ya da konstrüksiyonun tasarımı ve görünümü
2. Deney ya da çalışma koşulları
3. Deney parçası ya da konstrüksiyon malzemesi.

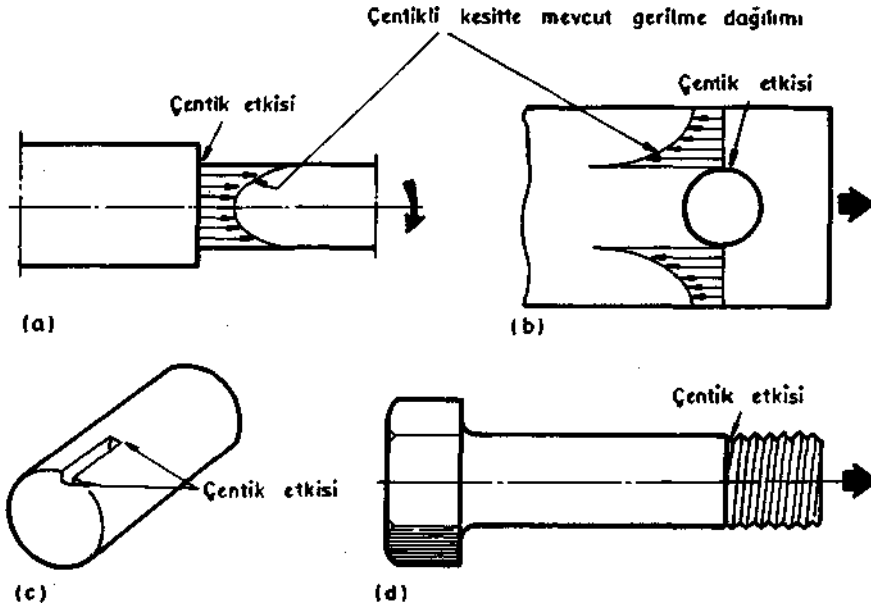
3.2.2. Parçanın Tasarımı ve Görünümü

S - N (Wöhler) eğrisinin şekli, çalışma sırasında meydana gelen gerilmelerin değerlendirilmesinde ya da çevrimsel gerilmelere maruz parçaların çalışan kesitlerinin hesaplanmasında yapılan hatanın

yorulma kırılmasına götürebileceğini açıkça gösterir. Bununla birlikte, S - N eğrisi ve yorulma sınırı, belli bir malzemenin değişmez bir niteliğini temsil etmez. Yorulma mukavemeti, özellikle, gerilme yoğunlaşmalarının varlığından derinden etkilenir ve bu yoğunlaşmalar çok türlü oluşabilir. Bu nedenle bir S - N eğrileri ailesinin ortaya çıkması olası olup bunlardan her biri, aynı şekilde denenmiş ama belli bir gerilme yoğunlaşması etkisine bağlı, aynı malzemeye uygulanabilir [35,38,81].

3.2.3. Çalışma Koşulları

Uygun yorulma verilerinin seçimi ve emniyetli çalışma gerilmeleri için doğru tasarım önlemleri, S - N eğrilerinin çizilmesinde kullanılanlarla aynı tipte çalışma yüklemesi koşulları, gerilmenin bir sabit değerde değiştiğinin varsayılmasını gerektirir. Sabit bir eğme momentine tabi dönen shaftlar için varsayım doğru kabul edilmiş olup benzer durumlar mevcuttur. Bununla birlikte eğer uniform olmayan ya da gelişi güzel bir yükleme hesaba alınıyorsa ki bu çoğu kez olur, S - N eğrisi tasarım için yetersiz kalır. Örneğin, sabit gerilmeli bir yükleme ve buna karşılık gelen S - N eğrisinin ömür için peşinen sunduğu değer aslında, çalışma sırasında biriktirilecek toplam döngü sayısının ancak küçük bir oranını temsil ettiğinden bilinmezlikten gelinen fazla yükleme periyotlarına rağmen ele alınır.



Şekil 3.2. Sık rastlanan çentik etkileri: (a) ani kesit değişmesi, (b) delinmiş delik, (c) dik köşeli kama yuvası ve (d) dişli cıvata [81]

Bunun sonucunda da normal yükleme döngüsü düzeyinin kırılmaya götürmeyeceği belli iken aslında bu kırılma meydana gelir. Fazla yükleme periyotlarının teşvik ettiği çatlak başlangıcı ortaya çok ciddi bir çentik etkisi meydana getirir; şöyle ki çatlağın ilerlemesi "normal yükleme düzeyi"nde de sürer. Bu nedenle tasarımda rastgele yükleme modellerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin değerlendirilme sorununa özel dikkat göstermek gerekir. Bu, mevcut olan ve bir ciddi esasa dayanmayan kurallardan daha ileri bir şeylerin ortaya konması için, sürekli araştırmalara konu olmaktadır.

Birçok endüstriyel uygulamada, çevrimsel gerilmelere maruz parçalar aynı zamanda yorulma mukavemetini azaltma yönünde etki yapan bir korozif çevrede çalışır. Çentik etkileri, korozyon karıncaları tarafından başlatılır ve "bıçak çizgisi" korozyon tahribatı, yorulmayla birlikte aynı anda ortaya çıkıp bir bileşik etki yapar. Bu nedenle korozyon yorulma deneyleri, bazı özel durumlarda değer taşır.

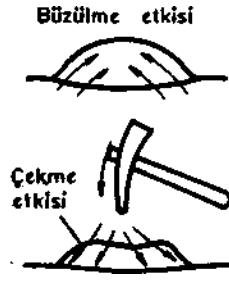
3.2.4. Malzeme

Metal ve alaşımların yorulma mukavemetleri genellikle malzemenin çekme dayanımı nitelikleri ile ilişki arz eder ancak bunun için pürüzsüz, parlatılmış ve dolayısıyla her türlü gerilme yoğunlaşma

etkisinin giderilmiş olması bir ön koşuldur. Bununla birlikte birçok malzeme, çelikler ve alüminyum alaşımları dahil, çentik varlığına hassas olup çekme dayanımı nitelikleri ne denli yüksek olursa, bunların hassasiyeti de o denli fazla olur. Bunun sonucu olarak çentikli numunelerin yorulma mukavemeti, çentiksiz yorulmanınki artsa da, çekme mukavemetiyle orantılı olarak artmaz. Çentiğe hassasiyet, yorulma çalışması için malzeme seçiminde en önemli kriter olup bunun kaynakla ilgili olarak özel anlamı vardır.

Isıl işlem ve çekme dayanımı nitelikleri ya da abrazyona, korozyona veya sürünmeye mukavemeti yükseltmek için başvurulan diğer işlemlerin etkileri, aynı şekilde yorulma niteliklerini önemli ölçüde değiştirebilir [82,85,86,90]. Bunun faydası kadar olumsuz etkileri de olabilir; fazla ısıtma ya da dekarbürasyon, yüksek sıcaklıkta ısıl işlemin sonucu olup yorulma mukavemetine ters etki yapmış olabilir. Özellikle yüzeylerin etkilenmesi önemli olmaktadır; şöyle ki yüzey koşulunun yorulma mukavemeti üstünde etkisi vardır. Aynı zamanda, tamamen homojen malzeme her zaman düşünülemez ve gerilme yoğunlaşmasının artmasına neden olan yüzey altı kusurlar, şüphesiz, mukavemet azalmasına yol açarlar [86,91-93].

Haddelenmiş, dökülmüş veya dövülmüş, ya da kaynakla imal edilmiş ürünler artık gerilmeleri içerirler. Bu gerilme sistemleri dış yük uygulaması olmadan mevcut olup, kalıntı basınç gerilmeleri tarafından dengelenmiş çekme bileşenleriyle bir denge halindedir. Bu nedenle, uygulanmış yüklerin meydana getirdikleri gerilmelerle ya aynı yönde, ya da ters yönde etki yaparlar. Bir artık basınç gerilmesi, çekme gerilmesine karşıt geldiğinde durum yorulma mukavemetinin lehine olup bu nedenle tane püskürtme, soğuk haddeleme veya çekiçleme gibi yüzeyde basınç gerilmeleri meydana getiren işlemler yorulma bakımından Şekil 3.3'te gösterildiği gibi yüzeyde çok etkili olurlar. Diğer taraftan, uygulanan çekme gerilmeleriyle aynı yönde etki yapan kalıntı çekme gerilmelerinin mutlaka bir zararlı durum yarattıkları iddiası da aynı ölçüde doğru olmayabilir [94]. Çok sayıda laboratuvar deneyi, kalıntı çekme gerilmelerinin ciddi yorulma mukavemeti azalmalarına yol açtığı anlamında zararlı olduğu iddiasını doğrulayamamıştır; oysa ki konu, deneysel açıdan hiçbir şekilde kapanmış değildir. Bununla birlikte, örneğin ısıl işlemle gerilim giderme işleminin, yorulma performansı dışında başka nedenlerle, gerekli bir işlem olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır [94]



Şekil 3.3. Çekiçlemenin etkisi [81]

3.2.5. Kaynaklı Birleşmelerin Yorulma Davranışı

Sanayileşmiş ülkelerde haddelenmiş çeliklerin %40-50'si kaynak edilebilir özelliklerde üretilir ve çoğunlukla kaynaklı konstrüksüyonlarda kullanılırlar. Bu konstrüksüyonlarda kaynak bağlantılarının sadece statik zorlamalar değil, aynı zamanda yorulma zorlamaları altındaki özellikleri de giderek önem kazanmaktadır.

Günümüzde endüstrinin hemen hemen her alanında kaynak bağlantıları kullanılmaktadır. Kaynak bağlantılarıyla elde edilen konstrüksiyonlar dinamik ve/veya statik zorlamalarla birlikte yorulma zorlamaları altında gösterdikleri davranış biçimleri de önem kazanmaktadır.

Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını etkileyen birçok parametre vardır. İlk bakışta gerilme yığılması (çentik etkisi), kaynak biçimi, çevrim sayısı, kaynak kalitesi, konstrüksiyonun dış biçiminin etkisi sayılabilir. Bunların dışında esas metalin kaynak kabiliyeti, yüksek ısı girdisi, bazı kaynak yöntemleri için dolgu metalinin saflığı ve dayanımı etkiler.

Kaynaklı konstrüksiyonlarda genellikle kullanılan malzemeler genel yapı çelikleridir. Tablo 3.1'de genel yapı çeliklerinin akma sınırı çekme dayanımı ve eğme değişken yorulma dayanımları verilmiştir.

Tablo 3.1. Genel yapı çeliklerinin mekanik özellikleri [17]

Akma Sınırı	Çekme Dayanımı	Eğme Değişken
σ_A	σ_K	Yorulma Dayanımı

Çelik Türü	kgf/mm ²	kgf/mm ²	⁰ _e D, kgf/mm ²
St 34	20 – 21	34 – 42	16 – 20
St 38	22 – 25	38 – 47	17 – 22
St 42	24 – 28	42 – 52	20 – 25
St 52-3	34 – 42	52 – 64	28 – 35

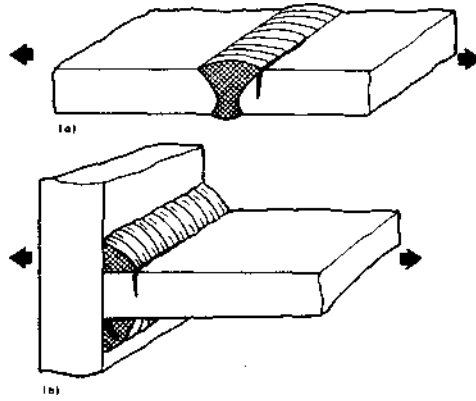
Tabloda bulunan St 52-3 çeliği aslında akma sınırları 55 kgf/mm, kopma dayanımları da 65 kgf/mm'ye ulaşabilecek yüksek dayanımlı yapı çeliklerinden sayılır. Yüksek dayanımlı yapı çelikleri de genel yapı gibi normalize edilmiş durumda kullanılırlar. Yüksek dayanımlar az miktarda alaşımlama (örneğin Mn,Mo,Cr ile) karbür yapıların katılması (V,Ti) veya azot ile sağlanır.

Yüksek dayanımlı yapı çelikleri için karakteristik olan dayanım sınırlarına ulaşmak ve aynı zamanda yeterli bir kaynak kabiliyeti sağlamak için ıslah edilmiş yapı çeliklerinin kullanılması zorunludur. Bu çelikler kimyasal bileşimleri bakımından düşük karbonludur ve katılan alaşım elemanları sınırlıdır. Yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çelikleri en çok %0,2, özel durumlarda %0,25 karbon içerirler. Alaşım elemanlarının (örneğin Mn, Cr, Ni, Mo) toplamı çoğunlukla %2'nin altındadır; bunlara ayrıca tane büyümesi engelleyen (V, Ti, Nb, Al, N, Zr) ve ostenit dönüşümünü geciktiren (B,N) ve tav sırasında kararlılığı arttıran elementler (V,Nb, Cu) az miktarda katılır. Yarı mamullerin ısıtma işlemi, su verme ve bunu takip eden 600–700°C arasında bir tavlama şeklinde, üretildikleri çelikhane veya haddehanelerde yapılır.

Yorulmada eksenel, eğilme ve burulma olmak üzere başlıca üç temel yükleme vardır. Yorulma sınırı eksenel eğilme ile saptandığından, pratikteki eğilme yükleri için ayrıma gerek yoktur. Ancak tam değişken eksenel yüklemeye maruz parlatılmış deney parçalarının yorulma sınırı, eğilmeye maruz deney parçalarının yorulma sınırının %85'i kadardır. Parlatılmış parçaların tam değişken burulmadaki yorulma sınırı ise eğilmedeki sınırın %58'i kadardır.

Kaynak bağlantılarının yorulma dayanımlarının geliştirilmesi genellikle kaynak sonrası yapılan işlemlerle sağlanır. Ancak elektron ışın kaynağında kaynak öncesi, dayanımı geliştirmek için işlem uygulanabilir. Kullanılan çelik malzemenin türüne göre ön ısıtma, kaynak sırasında sıcak tutma vb önlemler alıp uygun kaynak yöntemi ve katkı maddesi seçerek çok yüksek statik dayanım değeri elde edilmesine rağmen, yorulma dayanımları söz konusu olduğunda bu önlemler ancak dalgalı yorulma bölgesinin üst kısmında, yani ön gerilmelerin yüksek olduğu durumlarda anlam taşımaktadır.

Kaynaklı konstrüksiyonlarda yukarıda sözü edilmiş genel etmenler, kaynak edilmemiş konstrüksiyonlarda olduğu gibi hareket ederler; ancak bunlardan bazıları özel önem kazanır. Bu parçaların görünümü ve kullanılan kaynak birleşme şekli, yorulma davranışına egemen olma eğilimindedir. Kural olarak, daha sonra herhangi bir işlem görmemiş kaynaklı birleşmeler, kullanılan malzemeden daha az yorulma dayanımı gösterirler ve kırılma olduğunda bu, istisnalar dışında, bir çentik etkisinin doğal olarak meydana geldiği noktadan olur. Böylece, tekrarlanan çekme gerilmesine maruz bir enine alın kaynağı, kaynağın kenarı boyunca kırılır (Şekil 3.4a). Bir köşe kaynağı da ya aynı pozisyondan, ya da kaynağın kökünden kırılır (Şekil 3.4 b).



Şekil 3.4. Kaynaklı birleşmede çentik etkisi: (a) enine alın kaynağında yorulma kırılması, (b) köşe kaynaklarında kenar ve kök kırılması [81].

Kaynaklı konstrüksiyonların karakteristik yorulma davranışını açıklayıp bundan uygun önlem yöntemleri çıkartabilmek için kaynağın etkileri şöyle sınıflandırılabilir:

1. Geometrik çentik etkileri
2. Metalurjik etkiler
3. Rijidliğin etkileri

İlk iki etmen mevcut birleşmenin koşullarıyla, üçüncüsü de kaynaklı konstrüksiyonun tüm görünümüyle ilgilidir. Geometrik çentik etkileri kırılmada kendilerini çoğunlukla bir kaynağın kenar ya da kökünde yerel kesit değişme noktalarında Şekil 3.4'teki gibi gösterirler. Kaynağın kenarında kesit değişmesi ne kadar fazla olursa yorulma mukavemetinin azalması da o denli fazla olur; bu nedenle köşe kaynaklı birleştirmeler normal olarak alın kaynaklarına göre daha düşük mukavemetli olarak irdelenir. Bir köşe ya da alın kaynağında yanma çentiklerinin meydana gelmesi,

yerel çentik etkisini açıkça yükseltip mukavemet azalmasına götürür. Diğer kusurlar da, kırılmanın başlayabileceği tehlikeli geometrik çentikler oluşturabilir. Örneğin, bir alın kaynağının dibinde olabilecek bir nüfuziyet eksikliği, yüklemenin kaynak çizgisine yani kusur düzlemine dikey yönde olması halinde ciddi etki yapar. Öbür yandan birleşmenin kesit geometrisinde herhangi bir iyileştirme yorulma mukavemetini artırır; bu durum, alın kaynaklarında yüzeylerin tesviye edilip köşe kaynakları yüzeylerindeki her türlü aşırı dışbükeyliğin yok edilmesinin olumlu etkisini açıklamaktadır.

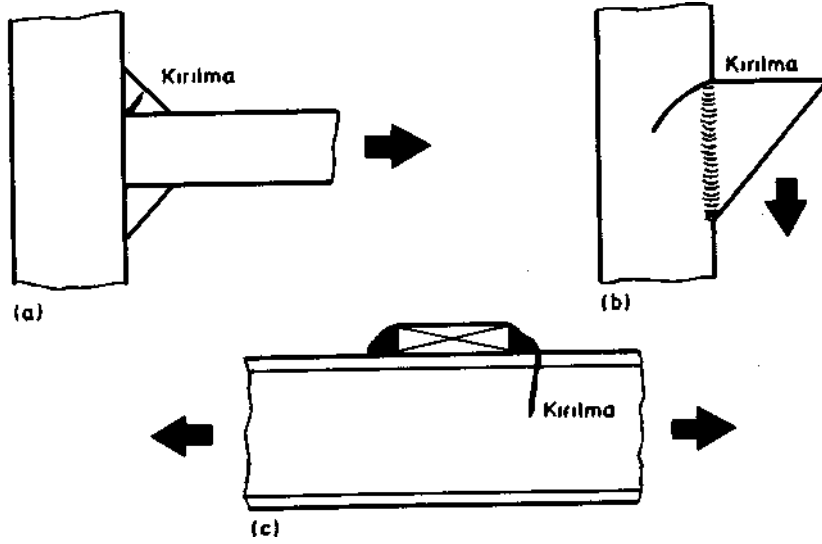
Kaynak banyosuna hemen komşu olan esas metal bölümü üzerine ısı etkisi, dokuda değişimler meydana getirir. Böylece, kaynağın kenarında mevcut olan yerel, geometrik çentik "ısının tesiri altındaki bölge" (ITAB) içinde bulunur. Bu bölge doğruca sıvı halden katılaşmış olduğu kadar su almaya meyilli ve fazla ısınmış malzemeden oluşur. Bundan dolayı geometrik çentik etkisiyle birlikte bir de "metalurjik çentik etkisi"nin varlığından söz edilir. Artan sertlik demirli malzemelerin ITAB'larının genel karakteristiği olup aşırı sertliğin var olması halinde kaynağın kenarında soğuk çatlama eğilimi meydana getirir. Keza sıcak çatlak da aynı yerde bazı koşullarda görülür. Çatlamanın herhangi bir şekli, yorulma mukavemetine kesin zarar veren bir sınır durumunu ifade eder. Metalurjik çentik etkisinin konstrüksiyonun yorulma açısından herhangi bir ciddi zayıflamasına bağlı olmadığı görülürse de deneyler bunun etkisinin, geometrik çentik etkisi kaynak talaşlı işleme veya taşlamayla düzeltilerek giderildiğinde ITAB çizgisi boyunca yorulma çatlama kalması için yeterli olduğunu göstermiştir [95].

Kaynaklı konstrüksiyonun rijitliği; civata ya da perçinli birleşmelerle kıyaslandığında, kaynaklı birleşmelerin gerilmeleri iletme verimi ve bu gerilmelerin birleşme alanlarında veya kaynaklı takviyeler bölgesinde mümkün olan yoğunlaşması nedeniyle bir ilave kırılma riskini meydana getirir. Bundan dolayı kaynaklı birleşmelerin yorulma mukavemetinin artırılması, bir tasarım (dizayn) olduğu kadar kaynak uygulaması sorunu da olmaktadır.

3.2.6. Yorulma Kırılmalarına Pratik Örnekler

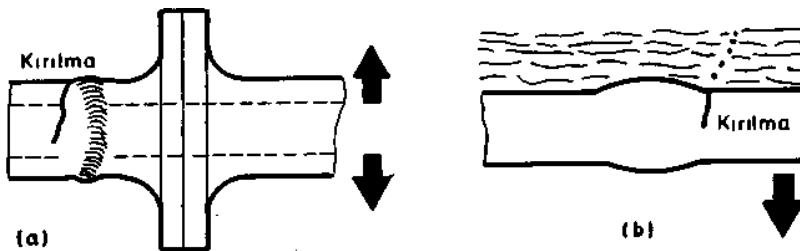
Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) uluslararası ölçekte yürütmüş olduğu bir araştırma sonuçlarını şu şekilde özetlemiştir: a) Birinci grup kırılma nedenleri, parçaların kötü tasarımı ya da ölçülendirilmesi olmaktadır. Böyle bir parçanın unsurları, ya da bunların birleştirildikleri kaynaklar, parçaların maruz buldukları çevrimsel gerilmelere dayanmak için yeterli boyutta olmayabilir şöyle ki bunlar üzerindeki çalışma yükü aşırı olur (Şekil 3.5a). Yine bir konstrüksiyonun bir

parçasının şekli kötü tasarlanmış olabilir şöyle ki bunda çentik etkisi yaratılmıştır (Şekil 3.5b), ve yine (maalesef bu duruma çok sık rastlanmaktadır) takviye veya fittings çalışan parçaya uygun önlem alınmadan kaynak edilmiştir (Şekil 3.5c). Böyle bir durumda, söz konusu kaynaklar herhangi bir gerilme iletmeseler bile, bu takviye ya da fittingslerin varlığı, konstrüksiyonun yorulma davranışını değiştirmeye yeterli olur.



Şekil 3.5. Birinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) aşırı çalışma yüklemesi, (b) fena tasarım ve (c) tali takviye veya fittings [81]

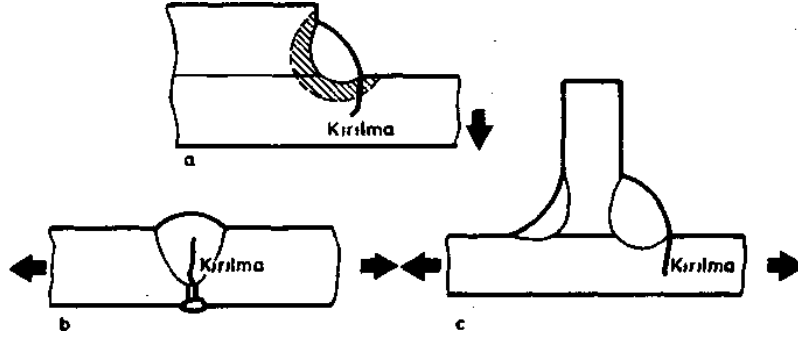
b) Kırılma nedenlerinin ikinci grubu, peşinen öngörülmuş çalışma koşullarından farklı koşullarla ilgilidir. Şekil 3.6a'da görüldüğü gibi bu koşullar anormal gerilmeleri (bunlar sadece kısa süreli fazla yükleme veya titreşim olsalar bile sonuç değişmemektedir), ya da Şekil 3.6b'de gösterildiği gibi gerilmelerin içinde oldukları çevrenin korozif etsini içerebilirler [90-93]. Bunun sonucu, kendileri de çentik gibi hareket eden çatlakların gelişmesi olmaktadır.



Şekil 3.6. İkinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) titreşim ve (b) korozif çevre [81]

c) Son olarak, bir üçüncü grup kırılma, hatalı kaynaklara bağlıdır. Hata çelikten ileri gelebilir, bunun kaynak kabiliyeti Şekil 3.7a'da belirtildiği gibi az olur; bu durumlarda kaynak işleminin

kendisinin metalurjik etkileri yine meydana çıkar. Kötü kaynak aynı zamanda iç yarıklar veya ciddi kalıntı gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı kırılmalar başarısız kaynak hazırlığından (Şekil 3.7b) ileri gelip bu hazırlık, konstrüksiyonun doğru birleştirilmesini ya da kaynağın tamirini olanaksız kılar; yine kırılmalar bir bitmiş konstrüksiyonda kaynağın Şekil 3.7c'de görüldüğü gibi hatalı şeklinden ileri gelmiş olabilmektedir.



Şekil 3.7. Üçüncü grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) yetersiz kaynak kabiliyeti, (b) kusurlu hazırlık ve (c) hatalı kaynak şekli [81]

Bu sınıflandırma hem kaynaklı parçaları içeren komple konstrüksiyonlar, hem de kaynakla tamir edilmiş ya da yüzeyi doldurulmuş parçalarla, yani birleştirme dışında bir amaçla metalin eklendiği parçalarla ilgilidir. Bu sonuncu durumla sık karşılaşılmaktadır, sert yüzey dolgusunun parçanın daha sonraki davranışı üzerindeki etkisi çoğu kez yeterince değerlendirilmez ve yapılan iş de, yukarıda bahsedilen maddelerden birine uygun olarak çoğu kez olumsuz sonuç verir.

Sonuç olarak, yorulma kırılması durumlarının sınıflandırılması, alevle kesme, metal püskürtme, yüzeyel su verme vb. kaynağa bağlı yöntemlerde kusurlu uygulama sonuçlarıyla ilgili konu başlıklarını içermektedir.

3.2.7. Yorulma Deneyleri

Çevrimsel gerilmeye tabi bir parçanın ömrünün birçok etmene bağlı olması sebebiyle ve bu etmenlerin etkisinin de kuramsal varsayımlarla peşinen görülemediğine göre parçanın olası davranışının sayısal bilgisi büyük ölçüde deneysel verilerin elde bulunmasına bağlı olacaktır. Bu nedenle yorulma deneyi, mühendislik araştırma ve geliştirmesinin çok önemli bir dalını oluşturup çok sayıda tekniğin kullanılmasını gerektirir.

Metallerin yorulma davranışının araştırılması ilk olarak, belli bir eğme momentine tabi bir döner çubuk numunenin kullanılmasıyla sistematik bir temele oturtulmuştur. Evrensel olarak onu ilk saptayan Wöhler'in adına bağlanan bu deney, beklenen ömrün uygulanan gerilmelerin büyüklüğüyle değiştiği gerçeğini ortaya çıkarmak üzere S - N ya da Wöhler eğrisi tarafından karakterize edilen gerilme - amplitüt/ömür ilişkisinin saptanma yolunu açmıştır. Bu temel ilişki, Wöhler deneyinde geliştirilmiş olan alternatif (değişken) eğme yükünden başka yükleme koşulları için de gösterilebilir; örneğin numuneler aksenal yüklemenin, burulma yüklemesinin ya da bileşik eğme ve burulma yüklemesinin çevrimsel şekillerine tabi tutulabilirler. Bu koşullardan herhangi biri, duruma göre, malzemenin yorulma niteliklerini değerlendirmek üzere deneysel olarak kullanılabilir [81,86].

Seçilen malzemedan çıkarılmış tam, çentiksiz numunelerle örneğin ısıtılma işleminin, yüzey işleminin ya da çevre - ortamın (korozyon, yüksek sıcaklık vb.) etkisiyle ilgili geniş bir yorulma verileri alanını saptamak mümkün olmaktadır. Bu yolla malzemenin temel yorulma nitelikleri gözlenebilir. Aynı şekilde basit çentik şekilleri "çentik duyarlılığı" nı ölçmek için deneye dâhil edilebilir ve çoğu kez bir çentiğin gerilme yoğunlaştırması etkisiyle yukarıda bahsedilen çevresel ya da maddi koşul değişkenlerini birleştirmek gerekli olmaktadır.

Yorulmanın genel karakteristiğini saptamak amacıyla, yorulmayla kırılma meydana getirmek için gerekli gerilme genliği ile gerilme çevrim sayısı arasındaki ilişkinin S - N, yani Wöhler eğrisiyle temsil edilebileceği belirtilmiştir. Sabit genlikte yükleme altında yürütülen araştırmaların çoğunluğu için S-N eğrisi, elde edilen sonuçları tanımlamada, özellikle çevre, çentik şekilleri, kaynaklı ayrıntılar vb. değişkenlerin genel etkisini değerlendirmek amacıyla kıyaslamalar yapıldığında, genellikle kullanılmaktadır. Her bir araştırmanın kesin hedefi, bununla birlikte, eğrinin çizilme şeklini saptayacak olup bazı durumlarda belli bir dayanma alanı içinde kalan sonuçların meydana getirilmesine özel dikkat sarf edilmesi gerekebilir. Böylece, azami 100.000 yükleme döngüsüne kadar sonuçlar, basınçlı kaplar gibi göreceli olarak seyrek yük değişmelerine maruz endüstriyel tesisler için en önemlileri olabilir; oysaki 10^6 döngü civarında sonuçlar daha çok yüksek yoğunlukta yük taşıyan kreyn, vinç ve köprülere uygulanır; döner makinelerde biriken gerilme döngüleri bu alanı 10^6 çevrimin çok ötesine uzatabilir. Deneysel yorulma sonuçları her zaman bir dağılma derecesi gösterecektir ve normal olarak bir ortalama değeri ifade eden S - N eğrisinin bu değeri tasarım amaçları için hayli yetersiz kalabilir. Belli gerilme düzeylerinde kaydedilen en düşük dayanma değerleri hesaba alınarak bir "alt sınır" gerilme/çevrim ilişkisini göstermek ve sonunda sonuçların bir istatistiksel analizini yapmaya olanak verecek yolla tasarlanmak üzere deney

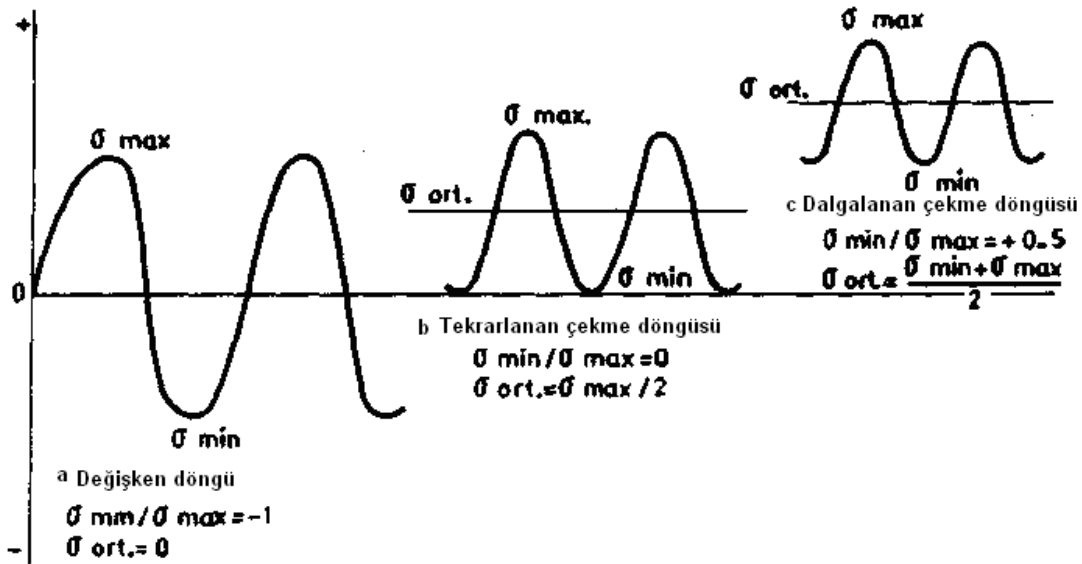
programının gereksineceği kritik tasarım uygulamaları için çizilebilir. Bundan dolayı yorulma deneylerinin sonuçları, araştırmanın doğasına bağlı olarak, değişik yollarla gösterilebilir. Bununla birlikte araştırmanın amacının genel tasarım hedefleri için veri saptamak olması halinde, bir başka değişkenin, yani ortalama gerilmenin hesaba katılması gerekebilir. Böylece, bir ortalama sıfır değerli değişken gerilmenin bazı tasarım sorunlarına uygulanabilir olmasına karşın başkaları, bir hareketsiz artı hareketli yük sistemiyle karşılaşıldığı hallerde olduğu gibi ya bir pozitif veya negatif ortalama gerilme ortaya çıkmıştır. S-N gösteriliş şekline dönülerek belli bir numune tipi üzerinde deneylerden bir eğriler ailesi böylece türetilebilir ki her eğri farklı bir minimum gerilmenin (σ_{min}), maksimum gerilmeye (σ_{max}) oranını ifade eder. Çoğu kez analiz için seçilen üç oran şunlardır:

Değişken gerilme; $\sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$, ortalama gerilme = 0

Tekrarlanan çekme gerilmesi; $\sigma_{min} / \sigma_{max} = 0$, ortalama gerilme = $\sigma_{max} / 2$

Dalgalandan çekme gerilmesi; $\sigma_{min} / \sigma_{max} = 0,5$, ortalama gerilme = $(\sigma_{min} + \sigma_{max}) / 2$

Bu oranlar grafik olarak Şekil 3.8'de gerilme/zaman şeklinde görülür.

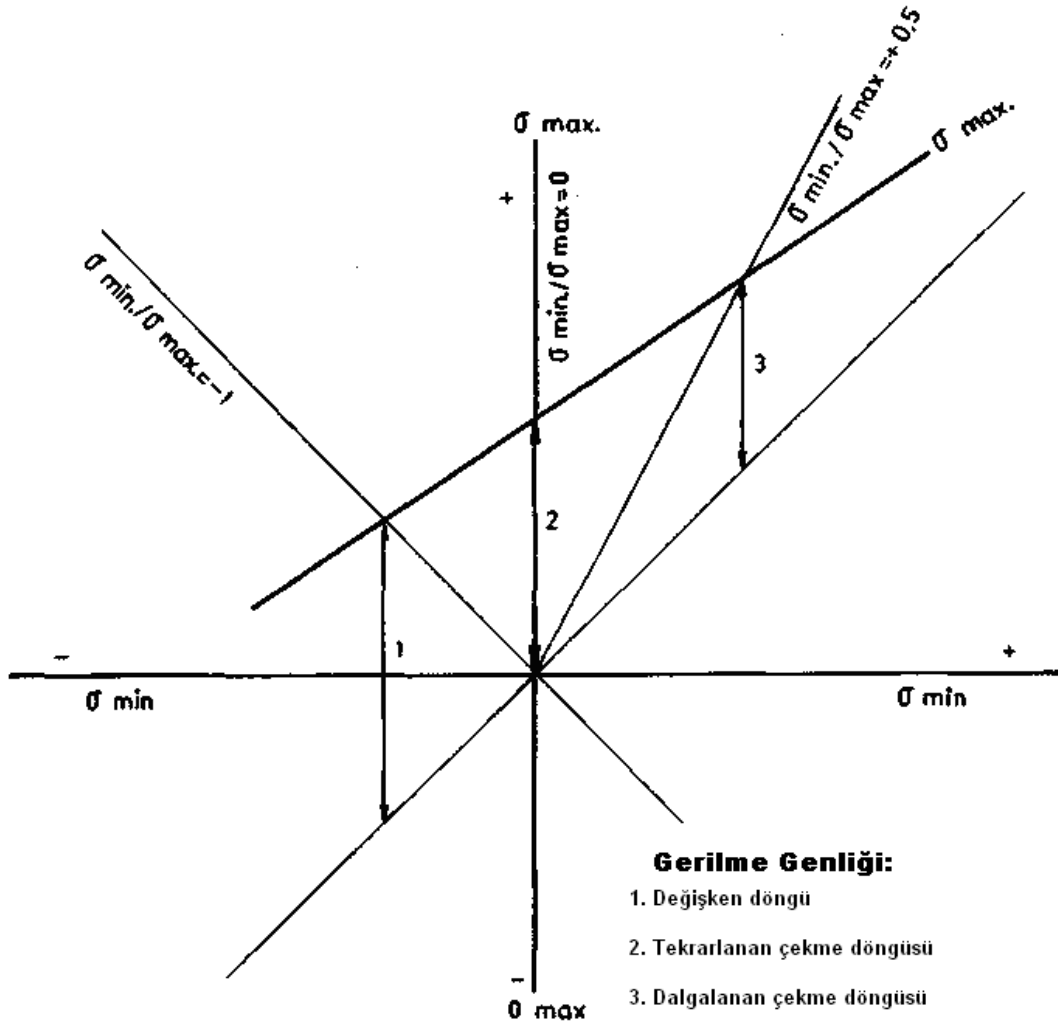


Şekil 3.8. Çeşitli ortalama gerilme düzeyleriyle yorulma gerilimi çevrimleri

Deney numunelerinin aynı olmaları ve bir sabit dayanıklılık değerinin belirtilmiş olması koşuluyla her bir gerilme oranı altında saptanmış yorulma mukavemetleri birbirleriyle kıyaslanabilir. Bunu

yapabilmek için minimum gerilmeyi maksimum gerilmeye bağlayan bir diyagram (Goodman ya da Gerber diyagramı) çizilir veya alternatif olarak, gerilme alanı diyagramından faydalanılabilir. Bunlardan ilki Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Bu diyagram nitel olarak genellikle elde edilen sonuç türünü ifade eder. Başka bir deyişle, ortalama gerilme arttığında, σ_{max} da artar ama gerilme alanı daralır. Uygulanan yükün esas itibariyle çekme yönünde olması halinde gerilme alanının diyagramın elastik gerilme koşullarını temsil eden alan üzerinde değişmesi fazla olmaz.

Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW)'nün XIII No.lu Komisyon'u kaynak deneyi alanında bir çalışma yapmış ve deney sonuçlarının gösterimi konusunda, yorulma dayanımının deneysel olarak saptanmasında tekdüzelik sağlamak üzere bir özel süreç önermiştir. Komisyonun ilgileri, 2×10^6 döngüde mukavemetin bir uygun değer olacağı merkezinde olmuş olup bu sürecin başka ihtiyaçlara uygulanabileceği bir gerçektir. Esas itibariyle sistem en az 2×10^6 döngüde kırılmamış üç numuneyi gerektirmektedir. Bununla birlikte bu, çatlak yokluğunu da sağlamalıdır ve çevrimsel yüklemenin bitiminde, görünürde kırılmamış numune statik olarak da denenecektir. Deneme aynı tip ve genel plastik şekil değiştirme meydana getirmeye yeterli büyüklükte yük altında olacaktır. Bu yolla her türlü küçük yüzey çatlakları hemen meydana çıkar ve eğer görülürse, numune başarısız olarak kabul edilir. Bunun üzerine önceki değerden daha düşük gerilmede tekrarlanan deneylere girişilir, bunlarda da amaç 2×10^6 döngüde çatlak meydana getirmemiş üç sağlam numune elde etmektir.



Şekil 3.9. Değiştirilmiş Goodman diyagramı.

BÖLÜM 4. DOLGU KAYNAKLARI

4.1. İşlemin Esasları

4.1.1. Tanımlama

Dolgu, istenen özellikler veya boyutlar elde etmek üzere bir metalin yüzeyine dolgu metali koymak şeklinde tanımlanır. İşlem genellikle, başka türlü bir mühendislik uygulaması için tüm gerekli nitelikleri sağlayamayacak bir parçanın ömrünü uzatmak veya korozyona uğramış metalin yerini almak için kullanılır. Dolgu, tam sağlamlık özellikleri sağlamaktadır.

Dolgunun abrazyon mukavemetine yardımcı olduğu yerlerde bu genellikle sert dolgu olarak anılır. Bu terim yine, darbe mukavemeti veya alçak sürtünme nitelikleri için bir sağlam veya tufal dökmeyen (pullanıp kalkmayan) dolgunun yapıldığı yerlerde kullanılır. “Sert” adı sözlük anlamı yerine burada “dayanıklılık-kalıcılık”ı ifade eder. Sert dolgunun amacı uzatılmış çalışma ömrü olduğuna göre, sertliğin aşınma mukavemeti için her zaman geçerli bir gösterge olmadığı bilinmelidir.

4.1.2. İşlemin Prensipleri

Dolgular genel olarak ark ya da gaz kaynak yöntemleriyle yapılır. Her iki süreçte de el, yarı veya tam otomatik teknikler kullanılabilir. Yapışma; ergime ya da metalurjik bağlantı ile olur.

Dolgu malzemesine ait özellikler ayrıntılarıyla verilmiştir. Bu alaşımların sağlayabilecekleri önemli özellikler şunlardır:

1. Sertlik

- a. Makrosertlik (kitle sertliği)**
- b. Mikrosertlik, ya da heterojen (homojen olmayan) yapının bireysel bileşenlerinin sertliği**
- c. Sıcak sertlik, yani sıcaklığın zayıflatıcı etkisine mukavemet**
- d. Sürünme mukavemeti; statik olarak yüklenmiş cisimlerin görünür sertliği üzerine sıcaklıkta zamanın etkisini göstermektedirler.**

2. Abrazyon mukavemeti

- a. Alçak gerilme koşulları altında
- b. Yüksek gerilme taşlaması koşulları altında
- c. Farklı abrazifler ve hızların yüksek basma gerilmeleriyle birlikte oyulma koşulları altında

3. Darbe mukavemeti

- a. Tekrarlanan darbe altında plastik deformasyona mukavemet (akma mukavemeti)
- b. Darbe altında çatlama mukavemet (hem kopma dayanımı hem de süneklikle ilgili)
- c. Basma mukavemeti
- d. Basma sünekliği

4. Isıya mukavemet

- a. Temperlenmeye mukavemet
- b. Sıcakta mukavemeti koruma (sıcakta sertlik dahil)
- c. Sürtünme mukavemeti (b'ye ek olarak zaman faktörü)
- d. Oksitlenme veya sıcak gaz korozyonu mukavemeti
- e. Isıl yorulma mukavemeti

5. Korozyon mukavemeti

6. Sürtünme nitelikleri ve kaynağa eğilimler

- a. Sürtünme katsayısı
- b. Pullanma (tufal dökme) eğilimi
- c. Yüzey filmleri
- d. Kayganlık
- e. Plastiklik

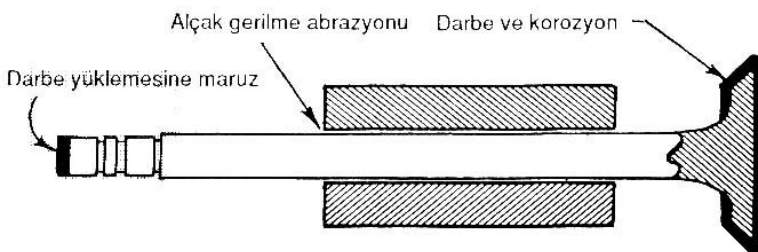
Dolgudan beklenen esas sonuç, çalışan alanın uzun ya da uzatılmış ömrüdür. Daha önce ayrıntılarıyla belirtildiği gibi aşınma koşullarının çeşitli ve alabildiğine karmaşık olması nedeniyle, çalışma ile nitelikler arasında basit bir karşılıklı ilişki kurmak zordur. En iyi yaklaşım, çalışma koşullarının büyük dikkatle analizi ve uygun fiziksel, mekanik veya aşınma deney verilerinin mantıklı uygulamasıdır. Aşınma tipinin saptanması, işin en önemli yanıdır. Başarısı da gözlemcinin deneyimine bağlıdır.

Gerçekten, dolgu metallerinin seçimine esas oluşturan mühendislik prensipleri kısmen anlaşılmıştır. Tipik uygulamalar için bazı dolgu metalleri kabul edilebilir olarak kaydedildiklerinden, bunlar aşağıda irdelenmektedir.

Bu kriterlere göre dolgunun yararları şöyle sıralanmaktadır:

1. Tam gerektiği yerde aşınma ya da korozyon mukavemetini pekiştirme
2. Çok sert bileşimler ve aşınmaya dayanıklı alaşımların kolayca kullanılmaları
3. İşyerinde kolayca uygulama
4. Pahalı alaşım elementlerinin ekonomik kullanımı
5. Sağlam bir yatakla pekiştirilmiş bir sert yüzey tabakası
6. Aşağıdaki hususlar, kullanıcıya ekonomik çıkarlar sağlar:
 - a. Daha uzun çalışma ömrü
 - b. Bakım ve parça değiştirmenin azaltılması
 - c. Aşınmış parçaların kurtarılması
 - d. Daha ucuz temel malzeme kullanımı

Dolgunun kalitesi çok geniş ölçüde uygulama, dolgu malzemesinin cinsi ve kaynakçının maharetine göre değişebilir. Örneğin; bir supapın, Cr-Co-W alaşımının oksii-asetilen kaynağı ile dolgusunun (Şekil 4.1) mükemmel olması



gerekir. İmalatta kaynak çubuğunun özenli kalite kontrolü gerekli olup yaptığı iş kabul edilebilir hale gelene kadar kaynakçının uzun eğitim döneminden geçmesi lazımdır. Korozyona dayanıklı dolgular daha da zorlaştırıcıdır şöyle ki yüzey mükemmel olmakla kalmayıp (bir kusur muhtemel bir felaketli hasara götürebilecek hızlı koroziif atakla sonuçlanabilir) yüzeye doldurulan malzemeye aşırı karışma ya da bileşim değişiminden korunacaktır. Bu karışma, mutlaka korozyona dayanımı zayıflatır.

Şekil 4.1. Korozyon, darbe ve abrazyona maruz motor supaplarına uygulanan tipik dolgular [74]

4.1.3. Dolgu Kaynaklarının Yarattığı Sorunlar

Her ne kadar ayrı bir konu olarak irdeleniyorsa da dolgu kaynakları, genel kaynak tekniği ve sorunlarından ayrı olarak düşünülemez. Gerçekten, bu sorunlar, dolgu kaynağında da aynen mevcut olup bunlar esas itibariyle “kaynak”ın beraberinde getirdiği “ısı”dan ileri gelmektedir.

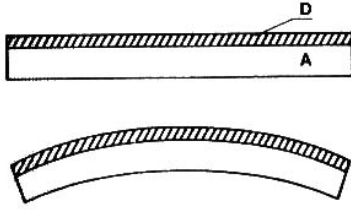
4.1.3.1. Isıl Gerilmeler

Bir yüzey dolgu uygulamasının başarısı bazen iç gerilmeler düzeyinin büyüklüğü ve dış gerilmelerin makaslama, basma veya çekme gerilmeleri olmalarına bağlıdır. Kaynak işleminden arta kalan gerilmeler, çalışma sırasında meydana gelenlere karşı koyabilir ya da bunlara eklenebilirler ki böylece, kullanım sırasında çatlağa karşı koyma ya da bunu ağırlaştırma eğiliminde olabilirler.

Dolgular genellikle gerilimi giderme işlemine tabi tutulduklarından engellenmiş ısıl genleşme ve çekmenin sonucu olan artık ısıl gerilmeler müthiş olabilirler. Bu gerilmelerin çarpılmalar (distorsiyonlar), çatlama ya da başka sıkıntılar yaratıp

yaratmaması geniş ölçüde dolgu ile ana metalin mukavemet ve sünekliğine bağlıdır.

Dolgu kaynağında çoğu kez esas metalle dolgu metali birbirinden farklı niteliktedir. Genleşme katsayıları, elastikiyet modülleri değişiktir. Bu nedenle çekme, her iki metalde aynı olmayacaktır, buna ek olarak da dolgunun çekildiği yüzey derhal ısınıp alt kısım soğuk kalır. Soğuk bir A ana metali üzerine bir D ergimiş dolgu metali çekildiğinde üst yüzey daha çok genişecek ve parça, Şekilde 4.2’de görülen dışbükey hali alacaktır. Soğumada olay tersine döner (alt tabakalar ısınırken üsttekiler soğur) ve dolgu tabakasının üstün çekmesi parçayı



içbükey hale getirir (Şekil 4.3).

Şekil 4.2. Isınma sırasında dışbükey oluşum [74]

Şekil 4.3. Soğuma sırasında içbükey oluşum [74]

Ana parça dolgudan önce bir ön ısıtmaya tabi tutulmuşsa şekil değiştirme daha az olur. Ana parça çok kalınsa, şekil değiştirme azalır veya hiç olmaz, ama parça içinde gerilmeler kalır (artık gerilme).

Dolgu alaşımları içinde östenitik çelikler en sağlam, çekme ve basmada yüksek süneklik ve mukavemet gösteren çeliklerdir. Martensitik çeliklerin, süneklikleri düşükse de, çekme ve basma mukavemetleri yüksektir. Bu çelikler üzerine dolgu yapılmış tabakalar soğuduklarında, yukarıda gösterildiği gibi zayıf ana metali eğeceklerdir. Yüksek karbonlu çelikler ise basmaya kuvvetli ama çekmeye zayıf ve gevrek görünürler. Yumuşak bir kalın ve şekil değiştirmeyecek esas metal üzerinde çekme mukavemeti muhtemelen soğuma sırasında aşılacak olup çatlaklar meydana gelecektir.

4.1.3.2. Karışma ve Bulaşma

Kaynak banyosunda karışan birbirinden farklı alaşımlarla kaynak, değişen bileşimler ve muhtemelen metalurjik yapılardan doğan bir dizi metalurjik sorunu ortaya çıkarır. Belli bir kaynak dikişine melez bileşim, ergimiş esas metal miktarının tüm dikiş hacmine oranından hesaplanabilir.

Bu oran, dağlanmış bir kesitin alan ölçümlerine dayandırılabilir. Bazen, yöntemden beklenen davranışa dayanan tahminler memnunluk verici olurlar, ama kritik uygulamalar, özellikle korozyon mukavemetinin istenmesi durumları, daha kesin bilgi ve yüzeyde doldurulan metal bileşiminin kontrolünü gerektirir. Sınırlı demir içeren demir dışı dolgu metalleri, örneğin; bir çelik malzeme üzerine doldurulduklarında ciddi şekilde bulaştırılmış olurlar. Bazen bu bulaşmayı asgaride tutmak için bunların arasına farklı bir alaşımdan bir tampon tabaka gerekir. İyi mühendislik pratiği, korozyon mukavemeti veya diğer kritik özellikler üzerine bileşimin etkisi konusunda bilgiyi, karışmanın nicel tahminini ve belki de kaynaktan sonra müsaade edilebilecek soğuma temposu ve bunun metalurjik değişmeler üzerindeki etkisinin bilinmesini gerektirir.

Elle yapılmış bir ark kaynağında birinci tabaka muhtemelen %50 esas metal, %50 de dolgu metalinden oluşacaktır. Dikkat ve özenle bu, %30 esas metal, %70 dolgu metale indirilebilir. İkinci tabaka böylece esas metalden %25 ile 10; üçüncü tabaka da %12 ile 3 arasında oluşacaktır.. Sıradan tozaltı ve gazaltı ark kaynakları aynı karışma değerlerini verebilirler. Seri bağlanmış iki elektrot arasında bir ark veya kaynak banyosunu bir ilave soğuk dolgu metaliyle besleme, esas metalin daha az ısınması ve karışmanın %10 gibi düşük bir miktara inmesini sonuçlandırır. Kısa bir arkla gazaltı kaynağı (DADK-doğru

akım düz kutup, elektrot-) karışmayı %5'e kadar indirebilir. Bütün yöntemlerle elektrotun salınımı, karışmayı azaltma eğilimini gösterir. Kaynak dikişinin biçim ve takibeden tabakalarda bunun yeri de karışmayı etkileyebilir. Geniş kalın dikişler tercih edilir.

TIG, modifiye MIG ve oksii-asetilen kaynağı, asgari karışıma oranlarının arandığı yerlerde, örneğın çelik üzerinde bazı demir dışı dolguda, genellikle seçilir. Dolgu malzemesinin en düşük ergime noktasını sağlaması halinde oksii-asetilen yöntemi az çok hiç metal karışımı olmadan iyi bir metalurjik bağlantı sağlar, ama bu birleşmede karbürlenme veya karbondan yana fakirleşme olabilir [96-99].

Korozyona dayanıklı dolgu metallerinin kullanıcısı muhtemelen kendi öz hesaplarını yapmak ve karışım bileşimlerini kontrol etmek durumunda olacaktır, ama bu faktörler özgül uygulamalar için sert dolgu elektrodlarının tasarımında çoğu kez telafi edilmişlerdir. Buna rağmen, süreç ve teknikler (ark voltajı, akım şiddeti, tabaka sayısı ve dikiş çevresi) mümkün olduğu kadar tasarım koşullarına ve elektrot üreticisinin önerilerine yakından uyacaktır.

Çok sık yapılan bir yanlışlık, karbonlu çelik üzerine doldurulmuş haliyle bir sert dolgu metalini değerlendirip bunu, gerekli incelemelere yer vermeden doğrudan bir %13 manganezli çelik üzerine kullanmaktır. Dolgu metalini, soğumada martensite dönüşmeye bağlı bir havada sertleşen tipten ise, ana metalden manganez azalması doldurulmuş kaynak metalinin östenitini o denli stabilize eder ki bu artık normal olarak sertleşmez. Bunun yerine, yüzeyde manganez içeriğini asgariye indirmek üzere (yüksek karbonlu dolguda istenmez) çok tabaka uygulaması veya manganez azalmasına izin veren formülde elektrot kullanılması tavsiye edilir.

4.1.4. Korozyona Dayanım İçin Yüzey Dolgusu

Her ne kadar her iki uygulamaya ait çok sayıda teknik değerlendirme mevcutsa da korozyon mukavemeti üzerine, abrazyonunkine göre, çok daha geniş bir literatür bulunmaktadır. Ayrıca, çok sayıda da kesin değişkenler vardır [86,90-93].

Sadece bir alaşımın bileşiminde veya bir korosif çevrede ufak bir fark önemli olmakla kalmayıp aynı zamanda bir alaşımın içyapısında değişimler de korozyon davranışı üzerinde derin etkide bulunabilirler. Bundan başka, çevre gerilme korozyonunda olduğu gibi mekanik faktörlerle çalışmayı karmaşık hale getirebilir. Dolayısıyla korozyon mukavemeti için kaynaklı dolguyu tasarlayanların aşağıda belirtilecek hususları dikkatle incelemeleri gerekir [74].

Korozyon mukavemeti faktörleri, karışmanın etkisi ve kaynakla metal ilave edilmenin hız ve maliyeti, korozyona karşı dolgunun seçim ve uygulamasında etken durumdur olacaktır. Büyük tankların içlerinin kaplanmasında olduğu gibi, çoğu kez büyük alanlar söz konusu olup bunlar otomatik kaynağın hız ve ekonomisini gerektirirler. Elle kaynak genellikle yüzeyin mahalli tamiri veya kaplamalı levhaların birleştirilmeleri işleriyle sınırlı kalır. Çok tabakalı dolgular tek tabakalısına göre daha pahalı olduğundan, çok daha yüksek alaşımlı elektrot seçimiyle karışmanın uygun şekilde telafi edilebilmesi halinde tek tabakalı bir dolgu tercih edilir. Bununla birlikte, çok tabaka gerekebilir ve belki esas metalin hemen üstüne bir koruyucu tabaka (tampon) gerekebilir. Korozyona karşı dolguların çoğunda paslanmaz çelik, nikel esaslı alaşımlar veya bakır esaslı alaşımlar kullanılır.

Karışma-bulaşmanın denetimi seçilen donanım ve kaynak tekniği ile yapılan seri bağlanmış ark kaynağı (ark, ana metalle elektrot arasında değil de iki elektrot arasında tutuşur) ve belki de buna ilaveten bir üçüncü “soğuk” dolgu teli, arkın enerjisini ana metalden çok dolgu metalini ergitmeye yoğunlaştırır. %10 kadar aşağı bir karışma elde edilebilir, oysaki tek elektrotlu tozaltı kaynağında bu, %30 ile 50 olur. Seri ark kaynağında metal terk etme oranları da daha yüksek olur. Aynı karışma muhtemelen MIG kaynağı ile de olur ama bir ek “soğuk” dolgu teli ile ve arkı bir önceki dikişe yönlterek bunu %10’a indirmek mümkün olur. Karışma yine DATK (elektrot +) kısa ark tekniği kullanılarak kısılabılır. TIG yönteminin elverişsizliği alçak metal terk etme oranı olmakla birlikte bunda karışma iyice sınırlıdır ve ayrıca saçtan kesilmiş bantların dolgu metalı olarak kullanılabilme avantajına sahiptir. Bazen bu, tel halinde elektrotla elde edilemeyen dolguya olanak verir. Başka bir yöntem de tozaltı kaynağında dolgu metalı olarak paslanmaz çelik bantları kullanır ve böylece geniş dikişler ve yüksek metal terk etme oranları elde edilir.

Bütün bu teknikler geniş, yassı ve olabildiğince kalın dikişleri amaçlayacaktır; bu arada dikişte hem ince tüy kenarlar (karışma ve çatlama eğilimi), hem de cüruf tutabilecek dik kenarlardan kaçınılacaktır. Aralıklar ve alçak alaşımlı alanlardan kaçınmak için de dikişler bir öncekine bindirilecektir. Bir salınlı kaynak kafası geniş dikişler yapmada yardımcı olur.

Korozyon tercihen küçük kusurların üstüne çöker. Yüzeyin mükemmelliği bir zorunluluktur. Çatlaklardan, karınca ve cüruf girmelerinden kaçınmak, çoğu abrasif çalışmadakinden çok daha önemlidir. Yüzeyin son kontrolü ihmal edilmemelidir. Bu, genel olarak bir sıvı penetrant yöntemiyle yapılır, şöyle ki; magnetik toz yöntemleri, magnetik olmayan östenitik alaşımlara uygun değildir.

Kaynaklı konstrüksiyonun ısı öyküsü bir basit korozyona dayanıklı parçanınkinden muhtemelen çok daha karmaşıktır. Bu nedenle de, takibeden kaynak dikişlerinin yeniden ısıtmasından çalışma sıcaklığının etkisine kadar işin her yönü dikkatle değerlendirilmelidir.

Örtülü elektrot kaynağı, pozisyon dışı dolgularda ve hacim sınırlamalarının başka yöntem kullanılmasına olanak vermediği hallerde geniş ölçüde kullanılır. Dikişler bir öncesinin yarısının üstüne binecek olup ark, ana metal üzerine değil, kaynak banyosuna yönelecektir.

4.1.5. Abrazyon Dayanımı İçin Yüzey Dolgusu

Abrazyon mukavemeti, yüzey dolgusunun ilk ve en önemli uygulaması olmaktadır. Dolgu metalleri, aşınmaya neden olan koşulların dikkatli analizi ve bu metallerin en ekonomik kaynak yöntemine uygunlukları esasına göre seçilmektedirler. Seçimde etkili olan, abrazyon ve darbe faktörleri olup ısı ve bazen korozyon da mevcut olabilir. Hatta yorulma da bunların içinde olabilir. Her ne kadar, daha önce gördüğümüz gibi, sertlikle abrazyon mukavemeti arasında bir kaba ilişki varsa da sertlik, güvenilir bir değer göstergesi olmamaktadır. Aynı şey alaşım içeriği için de doğrudur. En iyi yaklaşım, abrasifin doğası, sertliği, keskinliği ve sağlamlığı gibi çeşitli faktörleri, işe karışan gerilme düzeylerini, birlikte mevcut olan darbe miktarını, dolgu tabakasına sağlanan desteğin türünü, uygulanan gerilmenin cinsini (çekme, basma veya makaslama), çalışma sıcaklığı ve görünürde önemli çevresel koşulları iyice saptamaktır; bundan sonra dikkatli kontrol altında koşullar için bu faktörlere karşı koyma kabiliyeti esası üzerinde dolgu alaşımları kıyaslanacaklardır.

Ayrıntılarıyla teorik esasları irdelenen abrazyonu bu kez pratik açıdan, belirgin olarak farklı olan üç tipe ayırmak mümkündür. Bunlar; (1) Alçak gerilme kazıma abrazyonu veya erozyon, (2) Yüksek gerilme öğütme abrazyonu ve (3) Oyulma abrazyonu olup şöyle örneklenebilirler: a) Bir oluktan kayan kum veya kumlu bir toprak üzerinde çalışan saban demiri; b) Abrazif maden parçalarının metal yüzeyler arasında ezildiği bir toplu (sert küreler) öğütücü içindeki oluşum; c) Keskin kayaların dalıcı dişleri ve dönel konkasör yüzlerini oyma işlemi. Bunlara karşılık gelen atölye işlemleri; (1) Bir yumuşak bez üzerinde gevşek abrazifle parlatma, (2) Laplama ve (3) Bir kesici takım veya taşlama çarkı tarafından metal kaldırılmasıdır. Bu üç koşul çoğu kez abrazyona dayanıklı malzemeleri aynı sıraya göre dizerse de buna önemli istisnalar ve sıralamayı ters döndürme durumları da vardır.

Sertlik genel olarak erozyon koşulları altında, özellikle bir alaşımın bireysel bileşenlerinin mikrosertlikleri değerlendirildiğinde bir fayda unsurudur. Tungsten karbürü, sert yüksek kromlu dökme demirler ve martensitik dökme demirler bu tür aşınmaya dayanmakta mükemmeldirler.

Nispeten yumuşak, ama sağlam alaşımların daha sert malzemeleri eskittiklerine dair öğütücü abrazyon örnekleri vardır. Darbe de mevcut olabilir ve aşınma ile darbenin çeşitli birleşimlerini karşılamak üzere, sağlam östenitik manganez çeliğinden (hava çelikleri dâhil) martensitik demirlere kadar genel olarak, uygulamaya göre, kullanılmaktadır [74].

Ayrıca oyma abrazyonu da sertlik yerine sağlamlığı tercih edecektir. Çok yüksek zorlamalar ve darbe muhtemelen işe dahil olup ağır darbeyi karşılamak üzere sağlamlık, seçime egemen olacaktır. Kitlesel parçalar kırılmaya dayanmak için yeterince sağlam olacak ve yüzeyleri daha yüksek abrazyon dayanımlı ama gevrek alaşımlarla korunduğunda tasarım öyle olacaktır ki üst dolgu uygun şekilde desteklenmiş ve çekme veya makaslama yerine basmaya gerilmiş olsun.

Bu koşullar altında sert yüzey dolgusu çok önemli ekonomiler sağlayabilir. Bazen koşullar o denli ağır olur ki, büyük sağlamlık zorunlu olabilir. Bu durumlarda östenitik manganezli çelik tercih edilen malzeme olup yüzey dolgusu, aşınmış çeliğin yerine uygun manganezli çelik dolgu metalini kullanma sorunu haline gelmektedir.

4.1.6. Abrazif Aşınma Durumlarında Kullanılacak Malzemeler

Burada iki tip malzeme incelenmelidir. Abrazif aşınma istenildiği zaman abrazif olarak kullanılacak malzeme ile abrazyonun önlenmesi gerekip de abrazif maddelerin var olmaları halinde birbirleri üzerinde kayacak malzemeler.

Abrazif malzemenin, iyi bir kesme yeteneğine sahip olabilmesi için kriter sertlik ve keskinliktir. Sertlik kriteri, abrazifin aşındıracağı malzemedan daha sert olması gerekir anlamına gelmekle beraber etkili kesme bakımından sertlik farkının çok fazla olması gerekmez. Örneğin; sertliği aşındırılacak malzemeninkine kıyasla %50 fazla olan bir abrazif çok daha sert bir başkası kadar abrazif aşınma oranı sağlar. Abrazif madde, aşındırılacak malzemedan az miktarda daha sert ise keskin köşeleri plastik deformasyon ve abrazyonla yuvarlanır ve dolayısıyla kendi abrazif karakteri zayıflar. Bu nedenle çok sert bir abrazif kullanmak, abrazyon oranını artırmak için değil, bu oranı uzun müddet sürdürebilmek için faydalıdır.

Bir abrazifte aranan ikinci özellik keskin olmasıdır. Dolayısıyla yüksek zorlamalar karşısında keskin nokta ve köşeler göstererek dağılan gevrek abrazifler daha faydalıdır ve bu nitelik, metal olmayan abraziflerin tercih sebebini açıklamaktadır.

Söz konusu niteliklerin her ikisi de metal olmayan sert malzemelerin abrazif olarak en uygun olduklarını gösterir. Zira bunlar hem en sert olanlardır hem de gevrek kırılma ile dağılırlar. Gerçekten daima bu abrazifler kullanılır. Alüminyum oksit ve silisyum karbürü 2000 kg/mm^2 üstünde bir sertliğe sahip olup ayrıca gevrek ve ucuz olmaları itibariyle tercih edilirler. Bor karbürü ile elmas daha sert olmakla beraber çok pahalıdır. Tablo 4.1’de bazı malzemelerin sertlik değerleri görülmektedir.

Ahşap gibi nispeten yumuşak malzemeler için abrazifin çok sert olmasına gerek yoktur. Zımpara taşı ve kum marangoz zımpara kağıtlarında geniş ölçüde kullanılırlar. Kum püskürtme işleminde abrazif miktarı bol olduğundan abrazifin bozulması sorun değildir. Bu itibarla kum, çok sertleri hariç, metalleri ve metal olmayan malzemeleri aşındırmada kullanılır.

Tablo 4.1. Abrazif olarak kullanılan malzemeler

Malzeme	Bileşim	Sertlik (kg/mm^2)
Elmas	C	8000
Bor karbürü	B₄C	2750
Silisyum karbürü	SiC	2500
Titanium karbürü	TiC	2450
Korundum, alüminyum oksidi	Al₂O₃	2100
Tungsten karbürü	WC	1900
Zımpara taşı	Al₂O₃.3Fe	1350

	O.3SiO₂	
Zirkonyum oksidi	ZrO₂	1150
Kuartz (Silisyum oksidi, kum)	SiO₂	800
Cam	Silikat	~500

Birbirleri üzerinde kayan sistemlerde abrazyon etkilerinin önlenmesi konusunda yine sertlik birinci derecede önemlidir. Abrazyon aşınmaya dayanması gereken yüzeyler, abrazyon partiküllerden daha sert olmalıdır. En çok bulunan abrazyon dünyada yaygın katı cisim olan silisyum taneleridir. Metallerde elde edilen sertliğe yakın sertlikte olup aşındırmasına dayanacak metal cinsleri ise sayılıdır.

Tablo 4.2. Abrazyona dayanıklı malzemeler

Malzeme	Sertlik (kg/mm ²)
Yatak çeliği	700-950
Takım çeliği	700-1000
Krom (elektro kaplama)	900
Semante çelik	900
Nitrürlenmiş çelik	900-1250
Tungsten karbürü (kobalt bağlantılı)	1400-1800

Kayan sistemlerde abrazyon maddeler yok edilmelidir. Bu da, en iyi şekilde, devreden yağı filtre ederek elde edilir. Bununla beraber birbirleri üzerinde

kayan malzemelerden birisinin sert, diğ erinin yumuşak olması, koruyucu önlemi arttırır. Zira, yumuşak malzeme abrazyif partikülü toplar ve kendi içine gömer. Sert çelik yüzeylerle (şaft-mil yüzeyleri) en çok kullanılan yumuşak yatak malzemeleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Yataklar için tavsiye edilen yumuşak malzemeler

Yatak malzemesi	Sertlik (kg/mm ²)	Asgari şaft sertliği	Sertlik oranı
Kuruşun esaslı yataklar	15-20	150	8
Kalay esaslı yataklar	20-30	150	6
Alkali ile sertleştirilmiş kuruşun	22-26	200-250	9
Bakır-Kuruşun	20-23	300	14
Gümüş (kaplama)	25-50	300	8
Kadmium yatak	30-40	200-250	6
Alüminyum alaşımı	45-50	300	6
Kuruşun bronz	40-80	300	5
Kalay bronz	60-80	300-400	5

Dıştan giren abrazyif maddelerin yanısıra kayma esnasında ortaya çıkan partiküllerin meydana getirdikleri zararlar da göz önüne alınmalıdır. Bunlar yumuşak metalden kopacaklarına göre onun sertliğine sahiptirler. Sertlik, sert metalinkinin üçte birinden fazla olmamalıdır. Tablo 4.3'te gösterilen malzemeler bu koşula uyarlar. İçte ortaya çıkan bu abrazyif partiküllerin zararları, iriliklerine bağlıdır. Küçük partiküllerde zarar az olur, zira yağ filmi kayan yüzeyleri birbirinden uzaklaştırır. Bundan dolayı, büyük parça kopmalarını önlemek gerekir.

Büyük parça kopması çoğu zaman malzemenin yüzey yorulma kırılmasından meydana gelir. Bu nedenle seçilecek metalin iyi bir, yorulmaya karşı koyabilme

özelliği bulunmalıdır. Bir bakımdan bu özellik, kırılgnalık nedeniyle yukarıda sözü edilen yüksek sertlik koşulunu değiştirir. Östenitik alaşımlarda, Ni sünekliği artırır, Mo elastikiyet sınırını yükseltir. Alaşımsız çelikler üzerinde ilk tabaka martensitik ve kırılgnandır; bu şekilde kullanılması tavsiye edilmez. Kullanılışı, metal üstüne metal, sadece yuvarlama veya çarpma durumlarında yapılır. Abrazyona mukavemet aranıp darbelerin daha dayanıklı bir alaşım kullanmasına engel olduğu durumlarda bu çelikler, doku, alaşım düzeyi (genellikle az alaşımlı) ve kaynağın ısıl koşullarına bağlı aşınma mukavemetine sahiptirler. İy yapı ferritten; ferrit-beynit, beynit, beynit-martensit ve sonra martensite geçer. Yenileme (build-up) yüzeyaltı tabakalarında ve çok ağır olmayan metal üstüne metal sürtünmesinde, özellikle yuvarlanmada (tekerler) kullanılır. Abrazyon dayanıklılıkları azdır. Darbelere iyi karşı koyarlar.

4.1.7. Darbeye Karşı Yüzey Dolgusu

Darbe hafif (kinetik enerjinin yutulup elastik davranışa geri döndürüldüğu hal), orta (elastik davranışın görüldüğu, ama bir miktar plastik deformasyonun da kaçınılmaz olduğu hal) ve ağır (en kuvvetli malzemelerin ya kırılacağı ya da deformasyona uğrayacağı hal) olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma dolgu alaşımlarının mantıklı bir seğıimine olanak verir. Martensitik çelikler ve östenitik manganez çeliği darbe sınıflandırmasında aynı seviyededirler.

Tipik bileşimler yaklaşık %15 krom içerirler. Bunlar martensitik çeliklerin yüksek basma akma mukavemetinden yoksun olup dolayısıyla hafif darbelere daha az uygundur, ama buna karşılık ısıl gerileme çatlaması ile ılımlı darbeye daha dayanıklıdır.

Bazı uygulamalar, çelik haddehane makineleri ve demiryolu hatlarında olduğu gibi, ağır darbe ile birlikte metal-metal aşınmasını gerçekleştirirler. Esas malzeme çoğu kez %13 manganez çeliği olup dolgu, hırpalanmış ve çökmüş

alanları eski haline getirmek için yapılır. Bu uygulamalar için nispeten yüksek akma mukavemetli bir manganez çeliği dolgu metali aranır.

Bazen bir manganez çeliği dolgusu bir karbon çeliği ana metal üzerine yapılır. Bu iş çok dikkatle yapılmalıdır, zira karışmış metallerin ergime bölgesi sert, nispeten gevrek bir martensitik çeliğe dönüşebilir. Bununla birlikte bu uygulamaların bazıları tamamen başarılı olmaktadır.

Manganez çeliği kolayca akar ve akma mukavemetini aşan yükler altında çalışma sertleşmesine uğrar. Kayma, her kristal içinde bir veya daha fazla düzlemde olur, yönü de tane yönelmesi tarafından tayin edilir. Düzlemleri bir uygulanmış kuvvetin yönünde olan taneler daha kolaylıkla yönlenip ilk önce bunlar kayar (gerilme yönüne 45° 'de olanlar ilk önce akarlar). Bunlar sertleşince, akma öbür tanelere doğru yönelir, bunların her biri kendi yönünde hareket eder.

Östenitik çeliğin çalışma sertleşmesi çoğu kez martensit oluşmasına bağlanır. (Yüzeyde martensit varlığını gösteren) bir magnetik yankı alınan yerlerde bu, standart analiz aralığının dışında bir bileşimden ileri gelmiştir. Bu, çoğu kez, ısıl işlem den sonra dövme veya dökme parçalar üzerinde ince şekilde oluşur. Çalışma sertleşmesinin tam mekanizması henüz açıkça anlaşılamamıştır. Bununla beraber tane parçalanması veya kristallografik yönelmesinin önemli olduğu ileri sürülmüştür [74]. Bunlar sertleşince, akma öbür tanelere doğru yönelir, bunların her biri kendi yönünde hareket eder.

Manganez çeliğinin akma sınırı, yumuşak sünek karbon çeliklerinkinden daha yüksek, ama nispeten gevrek, sertleştirilmiş çeliklerinkinden azdır. Akma noktaları aşıldığında bunun şekil değiştirebilme kabiliyeti bir başka olumlu nitelik olup uygulanmış gerilme, şiddetli doruğunu şekil değiştirme işinde

absorbe etme olanağı verir. Bu davranış akma sınırını, akışa daha dayanıklı düzeylere yükseltir, akış için bir boyut payının düşünülmesi gerekebilir. Akışa mukavemet ile akma sınırı birbirlerine sıkıca bağlı olup bunları artırmak için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir.

Yeniden ısıtıldığında, dönüşümün başlatılması için çok daha fazla nokta ortaya çıkar ve gevrekleşme daha hızlı gerçekleşir. Soğuk çalışılmış metal, dönüşümün başlatılması için noktalar meydana getirebilir. Bu soğuk çalışmanın derinliği çoğunlukla sığ olup kaynak sırasında soğuk çalışılmış yapı genellikle ark tarafından nüfuz edilip geçilir. Bununla beraber, en üst niteliklerin arandığı uygulamalarda, kaynak işlerinden önce bütün soğuk çalışılmış metalin taşlanması veya oksijenle kaldırılması gerekir.

Kaynakta ısıdan kaçınmak mümkün değildir; beceri ve teknik sayesinde bu ısınmanın etkisi asgariye indirilebilir (ama tamamen yok edilemez); ancak uygun süreçlerle, örneğin ana metali yaklaşık 325°C altında tutarak, bu etki azaltılabilir.

Östenitik manganez çeliğinin darbe özellikleri yüksektir. Bazen kesin değerlerin elde edilmesi güç olmaktadır. Şöyle ki; deney çubuğu hazırlanması sırasında numuneler etkilenirler. Charpy deneyi numuneleri bazen makinede kırılma yerine eğrilir ve sürüklenirler. Bir V-çentiğinin talaşlı işlenmesinin ardından, yerel çalışma sertleşmesi dolayısıyla fevkalade yüksek sertlik değerlerine varılır. Çentikler özenle taşlanmaktadır [74].

Darbe mukavemeti ayrıca ısı işleminden etkilenir. 38 °C'de dökme manganez çelikleri, oda sıcaklığındaki darbe mukavemetlerinin %50 ile 85'ini muhafaza ederler. Sıvı hava sıcaklığında (-183 °C), profillendirilmiş alaşımlarda çok az sağlamlık kalır. Demiryolu hatları, madencilik ve bayındırlık hizmetlerinde

denenmiş bütün atmosferik sıcaklıklarda, dökme manganez için (ferritik çeliklerle kıyaslandığında) çok değerli bir güvenlik faktörü olmaktadır.

Çatlak ilerlemesi ve yayılmasına yüksek mukavemet, ani kırılma yerine önceden tehlike işareti vermesi anlamında olup yorulma çatlaklarının saptanması ve tam kırılma meydana gelmeden önce kullanımdan çıkarılmasına olanak sağlar. Bu, özellikle demiryolu işlerinde çok belirgin bir avantajdır.

Her ne kadar %12 manganezli çelik bazı aşınma tiplerine dayanıklı ise de, her zaman en iyi seçim sayılmaz. Bu çeliğin seçiminde, beklenen sağlamlık, onun abrazyon mukavemetine göre daha ağır basar. Ağır darbenin beklenmesi ya da darbeye karşı büyük bir güvenlik faktörünün gerekmesi halinde, östenitik manganez çeliği en mantıklı seçim olur.

Çok darbe (ve beraberinde çalışma sertleşmesi) nin mevcut olduğu yerlerde, %12 manganezli çelik başka metallere o denli üstündür ki, bunun performansı yanlış olarak perlitik çelikleri -hatta çalışma sertleşmesi olmadan- aşındırdığını göstermiştir.

Manganezli çeliğin korozyona mukavemeti yoktur. Kolaylıkla paslanır ve korozyonla abrazyonun bir arada olmaları halinde çok erken aşınıp gider.

4.1.8. Sert Dolgular İçin Esas Metaller

Çoğu kez sert doldurulmuş parçalarda ana metali yapısal tasarım ya da şekillendirme kıstasları belirler. Böyle malzemelerin kaynaklanabilirlikleri ve niteliklerinin başlıca sorun olduğu çok durum mevcut olup burada ana metal seçiminde oldukça serbesti vardır.

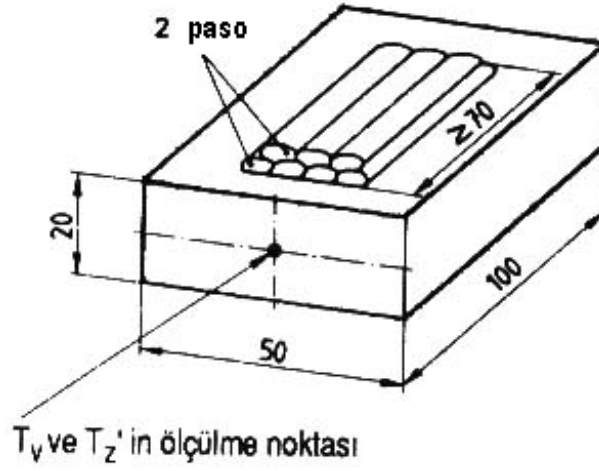
Basit bir işlem için en iyi ana metal seçimi genellikle alaşımsız karbon çeliğidir. Bunun pratik alanı AISI-SAE 1020'den 1095'e kadar (% 0,20 ila 0,95 karbon) uzanır, ama karbon oranı arttıkça kaynak zorluklarının da arttığı göz önünde tutulmalıdır.

İyi bir kaynak kabiliyeti ve kaynaktan sonra iyi bir mukavemeti birleştiren elverişli bir ana metal 1045 çeliğidir. Çelik temiz ve oksit giderilmiş durumda ise, kaynak güçlükleri en az düzeyde olur. 1045 çeliğinin mikroyapısı genellikle ferrit ve perlitten oluşmaktadır.

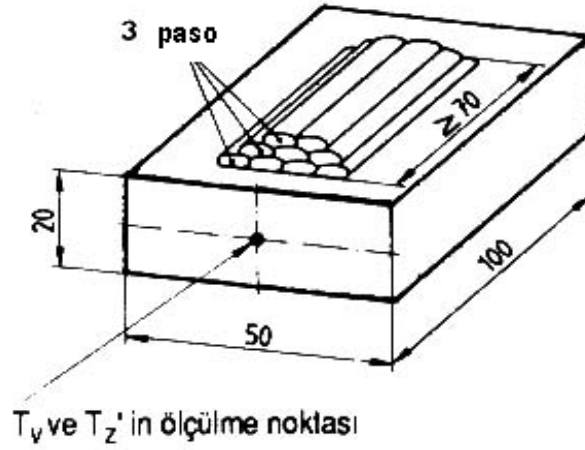
Perlit miktarı, karbon oranı artırılarak yükseltilebilir ve perlitin kendisi dahi çok az alaşım ilavesiyle daha sert hale getirebilir. Ancak bu değişiklikler ana metalin kaynak kabiliyetini bozma eğilimine neden olurlar. Ana metalin mukavemetinin yükseltilmesinin gerektiği haller dışında bu yola gidilmemelidir.

4.1.9. Sertlik Düzeyinin Saptanması

Sertlik düzeyinin saptanması için gerekli sertlik deneyleri, gaz kaynağı için Şekil 4.4'te ve ark kaynağı için de Şekil 4.5'te gösterilen deney parçaları kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 4.4. Gaz kaynağı için deney parçası (4-A1) [74]



Şekil 4.5. Ark kaynağı için deney parçası (4-A2) [74]

Kaynaklar, Tablo 4.4'te gösterilen çaplar ve dolgu malzemesi üreticilerinin önerdiği ön ısıtma ve kaynak parametreleriyle yapılmaktadır.

Tablo 4.4. Sertlik deneyinde deney parçasının kaynağı için dolgu metali çapı

Yöntem	ϕ (mm)
Gaz kaynağı	4
Elle ark kaynağı	4
TIG kaynağı	4

Dolu tel elektrodlarla MIG kaynağı	1,2
Özlu tel elektrodlarla MIG kaynağı	1,6
Özlu elektrodlarla metal-ark kaynağı	2,4
Tozaltı kaynağı	4

Ön ısıtma sıcaklığı (T_v) ile pasolararası sıcaklık (T_z), DIN 32524'te belirtildiği gibi ölçölmektedir.

Dolgu, gaz kaynağında iki (Şekil 4.4), ark kaynağında da üç sıra (Şekil 4.5) halinde yapılmaktadır.

Kaynak akımının dalgalanmalarına imkan vermek üzere, belirtilmiş üst sınırın %10 altında bir akım şiddeti ile çalışılmaktadır.

Elektrotlar 50 mm uzunluğu geçmeyecek seviyeye kadar ergitilir. Deney parçaları yerde yatay pozisyonda salıntısız olarak kaynak edilir. Her sıradan sonra kaynak yönü tersine çevrilir.

Deney parçasının yüzeyi pürüzsüz olarak talaşlı işlenir. Doldurulmuş malzemenin üst tabakası ise, sadece yeterince geniş bir deney alanı elde edilene kadar taşlanır.

4.2. Perlitik Çelikler

Perlitik çelikler yüzey dolgusu için bazen kullanılırlarsa da bunların daha uygun ve önemli kullanımı, aşınmaya daha dayanıklı malzemelerle dolgudan önce karbonlu çeliklerin “ölçüye getirilmesidir”. Bunlar çoğu kez hem ekonomik hem de bir parçayı eski boyutlarına getirmek için iki veya üç tabakadan çoğu gerektiğinde ölçüye getirme kaynaklarının mantığına uygun düşmektedirler. Çünkü, aşınmaya daha dayanıklı alaşımlarının çoğu göreceli pahalı ve birkaç kalın tabaka çekilmesine olanaklı değildir.

Amaca uygun ölçmeye getirme alaşımlarının kullanılması önemlidir. Çünkü mukavemeti düşük çelikler kullanım sırasında akabilirler ve üstteki tabakanın kopmasına yol açabilirler. Dolayısıyla bir ölçüye getirme malzemesi yeterli akma mukavemetine sahip olarak dolguya uygun destek olmalıdır. Ayrıca, ani kırılmalara karşı korumak ve sağlamlığa yardımcı olmak üzere uygun süneklığe de sahip bulunacaktır. Kaynak açısından da çok sayıda iyi kalitede tabakayı kolaylıkla dolduracaktır. (Düşük karbonlu martensitik çelikler de, perlitik çelikler gibi, ölçüye getirmede kullanılır. Östenitik ana metal üzerinde, benzer östenitik ölçüye getirme dolgu malzemesi kullanılır.)

%0,4 ile 1,00 karbon içeren çelikler, kaynak sıcaklığından itibaren normal soğumada geniş ölçüde perlitten ibaret olacaktır. Bunlar ucuz olup kolaylıkla dolgu yapılabilirler. Bununla birlikte bunlar ve benzeri düşük alaşımlı çelikler, karışmaya ve soğuma temposuna hassas olup sertlik ve diğer nitelikleri oldukça iyi fark edilir.

Perlitik çelikler son kaplama tabakası olarak kullanıldıklarında, aranan özellik genellikle sürtünme aşınmasına dayanımdır. Talaşlı işlenebilme ve dövülebilme bazen tercih sebebi olur. Alaşım içeriğinin, soğumada bir miktar martensit oluşturacak kadar yüksek olmaması halinde, doldurulan metal, yüzey dolgusu uygulamaları için ekonomik olmaz.

4.3. Kaynak Sürecinin Seçimi

4.3.1. Genel Kriterler

Hız ve düşük maliyet nedeniyle ark kaynağı süreçleri genellikle tercih edilmektedirler. Bununla beraber, bazı sert dolgular hala oksii-asetilen kaynağı ile uygulanmaktadır. Tozaltı sert dolgu kaynağında, alaşım elementleri, doldurulan metale flux (toz) tarafından geçebilmektedirler. Karbon-ark yöntemi de kullanılmaktadır.

Östenitik manganez çeliğı gibi fazla ısınmaya duyarlı çelikler üzerinde oksii-asetilen ve TIG kaynaklarından kaçınılmalıdır. Bu iki yöntem başka çelikler üzerinde başka dolgu malzemeleriyle kullanılabilir [97]. Oksii-asetilen ve karbon-ark süreçleri küçük, hassas parçalarda ve sadece ince bir dolgu tabakasının uygulanacağı yerlerde kullanılır [98].

Oksii-asetilen ve karbon-ark süreçlerinden biri, yüzey dolgusunun demirsiz olmasının gerektiğı hallerde demirdışı krom karbürü alaşımlarının doldurulması için tavsiye edilir. Dikkatli bir çalışma ile alaşım, çelik ana metal üzerine nüfuziyet veya çelikle alaşımlama olmadan damla damla sevkedilebilir. Bu alaşımların demirle karışımları halinde korozyon ve abrazyon mukavemetleri azalır [99].

Metal-ark yöntemlerinin sert dolgu için bir olası sakıncası, meydana getirdikleri derin nüfuziyettir. Ana metal ne kadar çok ergirse, dolgu malzemesi onunla o kadar çok alaşım yapar. Derin nüfuziyet genel olarak bir sakıncadır, doldurulan sert dolgunun kalınlığını artırır.

Abrazif koşulların özellikle ağır olmadığı ve daha ucuz bir malzemenin tercih edildiği durumlarda kesme ağızlarında krom karbürleri kullanılır. Bu malzemeler kolaylıkla kendilerini bilerler ve tungsten karbürdekilere göre daha düzgün daha az sürtünmeli ağızlar sağlarlar.

Ağır darbe yüklenmesinin mevcut olduğu uygulamalarda ne tungsten, ne de krom karbürü uygundur. Yorulma ve darbeye maruz ağızlara yarı östenitik ve östenitik manganez çelikleri en uzun ömrü sağlarlar. Bu malzemelerde doldurulmuş ağızlar, kendi kendilerini bileyici olmazlar, sağlam ve sünek olan yuvarlatılmış profil alarak aşınırlar. İri kayalarla temas halinde olan dalıcı dişlerden adı geçen karbürler yorulup giderler. Buna karşılık yarı östenitik veya östenitik manganez dolguları çalışma sertleşmesine uğrar, abrazyona dayanıklı hale gelir ve bu arada yüzeyin altındaki daha yumuşak malzeme darbe kuvvetlerini karşılar.

4.3.2. Tek Bir Yüzeyi Korumak İçin Seçim

Tek bir yüzeyi koruma gereksinimi, sert dolgu uygulamalarının büyük çoğunluğunu oluşturur. Bunda amaç; bir keskin kenar veya bir temas yüzeyi üzerinde aşınma düşüncesi olmadan yüzeyin aşınmasını önlemekten ibarettir [100].

İyi parlatılabilen bir düşük sürtünmeli yüzey (örneğin saban demiri veya toprağı deviren yan bıçağı) aranılabilir veya pürüzlü bir yüksek sürtünmeli yüzey (örneğin tarak-drag saplama bağlantıları) istenilebilir.

Genellikle yerçekimi ile malzeme transferinde (bir kattan alt kata ve aynı katta meyilli tutularak) kullanılan oluklar (düz ya da helezonik) genel olarak sert doldurulur. Genellikle, darbe yapabilecek iri kayalar ve diğer şeyleri içermeyen

ince taneli maden veya toprak nakledildiğinde krom karbürü gibi sert malzemeler tercih edilir. Ağır, kitlesel parçaların böyle bir oluğa devrilmesi ya da yüksek darbe kuvvetleri meydana getirebilecek durumlar halinde ise yarı östenitik veya manganez çeliklerine başvurulmaktadır.

Vidalı konveyörler ve yer delici aletler, normal olarak karbürler gibi sert malzemelerle korunurlar. Paslanmaz çelikler, su pompalarında korozyon mukavemeti sağlamak ve erozyona karşı korumak üzere ve iyi darbe mukavemetini gerektiren yerlerde kullanılırlar.

4.3.3. Temas Halindeki Yüzeyleri Korumak İçin Seçim

Bu uygulama tipi normal olarak, abrazyon, darbe, sürtünme ve korozyonun çeşitli kombinasyonlar altında metal-metale aşınmaya sebep olur. Dolgu malzemesi düzgün olarak aşınmalı, bir düşük sürtünme katsayısına sahip olmalı ve sarma veya pullanma eğiliminde olmamalıdır. Bu uygulama sınıfına kesin olarak uygun olmayan bir sert dolgu tipi, tungsten karbürüdür.

Çoğu kez, yüzeylerden biri, öbürüne göre daha çok korunmayı gerektirir. Bu durumlarda bir yüzey bronzla kaplanabilirken, öbürü kaplamasız kalır. Böylece bronz, kendini feda ederek öbür yüzeyi korumuş olur.

Yüksek karbonlu elektrotlar, yağlama ile çalışacak şaftları eski ölçülerine getirmede kullanılır. Doldurulmuş yüksek karbonlu metal, taşlı işlendiği ya da taşlandığında, bir yumuşak çelik elektrotu ile dolgu yapılan metalden kolayca elde edilebilen yüzeyden çok daha düzgününü sağlar. Yüksek sıcaklıklarda çalışacak yataklar krom karbürleri, paslanmaz çelikler ve yüksek kromlu ve nikelli alaşımlarla doldurulmaktadır.

Korozif koşullar altında çalışan parçalar krom karbürler ve paslanmaz çeliklerin bazıları tarafından korunurlar. Krom karbürle doldurulmuş yüzeyler, kum ve çamurda çalışan parçalarda iyi sonuç vermektedirler.

4.3.4. Seçimde Pratik Kriterler

Daha önce, herhangi bir deneyimin bulunmadığı yeni bir uygulamada bir sağlam, sünek sert dolgu malzemesi önerilebilir. Bu tür denemelerde yarı östenitik çelikler önerilmektedir. Bu malzemelerin kavlanmadan veya darbeden etkilenmemeleri halinde, daha sağlam krom karbürlerinden biri, takibeden denemede kullanılabilir. Nispeten daha sert alaşımlar, abrazyon mukavemetini geliştirmek üzere denenebilir.

Daha önceki sert dolgu başarısızlıklarının dikkatle incelenmesi, daha üstün malzeme seçiminde çok değerli ipucu verir. Bu konuda kısmen aşınmış parçalar üzerinde çalışma, anlamlı bilgi sağlayabilir. Şöyle ki, tamamen aşınmış bitmiş parçalar, aşınmanın hangi yolda geliştiği konusunda az şey söyler. Nitekim eğer parça üzerinde sert dolgu kaplamasından bir şey kalmamışsa, bunun abrazyonla mı, yoksa darbe ile mi aşınıp gittiğini saptamak olanaksız olur.

Belli bir sert dolgu uygulamasında en uygun kaynak sürecinin ve kullanılacak kaynak tekniğinin seçimi, alaşımın seçimi kadar önemli olabilir. Çalışma gereklerinin yanı sıra iş parçasının fiziksel karakteristikleri, ana metalin metalurjik özellikleri, sert dolgu alaşımının şekil ve bileşimi, doldurulan kaynak metalinden beklenen nitelik ve kalite, kaynakçının becerisi ve işlemin maliyeti, bir ark kaynağı süreci seçilirken dikkate alınmaktadır.

4.3.4.1. İş Parçası Faktörü

İş parçasının boyut, biçimi ve ağırlığı kaynak süreci seçimini daima etkiler. Sert yüzey dolgusu ya da eski ölçüsüne getirilmeyi gerektiren çok büyük, ağır olmakla nakli zor veya olanaksız olan parçalar durumunda, parçanın bulunduğu yere kolayca taşınabilen donanımı kullanan yöntem başvurulur. Bu tür uygulamalarda, özellikle ulaşılması nispeten güç yerlerin dolgusu söz konusu olduğunda kaynak daha çok elle ya da yarı otomatik olarak yapılır. Buna karşılık, kaynak makinelerine kolayca taşınabilen ve büyük miktarlarda işlenecek parçalar en etkin ve ekonomik olarak otomatik yöntemlerle doldurulabilir. Örtülü metal ark ve açık-ark kaynağı, gerekli düzeneğin kolayca bulunması açısından, tozaltı, TIG, MIG ve plazma ark yöntemleri şekilleriyle çok uygun olarak yapılabilir [101].

4.3.4.2. Esas Metalin Özellikleri

Kimyasal bileşim, ergime sıcaklığı aralığı ve genleşme karakteristikleri, bir kaynak sürecinin seçimini etkileyen ana metalin başlıca nitelikleridir. Ana metalin çatlamaya, oksitlenmeye veya yüksek sıcaklıklarda sıvanmaya yatkınlığı göz önüne alınabilmelidir. Böylece de hızlı ısınmanın ısıl çatlamaya yol açması durumunda, uygun ön ısıtma ve bir ılımlı ısınma temposu sağlayan bir kaynak süreciyle birlikte tercihen etkinlikten fedakârlık etmeden uygun bir ön ısıtma seçilecektir. Ayrıca, kaynak sıcaklığından itibaren soğuma temposu da denetim altında tutulacak olup artık gerilmeleri; kaynak sonrası gerilim giderme işlemiyle azaltılabilir.

4.3.4.3. Sert Dolgu Alaşımının Şekil ve Bileşimi

Sert dolgu alaşımının fiziksel ve metalurjik nitelikleri bunun hangi şekillerde elde edilebileceğini saptar. Daha sert, daha gevrek alaşımlar, çekme tel halinde imal edilemezler ve dolayısıyla bunlar toz karışımları halinde bir karbon çeliği boru tel içine doldurulurlar ve böylece sürekli tel elektrot gerektiren MIG, açık ark veya tozaltı kaynaklarında kullanılırlar. Tel, çıplak dökme çubuk veya çıplak boru çubuk, TIG kaynağında ilave metal olarak kullanılabilir [101,102].

4.3.4.4. Dolgu Metalinin Nitelik ve Kalite Gerekleri

Sert dolgu metalinin nitelikleri ve kalitesi her şeyden önce sert dolgu alaşımına bağlıdır. Diğer etkin faktörler ana metal bileşimi, kullanılan kaynak süreç ve yönetimi, dolgu uygulanan tabaka sayısı ve diğer kaynak karakteristikleridir. Yukarıda sözü edilmiş olan ana metal “karışması” süreç ve tabakaların sayısına göre değişecektir. Karışma oranı arttıkça sertlik, aşınma mukavemeti ve istenen diğer özellikler azalır. Bazen, bileşimi denetim altında tutmak için bir yastık (tampon) ana tabakası ana metalle sert dolgu alaşımının arasına çekilir. Karışmayı en aza indirme amacına ek olarak çoğu kez bir tampon tabakası, sert dolgu alaşımı ile ana metalin farklı genleşme-büzülme katsayılarının meydana getirebileceği ters etkileri telafi etmede kullanılır.

4.3.4.5. Kaynakçının Becerisi

Kalite gereklerini hem kaynak süreci hem de kaynakçının becerisine bağlamak esastır. Örneğin; nispeten küçük alanlar üzerinde, ağız ve girintilerde yüksek kalitede dolgular elle TIG kaynağı ile elde edilebilir [103,104] ve %10 gibi küçük

bir karışma ile ince tabakalar terk edilebilirse de oldukça yüksek bir kaynakçı becerisi ve kaynak işleminin yakın denetimi mutlaka gereklidir. Buna karşılık otomatik tozaltı bir asgari kaynakçı becerisini gerektirir ve yüksek metal doldurma oranını sağlar, ama nüfuziyet derin, karışma da çok olur ve sonuç olarak da alaşımın tüm niteliklerini gerçekleştirmek için bir ara tampon tabakası veya sert dolgu alaşımından iki veya daha fazla tabaka çekmek gerekebilir.

4.3.4.6. Seçim Faktörlerinin Birbirleriyle İlişkileri

En az üç seçim faktörü, esas metal, sert dolgu alaşımının bileşim ve şekli ve kaynak süreci birlikte koordine edilmektedir.

4.3.5. Niteliklerin Denetlenmesi

Bir kez bir özgül sert dolgu metali seçildikten sonra alaşım içeriği ve doldurulan metalin soğuma temposu, istenilen abrazyon mukavemeti ve darbe özelliklerini elde etmek için özenle ayarlanacaktır. Alaşım içeriği başlıca seçilen malzeme metali doldurmak için kullanılan süreçler ve dolgu metali ile ana metalde oluşan karışma ile saptanır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Genel

Bu çalışmada, Devlet Demiryollarında kullanılan trenlerin aşınmış teker bandajlarına farklı elektrot ve kaynak yöntemleriyle dolgu kaynağı uygulanmış, daha sonra bu malzemelerin aşınma ve yorulma davranışları karakterize edilmiş, dolgu kaynağının bakım ve tamir amaçlı olarak tren

tekerleklerinde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Aşınmış olan tekerlere dolgu kaynağı yapılarak ilk hacmin ve şeklin sağlanması bir çözüml olarak görölmektedir. Dolgu kaynağı uygulaması, parçaların değişik amaçlarda yüzeilerin aynı veya farklı ilave malzemelerle kaplanması olarak tanımlanabilir. Bu işleme mekanik aşınmalar veya kimyasal etkiler sonunda gerek duyulabileceği gibi bu tür zorlama ve etkilere maruz kalabileceği önceden bilinen parçaların, dayanımlı farklı malzemelerle örtölmesi amacına dönük olarak da başvurulabilir.

Bu tez çalışmasında, endüstride yaygın olarak kullanılan farklı firmaların ürünü olan iki farklı dolgu kaynağı elektrotu kullanılmış ve elektrik ark kaynağı yöntemiyle dolgu kaynağı işlemleri gerçekteştirilmiştir. Burada kullanılan elektrotlar “Elektrot-A” ve “Elektrot-B” biçiminde adlandırılmışlardır. Endüstriyel boyutta trenlerin ilk teker ölçülerinden kabul edilebilir toleransların altına inen tekerlerine otomatik makinelerde özlü telle gazaltı kaynağı veya endüstriyel adıyla Boden kaynağı yapılmaktadır. Trenin ray üzerinde tutunmasını sağlayan çıkıntısına Boden seviyesi denilir, tekerlerle ray arasında oluşan şiddetli katı-katı temasları neticesinde oluşan aşınma olayından dolayı Boden seviyesinin altına inilirse “trenin raydan çıkması” hadisesi, dray meydana gelir. Bu durumdaki tekerlere önceden önlem almak bakımından Boden kaynağı yöntemi kullanılarak dolgu kaynağı uygulanır ve ilk seviyesine getirilir. Boden seviyesi şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılmış bir tren tekerinin aşınmış yüzeyine 10 mm derinlikte gazaltı kaynak yöntemiyle orijinaline tamamen uygun biçimde Boden kaynağı yapılmıştır. Bu kaynağın, diğer iki farklı elektrotla atılan kaynakla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Daha sonra dolgu kaynaklı tren tekerlerinden aşınma deney numuneleri çıkarılmış, bunlarla disk- üstü-pim (pin-on-disc) aşınma deneyleri, kuru sürtünme şartlarında ve de yağışlı ve nemli hava koşulları dikkate alınarak yaş aşınma şartlarında farklı yükler kullanılarak yapılmıştır. Yine dolgu kaynağı elektrotlarıyla ve Boden kaynak yöntemiyle yorulma deney numuneleri hazırlanmış ve bunlarla düşük çevrimli yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tren teker bandajı-ray sisteminin bir unsuru da frenleme sistemi ve fren balatalarıdır. “Sabo” olarak da adlandırılan, dökme demir ve karbon-karbon kompozitinden üretilebilen fren balatalarının karakterizasyonu, aşınma ve yorulma davranışının incelenmesi de son olarak bu tez çalışmasında ele alınmıştır.

5.2. Kullanılan Malzemeler ve Spektrometrik Analiz

Deneyel çalışmalar kapsamında TCDD'nin yolcu trenlerinde kullandığı teker bandajlarından ve demiryollarında kullanılan raylardan numuneler alınmıştır. Bunların kimyasal kompozisyonları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.1. Ray Numunelerinin Spektrometrik Analiz Sonuçları

Yakma No	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% P	% S	% Nb	% V
1	97.87	0.486	0.242	1.169	0.018	0.021	0.011	0.053	0.022	0.036	0.009	0.005
2	97.88	0.508	0.261	1.145	0.017	0.021	0.012	0.048	0.011	0.026	0.006	0.007
3	98.03	0.480	0.229	1.074	0.015	0.020	0.011	0.048	0.013	0.015	0.006	0.006
4	98.01	0.483	0.224	1.083	0.015	0.021	0.012	0.049	0.016	0.018	0.007	0.007
Ortalama	97.97	0.490	0.238	1.101	0.016	0.021	0.012	0.048	0.013	0.020	0.006	0.006

Tablo 5.2. Bandaj Numunelerinin Spektrometrik Analiz Sonuçları

NTM TNE	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

NO	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Nb	V
1	97.58	0.590	0.269	0.905	0.163	0.183	0.044	0.140	0.021	0.013	0.009	0.008
2	97.56	0.592	0.269	0.907	0.163	0.185	0.044	0.142	0.024	0.012	0.009	0.009
3	97.40	0.631	0.320	0.894	0.163	0.201	0.057	0.140	0.030	0.007	0.008	0.007
4	97.42	0.631	0.313	0.891	0.157	0.201	0.056	0.141	0.028	0.009	0.007	0.008
5	97.47	0.639	0.305	0.858	0.153	0.198	0.053	0.140	0.027	0.006	0.010	0.010
Ortalama	97.49	0.617	0.295	0.891	0.160	0.194	0.050	0.141	0.026	0.009	0.009	0.008

Spektrometrik Analizlerin tümü optik emisyonlu Baird marka, 16 element kapasiteli cihaz ile yapılmıştır.

5.3. Uygulanan Dolgu Kaynak İşlemleri

Bandaj ve teker numunelerine farklı iki elektrot grubuyla dolgu kaynağı yapılmıştır.

Elektrot-A bazik karakterli bir dolgu elektrotudur ve genellikle darbeli zorlamaların bulunduğu aşınma şartlarında kullanılır. Yüksek hızlarda ve tonlarca ağırlık altında tren tekeri-bandajı ve ray arasında aynı aşınma olduğu için bu elektrot seçilmiştir.

DIN 8555 normuna göre E1-UM-350 olarak kodlanmıştır. Elektrot sertliği, 310–350 HB arasındadır.

Kullanılan diğer elektrot ise Elektrot-B'dir, DIN 8555 normuna göre E1-UM-250 olarak kodlanmıştır. Bu elektrotun da bildirilen kullanım yerleri arasında raylar, ray makasları, dişli çarkların hareket tekerleri gibi aşınmaya maruz kalan parçalar vardır. Elektrotun kaynak dikişinin Brinell sertliği, kaynak edilen malzemeye, kaynağın soğuma hızına ve üst üste gelen kaynak paso sayısına bağlı olarak 280–330 HB arasında bulunmuştur. Elektrotların kimyasal içerikleri aşağıda Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Dolgu kaynağı yapımında kullanılan elektrotların kimyasal kompozisyonları

Elektrot	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% P	% S	% Nb	% V
A	98.76	0.088	0.073	0.623	0.063	0.106	0.020	0.159	0.014	0.011	0.024	0.010
B	98.98	0.076	0.044	0.530	0.033	0.059	0.019	0.158	0.012	0.017	0.022	0.007

Bu elektrotlarla yapılan elektrik ark dolgu kaynağının kaynak bölgesinin kimyasal içerikleri de Tablo 5.4'teki gibidir.

Tablo 5.4. Kaynak bölgesinin kimyasal içerikleri

Elektrot	% C	% Mn	% Si	% Cr
A	0.20	1.5	1.0	3.5
B	0.15	1.2	1.1	3.5

Bu çalışmada her iki elektrotun verimliliği kıyaslamalı olarak incelenmiş; veriler, sonuçlar bölümünde bildirilmiştir.

5.3.1. Numune Hazırlama ve Ön- tavlama

Bandaj numunelerinin kaynak yapılacak yüzeyleri spiral taşla, pürüzsüz bir yüzey elde edilinceye kadar taşlanmıştır. Daha sonra kaynak işleminde kullanılacak elektrotlar, elektrot kurutma fırınında 250 °C'de 30 dakika bırakılarak kurutulmuştur. Bunda amaç elektrotun havadan ve çevreden absorbe ettiği nemin kaynak dikişine geçmesini önlemektir. Aksi takdirde kırılğan bir yapı elde edilmesi riski oluşur. Bandaj numunelerinin kaynak işleminden önceki görüntüsü Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Temizlenmiş ve kaynak işlemine hazırlanmış numuneler

Kaynak işlemine başlamadan önce numunelere herhangi bir ön ısıtma işlemi yapılmasına gerek olup olmadığına bakılmıştır. Kaynakta çeliğin sertleşme eğilimini belirten bir değer sayısının bulunması ve bununla çeliğin bileşimine dayanarak, kaynak kabiliyetini belirten bir formülün elde edilebilmesi için birçok çalışmalar yapılmış ve alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eş değerde sertliği sağlayan karbon miktarı saptanmıştır. Bu şekilde saptanan ve çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eş sertliği veren karbon miktarına “karbon eşdeğeri” adı verilmiştir. Birçok ülkede ve çeşitli kanunlarda, kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılacak çeliklerin içeriğindeki karbon ve manganez miktarları sınırlandırılmıştır. Bu iki element de çeliğin sertleşme eğilimini, dolayısıyla çatlak oluşma olasılığını artırırlar. Karbon eşdeğeri büyüdükçe kaynaktan sonra soğumanın yavaşlatılması gerekmektedir. Bunun için de tek çözüm, parçaya kaynaktan önce bir ön-tavlama uygulayarak soğuma hızını yavaşlatmaktır. Karbon eşdeğerine bağlı olarak ön-tavlama sıcaklıkları saptanmış olduğundan uygulamada kolaylık sağlanmıştır [104].

Karbon eşdeğerinin hesaplanması konusunda literatürde çok değişik formüllere rastlanılmaktadır. Bunlar salt bilimsel açıdan düşünüldüğünde ne çelikleri sınıflandırmak için kriter olabilmekte, ne de kaynak kabiliyetinin bir ölçüsü olarak kullanılabilirler; bunlar ancak uygulamada kullanılabilen ve tatminkar sonuçlar veren ampirik bağıntılardır [104]. Burada Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW)’nün IX numaralı Kaynak Kabiliyeti Komisyonunun kabul ettiği karbon eşdeğeri formülü şu şekilde kullanılmıştır:

$$C_{eş} = C + Mn/6 + Cr/5 + Mo/5 + V/5 + Ni/15 + Cu/15 + Si/25 \quad (5.1)$$

Bandaj numunesinin kimyasal içeriğini oluşturan alaşım elementlerinin ağırlıkça % değerlerini Eşitlik (5.1)'de yerine koyduğumuzda;

$$C_{eş} = 0.617 + 0.891/6 + 0.160/5 + 0.050/5 + 0.008/5 + 0.194/15 + 0.141/15 + 0.295/25$$

$C_{eş} = 0.84$ olarak bulunur.

Tablo 5.5. Karbon eşdeğeri ile ön-tav sıcaklığı arasındaki ilişki [104]

Karbon Eşdeğeri	Ön-Tavlama Sıcaklığı, °C
< 0.45	Normal atmosfer şartlarında gerek yoktur.
$0.45 < C_{eş} < 0.60$	100 – 200
> 0.60	200 – 350

Tablo 5.5'teki kriterlere göre bandaj numunelerinin karbon eşdeğeri 0.60 değerinden büyük çıktığı için ön-tavlama yapılması gerekmektedir. Kaç derecede tavlama yapılacağı da aşağıdaki formüle göre bulunmuştur.

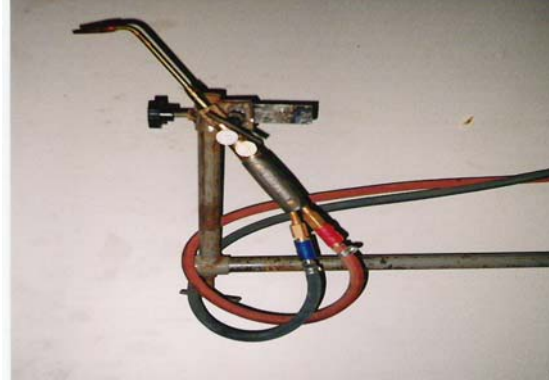
$$T_{\text{ön-tav}} (°C) = 350 * \sqrt{([C_{eş}] - 0.25)} \quad (5.2)$$

Buna göre Bek numarası 4 olan hamlaçlarla, ilk pasodan önce 15 dakika olmak üzere yaklaşık olarak 250 °C'lerde ön-tavlama yapılmıştır. Bu işlem Şekil 5.3'te, işlemin yapıldığı hamlaçlar da Şekil 5.4'te görülmektedir. Sıcaklık ölçümleri lazer ışınlarıyla ölçüm yapan, Datatemp marka taşınabilir, 800 °C'ye kadar sıcaklıkları ölçebilme kapasitesine sahip olan bir termokuplla yapılmıştır. Kaynak işleminden sonra ise numuneler tav fırınında 600 °C'de yaklaşık olarak 4 saat

boyunca tavlama işlemine tabii tutulmuş sonrasında ise yavaş soğumaya bırakılmıştır. Böylelikle kaynak dikişlerinde oluşabilecek iç gerilmeler (kalıntı gerilmeler) giderilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.3. Bandaj numunesinin ön-tavlaması



Şekil 5.4. Ön-tavlama için kullanılan hamlaçlar

5.3.2. Elektrik Ark Dolgu Kaynak İşlemleri

Aşınmış teker bandajlarına A ve B şirketlerinin ürünleri olan bazik karakterli, Tablo 5.3'te kimyasal kompozisyonları verilmiş iki farklı elektrot ile doğru akım kaynak makinesinde (Redresör), pozitif (+) kutuplamada, deneyler boyunca ortalama 24 V kaynak geriliminde, 130 A kaynak akım şiddetinde, kaynak akım şiddeti değerleri ve kaynak gerilimi değerleri sürekli olarak kaynak makinesi üzerinde bulunan Ampermetre ve Voltmetreden kontrol edilerek, sabit kaynak hızında dolgu kaynak işlemleri; x, xy ve z gibi üç farklı doğrultuda atılmıştır. Farklı doğrultularda kaynak çekilmesinin nedeni malzemede anizotropik oluşumlar olup olmayacağını incelemektir.

Kaynak işlemiyle ilgili fotoğraflar aşağıdaki şekillerde görülmektedir:



Şekil 5.5. Kaynak yapılmış numuneler (En sağdaki parçanın ilk hali)

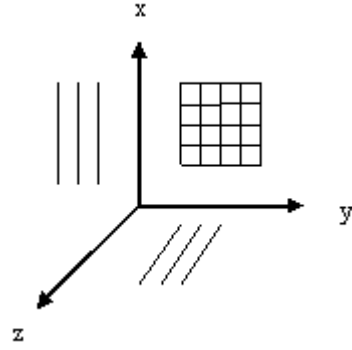
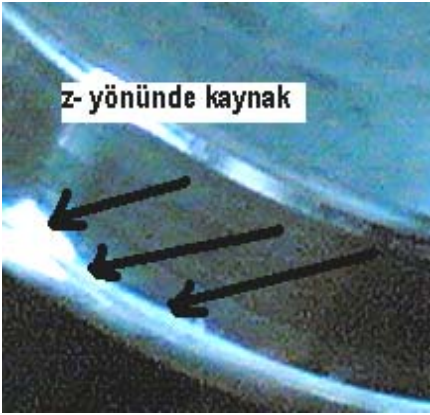


Şekil 5.6. Dikişlerin yandan görünüşü



Şekil 5.7. Doğru akımla yapılan dolgu kaynağı işleminde kullanılan redresör tipi kaynak makinesi.

Dolgu kaynağı her bir parçaya 13-14 paso çekilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Doğru akımla yapılan kaynakta elektrot, (+) pozitif kutupta kullanılmıştır. Dolgu kaynağı atılan yönler Şekil 5.8’de bandaj üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Dolgu kaynağı uygulanan doğrultular

Kaynak işleminden sonra bandaj numunelerinin farklı bölgelerinden yine spektrometrik analizler alınmış, veriler Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.6. Kaynaklı numunelerin farklı bölgelerindeki spektrometrik analiz sonuçları

BÖLGE	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% P	% S	% Al
Dikiş Üstü	94.36	0.110	0.204	0.495	4.411	0.113	0.026	0.016	0.007	0.040
Kaynak Bölgesi	94.36	0.110	0.217	0.491	3.500	0.112	0.026	0.016	0.008	0.039
ITAB	95.48	0.208	0.212	0.551	3.349	0.121	0.029	0.015	0.008	0.037
Ana Metal (Bandaj)	97.40	0.631	0.321	0.893	0.160	0.201	0.056	0.029	0.008	0.094

Tablo 5.7. Isının tesiri altındaki bölgeden (ITAB) alınan spektral analiz sonuçları

Ölçüm No	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% P	% S	% Al
1	95.26	0.208	0.212	0.551	3.349	0.121	0.029	0.015	0.008	0.037
2	95.48	0.239	0.217	0.575	3.055	0.127	0.031	0.017	0.007	0.037
3	95.71	0.306	0.278	0.645	2.582	0.149	0.038	0.021	0.007	0.044
4	96.71	0.446	0.301	0.748	1.277	0.172	0.044	0.022	0.006	0.062

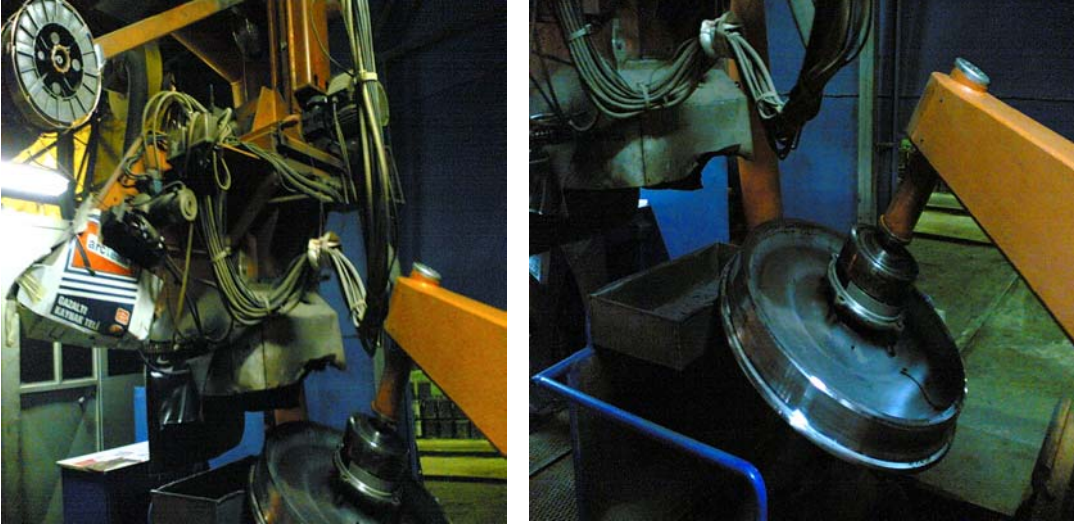
Elektrik ark kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı uygulaması yapılan numunelere Radyografik inceleme ile tahribatsız muayeneler yapılmış, parçaların tek tek kaynak filmleri çekilmiştir. Radyografik inceleme sonucu rapor biçiminde Şekil 5.9’da görülmektedir. Radyografik inceleme EN 1463 Tahribatsız Muayene Standardına göre yapılmıştır. Bu inceleme sonucu Elektrot-A ile dolgu kaynağı yapılan numunelerden bir tanesinde “tek taraflı kök hatası” ve Boden kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı yapılan numunelerden bir tanesinde ise “çeşitli cürufklar” olduğu tespit edilmiş; bu iki parçadan numune hazırlanmamış ve yeniden kaynaklı üretim yapılmıştır. Diğer üç Boden kaynaklı numune ve Elektrot-B ile hazırlanan numuneler “A (kabul)” raporu almışlar ve bu rapora dayanarak deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılmışlardır.

Boden kaynağı, tekerlek takımlarının yuvarlanma dairesi çaplarının aşınması ve işletme şartlarının altına düşmesi durumunda aşınan yan cidarına yapılan kaynaktır. Bu kaynak, 1.6 mm çapında ve 2.4 mm çapında iki özlü kaynak teli ve karışım haldeki CO₂ gazı kullanılarak, gazaltı kaynak yöntemine göre yapılır. Çapları farklı, içerikleri aynı olan tellerden ince çaplı olanı tutuşturmayı sağlarken, kalın çaplı olan özlü tel ergiyerek aşınmış bölgede birikim yapar dolayısıyla doldurma görevini yerine getirir. Bu özlü kaynak telinin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.8’de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.8. Boden kaynağında kullanılan özlü kaynak telinin spektrometrik analizi

	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% P	% S	% Nb	% V
Özlü Tel	96.71	0.105	1.017	1.719	3.0	0.036	0.026	0.257	0.002	0.009	0.033	0.016

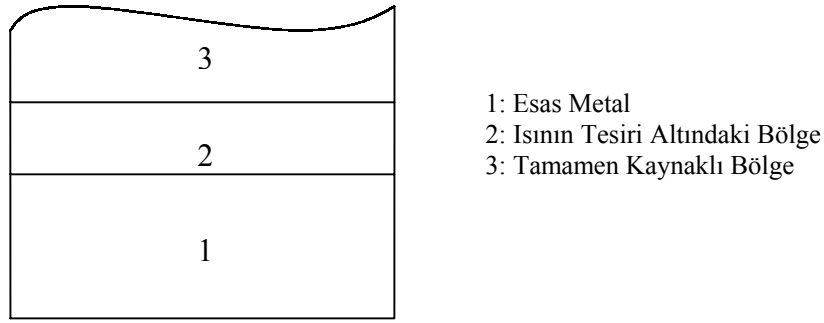
Boden kaynak işleminin yapıldığı düzenek Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Boden kaynak işlemlerinin yapıldığı sistem

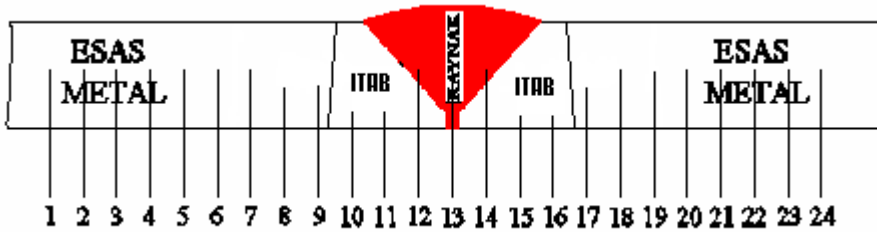
5.4. Sertlik Ölçümleri

Kaynaklı numunelerin, esas metalden tamamen kaynaklı bölgeye kadar değişik özellikler gösteren yerlerinden mikrosertlik ölçümleri alınmış ve bunlar grafik olarak sonuçlar bölümünde gösterilmişlerdir. Ölçümler 5 mm aralıklarla alınmıştır. Sertlikler sırasıyla aşağıda şematize edildiği biçim ve sırayla alınmıştır.



Şekil 5.11. Dolgu kaynaklı numunelerde sertlik alınan bölgeler

Aşınma ve yorulma numunesi elde etmek için yapılan kaynaklı birleştirmelerde ise sertlik ölçümleri Şekil 5.12’de gösterilen biçimde sıra-sertlik alımı şeklinde yapılmıştır.

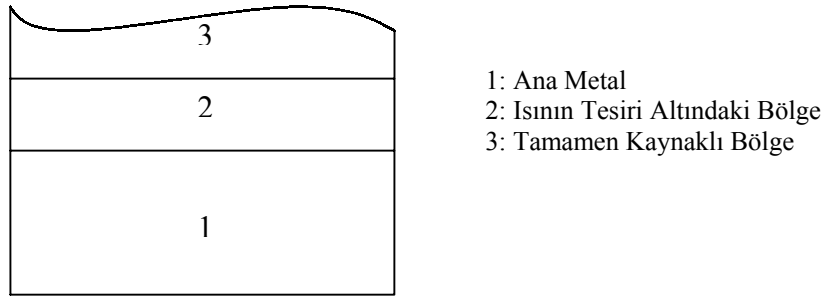


Şekil 5.12. Aşınma ve yorulma numuneleri elde etmek için hazırlanan parçada sertlik alınan noktalar

Labratuar ortamında yapılmış olan bütün mikro sertlik ölçümleri 1 kg’lık yük uygulanarak Officine Galileo Marka cihaz ile yapılmıştır.

5.5. X- Işını Analizleri

Dolgu kaynağı yapılmış bir parçadan Şekil 5.13'te gösterildiği gibi bir numune alınmış, bu numunenin değişik bölgelerinden alınan metal tozlarıyla X- Işınları Analizi yapılmıştır. Bunun için 100 kV kapasiteye sahip Philips marka ikiz tüplü, yatay ve dikey ganimetreli, yüksek sıcaklık uygulaması yapılabilen, Laue ve Debye-Scherrer kameralı, Geiger-Muller sayaçlı X-ışınları difraktometresi (PW/1050) kullanılmıştır. Işın olarak dalga boyu, $\lambda=1.7902\text{\AA}$ olan $\text{Co}_{K-\alpha}$ kullanılmıştır. Taramalar 30 kV gerilim altında, 8 mA akım şiddetinde ve 1 derece/dakika tarama hızında yapılmıştır. Genelde $2\theta=90^\circ$ mertebesinde tarama yapılırken, özellikle 3-nolu tam kaynak bölgesinden alınan numune $2\theta=130^\circ$ ler mertebesine çıkılmak suretiyle detaylı olarak taranmış, bunun sonucunda da matriste yüksek oranda bulunan Cr'un yaptığı karbürler tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. X-ışınları analizi yapılan bölgeler

5.6. Mikroyapı

5.6.1. Optik Mikroskop

Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemiyle yapılan elektrik ark dolgu kaynaklı ve Boden kaynaklı numunelere optik mikroskopta mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. 60, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik SiC zımpara ile zımparalanan numuneler Al_2O_3 solüsyonuyla parlatılmış daha sonra da %2'lik Nital çözeltisiyle dağlanmışlardır. Hem düşük hem de yüksek büyütmelelerde çalışılmıştır. Mikroyapı çalışmaları Olympus PME 3 marka optik mikroskopta yapılmıştır.

5.6.2. Makroyapı İncelemeleri

Elektrot-A ve Elektrot-B dolgu elektrotlarıyla kaynak yapılan bandaj parçalarının makroyapı incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla % 10'luk HNO₃ içeren çözelti ile makrodağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra bu kaynakla birleştirilen parçalardan hazırlanan yorulma deney numunelerinin de makroyapı incelemesi yapıldı. Bunun için iki amaç güdülmüştür. Birincisi, kaynak bölgesinin, yorulma numunesinin tam ortasına denk gelip gelmediğini görmektir; çünkü yorulma deneyi sırasında hasar, kırılma şeklinde ve kaynak bölgesinin hemen yakınlarında beklenmektedir. İkincisi ise numunenin yan yüzeyinin yüzey kalitesini görmektir; çünkü buralardaki herhangi bir süreksizlik, tornanın kalem izi, çatlak vs. gerilim artırıcı bir etki yaratacak ve deney sonuçlarında beklenmeyen etkiler oluşturacaktır.

5.6.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Elektrot-A ve Elektrot-B elektrotlarla birleştirilen ve Boden kaynak yöntemi uygulanan parçalardan hazırlanan numunelerin yorulma deneyleri sonrasında kırık yüzeyleri tarama elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Bunun için JEOL JSM-5600 marka SEM cihazı kullanılmıştır.

5.8. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri DIN 50324 standardına göre dizayn edilmiş disk-üstü-pim (pin-on-disc) prensibine göre çalışan bir aşınma cihazında yapılmıştır. Aşındırıcı olarak kullanılan disk, 63 Rc (150kg yükte) sertliğinde 4140 çeliğidir, ısıl işlem fırınında tavlanıp yağa daldırılmak suretiyle sertleştirilmiştir, daha sonra da her iki yüzeyi de taşlanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi sağlanmıştır. Disklerin deneylerden önce yapılan spektrometrik analizi aşağıda Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Aşınma deneylerinde kullanılan disklerin kimyasal kompozisyonu

	% Fe	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% P	% S	% V
Disk	96.551	0.407	0.207	0.757	1.289	0.179	0.210	0.370	0.003	0.012	0.015

Bu diskler, frekans kontrolü ile hassas bir şekilde devir ayarı yapılabilen bir motora bağlı diske vida yardımıyla bağlanmıştır. Disklerin yatağa uygun bir şekilde oturmasına dikkat edilerek yataкта metil alkol ile temizlenmiştir. Deneylerin tümü 1m/sn'lik aşınma hızlarında yapılmış ve numuneler

bir saat süreyle, toplam aşınma mesafesi 3600 metreye varıncaya kadar aşındırılmıştır. Numunedeki hacimsel kaybı ve sürtünme katsayısını tespit etmek için Şekil 5.13'te T noktasına, normal yüke dik olacak bir transdüser monte edilmiştir. Böylece açısal sürtünme kuvveti ölçülmüştür. Benzer şekilde, P noktası ile gösterilen bölgeye ve tam aşınma numunesinin üstüne gelecek şekilde bir başka transdüser yerleştirilmiştir. Bir amplikatör yardımıyla numune boyutlarında ve sürtünme kuvvetinde zamanla meydana gelen yükseklik kayıpları (h_v) ve ikincil kuvvetler kaydedilmiştir. Deneyler sırasıyla her bir numuneye (cihazın kapasitesi göz önüne alınarak); 10N, 20N, 30N ve 40N'luk normal yükler uygulanmıştır. Aşınma deneyinden elde edilen yükseklik kaybı değerleri, hacim kayıplarını hesaplamak amacıyla (5.3) eşitliğinde kullanılmıştır.

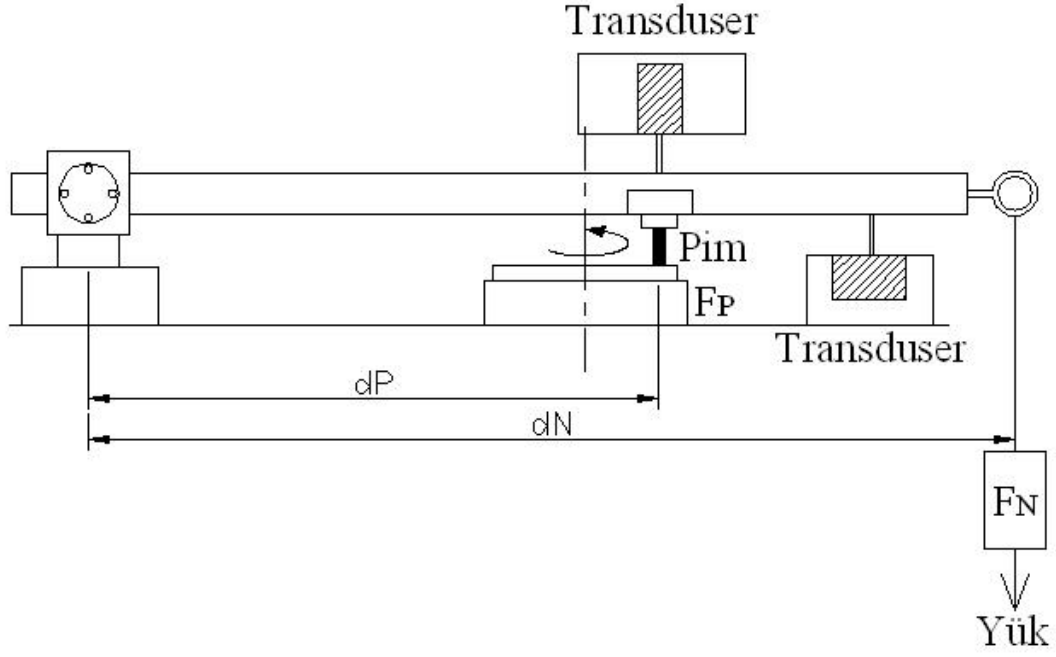
$$\text{Hacimsel Aşınma} = (\pi D^2/4) h_v \quad (5.3)$$

Burada D, aşındırılan numunenin çapı, h_v ise aşınma cihazından elde edilen numune yükseklik kaybıdır. Aşınma cihazında, numune yükseklik kaybını veren eğriler Solartron marka 50 mV/200 hassasiyetine ayarlanmış olup, amplikatör yardımıyla grafikler elde edilmiştir. Aşınma sırasında malzeme sürtünme katsayısı (μ) değerlerinin, sürtünmede oluşan açısal sürtünme kuvvetinin (F_p), uygulanan normal yüke olan oranına (F_N) göre değiştiği bilindiğinden, (5.4) denklemi kullanılmıştır. Kullanılan bu eşitlik ile her bir numunenin değişik deney şartındaki sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

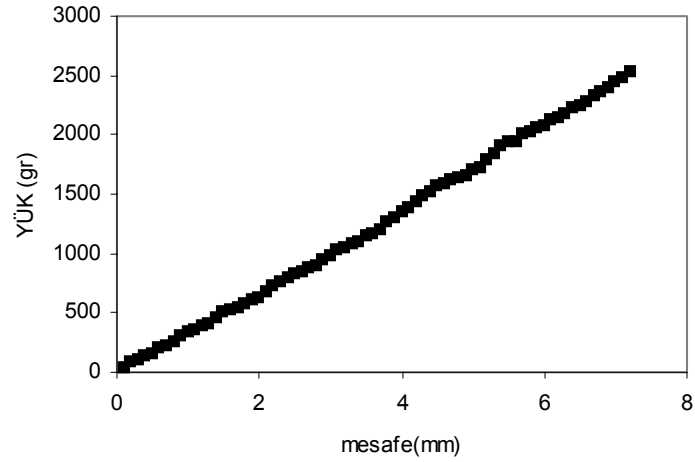
$$\mu = F_p * dp / F_N * d_N \quad (5.4)$$

Eşitlik (5.4)'teki dp ; Pimin mesnet noktasına olan uzaklığını ve d_N ; yükün mesnet noktasına olan uzaklığını göstermektedir.

Ayrıca aşınma sırasında numunede meydana gelen ağırlık kayıplarını belirlemek için, deneye başlamadan önce ölçülen m_1 , deney bitiminde ölçülen m_2 ağırlık kaybı ($m_1 - m_2$) ile belirlenmiştir.



Şekil 5.14. Aşınma cihazının şematik olarak önden görünüşü. d_P ; Pimin mesnet noktasına olan uzaklığını ve d_N ; Yükün mesnet noktasına olan uzaklığını göstermektedir



Şekil 5.15. Aşınma cihazındaki yanıl kuvvetlerin, F_P , hesaplanmasında kullanılan yük transdüser arasındaki değışimi gösteren grafik.

Disk-üstü-pim (pin-on-disc) deneyleri sırasında şunlara dikkat edilmelidir:

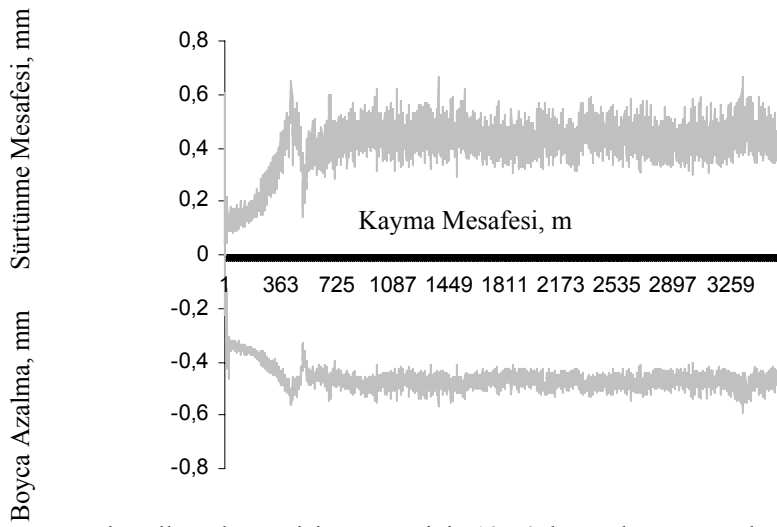
1. Pim ve diskin birbirleriyle tam olarak teması sağlanmalıdır. Bunun için deney pimleri aşındırıcı kağıtlar yardımıyla tam düz ve pürüzsüz bir yüzey elde edilinceye kadar zımparalanır.
2. Hem test pimleri hem de disk metil alkol içinde ultrasonik titreşimlerle temizlenir. Bunun için Decon F5 Minor marka zaman kontrollü ultrasonik titreşim cihazı kullanılmıştır.
3. Test pimi, aşınma makinesinin yük kolu üzerindeki yerine monte edilir ve gerekli yük ve hız uygulanır.
4. Sürtünme ve aşınmayı ölçecek doğrusal transdüserler kaydedicide sinyal olarak sıfırı gösterecek biçimde ayarlanır. Daha sonra tam yükleme yapılarak deney başlatılır.
5. Gerekli dönme mesafesine erişildiğinde deney durdurulur. Bu çalışmada, pin-on-disk yöntemiyle yapılan aşınma deneylerinin her biri bir saat sürmüştür, 3600 m yol alınmıştır.
6. Deneylerden sonra pimlerin ağırlığı tekrar tartılarak kaydedilir. Aradaki farktan ağırlık kaybı tespit edilir. Tartımlar, 10^{-4} gr hassasiyete sahip Gec Avery marka terazide yapılmıştır.

Şekil 5.16'da disk-üstü-pim aşınma deneylerinin yapıldığı deney cihazının fotoğrafı görülmektedir.

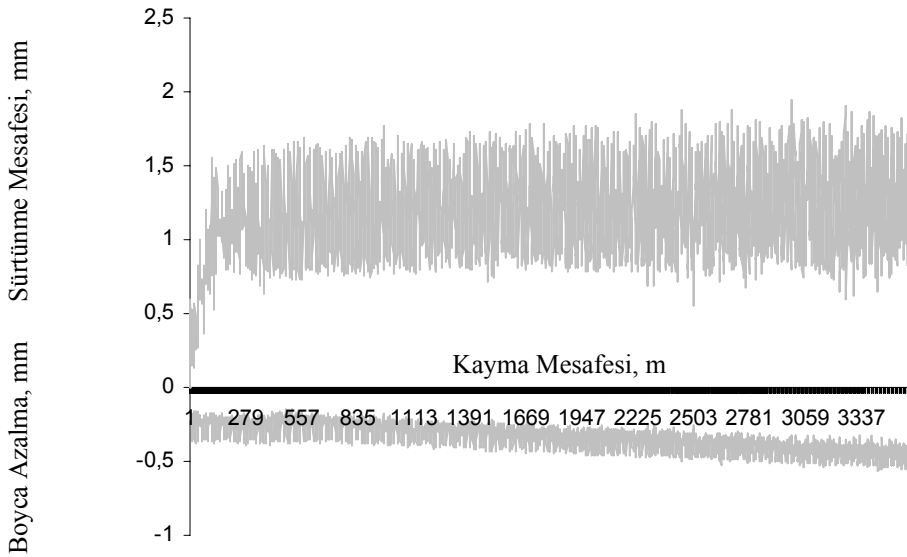


Şekil 5.16. Aşınma deney cihazı

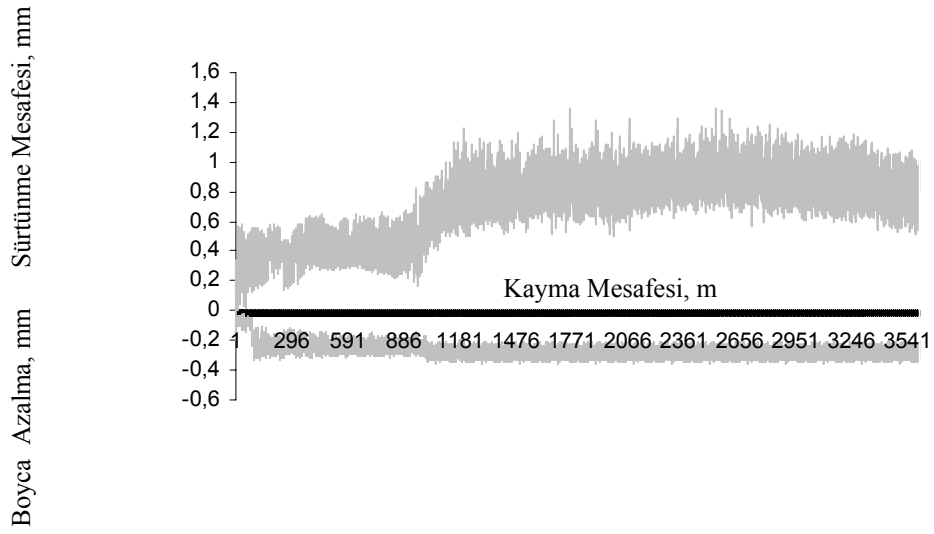
Aşınma deneyleri hem kuru sürtünme koşulları göz önüne alınarak hem de yağışlı hava şartları dikkate alınarak ıslak sürtünme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Disk ile aşınma davranışı karakterize edilen pim numunesinin temas ara yüzeyine; direkt doğadan biriktirilen yağmur suyu, bir serum şişesi ve hortumu yardımıyla 3 damla/dakika'lık bir hızda damlatılmıştır. Kuru ve yağ sürtünme farklılıkları bu şekilde tespit edilmiştir. Triboloji el kitaplarında bu durum “suyun yağlayıcılığı” biçiminde ifade edilmektedir [34].



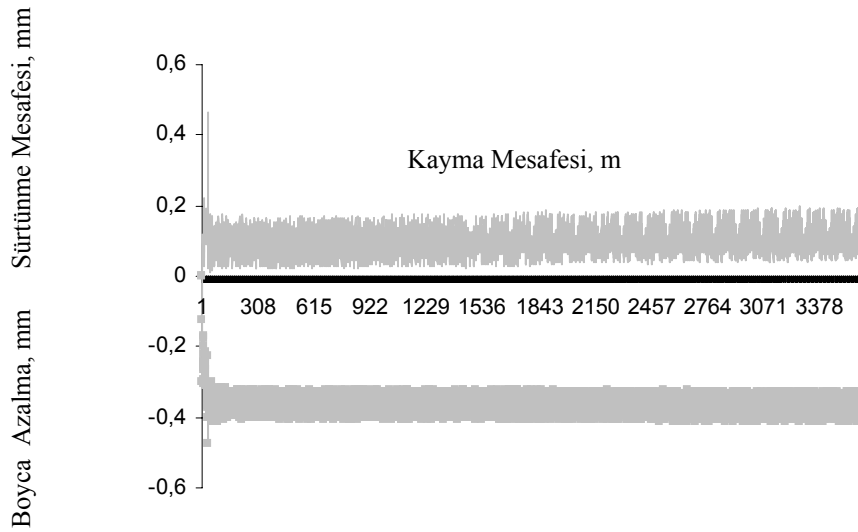
Şekil 5.17. Kuru sürtünme koşullarında Bandaj numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı



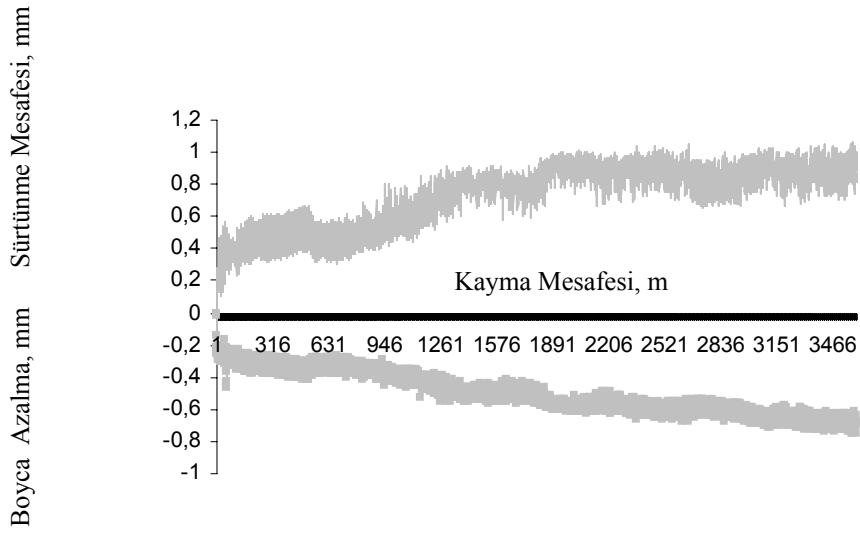
Şekil 5.18. Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-A ile “xy-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 30 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı



Şekil 5.19. Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile “x-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 20 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı. Pasolar arası geçiş sürtünme mesafesi eğrisinin değişiminden anlaşılmaktadır

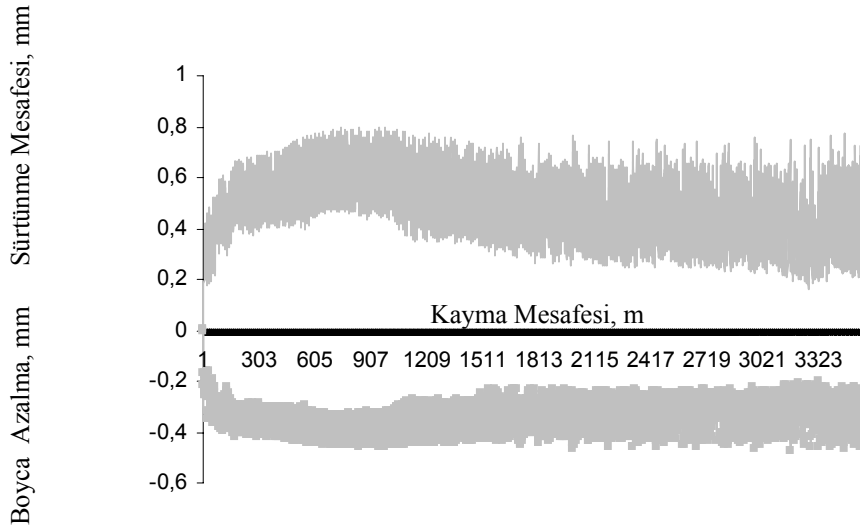


Şekil 5.20. Kuru sürtünme koşullarında Kompozit sabo numunesinin 10 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı

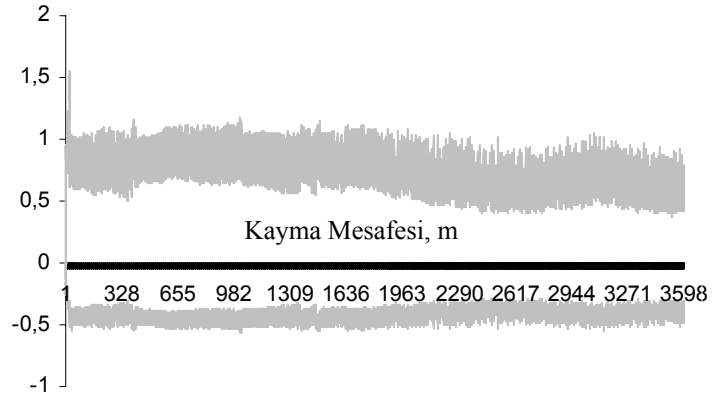


Şekil 5.21. Kuru sürtünme koşullarında dökme demir sabo numunesinin 10 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı

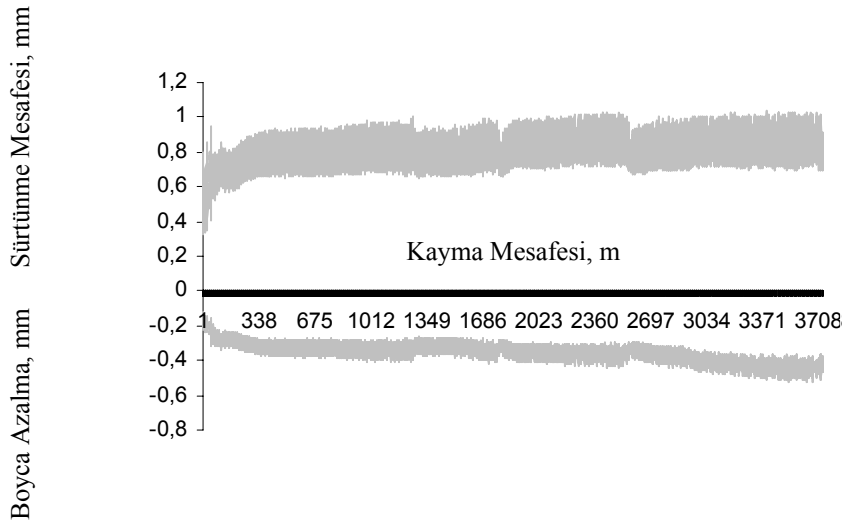
Aynı deneyler yağmur suyu ile yapıldığında; Sürtünme Mesafesi-Kayma Mesafesi değerlerinin değiştiği görülmüştür. Bunlara ait örnek grafikler de aşağıda gösterilmiştir.



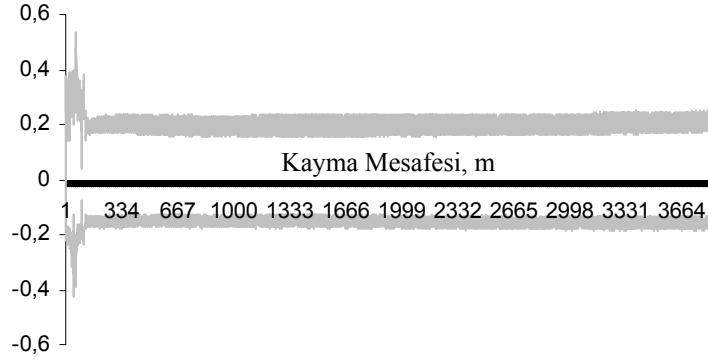
Şekil 5.22. Yağ sürtünme koşullarında Bandaj numunesinin 30 N' da yapılan aşınma deneyi çıktısı



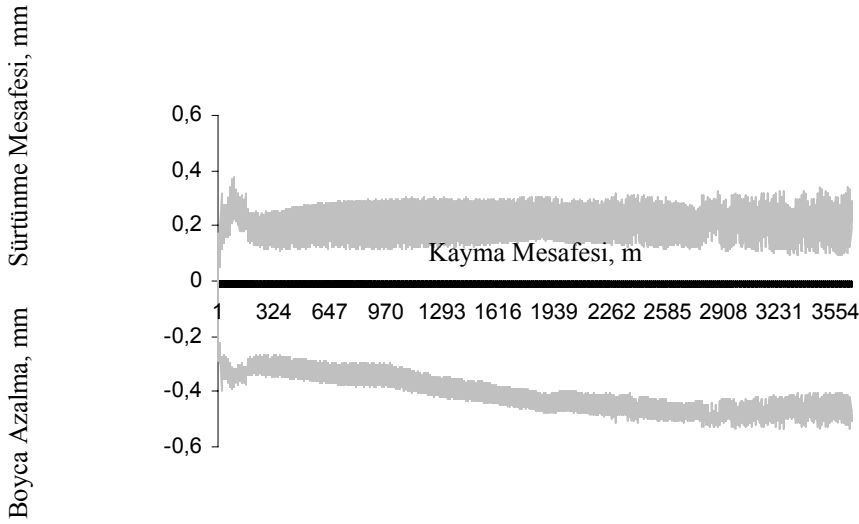
Şekil 5.23. Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-A ile “z-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 40 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı



Şekil 5.24. Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile “xy-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılmış numunenin 40 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı

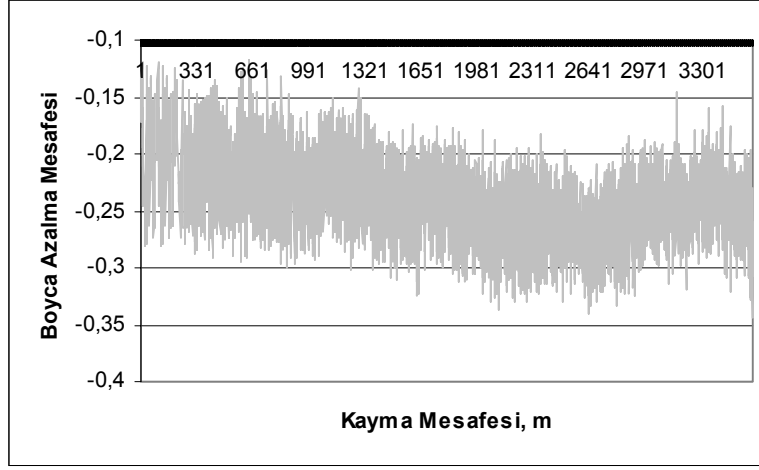


Şekil 5.25. Yaş sürtünme koşullarında Kompozit sabo numunesinin 20 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı



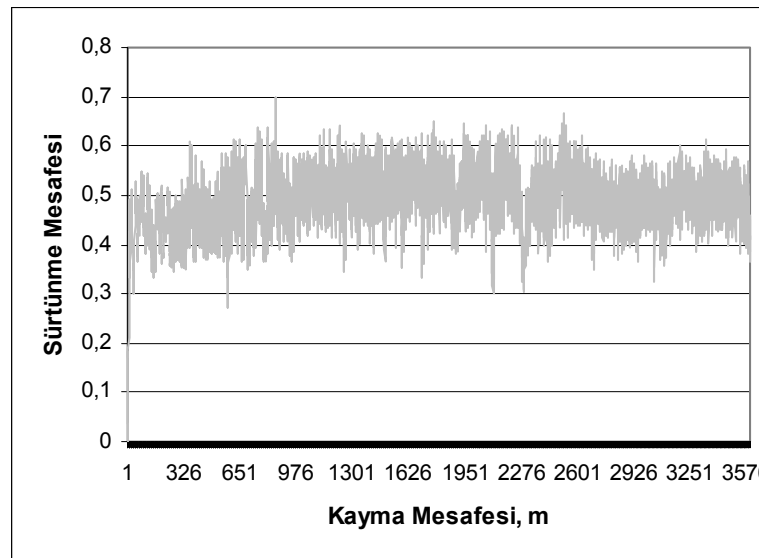
Şekil 5.26. Yaş sürtünme koşullarında Dökme demir sabo numunesinin 10 N’ da yapılan aşınma deneyi çıktısı

Yukarıdaki grafikler pin-on-disk aşınma deneyi sonrası Excel ortamında alınmış çıktılar olup bunlar daha sonra Sürtünme Katsayısı değerlerinin bulunmasında kullanılırlar. Numunenin hemen üzerinde bulunan transdüserden alınan veriler, “boyca azalma mesafesi-kayma mesafesi” grafiğini çizmek için kullanılır. Örneğin kuru sürtünme koşullarında Boden kaynak yöntemiyle dolgu işlemi yapılmış ve pim haline getirilmiş numunelerle 40 N’da yapılan aşınma deneyinden elde edilen “Boyca azalma mesafesi-Kayma mesafesi” grafiği Şekil 5.27’de verilmiştir.



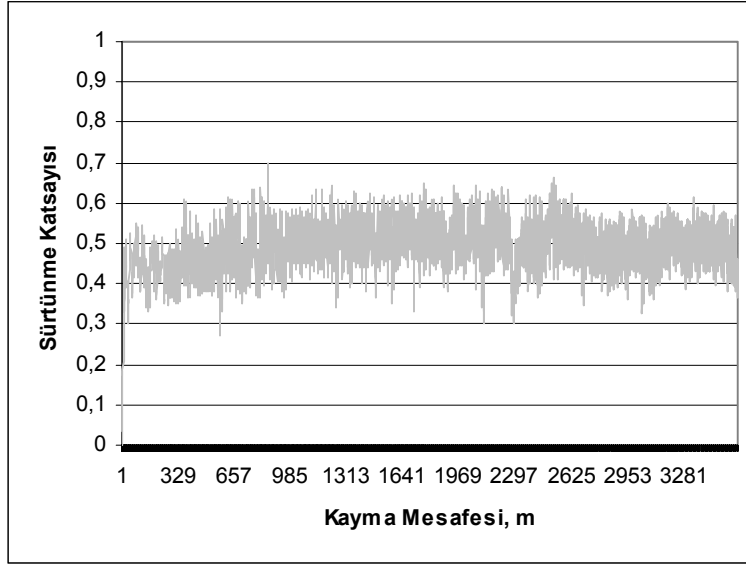
Şekil 5.27. Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneye 40 N'da yapılan aşınma deneyinde Boyca azalma-Kayma mesafesi grafiği.

Deney cihazında, numunenin yan tarafına konulan transduser ise yanal kuvveti, başka bir deyişle sürtünme kuvvetini ölçmekte kullanılır. Burada toplanan verilerle Şekil 5.17-Şekil 5.26 arasındaki örnekleri verilen grafikler çizilmiştir. Yine Şekil 5.28'de ise kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneye 40 N'da yapılan aşınma deneyinden elde edilen Sürtünme mesafesi-Kayma mesafesi grafiği görülmektedir. Bu grafiğin ortalama değeri hesaplanarak, Şekil 5.15'te verilen kalibrasyon eğrisinde yerine konular, buradan F_p yanal kuvveti bulunur ve Sürtünme katsayısı-Kayma mesafesi grafiği oluşturulur. Bu grafik şekil olarak yukarıda örnekleri gösterilen Sürtünme mesafesi-Kayma mesafesi grafikleriyle tamamen aynıdır, yalnızca dikey eksendeki sayılar farklıdır. Bu grafiğin yaklaşık ortalaması "sürtünme katsayısını" elde etmemizi sağlar



Şekil 5.28. Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneyle 40 N’da yapılan aşınma deneyinden elde edilen grafik.

Şekil 5.28’deki verileri kullanarak Boden kaynaklı numuneyle 40 N’da yapılan aşınma deneyinden elde edilen “Sürtünme Katsayısı-Kayma Mesafesi” grafiği ise Şekil 5.29’da gösterilen şekilde çizilmiştir.



Şekil 5.29. Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynaklı numuneyle 40 N’da yapılan aşınma deneyinden elde edilen Sürtünme Katsayısı-Kayma Mesafesi grafiği

Disk-üstü-pim aşınma deneyleri kuru sürtünme koşullarının yanında yağ sürtünme koşullarında da yapılmıştır. Bunda atmosfere açık bir sistem olan demiryolunda yağın kar, yağmur vb. yağışların teker-ray-fren sistemindeki sürtünmeyi nasıl etkileyeceğini görmek amaçlanmıştır. Adapazarı iline yağın yağmur suları doğal olarak biriktirilmiş, bunlar deney sırasında disk-pim ara temas yüzeyine 20 saniyede 1 damla olacak şekilde sabit hızla damlatılmışlardır. Yağ sürtünme deneylerinde de sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, hacimsel azalma ve spesifik aşınma oranı değerleri bütün numune grupları için hesaplanmıştır.

Yağmur suyunun kimyasal analizi SAÜ Çevre Mühendisliği bölümünde yapılmış olup değerler Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.10. Yağmur suyunun kimyasal analizi

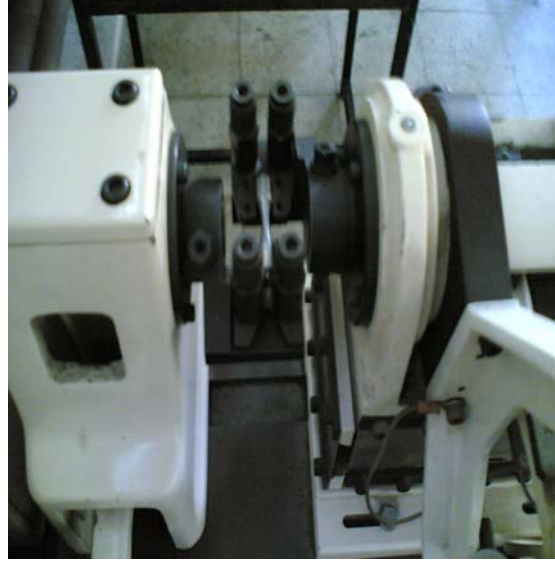
ELEMENT	%
Nitrat (NO_3^-)	0.2
Nitrit (NO_2^-)	0.01
Sülfat (SO_4^{2-})	1.00
Sülfür (S^{2-})	0.018

pH	5.52
----	------

Atmosferdeki hava kirleticilerinin en yaygın olanı SO_2 'dir. Her yıl tonlarca SO_2 çeşitli kaynaklardan yayılarak atmosfere karışmaktadır. Bu emisyonların en önemli bölümü elektrik üretmek amacıyla çok büyük miktarlarda katı ve sıvı yakıtlar yakan termik santrallerden oluşmaktadır. NO_x 'in atmosferdeki bulunuşu yaklaşık olarak yarı yarıya taşıt egzozu ve sabit yakma tesislerinden kaynaklanmaktadır. Bu gazlar atmosferde gaz çevrimine girerek nitrik asit (HNO_3) oluşumu ile sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlayarak asit yağışların oluşmasını etkilemektedir. Analiz sonucuna göre deneylerde kullandığımız yağmur suyunun hafif asidik karakterli olduğu görülmüştür. Bu asidik karakterin aşınma deneyi sırasında pim yüzeyinde yıpratıcı etki yapması, dolgu kaynağı pasolarını tabaka halinde kaldırması beklenmektedir.

5.8. Yorulma Deneyleri

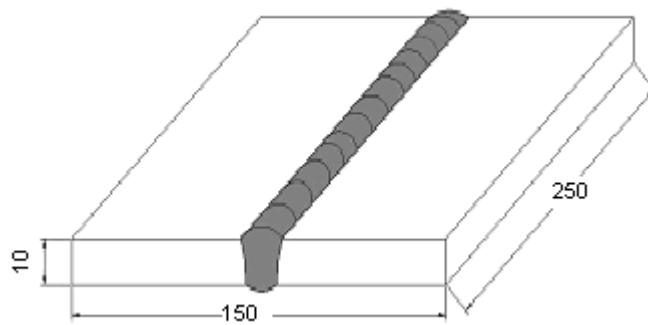
Bu çalışmada, TCDD'nin vagonlarında kullandığı tren teker bandajlarından numuneler kesilerek alın alına kaynak edilmiş; bu kaynaklı bağlantının yorulma davranışını gözlemlemek için de Üniversitede bulunan Denison 7615 marka yüksek çevrimli, burma, ileri geri eğme ile eğme ve burma modüllerinde çalışabilen yorulma cihazında (Şekil 5.30) düşük çevrimli "yorulma deneyleri" gerçekleştirilmiştir.



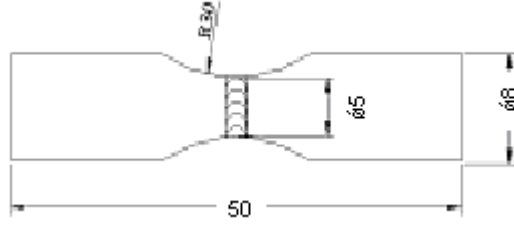
Şekil 5.30. Yorulma deney cihazı

Bakım ve tamir kaynağı yapılmış bandajlardan kesilen parçalara Şekil 5.31’de görüldüğü üzere alın altına kaynak yapılmış, elde edilen bu kaynaklı bağlantılardan CNC tornada yorulma deney numuneleri çıkarılmıştır. Kaynak işlemi parçalar arasına 5 paso çekilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Dikiş yönleri aynı doğrultudadır. Doğru akımla yapılan kaynakta elektrot (+) pozitif kutupta kullanılmıştır. Pasolar ortalama 24 V kaynak geriliminde ve ortalama 130 A kaynak akım şiddetinde çekilmiştir. Kaynak akım şiddeti değerleri ve kaynak gerilimi değerleri sürekli olarak kaynak makinesi üzerinde bulunan Ampermetre ve Voltmetreden kontrol edilmiştir.

Deneylerde kullanılan numuneler, kaynak edildikten sonra yorulma numuneleri 8 adet olmak üzere kesilerek çıkartılmış ve CNC tornada işlenmiştir. Kullanılan numunelerin boyutları Şekil 5.32’de gösterilmiştir:



Şekil 5.31. Alın kaynak pozisyonu ile kaynak edilmiş parça.



Şekil 5.32. Yorulma deney numunesi

Eğmeli yorulma deneyleri sonucu elde edilen değerler ve Wöhler eğrileri en yüksek gerilmeye karşılık çevrim sayısı işaretlenerek çizilmiştir. Deneylerde kullanılan eğme momenti (M) değerlerinden eğilme gerilmesi (σ) değerlerine klasik mukavemet bilgileri kullanılarak uygulanacak gerilmeye göre moment ve komparatörlerde ayarlanacak değerler aşağıdaki gibi hesaplanır. Hesaplamalar R= -1 gerilme oranı için dairesel kesitli parçalara göre yapılır:

$$\sigma = M/Z \quad (5.5)$$

$$Z = \pi D^3 / 32 \quad (5.6)$$

$$\text{Dolayısıyla; } \sigma = 32 M / \pi D^3 \text{ olur.} \quad (5.7)$$

Burada;

σ = Gerekli gerilme (MPa)

M = Eğme momenti

Z = Kesit modülü

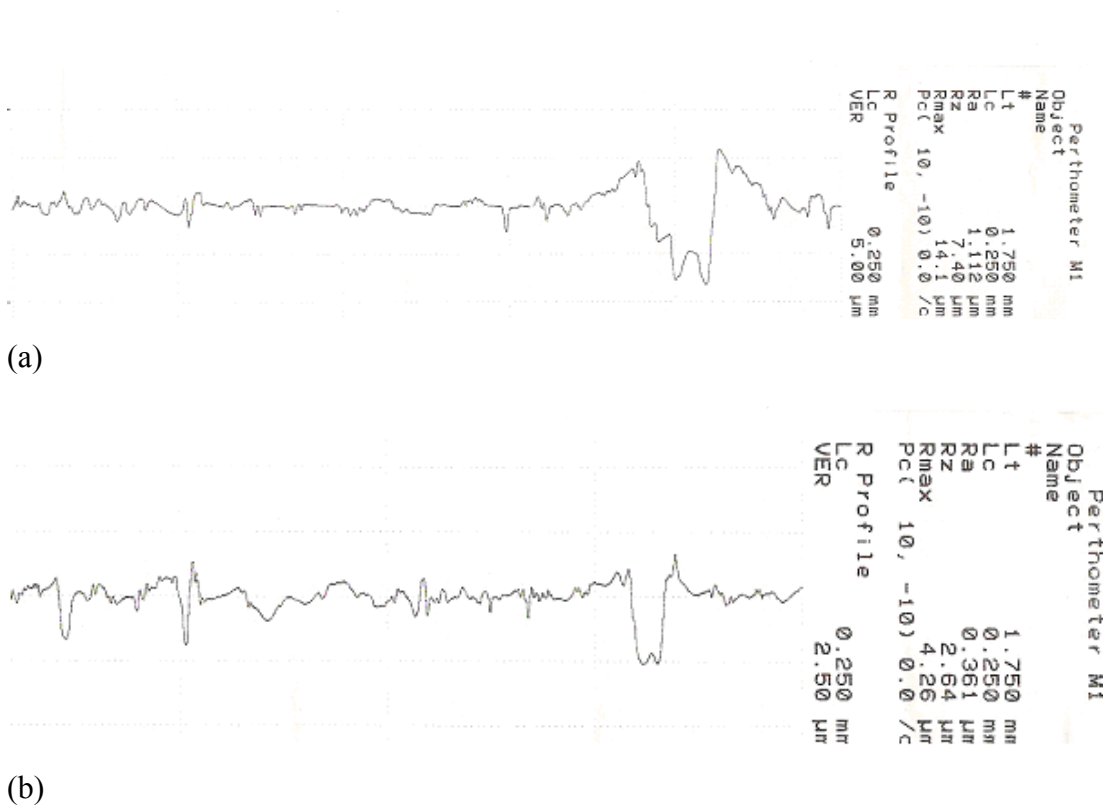
D = Numunenin orta kısmının çapıdır.

Hazırlanan numunelere uygulanan yorulma deneyi sonrasında kırılan deney parçaları incelenerek yorulma çatlaklarının oluştuğu yer saptanmıştır.

Yorulma deneyleri, numunelerin akma sınırının üzerinde seçilen 300, 400 ve 500 MPa gerilme genliklerinde, her bir gerilme değeri için 8 kez tekrarlanmak suretiyle yapılmış, sonuçta her bir gerilme genliği için 8 değer ortalaması alınarak ve bir grafik üzerinde çizilerek, tanımlanan bu koşula uyan durum için Wöhler eğrisi belirlenmeye çalışılmıştır.

5.9. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Aşınma deneylerinin öncesinde ve sonrasında pimlerin diske temas eden yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri yapılmış, R_a , R_z ve R_{max} değerleri tespit edilmiş, bu değerlerin aşınmada oynadıkları rol ve aşınma mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr Perthometer M1 marka cihazda yapılmıştır. Pürüzler, belirli bir mesafe boyunca ve belirli bir profil ortalama çizgisine göre tayin edilmektedir. Profil ortalama çizgisinin üstündeki ve altındaki pürüz kesit alanları birbirine eşittir. Bu cihazda yapılan bazı örnek taramalar Şekil 5.33'te gösterilmiştir.



Şekil 5.33.(a) Karbon-karbon kompozit fren balatasının 30 N’da yapılan aşınma deneyinin sonrasında alınan yüzey pürüzlülüğü değerleri, (b) Elektrot-A ile “z-doğrultusunda” dolgu kaynağı yapılan numunenin disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrasında alınan yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Burada;

* Lt : Taranan uzunluğu,

* Lc : Taranan uzunluğun 7’ye bölümünü,

- * Ra : Taranan uzunluktaki 7 eşit parçadan toplam 5 parçası içerisindeki pürüzlerin yükseklik ve derinlik değerlerinin profil ortalama çizgisinden dikey sapmasının aritmetik ortalama değerini,
- * Rmax: 7 eşit parçadan 5 bölge içerisindeki en derin ve en yüksek pürüz arası mesafe değerini,
- *Rz : 7 eşit parçadan 5 bölge içerisindeki ortalama pürüz yüksekliğinin, profil ortalama çizgisine olan uzaklığını,
- * Pc : Her parçada kaç noktada ölçüm yaptığını ve,
- * VER : Kaç μm 'de ölçüm yaptığını göstermektedir.

Yüzey pürüzlülüğü genel olarak profilometre ile ölçülmektedir. Mekanik profilometreler, elmas sivri bir ucun malzeme yüzeyinde gezdirilmesi sırasında sivri ucun malzeme yüzeyindeki girinti çıkıntılardan geçirilerek yüzey profilinin çıkarılması prensibine göre çalışmaktadır.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Genel

Bu tez çalışması kapsamında, tren bandajlarının aşınarak gereken ölçülerinin altına inen kısımlarına dolgu kaynağı işlemi uygulanarak tren tekerlerinin tekrar kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı sert dolgu elektrotu ile elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak, bunun yanında endüstriyel boyutta özlü tel kullanarak gaz altı kaynak metoduyla gerçekleştirilen ve Boden kaynağı olarak adlandırılan yöntemi kullanarak dolgu kaynakları yapılmıştır. Bu kaynaklı birleştirmelerden ve dolgu kaynağı yapılan yüzeylerden aşınma deneyleri için pim şeklinde numuneler ve standartlara uygun yorulma deney numuneleri CNC tornalar yardımıyla hazırlanmış ve bu numunelerle aşınma ve yorulma deneyleri, laboratuvar ortamında yapılmıştır.

Ayrıca, tren teker bandajı - ray sisteminin bir elemanı olması sebebiyle tren fren balatalarının da aşınma ve yorulma davranışları karakterize edilmiştir. Bunlar dökme demir malzemeden üretilebildiği gibi teknolojideki son gelişmelerin ışığında karbon-karbon kompozitlerinden de üretilebilmektedirler.

Deneylerde kullanılan bütün numunelerin sertlik değerleri ölçülmüş, mikroyapıları elde edilmiş ve tüm sonuçlar aşağıda verilmiştir.

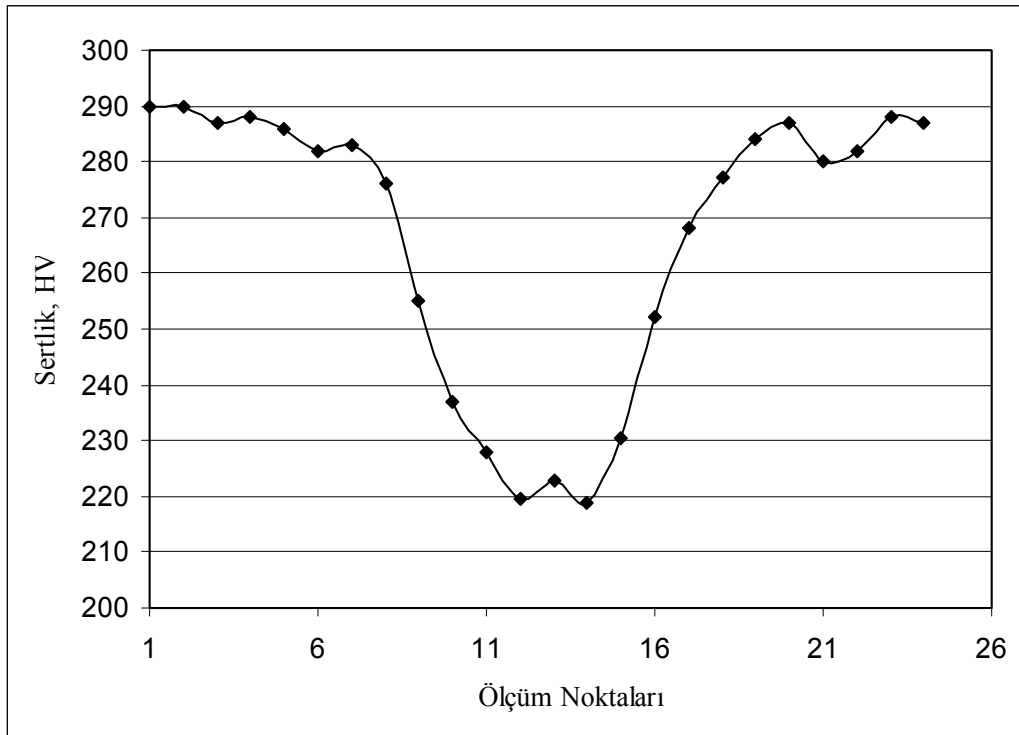
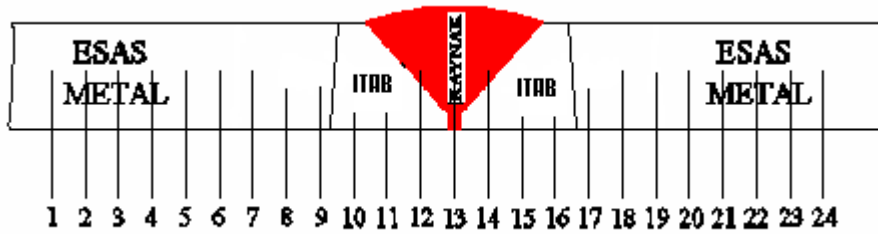
6.2. Sertlik

Sertlik ölçümleri ilk önce ray ve bandaj numunelerinin her biri için on ölçüm yapılmış, bu ölçümlerin ortalaması alınarak sonuçlar Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Ray ve teker bandajı numunelerinin sertlik değerleri

Malzeme	HV
Ray	269
Bandaj	232

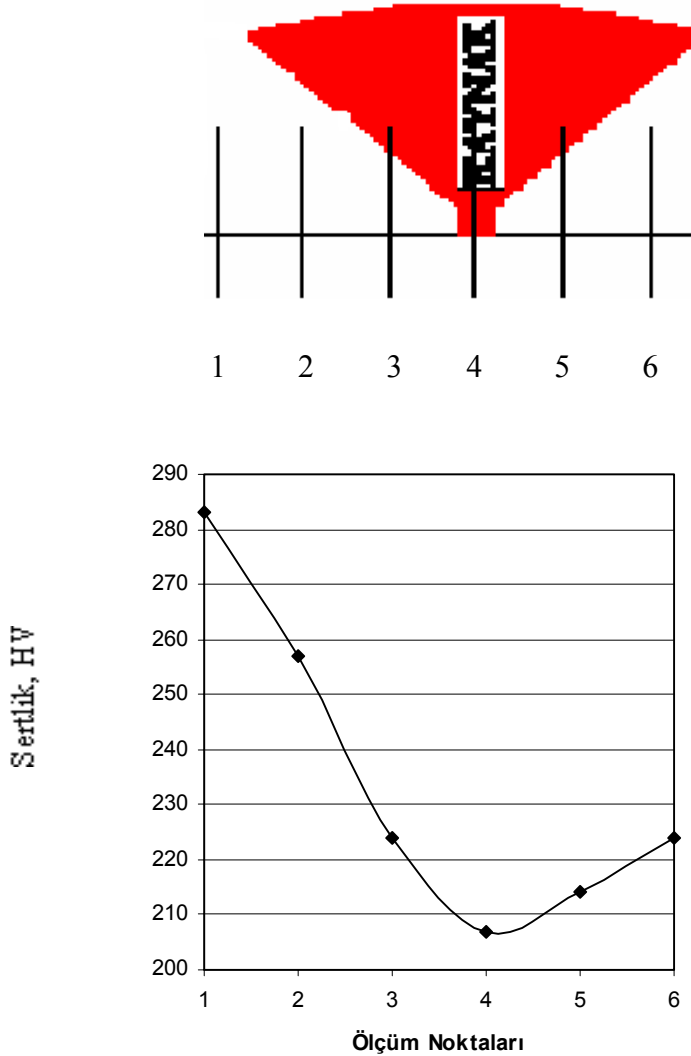
Kaynaklı birleştirmelerde esas metalden başlayarak ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak bölgesi sonra tekrar ITAB ve esas metali kapsayacak şekilde sırasıyla farklı bölgelerin Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 6.1’de gösterildiği şekilde 1-9 ve 17-24 arası noktalar esas metalden, 10-11 ve 15-16 arası noktalar ısının tesiri altındaki bölgeden (ITAB) ve 12-14 arası noktalar da kaynak bölgesinden alınmıştır.



Şekil 6.1. Elektrot-A ile kaynak yapılmış numunelerde sertliğin bölgelere göre değişimi

Esas metalde yaklaşık olarak ortalama 285 HV civarında olan sertlik değeri, ısının tesiri altındaki bölgeye yaklaşıldıkça kademeli olarak 255 HV ve kaynak bölgesine çok yakın yerlerde 225 HV değerlerine kadar düşmüştür. Kaynaklı bölgede ise ortalama sertlik 220 HV olarak bulunmuştur. Kaynaklı bölgeden çıkılıp esas metale doğru ilerleyerek sıra-sertlik almaya devam edildiğinde benzer değerler ve kademeli sertlik artışı gözlenmiştir. Sertlik eğrisinin kaynak bölgesine rastlayan kısmında bir kuyu biçimli düşüş olduğu belirgin olarak görülmektedir.

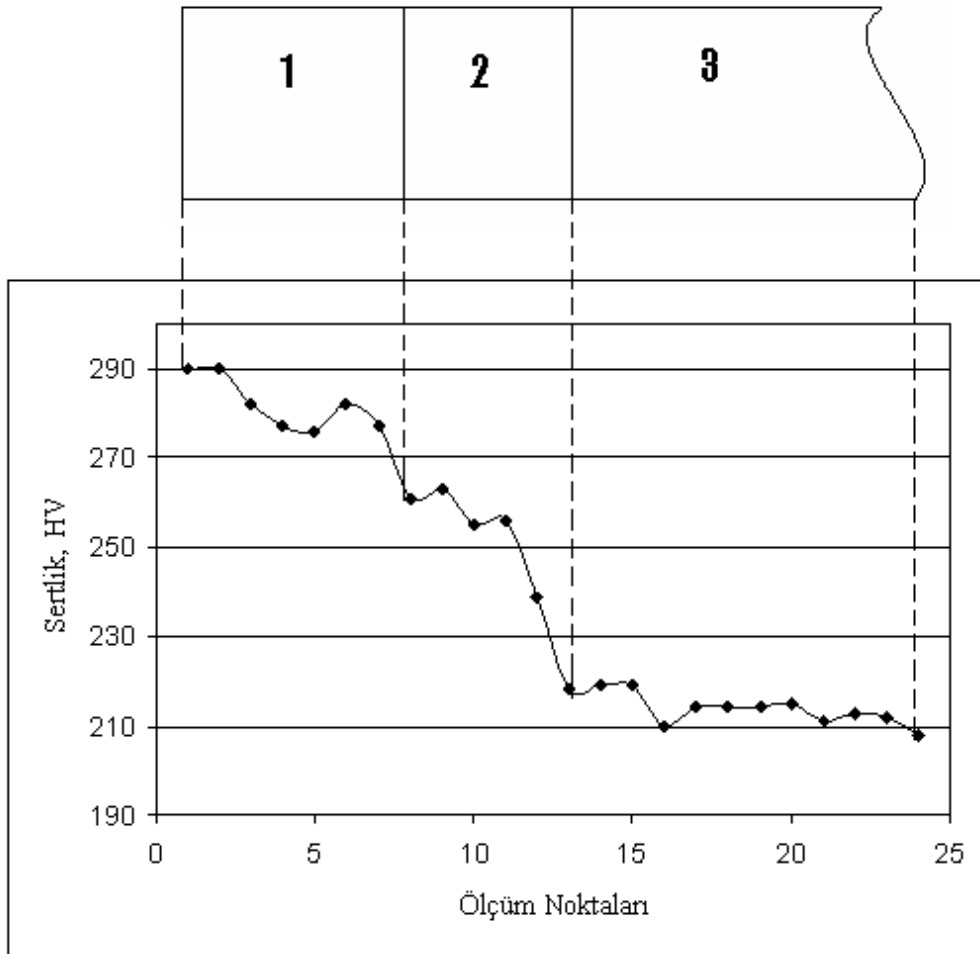
Elektrot-B ile kaynak yapılmış, tamamen kaynaklı bölgeden yatay doğrultuda alınan sertlik değerleri de Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Elektrot-B ile kaynak yapılmış numunenin kaynaklı bölgesinde soldan sağa doğrultuda ölçülen sertlik değerlerinin gösterimi

Şekil 6.3'te ise Boden yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan bandajlardan elde edilen sertlik sonuçları gösterilmiştir. Bandajların dolgu kaynağı uygulanan kısımlarından bir kesit çıkarılmış ve buradaki farklı özellikteki bölgeler 1, 2 ve 3 biçiminde numaralandırılmışlardır. "1" esas metal bölgesini, "2" ısının tesiri altındaki bölgeyi (ITAB) ve "3" dolgu kaynağı yapılan kaynak bölgesini temsil etmektedir.

Grafikteki 1-7 arası ölçüm noktaları, 1 numaralı esas metal bölgesine; 8-13 arası ölçüm noktaları 2 numaralı ITAB'a ve 14-24 arası ölçüm noktaları ise 3 numara ile gösterilen kaynak bölgesine aittir. Esas metalden ITAB ve kaynak bölgesine doğru gidildikçe sertliğin kademeli olarak düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.3. Boden kaynaklı numunede sertliğin esas metalden dolgu kaynağı bölgesine doğru değişimi

6.3. Aşınma Sonuçları

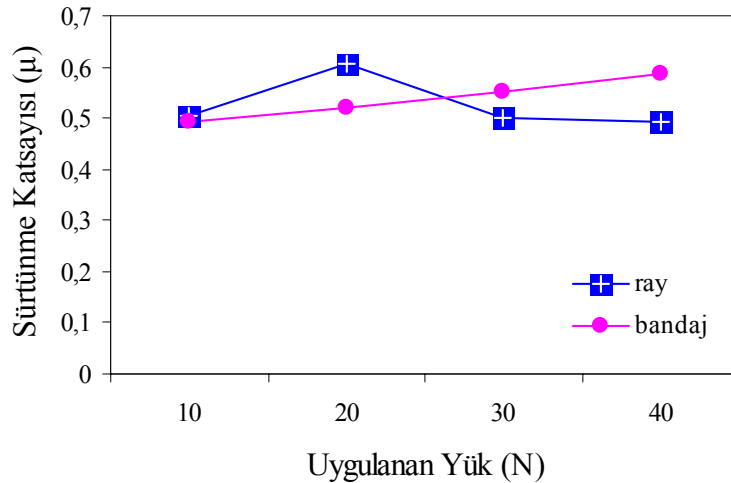
Aşınma deneyleri disk-üstü-pim (pin-on-disc) aşınma deney yöntemi kullanılarak, 10, 20 N, 30N ve 40N yüklerde, 1 m/s sabit kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneyler hem kuru sürtünme hem de yaş sürtünme koşullarında yapılmıştır. Tren tekeri-ray ve fren balatalarının birbirleriyle temas halindeki yuvarlanmalı/kaymalı hareketi dört mevsim devam ettiği için her türlü iklim koşulu için aşınmanın karakterize edilmesi ve etkin olan aşınma mekanizmasının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Deneylerin her birinde 3600 m yol alınmıştır.

6.3.1. Kuru Aşınma Sonuçları

Kuru sürtünme koşullarında yapılan disk-üstü-pim aşınma deneylerinde numunelerin; sürtünme katsayısı (μ), ağırlık kaybı (mg), hacimsel azalma (mm^3) ve spesifik aşınma oranı (gr/N.m) değerleri hesaplanmış, sonuçlar aşağıdaki bölümlerde grafikler biçiminde verilmiştir.

6.3.1.1. Sürtünme Katsayısı Değerleri

Şekil 6.4'te ray ve teker bandajı numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.

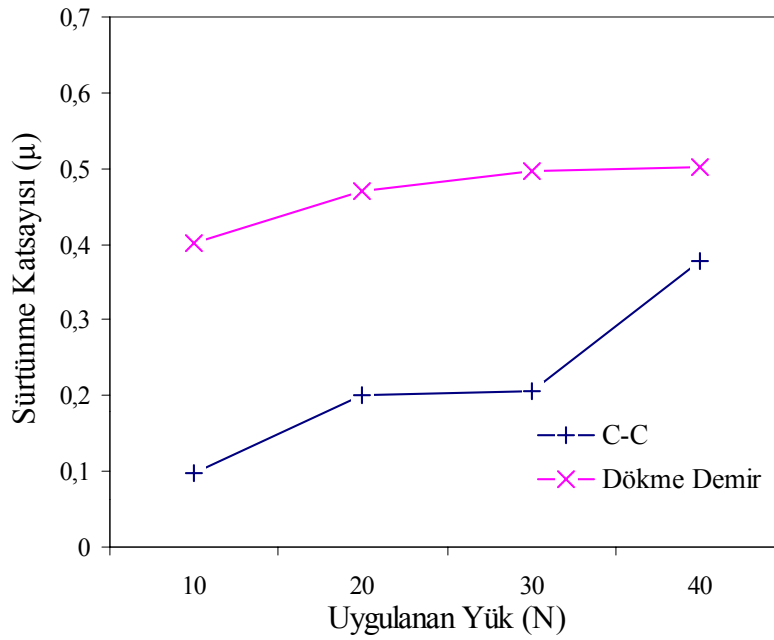


Şekil 6.4. Ray ve teker bandajının kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

Teker bandajı, tren tekerine çepeçevre geçirilmiş halde ray üstünde yuvarlanmalı/kaymalı hareket yapar. Bandaj numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı değerlerinin

10N’da 0,494 olarak bulunduğu ve artan yükte doğrusal olarak artıp 40N’da yapılan deneylerde 0,587 değerlerine çıktığı gözlenmiştir. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ise durum biraz farklıdır. 10N’da 0,505 olan sürtünme katsayısı değeri, 20N’da yapılan deneyde 0,608 değerine ulaşmış, ama yüksek yüklerde deneyler yapıldıkça önce 30N’da yapılan deneylerde 0,502 sonra da 40N’da yapılanlarda da 0,494 değerlerine düşmüştür. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orjinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.5’te karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin göreceli karşılaştırılması verilmiştir.

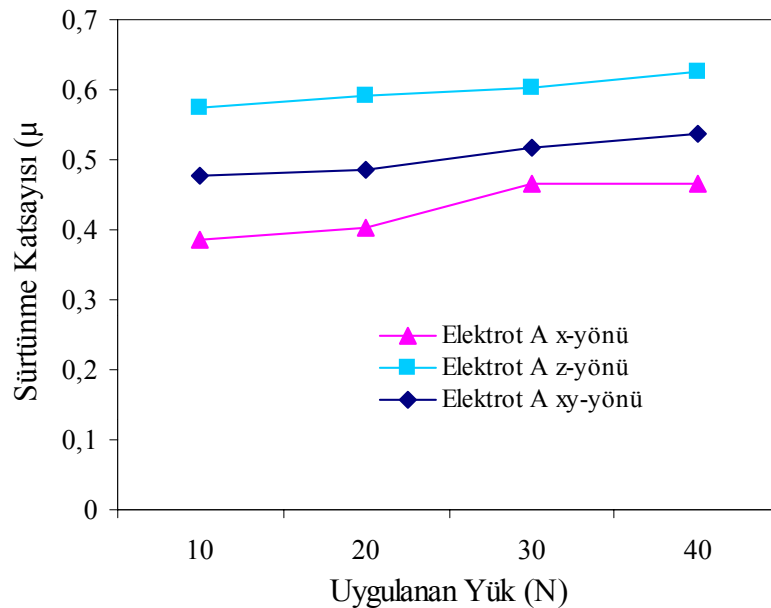


Şekil 6.5. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Fren balataları demiryolu endüstrisinde sabo olarak da adlandırılmaktadırlar. Dökme demirden üretilen saboların sürtünme katsayısı değerleri 10N’da 0,401 olarak hesaplanmışken bu değerler artan yükte doğrusal olarak artış göstermiş ve 40N’da yapılan deneylerde 0,503 civarlarına yükselmiştir. Teknolojideki ilerlemelerle beraber trenlerin fren balataları da daha hafif, daha dayanımlı ve üstün özellikli malzemelerden, özellikle de karbon-karbon kompozitlerinde yapılmaya başlanmıştır. Karbon-karbon kompozit saboların (C-C) da sürtünme katsayıları artan yükte beraber

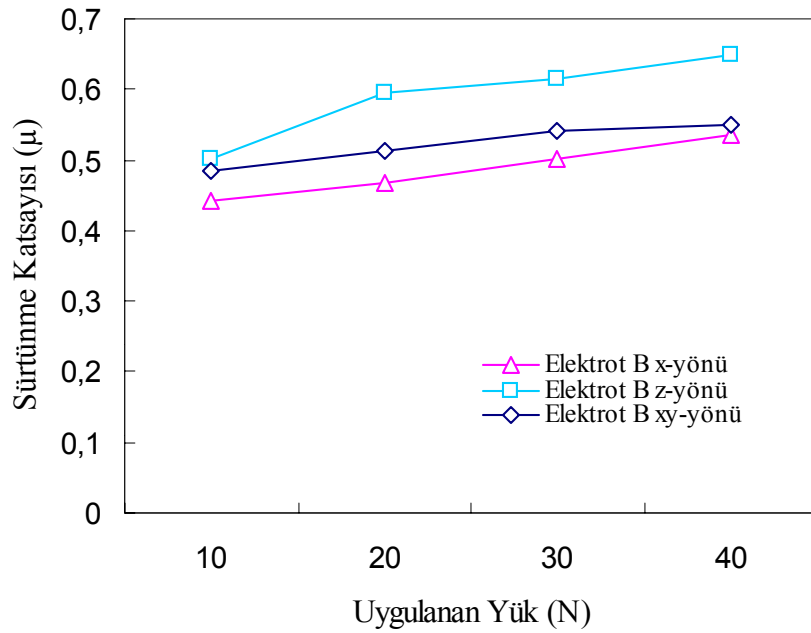
artmaktadır. Fakat hem sürtünme katsayısı düşüktür hem de bu artış eğilimi dökme demir sabolardan farklı olup 20N yüke kadar hızlı bir artış, 20 ve 30 N’da yapılan deneylerde ise çok küçük bir artma sonucu sırasıyla sürtünme katsayıları 0,201, 0,207 olarak bulunmuştur. 40 N yük altında ise sürtünme katsayısı 0,377 olarak hesaplanmıştır.

Elektrot-A ile Şekil 5.8’de belirtilen “x”, “xy” ve “z” yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerin sürtünme katsayısı-uygulanan yük grafikleri Şekil 6.6’da verilmiştir. Elektrot-A ile yapılan dolgu kaynağı işleminin sürtünme katsayısı (μ) değerleri üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’dan 30N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının 0.387 değerinden başlayarak 0.466 değerine kadar doğrusal olarak arttığı; fakat bu değerden sonra değişmeyerek 40N’da yapılan aşınma deneylerinde de aynı değeri verdiği görülmüştür. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde ise 10N’da 0.476 olan sürtünme katsayısı doğrusal biçimde kademeli olarak artarak 40N’da yapılan deneylerde 0.536 değerlerine çıkmaktadır. Benzer durum “z” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için de geçerlidir; sürtünme katsayısı 10N’da 0.573 değerlerindeki uygulanan yükün artırılmasıyla 40N’da 0.625’ler mertebesine yükselmiştir. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek sürtünme katsayısı değerleri “z-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 0.573, 0.592, 0.604 ve 0.625; en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise “x-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 0.387, 0.402, 0.466 ve 0.466 olarak hesaplanmıştır.



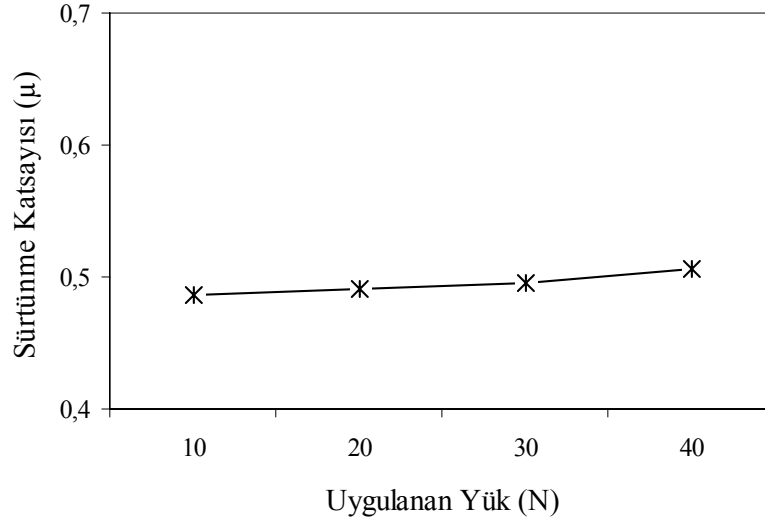
Şekil 6.6. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Elektrot-B ile Şekil 5.8’de belirtilen “x”, “xy” ve “z” yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerin sürtünme katsayısı-uygulanan yük grafikleri Şekil 6.7’de verilmiştir. Buna göre, her üç farklı doğrultuda da sürtünme katsayısı (μ) değerlerinin uygulanan yükün artmasıyla doğrusal olarak artmış olduğu görülmüştür. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde 10N’da 0.443 olan sürtünme katsayısı değerinin uygulanan yükün artmasıyla kademeli olarak artarak 40N’da 0.536 değerlerine ulaştığı görülmüştür. Benzer durumlar diğer iki farklı doğrultuda dolgu kaynağı yapılmış numunelerin aşınma deneyleri için de aynıdır. “xy” yönünde 10N’da 0.486 olan sürtünme katsayısı değerleri 40N’da yapılan deneylerde 0.551’lere yükselmiştir. “z” yönünde 10N’da 0.503 olan sürtünme katsayısı, 40N’da 0.648 değerlerine kadar yükselmiştir. Elektrot-A ile yapılan aşınma deneylerinde olduğu gibi burada da, deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek sürtünme katsayısı değerleri “z-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 0.503, 0.596, 0.615 ve 0.648; en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise “x-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 0.443, 0.468, 0.501 ve 0.536 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

Başka bir dolgu kaynağı metodu olan ve endüstriyel boyutta uygulanan Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri grafik olarak Şekil 6.8’de verilmiştir.



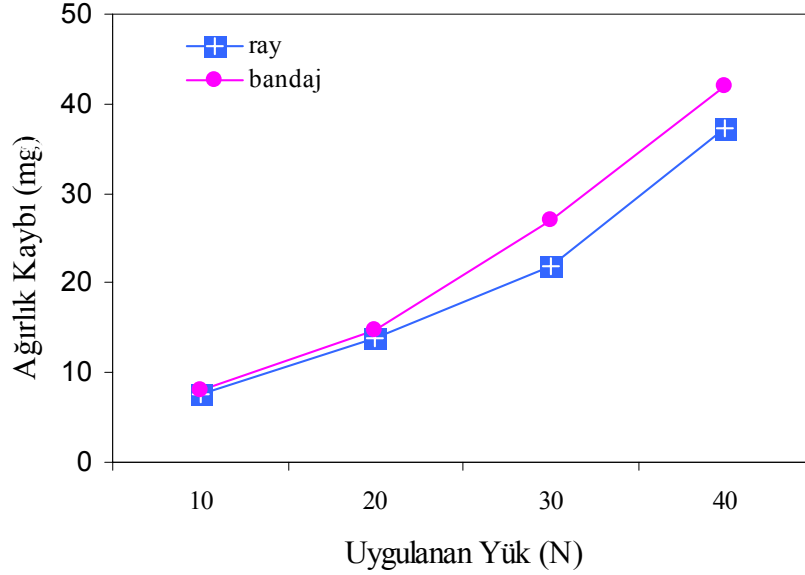
Şekil 6.8. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Burada da elektrik ark kaynak yöntemiyle, Elektrot-A ve Elektrot-B kullanılarak dolgu kaynağı atılan numunelerle yapılan aşınma deneylerinin sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değeri 10N’da 0.486 değerindeyken, uygulanan yükün artırılmasıyla hafif bir artış göstermiş ve 40N’a gelindiğinde 0.506 değerlerine yükselmiştir. Bu durum, elektrik ark kaynak yöntemiyle Boden kaynak yönteminin birbirleriyle paralel sonuçlar verdiklerinin bir göstergesidir.

Bu tez çalışmasının başlangıcında, yüzeylere dolgu kaynağı uygulamasında izotropinin olup olmadığının incelenmesi amaçlanmış ve bu yüzden farklı doğrultularda kaynaklar çekilmiştir. Disk-üstü-pim aşınma deneyleri sonucu farklı doğrultularda kaynak çekilmiş numunelerde farklı sürtünme katsayısı değerleri bulunması numunelerde anizotropinin olduğunu kanıtlamıştır.

6.3.1.2. Ağırlık Kaybı Değerleri

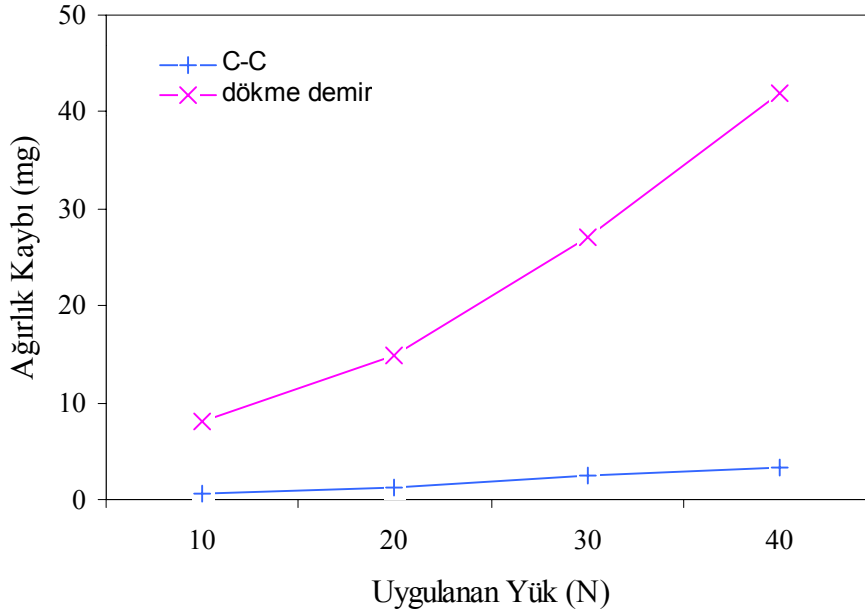
Şekil 6.9’da ray ve teker bandajı numunelerinin ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.9. Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

Bandaj numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerlerinin 10N’da 8 mg olarak bulunduğu ve artan yükü doğrusal olarak artıp 40N’da yapılan deneylerde 42 mg değerlerine çıktığı gözlenmiştir. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ise durum biraz farklıdır. 10N’da 8 mg olan ağırlık kaybı değeri, 20N’da yapılan deneyde 13.8 mg değerine ulaşmış, yüksek yüklerde deneyler yapıldıkça önce 30N’da yapılan deneylerde 21.9 mg sonra da 40N’da yapılanlarda da 37.2 mg değerlerine yükselmiştir. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının ağırlık kaybı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.10’da karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin göreceli karşılaştırılması verilmiştir.

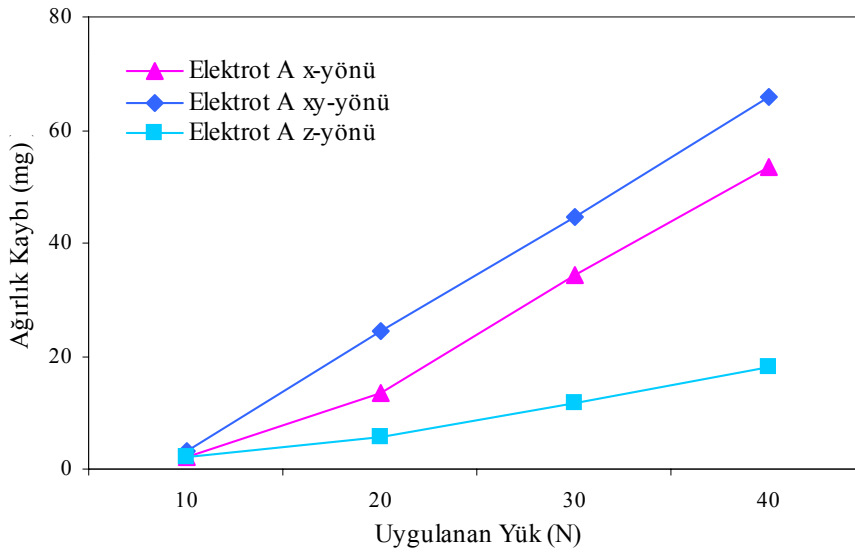


Şekil 6.10. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

Karbon-karbon kompozit saboların (C-C) ağırlık kayıpları artan yükle beraber çok az artmaktadır; 10N, 20N, 30N ve 40N'luk yüklerde sırasıyla 0.65, 1.17, 2.52 ve 3.3 mg ağırlık kaybı ölçülmüştür. Dökme demir malzemeden üretilen tren fren balatalarının ise ağırlık kaybı değerleri artan yükle beraber doğrusal olarak artış göstermiştir. 10N ve 20N'da 8 mg ve 14.8 mg olan artış eğilimi 20N'dan sonra daha keskin bir eğimle 30N ve 40N'da sırasıyla 27 mg ve 42 mg olarak devam etmiştir. Karbon-karbon kompozit fren balatalarının bu ağırlık kaybı değerleri, dökme demir malzemeden üretilmiş olanlarla kıyaslanamayacak kadar küçüktür. Bu sonuç, son yıllarda kompozit fren balatalarının (saboların) neden daha çok tercih edildiklerini açıklamaktadır; bunlar, hafifliklerinin yanında dökme demir sabolara kıyasla çok daha uzun süreli kullanım ömrüne sahiptirler.

Elektrot-A ile Şekil 5.8'de belirtilen "x", "xy" ve "z" yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerinin ağırlık kaybı-uygulanan yük grafikleri Şekil 6.11'de verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kayıpları doğrusal olarak artmıştır. "x" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N'dan 20N'a kadar yapılan aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerleri 2.3 mg ve 13.4 mg olarak ölçülmüşken 20N'dan sonra daha belirgin bir eğimle 30N'da 34.3mg, 40N'da da 53.5 mg'a yükselmiştir. "xy" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 10N'da 3.3 mg olan ağırlık kaybı lineer olarak artarak 20N, 30N ve

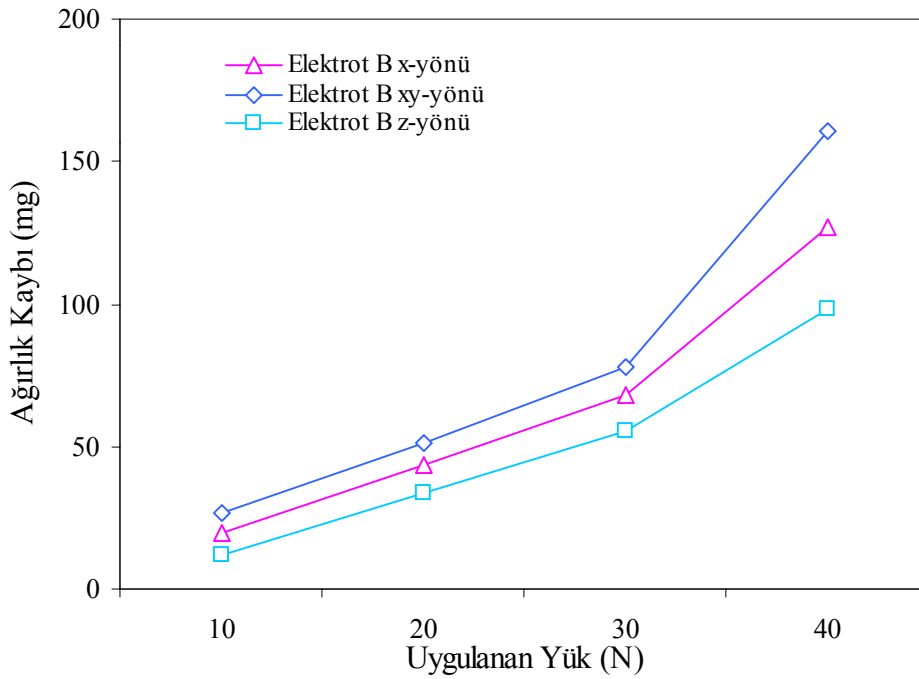
40N’da yapılan deneylerde sırasıyla 24.5, 44.5 ve 65.8 mg değerlerine çıkmaktadır. Benzer durum “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için de geçerlidir; ağırlık kayıpları 10N, 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 2, 5.5, 11.6 ve 17.9 mg olarak bulunmuştur. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek ağırlık kaybı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 3.3, 24.5, 44.5 ve 65.8 mg; en düşük ağırlık kaybı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 2, 5.5, 11.6 ve 17.9 mg olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

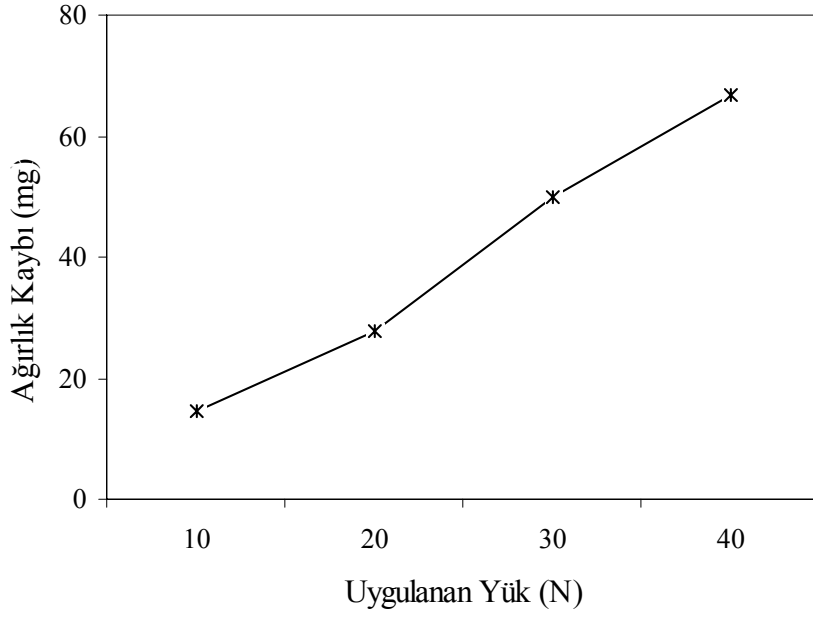
Elektrot-B ile daha önce belirtilen “x”, “xy” ve “z” yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerinin ağırlık kaybı-uygulanan yük grafikleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kayıpları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N, 20N ve 30N’da yapılan aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerleri 19.8, 43.2 ve 68 mg olarak ölçülmüşken 30N’dan sonra ani bir yükselişle 40N’da 127 mg’a yükselmiştir. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 10N’da 27 mg olan ağırlık kaybı lineer olarak artarak 20N ve 30N’da sırasıyla 51 ve 77.7 mg değerlerine çıkmaktadır. Daha sonra x-yönündekine benzer şekilde 30N’dan sonra sert bir yükselişle 40N’da yapılan deneyde 161 mg ağırlık kaybı değeri vermiştir. Benzer durum “z” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için de geçerlidir; ağırlık kayıpları 10N, 20N ve

30N’da sırasıyla 12.2, 34 ve 55.3 mg olarak bulunmuştur, 40N’da ise 98 mg ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Her üç doğrultuda da 30N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde lineer bir ağırlık kaybı artışı gözlenmiştir; bununla beraber, 30 N değerinden sonra 40N’da deneyler yapıldığında ağırlık kayıpları yaklaşık olarak 2–2,5 kat bir artış göstermişlerdir. Bu durumun 30N’dan sonra numunelerin aşınma mekanizmasının değişip daha şiddetli ve karmaşık mekanizmaların aşınmada etkin rol almasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek ağırlık kaybı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 27, 51, 77.7 ve 161 mg; en düşük ağırlık kaybı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 12.2, 34, 55.3 ve 98 mg olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.12. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

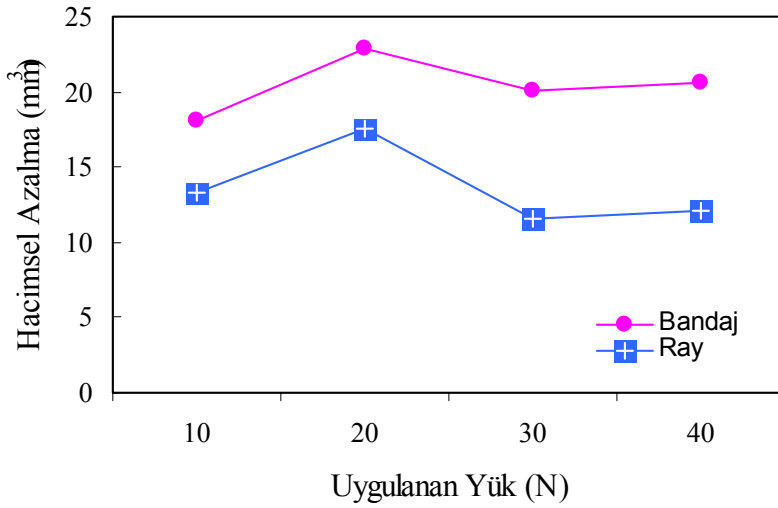
Şekil 6.13’te Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen ağırlık kaybı değerleri verilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kaybı değerleri lineer olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde sırasıyla, 14.4, 27.9, 49.8 ve 66.7 mg ağırlık kaybı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.13. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

6.3.1.3. Hacimsel Azalma Değerleri

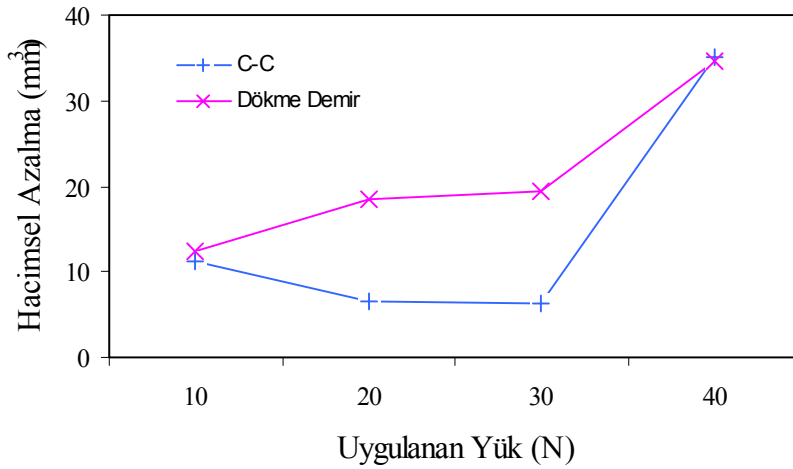
Şekil 6.14'te ray ve teker bandajı numunelerinin hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.14. Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

Bandaj numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerlerinin 10N'da 18.09 mm³ olarak bulunduğu ve artan yüklerle doğrusal olarak artıp 20N'da yapılan deneylerde 22.90 mm³ değerlerine çıktığı gözlenmiştir. 20N'dan 30N'a yük arttığında ise hacimsel azalma miktarının 20.07 mm³ değerine gerilediği görülmüştür. Buradan sonra hafif bir yükselme eğilimi gösteren hacimsel azalma miktarı 40N'da 20.64 mm³ olarak hesaplanmıştır. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde de benzer durum söz konusudur. 10N'da 13.29 mm³ olarak bulunduğu ve artan yüklerle doğrusal olarak artıp 20N'da yapılan deneylerde 17.53 mm³ değerlerine çıktığı gözlenmiştir. 20N'dan 30N'a yük arttığında ise hacimsel azalma miktarının 11.59 mm³ değerine gerilediği görülmüştür. Buradan sonra hafif bir yükselme eğilimi gösteren hacimsel azalma miktarı 40N'da 12.16 mm³ olarak hesaplanmıştır. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının hacimsel azalma miktarı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.17'de karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının hacimsel azalma miktarı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin göreceli karşılaştırılması verilmiştir.

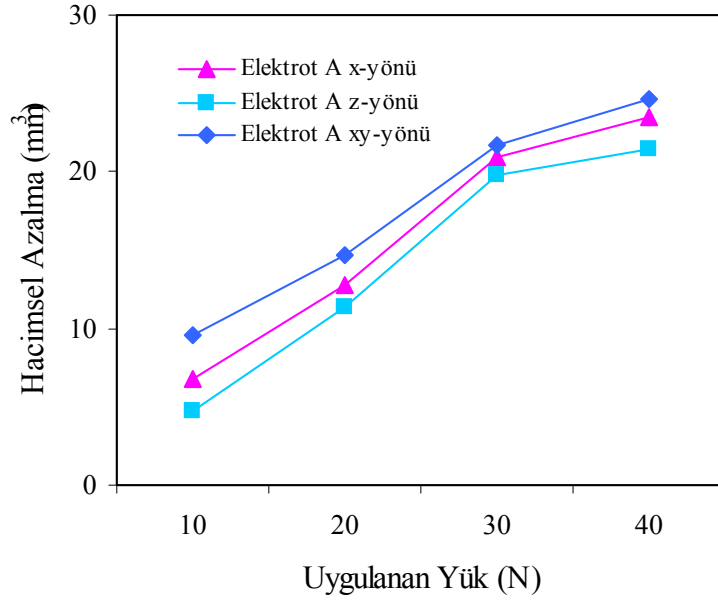


Şekil 6.15. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Karbon-karbon kompozit malzemedan üretilen tren fren balatalarının (saboların) hacimsel azalma miktarı 10N'da 11.31 mm³ değerinde iken artan aşınma yüküyle azalarak 20N'da 6.50 mm³, 30N'da da 6.22 mm³ değerlerine düşmüştür. Daha sonra 40N yükte yapılan deneylerde çok ani bir artışla 30N'daki değer yaklaşık 5 katına çıkarak 35.06 mm³ mertebesine çıkmıştır. Dökme demir saboların hacimsel azalma miktarlarında da 30N'dan sonra hızlı bir artış hesaplanmıştır. Uygulanan

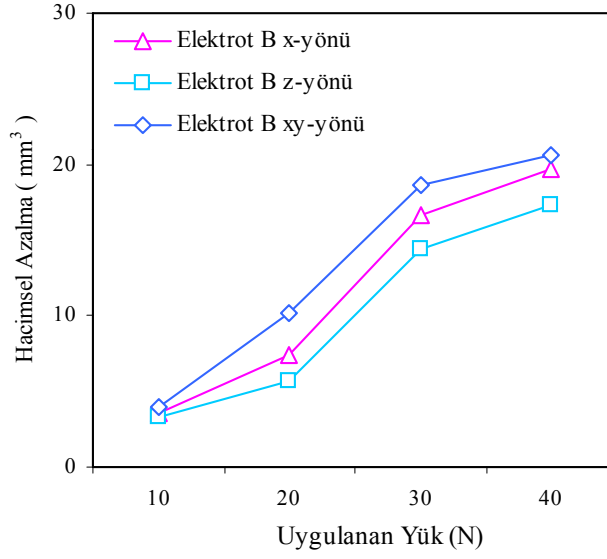
10N, 20N ve 30N yüklerde sırasıyla, 12.34, 18.38 ve 19.46 mm³ hacimsel azalma miktarı hesaplanmışken bu değer 40N'da 34.57 mm³ olarak tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak hem kompozit hem de dökme demir fren balatalarının 30N'luk aşınma yüküne kadar olan yüklerde güvenli olarak kullanılabilceği, 30N'u geçen yüklemelerdeki çalışma koşullarında kullanım ömürlerinin düşeceği sonucuna varılmıştır.

Şekil 6.16'da Elektrot-A ile "x", "xy" ve "z" yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işleminin sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan hacimsel azalma miktarı değerleri verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla hacimsel azalma miktarları doğrusal olarak artmıştır. "x" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N'dan 30N'a kadar yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri 6.79, 12.72 ve 20.92 mm³ olarak ölçülmüşken 30N'dan sonra artış hızı yavaşlamış ve 40N'da yapılan deneylerde 23.47 mm³ olarak hesaplanmıştır. "xy" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise x-yönündekilere yakın bir eğimle hacimsel azalma miktarı lineer artarak 10N, 20N ve 30N'da sırasıyla 9.58, 14.70 ve 21.76 mm³ olarak hesaplanmıştır. 30N'dan sonra az bir artış göstermiş ve 40N'da 24.58 mm³ değerine yükselmiştir. "z"-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için eğilim diğer doğrultularla paralellik göstermiştir. 10N'da 4.73 mm³ olan hacimsel azalma miktarı 20N, 30N ve 40N'da yapılan deneylerde 11.34, 19.8 ve 21.45 mm³ olarak bulunmuştur. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek hacimsel azalma miktarı değerleri "xy-yönünde" dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 9.58, 14.70, 21.76 ve 24.58 mm³, en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise "z-yönünde" dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 4.73, 11.34, 11.88 ve 21.45 mm³ olarak hesaplanmıştır.



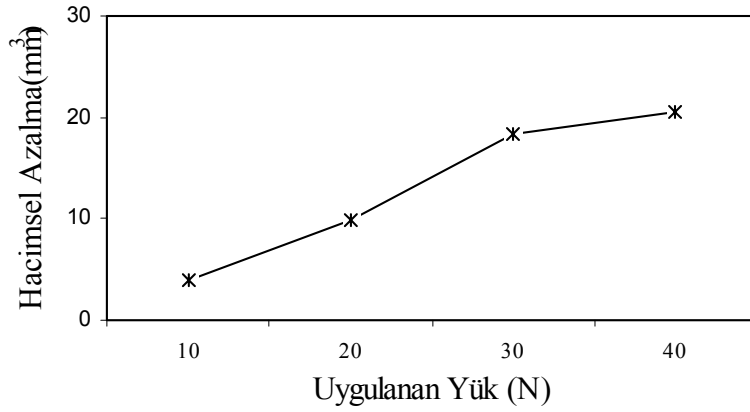
Şekil 6.16. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.17’de Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan hacimsel azalma miktarı değerleri verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla hacimsel azalma miktarları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’dan 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri 3.62 mm^3 ’den 7.65 mm^3 değerine yükselmiş, 20N’dan sonra daha dik bir eğimle lineer olarak artmaya devam etmiş ve 30N’da 16.66 mm^3 , 40 N’da da 19.64 mm^3 değerine çıkmıştır. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise x-yönündekilere yakın bir eğimle hacimsel azalma miktarı lineer artarak 10N, 20N ve 30N’da sırasıyla 3.96 , 10.18 ve 18.66 mm^3 olarak hesaplanmıştır. 30N’dan sonra az bir artış göstermiş ve 40N’da 20.64 mm^3 değerine yükselmiştir. “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için benzer artış eğilimi görülmüştür. 10N’dan 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri 3.35 mm^3 ’den 5.70 mm^3 değerine yükselmiş, 20N’dan sonra daha dik bir eğimle lineer olarak artmaya devam etmiş ve 30N’da 14.42 mm^3 , 40 N’da da 17.24 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek hacimsel azalma miktarı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 3.96 , 10.18 , 18.66 ve 20.64 mm^3 , en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 3.35 , 5.70 , 14.42 ve 17.24 mm^3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.17. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

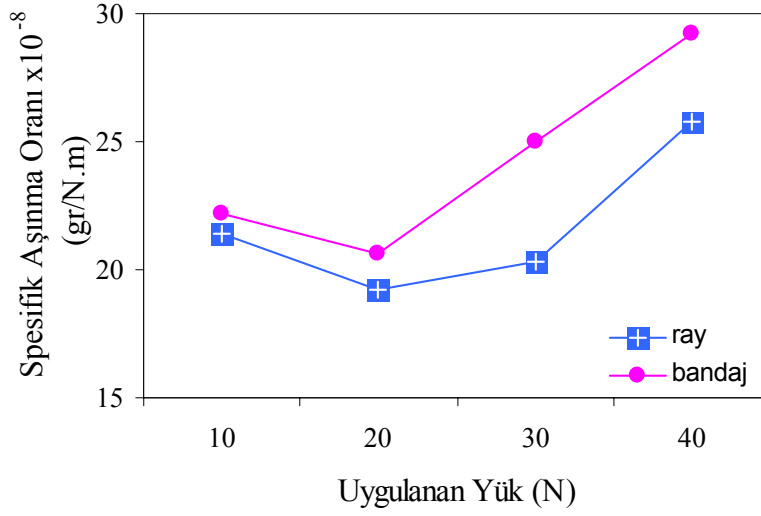
Şekil 6.18’de Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen hacimsel azalma değerleri verilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kaybı değerleri lineer olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde sırasıyla, 3.90, 9.90, 18.38 ve 20.50 mm³ hacimsel azalma miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 6.18. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

6.3.1.4. Spesifik Aşınma Oranı Değerleri

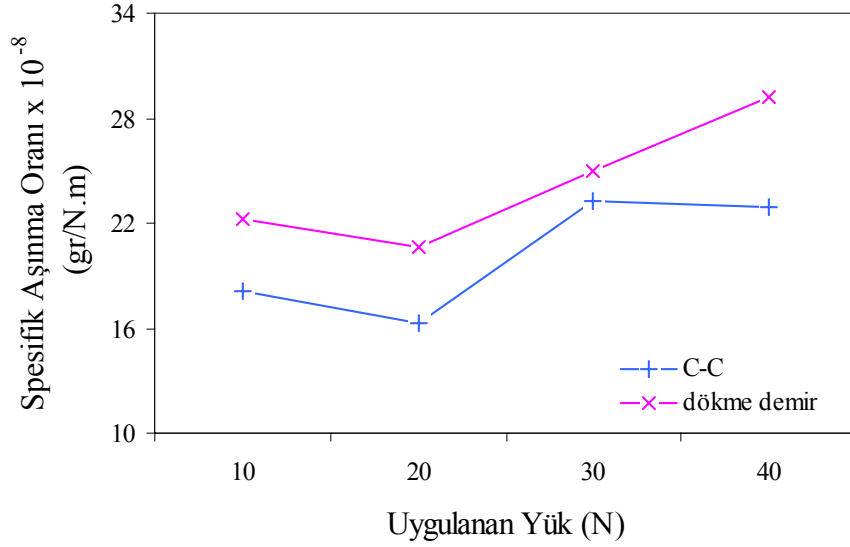
Şekil 6.19’da ray ve teker bandajı numunelerinin spesifik aşınma oranı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.19. Ray ve teker bandajı numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Tren teker bandajı numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değerlerinin 10N'da 22.2 gr/N.m olarak bulunduğu ve artan yükte doğrusal olarak azalıp 20N'da yapılan deneylerde 20.6 gr/N.m değerlerine düştüğü gözlenmiştir. 20N'dan sonra ise doğrusal olarak artan yükte beraber artmıştır. Spesifik aşınma oranı 30N ve 40N'da sırasıyla 25.0 ve 29.2 gr/N.m olarak hesaplanmıştır. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde de benzer durum söz konusudur. 10N'da 21.4 gr/N.m bulunan spesifik aşınma oranı 20N'da 19.2 gr/N.m değerine düşmüş, buradan kademeli olarak artarak 30N'da 20.3 gr/N.m, 40N'da ise 25.8 gr/N.m değerlerine yükselmiştir. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının spesifik aşınma oranı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.20'de karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının spesifik aşınma oranı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi verilmiştir.

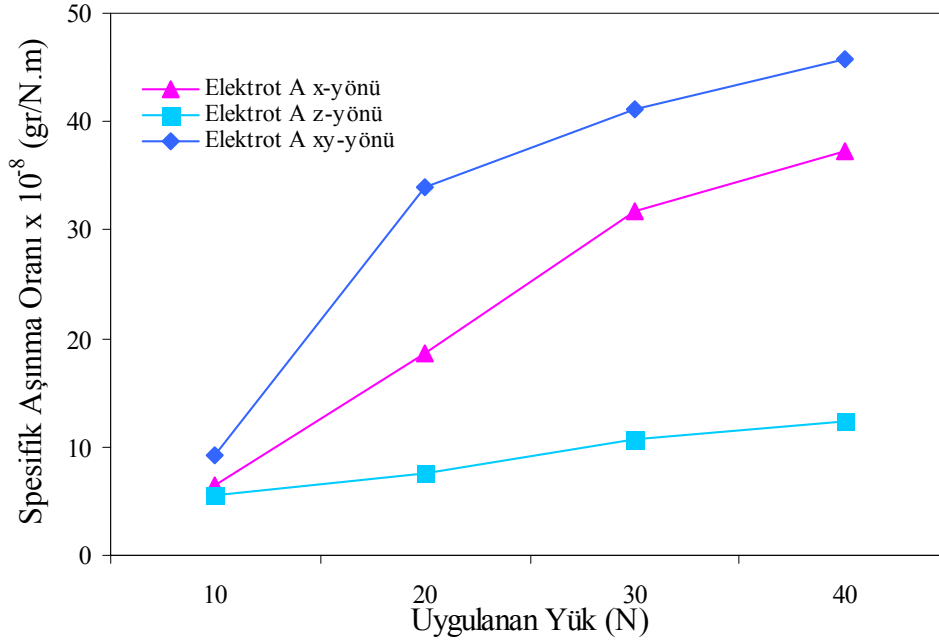


Şekil 6.20. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Karbon-karbon kompozit malzemedan üretilen tren fren balatalarının (saboların) hacimsel azalma miktarı 10N’da 18.1 gr/N.m değerinde iken artan aşınma yüküyle azalarak 20N’da 16.3 gr/N.m, değerine düşmüştür. Daha sonra 30N yükte yapılan deneylerde 23.3 gr/N.m değerine çıkmıştır. 40N’da ise 22.9 gr/N.m değerine gerilemiştir. Dökme demir saboların spesifik aşınma oranlarında da 20N’dan sonra hızlı bir artış hesaplanmıştır. Uygulanan 10N yükte 22.2 gr/N.m olan spesifik aşınma oranı 20N’da 20.6 gr/N.m değerine düşmüş, daha sonra artan yükte artarak 30N ve 40N yüklerde sırasıyla 25.0 ve 29.2 gr/N.m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6.21’de Elektrot-A ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan spesifik aşınma oranları verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’dan 30N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değerleri 6.4, 18.6 ve 31.8 gr/N.m olarak hesaplanmış, 30N’dan sonra artış hızı yavaşlamış ve 40N’da yapılan deneylerde 37.2 gr/N.m bulunmuştur. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 20N yüke kadar hızlı bir artış, sonraki yüklerde ise kademeli bir artış trendi görülmüştür. “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için trend diğer doğrultularla paralellik göstermiştir. 10N’da 5.6 gr/N.m olan hacimsel azalma miktarı 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde 7.6, 10.7 ve 12.4 gr/N.m hesaplanmıştır. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N

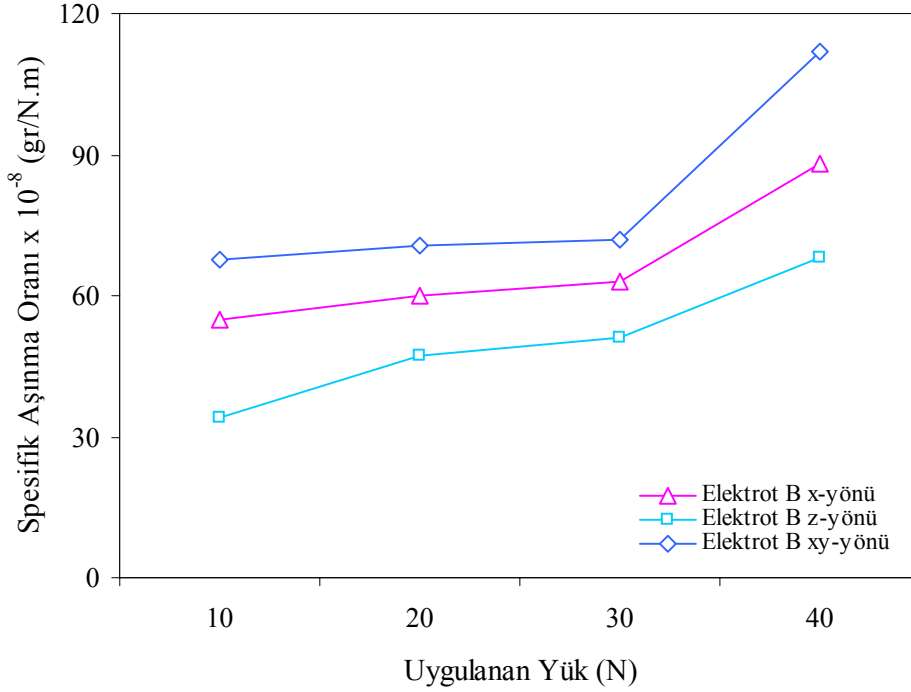
yüklerde, en yüksek spesifik aşınma oranları “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 9.2, 34.0, 41.2 ve 45.7 gr/N.m, en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 5.6, 7.6, 10.7 ve 12.4 gr/N.m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.21. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

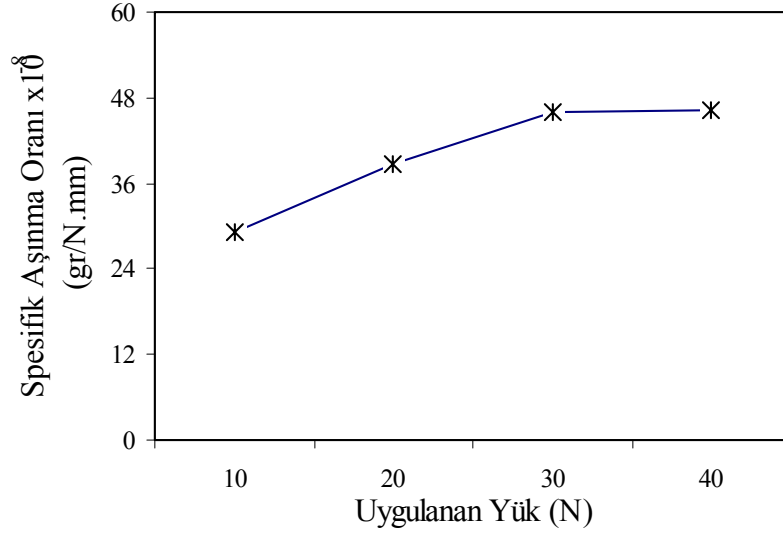
Şekil 6.22’de Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan spesifik aşınma oranları verilmiştir. Burada da üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’den 30N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değerleri 55.0, 60.0 ve 63.0 gr/N.m olarak hesaplanmış, 30N’dan sonra hızlı bir artışla 40N’da yapılan deneylerde 88.2 gr/N.m değerine yükselmiştir. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 30N yüke kadar x-yönündekine benzer bir artış, 30N’dan sonra sert bir yükseliş görülmüştür. z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için trend diğer doğrultularla paralellik göstermiştir. 10N’da 33.9 gr/N.m olan spesifik aşınma oranı miktarı 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde 47.2, 51.2 ve 68.1 gr/N.m bulunmuştur. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek spesifik aşınma oranları “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde

sırasıyla 67.6, 70.8, 71.9 ve 112 gr/N.m, en düşük spesifik aşınma oranları ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 33.9, 47.2, 51.2 ve 68.1 gr/N.m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.22. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.23’te Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen spesifik aşınma oranları verilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları doğrusal olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde sırasıyla, 29.2, 38.8, 46.1 ve 46.3 gr/N.m spesifik aşınma oranı tespit edilmiştir.



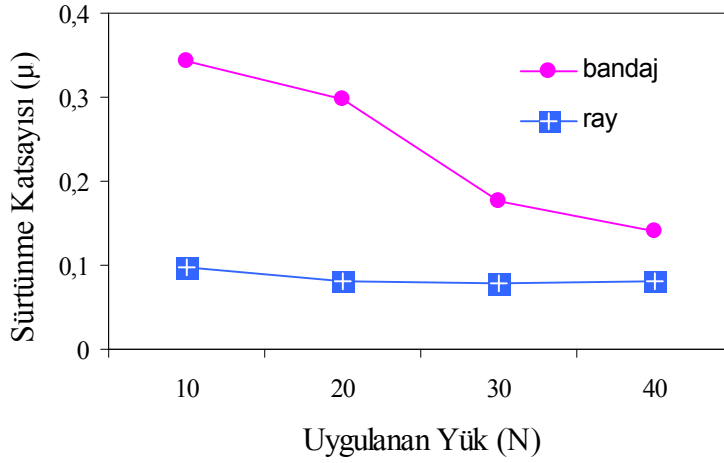
Şekil 6.23. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

6.3.2. Yaş Aşınma Sonuçları

Yaş sürtünme koşullarında yapılan disk-üstü-pim aşınma deneylerinde numunelerin; sürtünme katsayısı (μ), ağırlık kaybı (mg), hacimsel azalma (mm^3) ve spesifik aşınma oranı (gr/N.m) değerleri hesaplanmış, sonuçlar aşağıdaki bölümlerde grafikler biçiminde verilmiştir. Yaş sürtünme deneyleri için yağmur suyu kullanılmıştır. Yağmur suyu, disk ile pim diske temas eden alanına 3 damla/dakika hızla damlatılmıştır.

6.3.2.1. Sürtünme Katsayısı Değerleri

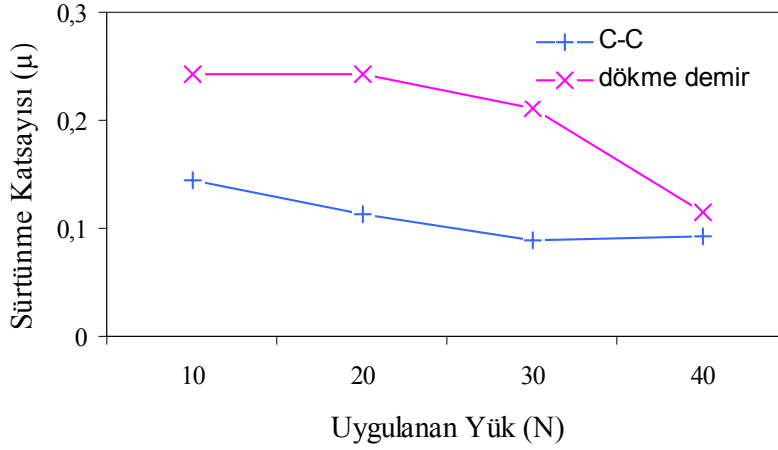
Şekil 6.24'te ray ve teker bandajı numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.24. Ray ve teker bandajının yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Teker bandajı, tren tekerine çepeçevre geçirilmiş halde ray üstünde yuvarlanmalı/kaymalı hareket yapar. Bandaj numuneleriyle yapılan yaş aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı değerlerinin 10N’da 0.342 olarak bulunduğu ve artan yüklerle kademeli olarak azalarak 20N’da 0.298, 30N’da 0.177 ve son olarak da 40N’da yapılan deneylerde 0.141 değerlerine düştüğü gözlenmiştir. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ise durum biraz farklıdır. 10N’da 0.097 olan sürtünme katsayısı değeri, 20N’da yapılan deneyde 0.081, 30 N’da 0.078 değerine düşmüş, sonra tekrar 40N’da yapılan deneyde 0.081 değerine yükselmiştir. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir. Teker bandajı numunelerinin kuru sürtünme koşullarında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri 10N-40N aralığında 0.494–0.587 değerleri arasında değişmekte iken yağmur suyunun kullanıldığı yaş sürtünme koşullarında sürtünme katsayısı değerlerinin 0.342–0.141 aralığına gerilediği görülmüştür. Asıl önemli düşüş ray malzemeleri için gözlenmiştir; kuru sürtünme koşullarında uygulanan 4 yük için ortalama 0.527 olan sürtünme katsayısı değerleri, yaş sürtünme şartlarında yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyleri sonrasında ortalama 0.084 değerlerine düşmüştür. Bu durum yağışlı havalarda trenlerin ray üzerinde tutunmalarının ne denli güç olduğunu göstermektedir.

Daha sonra fren balatalarının sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.25’te karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



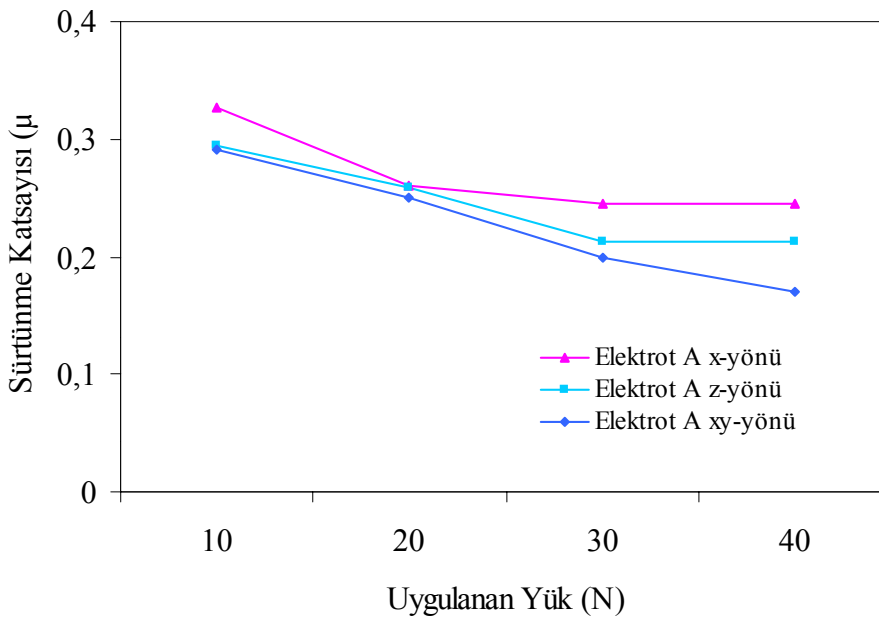
Şekil 6.25. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Dökme demirden üretilen saboların sürtünme katsayısı değerleri 10 ve 20N yüklerde 0.243 değerinde sabit kalmış, 20N'dan sonra düşmeye başlamış ve 30N'da 0.212, 40N'da ise 0.115 değerleri elde edilmiştir. Teknolojideki ilerlemelerle beraber trenlerin fren balataları da daha hafif, daha dayanımlı ve üstün özellikli malzemelerden, özellikle de karbon-karbon kompozitlerinden yapılmaya başlanmıştır. Karbon-karbon kompozit saboların da sürtünme katsayıları artan yüklerle beraber azalmaktadır. 10N'da 0.145 olan değer, 20N ve 30N'da sırasıyla 0.113 ve 0.088 değerlerine düşmüş, 40N'da yapılan deneylerde ise çok az bir artışla 0.092 değerine yükselmiştir.

Kuru sürtünme koşullarında dökme demir fren balataları için ortalama 0.468 bulunan sürtünme katsayısı değeri, yaş sürtünme şartlarında yapılan aşınma deneyleri sonucunda ortalama 0.203 değerine düşmüştür. Karbon-karbon kompozit fren balataları için de benzer şekilde kuru sürtünmede ortalama 0.220 olan sürtünme katsayısı değeri yağmur suyuyla yapılan yaş sürtünme koşullarında ortalama 0.109 değerine düşmüştür.

Elektrot-A ile "x", "xy" ve "z" yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işleminin sürtünme katsayısı (μ) değerleri Şekil 6.26'da görüldüğü gibi üç farklı doğrultuda da genel olarak uygulanan yükün artmasıyla doğrusal olarak azalmıştır. "x" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N'dan 30N'a kadar yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının 0.327 değerinden başlayarak 0.245 değerine kadar doğrusal olarak azaldığı; fakat bu değerden sonra değişmeyerek 40N'da yapılan aşınma deneylerinde de aynı değeri verdiği görülmüştür. "xy" yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde ise 10N'da 0.291 olan sürtünme katsayısı doğrusal biçimde kademeli olarak azalarak 40N'da yapılan deneylerde 0.171 değerine düşmektedir. "z" yönünde

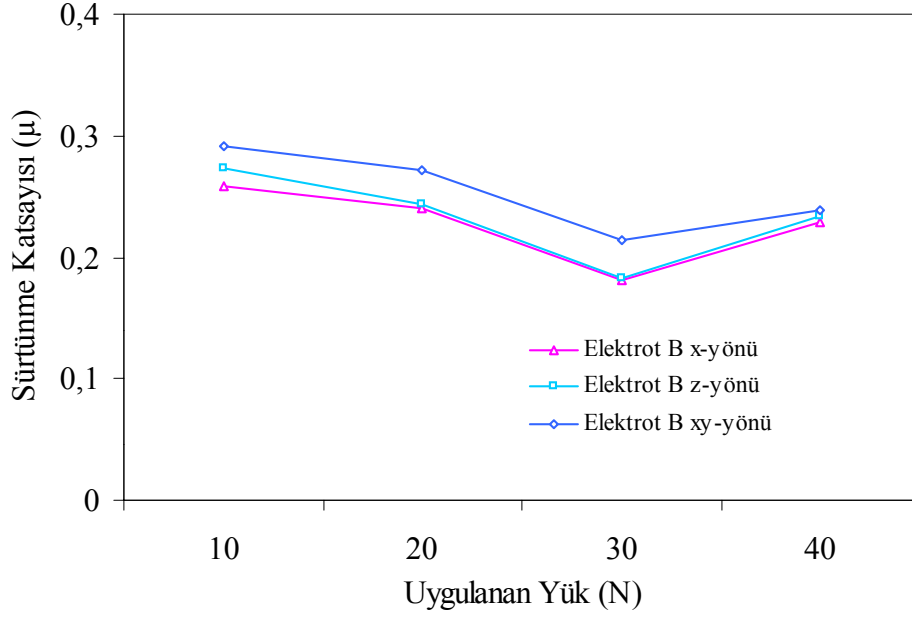
dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için x-yönündekine benzer bir durum söz konusudur; 10N'dan 30N'a kadar yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının 0.294 değerinden başlayarak 0.213 değerine kadar doğrusal olarak azaldığı; fakat bu değerden sonra değişmeyerek 40N'da yapılan aşınma deneylerinde de aynı değeri verdiği görülmüştür. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek sürtünme katsayısı değerleri “x-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 0.327, 0.261, 0.245 ve 0.245; en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise “xy-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 0.291, 0.251, 0.200 ve 0.171 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.26. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

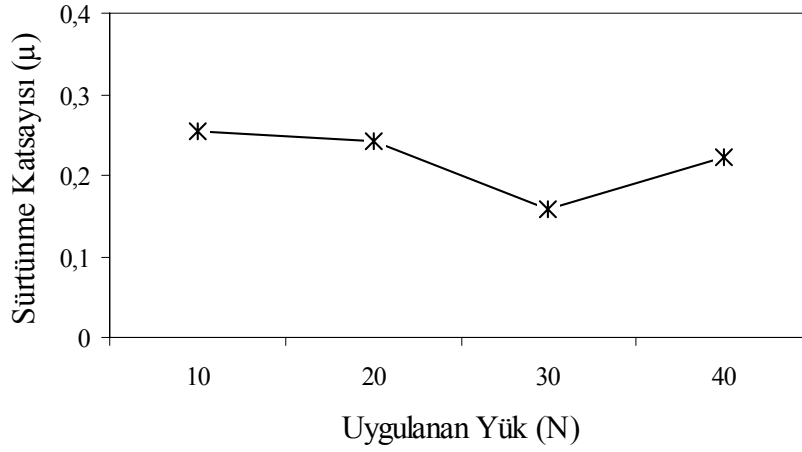
Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işleminin sürtünme katsayısı değerlerini veren Şekil 6.27’ye bakıldığında her üç farklı doğrultuda da sürtünme katsayısı (μ) değerlerinin uygulanan yükün artmasıyla 30N’a kadar doğrusal olarak azalıp buradan sonra 40N’da yapılan deneylerde arttığı görülmüştür. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde 10N’da 0.259 olan sürtünme katsayısı değerinin uygulanan yükün artmasıyla kademeli olarak azalarak 30N’da 0.181 değerlerine ulaştığı, buradan artmaya başlayarak 40N’da 0.229 değerine yükseldiği görülmüştür. Aynı eğilim diğer iki farklı doğrultuda dolgu kaynağı yapılmış numunelerin aşınma deneylerinde de görülmüştür. “xy” yönünde 10N’da 0.291 olan sürtünme katsayısı değerleri 30N’a gelindiğinde 0.214 değerine inmiş, 40N’da da 0.238 değerine yükselmiştir. “z” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde 10N’da 0.273 olan sürtünme katsayısı değerinin uygulanan yükün artmasıyla kademeli olarak azalarak 30N’da 0.183 değerlerine

ulaştığı, buradan artmaya başlayarak 40N’da 0.233 değerine yükseldiği görülmüştür. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek sürtünme katsayısı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 0.291, 0.272, 0.214 ve 0.238; en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise “x-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 0.259, 0.241, 0.181 ve 0.229 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.27. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Başka bir dolgu kaynağı metodu olan ve endüstriyel boyutta uygulanan Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri grafik olarak aşağıda Şekil 6.28’de verilmiştir.

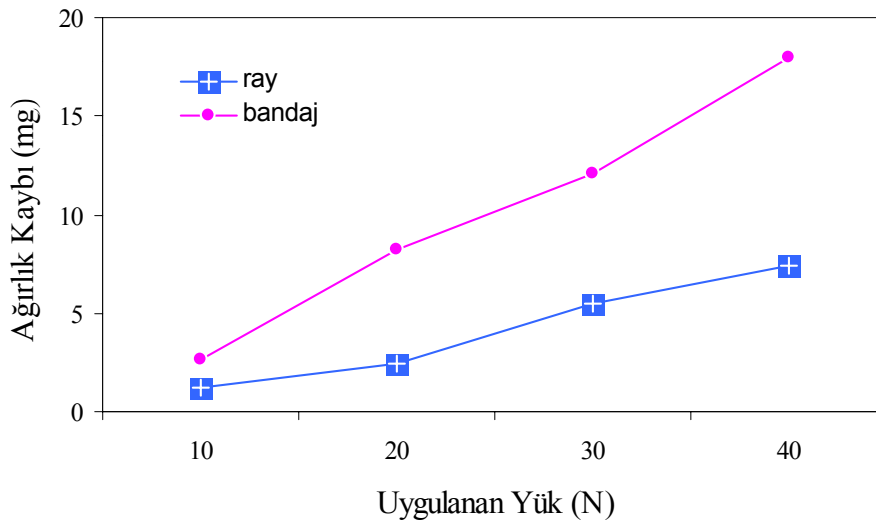


Şekil 6.28. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Boden kaynaklı numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonuçlarına göre 10N'da sürtünme katsayısı 0.254 bulunmuş, yük arttıkça değer 20N'da yapılan deney için 0.243'e düşmüş, 30N'da ise 0.159 değerine gerilemiş, son olarak 40N'da yapılan deneyde sürtünme katsayısı 0.223 bulunmuştur.

6.3.2.2. Ağırlık Kaybı Değerleri

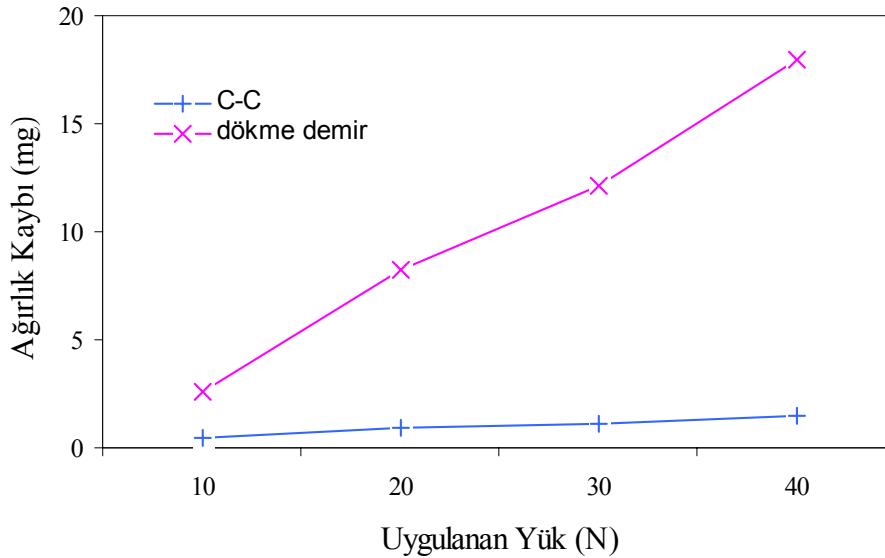
Şekil 6.29'da ray ve teker bandajı numunelerinin ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.29. Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Bandaj numuneleriyle yapılan yaş aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerlerinin 10N'da 2.6 mg olarak bulunduğu ve artan yüklerle doğrusal olarak artıp 40N'da yapılan deneylerde 18 mg değerlerine çıktığı gözlenmiştir. Ray numuneleriyle yapılan yaş aşınma deneylerinde 10N'da 1.18 mg olan ağırlık kaybı değeri, 20N'da yapılan deneyde 2.4 mg değerine ulaşmış, yüksek yüklerde deneyler yapıldıkça önce 30N'da yapılan deneylerde 5.5 mg sonra da 40N'da yapılanlarda 7.4 mg değerlerine yükselmiştir. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının ağırlık kaybı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.30'da karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin göreceli karşılaştırılması verilmiştir.



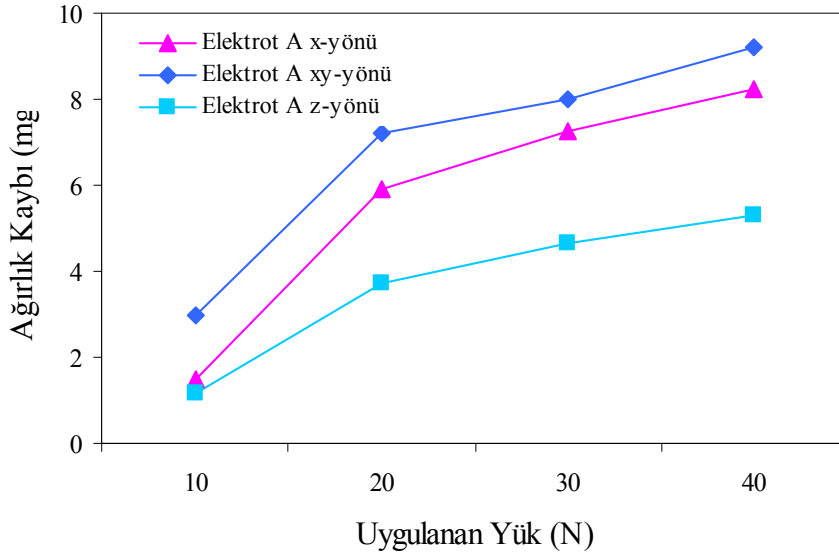
Şekil 6.30. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası karbon-karbon kompozit saboların (C-C) ağırlık kayıpları artan yüklerle beraber çok az artmaktadır; 10N, 20N, 30N ve 40N'luk yüklerde sırasıyla 0.44, 0.91, 1.10 ve 1.50 mg ağırlık kaybı ölçülmüştür. Dökme demir malzemedan üretilen tren fren balatalarının ise ağırlık kaybı değerleri artan yüklerle beraber doğrusal olarak artış göstermiştir.

10N’da 2.6 mg olan ağırlık kaybı lineer artarak 20N, 30N ve 40N’luk aşınma yüklerinde sırasıyla 8.2, 12.1 ve 18.0 mg değerlerinde bulunmuştur.

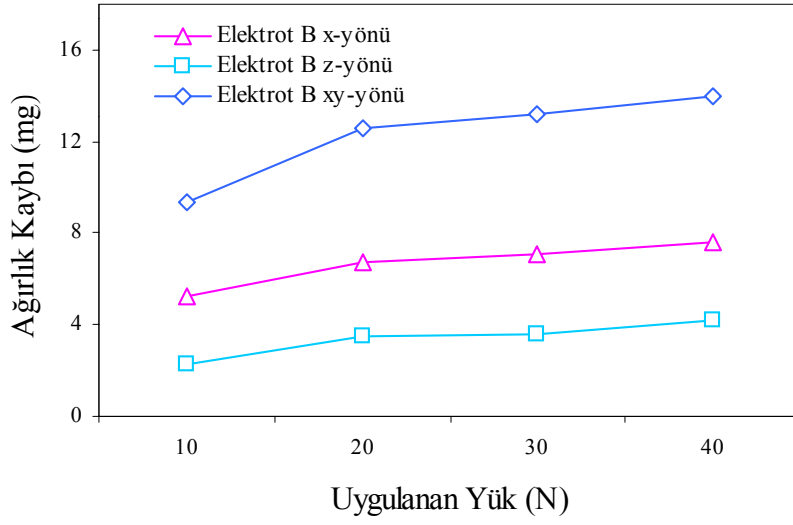
Karbon-karbon kompozit fren balatalarının bu ağırlık kaybı değerleri, kuru sürtünme koşullarında elde edilen ağırlık kayıpları gibi dökme demir malzemeden üretilmiş olanlarla kıyaslanamayacak kadar küçüktür. Bu sonuç, son yıllarda kompozit fren balatalarının (saboların) neden daha çok tercih edildiklerini açıklamaktadır; bunlar, hafifliklerinin yanında dökme demir sabolara kıyasla çok daha uzun süreli kullanım ömrüne sahiptirler.

Şekil 6.31’de Elektrot-A ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan ağırlık kaybı değerleri verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kayıpları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’dan 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerleri 1.5 mg ve 5.9 mg olarak ölçülmüşken 20N’dan sonra daha belirgin bir eğimle 30N’da 7.26mg, 40N’da da 8.22 mg’a yükselmiştir. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 10N’da 3.0 mg olan ağırlık kaybı lineer olarak artarak 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde sırasıyla 7.2, 8.0 ve 9.2 mg değerlerine çıkmaktadır. Benzer durum “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için de geçerlidir; ağırlık kayıpları 10N, 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 1.15, 3.70, 4.65 ve 5.30 mg olarak bulunmuştur. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek ağırlık kaybı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 3.0, 7.2, 8.0 ve 9.2 mg; en düşük ağırlık kaybı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 1.15, 3.70, 4.65 ve 5.30 mg olarak hesaplanmıştır.



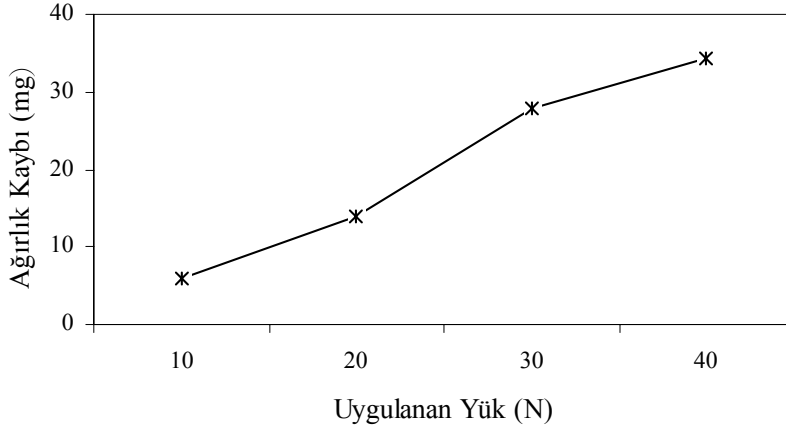
Şekil 6.31. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.32’de Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan ağırlık kaybı değerleri verilmiştir. Üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kayıpları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N, 20N, 30N ve 40N’da yapılan aşınma deneylerinde ağırlık kaybı değerleri 5.20, 6.72, 7.04 ve 7.60 mg olarak ölçülmüştür. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yağmur suyu kullanılarak yapılan aşınma deneylerinde ise 10N’da 9.36 mg olan ağırlık kaybı lineer olarak artarak 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 12.56, 13.20 ve 14 mg değerlerine çıkmaktadır. Benzer durum “z” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için de geçerlidir; ağırlık kayıpları 10N, 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 2.24, 3.52, 3.60 ve 4.16 mg olarak bulunmuştur. Her üç doğrultuda da 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde daha dik bir artış, 20N’dan itibaren ise daha yavaş bir lineer ağırlık kaybı artışı gözlenmiştir. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek ağırlık kaybı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde; en düşük ağırlık kaybı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde hesaplanmıştır.



Şekil 6.32. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.33'te Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen ağırlık kaybı değerleri verilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kaybı değerleri kademeli olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve 40N'da yapılan deneylerde sırasıyla, 6.0, 14.0, 27.9 ve 34.2 mg ağırlık kaybı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.33. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

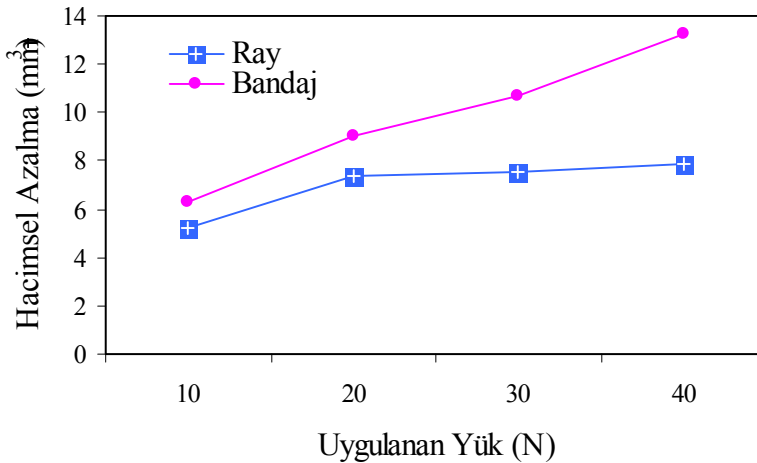
Elde edilen bulgular sonucunda; yuvarlanmalı/kaymalı hareket sırasında aşınmaya maruz kalacak bileşenlere bakım ve tamir amaçlı dolgu kaynağı uygulanması sırasında, kaynak yapılacak doğrultunun, bileşenlerin aşınma performanslarını ve kullanım ömürlerini önemli derecede

etkileyeceği görülmüştür. Buna göre; Elektrot-A ve Elektrot-B için z-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneylerinde uygulanan her bir yük için en düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

Elektrot-A, Elektrot-B'ye göre her dört yükte de daha az aşınmış, daha az ağırlık kaybına uğramıştır. Diğer önemli bir bulgu da günümüzde endüstriyel olarak uygulanan Boden kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı yapılan numunelerin, yaş sürtünme koşullarında elektrik ark kaynak metodu ile Elektrot-A ve Elektrot-B kullanılarak dolgu kaynağı yapılan numunelerden daha fazla ağırlık kaybına uğrayarak daha çabuk aşınmalarıdır. Bu aşınma, 30N yük uygulanarak yapılan deneylerde; Elektrot-B'nin xy-yönü için 2, x-yönü için 4, z-yönü için de 8 kat; Elektrot-A'nın xy ve x-yönlerinden 3,5 kat, z-yönünden ise 6 kat fazladır. 40N yük uygulanarak yapılan deneylerde ise; Elektrot-B'nin xy-yönü için 2,5 kat, x-yönü için 4,5 kat, z-yönü için de 8 kat; Elektrot-A'nın xy ve x-yönlerinden 4 kat, z-yönünden ise 6,5 kat fazladır.

6.3.2.3. Hacimsel Azalma Değerleri

Şekil 6.34'te ray ve teker bandajı numunelerinin hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.

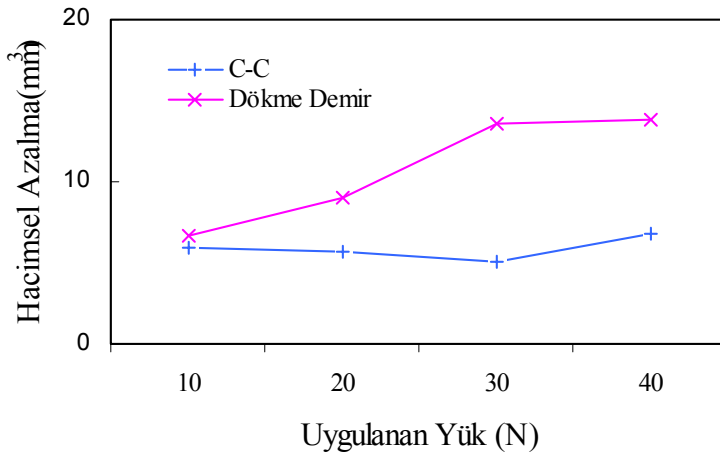


Şekil 6.34. Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Bandaj numuneleriyle yapılan yaş aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerlerinin 10N'da 6.32 mm³ olarak bulunduğu ve artan yüklerle doğrusal olarak artıp 20N, 30N ve 40N'da yapılan deneylerde

sırasıyla 9.05, 10.71 ve 13.29 mm³ değerlerine çıktığı gözlenmiştir. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ise yükselme trendi biraz farklıdır. 5.27 mm³ olan hacimsel azalma miktarı, 20N’da yapılan deneyde 7.40 mm³ olarak hesaplanmış, 30N ve 40N’da yapılan aşınma deneylerinde çok küçük artışlarla 7.53 ve 7.84 mm³ değerlerini alarak neredeyse değişmemiştir. Ray malzemesinin hacimsel kayba uğramaması, özellikle yüksek yüklerde böyle sabit değerlerde kalması demiryolu taşımacılığı için bir avantajdır; çünkü rayların bakım ve tamiri, yenilenmesi zordur. Ayrıca ray yüzeylerindeki bu hacimsel kayıptan kaynaklanan bozulmalar yolculuk konforunu olumsuz etkilemektedir. Burada kullanılan ray ve teker bandajı numuneleri, hiçbir kaynak işlemi görmemiş, orijinal numunelerdir.

Daha sonra fren balatalarının hacimsel azalma miktarı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.41’de karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının hacimsel azalma miktarı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin göreceli karşılaştırılması verilmiştir.

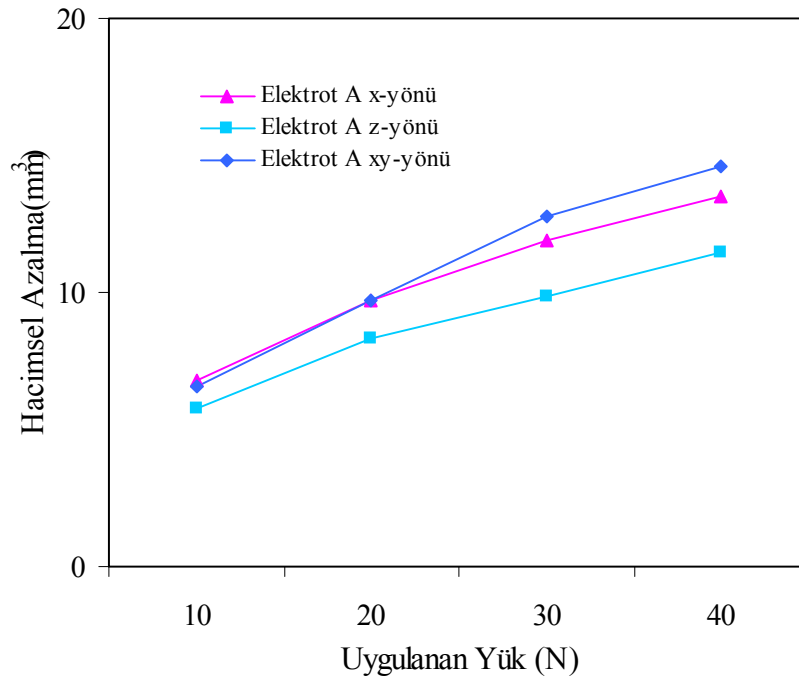


Şekil 6.35. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Karbon-karbon kompozit malzemeden üretilen tren fren balatalarının (saboların) hacimsel azalma miktarı 10N’da 5.94 mm³ değerinde iken artan aşınma yüküyle azalarak 20N’da 5.68 mm³, 30N’da da 5.11 mm³ değerlerine düşmüştür. Daha sonra 40N yükte yapılan deneylerde, kuru sürtünmedeki ani artış gibi olmasa da 6.79 değerine yükselmiştir. Dökme demir saboların hacimsel azalma miktarlarında da 10N-30N arasında bir artış hesaplanmıştır. Uygulanan 10N, 20N ve 30N yüklerde sırasıyla, 6.65, 9.05 ve 13.57 mm³ hacimsel azalma miktarı hesaplanmışken bu değer 40N’da çok az artarak 13.79 mm³ olarak tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak kompozit fren balatalarının yaş sürtünme koşullarında 30N’luk aşınma yüküne kadar olan yüklerde güvenli olarak kullanılabilceği,

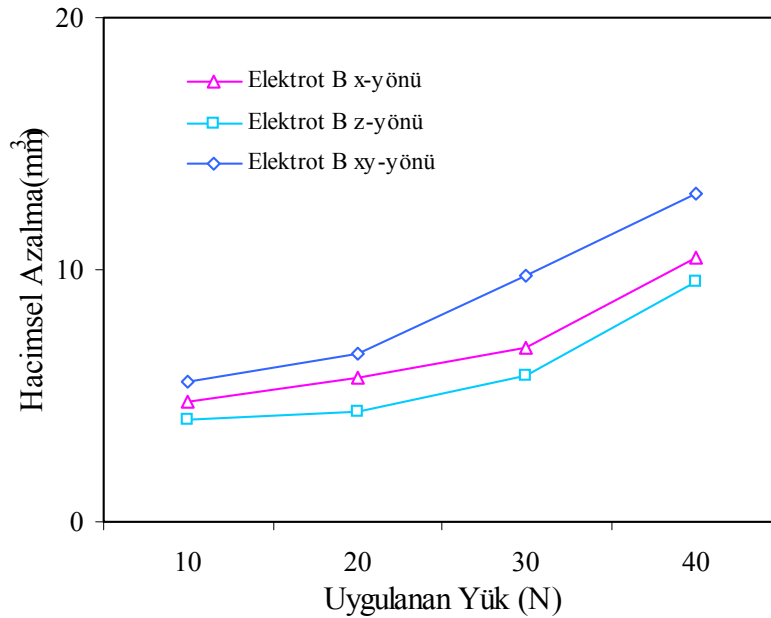
30N’u geçen yüklemelerdeki çalışma koşullarında kullanım ömürlerinin düşeceği sonucuna varılmıştır. Dökme demir sabolarda artan aşınma yüküyle hacimsel kayıplar da artmaktadır. Bu yüzden güvenli bir kullanım aralığı söylemek güçtür; sadece artış hızı 30N’dan sonra yavaşlamaktadır. (30N’da 13.57 mm³ iken 40N’da 13.79 mm³ olmaktadır.)

Şekil 6.36’da Elektrot-A ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan hacimsel azalma miktarı değerleri verilmiştir. Burada da üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla hacimsel azalma miktarları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N, 20N, 30N ve 40N’da yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri sırasıyla 6.79, 9.72, 11.92 ve 13.47 mm³ olarak ölçülmüştür. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise x-yönündekilere yakın bir eğimle hacimsel azalma miktarı lineer artarak 10N, 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 6.58, 9.70, 12.76 ve 14.58 mm³ olarak hesaplanmıştır. “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için eğilim diğer doğrultularla paralellik göstermiştir.10N’da 5.73 mm³ olan hacimsel azalma miktarı 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde 8.34, 9.86 ve 11.45 mm³ olarak bulunmuştur. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek hacimsel azalma miktarı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde, en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde hesaplanmıştır.



Şekil 6.36. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

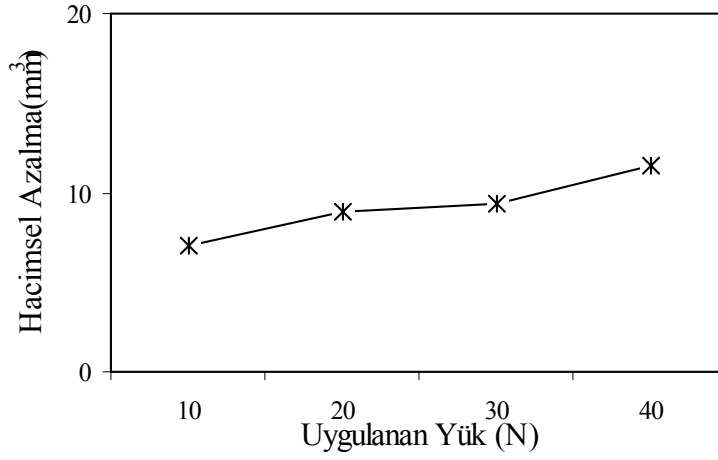
Şekil 6.37’de Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde yapılan dolgu kaynağı işlemi sonrası hazırlanan numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonucunda hesaplanan hacimsel azalma miktarı değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla hacimsel azalma miktarları doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’den 30N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri 4.79 mm^3 ’den 6.92 mm^3 değerine yükselmiş, 30N’dan sonra daha dik bir eğimle lineer olarak artmaya devam etmiş ve 40 N’da 10.47 mm^3 değerine çıkmıştır. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 20N’dan sonra daha hızlı bir hacimsel azalma miktarı artışı olmuştur. 10N, 20N, 30N ve 40N’da sırasıyla 5.58, 6.70, 9.76 ve 12.98 mm^3 olarak hesaplanmıştır. “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde de benzer artış eğilimi görülmüştür. 10N’den 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde hacimsel azalma değerleri 4.03 mm^3 ’den 4.34 mm^3 değerine yükselmiş, 20N’dan sonra daha dik bir eğimle lineer olarak artmaya devam etmiş ve 30N’da 6.88 mm^3 , 40 N’da da 12.45 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek hacimsel azalma miktarı değerleri “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde; en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde hesaplanmıştır.



Şekil 6.37. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.38’de Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bantajlardan hazırlanan pimlerle yapılan aşınma deneyinde elde edilen hacimsel azalma değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, uygulanan yükün artmasıyla ağırlık kaybı değerleri lineer olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve

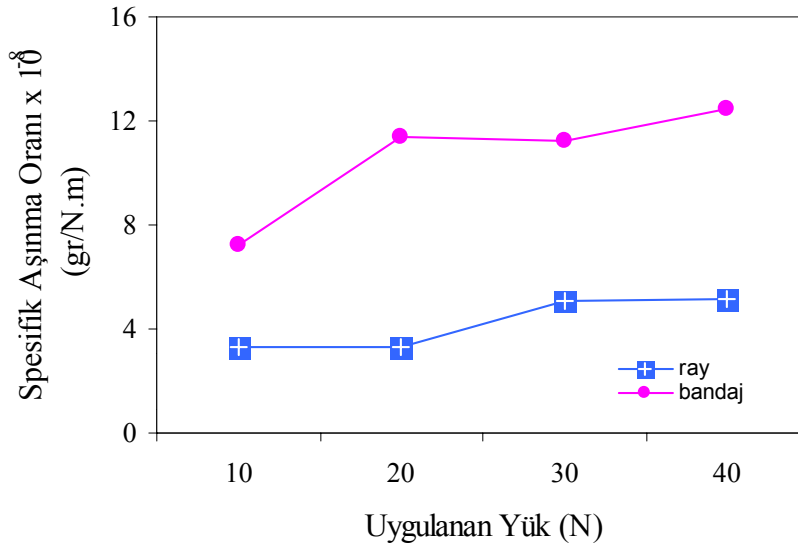
40N’da yapılan deneylerde sırasıyla, 7.05, 8.90, 9.38 ve 11.50 mm³ hacimsel azalma miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 6.38. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

6.3.2.4. Spesifik Aşınma Oranı Değerleri

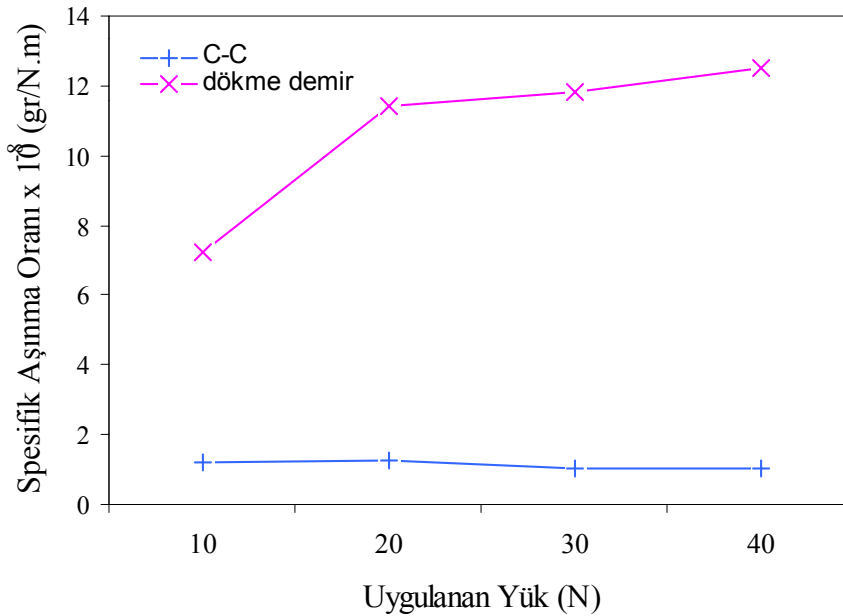
Şekil 6.46’da ray ve teker bandajı numunelerinin spesifik aşınma oranı değerlerinin uygulanan yüke göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.39. Ray ve teker bandajı numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Tren teker bandajı numuneleriyle yapılan yaş aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değerlerinin 10N'da 7.22 gr/N.m olarak bulunduğu ve artan yükte doğrusal olarak artıp 20N'da yapılan deneylerde 11.40 gr/N.m değerlerine yükseldiği gözlenmiştir. 20N'dan sonra ise çok az bir azalışla 30N'da yapılan deneyde 11.20 gr/N.m değeri hesaplanmıştır. 40N'da ise spesifik aşınma oranı 12.50 gr/N.m olarak bulunmuştur. Ray numuneleriyle yapılan kuru aşınma deneylerinde ise 10N ve 20N'da 3.28 ve 3.33 gr/N.m olan spesifik aşınma oranı, 30N ve 40N'da yapılan yaş aşınma deneyleri sonrasında 5.09 ve 5.14 gr/N.m olarak hesaplanmıştır. Ray ve tren teker bandajı numuneleriyle yaş sürtünme koşullarında laboratuvar ortamında yapılan disk-üstü-pim aşınma deneylerinin sonuçlarına bakarak rayların yağışlı ve nemli iklim şartlarında 30N ve üzerindeki aşınma yüklerine maruz kalmaları durumunda aşınma oranlarının hemen hemen değişmeyeceği; diğer bir deyişle, sabit ve önceden tahmin edilebilir bir oranda (ortalama 5 gr/N.m) aşınacağı kanısına, spesifik aşınma oranı-uygulanan yük grafiğinin verildiği Şekil 6.39'a bakılarak varılmıştır. Çünkü rayların aşınma veya bozulmaları istenmeyen bir durumdur, bunun yerine bandajın aşınması uygundur. Bandajlara dolgu kaynağı yapılarak aşınan kısımları tamir edilebilir ki bunların bakım ve tamiri, raylarınkiyle kıyaslanamayacak kadar kolay, az maliyet gerektiren bir prosestir. Diğer önemli bir parametre de zamandır. Bakım ve tamir prosesinin çok kısa sürede tamamlanması, hattın kapalı kalmaması çok önemlidir.

Daha sonra fren balatalarının spesifik aşınma oranı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.40'da karbon-karbon kompozitinden üretilen fren balataları ile dökme demir fren balatalarının spesifik aşınma oranı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi



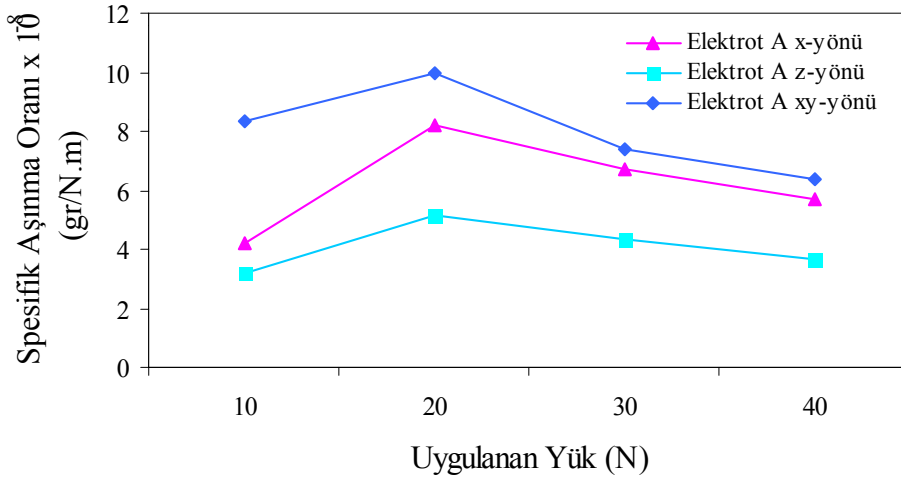
verilmiştir.

Şekil 6.40. Karbon-karbon ve dökme demir fren balatası numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki

spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

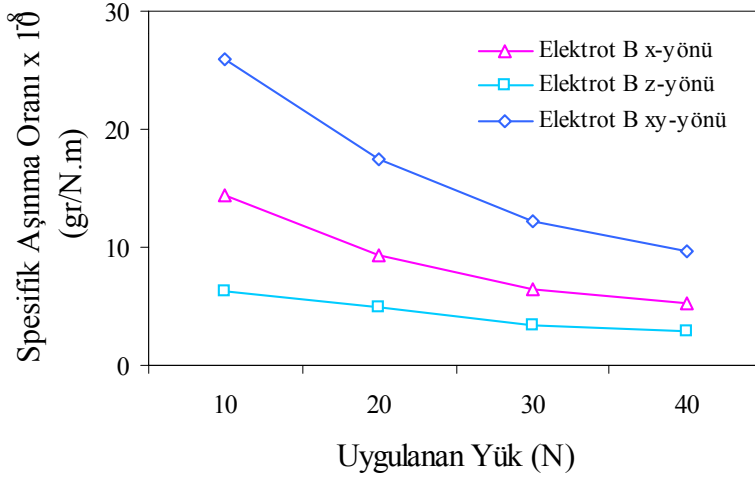
Karbon-karbon kompozit malzemeden üretilen tren fren balatalarının (saboların) hacimsel azalma miktarı 10N ve 20N’da 1.22 ve 1.26 gr/N.m değerinde iken artan aşınma yüküyle birlikte 0.2 gr/N.m’lik bir azalış ile 1.02 ve 1.04 gr/N.m olarak hesaplanmıştır. Bu trende bakılarak spesifik aşınma oranının daha yüksek yüklerde de ortalama 1.14 gr/N.m değerlerinde sabit kalacağı tahmin edilmektedir. Aşınmanın sabit oranda kalması, kompozit tren fren balatalarına olan güveni artırmaktadır. Çünkü Şekil 6.40’a bakıldığında dökme demir malzemeden üretilen fren balatalarının her dört yükte de ne kadar fazla aşındığı görülmektedir. Dökme demir sabolar için 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde spesifik aşınma oranı sırasıyla 7,22, 11,4, 11,8 ve 12,57 gr/N.m olarak hesaplanmıştır.

Elektrot-A ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerinin spesifik aşınma oranı-uygulanan yük grafikleri Şekil 6.41’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları 20N’da yapılan deneylere kadar doğrusal olarak artmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’dan 20N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değeri 4.17 gr/N.m’den yaklaşık 2 kat artışla 8.19 gr/N.m değerine yükselmiş, buradan 30N ve 40N’da yapılan deneylerde önce 6.72 gr/N.m sonra da 5.71 gr/N.m değerlerine düşmüştür. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 20N yüke kadar artış, sonraki yüklerde ise kademeli bir düşüş trendi görülmüştür. “z”-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için eğilim diğer doğrultularla paralellik göstermiştir. 10N’da 3.19 gr/N.m olan spesifik aşınma oranı 20N’da 5.14 gr/N.m değerine yükselmiş, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde ise kademeli olarak 4.31 ve 3.68 gr/N.m değerlerine düştüğü görülmüştür. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek spesifik aşınma oranları “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde sırasıyla 8.33, 10.0, 7.41 ve 6.39 gr/N.m; en düşük hacimsel azalma miktarı değerleri ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde sırasıyla 3.19, 5.14, 4.31 ve 3.68 gr/N.m olarak hesaplanmıştır.



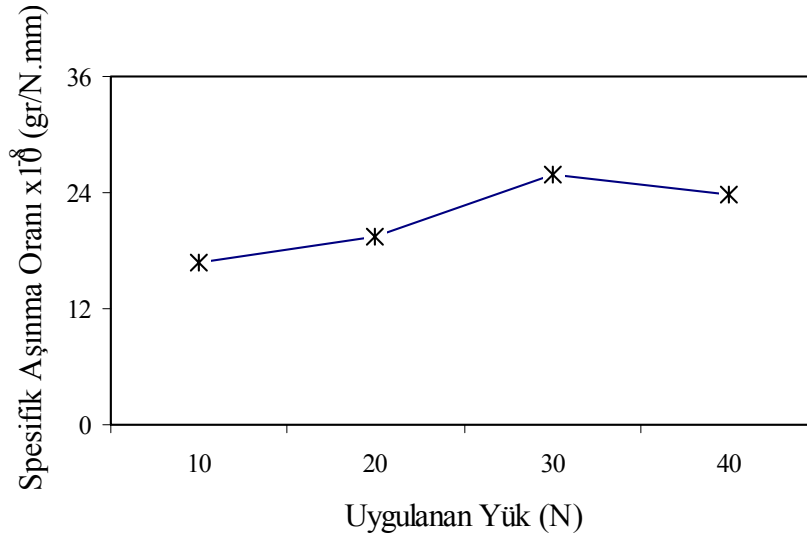
Şekil 6.41. Elektrot-A ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Elektrot-B ile “x”, “xy” ve “z” yönlerinde dolgu kaynağı atılmış bandaj numunelerinin yaş sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyleri sonunda elde edilen spesifik aşınma oranı - uygulanan yük grafikleri Şekil 6.42’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi üç farklı doğrultuda da uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları azalmıştır. “x” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde, 10N’den 40N’a kadar yapılan aşınma deneylerinde spesifik aşınma oranı değerleri 14.40, 9.33 6.52 ve 5.28 gr/N.m olarak hesaplanmıştır. “xy” yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerle yapılan aşınma deneylerinde ise 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde 26.0, 17.4, 12.2 ve 9.7 gr/N.m spesifik aşınma oranı ölçülmüştür. z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numuneler için trend diğer doğrultularla paralellik göstermiştir.10N’da 6.22 gr/N.m olan spesifik aşınma oranı 20N, 30N ve 40N’da yapılan deneylerde 4.89, 3.33 ve 2.89 gr/N.m değerlerine düşmüştür. Deneylerin yapıldığı 10N, 20N, 30N ve 40N yüklerde, en yüksek spesifik aşınma oranları “xy-yönünde” dolgu kaynağı uygulanan numunelerde; en düşük spesifik aşınma oranları ise “z-yönünde” dolgu kaynağı yapılan numunelerde hesaplanmıştır.



Şekil 6.42. Elektrot-B ile farklı doğrultularda dolgu kaynağı yapılan numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Şekil 6.43'te Boden kaynağı yöntemiyle kaynak atılan bandajlardan hazırlanan pimlerle yapılan yaş aşınma deneyinde elde edilen spesifik aşınma oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranları lineer olarak artmıştır. 10N, 20N, 30N ve 40N'da yapılan deneylerde sırasıyla, 29.2, 38.8, 46.1 ve 46.3 gr/N.m spesifik aşınma oranı tespit edilmiştir.



Şekil 6.43. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı atılmış numunelerin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

Kuru ve yaş sürtünme koşullarında disk-üstü-pim aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı (mg), ağırlıkça aşınma hızı (mg/km), spesifik aşınma oranı (gr/N.m), hacimsel azalma (mm³) ve hacimsel azalma hızı (mm³/km) değerleri Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.2. Kuru sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, ağırlıkça aşınma hızı, spesifik aşınma oranı, hacimsel azalma ve hacimsel azalma hızı değerleri.

	Yük (N)	Sürtünme katsayısı (μ)	Ağırlık kaybı (mg)	Ağırlıkça Aşınma Hızı (mg/km)	Spesifik Aşınma Oranı $\times 10^{-8}$ (gr/N.m)	Hacimsel Azalma (mm ³)	Hacimsel Azalma Hızı (mm ³ /km)
Elektrot-A x-yönü	10	0,387	2,30	0,63	6,89	6,70	1,86
	20	0,402	13,40	3,72	18,6	12,70	3,52
	30	0,466	34,30	9,52	31,8	20,90	5,80
	40	0,466	53,50	14,86	37,2	23,40	6,50
Elektrot-A xy-yönü	10	0,476	3,30	0,91	9,17	9,50	2,63
	20	0,486	24,50	6,80	34,00	14,70	4,08
	30	0,516	44,50	12,36	41,20	21,70	6,02
	40	0,536	65,80	18,27	45,70	24,50	6,80
Elektrot-A z-yönü	10	0,573	2,00	0,55	5,56	4,70	1,30
	20	0,592	5,50	1,52	7,64	11,30	3,13
	30	0,604	11,55	3,20	10,70	19,80	5,50
	40	0,625	17,89	4,96	12,40	21,40	5,94
Elektrot-B x-yönü	10	0,443	19,80	5,50	55,00	3,60	1,00
	20	0,468	43,20	12,00	60,00	7,30	2,02
	30	0,501	68,00	18,88	63,00	16,60	4,61
	40	0,536	127,00	35,27	88,20	19,60	5,44
Elektrot-B xy-yönü	10	0,486	27,00	7,50	67,50	3,30	0,91
	20	0,514	51,00	14,16	70,80	5,70	1,58
	30	0,541	77,70	21,58	71,90	14,40	4,00
	40	0,551	161,00	44,72	112,00	17,20	4,77
Elektrot-B z-yönü	10	0,503	12,20	3,38	33,90	3,90	1,08
	20	0,596	34,00	9,44	47,20	10,10	2,80
	30	0,615	55,30	15,36	51,20	18,60	5,16
	40	0,648	98,00	27,22	68,10	20,60	5,72
	10	0,486	14,40	4,00	29,10	3,80	1,05

Boden	20	0,491	27,90	7,75	38,80	9,80	2,72
	30	0,495	49,80	13,83	46,10	18,30	5,08
	40	0,506	66,70	18,52	46,30	20,50	5,69
C-C	10	0,097	0,65	0,18	18,10	11,30	3,13
	20	0,201	1,17	0,32	16,30	6,50	1,80
	30	0,207	2,52	0,70	23,30	6,20	1,72
Dökme Demir	10	0,377	3,30	0,91	22,90	34,50	9,58
	10	0,401	8,00	2,22	22,20	12,30	3,41
	20	0,471	14,80	4,11	20,60	18,30	5,08
	30	0,497	27,00	7,50	25,00	19,40	5,38
Ray	40	0,503	43,40	12,05	29,20	34,50	9,58
	10	0,505	7,70	2,13	21,40	13,20	3,66
	20	0,608	13,80	3,83	19,20	17,50	4,86
	30	0,502	21,90	6,08	20,30	11,50	3,19
Bandaj	40	0,494	37,20	10,33	25,80	12,10	3,36
	10	0,494	8,00	2,22	22,20	18,00	5,00
	20	0,521	14,80	4,11	20,60	22,90	6,36
	30	0,551	27,00	7,50	25,00	20,00	5,55
	40	0,587	42,00	11,66	29,20	20,60	5,72

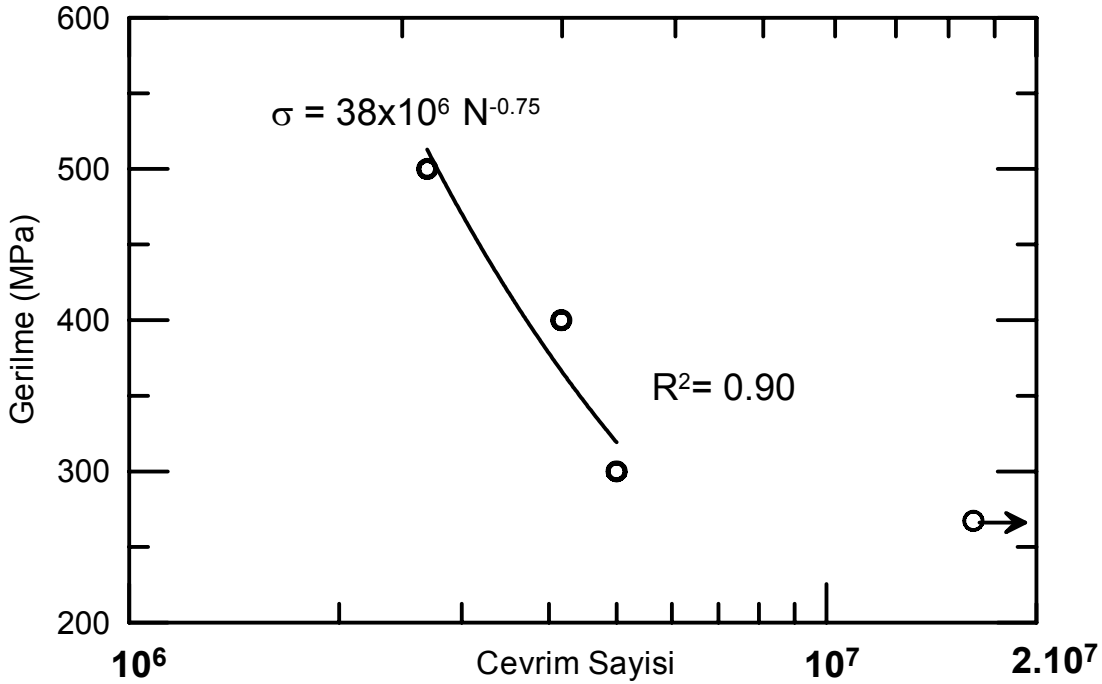
Tablo 6.3. Yaş sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, ağırlıkça aşınma hızı, spesifik aşınma oranı, hacimsel azalma ve hacimsel azalma hızı değerleri

	Yük (N)	Sürtünme katsayısı (μ)	Ağırlık kaybı (mg)	Ağırlıkça Aşınma Hızı (mg/km)	Spesifik Aşınma Oranı $\times 10^{-8}$ (gr/N.m)	Hacimsel Azalma (mm^3)	Hacimsel Azalma Hızı (mm^3/km)
Elektrot-A x-yönü	10	0,327	1,50	0,41	4,17	6,78	1,88
	20	0,261	5,90	1,63	8,19	9,72	2,70
	30	0,245	7,26	2,01	6,72	11,92	3,31
	40	0,245	8,22	2,28	5,71	13,46	3,73
Elektrot-A xy-yönü	10	0,291	3,00	0,83	8,33	6,57	1,82
	20	0,251	7,20	2,00	10,00	9,70	2,69
	30	0,149	8,00	2,22	7,41	12,76	3,54
	40	0,171	9,20	2,55	6,39	14,57	4,04
Elektrot-A z-yönü	10	0,294	1,15	0,31	3,19	5,73	1,59
	20	0,259	3,70	1,02	5,14	8,33	2,31
	30	0,213	4,65	1,29	4,31	9,87	2,74
	40	0,213	5,30	1,47	3,68	11,45	3,18
Elektrot-B x-yönü	10	0,259	5,20	1,44	14,4	4,78	1,32
	20	0,241	6,72	1,86	9,33	5,72	1,58
	30	0,181	7,04	1,95	6,52	6,92	1,92
	40	0,229	7,60	2,11	5,28	10,46	2,90
Elektrot-B xy-yönü	10	0,291	9,36	2,6	26,00	5,57	1,54
	20	0,272	12,56	3,48	17,4	6,70	1,86
	30	0,214	13,20	3,66	12,2	9,76	2,71
	40	0,238	14,00	3,88	9,72	12,98	3,60
Elektrot-B z-yönü	10	0,273	2,24	0,62	6,22	4,03	1,11
	20	0,243	3,52	0,97	4,89	4,33	1,20
	30	0,183	3,60	1,00	3,33	5,80	1,61
	40	0,233	4,16	1,15	2,89	9,50	2,63
Boden	10	0,253	6,00	1,66	16,7	7,04	1,95
	20	0,243	14,00	3,88	19,4	8,89	2,46
	30	0,159	27,90	7,75	25,8	9,37	2,60
	40	0,223	34,24	9,51	23,8	11,50	3,19
	10	0,145	0,44	0,12	1,22	5,93	1,64

C-C	20	0,113	0,91	0,25	1,26	5,67	1,57
	30	0,088	1,10	0,30	1,02	5,11	1,41
	40	0,092	1,50	0,41	1,04	6,78	1,88
Dökme Demir	10	0,243	2,60	0,72	7,22	6,65	1,84
	20	0,243	8,20	2,27	11,40	9,04	2,51
	30	0,212	12,10	3,36	11,80	13,57	3,76
Ray	40	0,115	18,00	5,00	12,57	13,78	3,82
	10	0,097	1,18	0,32	3,28	5,25	1,45
	20	0,081	2,40	0,66	3,33	7,39	2,05
	30	0,078	5,50	1,52	5,09	7,52	2,08
Bandaj	40	0,081	7,40	2,05	5,14	7,83	2,17
	10	0,342	2,60	0,72	7,22	6,32	1,75
	20	0,298	8,20	2,27	11,4	9,04	2,51
	30	0,177	12,10	3,36	11,2	10,71	2,97
	40	0,141	18,00	5,00	12,5	13,28	3,68

6.4. Yorulma Sonuçları

Orijinal bandaj numuneleriyle, Elektrot-A ve Elektrot-B ile kaynak yapılan parçalardan hazırlanan yorulma deney numuneleriyle gerçekleştirilen yorulma deneylerine ait Gerilme-Çevrim Sayısı grafikleri sırasıyla Şekil 6.44, 45 ve 46'da verilmişlerdir.



Şekil 6.44. Orijinal bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

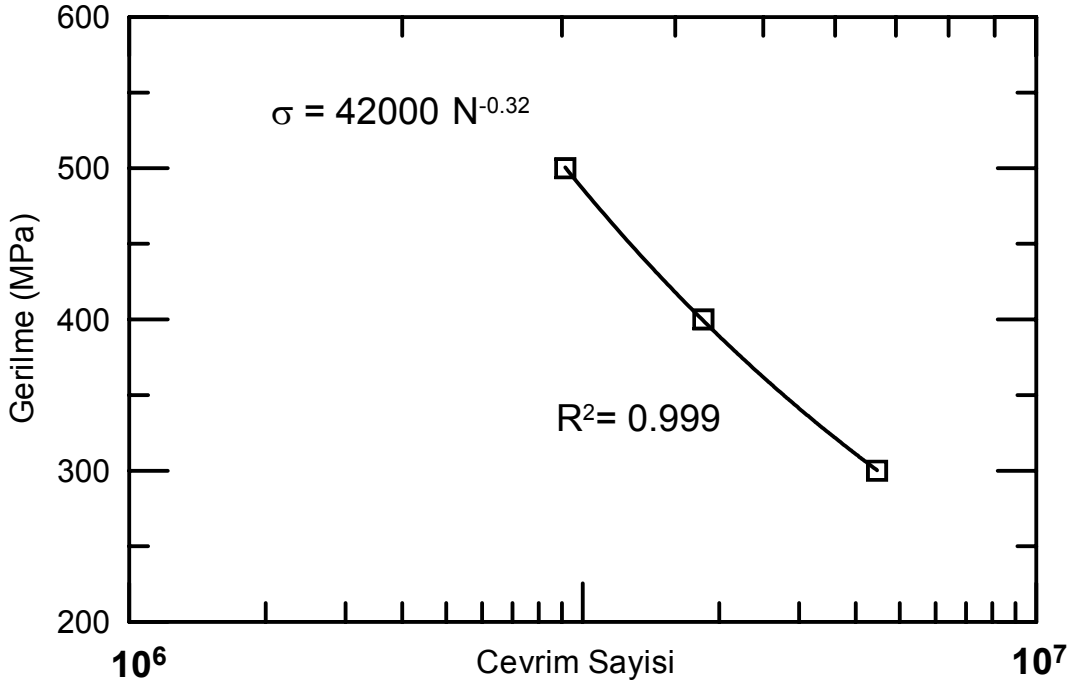
Yüksek çevrimli eğmeli yorulma deneyleri, 300, 400 ve 500 MPa gerilme genliklerinde, her bir yükte 8 deney yapılmak suretiyle gerçekleştirilmişlerdir. Bu 8 deneyin ortalamaları alınıp bir grafik üzerinde çizilerek, tanımlanan bu koşula uyan durum için Wöhler eğrisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Orijinal bandaj numuneleri için 500 MPa gerilme şiddetinde ortalama 2.75×10^6 çevrim sayısında, 400 MPa gerilme değerinde de 4.75×10^6 çevrim sayısında kırılma gözlenmişken 300MPa gerilme altında ortalama 17×10^6 çevrim sayısına erişildiği halde numunede kırılma meydana gelmemiştir. Literatürde yorulma dayanım sınırı tespiti için numune kırılmadan elde edilmesi için gereken çevrim sayısı 15×10^6 olarak bildirilmektedir. Bu deneylerde ortalama 17×10^6 çevrim sayısı bulunduğu ve numune de hala kırılmadığı için 300MPa'nın çok altında bir gerilme, örneğin 290 MPa değeri orijinal bandaj numunesinin “yorulma dayanım sınırı (endurance limit)” olarak düşünülmektedir.

Eğmeli yorulma deneyine tabii tutulan bütün numunelerin; $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ değerleri Gerilme-Çevrim sayısı grafikleri üzerinde gösterilmiştir. Benzer şekilde Basquin tarafından bulunan Eşitlik 6.1'e göre yapılan üs hesapları da her bir yorulma durumu için ilgili diyagramların üzerinde belirtilmiştir.

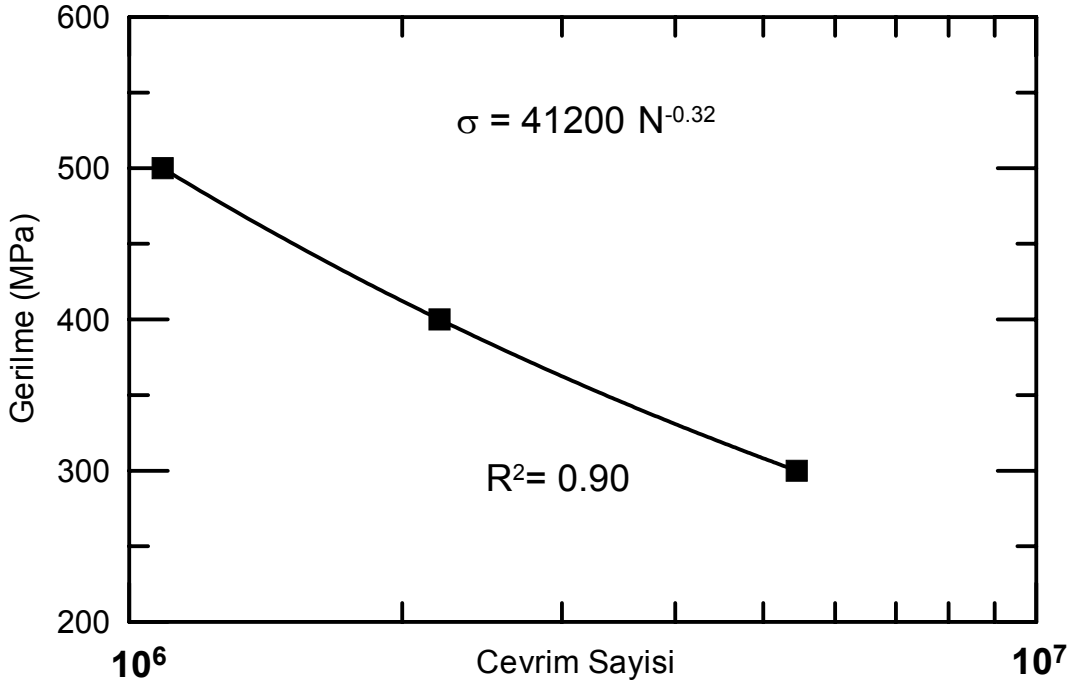
$$\sigma = A \times N^{-B} \quad (6.1)$$

Burada; σ , uygulanan gerilme, N , kopmaya kadar kaydedilen çevrim sayısı ve son olarak A ve B , deneysel sabitlerdir.



Şekil 6.45. Elektrot-A ile kaynak yapılmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

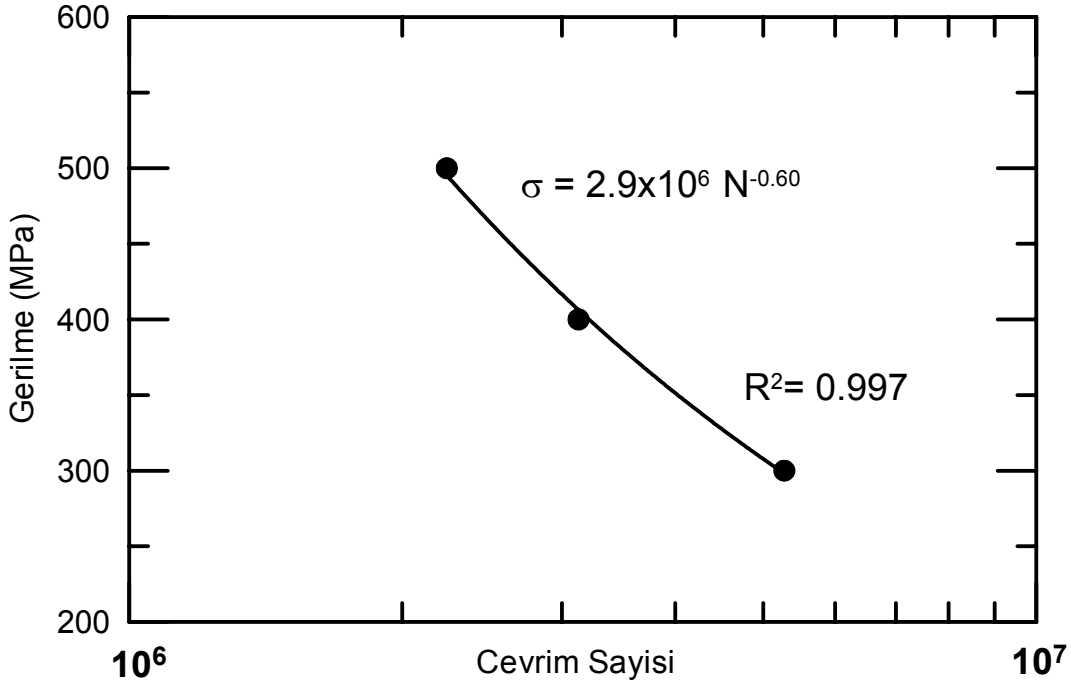
Şekil 6.45'te Elektrot-A ile kaynak yapılmış teker bandajı numuneleriyle yapılan yorulma deneyleri sonucu çizilen Gerilme-Çevrim sayısı grafiği görülmektedir. Numuneler $R^2 = 0.999$ olacak şekilde 500 MPa'da ortalama 9.15×10^5 , 400 MPa'da 1.843×10^6 ve 300 MPa'da ise 4.456×10^6 çevrim sayısına ulaştıktan sonra kırılmıştır. 15×10^6 çevrim sayısı sınırı geçilemediğinden sonsuz ömürden dolayısıyla yorulma dayanım sınırı için herhangi bir gerilme değerinden söz edilememiştir. Gerilme şiddeti düşükçe kırılma için geçen çevrim sayısında artış olduğu görülmüştür. Grafiğin yatay eksenini burada da logaritmik ölçekle çizilmiştir.



Şekil 6.46. Elektrot-B ile kaynak yapılmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

Elektrot-B ile yapılan yorulma deneyi sonucu Şekil 6.46'da verilmiştir. Burada da Elektrot-A'daki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiş, yorulma numuneleri yorulma dayanım sınırı için belirli bir gerilme değeri söylenmesine olanak vermeden yorulma hasarına uğrayarak kırılmışlardır.

Numuneler $R^2 = 0.90$ olacak şekilde 500 MPa'da ortalama 1.088×10^6 , 400 MPa'da 2.198×10^6 ve 300 MPa'da ise 5.443×10^6 çevrim sayısına ulaştıktan sonra kırılmıştır.

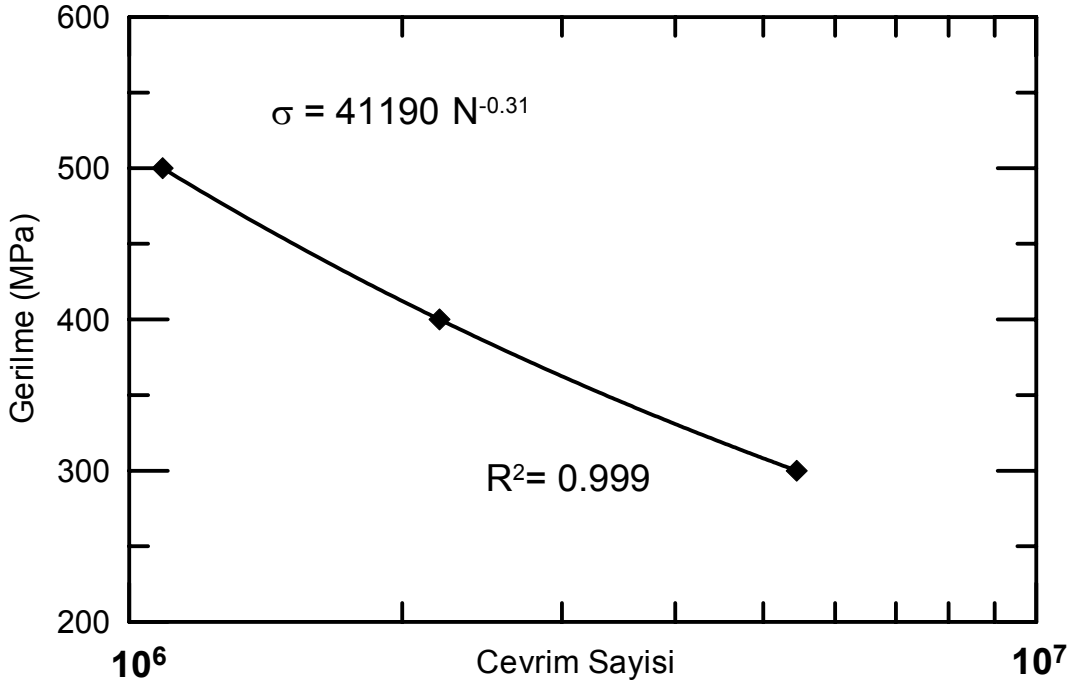


Şekil 6.47. Boden kaynak yöntemi ile hazırlanmış bandaj numunelerinin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

Şekil 6.47’de Boden kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş bandaj numunelerinin yorulma deneyleri sonucuna göre çizilen diyagram görülmektedir. Numuneler $R^2 = 0.997$ olacak şekilde 500 MPa’da ortalama 2.675×10^6 , 400 MPa’da 4.166×10^6 ve 300 MPa’da ise 5×10^6 çevrim sayısına ulaştıktan sonra kırılmıştır. Basquin eşitliğine göre deneysel sabitler; $A=2.9 \times 10^6$ ve $B=0.60$ olarak bulunmuştur.

Kaynaklı numuneler yanında, fren balatalarının da yorulma davranışları incelenmiştir. Çünkü tekerlerin fren yapma anında gerek dökme demir gerekse kompozit balatalara yük binmekte, teker yüzeyleriyle balataların sıkıştırma yüzeyleri arasında yuvarlanmalı/kaymalı sürtünme meydana gelmekte, bunun yanında trenin güzergahı boyunca her frenleme hareketi sonra tekrar yola koyulup ivmelenmesi sonucu balatalarda tekrarlı yüklemeye dolaylı yorulma meydana gelmektedir.

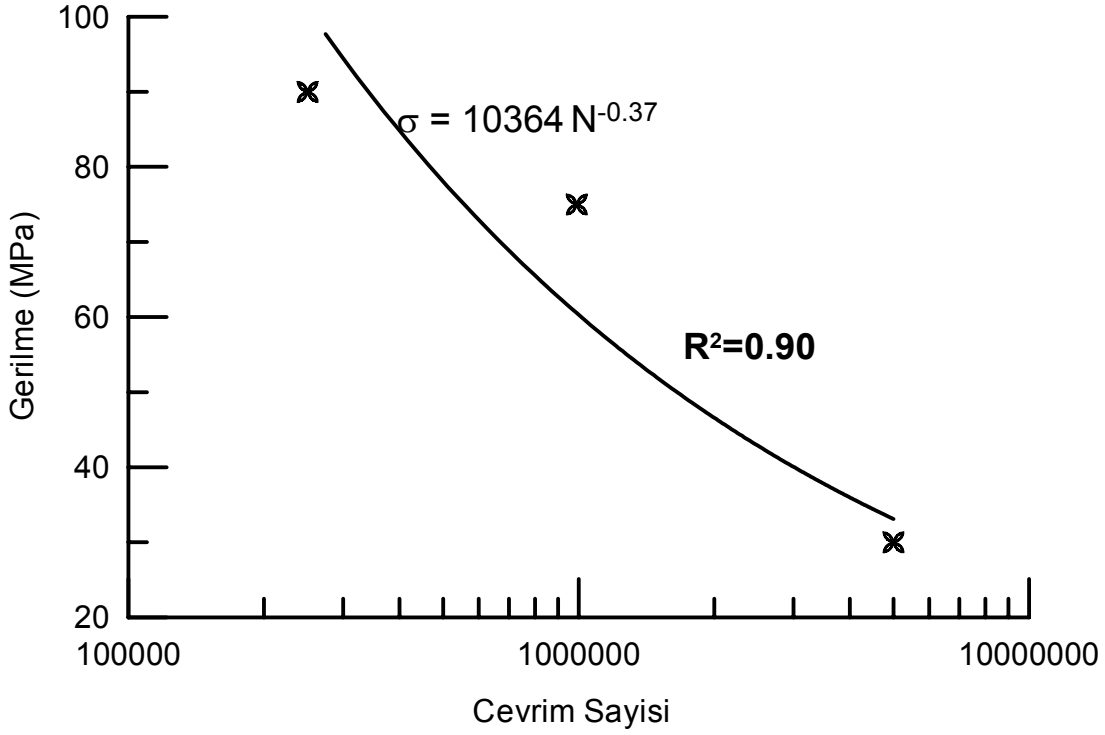
Dökme demir fren balatalarının (sabo) yorulma deneyleri, 300, 400 ve 500 MPa gerilme genliklerinde yapılmıştır. Elde edilen Gerilme-Çevrim sayısı diyagramı Şekil 6.48’de verilmiştir. Yorulma deneyleri numuneler, hiç kullanılmamış, orijinal malzemeden, her bir gerilme değeri için 8 adet olmak üzere hazırlanmıştır.



Şekil 6.48. Kullanılmamış dökme demir sabolardan hazırlanmış numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

Numuneler $R^2 = 0.999$ olacak şekilde 500 MPa'da ortalama 2.240×10^6 , 400 MPa'da 3.128×10^6 ve 300 MPa'da ise 5.275×10^6 çevrim sayısına ulaştıktan sonra kırılmıştır. Basquin eşitliğine göre deneysel sabitler; $A=41190$ ve $B=0.31$ olarak bulunmuştur.

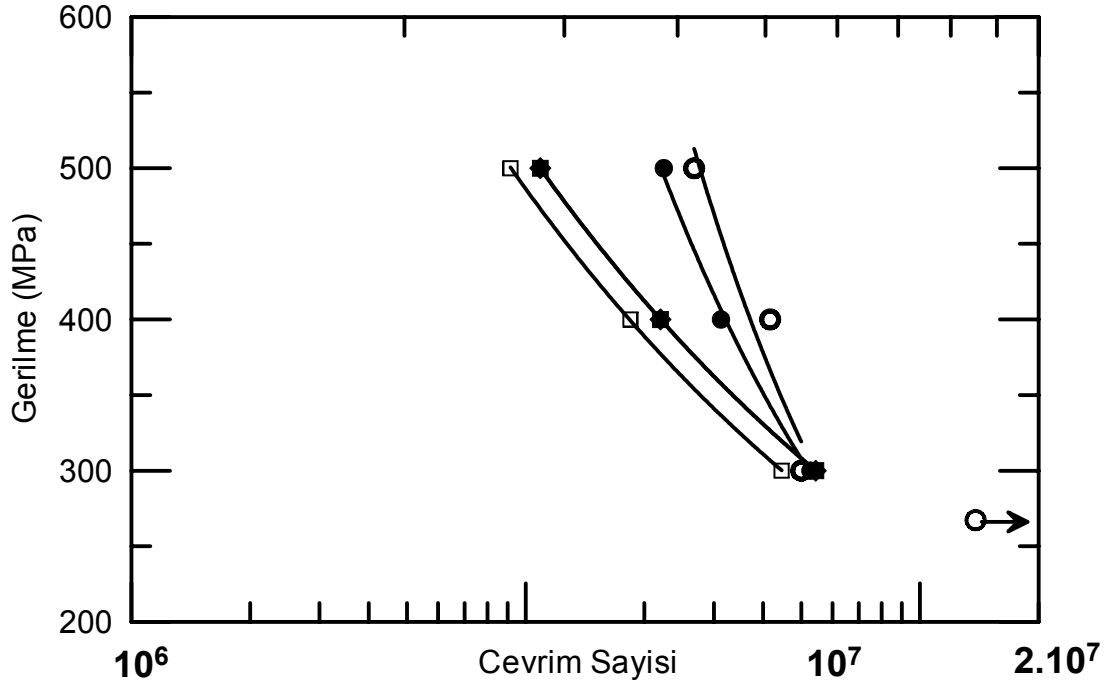
Dökme demir saboların yanında kompozit fren balatalarının yorulma deneyleri de benzer şekilde yapılmıştır. Kompozit malzemelerle çalışıldığından dolayı yorulma deneyleri için gerilme genlikleri 30, 75 ve 90 MPa olarak seçilmiştir. Gerilme-Çevrim sayısı diyagramı Şekil 6.49'da verilmiştir. Burada da dökme demir sabolarda olduğu gibi hiç kullanılmamış, orijinal malzemedan hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Diğer numunelerde yorulma hasarı sonucu oluşan kırılma, bu kompozit sabo malzemelerinde çatlayarak ikiye ayrılma biçiminde görülmüştür.



Şekil 6.49. Kullanılmamış kompozit sabolardan hazırlanmış numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

Numuneler $R^2 = 0.90$ olacak şekilde 90 MPa'da ortalama 2.5×10^5 , 75 MPa'da 9.9×10^5 ve 30 MPa'da ise 5×10^6 çevrim sayısına ulaştıktan sonra kırılmıştır. Basquin eşitliğine göre deneysel sabitler; $A=10364$ ve $B=0.37$ olarak bulunmuştur.

Kompozit sabo dışındaki diğer numunelerin yapılan yüksek çevrimli yorulma deneyleri sonrasında elde edilen Gerilme-Çevrim sayısı grafikleri toplu halde Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Kaynaklı numuneler kendi aralarında kıyaslandığında Boden kaynak yöntemiyle kaynak edilmiş numunelerin en yüksek yorulma dayanımına sahip oldukları, neredeyse her üç gerilme genliğinde de en yüksek çevrim sayısına sahip olup en geç kırıldıkları görülmüştür. Daha sonra Elektrot-B ile kaynak yapılmış numunelerin yorulma dayanımlarının, Elektrot-A ile yapılanlardan yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.50. Numunelerin yorulma deneyi sonucu elde edilen gerilme-çevrim sayısı diyagramı

6.5. Mikroyapı

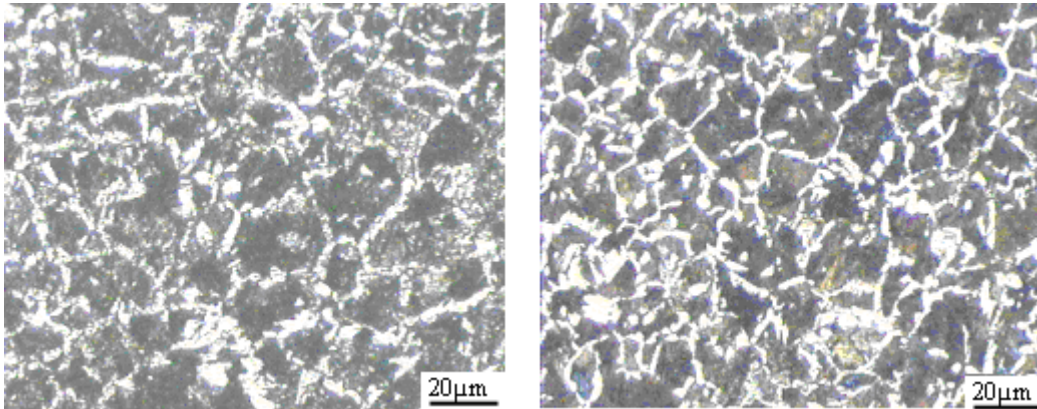
Raylı taşıtlarda teker bandajı-ray sisteminde dolgu kaynağı ve sabo parçalarının aşınma ve yorulma davranışlarının incelenmesi ve geliştirilmesi çalışmalarının bir parçası olarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Ray ve bandajlardan örnekler alınmış bunların mikrografları çıkarılmış, matriks yapıları karakterize edilmiştir. Daha sonra bandaj numunelerine tamir amaçlı olarak uygulanan dolgu kaynağının bandaj iç yapısında meydana getirdiği etkiler, tane sınırlarının ve boyutlarının değişimi hem optik hem de taramalı elektron mikroskopunda (SEM) detaylı olarak incelenmiştir. Kaynak işlemi sırasında malzemeye yüksek ısı girdisi olmaktadır. Yüzey atomlarının ve esas metalin matriks yapısı bu sürede değişime uğramaktadır, tane boyutlarındaki bu değişim kaynağın uygulandığı bölgede farklı tane boyutlarına sahip alanlar oluşturmaktadır. Mikroyapı incelemeleriyle bu alanlar tespit edilmiştir.

Daha sonra, kaynaklı numunelerle kuru ve yaş sürtünme koşullarında disk-üstü-pim aşınma deney yöntemini kullanarak aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan numunelerin diske temas eden aşınma yüzeylerinin hem optik hem de taramalı elektron mikroskobunda mikrografları çekilmiş, EDS-analizleri yapılmıştır. Son olarak yapılan yorulma deneyleri sonunda numunelerin kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş, yorulma kırılmasına neden olan unsurlar belirlenmeye çalışılmıştır.

Kaynaklı numunelerin yanında, trenlerin frenleme sistemlerinde kullanılan ve sabo olarak da adlandırılan fren balatalarının da optik ve taramalı elektron mikroskoplarında mikroyapı incelemeleri ve EDS-analizleri yapılmıştır.

6.5.1. Optik Mikroskopi

Ray malzemelerinin mikroyapıları Şekil 6.51(a) ve (b)'de gösterilmiştir.

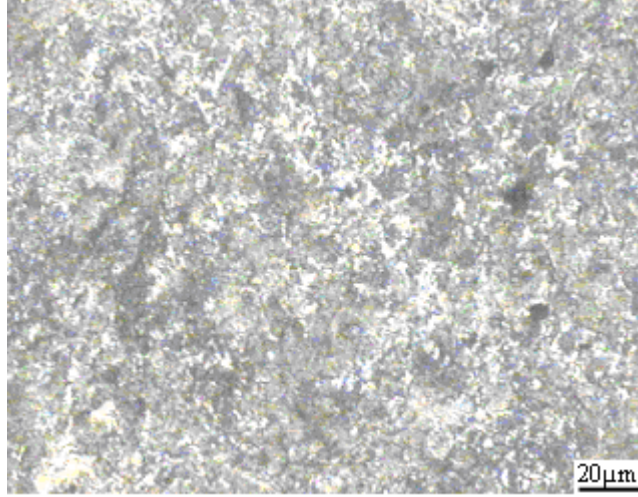


(a)

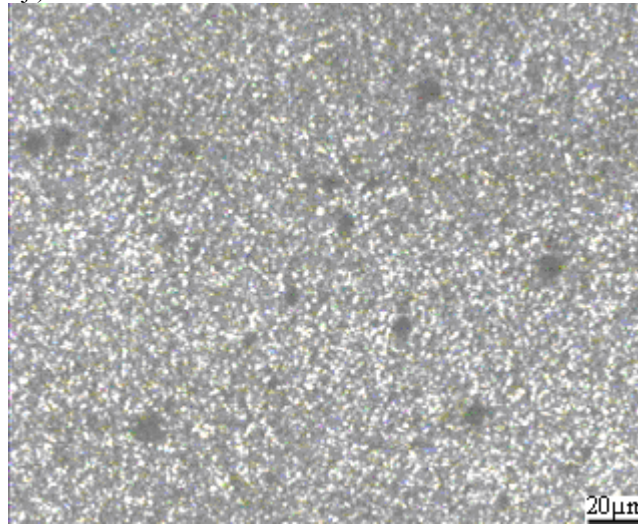
(b)

Şekil 6.51. Ray malzemesinin iç yapısı

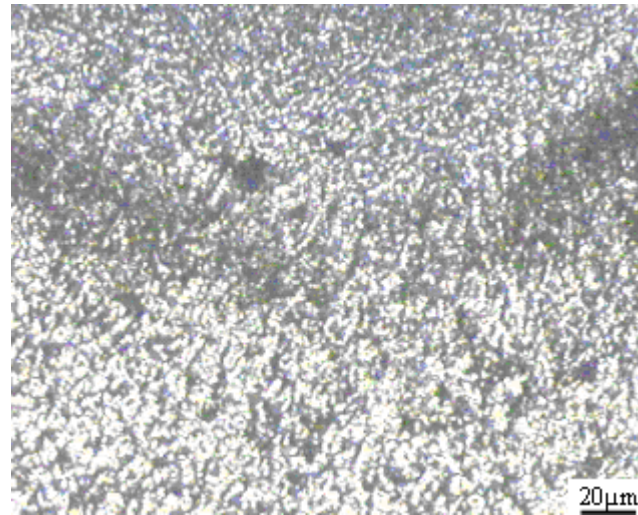
Bandaj numunelerine dolgu kaynağı yapıldıktan sonra esas metal (bandaj)-geçiş bölgesi (ITAB) ve kaynak bölgesi olmak üzere 3 bölgeyi de bulunduran bir parça kesilmiş ve bu numuneye de metalografik inceleme yapılmıştır. Elde edilen mikroyapılar Şekil 6.52-6.57 arasında gösterilmiştir.



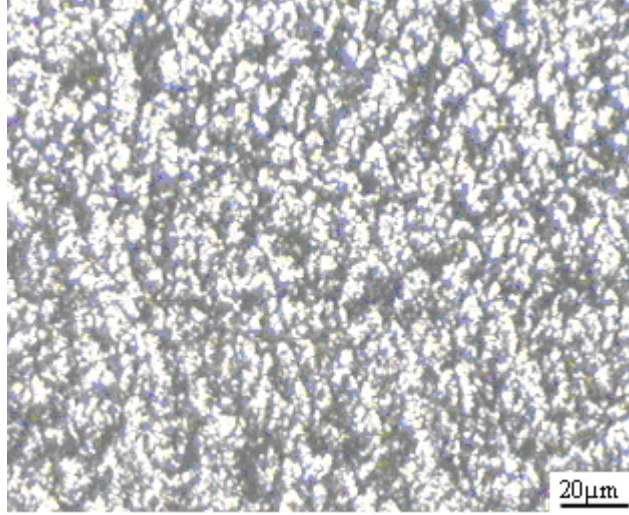
Şekil 6.52 : Esas Metal (Bandaj) Perlitik-ferritik matriks



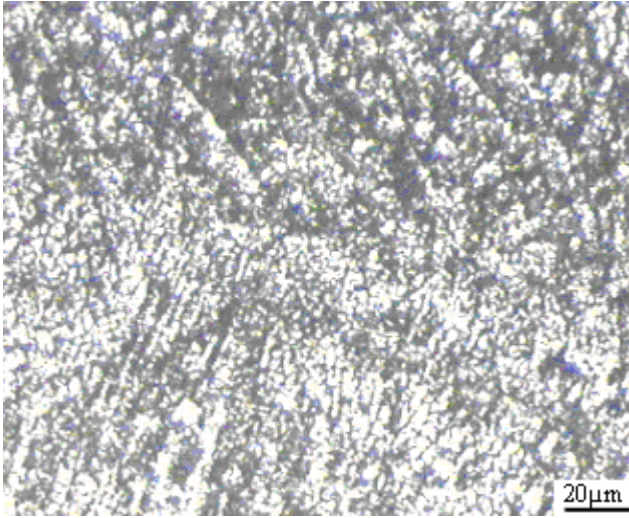
Şekil 6.53. Esas Metal (Bandaj) Karbürler görülmektedir.



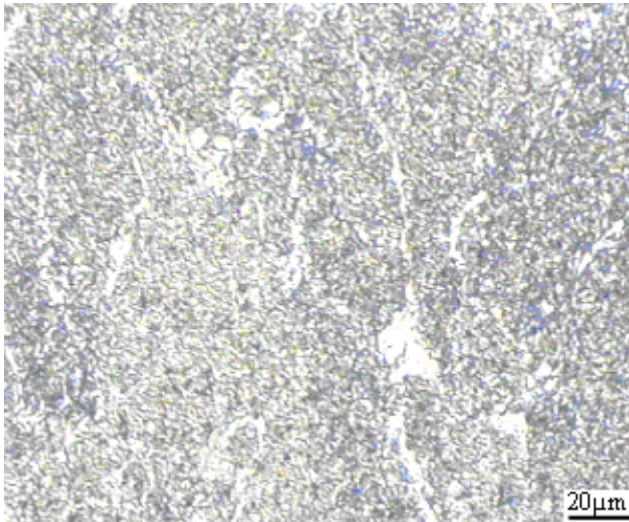
Şekil 6.54. Esas Metal – Kaynak arası geçiş bölgesi



Şekil 6.55. Kaynaklı bölge

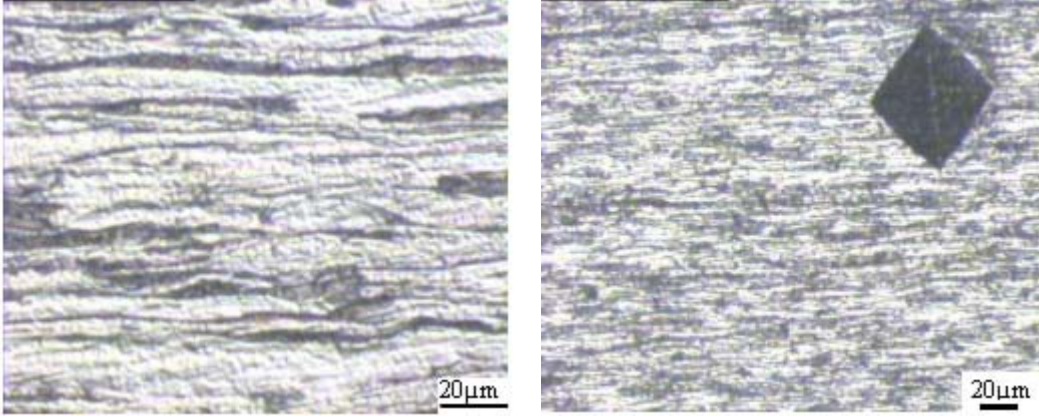


Şekil 6.56. Kaynak Geçiş Bölgesi



Şekil 6.57. Kaynaklı Bölgenin son pasosu (Kapak Paso)

Boden kaynak yöntemi ile yüzey dolgusu yapılırken çapları 1.6 mm ve 2.4 mm olan iki özlü tel kullanılmaktadır. Bu tellerin biri tutuşmayı (arkı) sağlarken diğer geniş çaplı olan tel eriyerek aşınmış bölgeyi doldurma görevini yapmaktadır. Kimyasal içerikleri aynı olan ve Tablo 5.8’de verilen bu tellerin mikroyapıları Şekil 6.58(a) ve (b)’de gösterilmiştir.

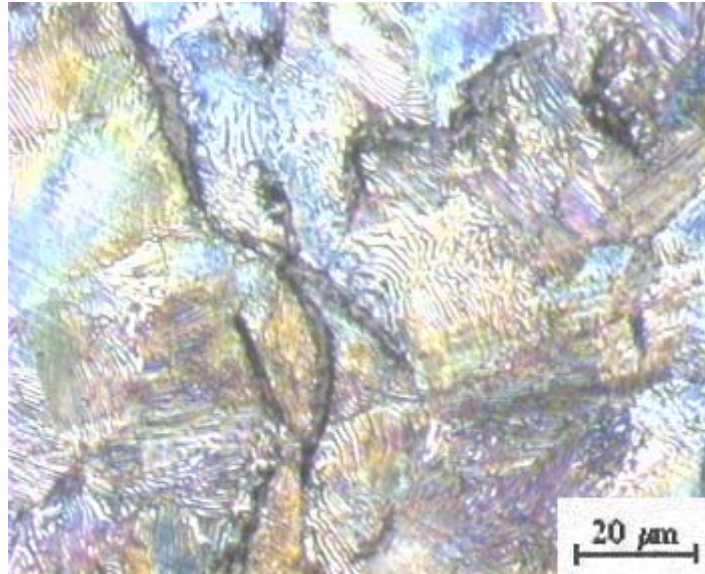


(a)

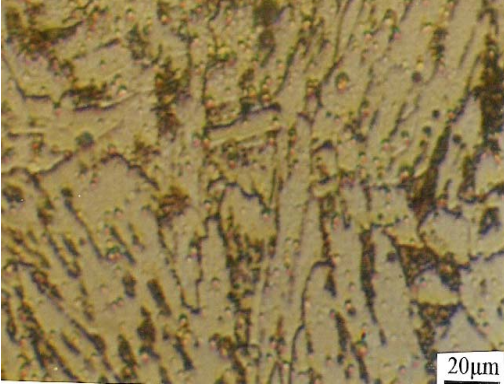
(b)

Şekil 6.58 (a). Boden kaynağı ile yüzey dolgusu yapılan tellerin mikroyapıları, (b) x100 büyütmede

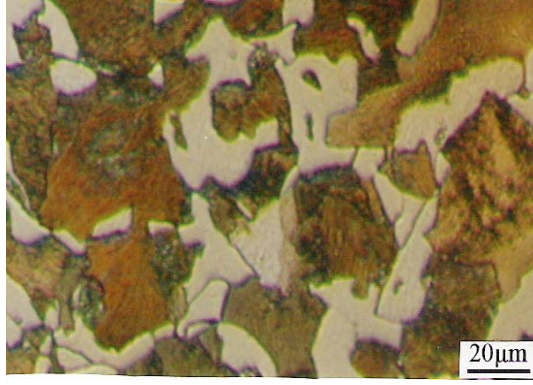
Dökme demirden üretilen fren balatalarının (saboların) mikroyapı görüntüsü Şekil 6.59’da verilmiştir. Şekil 6.60’ta ise Boden kaynağı uygulanmış bandaj numunelerinin çeşitli bölgelerinden alınan mikrograflar görülmektedir.



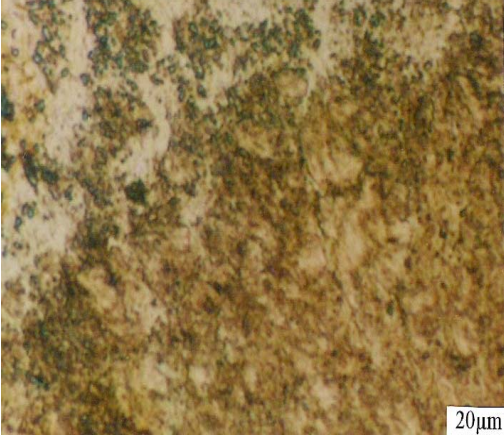
Şekil 6.59. Pik demir fren balatasının mikroyapısı



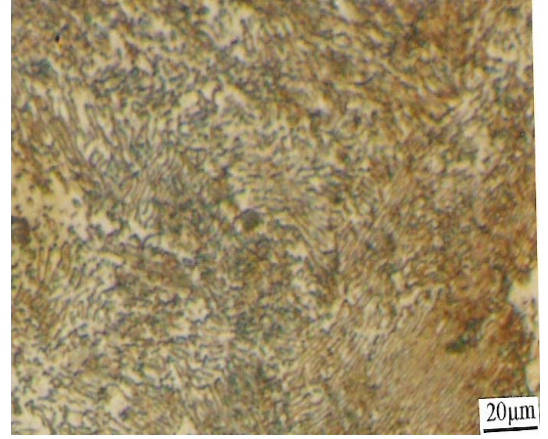
(a) Beynitik dönüşüme uğramış matriks yapı



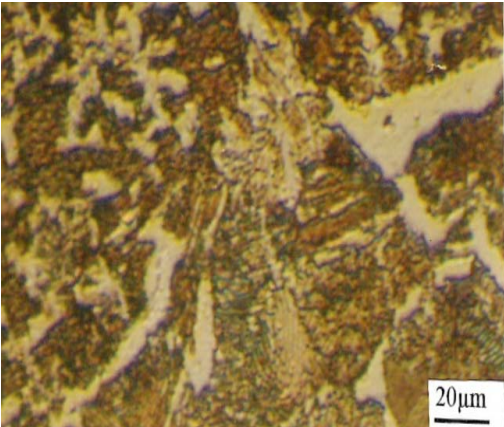
(b) Bandajın esas metalinin perlitik mikroyapısı



(c) ITAB-Kaynak bölgesi arası geçiş bölgesi



(d) Kaynak bölgesi



(e) Kısmen beynite dönüşmüş, beynitik+perlitik esas metal-ITAB arası bölge

Şekil 6.60. Boden kaynaklı numunelerin mikroyapıları

6.5.2. Makroyapı İncelemesi

Bu tez çalışması kapsamında incelenen ve Elektrot-A ve Elektrot-B olarak adlandırılan dolgu elektrotlarıyla kaynak yapılan bandaj parçalarının makroyapı incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla % 10'luk HNO_3 içeren çözelti ile makrodağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin resimleri Şekil 6.61 ve Şekil 6.62'de verilmiştir.



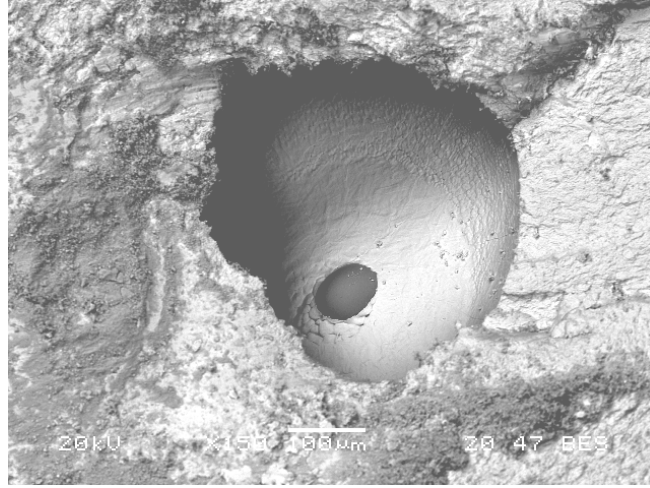
Şekil 6.61. Elektrot-A ile kaynak yapılan numunelerde kaynak bölgesi- Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve esas metal bölgelerinin değişimi



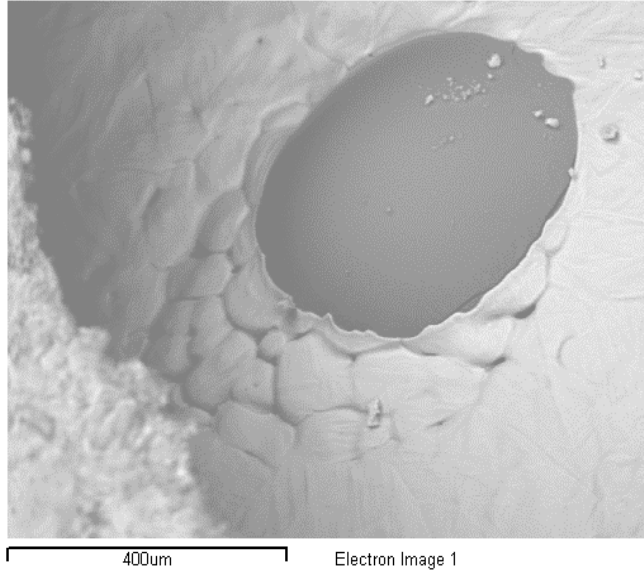
Şekil 6.62. Elektrot-B ile kaynak yapılan numunelerde kaynak bölgesi- Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve esas metal bölgelerinin değişimi

6.5.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri ve EDS-Analizleri

Elektrot-A ve Elektrot-B ile birleştirilen ve Boden kaynak yöntemi uygulanan parçalardan hazırlanan numunelerin yorulma deneyleri sonrasında kırık yüzeyleri tarama elektron mikroskopi (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Bunun için JEOL JSM-5600 marka SEM cihazı kullanılmıştır. Bulgular ve analiz sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

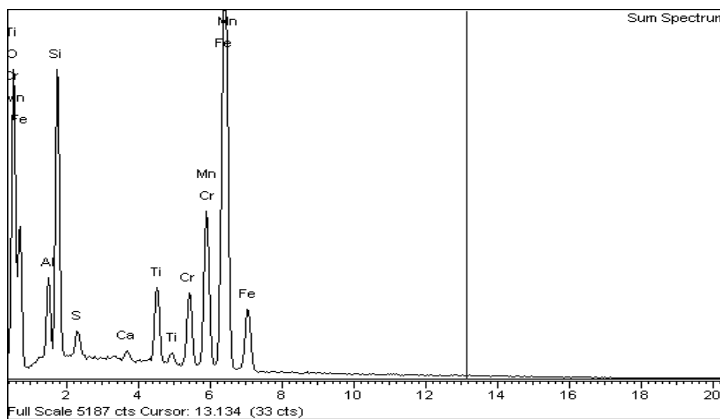


(a)



(b)

Şekil 6.63. Elektrot-A ile kaynak yapılan numunenin 400 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırık yüzeyde bir impurite (a ve b).



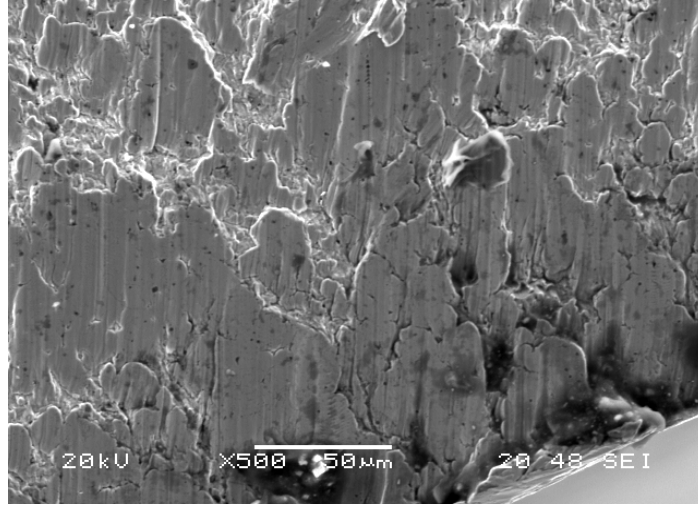
Şekil 6.64. Şekil 6.63'te görülen impuritenin EDS analizi

Tablo 6.4. Şekil6.63'te verilen yapının kimyasal içeriği

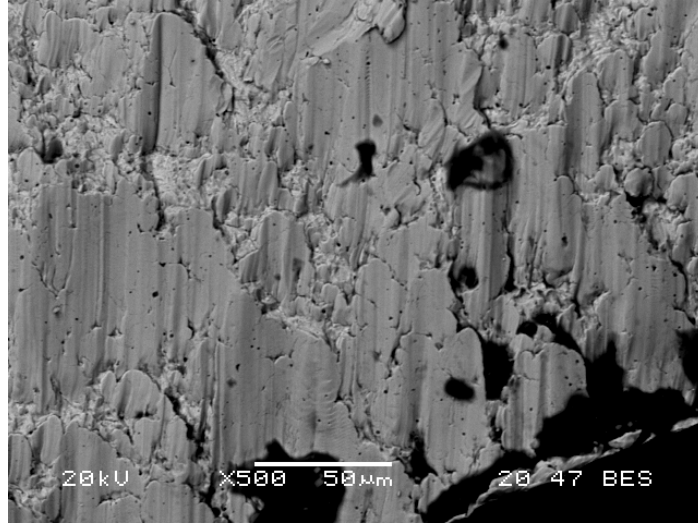
Element	Yak. Konsant.	Şiddet	Ağırlıkça %	ağ.% sigma	Atomal %
O K	181.17	1.0382	26.95	103	51.99
Al K	10.11	0.5548	2.81	008	3.22
Si K	39.34	0.6632	9.16	016	10.07
S K	3.71	0.7992	0.72	004	0.69
Ca K	2.21	1.0746	0.32	004	0.24
Ti K	21.59	0.9589	3.48	009	2.24
Cr K	27.95	0.9984	4.32	011	2.57
Mn K	64.93	0.8955	11.19	022	6.29
Fe K	241.33	0.9076	41.05	061	22.69
Toplam			100.00		

Elektrot-A ile kaynak yapılan numunenin 400 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırık yüzeyde bir impurite tespit edilmiş, yapılan EDS analizinde bunun manganlı+silisli bir oksit olduğu anlaşılmıştır. Tablo 5.4'te spektral analiz sonucu verilen Elektrot-A'nın kaynak bölgesinde % 1.5 oranında Mn ve % 1.0 oranında Si olduğu bildirilmiştir. Şekil 6.63'de gösterilen impuritenin, bu kimyasal içeriğe bağlı olarak oluştuğu ve yorulma kırılmasının erken meydana gelmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

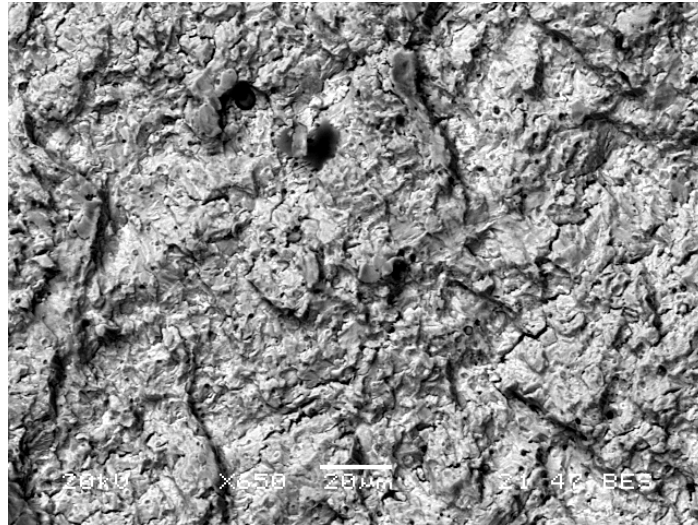
Boden kaynak yöntemiyle birleştirilerek hazırlanmış yorulma numuneleriyle farklı gerilme genliklerinde yapılan yüksek çevrimli yorulma deneylerine ait kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.65–6.68'da verilmiştir. Boden kaynaklı numunede yorulma çatlaklarının meydana gelişi Şekil 6.67'de, bu çatlakların ilerleyerek numunede yorulma hasarının bir sonucu olarak kırılmaya yol açması ise Şekil 6.68'de gösterilmiştir.



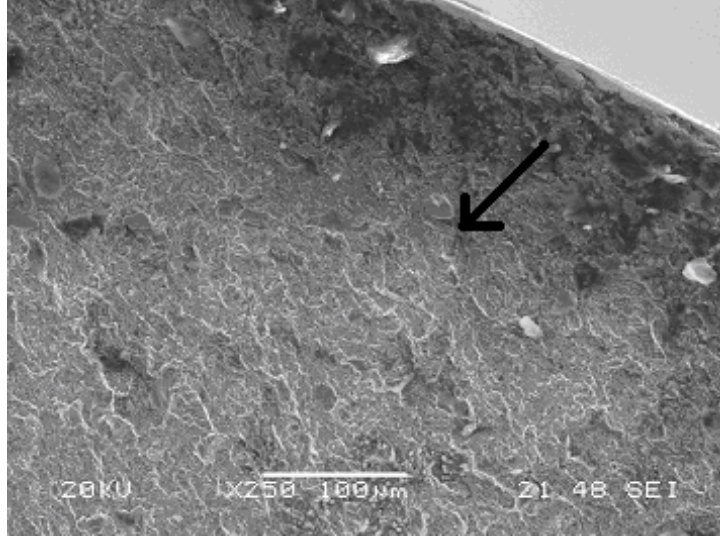
Şekil 6.65. Boden kaynaklı yorulma numunesinin 400 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırık yüzeyinin görüntüsü



Şekil 6.66. Aynı numunenin yüzey topografisi

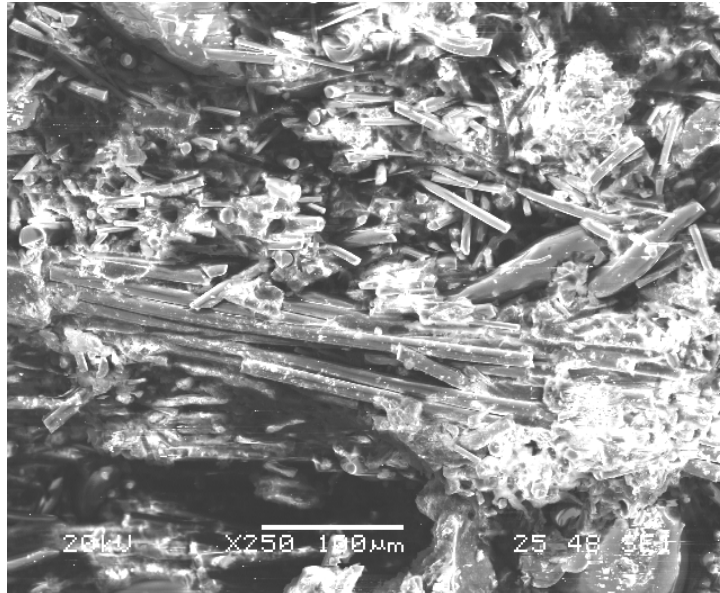


Şekil 6.67. Boden kaynaklı numunede 500 MPa'da yorulma kırıkları



Şekil 6.68. Boden kaynaklı numunede 400 MPa gerilme genliğinde yapılan yorulma deneyinde kırılma yüzeyinin kenarından alınan SEM görüntüsü. Hasar sağ üst köşeden başlamış, orta bölgeye doğru ok yönünde ilerlemiş.

C-C kompozit malzemesinden imal edilen fren balatalarının (sabolar) metalografik incelemesi taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen mikroyapılar Şekil 6.69’de sunulmuştur



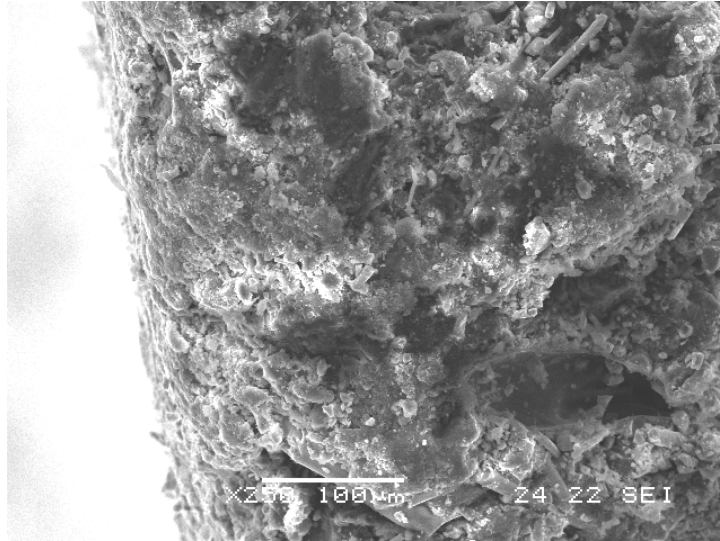
(a)



(b)

Şekil 6.69. C-C kompozit fren balatalarının mikroyapılarının SEM görüntüleri

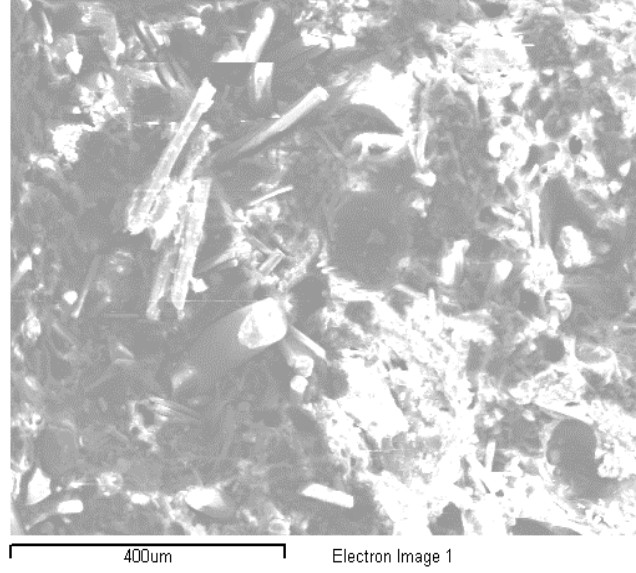
Bu hiç kullanılmamış kompozit sabolardan Şekil 5.32’de gösterildiği şekilde hazırlanan numunelerle 30 MPa gerilme genliğinde yapılan yorulma deneyinde elde edilen kırık yüzeyinin SEM mikrografi Şekil 6.70’de görülmektedir.



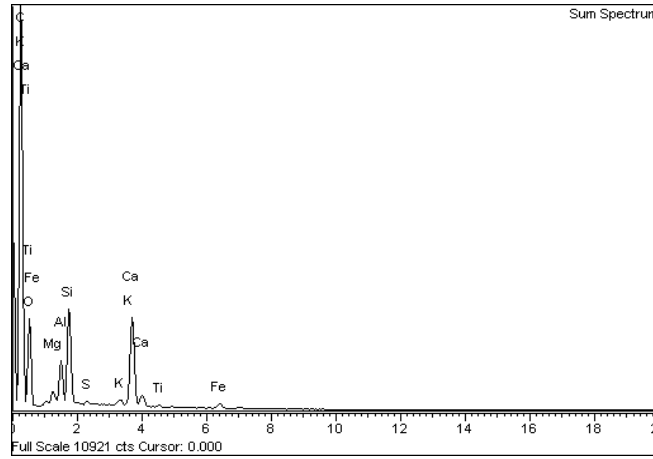
Şekil 6.70. C-C kompozit fren balatasının 30 MPa’lık gerilme altında yapılan yorulma deneyinde kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

Karbon-karbon kompozit fren balatası numunesinin kırılma yüzeyi görüntüsünden malzemenin oldukça sünek olduğu, yorulma hasarının da sünek karakterli bir kırılma davranışı sergileyerek açığa çıktığı görülmüştür.

Şekil 6.71’de yine bir kompozit fren balatasının mikroyapısı ve Şekil 6.72’de ise bu mikrografın orta kısmında soldan sağa doğru çizgisel olarak bir hat boyunca alınan elemental EDS-analizinin sonucu görülmektedir. Tablo 6.5’te ise bulunan bu elementlerin ağırlıkça ve atomsal olarak yüzde değerleri verilmiştir.



Şekil 6.71. Karbon-karbon kompozit fren balatasının mikrografı



Şekil 6.72. Şekil 6.71’deki mikrografın ortasından alınan çizgisel EDS-analizi sonuçları

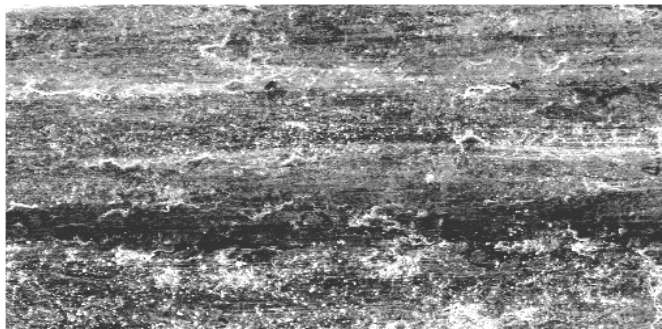
Tablo 6.5. C-C kompozit fren balatasının kimyasal kompozisyonu

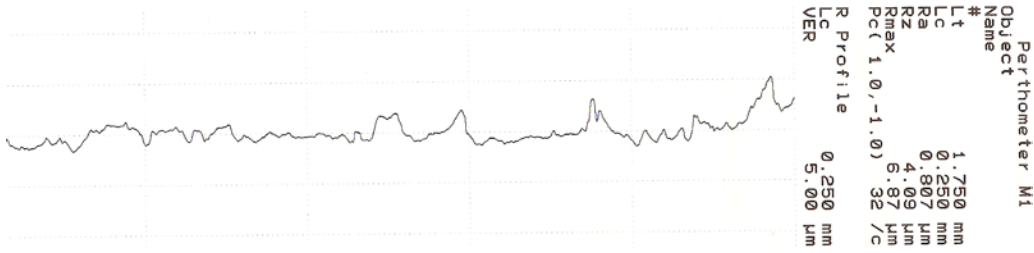
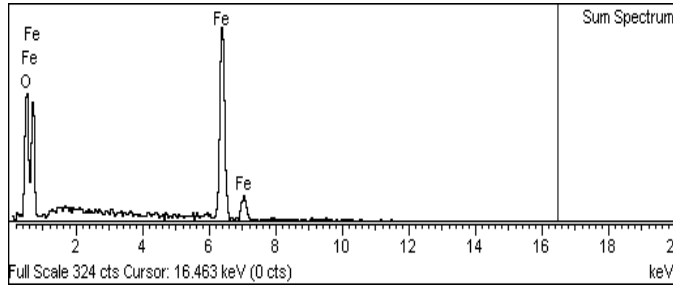
Element	Yaklaş. Konst.	Şiddet	Ağırlık %	Ağırlık % Sigma	Atomal %
C K	226.20	0.9406	58.29	0.34	67.77
O K	47.95	0.3578	32.48	0.36	28.35
Mg K	1.20	0.7242	0.40	0.02	0.23
Al K	4.19	0.8267	1.23	0.03	0.64
Si K	10.12	0.8907	2.75	0.04	1.37
S K	0.33	0.9309	0.08	0.02	0.04
K K	0.76	1.0553	0.17	0.02	0.06
Ca K	15.90	0.9799	3.93	0.05	1.37
Ti K	0.40	0.7922	0.12	0.02	0.04
Fe K	1.74	0.7844	0.54	0.05	0.13
Toplam			100.00		

6.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Hem kuru hem de yaş sürtünme koşullarında gerçekleştirilen disk-üstü-pim aşınma deneylerinin öncesinde ve sonrasında pimlerin diske temas eden aşınma yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri yapılmış, R_a , R_z ve R_{max} değerleri tespit edilmiş, bu değerlerin aşınmada oynadıkları rol ve aşınma mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. SEM’de numunelerinin aşınmış yüzeylerinin mikrografları çekilmiş, alınan çizgisel EDS analizleriyle birlikte yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de birleştirilerek malzemede etkin olan aşınma mekanizması ve aşınma türü karakterize edilmeye çalışılmıştır.

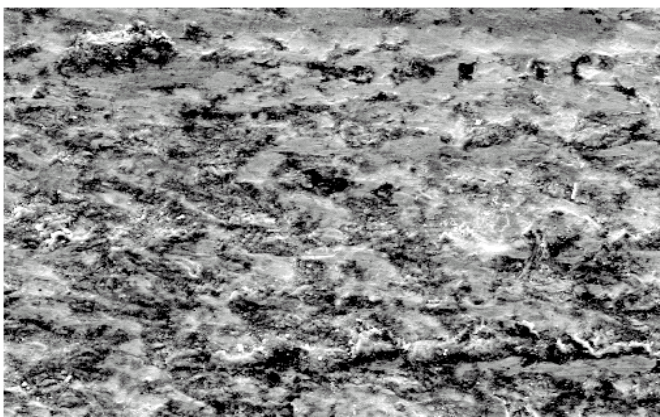
Aşınma deneylerinin başlangıcında, sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek için numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri aynı seviyeye getirilmiştir. Bunun için numuneler 320, 400 ve 600’lük zımparalardan geçirilmişlerdir. Disk-üstü-pim aşınma deneyinde kullanılan bütün numunelerin deney sonrasında R_a , R_z ve R_{max} değerleri tespit edilmiş, bunlar toplu halde tablo olarak verilmişlerdir.

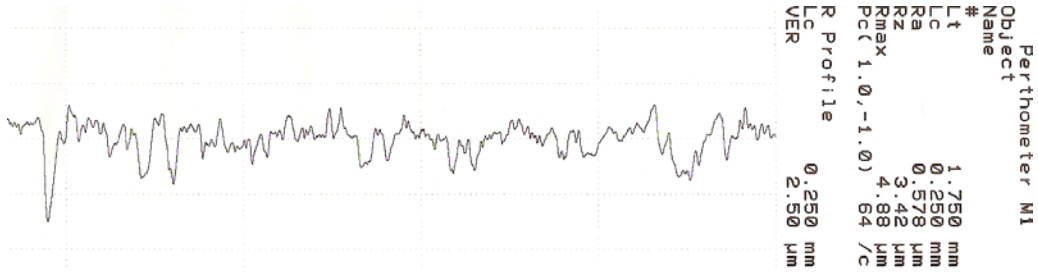
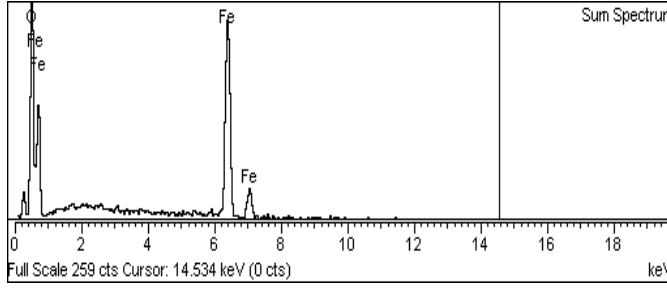




Şekil 6.73. Kuru sürtünme koşullarında ray malzemesinin 30N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

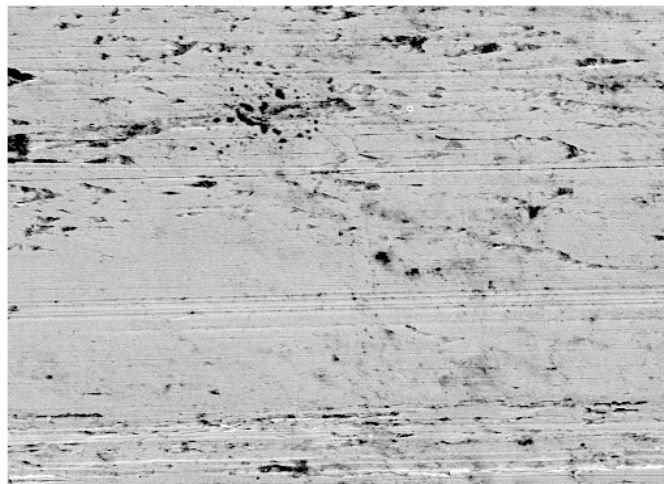
Şekil 6.73’te kuru sürtünme koşullarında, 30N’da ray numunesinin disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucu görülmektedir. Numunenin tam orta bölgesinde derin bir aşınma oluşunun olduğu göze çarpmaktadır. Bunun dışında numunede oksidatif aşınma meydana gelmiştir. EDS-analizine bakıldığında gözlenen oksijen piklerinin yüksekliği de bunu kanıtlamaktadır. Yapının beyaz olarak görülen bölgelerinde abrazif aşınmaya ilaveten oksidasyon aşınması da meydana gelmiştir.

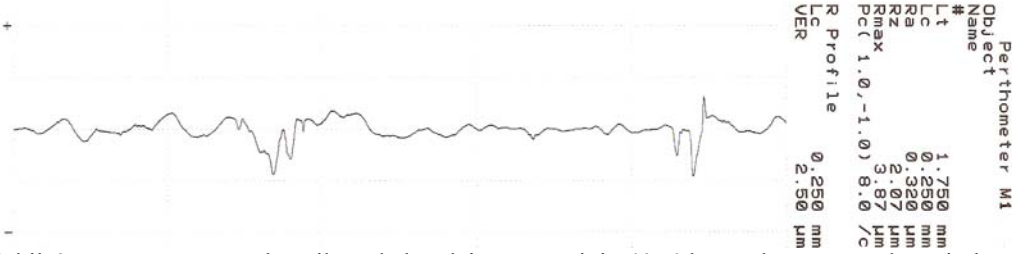
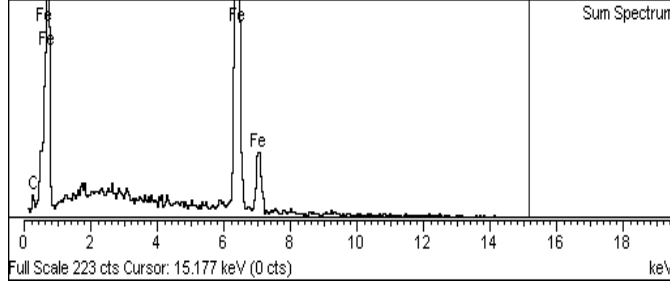




Şekil 6.74. Kuru sürtünme koşullarında bandaj numunesinin 30N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

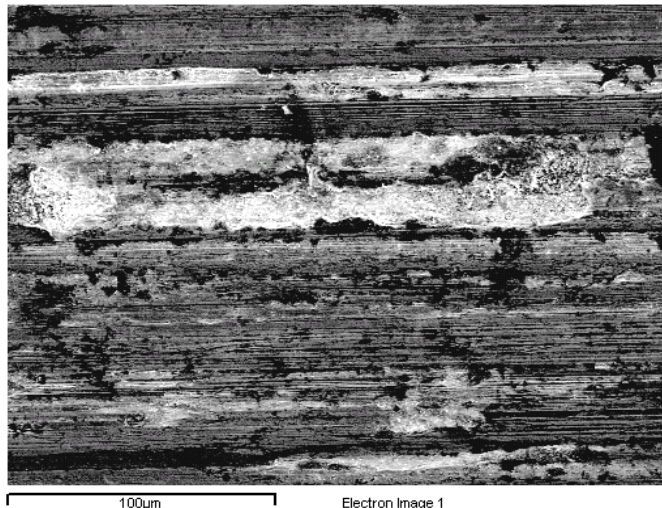
Şekil 6.74’de kuru sürtünme koşullarında, 30N’da bandaj numunesinin disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucu görülmektedir. Numunenin hemen hemen her yerinde pullanma biçiminde abrazif aşınma ve bunu takiben oksidasyon aşınması meydana gelmiştir. SEM görüntüsündeki beyaz bölgeler ve EDS analizindeki oksijen pikleri bu durumu özetlemektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü grafiğine bakıldığında oluşan çukurcukları gösteren negatif (-) bölgelerin, tepeciklere oranla daha fazla olduğu görülmektedir.

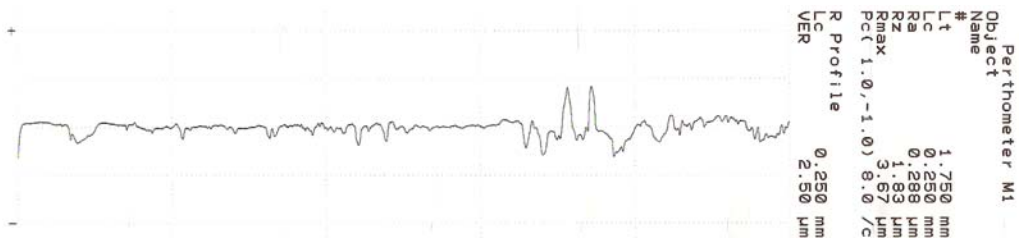
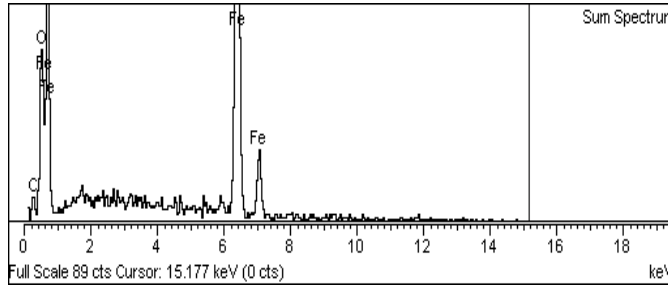




Şekil 6.75. Yaş sürtünme koşullarında bandaj numunesinin 40N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

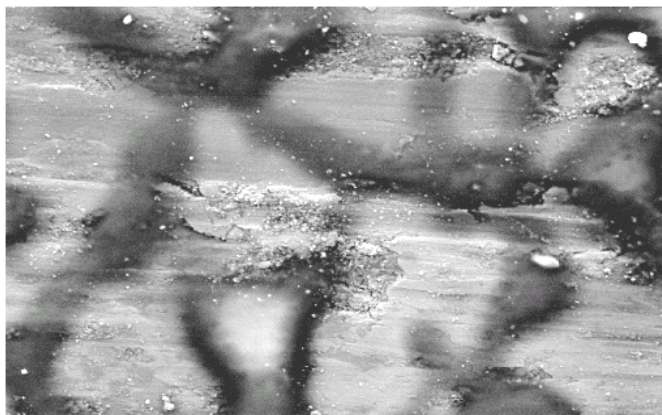
Şekil 6.75’te yaş sürtünme koşullarında, 40N’da bandaj numunesinin disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucu görülmektedir. Numunede, Şekil 6.74’de gösterilen durumla kıyaslanamayacak kadar az aşınma meydana geldiği görülmektedir. Numunelerin her ikisinin de aynı bandaj malzemesi olmasına rağmen Şekil 6.75’teki durumda çok hafif bir aşınma gözlenmesinin temel nedeni, aşınma deneyinin sulu ortamda yapılmasıdır. Diğer bir faktörün de EDS-analizinden anlaşıldığı üzere demir karbürlerin (FeC) varlığının aşınma dayanımını artırması olduğu düşünülmektedir.

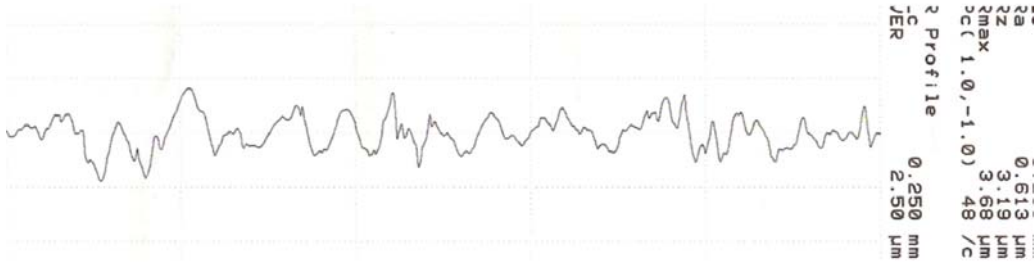
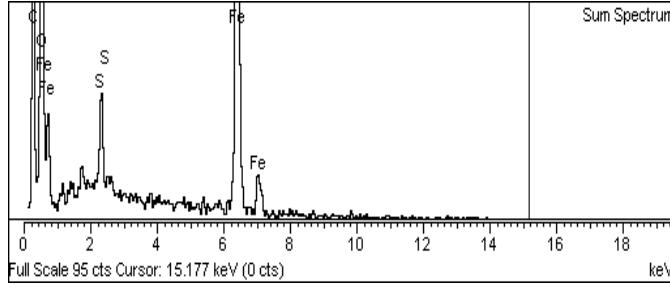




Şekil 6.76. Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

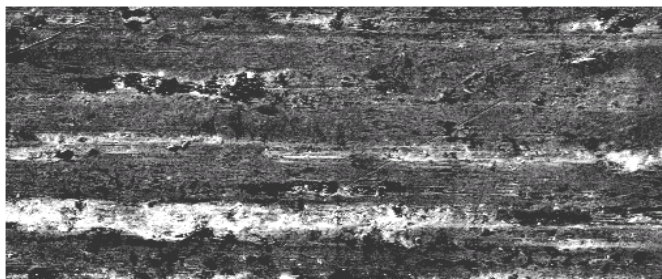
Şekil 6.76'da yaş sürtünme koşullarında, Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N'da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucu görülmektedir. Numunede, demir karbürlerin (FeC) oluşumu dikkat çekmektedir. SEM mikrografının orta ve üst kısımlarında aşınma olukları ve yivleri dikkat çekmektedir. Zaten yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakıldığında, en çukurla en tepe nokta arasını gösteren R_{max} değerinin 3.67 µm gibi yüksek bir değerde çıkması bu durumun göstergesidir. Bu abrasif aşınma sırasında, deney yağmur suyu ortamında yapıldığından dolayı, numunede oksitlenme meydana gelmiştir. Aşınma yivinin iç kısımları bundan dolayı beyaz renkte gözükmektedir. Daha da şiddetli bir aşınma olması olasılığı, oksitlenme sırasında oluşan bu oksit filmlerinin etkisiyle azalmış olabilir. Çünkü oksit filmlerinin sürtünme kuvvetini azaltıcı etki yaptığı bilinmektedir.

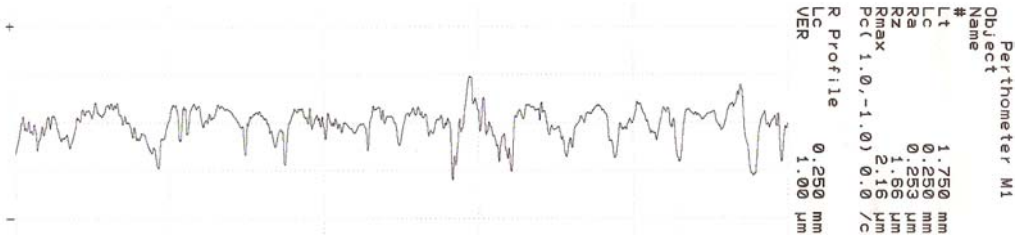
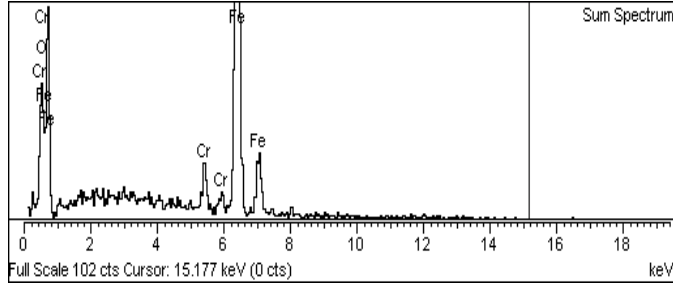




Şekil 6.77. Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-A ile xy-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

Şekil 6.77’de kuru sürtünme koşullarında, Elektrot-A ile xy-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N’da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucu görülmektedir. Numunenin EDS analizinden yapıda karbürlerin yanı sıra kükürdün de bulunduğu anlaşılmaktadır. SEM görüntüsünde sülfür inklüzyonları görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri $R_{max} = 3,68 \mu m$ ve $R_z = 3,19 \mu m$ olarak bulunmuştur. Aşınmanın türü hakkında bir şey söylenememiştir.

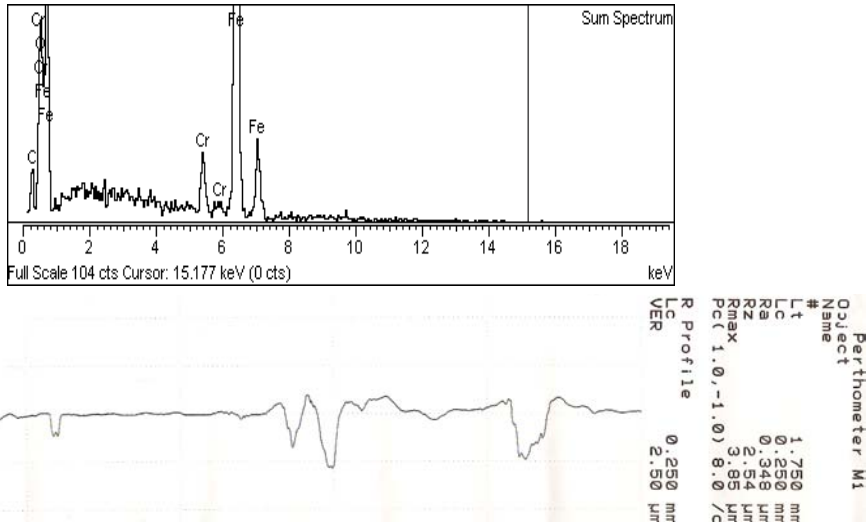




Şekil 6.78. Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

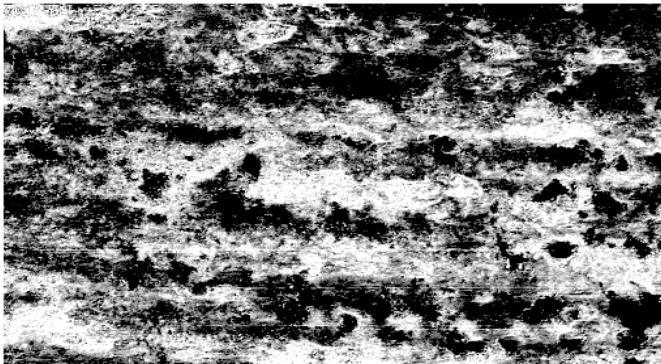
Şekil 6.78’de kuru sürtünme koşullarında, Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü sonucu görülmektedir. SEM görüntülerinden numunenin aşınma yüzeyinde abrasif aşınmadan kaynaklanan yivler ve aşınma debrisleri gözlenmektedir. Bunlar yer yer yapıdan kopmuşlardır, siyah noktalar koparak yüzeyden uzaklaşan aşınma partiküllerinin yerini göstermektedir. EDS-analizlerinden yapıda Cr piklerinin azımsanamayacak oranda olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum Elektrot-B’nin, daha önce Tablo 5.4’te verilen kaynak dikiş kompozisyonuyla uyumludur. Cr’un yapmış olduğu karbürler yapıda homojen olarak dağılmışlardır. Yüzeyde yoğun olarak meydana gelen oyuklar ve çukurlar, yüzey pürüzlülüğü grafiğinden teyit edilmektedir.

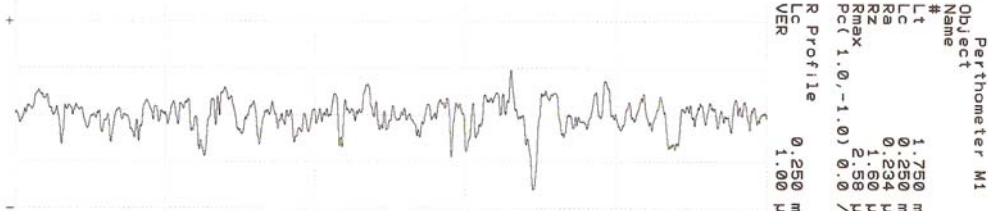
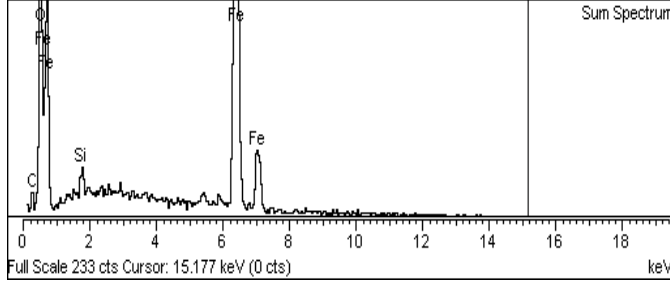




Şekil 6.79. Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N'da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

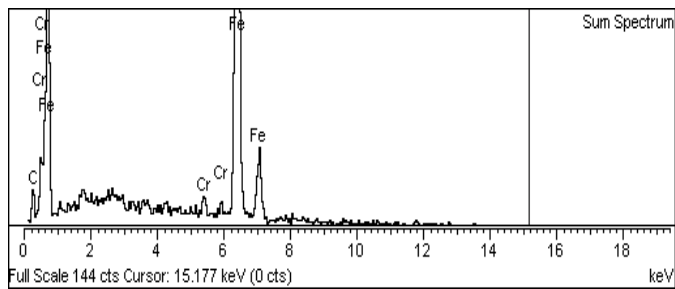
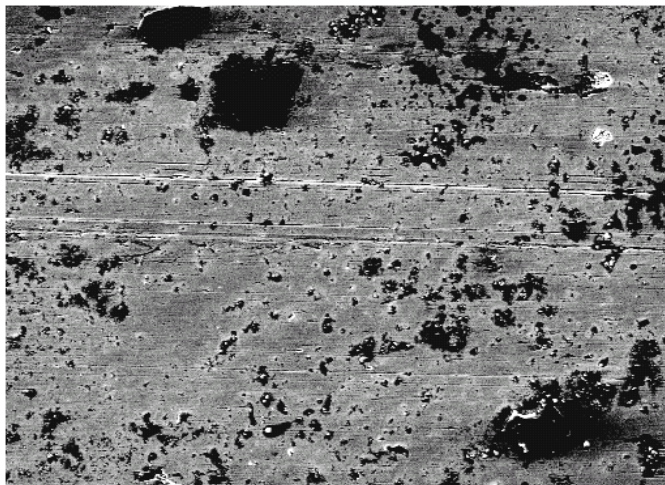
Şekil 6.79'da yaş sürtünme koşullarında, Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 40N'da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü sonucu görülmektedir. Şekil 6.86'da aynı numune ile kuru sürtünme koşullarında çalışılmış, burada ise uygulanan yük 2 katına çıkarılmış, yağmur suyu ile aşınma yapılmıştır. SEM görüntüsünden iki büyük bölgesel partikülün aşınma deneyi sırasında pimden koptuğu ve yerlerinin oyuklandığı görülmektedir. Aslında 40N gibi bu deneyler için yüksek diyebileceğimiz bir yük uygulanmasına rağmen sulu ortamda gerçekleştiği için aşınma hasarı şiddetli değildir. Yüzey pürüzlülüğü grafiğinde de bu kopan partiküllerin olduğu yerler kuyu biçiminde görülmektedir. Bir önceki örnekte olduğu gibi krom karbürler burada da göze çarpmaktadır.





Şekil 6.80. Kuru sürtünme koşullarında Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

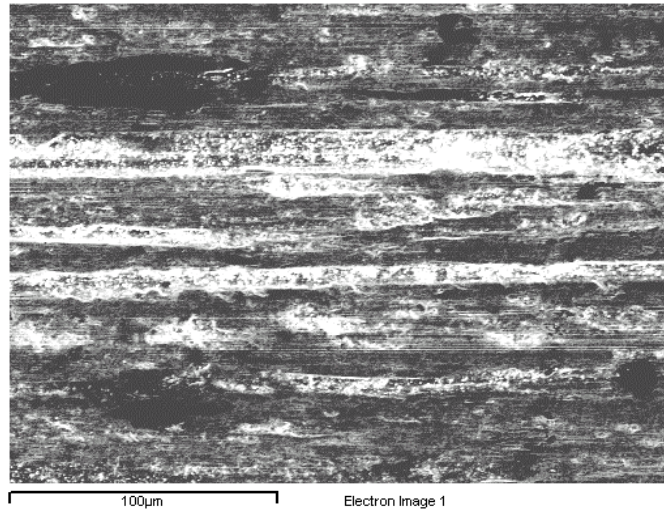
Şekil 6.80’de kuru sürtünme koşullarında, Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü sonucu görülmektedir. Numunenin SEM mikrografından, pimin diske temas eden yüzeyinde aşınma debrisleri, kazınma izleri görülmektedir. Bu izlerin yüzey pürüzlülüğü taramasından eksenin altta kalan kısmı da oluşan oyukların, yivlerin çokluğunu göstermektedir. Ayrıca pimin diskle birlikte kuru sürtünme altında çalışmasından açığa çıkan yüksek sıcaklıktan dolayı (termokupolla yapılan ölçümlerde 10N-40N arasında 68-87 °C’ler mertebesine çıktığı görülmüştür), yüzeyde oksitlenme görülmüştür. EDS-analizindeki oksijen pikinin yüksekliği ve SEM mikrografındaki beyaz bölgeler bu durumu kanıtlamaktadır. Numunede abrazif aşınmayla birlikte oksidasyon aşınması da görülmüştür.

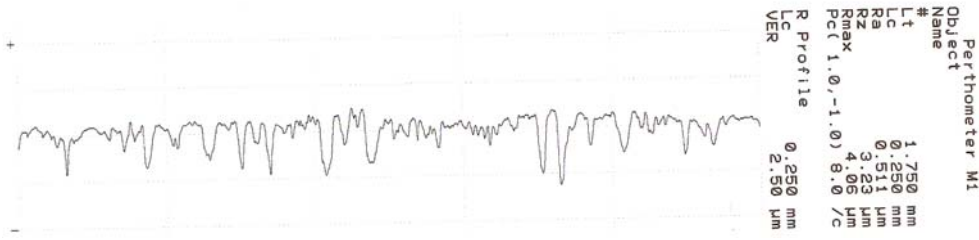




Şekil 6.81. Yaş sürtünme koşullarında Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 30N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

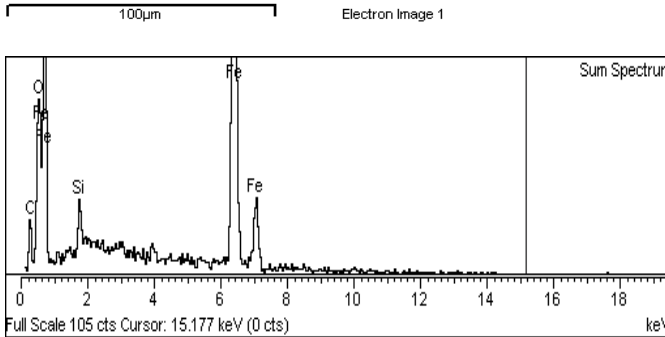
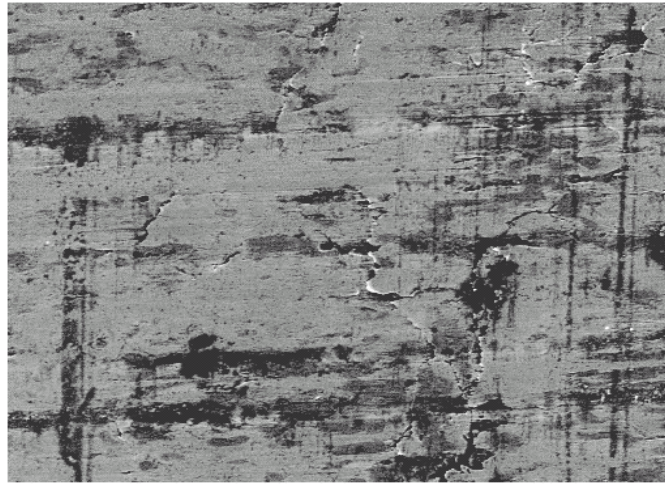
Şekil 6.81’da yaş sürtünme koşullarında, Elektrot-B ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü, bu yüzeyin ortasından soldan sağa doğru alınan çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü sonucu görülmektedir. EDS-analizinden varlığı anlaşılan krom karbürler, SEM görüntüsünde yapının her yerine homojen olarak dağılmış durumda gözükmektedirler. Yaş sürtünme koşullarından dolayı pimin diske temas yüzeyinde şiddetli bir aşınma olmamakla beraber, bazı yerlerden abrazif aşınma yoluyla aşınma ürünleri kalkarak yapıyı terk etmiştir, bu yerler siyah noktalar olarak gözükmektedir. Yüzey pürüzlülüğü grafiğindeki çukurlar da bu bölgelere denk gelmektedirler.

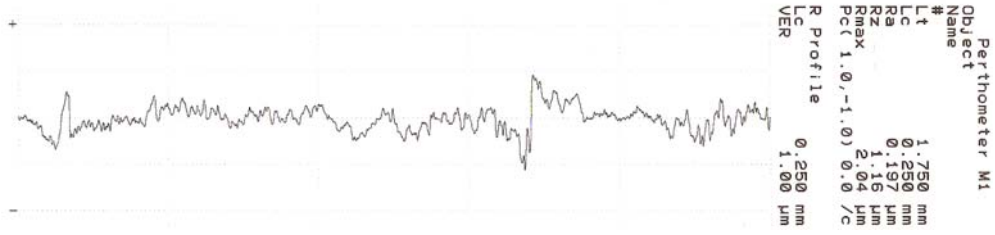




Şekil 6.82. Kuru sürtünme koşullarında Boden kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

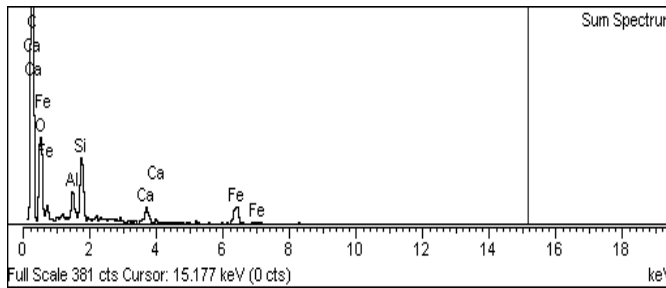
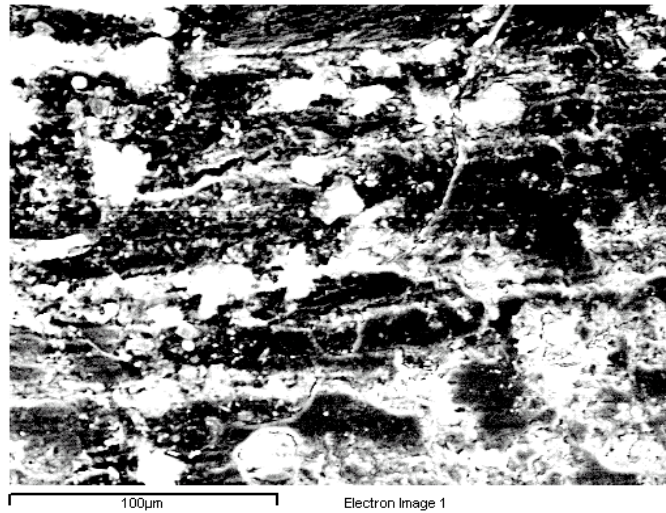
Şekil 6.82’de kuru sürtünme koşullarında, Boden kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı uygulanan numunenin 20N’da disk-üstü-pim aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü sonucu görülmektedir. Numunede abrazif aşınma sonucu oluklanmalar oluşmuştur. Şekil 6.80’de değinilen sıcaklık açığa çıkmasından dolayı Boden kaynaklı pimlerde de oksidasyon meydana gelmiş, oksidatif aşınma davranışı gözlenmiştir.

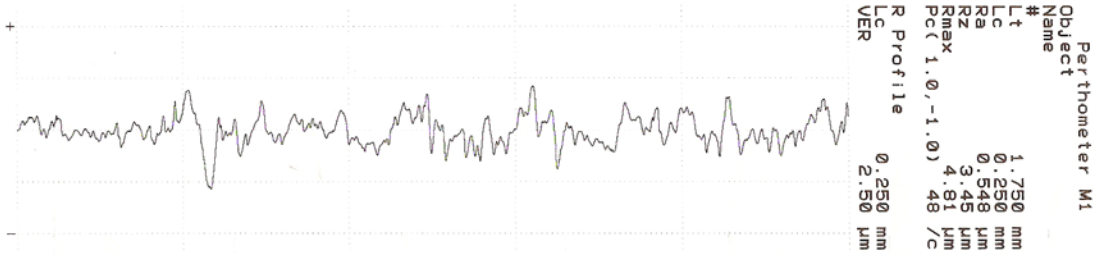




Şekil 6.83. Kuru sürtünme koşullarında dökme demir fren balatası numunesi ile 20N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

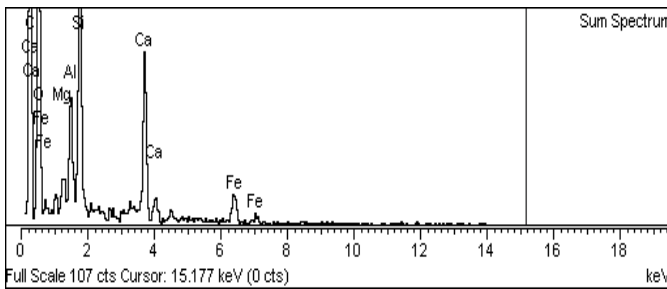
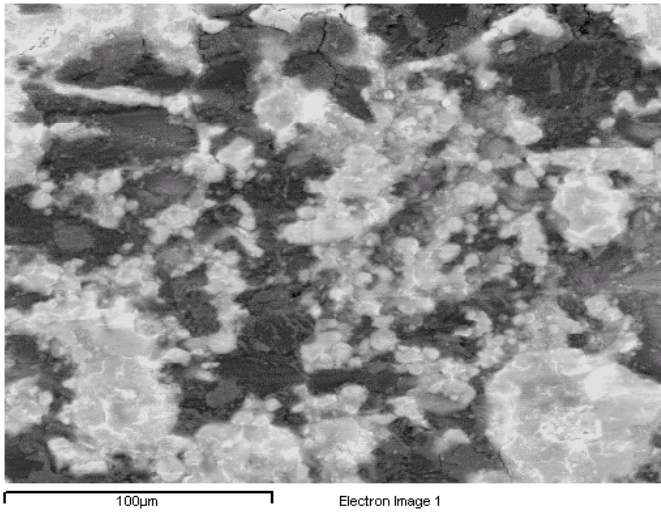
Şekil 6.83’te kuru sürtünme koşullarında dökme demir fren balatası numunesi ile 20N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri görülmektedir. SEM mikrografında dökme demir pimlerin aşınma yüzeylerinde mikro-çatlakların oluştuğu, bunların bazılarının ilerleyerek aşınma yivlerinin oluşumuna zemin hazırladığı görülmektedir. EDS-analizinde açığa çıkan oksijenin aşınma yüzeyinde oksit oluşturduğu izlenmiştir. Görülen mikro-çatlakların, bu oksitlerin kırılmasıyla da meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir ve bu oksitli yapıların gevrek olmasından dolayı yapısal kırılmalar sonucu aşınmanın artmış olabileceği düşünülmektedir.

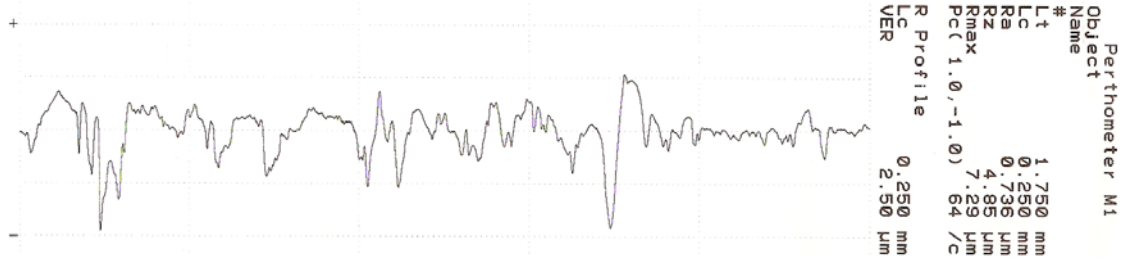




Şekil 6.84. Yaş sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 10N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

Şekil 6.84’te yaş sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 10N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri görülmektedir. Yaş sürtünme koşullarında aşınma deneyi yapıldığından kompozit sabo pimin diske temas eden yüzeyinde ince filmler oluşmuştur. Bu filmlerin abrazif aşınmayı geciktirici etkisi olduğu düşünülmektedir. EDS-analizinde rastlanan kalsiyum, kompozit sabonun iç yapısında bulunmaktadır.





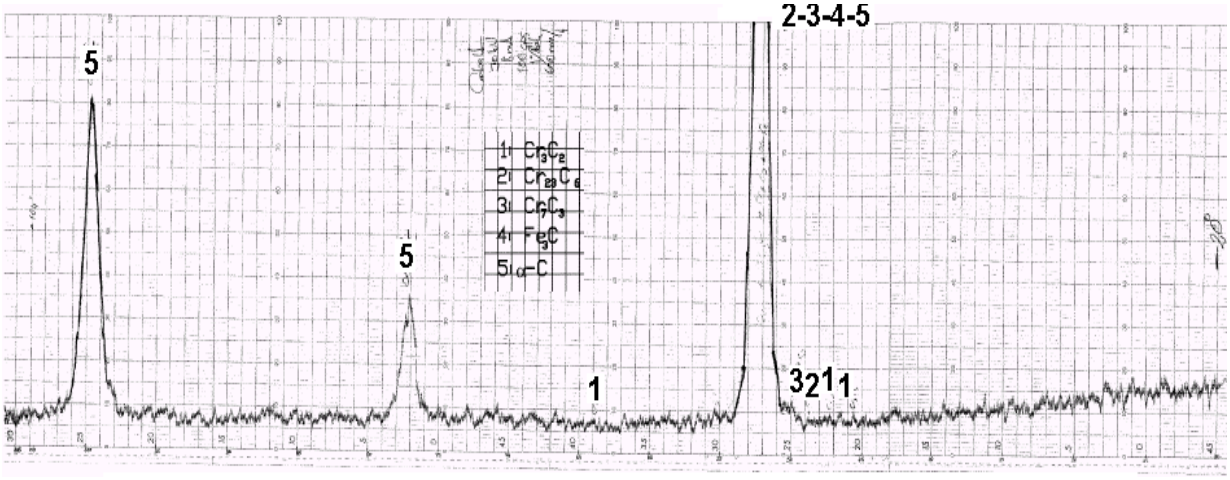
Şekil 6.85. Kuru sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 30N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

Şekil 6.85’te kuru sürtünme koşullarında kompozit fren balatası numunesi ile 30N’da yapılan aşınma deneyinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüsü, çizgisel EDS-analizi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri görülmektedir. SEM görüntülerine bakıldığında kompozit sabonun diske temas eden yüzeyinde şiddetli aşınma meydana gelmiştir. Ablativ aşınma olarak adlandırılan bu aşınma türü, aşırı zorlanan ve fiziksel ya da kimyasal değişimler nedeniyle ısınan yerlerde meydana gelmektedir. Bu aşınma türü en yaygın olarak uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı dış yüzeylerinde ve fren balatalarında görülmektedir.

6.7. X-Işını Analizleri

Dolgu kaynağı yapılmış bir parçadan aşağıdaki kesitte gösterildiği gibi bir numune alınmış, bu numunenin değişik bölgelerinden alınan metal tozlarıyla X- Işınları Analizi yapılmıştır.

Şekil 5.13’te görülen şemanın 3-nolu bölgesinden alınan X-ışınları difraktometresi Şekil 6.86’da verilmiştir.



Şekil 6.86. Kaynaklı bölgenin kapak pasosundan alınan X-ışınları analizi

Dolgu amacıyla çekilen pasoların en üstüne atılan son pasoda (kapak pasosu) yüksek oranda kroma rastlanmış, kromun yaptığı Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ ve Cr_3C_2 karbürleri tespit edilmiştir.

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Küçük ölçekli laboratuvar koşullarında yapılan aşınma deneylerinde teker-ray sistemi için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

6. Kuru sürtünme koşullarında belirli bir sertlik değeri için; perlitik çeliklerin beynitik veya martenzitik çeliklerden daha iyi aşınma dayanımı sağladıkları bildirilmiştir. Bunun nedeni bilinmemekle beraber aşınma sırasında perlitik çeliklerde karbürce zengin sert yüzeyler oluştuğu düşünülmektedir. Bu tabaka esas malzemenin sertliğinin iki katı kadar sertliğe sahip olabilmektedir. Beynitik ve martenzitik çelikler genellikle daha düşük karbon içeriğine sahiptirler. Bunlar perlitik çeliklerin ki kadar yüksek sertliğe ve karbür yoğunluğuna sahip olamazlar.
7. Perlitik çelik için karbon oranı arttıkça sertlik ve lamelli karbürlerin hacim oranları da artar bu da aşınma oranını düşürür.

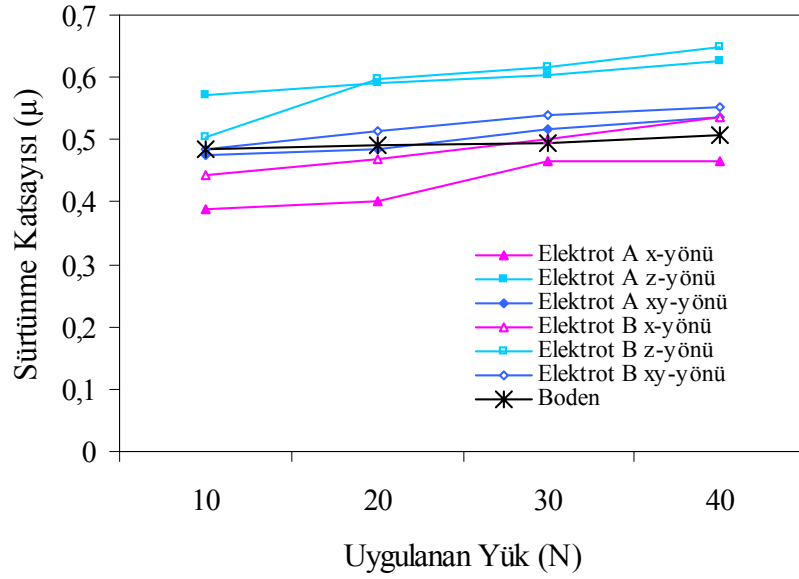
8. Perlitik çelikler için perlit tabakaları arasındaki mesafe alaşımlama yapılarak düşürülebilir. Bu da sertlik değerini arttırırken aşınma oranını azaltır. Bunun karbür lamellerinin kalınlığı ile gevreklik arasındaki ilişkiden dolayı olduğu düşünülmektedir. Bundan dolayı perlitin iyileştirilmesi aşınma yüzeylerinde karbür kırılmasını tetikler ve bundan dolayı aşınma oranı azalır.
9. Bütün çelikler için sıvı veya katı yağlama aşınma miktarını çok büyük oranlarda düşürür.
10. Küçük ölçekli kuru sürtünme deneyleri malzemelerin kullanım performanslarını belirlemede çokça kullanılırlar.

Bundan dolayı laboratuvar koşullarında yapılan disk-üstü-pim veya silindir-üstü-silindir aşınma deney yöntemleri kullanım sırasındaki aşınma performanslarını karakterize etmede önemli rol oynar.

Elektrot-A ve Elektrot-B elektrotlarıyla elektrik ark kaynak yöntemiyle x, xy ve z-yönü olarak tanımlanan üç farklı doğrultuda dolgu kaynağı yapılan numuneler ile endüstriyel boyutta tren teker bandajlarına bakım ve tamir amaçlı uygulanan Boden kaynak yönteminde kaynak edilmiş numunelerle, kuru ve yağ sürtünme koşullarında yapılan disk-üstü-pim aşınma deneyi sonuçlarına göre şu bulgulara ulaşılmıştır:

Kuru sürtünme koşullarında:

1. Hesaplanan “sürtünme katsayıları” göz önüne alınarak, Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin sürtünme katsayısı değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 7.1’de verilmiştir. Aynı yön esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek sürtünme katsayıları elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise Elektrot-A ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynaklı numunelerin sürtünme katsayıları, Elektrot-A’nkilerden yüksek, Elektrot-B’nkilerden ise düşüktür.

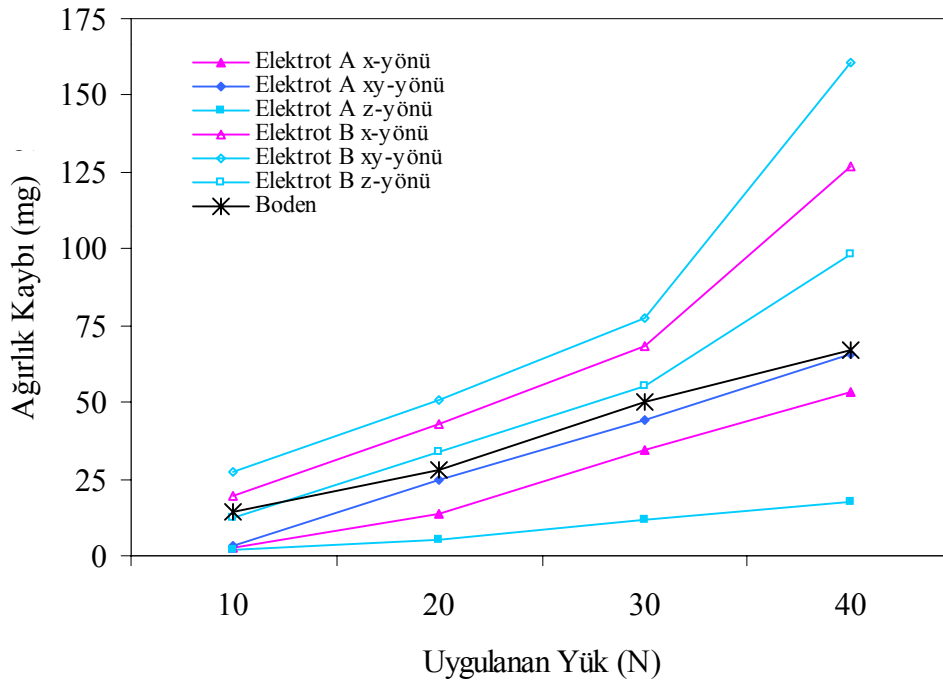


Şekil 7.1. Elektrot A, Elektrot B ve Boden numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

2. Teker bandajı-ray-fren sisteminin unsurları olarak bandaj, ray, kompozit fren balatası (sabo) ve dökme demir fren balatası malzemelerinin de sürtünme katsayıları aynı koşullarda hesaplanmıştır. Bandaj malzemelerinin sürtünme katsayısı değerleri, ray malzemelerinden yaklaşık olarak % 15; dökme demir balataların sürtünme katsayısı değerleri de kompozit balatalarinkinden yaklaşık olarak % 57 daha yüksektir.
3. Hesaplanan “ağırlık kayıpları” göz önüne alınarak, Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin ağırlık kaybı değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 6.15’te verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek ağırlık kayıpları elde edilmiştir. En yüksek ağırlık kaybı değerleri Elektrot-B ile xy-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük ağırlık kaybı değerleri ise Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları ise; uygulanan her bir aşınma yükü için, Elektrot-A ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin ağırlık kaybı değerlerinden daha yüksek, Elektrot-B ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin ağırlık kaybı değerlerinden ise daha düşüktür.
4. Elde edilen bulgular sonucunda; yuvarlanmalı/kaymalı hareket sırasında aşınmaya maruz kalacak bileşenlere bakım ve tamir amaçlı dolgu kaynağı uygulanması sırasında, kaynak yapılacak doğrultunun, bileşenlerin aşınma performanslarını ve kullanım ömürlerini önemli

derecede etkileyeceği görülmüştür. Buna göre; Elektrot-A ve Elektrot-B için z-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerle yapılan disk-üstü-pim aşınma deneylerinde uygulanan her bir yük için en düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

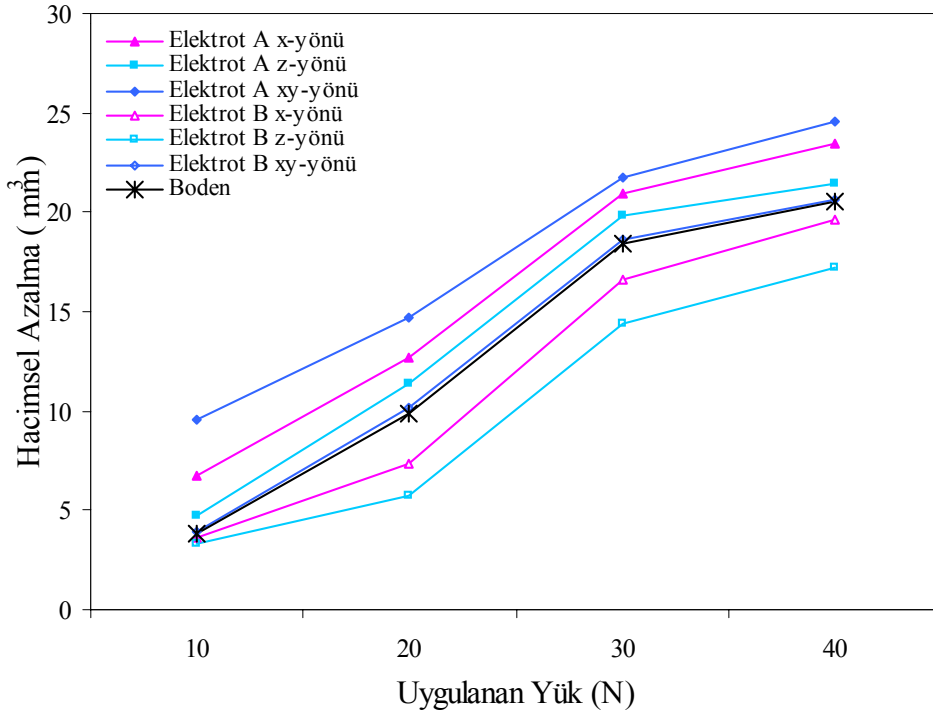
5. Elektrot-A, Elektrot-B'ye göre her dört yükte de daha az aşınmış, daha az ağırlık kaybına uğramıştır. Boden kaynaklı numunelerin ağırlık kayıpları, Elektrot-A'ninkilerden yüksek, Elektrot-B'ninkilerden ise düşüktür.



Şekil 7.2. Elektrot A, Elektrot B ve boden numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki ağırlık kaybı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi

6. Bandaj malzemelerinin ağırlık kaybı değerleri, ray malzemelerinden yaklaşık olarak % 12; dökme demir balataların ağırlık kaybı değerleri de kompozit balatalarinkinden yaklaşık olarak % 90 daha yüksektir.
7. Hesaplanan “hacimsel azalma miktarları” göz önüne alınarak, Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin hacimsel azalma değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 7.3’te verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-A ile yapılan deneylerde, Elektrot-B ile yapılanlara göre nispeten daha yüksek hacimsel azalma elde edilmiştir. En

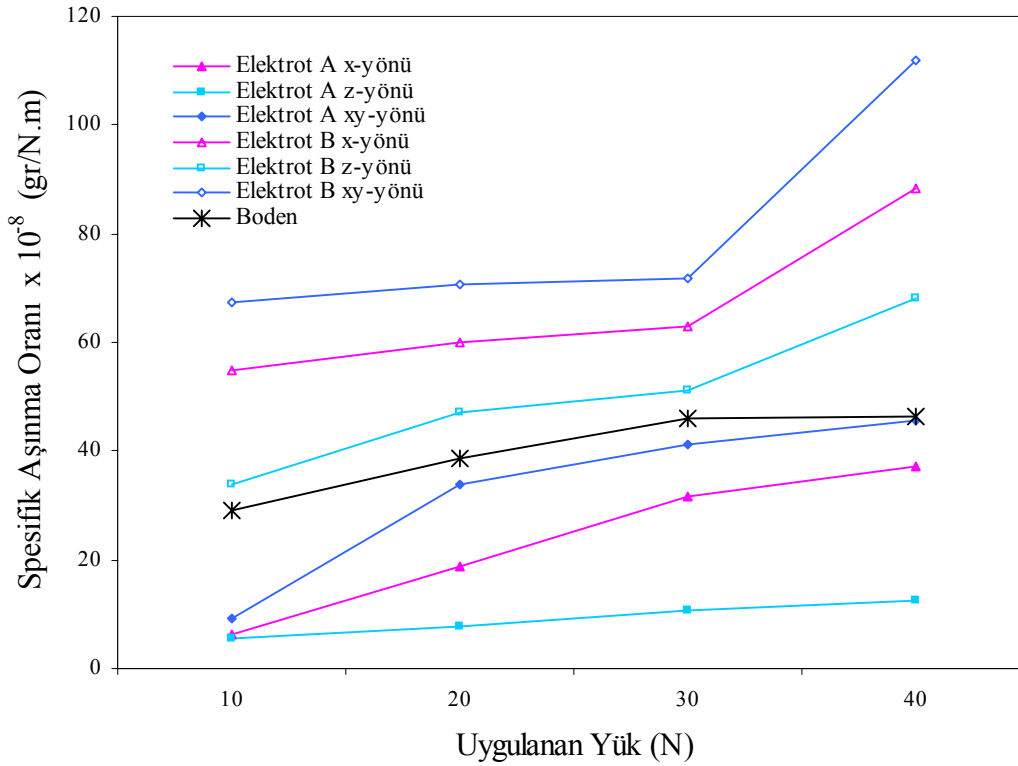
yüksek hacimsel azalma değerleri Elektrot-A ile xy-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük hacimsel azalma değerleri ise Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan numunelerin hacimsel azalma sonuçları ise; uygulanan her bir aşınma yükü için, Elektrot-B ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin hacimsel azalma değerlerinden daha yüksek, Elektrot-A ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin hacimsel azalma değerlerinden ise daha düşüktür.



Şekil 7.3. Elektrot A, Elektrot B ve boden numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

8. Bandaj malzemelerinin hacimsel azalma değerleri, ray malzemelerinden yaklaşık olarak % 42; dökme demir balataların hacimsel azalma değerleri de kompozit balatalarinkinden yaklaşık olarak % 68 daha yüksektir.
9. Hesaplanan “spesifik aşınma oranları” göz önüne alınarak, Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin spesifik aşınma oranlarının birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 7.4’te verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek spesifik aşınma oranı elde edilmiştir. En yüksek spesifik aşınma oranları Elektrot-B ile xy-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en

düşük spesifik aşınma oranları ise Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan numunelerin spesifik aşınma oranları sonuçları ise; uygulanan her bir aşınma yükü için, Elektrot-A ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin spesifik aşınma oranı değerlerinden daha yüksek, Elektrot-B ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin spesifik aşınma oranı değerlerinden ise daha düşüktür.



Şekil 7.4. Elektrot A, Elektrot B ve Boden numunelerinin kuru aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

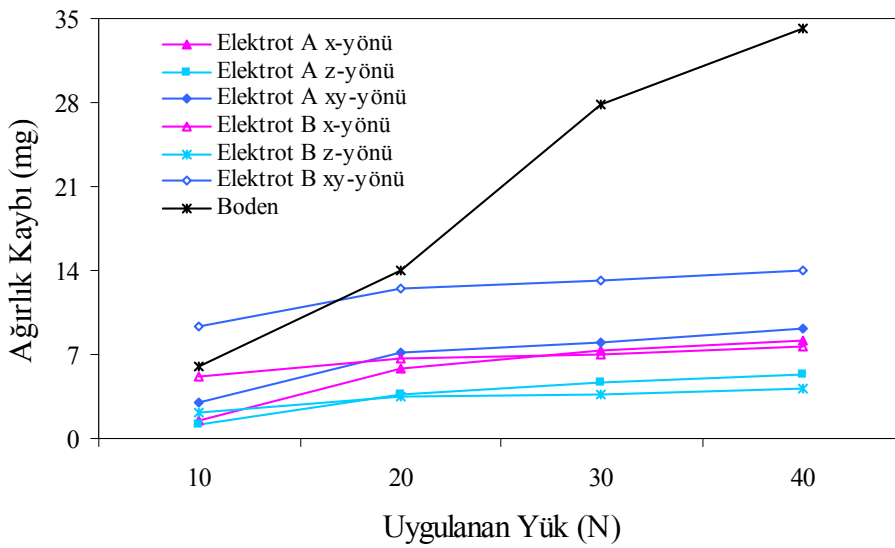
10. Bandaj malzemelerinin spesifik aşınma oranları, ray malzemelerinden yaklaşık olarak % 20; dökme demir balataların spesifik aşınma oranları da kompozit balatalarınkinden yaklaşık olarak % 24 daha yüksektir.

Yaş Sürtünme koşullarında:

11. Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin sürtünme katsayısı değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 6.33'te verilmiştir. Aynı yön esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek sürtünme katsayıları elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri Elektrot-B ile z-yönünde

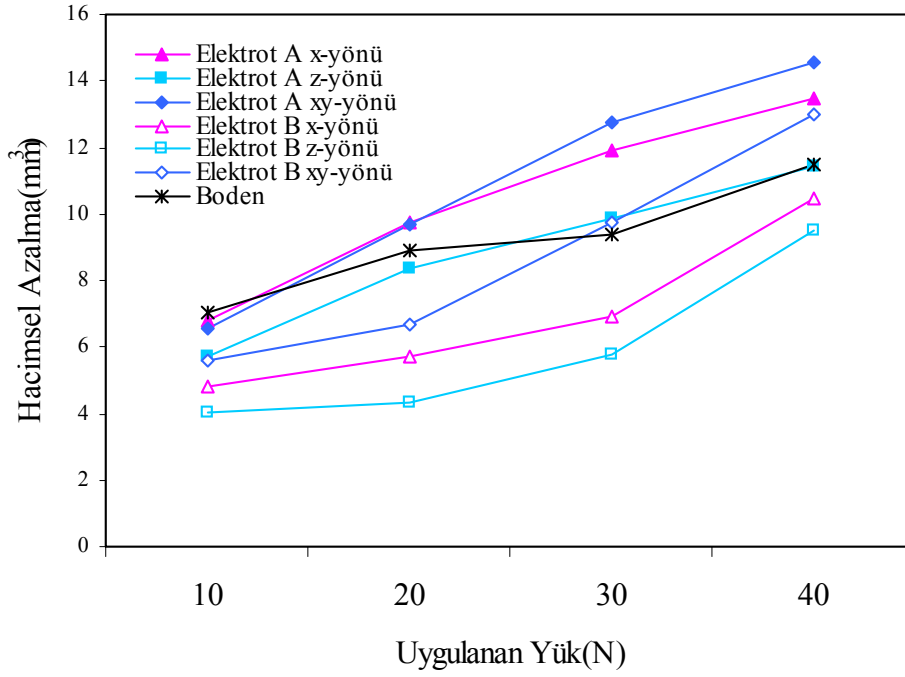
dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük sürtünme katsayısı değerleri ise Elektrot-A ile x-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynaklı numunelerin sürtünme katsayısı değerleri, hem Elektrot-A'ninkilerden, hem de Elektrot-B'ninkilerden düşüktür. Bu durum, aşınan kısımları Boden kaynağıyla doldurulmuş tekerlerin yağışlı hava koşullarında çok da güvenli hareket edemeyeceklerini göstermektedir. Elektrot-A ve Elektrot-B daha güvenlidir, maliyet optimizasyonu yapılarak bu elektrotların kullanımına geçilmelidir. Yaş sürtünme koşullarında da kuru sürtünme koşullarında olduğu gibi bandaj malzemelerinin sürtünme katsayısı değerleri, ray malzemelerinden; dökme demir balataların sürtünme katsayısı değerleri de kompozit balatalarinkinden yüksektir. Bununla beraber, yüksek yüklere çıkıldıkça her dört malzemenin de sürtünme katsayısı değerleri düşmektedir, bu da ray yüzeyine tutunmayı güçleştirmektedir.

12. Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin ağırlık kaybı değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 7.5'te verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek ağırlık kayıpları elde edilmiştir. En yüksek ağırlık kaybı değerleri Elektrot-B ile xy-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük ağırlık kaybı değerleri ise Elektrot-A ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları ise; uygulanan her bir aşınma yükü için, genelde üç yönde de Elektrot-A ve Elektrot-B'de elde edilen ağırlık kaybı sonuçlarından büyüktür.



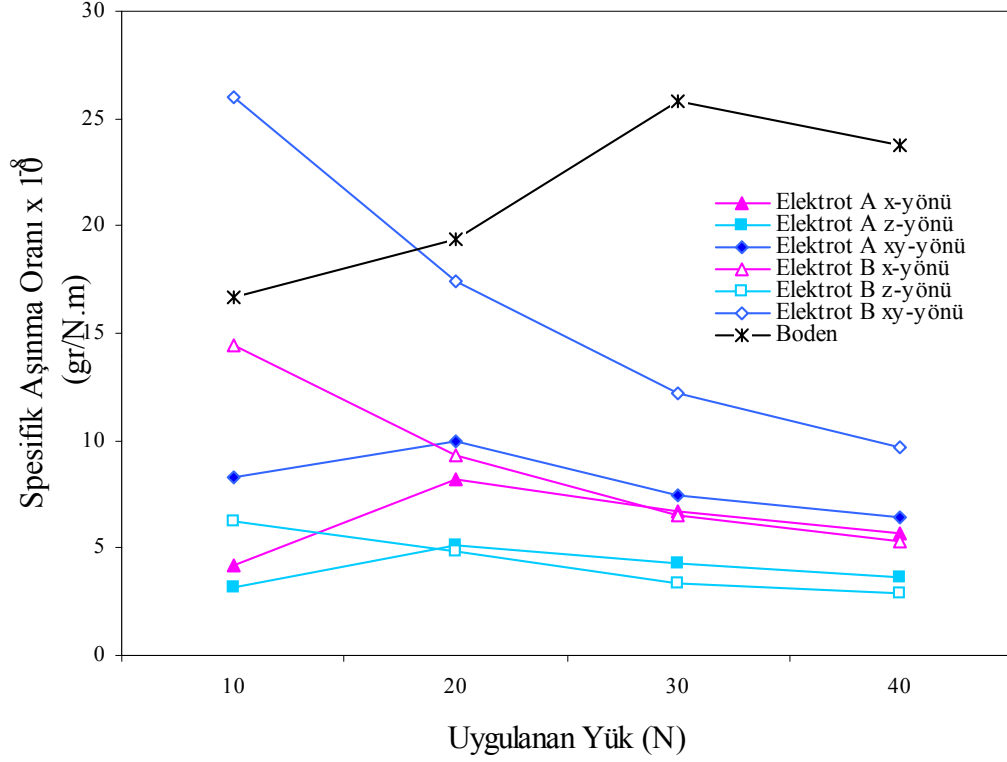
Şekil 7.5. Elektrot A, Elektrot B ve boden numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

13. Bandaj malzemelerinin ağırlık kaybı değerleri, ray malzemelerinden yaklaşık olarak %58; dökme demir balataların ağırlık kaybı değerleri de kompozit balatalarinkinden yaklaşık olarak % 91 daha yüksektir.
14. Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin hacimsel azalma değerlerinin göreceli olarak karşılaştırılması Şekil 7.6'da verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-A ile yapılan deneylerde, Elektrot-B ile yapılanlara göre nispeten daha yüksek hacimsel azalma elde edilmiştir. En yüksek hacimsel azalma değerleri Elektrot-A ile xy-yönünde dolgu kaynağı atılmış numunelerde, en düşük hacimsel azalma değerleri ise Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Boden kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yapılan numunelerin hacimsel azalma sonuçları ise; uygulanan her bir aşınma yükü için, Elektrot-B ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin hacimsel azalma değerlerinden daha yüksek, Elektrot-A ile x, xy ve z-yönlerinde kaynak atılmış numunelerin hacimsel azalma değerlerinden ise daha düşüktür. Bandaj malzemelerinin hacimsel azalma değerleri, ray malzemelerinden yüksektir. Dökme demir saboların hacimsel azalma miktarları 30N'a kadar doğrusal olarak artmakta, bu yükten sonra sabit kalmaktadır. Karbon-karbon kompozit malzemesinden üretilen saboların hacimsel azalma oranları ise tersine 30N'a kadar azalmakta, bu yükten sonra artmaya başlamaktadır. Bu verilere dayanarak kompozit fren balatalarının yaş sürtünme koşullarında 30N'luk aşınma yüküne kadar olan yüklerde güvenli olarak kullanılabilceği, 30N'u geçen yüklemelerdeki çalışma koşullarında kullanım ömürlerinin düşeceği sonucuna varılmıştır. Dökme demir sabolarda artan aşınma yüküyle hacimsel kayıplar da artmaktadır. Bu yüzden güvenli bir kullanım aralığı söylemek güçtür; sadece artış hızı 30N'dan sonra yavaşlamaktadır. (30N'da 13.57 mm³ iken 40N'da 13.79 mm³ olmaktadır.) Yüksek frenleme yüklerinde kullanılan kompozit balataların tükeneceği önceden bilinmeli, kontrolleri daha sık yapılmalıdır.



Şekil 7.6. Elektrot A, Elektrot B ve boden numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki hacimsel azalma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

15. Elektrot-A, Elektrot-B ve Boden kaynak yöntemlerinin spesifik aşınma oranlarının birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 7.7’de verilmiştir. Aynı doğrultular esas alındığında; Elektrot-B ile yapılan deneylerde, Elektrot-A ile yapılanlara göre nispeten yüksek spesifik aşınma oranı elde edilmiştir. En yüksek spesifik aşınma oranları ise 20N, 30N ve 40N’da Boden kaynaklı numunelerde; en düşük spesifik aşınma oranları ise Elektrot-A ile z-yönünde ve Elektrot-B ile z-yönünde dolgu kaynağı uygulanmış numunelerde bulunmuştur. Genelde Elektrot-B ile kaynak yapılmış numunelerin spesifik aşınma oranları Elektrot-A ile yapılanlarınkinden yüksektir.



Şekil 7.7. Elektrot A, Elektrot B ve boden numunelerinin yaş aşınma koşullarındaki spesifik aşınma değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi.

16. Bu tez çalışmasının başlangıcında, yüzeylere dolgu kaynağı uygulamasında izotropinin olup olmadığının incelenmesi amaçlanmış ve bu yüzden farklı doğrultularda kaynaklar çekilmişti. Disk-üstü-pim aşınma deneyleri sonucu farklı doğrultularda kaynak çekilmiş numunelerde farklı sürtünme katsayısı değerleri bulunması numunelerde anizotropinin olduğunu kanıtlamıştır.
17. Yorulma deneyi sonuçlarına bakılarak Kaynaklı numuneler kendi aralarında kıyaslandığında Boden kaynak yöntemiyle kaynak edilmiş numunelerin en yüksek yorulma dayanımına sahip oldukları, neredeyse her üç gerilme genliğinde de en yüksek çevrim sayısına sahip olup en geç kırıldıkları görülmüştür. Daha sonra Elektrot-B ile kaynak yapılmış numunelerin yorulma dayanımlarının, Elektrot-A ile yapılanlardan yüksek olduğu tespit edilmiştir.
18. Deneylerde kullanılan numunelerin aşınma mekanizmaları ve türleri incelendiğinde; kuru sürtünme koşullarında, numunelerde çoğunlukla abrazif aşınma meydana gelmiştir. Bu durum SEM görüntülerinden de açıkça görülmektedir. Pimin diskle temas eden yüzeyinde

aşırı ısınma meydana gelmektedir. 40N’da yapılan deneylerde 87 °C mertebelerine sıcaklık yükselmeleri olmuştur. Bu durum literatürle [12,1419,34] uyumludur. Bu yüksek ısıdan dolayı numunenin aşınma yüzeyinde oksitlenme meydana gelmektedir. EDS-analizlerinde oksijen piklerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Abrasif aşınmanın peşinden numunelerde ikincil aşınma mekanizması olarak oksidasyon aşınması meydana gelmiştir. SEM mikrograflarındaki aşınma yüzeyi üzerinde görülen beyaz bölgeler oksidatif aşınmaya maruz kalan bölgelerdir.

19. Dolgu kaynaklarının tamamında kapak pasosu denilen son pasonun spektrometrik analizinde ağ. % 4.3 oranlarına kadar Cr tespit edilmiş, X-ışınları analizlerinden de kromun yaptığı karbürler saptanmıştır. Aşınan yüzeylere sert yüzey dolgusu yapımında, bu karbürlerin yüzey sertliğini artırdıkları düşünülmektedir.
20. Yaş sürtünme koşullarındaki deneyler, doğadan biriktirilen yağmur suyuyla yapılmıştır. Demiryolu sistemi atmosfere açık bir sistem olduğundan yağışlı hava koşullarında, karlı ve buzlu ray ortamlarında sürtünme ve aşınma davranışlarının karakterizesi yapılmıştır. Yağışın şiddetinin bile sonuçları değiştireceği düşünülmektedir. Çünkü hafif yağın yağmur iyi bir yağlayıcıdır. Şiddetli yağmur ise rayla bandaj ara yüzeyinde bulunan kirleri temizleyeceğinden daha iyi tutunma sağlar. Bu çalışmadaki yaş aşınma deneylerinde yağmur suyu, bir serum şişesine doldurularak hortumla pim/disk temas yüzeyine 20 saniyede 1 damla damlayacak biçimde (3 damla/dakika) sabit hızda damlatılmıştır. Triboloji el-kitaplarında bu durum “suyun yağlayıcılığı” olarak adlandırılmaktadır, literatürde suyun yağlayıcılığı ile ilgili pek makaleye rastlanamamıştır. Yine de triboloji el-kitaplarında bu konuya değinilmektedir [34]. Sonuçlar literatürle uyumludur [19,34].
21. Bu çalışmada teker bandajı-ray-fren sisteminin aşınma ve yorulma davranışları incelenmiştir. Aşınan kısımlara tamir amacıyla dolgu kaynağı yapılarak ilk hacmin sağlanması bir çözüm olarak ülkemizde uygulanmaktadır. Fakat yapılacak dolgunun metalurjik olarak yapıya uyumu, performansının eskisi gibi korunması önemlidir. Sadece işletmelerde teker söküp değiştirilebildiği, hurdaya çıkacak tekerlerin mali açıdan ülke ekonomisine yük getirmesi, teker-balata değişimini için hattın kapalı kalacağı süre, zaman ve işgücü kayıpları dikkate alındığında bu prosesin ne denli önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Ülkemiz tekerleri ithal etmektedir; yapılacak iyileştirmelerle ömür artırımlarının, döviz kazancının yanında dışa bağımlılığımızı azaltacağı da unutulmamalıdır.

22. Tren ve demiryolu önemli mühendislik alanlarından biridir. Yaptığımız bu çalışmanın haricinde, vagon şasesinin, boji gövdelerinin ve bojiyi vagona bağlayan göbek milinin de aşınma ve yorulma davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ATAMERT S., STEKLY J.J., “Wear characteristics and Repair Welding of Rail Tracks, Wheels, Points and Crossing”, Cambridge Pres, 1995, pp.226-237
- [2] JOHNSON R.S., “Developments in Welding Techniques for The Installation and Maintenance of BR Track”, Welding and Metal Fabrication, May 1989, pp.145-150
- [3] JONHSON R.S., “Chaper Ways to Restore Rail by Welding”, Welding and Metal Fabrication, March 1989, pp. 169-171
- [4] MACD L., et al., “Copper-containing Steels for Severe Service Rails”, Int. Symp. Proceedings of Special Steels and Hard Materials, Pretoria, S. Africa, pp. 255-265
- [5] KRAUSE H., POOL G., “ Plastic Deformations of Wheel-Rail Surfaces”, Wear(113), 1986, pp.123-130
- [6] KRAUSE H., POOL G., “Wear of Wheel-Rail Surfaces”, Wear(113),1986,pp. 103-122
- [7] CLAYTON P., HILL D.N., “Rolling Contact Fatigue of a Rail Steel”, Wear(117), 1987,pp.319-334

- [8] GAHR K.H., "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series 10, Elsevier Science Publishers, 1987
- [9] LEE K.M., POLYCARPOU A.A., "Wear of Conventional Pearlitic and Improved Bainitic Rail Steels", *Wear*(2005), article in press
- [10] SAVKOOR A.R., SCHOOR G.H., "Slip-time History Influences on the Interaction Between Friction and Wear in Contaminated Rolling Contacts of Wheel-Rail Systems", *Wear*(164), 1993, pp. 980-984
- [11] VOSTROKHOV A.V., METRIKINE A.V., "Periodically Supported Beam on Viscoelastic Layer as a Model for Dynamic Analysis of a High-Speed Railway Track", *Int. J. Of Solids and Structures*(40),2003, pp. 5723-5752
- [12] FEC M.C., ŞEHİTOĞLU H., "Thermal-Mechanical Damage in Railroad Wheels due to Hot-spotting", *Wear*(102),1985,pp.31-42
- [13] CLAYTON P. et. al., "Wear behavior of Bainitic steels", *Wear* 120,1987, pp. 199-220
- [14] TYFOUR W.R. et. al., "The Steady-state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions", *Wear* (180), 1995, 79-89
- [15] CLAYTON P., DANKS D., "Effect of Interlamellar spacing on the wear resistance of eutectoid steels under rolling-sliding conditions" *Wear*(135), 1995, 369-389
- [16] JIN N., CLAYTON P., "Effect of microstructure on rolling/sliding wear of low carbon bainitic steels", *Wear* (202), 1997,202-207
- [17] SAWLEY K., JIMENEZ R., "The comparative wear performance of premium and bainitic rail steels under heavy axle loads", Association of American Railroads research report R-941, 2000
- [18] KRISTAN J., et. al., "Wear and rolling contact fatigue in bainitic steel microstructures", 6 th. Int. Conf. on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Gothenburg, Sweden, 2003
- [19] BLAU P.J., *ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. 18, ASM International, New York, 1992*
- [20] SAWLEY K., KRISTAN J., "Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* (26), 2003, 1019-1029
- [21] CLAYTON P., JIN N., "Unlubricated sliding and rolling/sliding wear behaviour of continuously cooled, low/medium carbon bainitic steels", *Wear*(200), 1996 74-82

- [22] KARATAŞOĞLU F., ve ark., "Monoblok tekerlerin aşınan kısımlarının Mag kaynağı ile yapılan dolgu metalinin aşınma davranışının incelenmesi" IWTS'98, 3-5 Haziran 1998, pp. 1-8
- [23] MUTTON P.J., ALVAREZ E.F., "Failure modes in aluminothermic rail welds under high axle load conditions", Engineering Failure Analysis(11), 2004, pp. 151-166
- [24] ÇAKMAK İ., YALÇIN Y., "Ray çeliğinin kuru yuvarlanma-kayma aşınma davranışının incelenmesi" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi(1), 2005, pp. 17-23
- [25] ÖKTEM Z., ve ark., "2024 Alüminyum alaşımında ısıtılma işleminin aşınmaya etkisi", 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-9 Haziran 1995, İstanbul, Bildiriler kitabı, 1169-1174
- [26] CLAYTON P., et. al., "Wear behaviour of Bainitic steels", Int. Symp. Proceedings of Wear of Materials, ASM, Houston Texas, April pp.5-9, 1987
- [27] BOLTON P.J., CLAYTON P., "Rolling-Sliding wear damage in rail and tyre steels", Wear (93), 1984, pp. 145-165
- [28] DANKS D., CLAYTON P., "Comparison of wear processes for eutectoid rail steels in field and laboratory tests", Int. Symp. Proceedings of wear of Materials, ASM, Houston Texas, April 1987, pp. 145-154
- [29] ATZORI B., MENEGHETTI G., "Fatigue Strength of fillet welded structural steels: Finite elements, strain gauges and reality", Int. J. of Fatigue(23), 2001, pp.713-721
- [30] NASCIMENTO M.P., et. al., "Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 Aeronautical Steel", Int. J. of Fatigue(23), pp. 607-618, 2001
- [31] MARKOV D., "Laboratory tests for seizure of rail and Wheel steels", Wear(208), pp. 91-104, 1997
- [32] DANKS D., CLAYTON P., "Comparison of wear processes for eutectoid rail steels: Field and laboratory tests", Wear(120), pp. 233-250, 1987
- [33] OHYAMA T., "Study on influence of contact condition between Wheel and rail on adhesion force and improvement at higher speeds", RTRI Report(2), 1987
- [34] BHUSHAN B., Modern Tribology Handbook, volume I-II, 2001 by CRC Press LLC
- [35] DIETER G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, 1988
- [36] TAUSCHER H., Çevirenler Güleç Ş., ARAN A., Çelik ve Dökme Demirin Yorulma Dayanımı, Gebze, 1983

- [37] DORF R.C., The Engineering Handbook, 2nd Edition, CRC Pres, 2005
- [38] DOWLING N.E., Mechanical Behavior of Materials, by Prentice Hall,1999
- [39] KUMBASAR F., Üst Yapı ve Demiryolu Mekaniği, Güven Yayınevi, Ankara, 1972
- [40] GROHMANN H.D., SCHOECH W., “ Contact Geometry and Surface Fatigue-Minimizing the Risk of Headcheck Formation”, Wear(253), 2002, pp. 54-59
- [41] BRANDAU J., “Einsatz Unsymmetrischer Schienenkopforofile im Nahverkehr”, Dissertation, der Universität Hannover,1999
- [42] LEUTWYLER M., et al., “ Suspended Particulate Matter in Railway Coaches”, Atmospheric Environment(36), 2002, pp. 1-7
- [43] WALTHER F., EIFLER D., “Local Cyclic Deformation Behavior and Microstructure of Railway Wheel Materials”, Materials Science and Engineering A(387), 2004, pp.481-485
- [44] VIAFARA C.C., et al., “Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels “, Wear, article in pres,2005
- [45] BELINGARDI G., et al., “Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the Front Structure of a High Speed Train”, Composite Structures(61), 2003, pp.13-25
- [46] BEYNON J.H., et al.,”Rolling Contact Fatigue of Three Pearlitic Rail Steels”, Wear(192), 1996, pp. 94-111
- [47] YAN W., FISCHER F.D., “ Apilicability of the Hertz Contact Theory to Rail-Wheel Contact Problems”, Archive of Apllied Mechanics (70), 2000, pp.255-268
- [48] PRAHL F., et al., “Practical Rail Grinding”, Interface Journal, April 2005
- [49] KALAY S., et al., Control of Wheel/Rail Friction, Oregon Pres, 2005
- [50] www.wordstop.com/pdfs/BookSample3-trimmed.pdf

- [51] EADIE D.T., et al., "Railway Noise and the Effect of top of Rail Liquid Friction Modifier", Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Vol. 2, Sweden, 2003, pp. 503-510
- [52] KAPOOR A., "Wear by Plastic Ratcheting", Wear(212), 1997, pp. 119-130
- [53] FLETCHER D.I., BEYNON J.H., "Development of a Machine for Closely Controlled Rolling Contact Fatigue and Wear Testing, 28,2000, pp.267-275
- [54] KALOUSEK J., et al., "Tribological Interrelationship of Seasonal Fluctuations of Freight Car Wheel Wear Contact Fatigue Shelling and Composite Brakeshoe Consumption", Wear(191), 1996, pp 210-218
- [55] FERİZOĞLU T., TEKİN E., "Gri Dökme Demir Fren Pabuçlarının İçyapıları ve Ömürleri", 2. Ulusal Demiryolu Kongresi, İstanbul, Aralık 1997, Bildiriler Kitabı 765-783
- [56] ESER M., TARHAN Z., " Fren Sistemlerinde Kullanılan Fren Pabuçları" 2. Ulusal Demiryolu Kongresi, İstanbul, Aralık 1997, Bildiriler Kitabı 445-449
- [57] VENKATARAMAN B., SUNDARARAJAN G., "The influence of sample geometry on the friction behaviour of carbon-carbon composites", Acta Materialia, 50(2002) 1153-1163
- [58] BOTELHO E.C., et al., "Rheological Studies Applied in the Processing and Characterization of Carbon/Carbon Composite", Journal of Advanced Materials(33), 2001, pp. 44-51
- [59] FERREIRA J.R., et. al., "Characteristics of carbon-carbon composite turning", J.of Materials Processing Technology, 109(2001) 65-71
- [60] SAVAGE G., Carbon-Carbon Composites, Chapman and Hall, Pres London, 1993
- [61] KOMANDURI R., "Machining of Fiber-Reinforced Composites", Machining Science Technology(1), 1997, pp.113-152
- [62] LUO R., "Fabrication of carbon/carbon composites by an electrified preform heating CVI method", Carbon, 1(2002)
- [63] C. Blanco et. al., "Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance", Wear, 213(1997) pp.1-12
- [64] WINDHORST T., BLOUNT G., "Carbon-carbon composites:a summary of recent developments and applications", Materials&Design, 18(1997) pp.11-15

- [65] GOMES J.R. et. al., “The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites”, *Wear*, 249(2001) pp.240-245
- [66] MATYSIAK S.J., et al.,”Contact Temperature and Wear of Composite Friction Elements During Breaking”, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*(45), 2002, pp. 193-199
- [67] FILIP P., et al., “ On Friction Layer Formation in Polymer Matrix Composite Materials for Brake Applications”, *Wear*(252), 2002, pp.189-198
- [68] HUTTON T.J., et al.,”Structural Studies of Wear Debris From Carbon/Carbon Composite Aircraft Brakes”, *Carbon*(37), 1999, pp.907-916.
- [69] SARKAR A.B., *Wear of Metals*, Pergamon Pres, 1985
- [70] ÖZSARAÇ U., “Endüstriyel Yatak Alaşımalarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 1999
- [71] BULDUK S., “Tankların Yürüyen Aksamında Aşınmanın İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 2004
- [72] ŞEVİK H., “Alümina Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Kompozitlerin Basınçlı Döküm Yöntemi İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 2004
- [73] DOĞAN H., ve arkadaşları, “Friction and Wear Behaviour of Implanted AISI 316L SS and Comparison with a Substrate”, *Materials and Design* 23, 2003, pp. 605-610
- [74] OĞUZ B., *Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları*, Oerlikon Yayınları, 1996
- [75] ASTM Standarts, G115-93, p.486
- [76] ASTM Standarts, G40-93, p.163
- [77] ÇINAR S.,”Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri”, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 1999
- [78] *Metals Handbook*, 8th Ed., Vol.10, ASM,1975
- [79] *Modern Tribology Handbook*, V.1, Chapter 4, 2001 by CRC Pres LLC
- [80] KNOTHE K., LIEBELT S., “Determination of Temperatures for Sliding Contact with Applications for Wheel-rail Systems”, *Wear* 189(1995), pp.91-99
- [81] OĞUZ B., *Ark Kaynağı*, Oerlikon Yayınları, 1989
- [82] LAHTI K.E., et al., “Nominal Stres Range Fatigue of Stainless Steel Filet Welds the Effect of weld Size”, *J. of Constructional Steel Research*(54), 2000, pp. 161-172

- [83] MASHIRI F.R., et al., "Effects of Weld Profile and Undercut on Fatigue Crack Propagation Life of Thin-walled Cruciform Joint", *Thin-Walled Structures*(39),2001, pp. 261-285
- [84] ŞIK A., ve arkadaşları, "Otomobil Saçlarının MIG/MAG Kaynağında Gaz Karışımlarının Yorulma Dayanımı Özelliklerine Etkisi", 10. Denizli Malzeme Sempozyumu, 2004
- [85] HIENSCH M., et al., "Two-Material Rail Development: Field Test Results Regarding Rolling Contact Fatigue and Squeal Noise Behaviour", 6th Inter. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems in Gothenburg, Sweden, 2003
- [86] MADDOX S.J., "Fatigue Design Rules for Welded Structures", *Prog. Struct. Eng. Mater.*, 2000, pp.102-109
- [87] MARINES I., et. al., "An Understanding of Very High Cycle Fatigue of Metals", *International Journal of Fatigue*, 2003
- [88] BATHIAS C., NI J., "Determination of Fatigue Limit Between 10⁵ and 10⁹ Cycles Using an Ultrasonic Fatigue Device", *American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 141-152
- [89] DEQING G., "A Method of Predicting the Fatigue Life Curve for Misaligned Welded Joints", *Int. J. Fatigue* Vol. 18, 1996, pp. 221-226
- [90] WAHAB M.A., SAKANO M., "Experimental Study of Corrosion Fatigue Behaviour of Welded Steel Structures", *Journal of Materials Processing Technology*(118), 2001, pp.117-122
- [91] NGUYEN N.T., WAHAB M.A., "The Effect of Residual Stresses and Weld Geometry on the Improvement of Fatigue Life", *J. Mater. Proc. Technol.*(48), 1995, pp.581-588
- [92] ANDRESEN P.L., *Corrosion Fatigue Testing, Fatigue and Fracture*, ASM Handbook, Vol. 19, 1996
- [93] PAO P.S., *Mechanisms of Corrosion Fatigue, Fatigue and Fracture*, ASM Handbook, Vol. 19, 1996, pp.185-209
- [94] McCONNELL D., "Weld Repair of Steel Castings", *AFS Transactions*, Vol. 94, 1986, pp.195-204
- [95] CREMONA C., "Reliability Updating of Welded Joints Damaged by Fatigue", *Int. J. Fatigue* Vol. 18, 1996, pp. 567-575
- [96] LIXING H., et. al., "Investigation of the Fatigue Behaviour of the Welded Joints Treated by TIG Dressing and Ultrasonic Peening Under Variable-Amplitude Load", *Int. J. Fatigue* Vol. 27, 2005, pp. 95-101
- [97] HERMANS M. J. M., DEN OUDEN G., "Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding", *Welding Research Supplement*, 1999, pp. 137-141

- [98] KIM I.S. et. al., "A Study on Relationship Between Process Variables and Bead Penetration for Robotic CO₂ Arc Welding", Journal of Materials Processing Technology, (136), 2003, pp.139-145
- [99] FLINN B. et. al., "Fatigue Properties of Welds of Nodular Cast Iron to Steel", AFS Transactions, pp.879-888
- [100] SLECZKA L., "Low Cycle Fatigue Strength Assessment of Butt and Filet Weld Connections", Journal of Constructional Steel Research (60), 2004, pp. 701-712
- [101] ATKINS G., et. al., "Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels", Welding Journal, 2002, pp.61-68
- [102] VOIGT R.C. et. al., "Welding Metallurgy of Gray and Ductile Cast Irons", AFS Trans., pp.133-146
- [103] BRANCO C.M. et. al., "Fatigue Performance of Tungsten Inert Gas(TIG) and Plasma welds in Thin Sections", Int. J. Fatigue Vol. 21, 1999, pp. 587-601
- [104] ANIK S., 1000 Soruda Kaynak, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1993

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Çorum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Çorum'da tamamladı. 1989 yılında girdiği ODTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümünden 1995 yılında mezun oldu. 1996 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde başladığı Yüksek Lisans çalışmalarını 1999 yılında tamamladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kaynak ABD'da başladığı doktora öğrenimini 2005 yılında bitirdi.

1996 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Mekanik Metalurji ABD'da Araştırma Görevlisi oldu. Halen bu görevini sürdürmektedir.

Evli ve bir çocuk babasıdır.