

Borlu eliklerin Ray Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Sürtünme ve Aşınma
zellikleri Açısından Araştırılması

Fatih Bozkurt

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2017



Investigation of Usage Possibilities of Boron Steels As a Rail Material in Terms of
Friction and Wear Properties

Fatih Bozkurt

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

August 2017

Borlu eliklerin Ray Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Sürtünme ve Aşınma
Özellikleri Açısından Araştırılması

Fatih Bozkurt

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca

Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı

Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ümit ER

Ağustos 2017

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Fatih Bozkurt'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Borlu Çeliklerin Ray Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Sürtünme ve Aşınma Özellikleri Açısından Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ümit Er

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümit Er

Üye : Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan

Üye : Doç. Dr. Özer Aydın

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Ümit ER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Borlu Çeliklerin Ray Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Sürtünme ve Aşınma Özellikleri Açısından Araştırılması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/08/2017

Fatih Bozkurt

İmza

ÖZET

Ray aşınmasının azaltılması ve teker – ray temasında sürtünme davranışının tahmin edilmesi günümüz raylı sistemler teknolojisinin en önemli konu başlıklarındandır. Ray aşınmasının temel çözümlerinden biri de, ray malzemesinin yapısını geliştirmektir.

Bu çalışma kapsamında, ülkemizde hızlı tren üstyapısında kullanılan ray malzemesine (R260), farklı karbon ve bor elementlerine sahip AISI 51B60H ve 30MnB5 kalitesindeki borlu çeliklerin alternatif olup olamayacağı sürtünme ve aşınma yönünden deneysel olarak incelenmiştir. Bir lokomotif tekerinden (ER9 sınıfı) elde edilen disk şeklindeki numuneler ile borlu çeliklerden ve rayın mantar kısmından çıkarılmış disk şeklindeki numuneler, aşındırma çifti oluşturacak şekilde test edilmiştir. Plint TE53 test cihazı kullanılarak, disk üzerinde disk kayma ve yuvarlanma hareketi simüle edilmiştir.

Ray numunesi ve iki farklı kalitedeki borlu çeliklere ait numuneler için mikro yapı incelemeleri yapılmış, sertlik ölçümleri alınmış, kuru ve ıslak koşullar altında spesifik aşınma oranları hesaplanmış, sürtünme katsayıları belirlenmiş ve aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Sertlik ölçümleri sonucunda ray, 51B60H borlu çelik, 30MnB5 borlu çelik ve ER9 sınıfı teker numunelerinin sertlik değerleri sırası ile 35 HRC, 61 HRC, 55 HRC ve 31,5 HRC olarak ölçülmüşlerdir. Aşınma testleri 1,5 GPa Hertzian temas basıncı altında, 200 dev/dak hızda ve %5,18 kayma oranında gerçekleştirilmiştir. Kuru şartlar altında hesaplanan spesifik aşınma oranlarına göre ray numunesi 51B60H borlu çelik numunesine göre 3,86 kat, 30MnB5 borlu çelik numunesine göre ise 3,67 kat daha fazla aşınmıştır. Islak şartlar altında ise borlu çelikler için kayda değer bir aşınma tespit edilememiştir. Genel olarak demiryolu hatlarındaki sürtünme katsayısı, kuru şartlar için 0,5 – 0,7 aralığında, ıslak şartlar için ise 0,2 – 0,3 aralığında değişmektedir. Teker numunesi karşısında test edilen tüm numunelerde, bu aralık değerleri hem kuru hem de ıslak şartlar altında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, ray aşınması, martenzitik ray, ray tribolojisi, borlu çelikler.

SUMMARY

Reducing the wear of rail and estimating the friction behavior of wheel – rail contact are the most important topics of today's railway system technology. One of the main solutions of the rail wear is improving the structure of rail material.

Within the scope of this study, AISI 51B60H and 30MnB5 boron steels with different carbon and boron content were investigated experimentally in terms of friction and wear, whether it could be alternative to rail material (R260) used in high speed railway superstructure in our country. Disc shaped samples made out of a locomotive wheel (class ER9) with disc shaped samples made out of boron steels and rail head were tested as wear couple. Using with Plint TE53 test equipment, twin disc rolling – sliding motion was simulated.

Microstructural examinations were studied, hardness measurements were evaluated, specific wear rates were calculated in dry and wet conditions, coefficients of friction were determined and worn surfaces were examined by scanning electron microscopy for rail sample and two different grades of boron steel samples.

As a result of the hardness measurements, the measured values of rail, 51B60H boron steel, 30MnB5 boron steel and ER9 class wheel samples were 35 HRC, 61HRC, 55 HRC and 31.5 HRC, respectively. Wear tests were performed under 1.5 GPa Hertzian contact pressure, 200 rpm and 5.18% slip ratio. According to the specific wear rates calculated under dry conditions, rail sample was worn 3.86 times higher than 51B60H boron steel sample and 3.67 times higher than 30MnB5 boron steel sample. Under wet conditions, no significant wear was determined for boron steels. Generally, the coefficient of friction in railway lines varies between 0.5 – 0.7 for dry conditions, 0.2 – 0.3 for wet conditions. Tested all samples mating with wheel sample, these range values were obtained at both dry and wet conditions.

Keywords: Wear, rail wear, martensitic rail, tribology of rail, boron steels.

TEŞEKKÜR

Çalıőmam sırasında bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ümit ER'e, deneysel çalıőmalarımnda yardımcı olan Arő. Gör. Fatih Hayati ÇAKIR'a, deney numunelerini temin etmede yardımcı olan Bursa Asil Çelik Fabrikası, Eskişehir Turan Tarım Makinaları ve TÜLOMSAŐ çalıőanlarına ve deney numunelerinin iőlenmesinde emeği olan babam Orhan BOZKURT'a teőekkürü borç bilirim.

Çalıőmalarım boyunca bana her türlü desteği gösteren eőime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. RAY VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Ray	3
2.1.1. Rayın işlevi	3
2.1.2. Ray tipleri	4
2.1.3. İdeal bir raydan beklenen özellikler	6
2.2. Ray Üretimi	7
2.2.1. Yüksek fırın	7
2.2.2. Çelik yapımı	8
2.2.3. Vakumda gaz giderme ve argon üfleme	10
2.2.4. Sürekli döküm	11
2.2.5. Haddeleme, doğrultma ve ölçüm	12
2.3. Rayın Mekanik Dayanımı	13
2.4. Tekerlek Profili	16
3. AŞINMA	21
3.1. Aşınmanın Unsurları	21
3.2. Aşınma Mekanizmaları	23
3.2.1. Adhezif aşınma	24
3.2.2. Abrazif aşınma	25
3.2.3. Yorulma aşınması	27
3.2.4. Korozyon aşınma	28
3.3. Aşınma Testleri ve Metotları	29

İÇİNDEKİLER (devam)

4. BORLU ÇELİKLER.....	32
4.1. Borun Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Kullanılması	33
4.2. Borlu Çeliklerin Endüstriyel Kullanım Alanları.....	35
5. TEKER – RAY ETKİLEŞİMİ	40
6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	49
7. MATERYAL VE YÖNTEM	61
7.1. Deneysel Malzemeler	61
7.2. Aşınma Deneyleri ve Koşulları.....	64
7.3. Sertlik Ölçümleri.....	67
7.4. Mikro Yapı İncelemeleri.....	67
7.5. Aşınma Oranlarının Hesaplanması	68
7.6. SEM İncelemeleri	69
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
8.1. Mikro Yapı Sonuçları	70
8.2. Sertlik Deneyi Sonuçları	71
8.3. Sürtünme Eğrileri ve Sürtünme Katsayı Değerleri	72
8.4. Aşınma Profilleri ve Spesifik Aşınma Oranlarının Hesaplanması	74
8.5. SEM Sonuçları	80
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Demiryolu üstyapı kesiti.....	3
2.2 Çift mantarlı ray	4
2.3 “Bull headed” ray	5
2.4 Vinyol tipi ray.....	5
2.5 Oluklu ray tipi örneği	6
2.6 Thyssen firmasında ray üretim aşamaları, 1) Yüksek fırın, 2) Eriyik metalden kükürt giderme aşaması, 3) Bazik oksijen çelik üretimi, 4) Gaz giderme aşaması, 5) Sürekli döküm kısmı, 6) Yürür kirişli tekrar ısıtma fırını, 7) Hazırlama haddesi, 8) Son işlem standı	7
2.7 Yüksek fırının şematik gösterimi	8
2.8 Bazik oksijen fırını	9
2.9 Dönüştürücünün potaya eriyik metali aktarma anı.....	10
2.10 Vakumda gaz giderme ünitesinin şematik görüntüsü (Thyssen), 1) Alaşımlandırma kısmı, 2) Hücresel alaşımlandırma birimi, 3) Süpürme gazı, 4) Emiş hattı, 5) Vakum üretici, 6) Üç parçalı vakum tankı, 7) Çıkış hattı, 8) Gözenek tapalı pota	10
2.11 Sürekli döküm hattı 1) Pota boşaltma, 2) Pota oturgacı, 3) Tundish tankı, 4) Kalıp, 5) Elektromanyetik karıştırıcı, 6) İkincil soğutucu bölgesi, 7) Düzleştirici ünitesi, 8) Alevli kesici, 9) Markalama makinası.....	11
2.12 Thyssen tarafından tasarlanmış ray haddesi	13
2.13 Perlitik bir ray çeliğinin SEM altındaki görüntüsü.....	14
2.14 Teker profili.....	16
2.15 Bir teker profilinin ve tekerlek setinin değerleri ve tanımları	18
2.16 Ray açıklığının gösterimi ve traverse gömülü rayın eğimi	19
2.17 UIC-ORE (S1002) teker profili ve UIC-60 rayın iki farklı ray eğimi altında oluşan temas noktalar a) 1:20 eğim, b) 1:40 eğim	20
3.1 Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi	21
3.2 Sürtünme ve aşınmayı kontrol eden dinamik tribofiziksel ve tribokimyasal temas prosesindeki girdi parametreleri	22
3.3 a) Yüzey şekli yüzey topografisi olarak adlandırılmıştır, b) yüzey profili, c) temas halindeki iki yüzeyin gerçek temas alanı.....	23

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.4 Temel aşınma mekanizmaları a) Adhezif, b) Abrazif, c) Yorulma ve d) Korozyon	23
3.5 Adhezif aşınma mekanizması sonucu aşınma parçacığının oluşumu.....	24
3.6 Abrazif aşınma mekanizmasının üç çeşidi olan a) Kesme (cutting), b) Takozlama (wedging) ve c) Pulluklama (ploughing) aşınmalarının SEM görüntüleri	25
3.7 Abrazif aşınma tipleri a) İki elemanlı ve b) Üç elemanlı	27
3.8 Yüzey çatlak başlangıcı ve ilerlemesi işleminin şematik gösterimi	28
3.9 Gerçeklik durumuna göre aşınma testlerinin sınıflandırılması	29
4.1 Sertleştirilmeyi geliştirmek için gerekli olan elementlerin mali açıdan kıyaslanması	34
4.2 Fe – B sisteminin denge diyagramı (FeB ₂ bileşimi gösterilmemiştir).....	34
4.3 HF çeliğinde dönüşümler, 1) Başlangıç, oda sıcaklığında ve ham metal olarak bulunan çelik, 2) Şekil vermenin tamamlandığı sıcaklığın artırıldığı bölge, 3) Nihai dayanımın ve uzamanın erişildiği hızlı soğutmanın yapıldığı bölge.....	37
4.4 Destek çubukları, köşe takviyeleri ve levhalar	38
5.1 Teker – ray teması	40
5.2 Temas şekilleri a) Nokta teması, b) Alan teması, c) Gerçek temas.....	42
5.3 Hertzian temasının genel gösterimi	43
5.4 Hertzian temasının teker – ray için gösterimi.....	43
5.5 Kılavuzluk eden tekerlek setinin sağ kurplu yola girişi	47
5.6 Teker – ray temas noktaları	47
5.7 İki yıllık süreç boyunca teker ve ray profilinin değişimi.....	48
5.8 Ray sertliğine bağlı olarak teker – ray aşınması.....	48
7.1 Hızlı tren üstyapısında kullanılan raydan numunelerin çıkarıldığı kısım.....	61
7.2 Ray ve borlu çelik malzemelerinden hazırlanmış deney numunesi boyutları	61
7.3 Teker numunelerinin tekerden çıkarıldığı kısım	62
7.4 Teker malzemesinden hazırlanmış deney numunesi boyutları	62
7.5 Plint TE 53 aşınma cihazı ve teker – ray numune aşınma çiftinin cihaza bağlanmış görüntüsü	64
7.6 HertzWin yazılımına ait ara yüzün ekran görüntüsü	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.7 Teker – ray numunelerinin dönüş yönü.....	66
7.8 Plint TE53 cihazına ait hazne	67
7.9 a) Struers Discotom 50 kesme cihazı, b) Struers CitoPress-1 kalıplama cihazı c) Struers Tegraforce 4500 zımparalama ve parlatma cihazı, d) Nikol Eclipse L150 görüntü analiz sistemi.....	68
7.10 Mitutoyo SJ-400 profil ölçüm cihazı.....	69
8.1 Standart ray ve iki farklı kalitedeki borlu çeliğin mikro yapı görüntüleri a) Ray çeliği 200x ve 1000x, b) 51B60H borlu çelik 200x ve 1000x c) 30MnB5 borlu çelik 200x ve 1000x	70
8.2 Deney numunelerinin ortalama sertlik değerleri	71
8.3 Teker numunesine karşılık standart ray, 51B60H çeliği ve 5630 çeliğinin kuru şartlar altında sürtünme katsayısının tur sayısına karşı değişim grafiği	72
8.4 Teker numunesine karşılık standart ray, 51B60H çeliği ve 5630 çeliğinin ıslak şartlar altında sürtünme katsayısının tur sayısına karşı değişim grafiği	73
8.5 Aşınma deneyi öncesi standart ray numunesinin yüzey profili.....	75
8.6 Aşınma deneyi sonrası standart ray numunesinin yüzey profili.....	75
8.7 Kuru şartlar altında a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numunelerinin aşınma alanları.....	76
8.8 Islak şartlar altında standart ray çeliği numunesinin aşınma alanları.....	76
8.9 Kuru şartlar altında teker numunesinin a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları.....	78
8.10 Islak şartlar altında teker numunesinin a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları.....	79
8.11 Kuru şartlar altında aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri a) Standart ray numunesi, b) 51B60H borlu çelik numunesi, c) 30MnB5 borlu çelik numunesi.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1 Rayların mekanik özellikleri	16
3.1 Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları	30
5.1 Hertz katsayıları.....	45
5.2 22,5 Ton aks yüküne kadar ve yıllık en az 20 MGT'luk yük taşıyan demiryolları için farklı ülkelerin ray kalitesi seçim tablosu.....	46
7.1 R260 kalite ray malzemesinin kimyasal kompozisyonu	63
7.2 51B60H kalite borlu çeliğinin kimyasal kompozisyonu	63
7.3 30MnB5 kalite borlu çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	63
7.4 ER9 sınıfı alaşımsız çelik tekerleğin kimyasal kompozisyonu	63
8.1 Deney numunelerinin sertlik değerleri	71
8.2 Kuru ve ıslak şartlar altında standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numunelerinin teker numunesi karşısında aşınma alanları ve spesifik aşınma oranları	77
8.3 Kuru ve ıslak şartlar altında teker numunesinin standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları ve spesifik aşınma oranları.....	79

1. GİRİŞ VE AMAÇ

İlk raylı sistemler 17. YY ve 18. YY' larda taş ve maden ocaklarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemde atlar kullanılarak vagonlar çekilmekteydi. Alt yapı olarak zeminde yassı taşlar ve tomruklar kullanılmıştır. Artan talep ile birlikte ağırlıkların da artması ile bu sistem yetersiz kalmaya başlamıştır. Endüstriyel devrim ile birlikte, zeminde bulunan tomrukların aşınmasını azaltmak amacı ile dökme demir veya demir levhalar tekerleklerin gelecekleri yerlere yerleştirilmiştir. Daha sonra bu yapı demir kenarlı raylara dönüştürülmüştür. Tekerleklerle de ray üzerinde kalmasını sağlayacak çıkıntılar eklenmiştir.

19. YY başlarında, buharlı lokomotif kullanılmaya başlandığında, kısa kısa dövme demirden yapılmış raylar yerine, geniş tabanlı uzun ve tek parça şeklinde çelik raylar geliştirilmiştir. Bu tip raylar sayesinde altlarındaki uzunlamasına tomrukların yardımı olmadan ağır dingil yükünü taşıyabilecek duruma getirilmiştir. Bu sayede raylar sadece raylı sistem aracının gideceği yolu belirlenmesini değil, aynı zamanda altındaki destek yapısının yardımı ile lokomotif veya vagonun geçişi sırasında oluşacak yük ve kuvvetleri güvenli bir şekilde zemine aktarma görevini üstlenmiştir.

İlk demiryolu hatları 1830 yıllarında pek çok Avrupa kentinde işlemeye başlamıştır ve birçok demiryolu kurumu 20. YY başında maksimum kapasitede çalışmıştır. Demiryolu bu kadar kısa sürede gelişmesinin en önemli sebebi hızlı ulaşımdır. 1835'de İngiltere'de 100 km/sa, 1890'da Fransa'da 144 km/sa, 1903'de Almanya'da 213 km/sa hıza ulaşılmıştır. Maksimum işletme hızları çok daha az olmasına rağmen (test hızının 1/2'si veya 2/3'ü), demiryolu ulaşımının hızlı gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bu gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan her sorun zaman içerisinde detaylı olarak incelenmiş, her bir soruna alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bir üst yapı elemanı olan rayda ise temel sorun her zaman aşınma konusu olmuştur. Taşıdığı ekstrem yük ve yüksek hızlar, gelişmekte olan raylı sistemin her zaman var olan bir sorunudur. Aşınma konusunda çözümler üretilmeye ilk önce rayın şeklini değiştirmek ile başlanmış, daha sonra kimyasal içeriği değiştirilmeye çalışılmış ve malzeme teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak değişik sertleştirme yöntemleri uygulanarak hem rayın hem de raya temas eden tekerleğin daha uzun ömürlü olması sağlanmıştır (Erkaya, 2013).

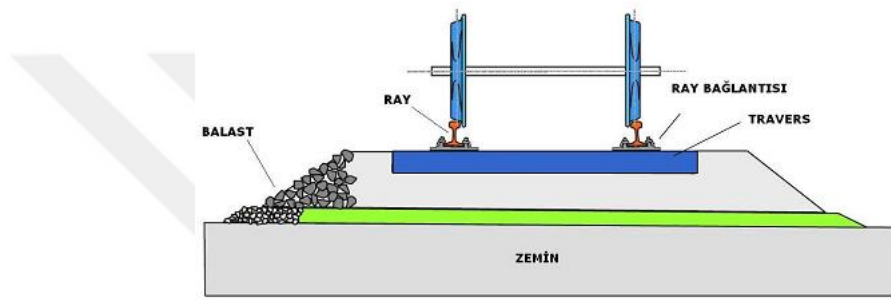
Özel bir konuma sahip olan raylı sistemler teknolojisi ülkemiz açısından geç kalınmış olsa da son yıllarda önem vermeye başlanmıştır. Tramvaydan yüksek hızlı hatlara kadar birçok proje hazırlanmakta ve hayata geçirilmektedir. Bir raylı sistem aracının güvenli ve konforlu bir şekilde ulaşım sağlayabilmesi açısından teker ve ray temasının önemi büyüktür. Katı teması olan her yerde aşınmanın da var olacağı kaçınılmaz bir problemdir. Ray aşınmasını önlemek amacı ile, hattın uygun kısımlarına yağlama yapılmakta, ray yüzeyine aşınmaya dirençli işlemler uygulanmakta ve ray metalürjisi geliştirilmektedir. Bunun haricinde işletilen her demiryolu hattında rayın periyodik aşınma kontrolü yapılmaktadır. Herhangi bir yağlama sistemi kullanılmayan 12 MGT'lik bir demiryolu hattının kilometre başına ray bakım masrafı 54 Amerikan doları olup, 30 km'lik bir yol için yaklaşık yıllık 1,5 milyon dolar gibi bir bakım maliyeti ortaya çıkmaktadır (Santa vd., 2016). Bundan dolayı uzun süreler hizmet vermesi beklenen rayın aşınma problemi hem akademik hem de pratik kullanım açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'de yüksek hızlı tren hattında kullanılan raylara alternatif olarak farklı kalitedeki borlu çeliklerin ray malzemesi olarak kullanılması durumunda, elde edilen aşınma sonuçları karşılaştırılmış ve geleneksel ray malzemesine alternatif olup olmayacağı araştırılmıştır. İkinci bölümden itibaren ray hakkında genel bilgiler verilmiş, üretim aşamalarından bahsedilip önemli olduğu düşünülen mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde aşınma ve aşınma tipleri özetlenmiştir. Dördüncü bölümde Türkiye'nin önemli derecede rezerv sahibi olduğu bor madeni ve borlu çelikler konusuna değinilmiştir. Beşinci bölümde ray – teker teması üzerinde durulmuş, kullanılan temas modelleri hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde genellikle teker ve ray malzemesi kullanılarak, aşınma üzerine yapılmış akademik çalışmalar özetlenmiştir. Yedinci ve sekizinci bölümde yapılmış deneysel çalışmalar anlatılmış ve sonuçlarından bahsedilmiştir. Son bölümde ise genel sonuçlar özetlenmiş, gelecek çalışmalar için bir yol haritası belirlenmiştir.

2. RAY VE ÖZELLİKLERİ

Bir demiryolu hattı iki farklı kısma ayrılır.

- Üstyapının elemanları raylar, traversler, balast ve betonarme plaktan oluşmaktadır. Tren yüklerini altyapıya emniyetle aktarır ve yayarak azaltırlar. Üst yapı, periyodik bakım ve yenilenmenin gerçekleştiği kısımdır. Şekil 2.1’de bir üst yapının kesiti gösterilmiştir (Özden, 2011).



Şekil 2.1. Demiryolu üstyapı kesiti (Özden, 2011)

- Altyapı elemanları ise zemin ve formasyon tabakasından meydana gelmektedir. Tren yükleri yeteri kadar azalarak altyapıya ulaştığı ve periyodik bakımın yapılmadığı kısımdır.

2.1. Ray

Raylar, iki paralel hat boyunca alt yapı üstünde bulunan trenin hareketi esnasında değişmeyen, sürekli ve düz bir yüzey boyunca hareket etmesini sağlayan üst yapı elemanıdır. Gerilmelere dayanabilmesi için yüksek karbonlu çeliklerden imal edilmektedirler. Standart bir rayın kısımları, özellikleri ve çeşitleri bu bölüm altında özetlenmiştir.

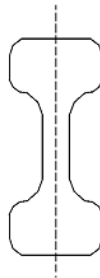
2.1.1. Rayın işlevi

Raylar çelik kirişlere çok benzemektedir. Bir demiryolu hattında aşağıda sıralanmış işlevlerin yerine getirilmesi istenir:

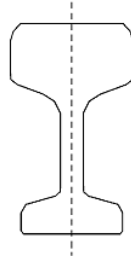
- Raylar, çeken ve çekilen araçların sürekli ve düz bir yüzey üzerinde hareketini sağlamalı
- Yol boyunca pürüzsüz bir yüzey ve düşük sürtünme değerlerine sahip olmalıdır. Bir çelik teker ile çelik ray arasındaki sürtünme, bir kauçuk teker ile asfalt yol arasındaki sürtünmenin yaklaşık beşte biridir.
- Tekerler için yanal kılavuzlama görevi yapmalıdır.
- Çeken ve çekilen araçların oluşturduğu yüklerin aks ve tekerler aracılığı ile dikey olarak iletilmesi sonucunda oluşan gerilmelere ve aynı zamanda frenleme esnasında oluşan termal gerilmelere de dayanmalıdır.
- Büyük bir alandan oluşmuş travers ve balastlara yükün dağıtılması görevini yerine getirmelidir (Chandra ve Agarwal, 2007).

2.1.2. Ray tipleri

İlk kullanılan raylar çift mantarlı olup kesit görüntüsü olarak Şekil 2.2’de gösterilen “T” profile veya “dambıl” şekline benzemektedir. Bu tasarım yapılırken düşünce, servis boyunca aşınan yüzeyin ters çevrilerek tekrar kullanılması amaçlanmıştır. Fakat deneyimler göstermiştir ki, yüzeyle temas eden rayın diğer yüzü uzun süreler maruz kalınan yüksek ve sürekli yükler yüzünden yıpranmış ve tekrar kullanılamayacak bir yüzeye sahip olmuştur. Bu durum “bull headed” denen, hemen hemen aynı kesit şekline sahip, aşınmalara dayanımlı olması amacı ile mantar kısmında daha kalın ve fazla metal bulunduran Şekil 2.3’de gösterilen ray tipinin geliştirilmesine neden olmuştur. Fakat bu tip rayında traverse sabitlenmesi esnasında problemler çıkması sebebi ile bu tasarımdan da vazgeçilmiştir (Chandra ve Agarwal, 2007).

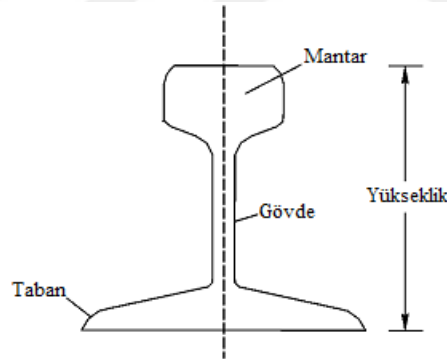


Şekil 2.2 Çift mantarlı ray (Chandra ve Agarwal, 2007)



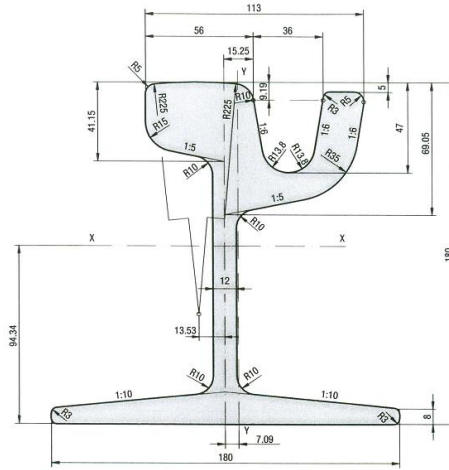
Şekil 2.3 “Bull headed” ray (Chandra ve Agarwal, 2007)

Patenli raylara aynı zamanda “Vinyol” (İngiliz demiryolu mühendisi Charles Blacker Vignoles tarafından geliştirildiği için “Vignoles rail” diye adlandırılmaktadır) tipi ray da denilmektedir, geniş ve düz bir tabana sahip olup, kesit görüntüsü olarak ters çevrilmiş T şekline sahiptir (Şekil 2.4). Bu geliştirilen ray tipi sayesinde bağlantı elemanları ile traverslere kolay bir şekilde montajı gerçekleştirilmektedir. Düz tabanlı Vinyol tipi rayın diğer avantajları da, kesit alanına kıyasla “Bull headed” ray tipine göre, daha yüksek dayanıma, aksel stabilizeye sahip olması ve ekonomik olmasıdır. Bu tarz raylar belirli bir standardizasyon ile ölçüleri belirlenmiştir (Chandra ve Agarwal, 2007).



Şekil 2.4 Vinyol tipi ray (Chandra ve Agarwal, 2007)

Yukarıda anlatılan ray tipleri haricinde bir de oluklu ray bulunmaktadır. Genel olarak tramvay hatlarında kullanılmaktadır. Ayrıca kara yolu ile demir yolunun aynı seviyede kesiştiği hemzemin geçitlerde kullanılmaktadır. Bu tip rayların kullanımında dikkat edilmesi gereken husus, boden yataklarının çeşitli malzemelerle dolması nedeni ile yolun sürekli bakım ve temizliğe ihtiyaç duymasındır. Eğer dikkat edilmezse demiryolu araçlarının raydan çıkmasına (deray) sebep olabilir. Şekil 2.5’de oluklu raya ait bir teknik resim gösterilmiştir (Özden, 2011).



Şekil 2.5 Oluklu ray tipi örneği (Özden, 2011)

2.1.3. İdeal bir raydan beklenen özellikler

İdeal bir ray kesit tipinin aşağıda sıralanmış özellikleri karşılanması beklenmektedir:

- Ray ekonomik olmasının yanı sıra tutarlı bir dayanım, rijitlik ve kalıcılığa sahip olmalıdır.
- Ray kesitinin ağırlık merkezi ray yüksekliğinin hemen hemen ortasında olmalı ki maksimum çekme ve basma gerilmeleri birbirlerine eşit olması sağlanır.
- Bir ray temel olarak mantar, gövde ve taban kısımlarını içermektedir ve bu kısımlar arasında metal dağılımı düzgün bir şekilde yapılmalı ki her birisi yerine getirmesi gereken fonksiyonu sağlasın.

Ray kısımlarında gereksinimler ve göz önünde bulundurulması gereken özellikler ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

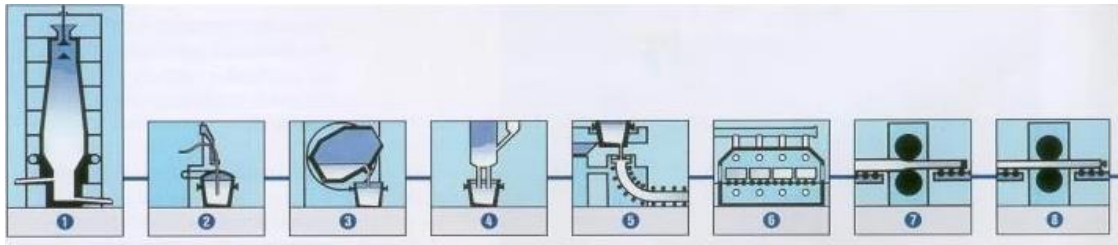
- Mantar; düşey aşınma için ray mantarının yeterli düzeyde derinliğe sahip olması gerekmektedir. Ray mantarı yeterli derecede geniş olmalı ki bu sayede sadece geniş bir yuvarlanma yüzeyi sağlanmış olmaz aynı zamanda rayın yeterli derecede aksel rijitliği de sahip olur.
- Gövde; yüklerden dolayı oluşan gerilmelere karşı koyacak şekilde kalın olmalı ve ayrıca korozyon direncine de sahip olmalıdır.
- Taban; korozyondan kaynaklanan izin verilen kayıptan sonra dikey ve yatay kuvvetlere direnç gösterebilecek kadar yeterli bir kalınlığa sahip olmalıdır. Devrilmeye karşı taban kısmı yeterli düzeyde stabiliteye sahip olmalıdır. Taban dizaynı ekonomik açıdan uygun olmalı ve verimli bir şekilde haddelenmelidir.

- Ray yüksekliği; yükseklik, yeterli rijitliği ve dayanımı verecek uzunlukta olmalıdır (Chandra ve Agarwal, 2007).

2.2. Ray Üretimi

Modern ray üretim teknolojisi Avrupa Komitesi'nin belirlediği EN 13764 standardı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Bazı üretim teknikleri rayın iyi bir servis süresi sağlaması için tanımlanmıştır. Çelik bazik oksijen prosesi ile ya da elektrik ark ocağında ergitilerek hazırlanmaktadır, fakat ikinci yöntem Avrupa'da şu an için kullanılmayan bir yöntemdir. Ingot döküm için müsaade edilmemektedir. Vakumda gaz giderme, metalik olmayan kalıntıların sebep olduğu ray kırılmalarını önlemek amacı ile zorunludur. Üreticiler sürekli ürün kalitesini sağlamak ve teslimat sürecine kadar gerekli tüm prosedürleri yerine getirme amacı ile bir kalite yönetim sistemi uygulamalıdır.

Ray üretim süreci Şekil 2.6'da gösterildiği üzere şu temel işlemlerden oluşmaktadır; yüksek fırın, çelik yapımı, sürekli döküm, haddeleme, doğrultma, ölçüm (ultrasonik, geometrik) ve ürün kabulü şeklindedir (Esveld, 2001).

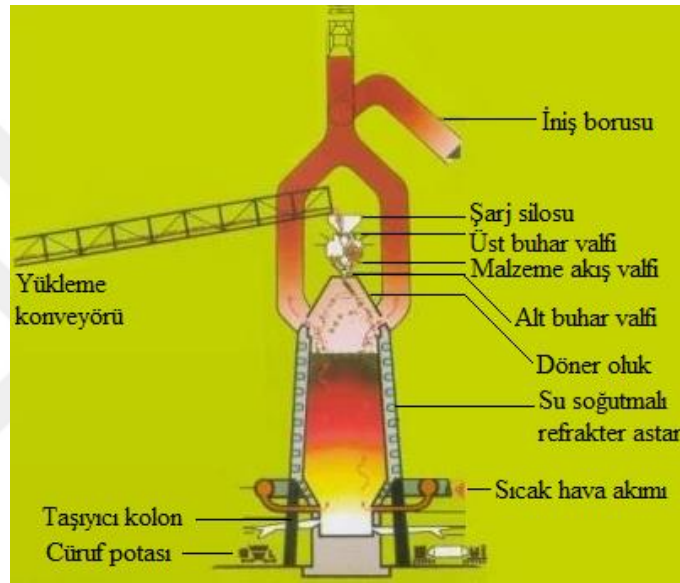


Şekil 2.6 Thyssen firmasında ray üretim aşamaları, 1) Yüksek fırın, 2) Eriyik metalden kükürt giderme aşaması, 3) Bazik oksijen çelik üretimi, 4) Gaz giderme aşaması, 5) Sürekli döküm kısmı, 6) Yürür kirişli tekrar ısıtma fırını, 7) Hazırlama haddesi, 8) Son işlem standı (Esveld, 2001)

2.2.1 Yüksek fırın

Yüksek fırın aşamasında, çelik hazırlanırken diğer alaşım elementleri dikkatli bir şekilde ölçülmelidir. Demir, demir oksit olarak adlandırılan madenlerden çıkarılmaktadır. Cevher sınıflandırılır ve parçalanır daha sonra küçültülmüş olan cevher kok ve kireç taşının karıştırıldığı sinterleme ünitesine alınır ve sinter olarak bilinen demir açısından zengin cüruf

oluşturmak üzere ısıtılır. Bu sinter, fırının üst kısmına daha fazla cevher, kok ve kireç taşı kontrollü ölçüde beslenir ve tamamı yakılır. Büyük miktarda ısı üretilir ve ısıtılmış basınçlı hava karışıma üflenir. Bu işlem sayesinde demir cevheri indirgenmiş olur. Fırın içerisinde bulunan sinter parçaları ve cevher eriyerek yaklaşık 1500°C’de fırının dibinde toplanılması sağlanır. Kireçtaşı demir cevheri içerisindeki kalıntılar ile birleşerek, sıvı halde bulunan cüruf oluşur ve metalden daha hafif olduğu için metalin üzerinde yüzmektedir. Şekil 2.7’de yüksek fırının kısımları gösterilmiştir (Esveld, 2001).



Şekil 2.7 Yüksek fırının şematik gösterimi (Esveld, 2001)

Yüksek fırın işlemi sürekli bir işlemdir. Erimiş metal üzerinde cüruf oluştuğunda periyodik olarak temizlenmelidir. Aynı şekilde, eriyen metalde cürufun altından sürekli alınarak çelik üretimine gitmektedir. Bu sırada, ham maddeler, sinter, cevher ve kireç taşı yüksek fırının üst kısmından sürekli olarak beslenmekte ve alt kısımdan da sıcak hava ile eritilmektedir. Bu işlem sürekli olarak, genel olarak dört yıl veya daha fazla, yüksek fırının ısıya dayanıklı tuğla astarlarının kullanılmayacak hale gelmesine kadar devam etmektedir (Esveld, 2001).

2.2.2. Çelik yapımı

Bazik oksijen fırın işlemi çelik yapımında temel üretim yöntemi olmuştur. Modern tesislerde 150 – 300 ton aralığındaki veya daha fazlası bir şarj 40 dakika içinde çeliğe

dönüşmektedir (Şekil 2.8). Eriyik metal kullanımı bazik oksijen işleminde kullanılan ana malzemedir. İlk olarak eriyik metal kükürt giderme işlemine tabi tutulur. Fırın hafifçe yana doğru yatırılır, ilk parti hurda demir ile eriyik demir buluşur daha sonra tekrar dik duruma getirilir. Şarjın yaklaşık %70'i eriyik metal ve %30'u da hurda demirdir. Su soğutmalı oksijen üfleme borusu fırın içerisine yüksek saflıkta kuru oksijeni yüksek hızlarda üfleme başlar. Oksijen, karbon ve diğer istenmeyen elementler ile birleşir ve bu şekilde eriyik şarj içerisindeki kalıntıları elemiş olur. Karbon oranı %0,1'e ininceye kadar üfleme işlemine devam edilir. Üfleme esnasında okside olmuş kalıntıların eriyik üzerine çıkmasını sağlayıp, kolayca uzaklaştırmak üzere kireçtaşı eklenmektedir (Esveld, 2001).



Şekil 2.8 Bazik oksijen fırını (Esveld, 2001)

Üfleme borusunun pozisyonu, oksijen hacminin miktarına göre ayarlanmakta, gazın beslenmesi ve gerekli adımların yapılması için tamamı otomatik ve bilgisayar kontrollü bir işlemdir. Tüm eriyik çelik potaya alındığı zaman, dönüştürücü ters dönerek kalan artık cüruflar da cüruf potasına alınmaktadır.

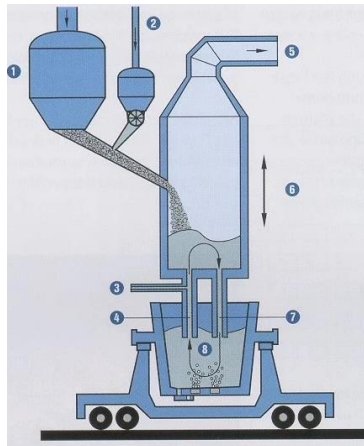
Pota içerisinde eriyik metal karbürlenir ve alaşımlandırılır. Kimyasal kompozisyonu ayarlanan eriyik metalin, sıcaklığı ayarlanır ve kalıntıların çökmesi gerçekleştirilir. Şekil 2.9 eriyik metalin potaya alınma anını göstermektedir (Esveld, 2001).



Şekil 2.9 Dönüştürücünün potaya eriyik metali aktarma anı (Esveld, 2001)

2.2.3. Vakumda gaz giderme ve argon üflenmesi

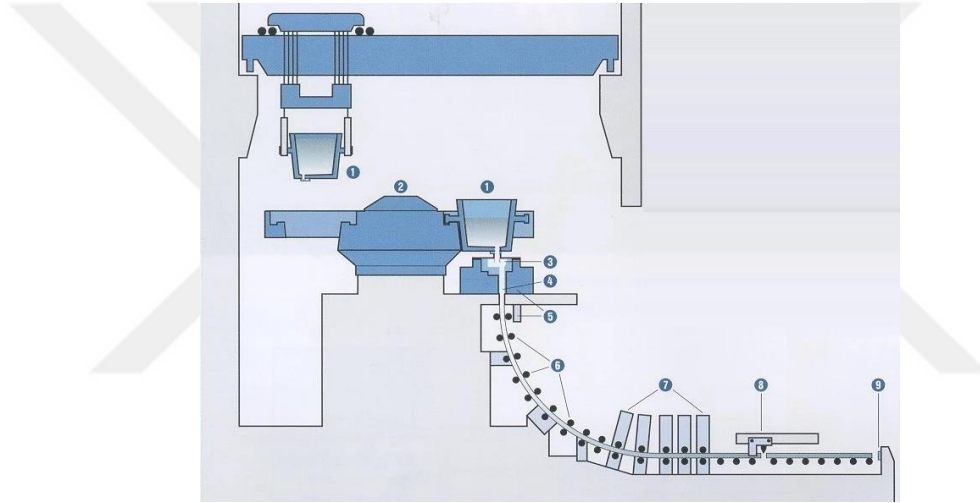
Modern bir çelik yapım sürecinde birçok adım çeliğin kalitesini artırmak amacı ile uygulanmaktadır. Argon üfleme ünitesi kimyasal kompozisyonu ve sıcaklığı homojenize etmek amacı ile kullanılır. Gaz giderme ünitesi Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, hidrojen içeriğini 2 ppm seviyelerine düşürmek ve çeliğin oksit açısından temizlenmesini sağlamaktadır. Eriyik çelikte 2 ppm'den daha düşük seviyelerdeki hidrojen içeriğinde pullanmasını önlemek amacı ile özel bir soğutma önlemi gerekmemektedir. Bu pullanma veya tabakalanmalar yüksek yüklerde yorulma çatlaklarının başlamasına ve ilerlemesine neden olmaktadır (Esveld, 2001).



Şekil 2.10 Vakumda gaz giderme ünitesinin şematik görüntüsü (Thyssen), 1) Alaşımlandırma kısmı, 2) Hücresel alaşımlandırma birimi, 3) Süpürme gazı, 4) Emiş hattı, 5) Vakum üretici, 6) Üç parçalı vakum tankı, 7) Çıkış hattı, 8) Gözenek tapalı pota (Esveld, 2001).

2.2.4. Sürekli döküm

Sürekli dökümün prensibi, şu anda çelik üreticisinin kullandığı üretim yöntem, Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Pota içerisinde bulunan 150 – 350 ton eriyik metal kuleye yerleştirilir. Bu kulede iki adet pota dağıtımı kolaylaştırmak amacı ile konumlandırılmıştır. Eriyik metal potadan tundishe aktarıldığı zaman diğer pota hazırda bekletilmektedir. Bu şekilde işlem süreklilik arz eder. Eriyik çelik potadan tundishe dökülürken gömme döküm tekniği kullanılır. Altıdan sekize tüm kalıplara aynı miktarda metal akmasını sağlayan hassas ölçülü döküm ağızlıkları kullanılır (Esveld, 2001).



Şekil 2.11 Sürekli döküm hattı 1) Pota boşaltma, 2) Pota oturgacı, 3) Tundish tankı, 4) Kalıp, 5) Elektromanyetik karıştırıcı, 6) İkincil soğutucu bölgesi, 7) Düzleştirici ünitesi, 8) Alevli kesici, 9) Markalama makinası (Esveld, 2001)

Tüm çelik malzeme atmosferden etkilenip oksidasyondan korunması amacı ile, pota ile tundishe arasına ve tundishe ile kalıp arasına refrakter koruma uygulanır. Çift duvarlı kalıplar su soğutmalıdır. Döküm yolu şekillendirilmiştir ve farklı kesit şekillerinde olabilmektedir. Kalıbın köşeleri oluşabilecek çatlakları önlemek amacı ile yuvarlatılmıştır.

Sıvı çeliğin çok yüksek sıcaklığa sahip olması, döküm kütüğünü metalürjik kalitesi açısından büyük ölçüde etkiler. Bundan dolayı tundishe içerisindeki çeliğin sıcaklığı, sıvı haldeki sıcaklığının 15 °C üzerinde tutulur.

Döküm işlemi boyunca çeliğin bakır kalıba yapışmasını önleme amacı ile döküm hızı ve salınma göre kalıp 60 – 200 dev/dak hızında hareket eder. Döküm hızı yaklaşık olarak 0,8 m/dak değerlerindedir. Yapının katılaşmasını geliştirmek amacı ile döküm yolu elektromanyetik sargılar ile donatılmıştır.

Haddeden çıkan sıcak kütükler 10 – 13 m'lik bir yarıçapla dönerek doğrultma tezgahlarına ikinci soğutmayı sağlayan spreycemberinden geçerek gider. Alev ile istenen uzunlukta kesilen kütükler yürüyen bantlar ile yeniden ısınmak üzere ısıtma ünitesine yollanırlar. Döküm işleminin başında hidrojen artışı gerçekleşebilir. Eğer kritik bir hidrojen değerine ulaşırsa, bu kütükler hidrojen miktarını kontrol altında tutmak amacı ile soğutulurlar.

Sürekli döküm ile elde edilen çeliğin ingot döküme göre daha temiz çelik yapısına ayrıca küçük ve daha düzgün dağılmış kalıntılara sahip olması gibi avantajı vardır (Esveld, 2001).

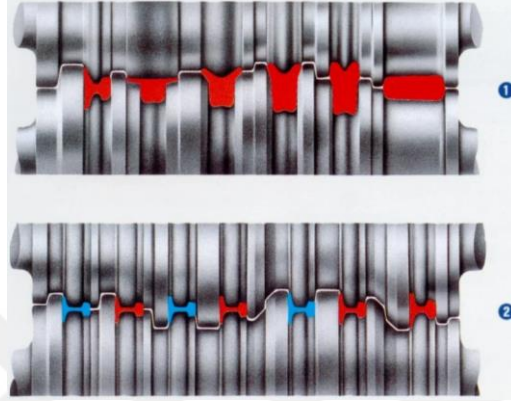
2.2.5. Haddeme, doğrultma ve ölçüm

Kütükler kontrol edilir ve nihai ürünün yüksek derecede yüzey kalitesine sahip olduğu sağlanması amacı ile bozukluklardan arındırılır. Kütükler ray kısımlarına haddelenmeden önce özel tasarlanmış fırınlarda 1250 °C sıcaklığa kadar ısıtılır. Kütükler fırından çıktıktan sonra fırın içerisinde oluşmuş tufalleri temizlemek amacı ile 200 bar basınçta su uygulanır. Bu haddelerin ve haddelenmiş yüzeylerin zarar görmesini engeller (Esveld, 2001).

Kütükler ray formunu veren haddeye girmeden önce ilk şekilleri verilmek üzere ön haddeden geçmektedir. Ray nihai şeklini alıncaya dek 8 – 11 defa haddeden geçer.

Şekil 2.12'de Bartscherer ray profil haddesinin şekli verilmiştir. İlk olarak kütük yüzeyine dik olan iki bıçak geçer ve ilk çıkıntı oluşturulur. Oluşan ilk çıkıntıları yatay olarak yeniden düzeltme ray tabanının dinamik eğilme gerilimi altındaki davranışını düzenler. Ürünün son olarak yüzeyi temizlenir ve düz bir yüzey elde edilir. Son haddeden geçerken ray üzerine markalama yapılır. Son şeklini alan raylar sıcak kesme ile istenilen boyda

kesilirler. En fazla 125 m'ye kadar ray üretimi mümkündür. Sıcak raylar yürüyen bantlar üzerinde soğumaya götürülürler. Soğuma işlemi yaklaşık 3 – 4 saat sürmektedir ve sıcaklık yaklaşık 800°C'den 60°C'e kadar düşmektedir. Rayın yürüyen bantlarla taşınması ray üzerinde yüzey kusurlarının oluşmasını önlemektedir. Soğumanın ardından raylar doğrultma ünitesine giderler (Esveld, 2001).



Şekil 2.12 Thyssen tarafından tasarlanmış ray haddesi (Esveld, 2001)

Sonradan uygulanan düzeltme işlemi her ne kadar düzgünlük sağlasa da rayda zararlı gerilmelere yol açar. Rayın akma gerilmesine bağlı olarak 100 – 300 N/mm² düzeyinde kalıcı gerilmeler meydana gelir.

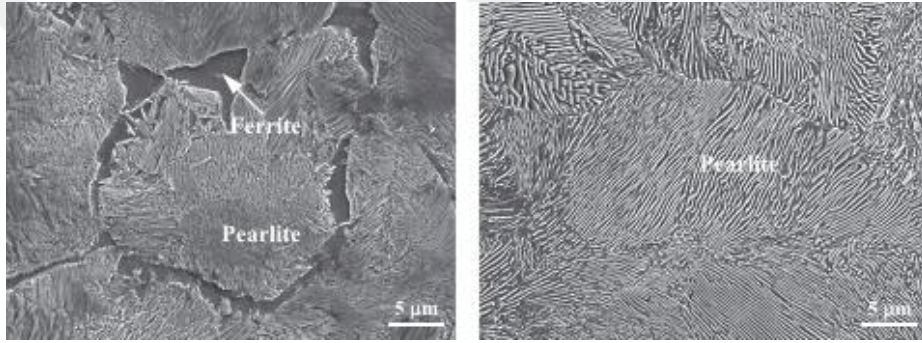
Bütün raylar doğrultma haddesinden çıkınca test merkezine giderler. Burada rayın tüm özellikleri test edilir ve varsa içsel hatalar, yüzey hataları ve boyut hataları tespit edilir. İçsel hatalar ultrasonik yöntemle belirlenir. Üretim sonunda raylar istenilen boyutlarda kesilirler, gerekli ise cebire delikleri delinir. Raylar tekrar teste tabi tutulur ve fabrikadan çıkar (Esveld, 2001).

2.3. Rayın Mekanik Dayanımı

Gelişen teknoloji ile beraber demiryolu araçlarının hızları ve dingil yüklerinin artması, ray çeliğinin de kalitesini artırma gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Demiryolunun ilk zamanlarında 1882'de ray malzemesinin çekme dayanımı 50 kg/mm² iken günümüzde bu değer yaklaşık olarak 70 – 120 kg/mm² seviyelerine ulaşmıştır. Ray çeliğinin mekanik

dayanımının artması ani kırılmalara sebep olabilir. Bu yüzden belirli bir limite kadar artması istenen bir durumdur (Öztürk ve Arlı, 2009).

Demiryollarında yaygın bir şekilde perlitik raylar kullanılmaktadır. Rayın mekanik özellikleri (aşınma dayanımı, çekme mukavemeti, tokluğu) sementit (Fe_3C) lameller arasındaki mesafe, lamel kalınlıkları ve tane büyüklüğü ile belirlenmektedir (Şekil 2.13). Sementit – lameller arası mesafe azaldıkça rayın akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artar, bu mesafe azaldıkça çekme dayanımından ziyade akma dayanımı daha fazla artar. Lameller arası mesafe alaşım elementlerinin oranlarına ve soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir (Öztürk ve Arlı, 2009).



Şekil 2.13 Perlitik bir ray çeliğinin SEM altındaki görüntüsü (Wang vd., 2016)

Perlitik rayların haricinde östenitik, beynitik ve martenzitik çeliklerden üretilmiş raylar da mevcuttur. Östenitik raylar, ray makaslarında kullanılmaktadır. Demiryolu aracı bir hattan diğer hatta geçerken, tekerlekler darbe şeklinde yüksek hızlı yüklere maruz kalmaktadır. Hadfield tipi çelikler, bu tip uygulamalar için uygundur. Östenitik tip raylar iyi bir aşınma direncine sahip olmasına karşın, manyetik özellikleri yoktur. Bundan dolayı ultrasonik testlerde çatlakların tespiti zordur. Bu yüzden demiryolu uygulamaları açısından çok uygun değildir. Diğer bir tür uygulama çeliği olan beynitik raylar ise 730 °C üstü sıcaklıklardan yavaş soğuma oranları ile elde edilmektedir. Karbürsüz beynitik raylar demiryolu uygulamalarında kullanılmaktadır. Perlitik raylara göre daha sert olup ray makaslarında kullanılmaktadır. Fakat beynitik rayların kullanımı hala yaygın olmayıp araştırma – geliştirme aşamasındadır. Son uygulama ise martenzitik tip çeliklerin ray malzemesi olarak kullanılmasıdır. Isıtılarak östenit hale getirilen çelik, yüksek soğuma hızlarında soğutulursa, karbon atomu demir atomları içine difuze olamaz ve sıkışır. Bu durumda yapı, hacim merkezli tetragonal kafes yapısına dönüşür. Sonuç olarak sert ve

kırılgan bir yapı elde edilir. Daha sonra bu yapı 100 – 650 °C sıcaklıklar arasında temperleme işlemi yapılarak kullanılır. Diğer çelik türleri olduğu gibi martenzitik çelikler de ray makaslarında kullanılmaktadır (Schmidova, 2015).

Rayın önemli bir mekanik özelliği olan tokluk ise, sementit lamellerinin kalınlığı ve tane boyutu ile belirlenir. Sementit lamellerinin kalınlığı arttıkça lameller arasında kalan alan azalır ve tokluk artar.

Rayın mukavemetinin yükselmesi çeliğin kimyasal tertibini değiştirmek ile, karbon miktarını çoğaltıp ayrıca manganezin ilave edilmesi ile elde edilir. Bu durum ise rayda uzamanın azalmasına yani kırılma dayanımının artmasına neden olur. Rayda aşınma mukavemetinin yüksek olması istendiği gibi kopma uzamasının da %10'dan az olması istenmez.

Ray çeliğinin bileşiminde demirden başka karbon, silis, manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Bunlardan karbon, silis ve manganezin belli bir miktarda bulunması rayı daha mukavemetli yapması için gereklidir. Fosfor ve kükürt ise çeliğin bünyesinden tamamen çıkarılmaz. Silis, çeliğin oksitlenmesini zorlaştıran bir element olup, ayrıca malzemesinin daha akıcı, yoğun ve ince taneli, homojen olmasını sağlar. Ray tipine göre silis miktarı %0,3 – 0,5 arasında değişmektedir.

Ray çelikleri iki sınıfta toplanabilir.

- Normal çelik sınıfı, %0,4 – 0,5 karbon, maksimum çekme dayanımı 70 – 90 kg/mm²
- Sert çelik sınıfı, %0,7 – 0,8 karbon, kurplarda kullanılır, maksimum çekme dayanımı 90 – 120 kg/mm² civarındadır.

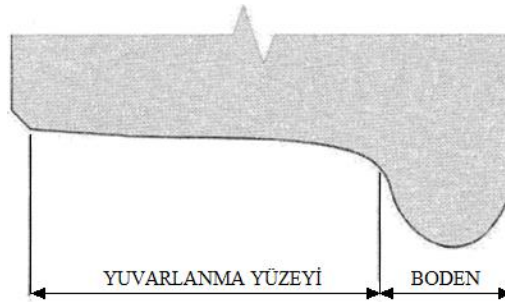
R200 (700) ve R260 (900A) raylar dayanımlarını başlıca karbon yüzdesinden kazanırken, R260Mn (900B) manganezden kazanmaktadır. R260 rayın kaynak özelliği daha iyi olduğu için Avrupa'da çoğunluk ile standart ray olarak kullanılmaktadır. R350 HT, R260 rayın ısıtma işlemi ile mantarı sertleştirilmiş formudur. R350 LHT ise krom oranı %0,3 ile sınırlandırılmış düşük alaşımlı ısıtma işlemi ile sertleştirilmiş raydır. Çizelge 2.1 ray sınıflarını ve bu raylara ait çekme dayanımlarını göstermektedir (Öztürk ve Arlı, 2009).

Çizelge 2.1 Rayların mekanik özellikleri

Ray Sınıfı	Çekme Dayanımı N/mm ²	Kopma Uzaması %	Sertlik BHN
UIC 700	680 – 330	14	
900A	880 – 1030	10	
Mn 900B	880 – 1030	10	
UIC 1100	> 1080	9	
R 200	> 680	14	200 – 240
R 220	> 770	12	220 – 260
R 260	> 880	10	260 – 300
R 260 Mn	> 880	10	260 – 300
R 320 Cr	> 1080	9	320 – 360
R 350 Ht	> 1175	9	350 – 390
R 350 LHT	> 1175	9	350 – 390

2.4. Tekerlek Profili

Tekerlek profili terimi ile, tekerin en kesitini birbirine bağlayan bir eğriyi anlıyoruz. Tekerlek profili araç – hat ara yüzeyini oluşturur ve Şekil 2.14’ de görülen teker yuvarlanma yüzeyinden ve bodeninden meydana gelir (Zelenka ve Michalek, 2014).



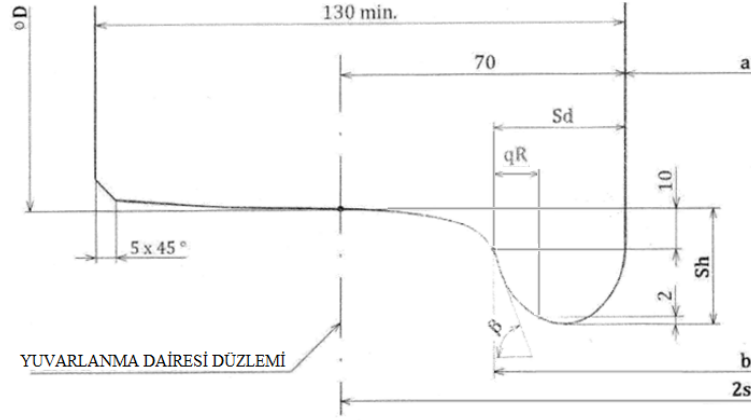
Şekil 2.14 Teker profili (Zelenka ve Michalek, 2014)

Teker yuvarlanma yüzeyi ile boden arasındaki geçiş genellikle dairesel yay ile tanımlanır. Aşınmadan dolayı, bu yayın yarıçap değeri rayın iç kısmındaki mantarın yarıçap değerinden daha büyük değere sahip olur. Teker yuvarlanma yüzeyine göre teker profillerini üç kategoriye ayırılır:

- Silindirik teker profilleri – teker yuvarlanma yüzeyi bir yatay doğru parçası ile oluşturulmuştur.
- Konik teker profilleri – teker yuvarlanma yüzeyi yine bir yatay doğru parçası ile oluşturulmuştur fakat bu doğru parçası eğimlidir; bundan dolayı, teker belirli bir koniklik değerine sahiptir.
- Eğrisel (aşınmış) teker profilleri – teker yuvarlanma yüzeyi nokta koordinatları, polinom fonksiyonlar veya dairesel yayların birleşimi gibi tanımlanmış bir eğri yardımı ile oluşturulmuştur; böyle bir tekerin sabit bir değerinde konikliği yoktur (Zelenka ve Michalek, 2014).

Silindirik teker profilleri, aracın seyri üzerinde negatif etkisinden dolayı demiryolu işletmeleri için kullanılması uygun değildir. Bu tekerlek profilleri tramvay işletilmesinde kullanılmaktadır. Bu durumda, profilin araç hareketi üzerindeki negatif etkisi, tramvay hızının düşük olmasının yanı sıra genellikle hat geometrisinin yüksek kalitede olmamasından dolayı önemli olmaz. Prag şehrindeki tramvayların haricinde, silindirik teker profilleri 1970lere kadar kullanılmıştır. Demiryolu işletmelerinde, konik teker profilleri 19. YY'ın başlarından bu yana kullanılmıştır. Aşınmanın gözlemlenmesi ile birlikte, bu teker profilleri çok hızlı bir şekilde belirli eğrisel şekilli profile aşındığı fark edilmiştir; işletmede, teker profilindeki bu eğrisel şekil değişiminin daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bu bilgi, 20. YY'ın ikinci yarısında eğrisel teker profillerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Zelenka ve Michalek, 2014).

Teker profili, raylı aracın seyri üzerinde önemli derecede etkisi olan faktörlerden birisidir. İşletme esnasında teker profillerinin aşınmasını gözleme ve teker profillerinin ölçümlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalma gerekliliği bu sebepten dolayıdır. Şekil 2.15'te ölçülmüş teker profilinin ve tekerlek setinin değerleri ve tanımları (standart tekerlek seti için muhtemel limit değerleri kapsayan) takip eden listede verilmiştir. Bu toleransları kapsayan parametreler örnek olarak CD V25 Çek Demiryolu Yönergesinin Ek No. 9'da verilmiştir (Zelenka ve Michalek, 2014).



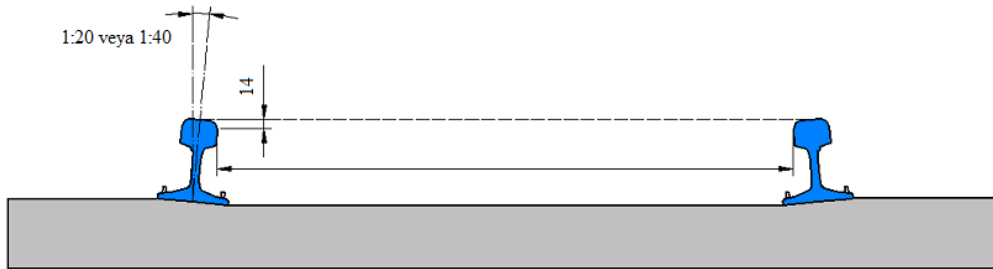
Şekil 2.15 Bir teker profilinin ve tekerlek setinin değerleri ve tanımları (Zelenka ve Michalek, 2014)

- İçten içe teker mesafesi, tekerlerin (bandajlı tekerlek olursa bandajın veya ispitin) iç yüzeylerinin birbirine olan ve $a=1360\pm 3$ mm nominal değere sahip olan mesafedir. Yuvarlanma yüzeyi tekerlek seti eksenine dik olan ve tekerin (bandajın veya ispitin) iç yüzeyinin 70 mm içinden geçen hayali bir yüzeydir. Her iki tekerin yuvarlanma daireleri arasındaki mesafe standart ile verilmiştir ve $2s=1500$ mm değerine sahiptir. Örnek olarak tekerlek çapı $\varnothing D$ yuvarlanma dairesi üzerinde ölçülür.
- Boden yüksekliği (S_h), yuvarlanma dairesinden bodenin uç noktasına kadar ölçülmesi ile hesaplanır.
- Boden kalınlığı (S_d), tekerin iç yüzeyi ile yuvarlanma dairesinin 10 mm yukarısında bulunan teker profilinin noktası arasındaki mesafedir. Tüm teker bandajının kalınlığı genellikle 135 mm veya 140 mm değerine sahiptir.
- Boden yanak ölçüsü (qR), teker profilinin iki noktası arasındaki yatay mesafe olarak tanımlanır; ilk noktası yuvarlanma dairesinin 10 mm yukarısında bulunan ikincisi ise boden uç noktasının 2 mm altında bulunmaktadır.
- Boden açısı (β), bodenin en dik noktasının eğimidir. Konik teker profili olması durumunda bu açı değeri genellikle 60° ve eğrisel teker profili olması durumunda ise 70° olmaktadır. Bu parametrenin derayman güvenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- Tekerlek seti açıklığı (b), mesafesi şu şekilde tanımlanmıştır, içten içe tekerlekler arası mesafe ile her iki boden genişliğinin toplanmasıdır; matematiksel olarak $b = a + S_{d1} + S_{d2}$. Standart bir tekerlek seti açıklığının 1410 – 1426 mm değerleri arasında olmalıdır.

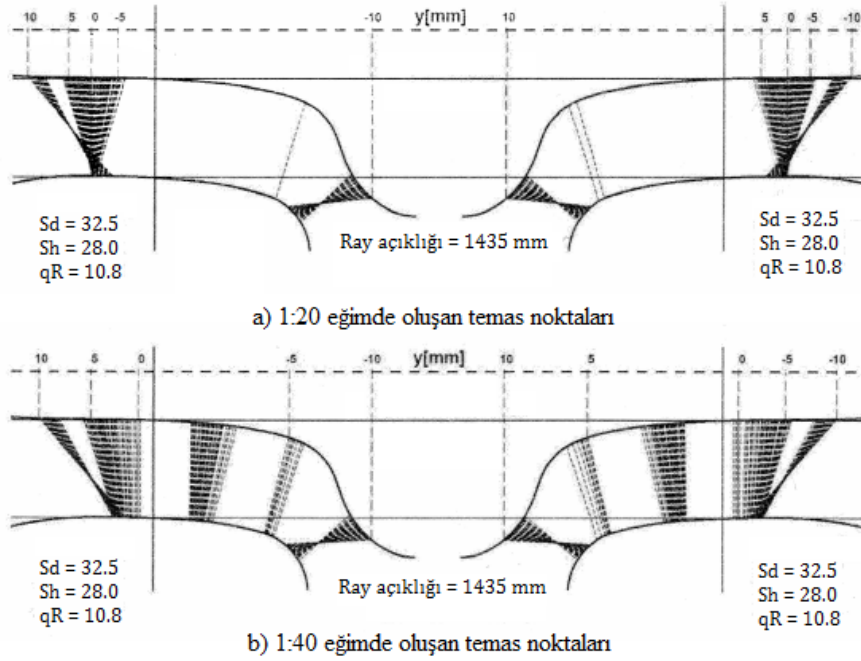
- Tekerlek seti parametresi, ise içten içe tekerlek mesafesi ile kalın bodenin toplamı olarak tanımlanmıştır $c = a + \max(S_{d1} ; S_{d2})$. Bu parametre makasların geçişi esnasında önemlidir ve limit değer olan 1394 mm değerini aşmamalıdır (Zelenka ve Michalek, 2014).

Bugünlerde eğrisel (aşınmış) teker profili, demiryolu uygulamalarında kullanılmakta olan hemen hemen tek tip tekerlek profilidir. Avrupa’da sıkça kullanılmakta olan S1002 (UIC-ORE’a göre) tekerlek profilinin sahip olduğu nominal ölçülerin değerleri şunlardır: $S_d=32,5$ mm, $S_h=28$ mm, $qR=10,8$ mm, $\beta=70^\circ$. Tekerlek seti açıklığının nominal ölçü değeri ise $b=1425$ mm olup bu üst limit değerlerine çok yakındır (Zelenka ve Michalek, 2014).

İlerleyen bölümlerde anlatılacak olan teker – ray temas noktasını belirleyen faktörler; teker profili, ray profili, ray eğimi, tekerlerin içten içe mesafesi ve ray açıklığıdır. Burada, ray açıklığı, rayın üst kısmından geçtiği varsayılan düzlemin 14 mm altından yapılan ölçümün mesafesi ray açıklığını vermektedir ve bu değer çoğu ülke için 1435mm değerindedir (Şekil 2.16). Ray eğiminde ise 1:20 veya 1:40 değerleri kullanılmaktadır. Uzun deneyimler sonucu ve yapılan araştırmalara göre UIC-ORE tipi tekerlek profiline sahip tekerlerin 1:20’lik ray eğiminde kullanılması, çok yüksek gerilmelerin oluşmasına, tekerin daha fazla aşınmasına ve bazı durumlarda da tekerin ray üzerinden kolayca atlamasına sebep olmuştur. Bundan dolayı 1:40’lık ray eğiminde, temasın daha geniş bir alana yayıldığı ve buna bağlı olarak teker ve ray aşınma profilinin daha düzgün olduğu görülmüştür (Şekil 2.17) (Zelenka ve Michalek, 2014).



Şekil 2.16 Ray açıklığının gösterimi ve traverse gömülü rayın eğimi (Zelenka ve Michalek, 2014)



Şekil 2.17 UIC-ORE (S1002) teker profili ve UIC-60 rayın iki farklı ray eğimi altında oluşan temas noktaları a) 1:20 eğim, b) 1:40 eğim (Zelenka ve Michalek, 2014)

3. AŞINMA

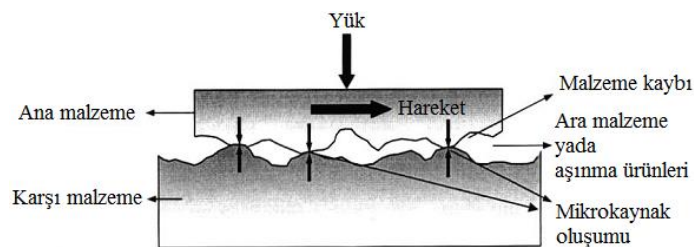
Genel olarak aşınmanın tanımı, “bir katı yüzeyin temas halinde olduğu katı, sıvı veya gaz tarafından mekanik yolla malzemenin kaybı şeklindeki hasardır” şeklinde yapılabilir. Çoğu zaman kademeli olarak ortaya çıkar ve aşınma sadece mekaniksel bir etki ile değil aynı zamanda kimyasal korozyon gibi farklı türlerde de aşınma gerçekleşebilir (Davis, 2001).

DIN 50320 standardına göre aşınmanın tanımı ise “bir malzemenin başka bir malzeme ile (katı, sıvı veya gaz halinde) teması sonucu mekanik etkenler ile yüzeyden çok küçük parçaların kopması ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde verilmiştir.

Aşınmanın gerçekleşmesi için, temas eden yüzeyler arasında sürtünmenin gerçekleşmesi gerekmektedir. Katı yüzeyler, oksit filmler ve/veya sınır tabaka yağlayıcılar ile korunsun bile, oksit filmlerin mekanik yük altında parçalandığı yerlerde ve aktif sınır tabaka yağlayıcısının zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı ile katı arasında temaslar oluşur ve bu temaslar aşınmaya neden olur (Ayday, 2013).

3.1. Aşınmanın Unsurları

Bir aşınma sistemi (1) aşınan malzeme, (2) aşındırıcı malzeme, (3) ara malzeme, (4) yük ve (5) hareket olmak üzere beş ana unsurda incelenebilir. Bu unsurların tamamı teknikte tribolojik sistemi meydana getirir ve bu sistem şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmektedir (Stachowiak ve Batchelor, 2014).



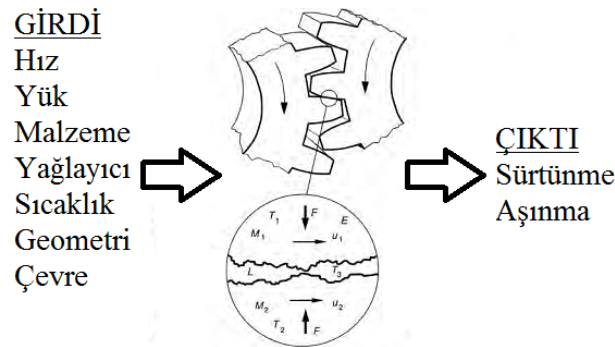
Şekil 3.1. Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi (Stachowiak ve Batchelor, 2014)

Aşınma sistemindeki diğer önemli unsur ise çevredir. Sistem nem veya korozyif etkilere maruz kaldığında, aşınma hızlanır. Birbirleri ile temas halinde olan malzemelerde, temas sonucu sürtünmeye uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörler ile azaltılabilir fakat tamamen önlenemez. Aşınma bazı yönleri ile korozyona benzer. Yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.

Aşınmayı etkileyen faktörler farklı gruplar halinde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört madde halinde verilmiştir (Ulutan 2007).

- 1) Ana malzemeye bağlı faktörler; malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutudur.
- 2) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisidir.
- 3) Ortamın etkisi; sıcaklık, nem ve atmosfer.
- 4) Servis koşulları; basınç, hız ve kayma yolu.

Günlük hayatımızda, birbirlerine temas ederek izafi hareket etme olayı çok fazla yaşanmaktadır. Yüzeylerin farklı koşullarda istenilen gereksinimleri karşılama açısından çok geniş bir yelpazede çalışması beklenmektedir. Yukarıda bahsedilen faktörler de göz önüne alındığında, tribofiziksel ve tribokimyasal prosesler Şekil 3.2’de gösterildiği gibi çok karmaşık bir yapıya sahiptir (Holmberg ve Matthews, 2009).



Şekil 3.2. Sürtünme ve aşınmayı kontrol eden dinamik tribofiziksel ve tribokimyasal temas prosesindeki girdi parametreleri (Holmberg ve Matthews, 2009)

Mühendislik açısından tipik bir metalik yüzeyinde farklı profillerde tepelikler ve vadeciklerden meydana gelmiştir ve eğimleri yaklaşık 5° ve nadir olarak da 30° 'den daha dik bir profile sahiptir. Yükseklik açısından ise vadiciğin en alt noktası ile tepeliklerin en üst noktası arasındaki fark genel olarak 0,1 ile 3 μm arasında değişmektedir. Tipik bir yüzey

topografisi ve temas yüzeyleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Ayrıca gerçek temas alanı görünen temas alanına göre genel olarak her zaman daha küçüktür (Holmberg ve Matthews, 2009).



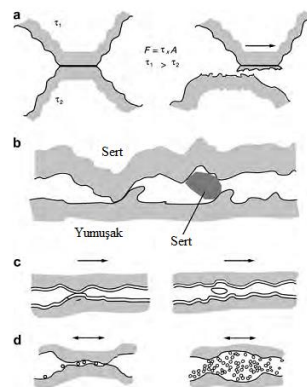
Şekil 3.3. a) Yüzey şekli yüzey topografisi olarak adlandırılmıştır, b) yüzey profili, c) temas halindeki iki yüzeyin gerçek temas alanı (Holmberg ve Matthews, 2009)

3.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma mekanizmaları ve çeşitleri hakkında hala genel bir anlaşma olmasa da bir sınıflandırma mevcuttur. Önerilen farklı aşınma sınıflandırılma örneklerini inceleyerek bir özet çıkaran Blau (araştırmacı), en çok kabul gören sınıflandırmayı yapmıştır. Temel aşınma mekanizmaları,

- Adhezif aşınma,
- Abrasif aşınma,
- Yorulma aşınması ve
- Korozif aşınma

olarak sınıflandırılmıştır. Bu dört temel aşınma mekanizmaları Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bunlara ek olarak erozif aşınma, öğütmeli aşınma, oymalı aşınma ve kazımalı aşınma mekanizmaları da mevcuttur (Holmberg ve Matthews, 2009).



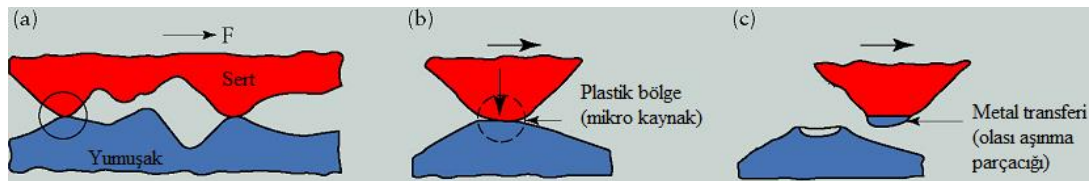
Şekil 3.4. Temel aşınma mekanizmaları a) Adhezif, b) Abrasif, c) Yorulma ve d) Korozif (Holmberg ve Matthews, 2009)

Dört farklı aşınma türü, malzeme yüzeyinden kopan aşınma parçacıklarını da farklılaştırmaktadır. Aşınmayı etkileyen faktörler (sertlik, yüzey topografisi, yük, yüzey yorulma dayanımı, çevre kimyası ve hareket türü) göz önüne alındığında aşınma parçacıkları şu şekilde sınıflandırılabilir;

1. Şiddetli aşınma, aşınma sonucu oluşan parçacık boyut aralığı 20 – 200 μm
2. Hafif aşınma, aşınma sonucu oluşan parçacık boyut aralığı 0,01 – 1 μm ve
3. Nano aşınma, aşınma sonucu oluşan parçacık boyutu moleküler ve atomik ölçektir.

3.2.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, bir malzeme yüzeyinin bir başka malzeme yüzeyindeki bağlı hareketi esnasında birbirine mikro kaynaklanmış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. En yaygın aşınma türlerinden biri olan adhezif aşınma olmasına karşılık aşınma hasarlarını hızlandırıcı etkisi abrazif aşınmaya kıyasla daha azdır. Malzeme yüzeyinde var olan pürüzlülükler uygulanan yüke göre birçok noktadan temas edebilir. İki malzemenin yüzeyi birbirine temas ettiği zaman, malzeme yüzeylerinde var olan izler, girintiler, çıkıntılar, düzensizlikler temas noktalarında bölgesel yüksek basınç oluştururlar (Şekil 3.5) ve yüzeyden parçacık kopmasına veya kırılmasına sebep olurlar (Ayday, 2013).



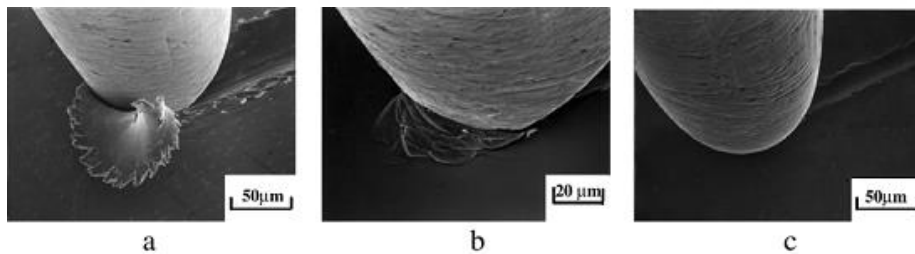
Şekil 3.5 Adhezif aşınma mekanizması sonucu aşınma parçacığının oluşumu (Ayday, 2013)

Adhezif aşınmanın etkisini azaltmak için bazı uygulamalar veya önlemler geliştirilmiştir. Adhezif aşınma, sıcaklık değerlerinin lokal olarak arttığı bölgelerde meydana geldiğinden, iyi bir yağlama uygulanması ile hem yüzeyler arasında sürtünme azaltılabilir hem de yağlayıcılar sistemden ısıyı uzaklaştırabilir. Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki metalin kullanılması ile, adhezif aşınmanın meydana gelişi tamamen ortadan kaldırılabilir. Birbirleri ile temas halinde olan yüzeylerde soğuk kaynaşma meydana getirecek şekilde çıkıntılar mevcut değil ise (yüzey pürüzlülüğünün azaltılması), adhezif aşınma azalacaktır (Sağlam, 2016).

3.2.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, birbirine temas halindeki metal yüzeylerden biri diğerine göre daha sert ve pürüzlü olan yüzeyin kayması sırasında meydana gelir. Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da adlandırılan abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan bir aşınma türüdür. Sert partiküllerin yumuşak metale batması abrazif aşınmaya neden olabilmektedir. Sert partiküller sisteme ya dışarıdan girmekte ya da aşınma ürünleri olarak sistem tarafından üretilmektedir (Ayday, 2013)

Abrazif aşınma boyunca yüzeyden malzemenin nasıl uzaklaştığını açıklamak için farklı mekanizmalar ileri sürülmüştür. Bunlar genel olarak kırılma, yorulma ve ergime şeklindedir. Abrazif aşınmanın meydana gelmesindeki kompleks yapıdan dolayı tek bir mekanizma tüm malzeme kaybından sorumlu tutulamaz. Şekil 3.6'da tek bir abrazif ucun malzeme yüzeyinden geçerken oluşturduğu abrazif aşınma profilleri gösterilmektedir. Bu tipler kesme, takozlama (abrazif ucun önünde takoz şeklinde malzeme transferi oluşur) ve pulluklama olarak adlandırılır. (Ayday, 2013)



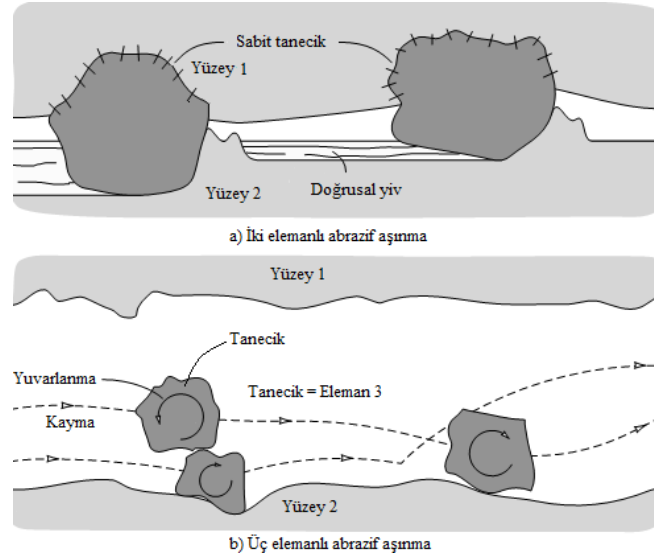
Şekil 3.6 . Abrazif aşınma mekanizmasının üç çeşidi olan a) Kesme (cutting), b) Takozlama (wedging) ve c) Pulluklama (ploughing) aşınmalarının SEM görüntüleri (Ayday, 2013)

Pulluklama aşınma türünde, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Daha sert olan malzeme yüzeyinde bulunan tepcikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve hareket devam ederse yüzeyde yiv oluşumuna sebep olur. Kızaklama oluşumunun iki ana sebebi yüzeylerdeki tepcikler yada temas bölgesinde bulunan sert partiküllerdir. Bu mekanizmada malzeme, yüzeyde meydana gelen yivlerin kenarlarına toplanır. Bu düşük yüklerde meydana gelir ve herhangi bir malzeme kaybına yol açmazlar. Hasar, malzemenin yüzeyinde soğuk deformasyon sebebi ile gelişen ve büyüyen dislokasyonlar sonucu meydana gelir. Eğer ki bu soğuk deformasyon bölgesinde

yiv oluşumu devam ederse, yüzeydeki hasara ilave olarak mikroyorulma mekanizması sonucu da hasar oluşur. (Ayday, 2013)

Takozlama, abrazif ucun önünde meydana gelir. Bu mekanizmada yiv önünde toplanan malzeme miktarı, kenarlara toplanan malzeme miktarından fazladır. Bu oluşum abrazif aşınmanın hafif hasar bırakan mekanizmalarından sayılmaktadır. Yumuşak malzeme için en ağır aşınma mekanizması ise kesmedir.

Yüzeylerin aşınmasına neden olan parçacıkların bıraktığı izler abrazif aşınmanın çeşidini belirler. Literatürde abrazif aşınmanın iki modeli vardır. Bunlar iki elemanlı ve üç elemanlı model olarak adlandırılmaktadır. İki elemanlı abrazif aşınma için örnekleme yapılırsa, bir yüzey üzerine zımpara kâğıdının temas ettirilmesidir. Sert çıkıntılar veya rijit halde bulunan tanecikler yüzey üzerinden bir kesici takım ucu şeklinde geçerler. Üç elemanlı abrazif aşınmada tanecikler serbestçe yuvarlanmakta aynı zamanda rijit olarak tutunmadığı için yüzey üzerinde kaymaktadır. Şekil 3.7’de iki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınma şematik olarak gösterilmiştir. İlk başlarda bu iki abrazif aşınma tipi aynı olduğu düşünülmüştür, fakat aralarındaki bazı önemli farklılıklar ortaya çıkarılmıştır. Üç elemanlı abrazif aşınma tipi, iki elemanlı aşınma tipine göre kıyaslandığında 10 kat daha yavaş olup, bu durum diğer bir mekanizma olan adhezif aşınma ile yarışacak derecededir. İki elemanlı abrazif aşınma, kesici ucun talaş kaldırma modeline çok yakın iken üç elemanlı abrazif aşınma talaş kaldırmanın daha yavaş modelidir. Aşınmış yüzeyin, iki elemanlı abrazif aşınmadaki gibi uzun yivlerin oluşturduğu çizik serilerinin görünümü yoktur. Bunun yerine aşınmış yüzey, kısa yivler ve fazla sayıda üst üste binmiş girintiler ile rastgele bir yüzey topografisi sergilemekte ve çıkıntı temaslarının neden olduğu yüzey tabakalarının kademeli olarak kaldırılması şeklindedir (Stachowiak ve Batchelor, 2014).



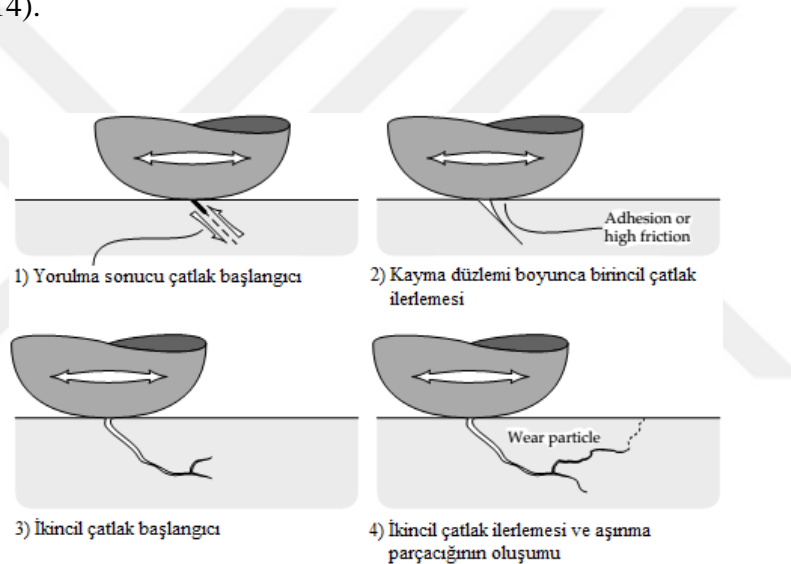
Şekil 3.7. Abrazif aşınma tipleri a) İki elemanlı ve b) Üç elemanlı (Stachowiak ve Batchelor, 2014)

Aşınma ya da aşındıran yüzeylerde aşınma hızı, malzemenin doğasına değil, her iki yüzeyin karakteristiğine, yüzeyler arasındaki abrazif mevcudiyetine, temas hızına ve diğer çevresel şartlara bağlıdır (Ayday, 2013).

3.2.3. Yorulma aşınması

Terim olarak “temas yorulması” veya “yüzey yorulması” genel olarak mühendislik dilinde “tekrarlı yuvarlanma teması” sebep olduğu yüzey hasarı için kullanılan teknik bir jargondur. Çok iyi koşullarda yağlanmış temas yüzeylerde, iki yüzey arasındaki adhezyon ihmal edilebilir seviyededir fakat hala ciddi oranda bir aşınma mevcuttur. Bu aşınma yüzeyde bulunan pürüzlülüklerin, karşı malzemede mevcut pürüzlülükler ile temas etmesi sonucu meydana gelen deformasyonlar sonucu oluşmaktadır. Temas noktalarındaki pürüzlülükler yüksek lokal gerilmelere, kayma ve yuvarlanma esnasında çok sık sayıda tekrarlı bir şekilde maruz kalmaktadır. Aşınma parçacıkları ise tekrarlı yorulma çatlakları sonucu olduğundan “yorulma aşınması” denilmiştir. Aşınma, bu koşullar altında çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve çatlak oluşumunun mekaniği ile belirlenir. Aşınmış yüzeyler, aşınmamış yüzeyler ile kıyaslandığında yüksek derecede plastik deformasyon içermektedirler (Stachowiak ve Batchelor, 2014).

Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişken mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiğinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Genellikle çatlaklar, aşınmış yüzeylerin mikroyapı fotolarında gözlemlenmektedir. Yorulma aşınmasının yüzey çatlak ilerleme mekanizması şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Birincil (ilk) çatlak yüzeyin en zayıf bölgesinde oluşur ve zayıf olan kayma düzlemleri veya dislokasyon sınırları boyunca aşağı doğru ilerlemeye devam eder. İkincil çatlak, ilk çatlakın oluştuğu yerden veya bunun yerine birincil çatlak, var olan yüzey altı çatlakları ile birleşerek oluşabilir. Oluşan çatlak tekrardan yüzeye eriştiğinde ise aşınma parçacığı oluşmuş olur. Bu tür aşınma çoğunlukla dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeyinde görülür (Stachowiak ve Batchelor, 2014).



Şekil 3.8. Yüzey çatlak başlangıcı ve ilerlemesi işleminin şematik gösterimi (Stachowiak ve Batchelor, 2014)

3.2.4. Korozyon aşınma

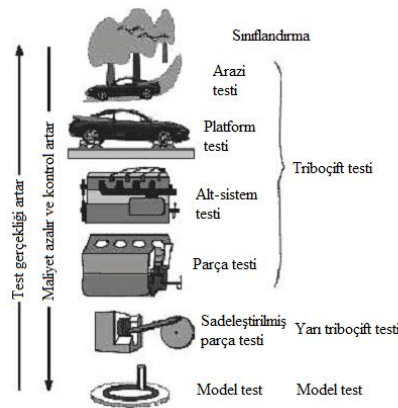
Korozyon aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünlerinin yüzeye kuvvetli bir şekilde yapışması ve ana malzeme gibi davranması durumunda, aşınma mekanizmasının da neredeyse ana malzeme ile aynı olacağı öngörülmektedir. Yine de birçok durumda böyle reaksiyon ürünleri ana malzemedan farklı davranmaktadır. Sonuç olarak bu durumda katı yüzeyinin korozyon ortam ile etkileşimleri ve reaksiyon ürünlerinin oluşumu korozyon aşınmayı meydana getirir (Stachowiak, 2014: Aydan'dan 2013).

Korozif aşınmada oluşan reaksiyon ürünleri sürtünme ile yüzeyden kalkar. Bu durumda reaksiyon tabakalarının aşınma hızı, yüzeyde oluşan ve yüzeyden kalkan reaksiyon ürünlerinin hızı ile alakalıdır (Stachowiak, 2014: Aydan'dan 2013).

3.3. Aşınma Testleri ve Metotları

Sürtünme katsayısı ve farklı aşınma mekanizmaları koşullarında aşınma çıktıları, malzeme içyapısından farklı olarak tribolojik sisteme bağlıdır. Örnek olarak temas şekli, karşılıklı çalışan malzemelerin yüzey karakteristikleri gibi örnekler verilebilir. Bu nedenle gerçekçi tribolojik davranışların belirlenmesi için saha testleri yapılması gerekmektedir. Testler ilerleyen aşamada gerçek sistemler üzerinde de denenmelidir. Bu tarz testleri uzun süreli, karmaşık ve maddi gereksinimi yüksek olup aynı zamanda farklı değişkenlerin etkisini çıkarmak zor olduğu için sonuçların yorumlanması genelde zordur. Bu sebeplerden dolayı, çoğu çalışmada tezgah testleri, gerçek sistemden izole edilmiş tekil bileşen testleri ve aşınma mekanizmasını simüle eden basitleştirilmiş testler yapılmaktadır.

Aşınma testleri tribolojik sistemin özelliklerine göre daha iyi sınıflandırmak mümkündür ve sınıflandırma Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Maliyet ve zaman kısıtlamaları dikkate alındığında, incelemeler daha basit test cihazları ile gerçekleştirilebilir. Aşınma elemanlarının gerçek olmasına dikkat edilerek, geri kalan tribolojik sistem elemanları laboratuvar ortamında aşınma mekanizmasını tam olarak canlandırmalıdır (Bhushan 2001: Ulutan'dan, 2007).



Şekil 3.9 Gerçeklik durumuna göre aşınma testlerinin sınıflandırılması (Stachowiak ve Batchelor, 2014)

Tezgah testleri, hızlandırılmış bileşen testleri ve basitleştirilmiş testler, gerçek saha testlerine oranla maliyet ve zaman açısından daha uygundur. Aynı zamanda test parametreleri daha iyi kontrol edilebilmekte ve çıkan sonuçlar çok daha basit bir şekilde yorumlanabilmektedir. Basitleştirilen test sonuçları, belirli bir istatistiksel güven aralığında farklı malzemelerin performansları ile hatta literatürdeki benzer koşullarda yapılmış testlerle bile kıyaslanabilir. Fakat basitleştirilmiş testler büyük bir özenle seçilmeli ve gerçekleştirilmelidir. Sonuçların yorumlanması esnasında, gerçek tribolojik sistem bilgilerine bağlı kalarak dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır. Doğru bir yaklaşım ile, ön tahminler baskın aşınma mekanizmasının yapabileceği hasarın tahmin edilmesini, laboratuvar testleri aynı sistemde malzeme örneklerinin belirlenmesine yardımcı olur. Çok sayıda test cihazı (tribometre) çeşidi mevcuttur ve bunların bazıları spesifik standartlar ile belirlenmiştir. Farklı aşınma mekanizmalarının simüle edilebilen basitleştirilmiş testlerin en önemlileri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgede test türü ile birlikte simüle edilen aşınma ve aşınma mekanizması belirtilmiştir. Belirtilen testlerin doğruluğunun kontrolü için, gerçek bileşenlerin aşınma mekanizmalarının doğal hayattaki rolü incelenmelidir. Aynı örnekleme teknikleri, gerçek bileşenlerde hata analizlerinin yapılmasında kullanılmaktadır ve bir sonraki aşama hangi testin uygulanacağına karar verilmelidir (Sirek, 2015).

Çizelge 3.1 Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları

Test makinası	Simüle edilen test prosedürü	Simüle edilen aşınma mekanizması
Disk üzeri pim	Kayma aşınması	Adhezif aşınma, tribooksidatif aşınma
Blok disk	Kayma aşınması	Adhezif aşınma, tribooksidatif aşınma
Disk üzerinde disk	Yuvarlanma-kayma aşınması	Temas yorulması, adhezyon tribooksidatif aşınma
4 top	Yuvarlanma aşınması	Temas yorulması
Pim abrazyon testi	Yüksek baskı abrazyon	Abrazif aşınma
Kuru kum, kauçuk lastik	Düşük baskı abrazyon	Abrazif aşınma

Sürtünme, bir enerji kaybı yöntemidir, bu yüzden uygulanan yükün sürtünme bileşeni kuvvet sensörleri ile ölçülür. Aşınma deneyinden elde edilecek bilgiler, kullanılan donanım, aşınan pim ve aşındıran diskin ölçüleri, temas eden en az iki malzeme, yüzey durumu, uygulanan normal kuvvet (F_n), uygulanan basınç (P_a), kayma mesafesi, zaman (t), hız (V), test sıcaklığı (T), atmosfer, yağlayıcı ve test sayısıdır.

Aşınma deneyleri için farklı yöntemler önerilmiştir. Bunlar ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim yöntemi ve radyo izotop değişimi başlıca yöntemlerdir. Bu yöntemlerin nasıl yapıldığına dair ayrıntıya girilmeyecek sadece bu çalışmada uygulanan aşınma deneyine ve hesaplama yönteminden bahsedilecektir.

Spesifik aşınma oranı “ k ”, Archard aşınma denklemi prensibine dayanarak, aşınma hacminin “ V ”, kayma mesafesi “ X ” ve uygulanan normal yükü “ L ” çarpımına bölünerek bulunmaktadır.

Spesifik aşınma oranı denklem 3.1’de verilmiştir.

$$k = \frac{V}{XL} \quad 3.1$$

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile belirlenen aşınma alanlarından, aşınma hacimleri hesaplanarak spesifik aşınma oranı tespit edilmiştir (Miranda ve Ramalho, 2005). Literatürde genel olarak aşınma hacmi V (mm^3), kayma mesafesi X (m) ve normal yük L (N) parametrelerine bağlı olarak hesaplanır ve sonuçta spesifik aşınma oranı k (mm^3/Nm) olarak değerlendirilir.

4. BORLU ÇELİKLER

Bor elementi, periyodik tabloda “B” simgesi ile gösterilen ve atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 g/cm³ ve ergime noktası 2200°C olan, metal/ametal arası özelliklere sahip bir yarıiletkenidir. Doğada bor elementi tek başına bulunmamakla beraber oksijenle oluşturduğu ve borat olarak adlandırılan bileşimler halinde bulunmaktadır. Çok sayıda borat vardır fakat bunların pek azı ticari açıdan işlemeye değerlidir. Boraks, kermit, üleksit, probertit, kolemanit, pandemit, hidroborasit ve sassolit isimli boratlar çıkarılmaya ve işlenmeye değer bulunanlardır (Er, 2003).

Bor elementi, günlük hayatımızda nükleer yakıt teknolojisinden motorlu yakıt taşıtlarına, hidrojen elde edilmesine, seramik ve ilaç sanayisine, deterjandan tekstile, cam endüstrisinden yüksek ısı transistörlerine, süper iletkenlere kadar sayısız alanda kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile bugün sanayinin tuzu olarak adlandırılan borun kullanımını ve bağımlılığını artırmakta ve borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir (Akbayır, 2005).

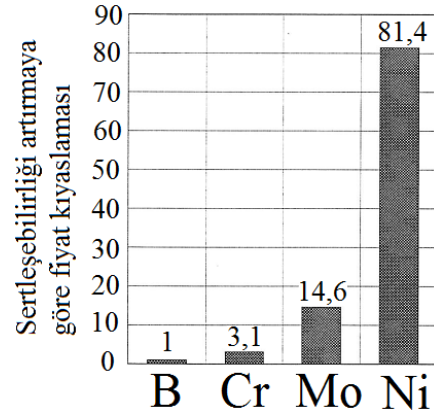
Bor ve bor türevi ürünlerinin endüstriyel anlamda yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan önemli diğer yeni uygulamalarından biri de çelik endüstrisidir. Çelik endüstrisinde bor, alaşım elementi olarak katıldığı çeliğe yüksek oranda sertleşme kabiliyeti kazandırdığı belirtilmektedir (Çarboğa vd., 2016). Borun çelik endüstrisindeki bir diğer kullanım şekli de borlama yöntemidir. Bütün demir esaslı malzemeler (yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler) borlama için uygundur. Demir esaslı malzemelere ek olarak başka element ve bileşikler de borlama işlemi uygulanabilmektedir. Çelik ve dökme demir alaşımları yanında, demir dışı metal ve alaşımlarında (Ni, Co, Mo, Ti) başarı ile uygulanarak bor tabakası elde edilmiştir. Borlama işlemi sonucunda, titanyum ve titanyum alaşımlarında aşınmaya dayanıklı TiB₂ tabakası elde edilmektedir. Borlama işlemi bakır ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir fakat düşük ergime sıcaklığına sahip olmalarından ötürü çinko ve alüminyuma uygulamamaktadır. Bahsedilen malzeme çeşitlerinin borlama işlemleri demir esaslı malzemelerin borlama işleminden farkı yoktur (Ünlü ve Yılmaz, 2006).

4.1. Borun Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Kullanılması

Ülkemizin dünyada en büyük bor madeni rezervine sahip ülke olduğu bilinmektedir. Çok farklı kullanım alanına sahip bor türevi ürünlerin uygulama alanlarından biri de çelik endüstrisidir (Er ve Gaşan, 2006).

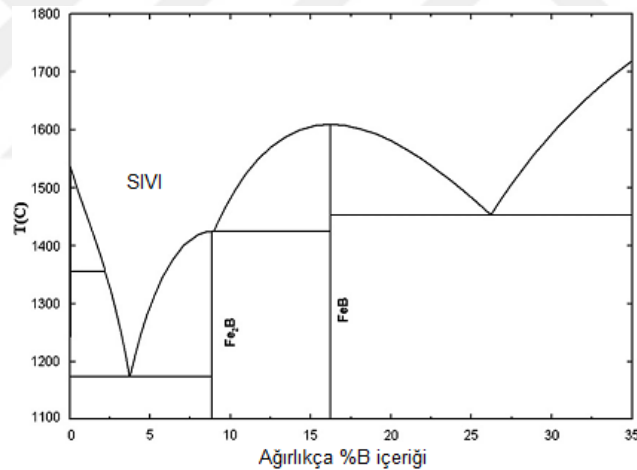
Bor tipik bir mikro alaşımlandırma elementi olup, az bir oranda kimyasal bileşimde bulunması halinde bile çeliklerin ciddi oranda mekaniksel özelliklerini geliştirmektedir. Bu çoğu durumda maliyeti düşürmekte, alaşımlandırma elemanlarını ve aynı zamanda da mineral ve enerji kullanımını da azaltmaktadır. Bor, eşsiz kabiliyeti sayesinde sertliğini artırmak amacı ile %0,001'dan %0,0004'a kadar çeliklere katılmaktadır. Çok az miktardaki borun, karbon ve mangan kombinasyonunun çoğu geleneksel alaşım elementlerinden daha verimli bir etki göstermektedir. Bor, paslanmaz çeliklerde sürünme özelliklerini geliştirmek amacıyla veya nükleer endüstride nötron soğurumunun gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır (yüksek nötron soğurumunun %1'den daha az bor katkısı ile çelikler için uygulaması başarılıdır). Bor aynı zamanda yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (High Strength Low Alloy) ve diğer yapı çeliklerinde de kullanılmaktadır. Ferrobor, taneler arası nitrojen etkisinden korumak ve çeliklere şekil verebilmek kabiliyetini artırmak amacı ile de kullanılmaktadır. Normalde %0,002 ile %0,0025 oranlarında bor alüminyum tarafından deokside olmuş çeliğe eklenmektedir (Gasik, 2013).

Düşük karbonlu çeliklere yapılan az miktardaki bor ilavesi çeliklerin ciddi oranda sertliğini artırmaktadır. Şekil 4.1 elementlerin çeliği sertleştirme maliyetinin kıyaslanmasını göstermektedir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere az miktardaki bor katkısı çeliklerin sertliğini önemli derecede artırmaktadır. Bundan dolayı bor, çelikler için sertleşebilirliği artırma maliyeti diğer elementler ile kıyaslandığında düşük kalmaktadır. Örnek olarak çeliğin işlenmesi bor katıldığından dolayı krom (Cr), molibden (Mo) ve nikel (Ni) gibi elementlerin çok az var olmasından dolayı daha kolay olmaktadır (Koyama ve Tskukamoto, 1997).



Şekil 4.1 Sertleştirilebilmeyi geliştirmek için gerekli olan elementlerin mali açıdan kıyaslanması (Koyama ve Tskukamoto, 1997)

Demir ile birlikte bor termodinamik açıdan stabil Fe_2B , FeB ve FeB_2 borürler oluşturmaktadır (Şekil 4.2). Borun sıvı demir içerisinde çözünmesi yüksek derecede ekzotermiktir (Gasik, 2013).



Şekil 4.2 Fe – B sisteminin denge diyagramı (FeB_2 bileşimi gösterilmemiştir) (Gasik, 2013)

Bor karbon sisteminde, stabil karbür B_4C 'nin geniş konsantrasyon homojen aralığına ve $2450^\circ C$ gibi yüksek ergime noktasına sahiptir. Bor ve silisyum ise stabil SiB_3 , SiB_6 ve SiB_{14} gibi bor silisler oluşmaktadır. SiB_6 yaklaşık olarak ergime sıcaklığı $1850^\circ C$ civarlarıdır. Bor aynı zamanda birçok metal ile de stabil borürler oluşturmaktadır. Bor – alüminyum sisteminde AlB_2 , AlB_{10} ve AlB_{12} gibi borürler oluşmaktadır ve oluşan bu borürlerin ergime sıcaklığı yaklaşık olarak AlB_2 için $960^\circ C$, AlB_{10} için $1660^\circ C$ ile $1850^\circ C$ aralığında ve AlB_{12} için $2150^\circ C$ 'dir Borun, oksijen ile farklı bor/oksijen oranlarında çok sayıda oksitler oluşturmaktadır. Bunlar B_7O , B_6O , B_2O , B_4O_3 , BO_2 , B_4O_5 ve B_2O_3 olan ise

en stabil olanıdır. B_2O_3 bileşiminin yaklaşık olarak ergime sıcaklığı $450^\circ C$ 'dir ve camı fazların soğuma esnasında oluşmasıyla bilinen ve borosilikat camın üretilmesinde kullanılan bir oksittir. Boroksit su ile tepkimeye girerek, zayıf H_3BO_3 asidini oluşturmaktadır (Gasik, 2013).

4.2. Borlu Çeliklerin Endüstriyel Kullanım Alanları

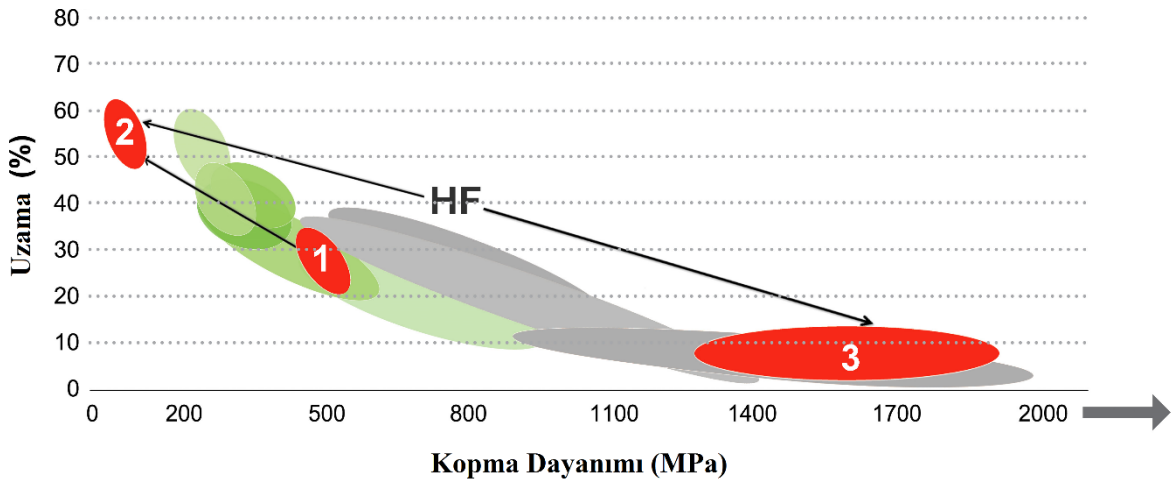
Borlu çeliklere uygulanan ısı işlemler sonucunda yüksek sertlik değerlerine ulaşabilmektedirler. Bu kazandığı özelliklerle beraber sürtünmeye ve aşınmaya karşı direnç gerektiren ziraat aletleri, toprak işleyen aktif uçlar ve madencilik ekipmanlarında sıkça kullanılmaktadır. Son yıllarda ise otomotiv üreticileri, araçların bazı parçalarında hafiflik elde etmek ve darbeye maruz kalacak bölgelerde sürücü ve yolcu güvenliğini arttırmak amacı ile borlu çeliklerin kullanımını yaygınlaştırmışlardır. Ayrıca otomotiv sektöründe, borlu çelik sacların sıcak şekillendirme ile kullanımı görülmektedir. Sıcak şekillendirmenin avantajı ise mükemmel geometrik hassasiyetin sağlanması ve geri yaylanma olmadan üretimin mümkün olmasıdır. Düşük karbonlu çeliklere Cu – B ilavesi ile kazanılan yüksek korozyon direnci sayesinde borlu çelikler, savaş gemilerinin, köprülerin ve petrol platformlarının yapımında kullanıldıkları bilinmektedir. Örnek verilebilecek diğer uygulamalar ise forklift kolları, kar küreme araçlarının iş gören kısımları, tank paletleri, taş kırıcı ve öğütücüleri, kepçe tırnakları, petrol boru hatları ve genel makine imalatıdır (Er, 2011).

Toz metalürjisi ve hızlı katılaşma teknikleri kullanılması ile mekanik özellikleri geliştirilmiş borlu çeliklerin üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu teknikler ile üretilmiş çok sayıda yüksek dayanımlı borlu karbon çelikleri ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Diğer geleneksel dayanımı artırılmış çeliklere göre bor ilaveli çeliklerin mekanik özellikleri daha üstün özellikler sergilemektedir. Bunun sebebi olarak da, ince eş taneli yapıya sahip olmaları ve büyük ikincil faz parçacıklarının olmamasıdır. Oluşan mikro yapılarda, ince ferrit ve östenit fazlarının tane boyutları 0,2 ile 4 μm arasında değişmekte olup, tane etrafında alaşımın kompozisyonuna göre oluşmuş borürler ve karbaborürler tarafından çevrelenmiştir. Bu mikroyapılar yüksek sıcaklıklarda stabil halde bulunmaktadır. Borlu çelikler orta ve düşük sıcaklıklarda yüksek mekanik özellikler sergileyip maksimum çekme dayanımı 2000 MPa civarındadır. Bu özellikler ise kesme işlemlerinde yüksek hız çeliklerin yerini almayı

mümkün kılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük gerinim oranlarında, borlu çelikler tane sınırları kayma mekanizmasının deformasyonu kontrol ettiği, yaklaşık 2 gerilme üssü değerine sahiptir. Çekme uzaması ise %500 değerlerine kadar elde edilmiştir (Jimenez vd., 1995).

Kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri eş değer karbon oranları, kaynağın kompozisyonu, ısı girdisi ve soğuma oranı, kaynak sonrası tane boyutu gibi birçok parametreye bağlıdır. Bir çelik kompozisyonuna sahip metal için, hızlı soğuma oranı, beynit ve martenzit gibi daha sert olan mikroyapıların oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun tam aksine göre de, daha yavaş soğuma oranları ise ferrit gibi yumuşak mikroyapıların oluşmasına neden olmaktadır. Kaynak metaline ufak bir bor element katkısı, kaynaklı yapının mikroyapısını, sertliğini, dayanımını ve enerji absorblama gibi mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Darbe tokluğuna olumlu yönde etkisi olan iğnemsî ferritin miktarı, kaynak edilmiş metallerde önemli bir özellik olarak göz önünde bulundurulmaktadır. Bor katkı miktarı arttıkça, iğnemsî ferrit miktarı düşmektedir. Bunun sebebi de ötektoid sıcaklığın düşmesinden dolayıdır. Bu şekilde, düşük sıcaklık dönüşümü sonucu oluşan beynit kolay bir şekilde oluşmaktadır. Borun sertleştirme mekanizması hakkında farklı görüşler ortaya atılmıştır. Bunlardan birisi serbest bor, östenit tane sınırlarına doğru difüze olarak enerjilerini düşürerek, ferrit oluşumu için daha az uygun alan yaratması sonucuna dayanmaktadır (Lee vd., 2007).

“Hot formed” (HF) sıcak şekillendirilmiş çelikler tipik olarak %0,002 ile %0,005 oranında bor içeren ve genellikle borlu çelikler olarak adlandırılan bir çelik türüdür. HF çeliğini üretmek için kullanılan işlemler çeliğe özgün özelliklerin kombinasyonunu sağlamaktadır (Şekil 4.3). “Direct hot forming” (doğrudan sıcak şekillendirme) östenitik halde bulunan çelikleri deforme ederek veya “indirect hot forming” (dolaylı sıcak şekillendirme) kullanılarak yüksek sıcaklıklarda şekil vererek ve sonunda oda sıcaklığında işlemin son bulması ile elde edilebilmektedir. Her iki durumda da, çelik bir seri uzama ve dayanım dönüşümlerinden geçmekte, hızlı soğutma yapılarak da arzu edilen mekanik özelliklere erişilmektedir (Tamarelli, 2011).



Şekil 4.3 HF çeliğinde dönüşümler, 1) Başlangıç, oda sıcaklığında ve ham metal olarak bulunan çelik, 2) Şekil vermenin tamamlandığı sıcaklığın artırıldığı bölge, 3) Nihai dayanımın ve uzamanın erişildiği hızlı soğutmanın yapıldığı bölge (Tamarelli, 2011)

Doğrudan sıcak şekillendirmede, oda sıcaklığında bekleyen bor içerikli çelik, östenitleme yapmak üzere yeterli sıcaklığa ısıtılır. Daha sonra çelik sıcak haldeyken şekillendirilir ardından su verilerek martenzitik bir mikroyapı elde edilir. Nihai ürünlerde istisna olarak daha da yüksek dayanım isteniyorsa, bazı şekil verme sonrasında ek işlemler yapılabilmektedir. Dolaylı sıcak şekillendirme işleminde, oda sıcaklığında önceden şekil verilmiş olan düşük dayanım ve yüksek uzamaya sahip olan çelik ısıtılarak şekil verme işlemi tamamlanmış olur. Son olarak da su verme işlemi yapılarak kullanıma hazır hale gelir.

HF çeliğinden yapılan parçaların yüksek dayanım ve geliştirilmiş geri yaylanma gibi birçok avantajları bulunmaktadır. HF borlu çeliğin kullanımı, bazı otomotiv üreticileri tarafından “Ultra High Strength Steel” (UHSS) çok yüksek dayanımlı çelik olarak anılmakta olup Avrupa’da kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Aynı zamanda sıcak şekillendirilmiş diğer malzemelerin kullanımı da araştırılmakta, yeni kaplamalar ile birlikte korozyon direncini artırılmaya yönelik çalışmalar da sürmektedir (Tamarelli, 2011).

Yeni araç güvenliği düzenlemeleri ve artan yakıt fiyatları birlikte, otomotiv üreticileri yüksek araç gövdesi rijitliği ve düşük araç ağırlığı ile, güvenlik – yakıt tasarrufu konusunda gerekli çözümleri almaya başlamıştır. Avrupalı araç üreticileri de borlu çeliğin kullanımı 2000’li yılların başında piyasaya tanıtmaya başlamışlardır. Pratikte kullanımı açısından örnek vermek gerekirse, 2002 yılında üretilen Porsche Cayenne SUV tipi aracının ön gövde altındaki travers elemanlarında, 2003 yılında üretilen Porsche Boxster aracının

arka koltuklar etrafındaki emniyet çitasında, 2003 yılında üretilen Porsche 911 Carrera aracının kapı destek kirişlerinde, 2003 yılında üretilen Mercedes Benz E Class aracının iç sütunlarında, Volvo S40, V50, XC90 ve Ford'un bazı araçlarının çeşitli şasi ve gövde kısımlarında borlu çelik uygulamaları görülmektedir (Şekil 4.4) (Watson, 2008).



Şekil 4.4 Destek çubukları, köşe takviyeleri ve levhalar (Watson, 2008)

Borlu çeliklerin özellikleri, bor elementinin yapıdaki dağılımı ve diğer alaşım elementleri ile olan etkileşiminin bir fonksiyonudur. Bu durumda bor, az alaşımli çeliklerde östenitin dönüşümünü yavaşlatarak sertleşme kabiliyetini arttırdığı, bununla birlikte darbe direncini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir (Ünlü ve Yılmaz, 2006).

Takım çeliklerine yapılan bor katkısı sertleşme kabiliyetini artırmaktadır. Örnek olarak paslanmaz çeliğe ppm mertebesinde bor ilavesi, kaynak kabiliyetini, sürünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon kapasitesini artırmakta ve sıcak yırtılmaları önlemektedir. Krom, krom nikel kobalt gibi yüksek sıcaklık çeliklerine az miktardaki bor ilavesi bu malzemelerin kullanım ömrünü uzatmaktadır. Yüksek hız çeliklerine kullanımda sertleşebilen ve ısıl işlem görebilen çeliklere bor ilavesi özellikle sürünme mukavemetini artırmaktadır (Ünlü ve Yılmaz, 2006).

Borlu çelikleri yüksek mekanik özelliklere ulaştırmak için, şekil verme sonrası su verme sıcaklığına kadar ısıtılır (yaklaşık 900°C), malzeme ölçülerine bağlı olarak bu sıcaklık değerlerinde bekletilir ve son olarak da yağda veya suda su verilerek ısıl işlem tamamlanmış olur. Böyle bir sertleştirme ısıl işlem sonunda oldukça sert (45-50 HRC) ama aynı zamanda sürtünme ve aşınmaya karşı iyi derecede direnç gösteren yüksek mekanik özellikler sergileyen bir yapı elde edilmiş olur. Sertleştirilmiş borlu çeliklerin temperleme işlemi uygulanmadan kullanılabildiği gibi, iş parçasının kullanım koşullarına bağlı olarak daha tok

bir yapının istenildiği durumlarda temperleme işlemi parçanın ölçülerine göre uygulanabilmektedir. Temperleme işlemi 150 – 200°C sıcaklıklar arasında uygulanarak, hemen hemen sertliği düşürmeden sünekliği yani tokluğu artırdığı bilinmektedir. Darbeli çalışma koşullarına maruz kalacak uygulamalarda darbe dirençlerini artırmak amacı ile 400 – 450°C gibi yüksek temperleme sıcaklıklarına çıkılması önerilmektedir. En önemli özelliklerinden birisi de daha çevreci olan suda su verme işleminin bu tip çeliklere uygun olmasıdır. Diğer bir önemli avantajda düşük temperleme sıcaklıklarının çok iyi tokluk değerleri vermesidir ki bu da maliyet anlamında enerji girdisini azaltan bir faktördür. (Er, 2009).



5. TEKER – RAY ETKİLEŞİMİ

Çelik tekerlerin, çelik raylar üzerinde yuvarlanma hareketi yaparak ilerlemesi diğer ulaştırma çeşitleri açısından raylı sistemleri farklı kılmaktadır (Şekil 5.1) (Bhushan, 2001). Birbirine temas eden teker ve ray malzemelerinin, temas bölgesinde meydana gelen dikey kuvvetlerin sebep olduğu gerilime ve aynı zamanda yol ve teker yüzeyinde bulunan düzensizliklerin sebep olduğu dinamik etkilere karşı yeterli bir dayanıma sahip olmalıdır. Teker ve ray temas alanı (gerçek temas alanı yaklaşık 100 mm^2) tüm yükü taşıyarak, hareket boyunca yönlendirme, çekiş ve fren kuvvetleri bu temas alanı üzerinden aktarılmaktadır (Iwnicki, 2006).



Şekil 5.1 Teker – ray teması (Iwnicki, 2006)

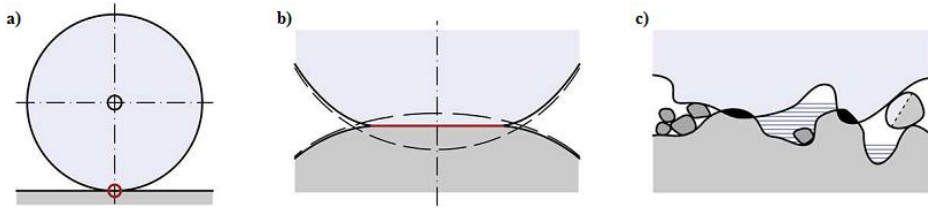
Teker – ray temas alanı yaklaşık olarak bir bozuk para büyüklüğünde olup, 30 tondan (yolcu vagonu) başlayıp 140 tona (yük vagonu) kadar çıkan ağırlıktaki araçlar sekiz adet temas (sekiz teker) noktası yardımı ile desteklenmektedir. Malzeme içerisinde ve temas alanının etrafında çok yüksek gerilmelere maruz kalmaktadır. Böylesine yüksek bir gerilmeli temasta yüksek oranda aşınma beklenmekte olup ek olarak yükün, araçların hareketi boyunca sürekli olarak yüklenip boşalması ile, ray yüzeyinin yorulma sonucu hasara uğraması da ihtimaldir. Aşınmaya veya yorulma sonucu hasara uğramayacak ideal teker veya ray malzemesi ekonomik açıdan mümkün olmamak ile birlikte, bu tür bir malzeme şu ana kadar bulunamamıştır (Bhushan, 2001).

Aks yükü örnekleri vermek gerekirse, aracın istasyonda beklediği andaki temas noktasındaki yük statik yük olarak adlandırılmaktadır. Dinamik yükler ise daha büyük olup, dikey yöndeki ivmelenmeler 1000 m/s^2 değerlerine ulaşmaktadır. Bu teker ray ara yüzeyinin çok yüksek rijitlik değerine sahip olmasının sonucudur. İyi dizayn edilmiş birincil süspansiyonlar bu kuvvetlerin en aza indirgenmesi yol ve teker ömrü açısından gereklidir (Bhushan, 2001).

Yük vagonları genel olarak 60 ile 90 km/h değerleri arasında sınırlandırılmışlardır, maksimum hız değeri ise eğim, aerodinamik etkiler ve aracın kapasitesine göre belirlenmektedir. Yüksek hızlı yolcu trenlerinde ise örnek olarak Fransız LGV (Ligne Grande Vitesse), aks yükü 15 ton olarak sınırlandırılmıştır böyle bir kısıtlamanın gerekliliği ise 300 km/h gibi hız değerlerine çıkan bu araçlarda dinamik kuvvetlerin daha yüksek olmasıdır. Avrupa'da, yük vagonlarının aks yükü uzun yıllar 18 ton olarak sınırlandırılmıştı fakat şu an UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) tarafından 22,5 ton olarak belirlenmiştir (Bhushan, 2001).

Raylı sistem aracının hareketi, üzerine etkiyen kuvvetler tarafından belirlenmektedir. Bu kuvvetler, aerodinamik etkilerin haricinde araç tekerinin raya temas ettiği noktalarda meydana gelen kuvvetlerdir. Bundan dolayı teker ray temas koşullarının çalışılmasının kritik bir önemi vardır. Bu çalışma koşulları çoklu fiziksel kurallardan türetildiği için teker – ray temas problemleri de oldukça karmaşık bir olaydır. Farklı amaçlar için farklı modeller kullanılarak gerçek temas üzerinde farklı basitleştirmeler ve kabuller uygulanmıştır. Dış kuvvetler raylı sistem aracının hareketini, teker ve ray temas bölgesindeki noktalara göre belirlemektedir. Bu aşamada üç farklı seviyede temas problemleri ele alınabilmektedir (Voltr, 2013).

- Nokta teması; iki rijit yüzeyin normal ve teğetsel kuvvetlerin iletimi (Şekil 5.2a)
- Alan teması; iki düzgün, pürüzsüz, deforme olabilen yüzeyin temas noktasında normal ve teğetsel gerilmelerin dağılım gösterdiği (Şekil 5.2b)
- Gerçek temas; iki pürüzlü yüzeyin partikül barındırarak homojen olmayan bir şekilde teması (Şekil 5.2c)



Şekil 5.2 Temas şekilleri a) Nokta teması, b) Alan teması, c) Gerçek temas (Voltr, 2013)

Nokta temasında, teker ve ray sadece tek bir nokta üzerinde temas etmektedir ve bu temasın pozisyonu yüzeylerin geometrisini göre belirlenmektedir. Normal ve teğetsel kuvvetler bu noktada yoğunlaşmıştır. Bu temas tipi, aracın tümü ile hareket etmesinin araştırılmasında kullanılmaktadır, çünkü gerçek temas alanı araç tekerleğinin karakteristik ölçülerinden daha küçüktür.

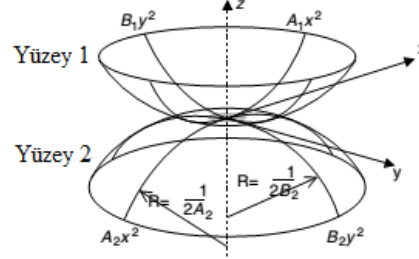
Alan temasında, teker ve ray birbirlerine teması esnasında elastik, homojen ve pürüzsüz yüzey kabulü yapılarak, deforme olmuş haldeki alan göz önüne alınır. Normal ve teğetsel gerilmeler temas alanında dağıtılmıştır. Bu model kuvvet hesaplamalarının sağlanması için gereklidir.

Gerçek temas koşullarında, teker ve ray birbirlerine pürüzlü bir şekilde, partiküllü, ara yüzey sıvı tabakalı ve homojen olmayan bir şekilde temas etmektedir. Bu yaklaşımda malzeme modellerinin doğru seçimi, gerçek temas alanının bulunmasında büyük bir yarar sağlamaktadır.

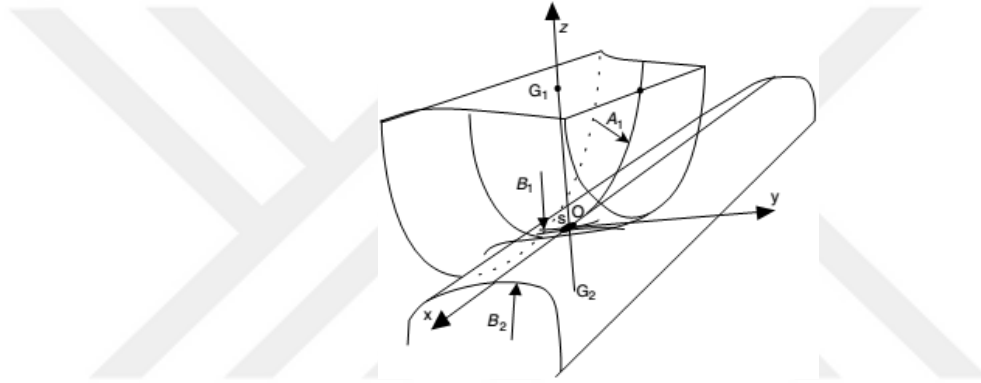
1800'lerin ortasında bugünlerde kullanılan teker – ray temasının benzeri ortaya atılmış fakat 1896 yılında ilk bilimsel teker – ray temasının tanımı Hertz tarafından yapılmıştır. Hertz analiz metodunu geliştirirken elastik cam lenslerin kullanmıştır fakat daha sonraki yayınlarında bu modelin aynı zamanda yuvarlanma hareketi yapan rulmanlarda, dişliler arasında ve en önemlisi de teker – ray temasında kullanılabileceğini belirtmiştir.

Teker – ray temas geometrisinde çözüm yapılırken temasın elastik davranış gösterdiği, yarı sonsuz düzleme sahip olduğu, temas bölgesine göre eğrilik yarıçaplarının büyük olduğu ve temas noktasının sabit eğriliğe sahip olduğu kabulleri yapılmaktadır. Raylı sistem çözümlerinde dört ana eğri birbirine dik pozisyonda temas etmektedir ve bunların

orijin, x ve y eksenlerindeki gösterimi Şekil 5.3’de genel gösterimi, Şekil 5.4’de de teker - ray için gösterimi verilmiştir (Iwnicki, 2006).



Şekil 5.3 Hertzian temasının genel gösterimi (Iwnicki, 2006)



Şekil 5.4 Hertzian temasının teker – ray için gösterimi (Iwnicki, 2006)

Teker ve rayın temas halini düşünersek, temasın olduğu O noktasında, iki gövde arasındaki uzaklık çok azdır. Yüksüz bir durumda gövdelerin yüzey fonksiyonları aşağıdaki gibi ikinci dereceden bir polinomdur.

$$z_1 = A_1x^2 + B_1y^2 \quad 5.1$$

$$z_2 = A_2x^2 + B_2y^2 \quad 5.2$$

$A_{1,2}$ ve $B_{1,2}$ katsayılarının O’ya komşuluğunda sabit kabul edip, bu değerler temas alanının eğrilikleriyle de ilişkili olup, bu fonksiyonların 2. derece diferansiyeli ile bulunur;

$$\frac{d^2z_1}{dx^2} = 2A_1 \approx \frac{1}{r_n} \quad 5.3$$

$$\frac{d^2z_1}{dy^2} = 2B_1 \approx \frac{1}{R_{wx}} \quad 5.4$$

$$\frac{d^2 z_2}{dy^2} = 2B_2 \approx \frac{1}{R_{rx}} \quad 5.5$$

Yukarıdaki formüllerde ray uzunluğunun sonsuz yarıçapta olması nedeni ile A_2 ihmal edilir. Burada $B_{1,2}$ ise tekerlek ve ray profilinden elde edilen yanal eğrilik olup, r_n ise tekerlek çapıdır ve yuvarlanma çapından elde edilir.

Yükleme yapılmadan önce, iki yüzey arasındaki bağıl uzaklık şu şekilde yazılabilir:

$$z_1 + z_2 = d = Ax^2 + By^2 \quad 5.6$$

Bu durumda $A = (1/2r_n)$ ve $B = 1/2(1/R_{wx}+1/R_{rx})$ olacaktır. Bu “A” ve “B” katsayıları ile temas alanı uzunlukları olan “a” ve “b” arasında bir ilişki vardır ve “a” boylamsal uzunluğu, “b” yanal uzunluğu belirtmektedir. Eğer $A > B$ durumu varsa temas alanının boyutları $b > a$ şeklindedir. Hertz teorisine göre bir Θ açısı tanımlanırsa:

$$\cos\theta = \frac{|B - A|}{B + A} \quad 5.7$$

Eğer $a > b$ ise, pratik olarak “a”, “b” ve “ δ ” (iki cismin merkezleri arasındaki mesafe) arasındaki bağıntılar şu şekilde tanımlanmıştır:

$$a = m \left(\frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \frac{1}{A+B} \right)^{1/3} \quad 5.8$$

$$b = n \left(\frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \frac{1}{A+B} \right)^{1/3} \quad 5.9$$

$$\delta = r \left(\left(\frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \right)^2 (A+B) \right)^{1/3} \quad 5.10$$

Bu formüllerde “E” elastisite modülü, “v” poisson oranı, “N” normal yük olup “m”, “n”, “r” değerleri Çizelge 5.1’de verilen θ açısına göre okunan değerlerdir. Temas alanı $\pi.a.b$ olup:

$$ab = mn \left(\frac{3}{2} N \frac{1-\nu^2}{E} \frac{1}{A+B} \right)^{2/3} N^{2/3} \quad 5.11$$

yazılarak, parantez içerisindeki terimler malzeme ve geometrik sabitler olup, ikinci terim ise sadece yükü temsil edecek şekilde denkleştirilir (Iwnicki, 2006). Temasın eliptik olduğu ve ortalama basıncın $N/\pi.a.b$ kabul edilirse, maksimum basıncın basitleştirilmiş haldeki formülü şu şekilde olur:

$$\sigma_{\max} = \frac{1,5N}{\pi ab} \quad 5.12$$

Çizelge 5.1 Hertz katsayıları

θ°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
m	1	1,128	1,285	1,486	1,754	2,136	2,731	3,816	6,612	∞
n	1	0,8927	0,8000	0,7171	0,6407	0,5673	0,4931	0,4122	0,3110	0
r	1	0,9932	0,9726	0,9376	0,8867	0,8177	0,7263	0,6038	0,4280	0

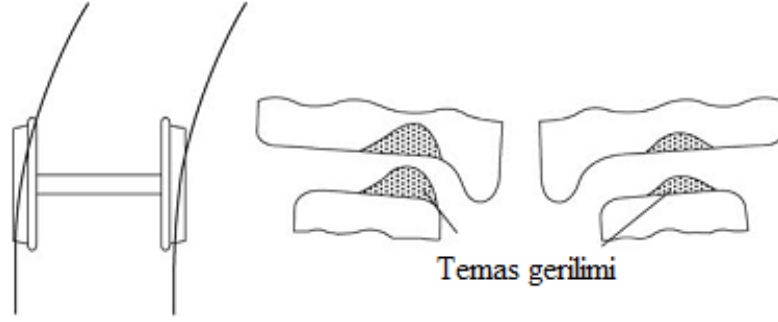
Maksimum Hertzian temas basıncı bir teker – ray sistemi için yaklaşık olarak 600 MPa değerlerinden başlayıp 2700 MPa değerlerine kadar çıkmaktadır. Normal işletme koşullarında temas basıncı 1500 MPa değerleri civarındadır (Lewis ve Olofsson, 2009).

Raylı sistem taşımacılığında 2000 metreden daha küçük yarıçapa sahip kurplar (dönemeçler) dar yarıçaplı kurplar olarak değerlendirilmektedir. Kurp yarıçapı küçüldükçe o kısımda çıkılabilecek maksimum hız azalmakta ve bakım maliyetleri artmaktadır. Dar yarıçaplı kurplarda ray daha hızlı aşınmakta ve düz raylara göre çok daha kısa periyotlarda rayların yenilenmesi gerekmektedir. Uluslararası Demiryolları birliğinin (UIC) Mart 2005 ve 721 numaralı talimatına göre yıllık 20 milyon tondan fazla tonaj ve 400 metreden küçük yarıçapı olan kurplarda mantarı sertleştirilmiş ray tavsiye edilmektedir. Yarı çapı 400 ile 700 metre arasındaki kurplarda sertleştirilmiş ya da sertleştirilmemiş ray kullanımına diğer ortam koşullarına göre karar verilmesini tavsiye edilmektedir. Mantarı sertleştirilmiş ray kalitesi R350, standart ray kalitesi ise R260 olup, Çizelge 5.2’de bazı Avrupa ülkelerindeki kurp yarı çapına göre ray kalitesi seçim tablosu verilmiştir (Innotrack, 2006: Çakır’dan 2014)

Çizelge 5.2 22,5 Ton aks yüküne kadar ve yıllık en az 20 MGT'luk yük taşıyan demiryolları için farklı ülkelerin ray kalitesi seçim tablosu

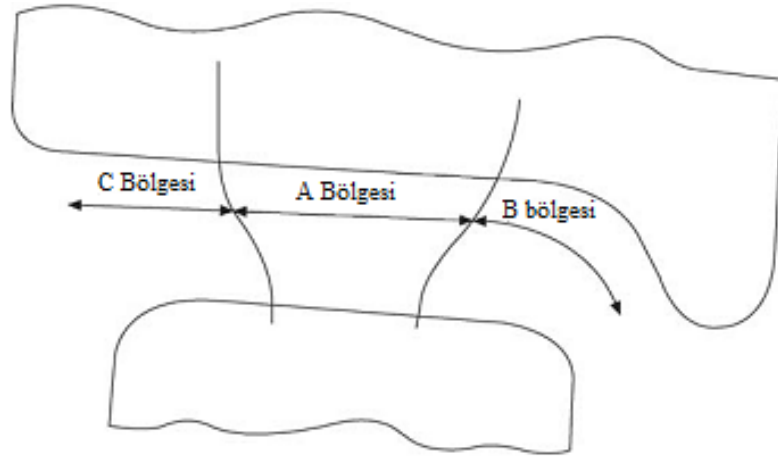
Radyus(m)	≤300	≤400	≤500	≤600	≤7000	≤800	≤1500	≤3000	3000>
UIC	R350HT		R350HT/R260			R260			
DB	R350HT (≥30000 t/d)					R260			
DB yeni	R350HT (≥50000 t/d)							R260	
CH	R350LHT		R350HT/R320Cr			R320Cr/ R350HT	R260		
CH önerilen	R370CrHT		R350LHT		Beynit 1200 m'ye kadar		R260		
AT	R350HT	R260							
SWE	R350HT	R260							
SWE (HH)	R350HT								R260
NOR	R350HT					R260			
UK, IT	R260								
BE, LUX DK, PL, H, RO	R350HT					R260			

Teker – ray temasının pozisyonu, trenin hareketi boyunca sürekli olarak değişmektedir. Temas noktası teker ve ray profiline, yolun eğrilik derecesine, tekerin boji içerisinde hareket esnasında kılavuzluk görevi görüp görmediğine aynı zamanda da boji tasarımına göre değişmektedir. Düz bir yolda, tekerin yuvarlanma yüzeyi (bandı) ray mantarı temas halinde olacağı fakat kurpta (eğri eksenli bir hatta) ise teker flanşı (boden) ile ray açıklığının köşesinin temas etmesi muhtemeldir. Şekil 5.5 sağ kurplu bir yolda kılavuzluk eden tekerlek setindeki iki tekerin ile rayın temas noktalarını ve gerilim dağılımının nasıl değiştiğini göstermektedir (Lewis ve Olofsson, 2009).



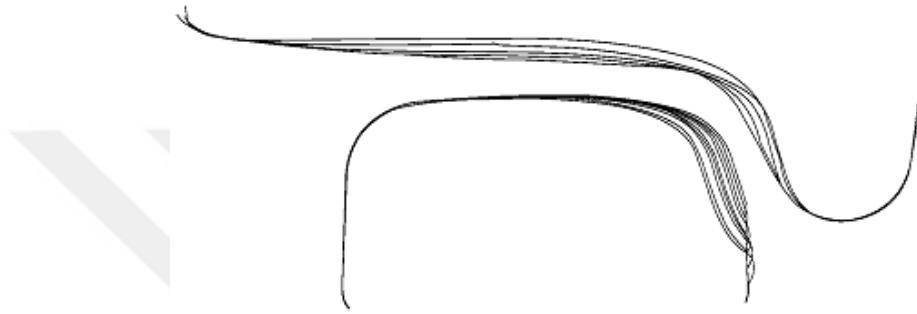
Şekil 5.5 Kılavuzluk eden tekerlek setinin sağ kurplu yola girişi (Lewis ve Olofsson, 2009)

Teker – ray temasında oluşabilecek üç durum Şekil 5.6’da gösterilmiştir. A bölgesi, teker yuvarlanma (yürüme) bandı ile ray mantarının temas durumudur. Bu teker – ray teması genel olarak düz bir hatta ilerlerken veya çok yüksek yarıçapa sahip kurpta ilerlerken oluşur. Bu halde en düşük temas basınçları ve yanıl kuvvetlerin oluştuğu durumdur. B bölgesi, teker bodeni ile ray açıklığının köşe kısmından temas durumudur. Bu bölgedeki temas A bölgesine göre daha küçük olup daha yüksek temas gerilmeleri ve aşınma oranları oluşur. Yüksek aşınma ve malzeme akışı gerçekleşirse, iki nokta teması yuvarlanma dairesi ile bodenin temasının açıkça görüleceği şekle dönüşebilir. C bölgesi, tekerin kenar bölgesi ile rayın temas durumudur. Bu temas durumunun oluşması düşük ihtimalli olup, eğer oluşursa çok yüksek gerilmelerin oluşacağı, tekerlek setinin uygunsuz hareketine sebep olacağından istenmeyen aşınma durumları ortaya çıkmaktadır.



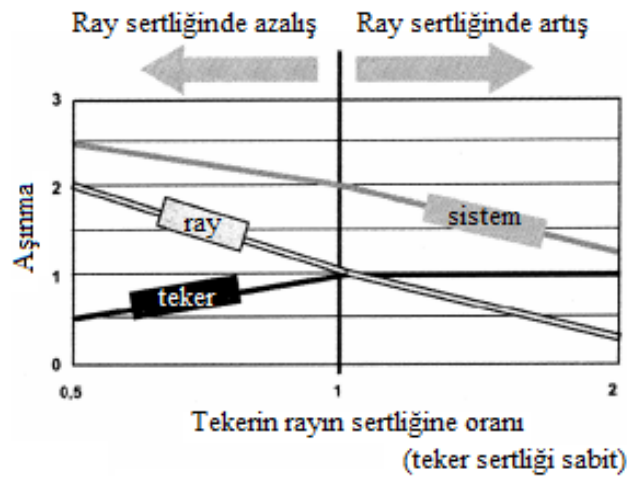
Şekil 5.6 Teker – ray temas noktaları (Lewis ve Olofsson, 2009)

Temas noktası tüm teker ve ray profili boyunca yayılmazsa, zaman ilerledikçe aşınma ve malzeme akışından dolayı profillerin şeklinin değişeceği bir gerçektir. Bundan dolayı temas gerilmesinin düzgün bir şekilde belirlenmesi, profilin ne şekilde değişeceğini tahmin etmek açısından önemlidir. Temas gerilmesi aynı zamanda yuvarlanma temas yorulmasının da ana sebeplerinden birisidir. Stockholm’de yerel trafik hattında kullanılan teker ve ray profilinin iki yıl içerisindeki değişimi Şekil 5.7’de gösterilmiştir (Lewis ve Olofsson, 2009).



Şekil 5.7 İki yıllık süreç boyunca teker ve ray profilinin değişimi (Lewis ve Olofsson, 2009)

Teker ve rayın aşınma oranı olarak dengeli bir şekilde gidilmesi isteniyorsa, sertlik açısından doğru bir seçim yapılmalıdır. Bu konuda yapılan pratik ve teorik çalışmalar ise teker malzemesinin sertliği sabit kalmak şartı ile, ray malzemesinin sertliğini artırması sonucunda teker aşınmasının hemen hemen sabit kaldığını göstermektedir. Bu durum Şekil 5.8’deki grafikte verilmiştir (Zajic vd., 2016).



Şekil 5.8 Ray sertliğine bağlı olarak teker – ray aşınması (Zajic vd., 2016)

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde teker – ray aşınma modelleri çalışmalarına yer verilmiştir. Özetlenen çalışmalarda önemli görülen ve tez aşamasında kullanılan “Plint TE 53” cihazına yakın aşınma modelleri incelenmiştir. Araştırmacılar çeşitli temas koşullarında farklı parametre ve malzemeler kullanmışlardır.

Cuevas vd. (2011), yaptıkları çalışmada frenleme esnasında kullanılan kumun parçacık boyutlarının adhezyon ve teker – ray kontağında meydana gelen aşınma üzerindeki etkilerini laboratuvar ortamında araştırmışlardır. İkiz disk yuvarlanma kayma hareketi yapabilen SUROS (Sheffield University Rolling Sliding) düzeneği sayesinde teker – ray teması simüle edilmiştir. Hidrolik kriko sayesinde 4,7 kN yük uygulanarak temas noktasında 1,2 GPa Hertzian basıncı elde edilmiştir. Bu basınç değeri Hollanda’da kullanılan yolcu trenlerinin teker – ray arasındaki basınç değerine eş değerdedir. Ray malzemesi olarak R260Mn kalitesindeki raydan ve B5T kalitesindeki tekerden çıkarılan 47 mm çapında ve 10 mm genişliğinde hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Deney esnasında farklı şaftlara bağlanan teker numunesi ray numunesine göre daha hızlı dönmekte olup, ray numunesinin dönüş hızı 400 dev/dak olarak belirlenmiştir. Üç farklı kayma temsili çekiş ve frenleme işlemi test boyunca göz önünde bulundurulmuştur. Parçacık boyutuna etkisi olacak dört farklı kum tipi kullanılmışlardır. Kumlar bir boru yardımı ile yer çekiminin etkisi altında serbest olarak temas noktasına beslenmiştir. Bir vakum sistemi de temas noktasından düşen kumları ortamdaki uzaklaştırmaktadır. Test başlangıcında da yaprak parçaları mevcuttur. Her test başlangıcında ray ve teker numuneleri yenilenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda varılan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir. Yapraklar, aşındırıcı kum parçacıklarının sürekli olarak beslenmesi ile yüzeyden hızlı bir şekilde yok olmuştur. Büyük tanecik boyutlar ve yüksek kaymalar daha yüksek adhezyon katsayılarına neden olmuştur. Bu durum teker ve ray numunelerinde daha derin plastik deformasyona sebep olmuştur. Büyük tanecik boyutları ve yüksek kaymalar teker ve ray numunelerin yüzeyinde meydana gelen deformasyon sertleşmesini artırmıştır. Tanecik boyutları, kaymaya da bağlı olarak aşınma üzerinde büyük bir etkisi vardır. Yüksek kaymada aşınma eğilimi adhezyon katsayısına bağlı gibi iken, düşük kaymalarda bu eğilim tam tersine doğrudur.

Liu vd. (2011a), yaptıkları çalışmada JD-1 teker/ray simülasyon setini kullanarak, kuru ve ıslak koşullar altında teker/ray temasında adhezyon davranışını araştırmışlardır. Tüm deneyler JD-1 setinde yapılmıştır. Test setindeki küçük çaplı numune çeken veya çekilen araçlarda kullanılan tekeri temsilen “wheel roller” ve büyük çaplı numune ise rayı temsil etmesi amacı ile “rail roller” demişlerdir. Kullanılan numuneler hali hazırda serviste olan ray ve teker malzemeleridir. Teker numunesinin çapı 210 mm ve ray numunesinin çapı 1050 mm olarak belirlemişlerdir. Temas basıncını artırmak amaçlı teker numunesinin ray numunesi ile temas ettiği kısım 40 mm yarıçaplı olacak şekilde radyus verilmiştir. Her ikisi de ayrı şaftlara bağlanarak bir DC motoru tarafından tahrik edilmiştir. Temas basınç değerleri 1050 MPa, 1120 MPa ve 1190 MPa değerlerine denk gelecek şekilde aks yükü uygulanmıştır. Numuneler üzerinde aynı zamanda atak açısı değeri verilerek kurplardaki aşınmanın simüle edilmesi sağlanmıştır. Atak açısı değerleri 0° , $0,2^\circ$, $0,3^\circ$ ve $0,4^\circ$ olup teğet çizgisinin kurp yarıçapı 3000 m, 1600 m ve 1000 m değerleri göz önünde bulundurmışlardır. Ray numunesinin hızı ise 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h olarak ayarlanmış ve çevrim sayısı 5×10^2 olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar şu şekilde sıralanabilir. Teker – ray temasında adhezyon davranışı krepaj oranına, hıza ve atak açısına ciddi oranda bağlıdır. Krepaj oranının artması ile beraber kuru koşullar altında, adhezyon katsayısı artmakta ve %1 krepaj oranında maksimum değerine ulaşmaktadır, %5’lik değerlerde ise hafif bir düşme gözlemlenmiştir. Hızın, atak açısının ve aks yükünün artması ile teker/ray adhezyon katsayısında ciddi bir düşüşe sebep olmuştur. Sulu yağlama testleri, teker/ray adhezyon davranışını ciddi oranda etkilemiştir. Teker/ray arasına eklenen suyun adhezyon katsayısını ciddi oranda düşürmüştür. Sulu koşullar altında, hızın ve atak açısının artması ile adhezyon katsayısı düşmüştür.

Liu vd. (2011b), yaptıkları çalışmada JD-1 teker/ray simülasyon setini kullanarak, yağ, su ve kumlama koşulları altında teker/ray temasında adhezyon davranışını incelemişlerdir. Tüm deneyler JD-1 setinde yapılmıştır. Test setindeki küçük çaplı numune çeken veya çekilen araçlarda kullanılan tekeri temsilen “wheel roller” ve büyük çaplı numune ise rayı temsil etmesi amacı ile “rail roller” demişlerdir. Kullanılan numuneler hali hazırda serviste olan ray ve teker malzemeleridir. Teker numunesinin çapı 210 mm ve ray numunesinin çapı 1050 mm olarak belirlemişlerdir. Temas basıncını artırmak amaçlı teker numunesinin ray numunesi ile temas ettiği kısım 40 mm yarıçaplı olacak şekilde radyus verilmiştir. Her ikisi de ayrı şaftlara bağlanarak bir DC motoru tarafından tahrik edilmiştir.

Temas basınç değerleri 1120 MPa, 1161 MPa ve 1194 MPa değerlerine denk gelecek şekilde aks yükü uygulanmıştır. Ray numunesinin hızı ise 60 km/sa, 90 km/sa ve 120 km/sa olarak ayarlanmış ve çevrim sayısı 5×10^2 olarak belirlemişlerdir. Yağ ve yağ – su karışımı olan sıvı teker – ray temas yüzeyine, açılan bir kanal vasıtası ile 5 ml/dak debi oranında eklenmiştir. Su ve yağ karışımı olan sıvının oranı %50 su ve %50 yağdır (SE15W/40). Kumlama yapıldığında ise, kum sürekli olarak PVC bir boru yardımı ile 20 g/dak oranında temas noktasına püskürtülmüştür. Yapılan deneyler ile birlikte şu sonuçlara varmışlardır. Yağ, teker – ray adhezyon katsayısını kuru ve ıslak koşullar ile kıyaslandığında ciddi oranda düşürmüştür. Artan hızla beraber, adhezyon katsayısı yağ, su ve kum koşulları altında azalmıştır. Artan aks yükü ile birlikte, teker – ray adhezyon katsayısı 3 farklı koşulda artmıştır. En yüksek adhezyon katsayısı yağ, su ve kum karışımı şartlarında elde edilmiştir. En düşük adhezyon katsayısı su ve yağ karışımında elde edilmiştir. Kum, adhezyon katsayısını yağ ve su koşulları altında artırabilmektedir. Adhezyonun, kumlama ile artma etkisi özellikle su koşullarında daha iyi gözlemlenmektedir. Teker – ray temas yüzeylerindeki yağ kalıntısının, çeşitli koşullar altında trenin güvenli bir işletim sağlaması için tamamen temizlenmesi tavsiye edilmektedir.

Zhu vd. (2012), yaptıkları çalışmada teker – ray temasında görülen düşük adhezyon problemini mini traksiyon cihazı ile simüle etmeye çalışmışlardır. Testler kuru koşullar altında ve su veya yağı yağlayıcı olarak kullanarak, yüzey pürüzlülüğünün adhezyon katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile yapmışlardır. Test ekipmanı olarak, $\frac{3}{4}$ " küre (yaklaşık olarak 19,05 mm çapında) ve 46 mm çapında disk kullanılarak gerçek temas koşullarını temsil etmesi amacı ile yaklaşık 1,25 GPa değerlerine ulaşmışlardır. Kullanılan malzemeler AISI 52100 rulman çeliği, UIC60 900A kalite ray ve R7 sınıfı tekerlektir. Yuvarlanma hızı kademeli olarak artırılarak 1500 mm/s olacak şekilde belirlenmiştir. Başlangıç periyodu etkilerini azaltmak amacı ile tüm deneyler 3 dakika boyunca 1500 mm/s yuvarlanma hızında ve 700 MPa veya 900 MPa temas basınçlarında planlanan yağlama koşullarında yapılmıştır. Vardıkları sonuçları şu şekilde sıralayabiliriz. Yağ yağlamalı testlerde, pürüzlü yüzeyler pürüzsüz yüzeylere göre daha yüksek adhezyon katsayısına sahip olmuştur. Yüzey topografisi, pürüzsüz yüzeye sahip disklerde çizik haricinde az değişmiştir. Sıcaklığın 20°C'den 5°C'ye değişmesinde adhezyon üzerinde az bir etkisi olmuş, fakat artan basınç adhezyon katsayısını artırmıştır. Sulu yağlama testlerde, pürüzsüz yüzeylere sahip numunelerde çok düşük adhezyon katsayılarına, 0,02 değerine sahip olup ki bu değer yağ

yağlamalı test değerlerinden bile düşüktür. Sulu yağlama testlerinde yüzeylerde, yağ yağlamalı testlere göre daha az çizikler mevcuttur. Pürüzlülüğün ve yağ sıcaklığının adhezyon üzerindeki, elastohidro-dinamik yağlamanın baskın olduğu yağ ile yağlama koşulları altında, etkisi ihmal edilebilir seviyededir. Buna karşılık, sulu yağlama koşulları altında yüzey pürüzlülüğünün ve su sıcaklığının adhezyon üzerinde önemli derece etkisi vardır. Çoklu cisim simülasyon (Multi-body simulation) modellemesi, sulu yağlama temas koşulları için yüzey pürüzlülüğü ve su sıcaklığı göz önüne alınarak geliştirilebilir.

Ay ve Çelik (2013), kullanılmış rayın mantar kısmından çıkarılan numunelere, kuru ve ıslak koşullarda farklı temas basınçlarında ve kayma hızlarında aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma modeli olarak disk üzerinde küre olup, CSM “tribometer” kullanılmıştır. Küre malzemesi WC olup 3 mm’lik çapa sahiptir. Deney koşulları ise, 5 cm/s, 7.5 cm/s, 10 cm/s, 12 cm/s kayma hızlarında ve 8 N yük altında uygulanmıştır. Kuru koşullarda 30°C’de %30-35 nem oranında, ıslak koşullarda ise 29,3°C sıcaklıkta bulunan su banyosu içinde testleri gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar şu şekildedir. Her bir hız değer için ıslak koşullar daha düşük sürtünme katsayıları bulunmuştur. Hem ıslak hem kuru koşullar için hızın artması ile beraber aşınma da artmıştır.

Ramalho vd. (2013), yaptıkları çalışmada temas koşullarının, karbon ve düşük alaşımli ray – teker çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarına olan etkisini araştırmışlardır. Kayma oranı, temas basıncı ve teğetsel hızın bileşke çekiş katsayısını ve aşınma miktarı üzerindeki etkisini görmek amacı ile iki disk yuvarlanma kayma testini uygulamışlardır. Temas noktasının altındaki çatlak ilerlemesini ve temas gerilmesinin neden olduğu gerinim sertleşmesi etkisini değerlendirmek amacı ile taramalı ve optik mikroskopi ve mikro sertlik deneylerini uygulamışlardır. Yuvarlanma kayma ve tek yönlü kayma testleri teker ispitlerinin aşınmasını değerlendirmek amacı ile uygulanmışlardır. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4140 çeliği teker malzemesi olarak, normalize edilmiş AISI 1055 çeliği ise ray malzemesi olarak kullanılmıştır. Teker – ray temas noktasındaki hem basıncı artırmak hem de zorlu aşınma koşullarını simüle etmek amacı ile 60 mm çapında ve 10 mm genişliğinde disk şeklinde hazırlanan numunelerden ray malzemesine ait numunenin orta kısmında 1,50 mm’lik bir çıkıntı bırakılacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Sadece kayma koşullarını simüle edebilmek adına da ray numunesinin kalınlığını 2,25 mm ölçüsünde hazırlanmış ve bu numuneyi aşınma testleri boyunca dönme hareketi yapmayacak

şekilde sabitlemişlerdir. Kullanılan test cihazı “Multi-Purpose Friction and Wear Tester model TE 53 of PLINT” olup üzerinde birkaç modifikasyon yapılmıştır. Yapılan modifikasyon ile yük uygulanması ölü yük sistemi yerine pnömatik yay ve yük hücresi ile yapıya gelecek kuvvetlerin ayarlanması sağlanmıştır. Temas noktasındaki basınç değerleri 0 MPa’dan başlayıp 1000 MPa değerlerine kadar çıkarılmıştır. Krepaj değerleri ise %0 ile %15,23 değerleri arasında değişmektedir. Hız değerleri aralığı ise 0,5 m/s ile 1,85 m/s değerleri arasındadır. Vardıkları sonuçlar ise kısaca şu şekilde sıralanabilir; temas basıncındaki bir artış sürtünme katsayısını ve aşınma hacmini artırmaktadır. Perlitik çelikler düşük sertlik değerlerine rağmen gerinim sertleşebilme özelliğinden dolayı en az beynitik çelikler kadar iyi bir performans sergilemiştir. Kayma oranının artması farklı hata çeşitliliğini artırmıştır örneğin düşük kayma oranları için yuvarlanma temas yorulması, orta kayma oranlarında plastik deformasyon ve yuvarlanma temas yorulması kombinasyonları, yüksek kayma oranlarında ise plastik deformasyon ve oksidasyon gözlemlenmiştir. Düşük teğetsel hızlar numune üzerindeki en yüksek aşınma kayıplarını adhezyondan dolayı tetiklemiştir ve yüksek kayma hızlarında ise sıcaklığın artmasından dolayı oksidasyonun artmasına neden olmuştur. Sıcaklığın artışı aşınma rejimini krepaj oranı testlerini ve kayma hız testlerini farklı şekilde etkilemiştir. Farklı kayma hız testlerinde aşınma direncini artırmış ve farklı krepaj oranı testlerinde aşınma direncini düşürmüştür, her iki durumda da oksidasyonun artmasından dolayıdır.

Abbasi vd. (2013), disk üzerinde pim aşınma cihazını kullanarak, “friction modifiers” in teker – ray temasında, kuru ve yağlı koşullar altında aşınma sonucu oluşan parçacıkların üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Diskler ve pimler kullanılmış, R7 kalite tekerlek ve UIC 60 raydan, sırası ile 270 ve 280 HV sertlik değerlerine sahiptir. Ölü yük uygulama sistemi ile disk üzerinde pim cihazı ile yuvarlak uca sahip pime 40 N yük uygulayarak maksimum temas basıncını ki bu yaklaşık olarak 550 MPa’dan fazla olup aşınmayı simüle etmeye çalışmışlardır. Kayma hızı 0,1 m/s’dir. İki farklı “friction modifiers”, Tip A (bitki yağı bazlı) ve Tip B (su bazlı), kullanılmıştır. Buna ek olarak rayların yağlanması için kullanılan özel yağ, karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Biyolojik olarak çözünür olan ray için kullanılan yağ, temas noktasına bir şırınga yardımı ile bir bilgisayar tarafından kontrol edilen yazılım yardımı ile her 8 m’de 0,02 g yağlayıcı besleyerek uygulanmıştır. Tip A ve Tip B sürtünme değiştiricileri, ince bir fırça kullanılarak disk yüzeyi yağlayıcı madde ile kaplayacak şekilde uygulanmıştır. Daha sonra da parçacık ölçüm

analizleri yapılmıştır. Sürtünme değiştiriciler, havaya salınan kaba parçacıkların azaltılmasında ray veya teker üzerinde kullanılabilir. Su bazlı yağlayıcının kullanılması teker – ray temasında çok ince parçacıkların oluşturabilir. Yüksek temas sıcaklık potansiyel durumlarında (dar kurplar, yüksek aks yükleri ve sıcak hava koşullarında) su bazlı yağlayıcılarda, buharlaşmanın fazla olacağından dolayı bu durum gözden geçirilerek kullanılması tavsiye edilmektedir.

Wang vd. (2015a), teğetsel kuvvetlerin teker malzemesinin aşınma ve yuvarlanma temas yorulma davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma esnasında özel olarak tasarlanmış JD-1 teker – ray simülasyon standı sayesinde teker malzemesinin davranışını incelemişlerdir. Deneyler, iki ayrı şafta bağlanan 68 mm çaplı teker numunesi ile 1050 mm çapa sahip ray numunesini temsil eden JD-1 teker – ray simülasyon standında yapılmıştır. Ray numunesinin bağlandığı şaft DC motor tarafından kontrol edilmektedir. Teker ve ray arasındaki normal, teğetsel ve yanal kuvvetler sensörler yardımı ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. 16 – 330 N arasında değişen teğetsel kuvvetleri manyetik güç freni sayesinde oluşturmuşlardır. Teker ve ray arasındaki açı farkı olarak bilinen atak açısı, döner kanat plaka sayesinde istenilen değerlerde verilmiştir. Kullanılan malzemeler ise, teker malzemesi olarak gerçek tekerlek bodeninden çıkarılmış, ray numunesi ise gerçek ray malzemesinden üretilmiştir. Teker – ray arasındaki maksimum temas basıncı ise 1120 MPa olarak belirlenmiştir. Ray numunesinin dakikadaki dönme hızı 56 dev/dak ve teker numunesinin dönüş sayısı ise 10^6 olacak şekilde ayarlanmıştır. Temas noktasındaki kayma oranları ise %0,1, %0,8, %1,4 ve %2'dir. Atak açısı ise 1200 m yarıçapa sahip bir kurptan geçerken oluşacak açıya eş değer bir açı belirlenmiş ve bu açının da oluşturacağı değer de 200N'luk bir kuvvete eş değerdir. Tüm deneyler 18 – 23°C sıcaklık değerinde, %50 – 70 değerlerinde bir nem oranı altında yapılmıştır. Vardıkları sonuçları şu şekilde sıralayabiliriz. Teğetsel kuvvetlerin artması ile beraber tekerin yüzey sertlik değeri ve aşınma kayıplarının arttığını tespit etmişlerdir. Yüzey çatlak ağzlarının bileşke sürtünme kuvvetlerinin yönüne dik olduğunu bulmuşlardır. İkincil çatlakların ve çok katmanlı çatlaklar gözle görülebilir olduğunu ve çok katmanlı çatlakların ara katmanlı malzemesinin kırılmaya kolay olduğunu bulmuşlardır. Aşınma kalıntılarının kompozisyonu ise Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve demirden oluşmaktadır.

Wang vd. (2015b), yaptıkları çalışmada yuvarlanma – kayma hareketi yapan test aparatı kullanarak, dönme hızının teker – ray malzemeleri üzerindeki aşınma ve hasar davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Testler iki ayrı şafta bağlanarak yuvarlanma ve kayma hareketi kabiliyetine sahip bir cihazda gerçekleştirilmiştir. Çapı 40 mm olan raydan çıkarılan numune ile çapı 40 mm tekerden çıkarılan numunenin temas noktasına denk gelen kısmında 14 mm radyus verilerek, 220 N kuvvet altında Hertzian maksimum temas basıncı yaklaşık olarak 1460 MPa değerine ulaşılmıştır. Alt şafta ray numunesi, üst şafta ray numune bağlanmıştır. 100, 300, 500 ve 800 dev/dak olmak üzere 4 farklı dönme hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Vardıkları sonuçları şu şekilde sıralanabilir. Artan dönme hızları ile birlikte ray numunesinin sertliği değişmemiş iken teker numunesinin sertliği artması sonucu teker/ray sertlik değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Artan dönme hızları, teker numunesindeki aşınmayı artırmışken ray numunesinde azalma meydana gelmiştir. Teker numunesindeki yüzey hasar morfolojisinde yorulma çatlakları ve adhesiv aşınmanın birleşimi şeklinde baskın gelmiş iken, ray numunesinin yüzey morfolojisinde açık bir şekilde soyulma ve kavlama hasarları gözlemlenmiştir. Teker numunesinin yorulma çatlağı, yumuşak ferrit çizgileri ile beraber plastik deformasyon alanına doğru ilerler iken ray numunesindeki çatlaklar yüzeye paralel olacak şekilde veya yüzeye doğru yönelecek şekilde bir eğilim göstermişlerdir. Yüzey çatlakları, tekil katmanlı çatlaklar ve çok katmanlı çatlaklar olarak bölünmüşlerdir. Çok katmanlı çatlakların ara katmanlarındaki çatlaklar kırılmaya meyilli olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma kalıntıları Fe_2O_3 ve martenzitten oluşmaktadır. Dönme hızının artması ile beraber, kalıntıların büyüklüğü azalmakta ve martenzit içeriği artmaktadır.

Zhu vd. (2015a), yaptıkları çalışmada disk üzerinde pim aşınma cihazını kullanarak çevresel koşulların ve demir oksitlerin teker – ray temasında meydana gelen aşınma performansının üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deney sırasında kullanılan diskler R7 kalite tekerlekten çıkarılmış olup, pim ise 5 mm yarıçapında yuvarlatılmış şekilde UIC 900A kalite ray malzemesinden üretilmiştir. Lineer hız 0.01 m/s olarak belirlenmiş, temas basıncı ise Hertzian temas teorisine göre 900 MPa olacak şekilde uygulanmıştır. Test süresi 18 dakika olarak belirlenmiş ki bu da yaklaşık 18 m'lik kayma mesafesine denk gelmiştir. Aşınma mekanizmaları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak analiz edilmiş ve çevresel koşullara yüksek derecede bağlı olduklarını saptamışlardır. Numuneleri temiz temas yüzeylerinde artan bir nem oranı ile adhesiv aşınma mekanizmasından oksidatif aşınma

mekanizmasına dönüşecek şekilde test etmişlerdir. Vardıkları sonuçları kısaca sıralarsak; temiz teker – ray temas testleri için üç farklı sıcaklık değerlerinde (3°C, 10°C ve 20°C) ve düşük relatif nem oranında (%40) genel olarak adhesiv aşınma gözlemlenmiş olup, düşen sıcaklık değerleri ile adhesiv aşınma daha fazla hâkim olduğunu ve aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir. Teker – ray teması artan nem ile beraber daha az aşınmaya maruz kaldığını tespit etmişlerdir. Oksitlenmiş teker – ray teması genel olarak abrazyon aşınmanın hâkim olduğunu bulmuşlardır. Düşen sıcaklık değerleri ile beraber, temas yüzeyinden daha fazla kopan aşınma parçacıkları üç cisimli abrazyon aşınma gibi davranmasına sebep olarak aşınma işlemini daha da etkin hale getirdiğini bulmuşlardır. Relatif nem oranının %85'lere kadar artması ile beraber, temiz teker – ray temas testlerinde oda sıcaklıklarında (10°C ve 20°C) aşınma mekanizmasının adhesiv aşınmadan oksidatif aşınmaya doğru değiştiğini bulmuşlardır. Kendiliğinden oluşan oksit pulcukların, pimi etkili bir şekilde ciddi bir aşınmadan koruduğunu gözlemlemişlerdir. Düşük sıcaklık değerlerinde (3°C), oksit pulcukların yerine küçük oksit tanecikleri bulunmuştur.

Zhu vd. (2015b), kuru ve ıslak koşullarda demir oksitlerin ve yüzey pürüzlülüğünün teker – ray temasına olan etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma için disk üzerinde disk aşınma test cihazını kullanmışlardır. CL60 kalite tekerden 40 mm çaplı, 10 mm genişliğinde ve temas noktasında basıncı artırmak amaçlı 5 mm genişliğinde çıkıntı bırakılan disk teker numunesi olarak kullanılmıştır. U71Mn kalitedeki raydan ise 40 mm çapında ve 1mm genişliğinde disk üretilmiştir. Alt şafta bağlanan ray numunesi, üst şafta bağlanan teker numunesinden daha hızlı dönmekte olup, 400 dev/dak bir hız ile dönmektedir. Teker ray arasındaki temas basıncı ise 800 MPa olacak şekilde ayarlanmıştır. Kuru koşullar altında test süresi 60 dakika, ıslak koşullar altına ise 180 dakika olarak belirlenmiştir. Kayma oranı ise %0,91 olarak uygulanmıştır. Islak test koşullarda suyun debisi ise 0,5 l/dak olacak şekilde ayarlanmıştır. Demir oksitler iklim denetim çemberinde oluşturulmuştur ve iki farklı yüzey pürüzlülük değerinde ve kuru ve ıslak koşullarda test etmişlerdir. Aşınan yüzeyler taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı görüme gözlemi ve X ışınları kırınım ölçeri kullanılarak değerlendirilmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün oksit tabakalarını yok etmesi üzerine etkisini ve adhezyonun tekrar aktif hale gelmesindeki rolü üzerine fazladan bir test seti uygulamışlardır. Varılan sonuçlardan kısaca bahsederek; kuru koşullar altında kalın oksitler ile beraber kaba yüzeyler çok yüksek derecede adhezyon ve aşınma değerlerine sahip olsa da düşük adhezyon problemi beklenmedik şekilde gözlemlendiğini tespit etmişlerdir.

Ayrıca oluşan oksit katmanların zorlu temas koşullarından dolayı kaldırıldığını tespit etmişlerdir. Islak koşullar altında ise, ince oksit tabakaların, temas eden yüzeylerin ihmal edilebilir düzeyde aşınmaya uğramasına yardımcı olduğu ve düz bir topografi elde edilmesini sağladığını bulmuşlardır. Fakat artan yüzey pürüzlülüğünün ya da kalın oksit tabakaların aşınmayı artırdığını vurgulamışlardır. Yüzey pürüzlülük değeri ne olursa olsun, kalın oksit tabakasının aşınma oranını ciddi bir şekilde artırdığını ve kaba yüzey pürüzlülüğünün ince oksit tabakasını kaldırıp adhezyonu tekrar aktif hale gelmesinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Ramalho (2015), yaptığı çalışmada EN 260 ray çeliği ve R7 teker çeliği kullanılarak yapılan testlerde temas koşullarının sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Laboratuvar ortamında simüle edilen testlerde ikiz disk yuvarlanma – kayma test düzeneği kullanılarak krepaj oranının, temas basıncının ve teğetsel hızın çekiş katsayısı ve aşınma miktarı üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Hacim kayıpları deney numunelerinin test öncesi ve sonrası ağırlıkları tartılarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Aşınma hacimleri kullanılarak Archard modeline dayanan aşınma denklemleri geliştirilmiş ve ağırlık faktörleri göz önünde bulundurularak krepaj oranının, temas basıncının ve teğetsel hızı spesifik aşınma oranına bağlı olarak tahmin etmeye çalışmıştır. Tahmin edilen sonuçlar ile laboratuvar ortamında test edilen sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Ön görülen değerler ile laboratuvar test sonuçları arasında çok az farklılık bulunmuş ve öngörülen metodun güvenilirliği onaylandığını ortaya çıkarmıştır. Aşınma mekanizmalarını araştırmış ve gerçek teker – ray setinde görülen yorulma çatlakları ile karşılaştırmış ve temas eden yüzeyler altında deformasyon sertleşmesi mekanizmasını açıklamaya çalışmıştır. Yapılan bu çalışmada teker – ray temas noktasındaki hem basıncı artırmak hem de zorlu aşınma koşullarını simüle etmek amacı ile 60 mm çapında disk şeklinde hazırlanan numunelerden ray malzemesine ait numunenin ucuna 1 mm’lik bir çıkıntı bırakılacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan test cihazı “Multi-Purpose Friction and Wear Tester model TE 53 of PLINT” olup üzerinde birkaç modifikasyon yapılmıştır. Yapılan modifikasyon ile yük uygulanması ölü yük sistemi değil de pnömatik yay ve yük hücresi ile yapıya gelecek kuvvetlerin ayarlanması sağlanmıştır. Temas noktasındaki basınç değerleri 300 MPa ile 1000 MPa değerleri arasında değişmiştir. Krepaj oranları %0 ile %1,75 değerleri arasında tutulmuştur. Hız aralığı ise 0,1 m/s ile 1,5 m/s değerleri arasındadır. Deney şartları, aşınma cihazının limitleri ile gerçek uygulamadaki değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Yapılan testler sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir; yapılan tüm testler sonucunda aşınma miktarı teker numunelerinde fazladır. Fakat tamamen yuvarlanma durumunda bir istisna oluşturduğunu ve aşınma miktarının teker ve rayda hemen hemen eşit olduğu vurgulanmıştır. Temas basıncında meydana gelen artış aşınma hacmini artırmakta ve özellikle en yüksek temas basıncı aşınmayı ciddi oranda artırdığı bulunmuştur. Düşük teğetsel hızlar numuneler üzerinde aşınmayı ciddi oranda artırdığını ve artan lineer hız ile birlikte azaldığı bulunmuştur. Genel olarak krepaj oranının artması hem teker hem ray numunesinde spesifik aşınma oranının azalmasında etkili olduğunu vurgulamıştır. Archard aşınma denkleminde dayandırılarak öngörülen metot ile aşınma katsayısının tahmini temas basıncının, kayma hızının ve krepaj oranının etkileri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Öngörülen metot ile elde edilen değerler deneysel sonuçlar birbirine çok yakın olup, ortalama rölatif hata teker için %7,6 ve ray için %6 olduğunu bulmuştur.

Literatür taraması sonucunda, borlu çeliklerin ray malzemesi olarak kullanım olanağını araştıran iki çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kassfeldt ve Lundmark (2009), aynı anda yuvarlanma ve kayma hareketi yapan aşınma cihazı kullanılarak, sertleştirilmiş yüksek dayanımlı borlu çeliğin tribolojik özellikleri hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amacı, borlu çelik ile UIC 1100 ray çeliği olmak üzere iki farklı çeliğin, “Blue light” olarak adlandırılan teker çeliği karşısında, kuru ve ıslak koşullar altında tribolojik özelliklerinin araştırılması ve karşılaştırılmasıdır. Sonuçların değerlendirilmesinde 3D optik yüzey profil, mikro sertlik ölçümler, ışık mikroskobu ve SEM/EDS analizleri kullanılmıştır. UIC 1100 kalitedeki raydan elde edilen numunenin çapı 40 mm, “Blue light” tekerinden elde edilen numunenin çapı 42 mm ve borlu çelikten elde edilen numunenin çapı ise 45 mm’dir. Tüm disk numunelerin kalınlığı 10 mm’dir. Numuneler arasındaki çap farklılığının nedeni ise temin edilen malzemelerin imalat kısıtlamalarından dolayıdır. Testler sırasında UTM 2000 Wazau çift disk cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz çizgi şeklinde temas yüklemesini mümkün kılmakta ve aynı anda yuvarlanma ve kayma hareket kabiliyetine sahiptir. Temas noktasındaki basınç ölü yük sistemi sayesinde üretilmektedir. 2000 N kuvvet uygulanarak yaklaşık 0,9 GPa değerinde basınç elde edilmiştir. Dönüş hızı 200 dev/dak ve %1 kayma oranı ile 5 saatlik deney planı yapılmıştır. Silindirik disk numuneler ayrı şaftlara monte edilerek dönme hareketi bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Deneyler süresince sürtünme torkları

kaydedilmiş ve kütle kayıpları hesaplanmıştır. Son olarak aşınmış yüzeyler ve alt yüzey değişimleri analiz edilmiştir. İki ana test serisi uygulanmıştır. Birisi kuru koşullar altında ve diğeri temas bölgesine su eklenerek yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda şu sonuçlara varılmıştır. Borlu çeliğin temas halinde olduğu teker çeliği ile aynı anda yuvarlanma – kayma ve temas yükü yüksek koşullar altında, yüksek aşınma direnci ve stabil sürtünme performansı sergilemiştir. Güvenlik sebepleri nedeni ile sürtünmenin çok fazla düşürülmesi kabul edilemez çünkü frenleme kuvvetlerinin yeterli olması sağlanmalıdır. Hemen hemen sabit olan sürtünme katsayısı hava koşulları ile değişebilir, kuru ray veya ıslak ray gibi durumlarda, borlu çelik diğer geleneksel ray malzemesine göre kıyaslandığında, frenleme esnasında yüksek güvenlik, hızlı ivmelenme ve planlanan zaman çizelgeleme içerisinde kalmasını kolaylaştırmasından dolayı büyük bir avantaj sağlamaktadır. Sabit sürtünme katsayı değerleri aynı zamanda teorik modellerin kullanımını da kolaylaştırmaktadır. Kuru koşullar ve ıslak koşullar altında düz bir yüzey ile birlikte, temas yarım saat sonra ki bu toplam test süresinin 1/10'una denk gelen zamanda kararlı hale gelmiştir. Islak koşullar altında ise kararlı hale gelme süresi ise yaklaşık 2 saat sonunda gerçekleşmiştir. Sürtünme kat sayısını ıslak koşullar altında 0,3 ile 0,35 değerleri arasında ve kuru koşullar altında 0,35 ile 0,4 değerleri arasında bulmuşlardır. Borlu çelik su eklendikten sonra %80-85 oranında hala çekiş mevcut olduğunu UIC 1100 ile yapılan deneyde ise su eklendiğinde %50 oranında sürtünme azalması gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Çakır vd. (2016), yaptıkları çalışmada hızlı tren hatlarında kullanılan raylardan çıkarılmış perlitik ray numunesi ve iki farklı kimyasal bileşime sahip borlu çeliğin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Birinci numune olarak raydan çıkarılan numune direkt olarak kullanılmış, ikinci numune olarak raydan çıkarılan numuneye 860°C'de ısıtılarak östenitlenmiş, yağda su verilmiş ve son olarak da 200°C sıcaklıkta 1 saat süre ile temperlenmiştir. İki farklı kimyasal bileşime sahip olan borlu çeliklere ise 850°C'de 30 dakika boyunca ısıtılarak östenitlenmiş, suda su verilmiş ve son olarak da 200°C sıcaklıkta 1 saat boyunca temperlenmiştir. Aşınma modeli olarak disk üzerinde küre olup, CSM “tribometer” kullanılmıştır. Küre malzemesi WC olup 3 mm'lik çapa sahiptir. Deney koşulları ise, 10 N yük uygulanarak, 50 m kayma mesafesi ve 100 dev/dak hızda gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir. Borlu çelikler, perlitik ray çeliklerine göre daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir. WC küre karşısında borlu çelikler daha yüksek sürtünme katsayısı değerlerine sahiptir. Bu deneysel

Çalışma sonucunda, borlu çeliklerin ray malzemesi olarak demiryolu üstyapısında kullanılma potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır.



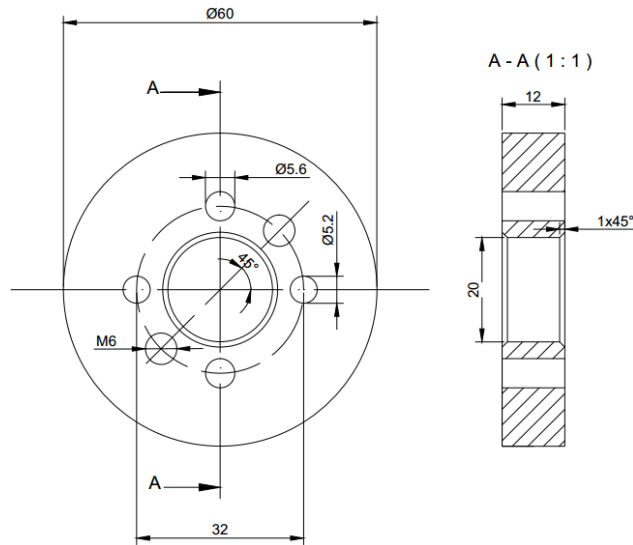
7. MATERYAL VE YÖNTEM

7.1. Deneysel Malzemeler

Bu çalışmada, farklı karbon ve bor elementlerine sahip AISI 51B60H ve 30MnB5 kalitesindeki iki borlu çeliğin, hızlı tren üstyapısında kullanılmakta olan ray malzemesine alternatif olup olmayacağı, sürtünme ve aşınma davranışları yönünden laboratuvar ortamında deneysel olarak araştırılmıştır. Aşınma deneyinde ray malzemesi olarak kullanılacak olan numuneler, standart ray (R260 kalite) malzemesinin mantar kısmından Şekil 7.1’de gösterildiği gibi, raya alternatif diğer numuneler ise borlu çeliklerden yapılarını bozmayacak şekilde talaşlı imalat teknikleri uygulanarak aşınma test cihazına uygun ölçülerde Şekil 7.2’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır.



Şekil 7.1 Hızlı tren üstyapısında kullanılan raydan numunelerin çıkarıldığı kısım

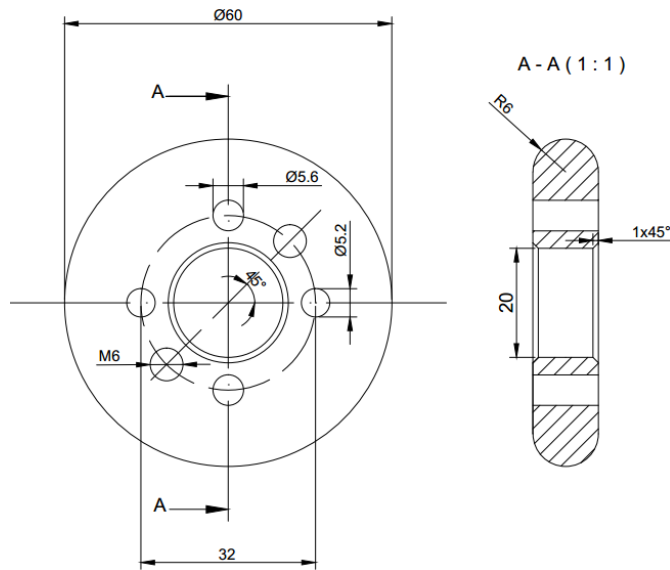


Şekil 7.2 Ray ve borlu çelik malzemelerinden hazırlanmış deney numunesi boyutları

Aşınma çiftini oluşturan diğer eleman ise tren tekeridir. Sürtünme ve aşınma deneylerinde karşıt cisim olarak kullanılacak teker numuneleri ise, belirli standartları karşılayan ER 9 sınıfı alaşımsız çelik malzemeden yapılmış lokomotif tekerinden talaşlı imalat teknikleri ile yapısını bozmadan çıkarılarak hazırlanmıştır. Teker numunelerinin çıkarıldığı yerler şematik olarak Şekil 7.3’de gösterilmiştir. Teker numuneleri aşınma test cihazı kitapçığında belirtildiği gibi temasın tam ve tek noktadan oluşmasını sağlamak amacı ile 6 mm yuvarlatma yapılarak Şekil 7.4’de verilen ölçülerde işlenerek hazırlanmıştır. Bu yuvarlatma işlemi ile aynı zamanda da gerçek teker – ray temasında ulaşılan yüksek temas basınç değerlerine daha düşük yüklerde kolaylıkla ulaşılmıştır. Aşınma numunelerinin dışında, farklı incelemelerde kullanılmak üzere hazırlanan, aynı deney şartlarına sahip küp şeklindeki numunelerin bir ölçüsü ise 12,7 mm’dir.



Şekil 7.3 Teker numunelerinin tekerden çıkarıldığı kısım



Şekil 7.4 Teker malzemesinden hazırlanmış deney numunesi boyutları

Hızlı tren üstyapısında kullanılan ray malzemesi (referans) ve bir lokomotif tekerinden hazırlanmış numunelere herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Borlu çeliklerden hazırlanan numunelere ise literatürden örnek alınarak ısıl işlem uygulanmıştır. 51B60H ve 30MnB5 kalite borlu çelik numuneler Eskişehir’de faaliyet gösteren Tavsan Isıl İşlem sanayi bünyesinde bulunan ısıl işlem fırınında 850°C östenitleme sıcaklığında 30 dakika boyunca bekletilen numuneler, oda sıcaklığındaki suda su verilerek sertleştirilmişlerdir. Su verme işleminden sonra 200°C sıcaklıkta bir saat süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır.

Deneyleerde kullanılan ray çeliğinin kimyasal analizi Eskişehir Şeker Makine Fabrikası laboratuvarında bulunan spektral analiz cihazı ile tespit edilmiş diğer malzeme türleri olan 51B60H borlu çeliği, 30MnB5 kalite borlu çeliği ve ER 9 sınıfı teker çeliğinin kimyasal analizleri ise sırası ile Bursa Asil Çelik Fabrikası, Eskişehir Turan Tarım Makinaları ve Eskişehir TÛLOMSAŞ kurumlarından temin edilmiştir. Tüm deney numunelerinin kimyasal bileşimleri sırası ile Çizelge 7.1 – 7.4 arasında verilmiştir.

Çizelge 7.1 R260 kalite ray malzemesinin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Co	Ti
0,71	0,28	1,052	0,015	0,032	0,04	0,004	0,013	0,001	0,021	0,001	0,002	0,0017

Çizelge 7.2 51B60H kalite borlu çeliğinin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Sn	B	Ti
0,63	0,24	0,91	0,009	0,004	0,87	0,01	0,1	0,008	0,08	0,005	0,0012	0,026

Çizelge 7.3 30MnB5 kalite borlu çeliğinin kimyasal kompozisyonu

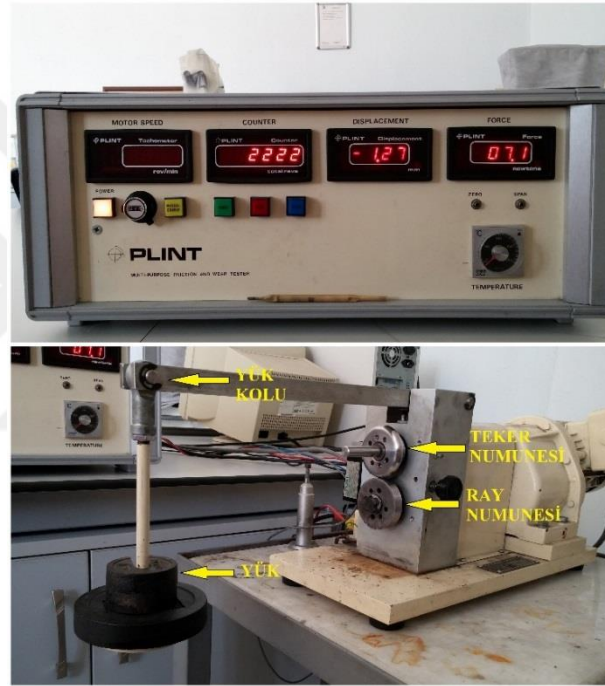
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	B	Ti
0,32	0,29	1,33	0,012	0,002	0,14	0,006	0,05	0,049	0,05	0,003	0,004	0,035

Çizelge 7.4 ER9 sınıfı alaşımsız çelik tekerleğin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
0,60	0,40	0,80	0,02	0,015	0,30	0,08	0,30	0,06	0,08

7.2. Aşınma Deneyleri ve Koşulları

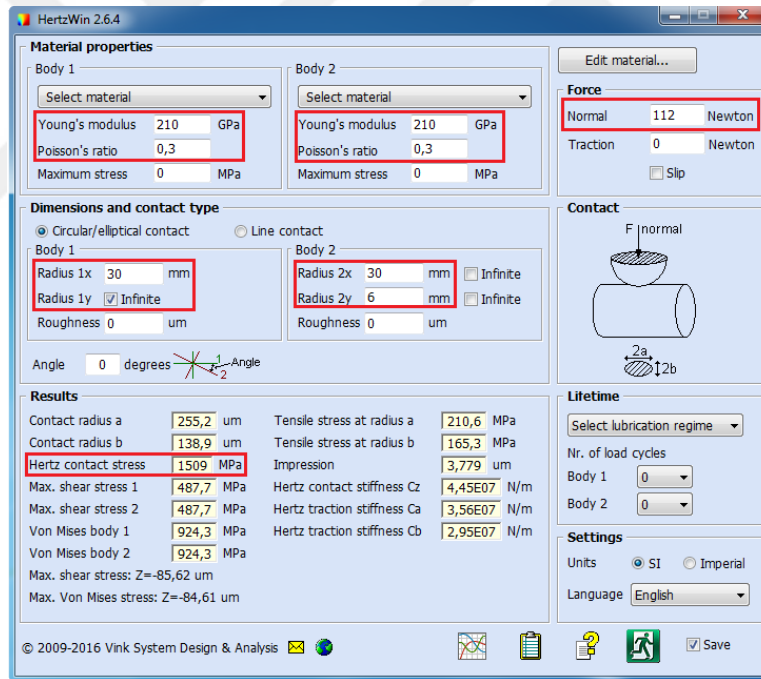
Aşınma deneyleri, referans ray malzemesi ve araştırma konusu olan borlu çeliklerden hazırlanmış toplam dokuz adet aşınma numunesi (her birinden üçer adet) ve karşıt cismi oluşturan her bir grup için ayrılmış toplam üç adet teker numunesi, Plint TE53 marka sürtünme ve aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri toplama sistemi ile deneyler sırasında oluşan sürtünme kuvvetleri kaydedilmiştir. Aşınma cihazının ve test edilecek numunelerin cihaza bağlanmış şekildeki fotoğrafları Şekil 7.5’de gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Plint TE 53 aşınma cihazı ve teker – ray numune aşınma çiftinin cihaza bağlanmış görüntüsü

Plint TE53 cihazının üst tutucusuna bağlanan 6 mm ölçüsünde yuvarlatılmış (crowned) teker numunesi ile alt tutucusuna bağlanan ray numunesi arasında, normal işletme şartlarında olduğu gibi 1,5 GPa’lık Hertzian temas basıncına ulaşabilmesi için ne kadar bir kuvvet gerektiği hesaplanmıştır. Bu temas basıncı hesaplanırken, Hollanda menşeli “Vink System Design & Analysis” şirketi tarafından geliştirilen ve ücretsiz olan “Hertz Contact Stress Calculations, HertzWin” yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın ara yüzüne ait ekran görüntüsü Şekil 7.6’da verilmiştir. Ara yüzde yer alan “Material Properties” (Malzeme Özellikleri) başlığı altında bulunan “Body 1” ve “Body 2” (Cisim 1 ve Cisim 2) sekmeleri malzemelere ait özellikler olup, deneyler esnasında kullanılan malzemeler çelik olduğundan

dolayı Elastisite Modül değeri 210 GPa ve Poisson oranı da 0,3 olarak belirlenmiştir. Önemli olan parametrelerden birisi de “Dimensions and Contact Type” (Ölçüler ve Temas Çeşidi) başlığı altında bulunan temas eden yüzeylerin ölçüsüdür. İlk olarak “Circular/elliptical contact” (dairese/eliptik temas) tipi seçilmiştir. “Body 1” sekmesi altındaki ray numunesinin ölçüleri “Radius 1x” olup yarıçap değeri olarak 30 mm, herhangi bir yuvarlatma yapılmadığı için ise “Radius 1y” değeri “Infinite” (sonsuz) olarak belirlenmiştir. “Body 2” sekmesi altındaki teker numunesinin ölçüleri “Radius 2x” olup yarıçap değeri olarak 30 mm, 6 mm yuvarlatma yapıldığı için “Radius 2y” değeri 6 mm olarak belirlenmiştir. “Force” (Kuvvet) sekmesinde bulun alana yazılan 112 N’luk bir kuvvet altında yaklaşık 1,5 GPa’lık temas basıncına ulaşıldığı görülmüştür. Plint TE53 cihazının ölü yük sistemini göz önüne aldığımızda, 14 N’luk ağırlık takılarak bahsedilen temas basınç değerlerine çıkıldığı belirlenmiştir.



Şekil 7.6 HertzWin yazılımına ait ara yüzün ekran görüntüsü

Tüm deney setlerinde yaklaşık 1,5 GPa’lık temas basıncı altında aşınma testleri tamamlanmıştır. Deney sırasında kayma ve yuvarlanma hareketini de temsil etmesi açısından, Plint TE53 cihazın dişli setleri ayarlanarak %5,18 “slip” (kayma) oranı ile çalıştırılmıştır. Deney sırasında temas eden teker – ray numunelerin dönüş yönü Şekil 7.7’de gösterildiği gibi birbirine zıt şekildedir. Her bir aşınma testi toplamda 40000 tur

döndürülerek tamamlanmıştır. Deney hızı 200 dev/dak olarak belirlenmiş, ki yaklaşık olarak bu da 0,6283 m/s hıza denk gelmektedir. Bu deney şartları seçilirken, sertlik açısından en yüksek değere sahip numune olan 51B60H borlu çeliğinin, kuru kayma şartları altında teker numunesi karşısında belirgin bir aşınmanın tespit edildiği ön deneylere göre belirlenmiştir.



Şekil 7.7 Teker – ray numunelerinin dönüş yönü

Servis süresi boyunca bir raylı sistem araç tekerinin raya teması sadece kuru şartlardan oluşmamaktadır. Ray yüzeyinde bazen çamur, kum ve yaprak gibi üçüncü aşındırıcı cisimler olmakla birlikte bazı durumlarda yağmur ve neme maruz kalarak yüzeyinde su birikimi de oluşmaktadır. Gerçek çalışma durumunu temsil etmesi açısından, testler hem kuru hem ıslak çalışma koşullarında tamamlanmıştır. Şekil 7.8’de gösterildiği gibi, aşınma cihazına ait hazne içerisine su eklenerek, bahsedilen sulu kayma koşulu temsil edilmeye çalışılmıştır. Alt tutucuya bağlanan ray numunesine temas eden su, deney boyunca ray – teker temas bölgesine taşınmıştır. Tez içerisinde suyla temas etme durumuna ıslak şartlar altında tanımlaması yapılmıştır. Tüm deneyler, oda sıcaklığında ve %32 bağıl neme sahip ortam koşullarında tamamlanmıştır.



Şekil 7.8 Plint TE53 cihazına ait hazne

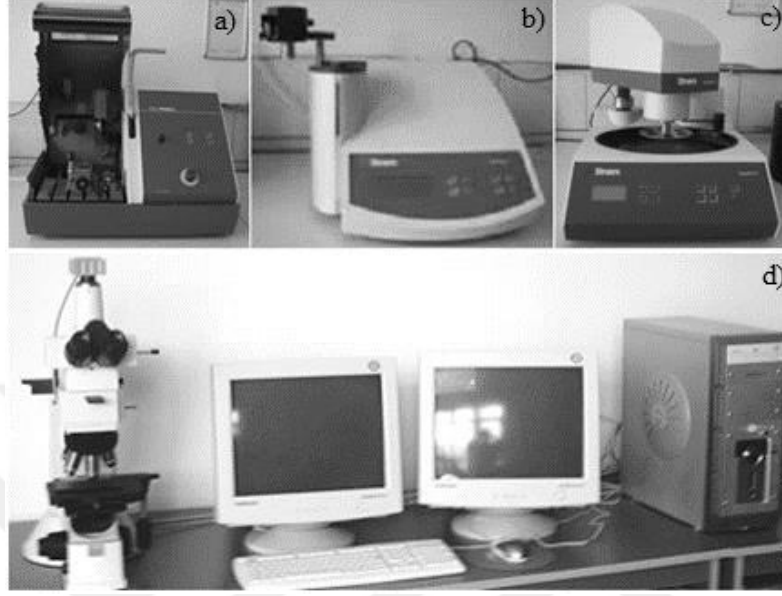
7.3. Sertlik Ölçümleri

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde, basit olması ve diğer test metodlarına göre daha az tahrip etmesi sebebi ile sertlik ölçümünün büyük bir önemi vardır. Bu çalışmada da ray, teker, 51B50H ve 30MnB5 çeliğinden hazırlanmış numunelerin sertlik değerleri, Rockwell C skalasında 150kg yük ve üç farklı noktadan alınan ölçüm sonuçları ile belirlenmiştir.

7.4. Mikro Yapı İncelemeleri

Mikro yapı incelemelerinde, ray ve borlu çelik numunelerin 12,7mm x 12,7mm x 12,7mm ölçüsünde hazırlanan küp şeklinde numuneler kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanması esnasında Struers Discotom-50 (Şekil 7.9a) kesme cihazı kullanılmıştır. Kesilen numuneler Struers CitoPress-1 (Şekil 7.9b) cihazı kullanılarak kalıplanmıştır. Kalıplanan numuneler, Şekil 7.10'da gösterilen Struers Tegraforce 4500 (Şekil 7.9c) cihazında, 150 dev/dak dönme hızında 400 – 1200 gritlik zımparalar kullanılarak zımparalanmış, 5 dakika boyunca 150 dev/dak dönme hızında 3 µm boyutundaki elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numunelerin yüzeyi yeni hazırlanan %2'lik nital dağlama çözeltisi kullanılarak yaklaşık 30 saniye dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numunelerin yüzeyi alkollü pamuk ile silinmiştir. Hazırlanan numuneler, Nikon

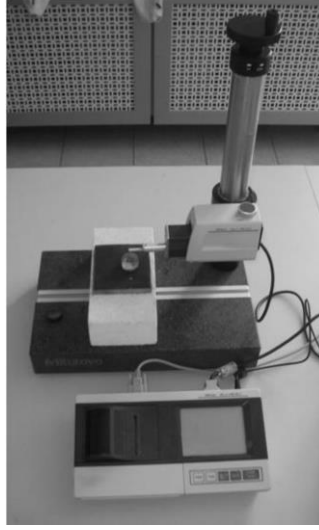
Eclipse L150 (Şekil 7.9d) marka görüntü analiz sisteminde optik mikroskopla incelenmiş, mikro yapı görüntüleri alınmıştır.



Şekil 7.9 a) Struers Discotom 50 kesme cihazı, b) Struers CitoPress-1 kalıplama cihazı c) Struers Tegraforce 4500 zımparalama ve parlatma cihazı, d) Nikon Eclipse L150 görüntü analiz sistemi

7.5. Aşınma Oranlarının Hesaplanması

Deney numuneleri hazırlanırken, tüm aşınma çiftlerini oluşturacak numunelerin yüzeyleri, 20µm değerlerinin altında olacak şekilde hazırlanmıştır. Böylece, farklı yüzey pürüzlülük değerlerinin aşınma deney sonuçlarına etkisinin mümkün olduğunca en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında, yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 7.10'da gösterilen Mitutoyo SJ-400 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümler yapılırken ISO 97 standardı, Gauss filtreleme ve R profil değerleri kullanılmıştır. Deneyler sonunda farklı açılardan yapılan ölçümler ile aşınma izlerinin alanları tespit edilmiş, ortalama aşınma alanları yardımıyla aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Literatürdeki aşınma oranı hesaplama yöntemi kullanılarak aşınma oranları belirlenmiştir.



Şekil 7.10 Mitutoyo SJ-400 profil ölçüm cihazı

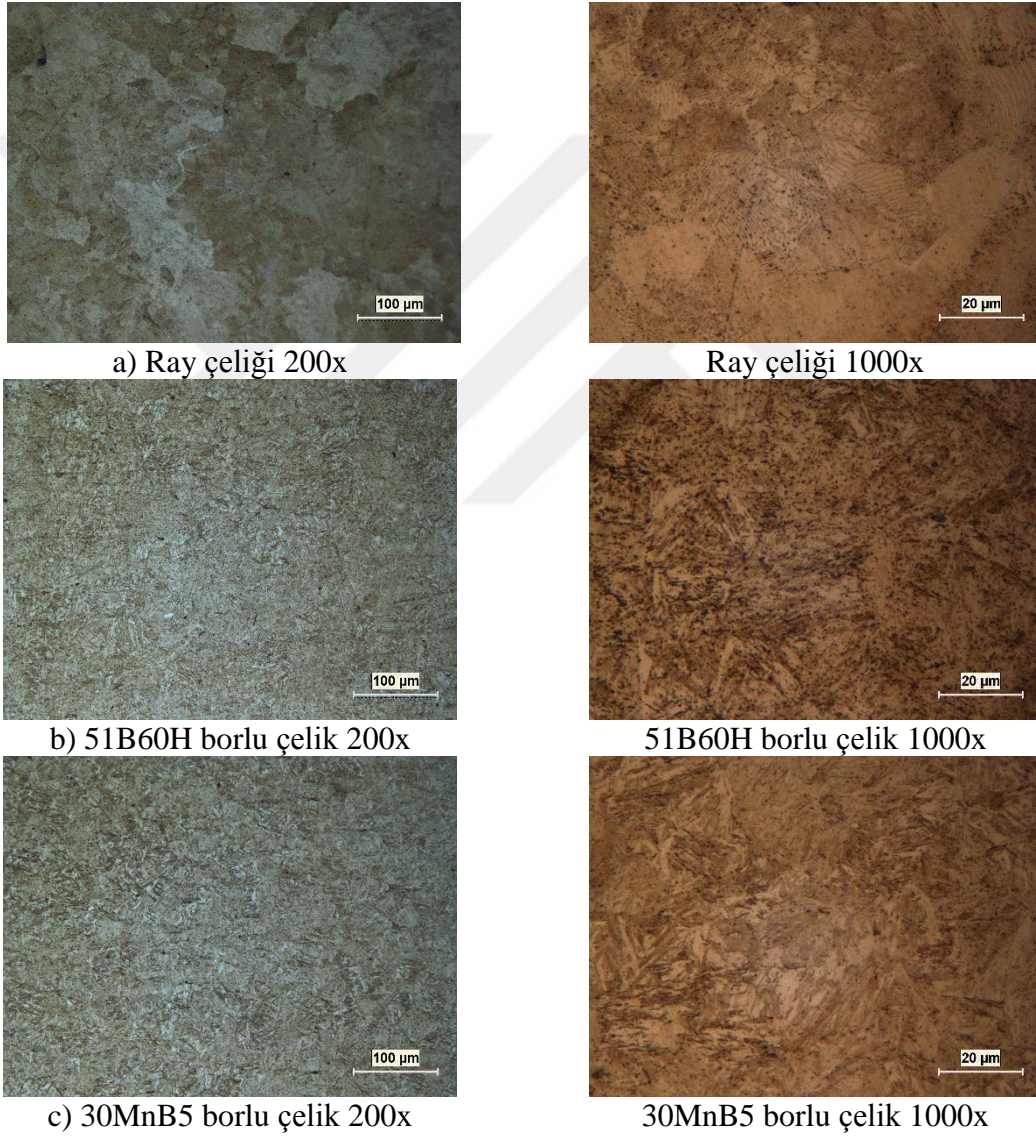
7.6. SEM İncelemeleri

SEM incelemelerinin aşınma davranışlarını karakterize etmekte büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. Deneyle sonunda, aşınma çiftini oluşturan teker – ray numunelerinin aşınmış bölgeleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan JEOL– JSM 5600LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

8.1. Mikro Yapı Sonuçları

Standart ray numunesi ve raya alternatif olarak incelenen iki farklı kalitedeki borlu çelik numunelerinin 200 ve 1000 büyütme mikroyapı görüntüleri Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1 Standart ray ve iki farklı kalitedeki borlu çeliğin mikroyapı görüntüleri a) Ray çeliği 200x ve 1000x, b) 51B60H borlu çelik 200x ve 1000x c) 30MnB5 borlu çelik 200x ve 1000x

Ray çeliğinin mikro yapısına bakıldığında perlitik yapıdan meydana geldiği gözlenmektedir. Ray çeliğinin 1000 büyütme mikro yapı fotoğrafında parmak izine benzer perlit içerisindeki ferrit (α) ve sementitten (Fe_3C) oluşmuş lamelli yapı mevcuttur. 51B60H borlu çeliğinde östenitleme ve ardından suda su verme işlemi sonunda, martenzitik bir yapı elde edilmiştir. Aynı şekilde 30MnB5 borlu çeliğinde de yapılan östenitleme ve suda su verme işlemi sonucunda yapının martenzitik bir yapıya dönüştüğü gözlenmiştir.

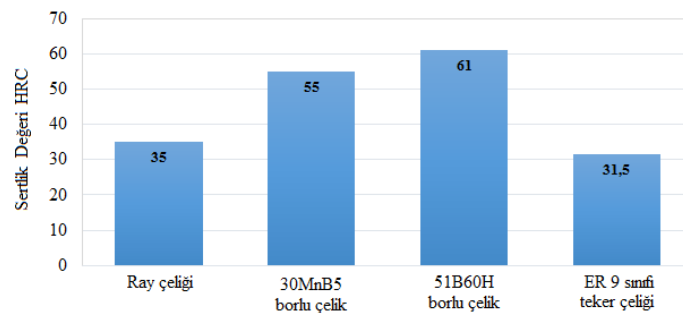
8.2. Sertlik Deneyi Sonuçları

Ray – teker çiftini oluşturacak her bir malzeme çiftinin sertlik ölçümleri Rockwell C skalasında (HRC) ölçülmüştür. Hazırlanan deney numunelerinin yüzeyine konik batıcı uç, üç farklı noktadan batırılarak sertlik ölçümleri alınmıştır. Çizelge 8.1’ de her bir numuneye ait sertlik ölçüm değerleri verilmiştir.

Çizelge 8.1 Deney numunelerinin sertlik değerleri

Ölçüm No	Ray çeliği			30MnB5borlu çelik			51B60H borlu çelik			Teker çeliği		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sertlik Değeri HRC	35	36	34	55	54	56	59	61	63	31,5	32	31

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda sertlik değerleri; ray çeliğinin 34 – 36 HRC, 30MnB5 borlu çeliğinin 54 – 56 HRC, 51B60H borlu çeliğinin 59 – 63 HRC, teker çeliğinin 31 – 32 HRC arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan bu ölçümlerin aritmetik ortalama değerleri Şekil 8.2’de gösterilmiştir.

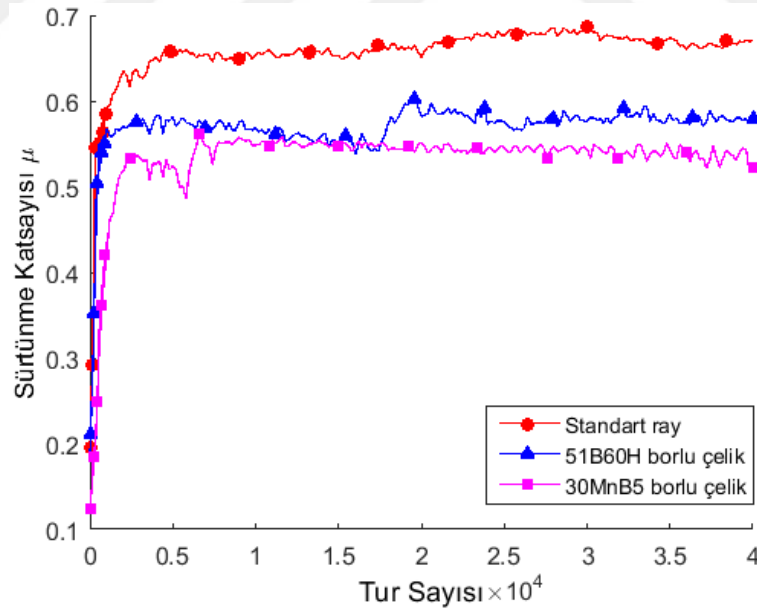


Şekil 8.2 Deney numunelerinin ortalama sertlik değerleri

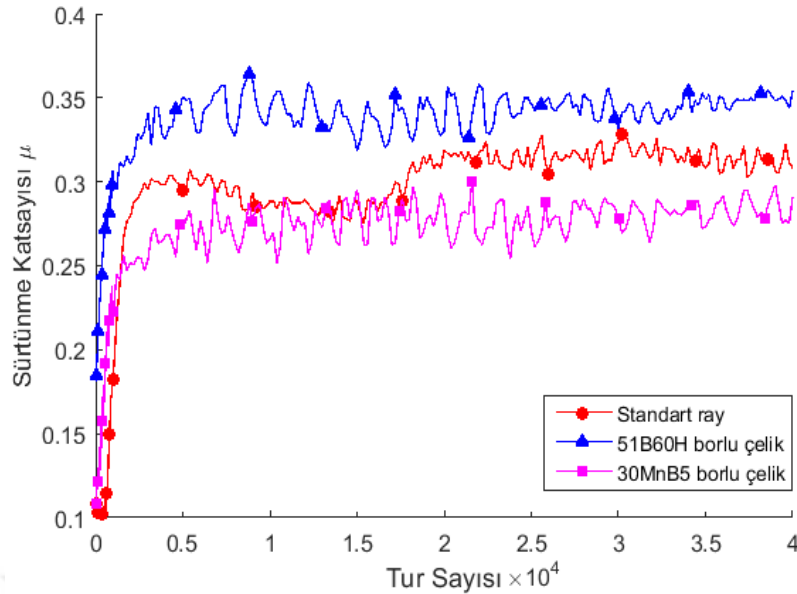
51B60H borlu çeliği 61 HRC sertlik değeri ile en sert deney numunesidir. Bunun sebebi sahip olduğu karbon miktarı ve bor elementinin sertleşebilirliğe olumlu etkisinden dolayıdır. Bor, tane sınırlarında birikerek östenitin ferrite dönüşümünü geciktirerek, martenzit oluşumunu desteklemektedir. 51B60H çeliğinden daha yumuşak olan 30MnB5 borlu çeliğinde de aynı durum geçerlidir. Ray çeliği ve ER9 sınıfı teker çeliğinin sertlik değerleri birbine yakın olup, servis şartlarında dengeli bir aşınma için bu değerlerin tasarlanıldığı düşünülmektedir.

8.3. Sürtünme Eğrileri ve Sürtünme Katsayı Değerleri

Veri toplayıcısından alınan sürtünme kuvvet değerleri Matlab yazılımına aktarılmıştır. Deneyler süresince aşınma çiftine etkileyen normal kuvvet 112 N'dur. Sürtünme katsayıları, sürtünme kuvvet değerlerinin normal kuvvet değerlerine bölünmesi ile her bir deney seti için hesaplanmıştır. Ölçülen sürtünme katsayılarının tur sayısına karşı değişim grafiği kuru şartlar için Şekil 8.3'te, ıslak şartlar için Şekil 8.4'te verilmiştir.



Şekil 8.3 Teker numunesine karşılık standart ray, 51B60H çeliği ve 5630 çeliğinin kuru şartlar altında sürtünme katsayısının tur sayısına karşı değişim grafiği



Şekil 8.4 Teker numunesine karşılık standart ray, 51B60H çeliği ve 5630 çeliğinin ıslak şartlar altında sürtünme katsayısının tur sayısına karşı değişim grafiği

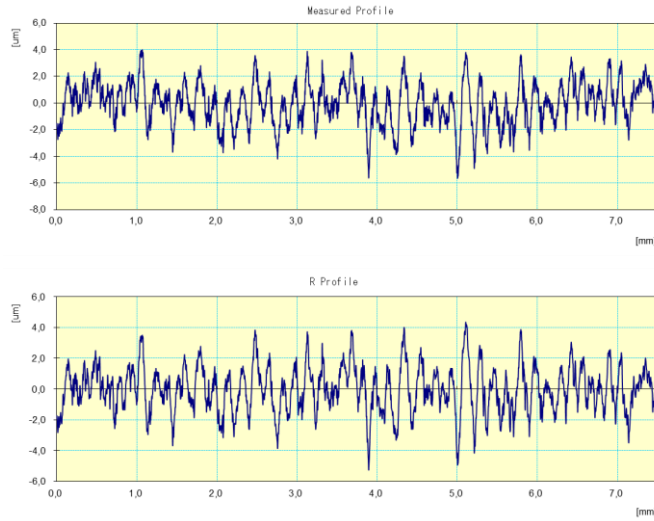
Teker numunesinin kuru şartlar altında standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çeliklerine karşı sürtünme eğrileri deney başlangıcından yaklaşık 4000 tur sonra, ki bu yaklaşık 753 m mesafe ve 20 dakikalık deney süresine denk gelmektedir, daha düzgün ve kararlı bir davranış sergilemiştir. Ayrıca deney sonuna dek sürtünme eğrilerinde büyük bir dalgalanma gözlenmemiş, dengeye geldikten sonra sabit bir şekilde deneyler tamamlanmıştır. Dengeye gelmiş haldeki ortalama sürtünme katsayı değeri standart ray numunesi için 0,66 olarak tespit edilmiştir. Alternatif olarak kullanılması planlanan borlu çelik numunelerin ortalama sürtünme katsayı değerleri ise 51B60H için 0,57 ve 30MnB5 için 0,54 olarak tespit edilmiştir. Zhu'nun (2013) çalışmasında bahsettiği gibi 19°C sıcaklıkta, aktif olarak kullanılan kuru bir ray üzerinde "hand push tribometer" cihazı ile yapılan ölçümlerde sürtünme katsayısı 0,6 – 0,7 değerleri arasında bulunmuştur. Ayrıca, Olofsson ve Telliskivi'nin (2003), yaptığı çalışmada kuru şartlar altında, demiryolu hattı üzerinden ölçülen sürtünme katsayısı değerleri ile laboratuvar koşullarındaki sürtünme katsayısı değerlerini kıyaslamış ve ölçülen değerleri birbirine çok yakın olarak 0,5 ile 0,6 aralığında tespit etmiştir. Bu çalışmada ölçülen ray numunesinin ortalama sürtünme katsayısı, bahsedilen aralık değerleri ile tam bir uyum sağlamaktadır. 51B60H borlu çelik numunesi standart ray numunesine göre yaklaşık %13 oranında daha düşük bir ortalama sürtünme katsayısı değerine sahiptir. Diğer bir alternatif olan 30MnB5 borlu çelik ise standart ray numunesine göre yaklaşık %18 oranında daha düşük bir ortalama sürtünme katsayısı değeri sergilemiştir.

Teker numunesinin ıslak şartlar altında standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çeliklerine karşı sürtünme eğrileri deney başlangıcından, yaklaşık 6000 tur sonra ki bu yaklaşık 1130 m mesafe ve 30 dakikalık deney süresine denk gelmektedir, denge haline gelmiştir. Fakat deneyler süresince sürtünme eğrilerinde sürekli bir dalgalanma gözlenmiştir. Bu dalgalanmanın en büyük sebebi ise adhezyonu (tutunmayı) düşüren sulu kayma koşullarıdır. Dengeye gelmiş haldeki ortalama sürtünme katsayı değeri standart ray numunesi için 0,30 olarak tespit edilmiştir. Borlu çelik numuneler olan 51B60H için 0,34 ve 30MnB5 için ise 0,27 olarak tespit edilmiştir. Islak koşullar altında 51B60H borlu çeliği, standart ray numunesine göre yaklaşık %13 oranında daha yüksek sürtünme katsayı değerine sahiptir. Diğer alternatif olan 30MnB5 borlu çeliği ise, standart ray numunesine göre %10 oranında daha düşük sürtünme katsayı değerine sahiptir. Zhu'nun (2013) çalışmasında bahsettiği gibi 5°C sıcaklıkta ve yağmurlu bir havada aktif olarak kullanılan ray üzerinde "hand push tribometer" cihazı ile yapılan ölçümlerde sürtünme katsayısı 0,2 – 0,3 değerleri arasında bulunmuştur. Bahsedilen bu aralık değeri, standart ray numunesinin sahip olduğu ortalama sürtünme katsayısı değeri ile örtüşmektedir. Kassfeldt ve Lundmark (2009), ıslak koşullar altında teker numunesine karşılık borlu çelik malzemesinin sürtünme kat sayı değerini 0,3 – 0,35 arasında tespit ettiğini belirtmiştir. Bu aralık değeri, bu çalışmada ölçülen borlu çeliklerin sürtünme katsayısı değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

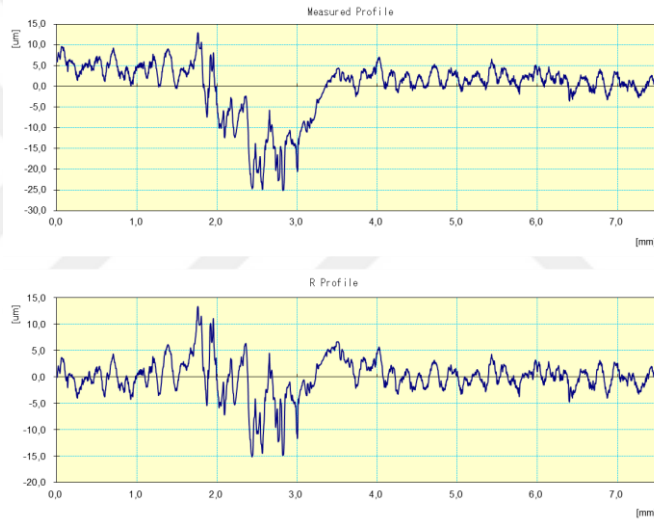
Her bir malzeme türü için ıslak koşullar altındaki sürtünme katsayısı, kuru koşullar altındaki sürtünme katsayısına göre yaklaşık %50 oranında daha düşüktür. Yine bu düşüş oranı hem Kassfeldt ve Lundmark'ın (2009) çalışması hem de Liu vd. (2011a) çalışmaları ile uyum içerisindedir.

8.4. Aşınma Profilleri ve Spesifik Aşınma Oranlarının Hesaplanması

Aşınma deneyleri öncesinde ve sonrasında teker ve ray numunelerinin yüzey pürüzlülük cihazı ile aşınma oranları hesaplanmış ve bu hesaplanan alandan spesifik aşınma oranları tespit edilmiştir. Örnek teşkil etmesi açısından Şekil 8.5'te standart ray numunesinin aşınma deneyi öncesi ve Şekil 8.6'da deney sonrası yüzey profilleri gösterilmiştir. Bu profil verileri daha sonra bilimsel grafik ve veri analiz programı olan Origin Lab'e aktarılmış, aşınmanın gözlemlendiği profil ile aşınmaya uğramamış profil üst üste getirilerek, aşınma alanları hesaplanmıştır.

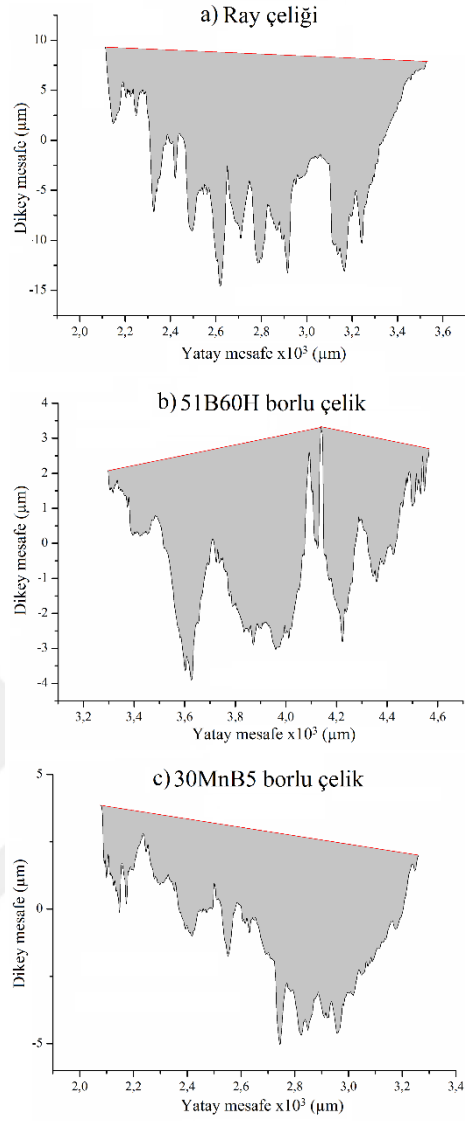


Şekil 8.5 Aşınma deneyi öncesi standart ray numunesinin yüzey profili

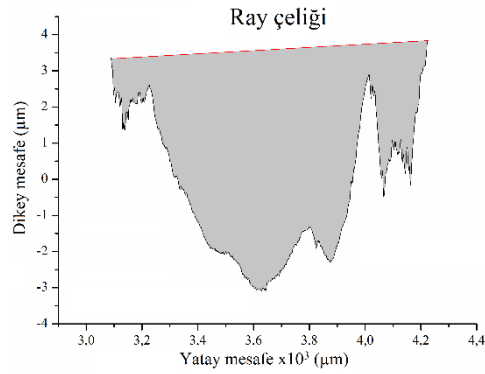


Şekil 8.6 Aşınma deneyi sonrası standart ray numunesinin yüzey profili

Kuru ve ıslak şartlar altında teker numunesine karşılık standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numunelerinin, aşınma deneyleri sonunda aşınma izlerinin alanları sırası ile Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de gösterilmiştir. Bu aşınma alanları ile beraber normal yük (112 N) ve kayma mesafesi (yaklaşık 7539,82 m) kullanılarak hesaplanan spesifik aşınma oranları ise Çizelge 8.2’de verilmiştir.



Şekil 8.7 Kuru şartlar altında a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numunelerinin aşınma alanları



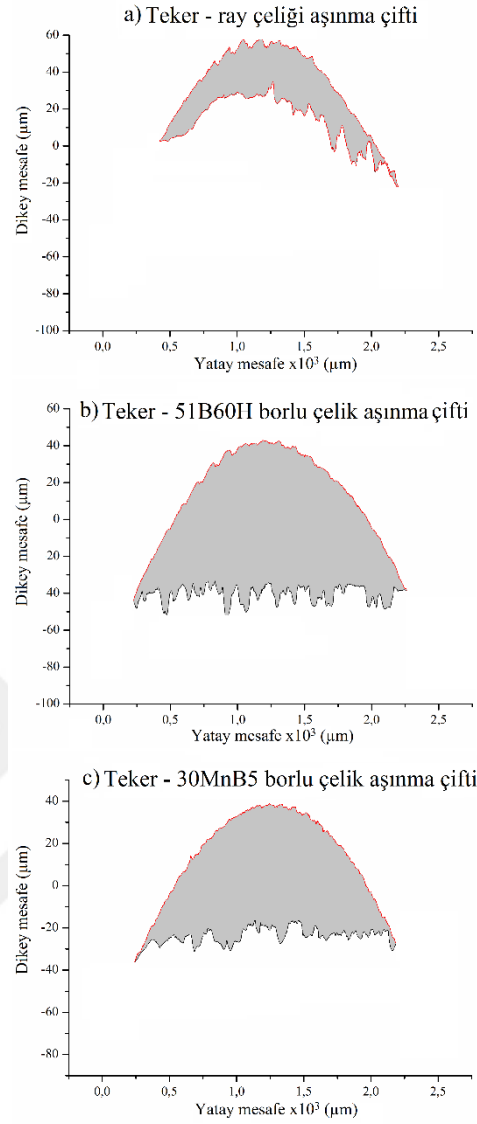
Şekil 8.8 Islak şartlar altında standart ray çeliği numunesinin aşınma alanları

Çizelge 8.2 Kuru ve ıslak şartlar altında standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numunelerinin teker numunesi karşısında aşınma alanları ve spesifik aşınma oranları

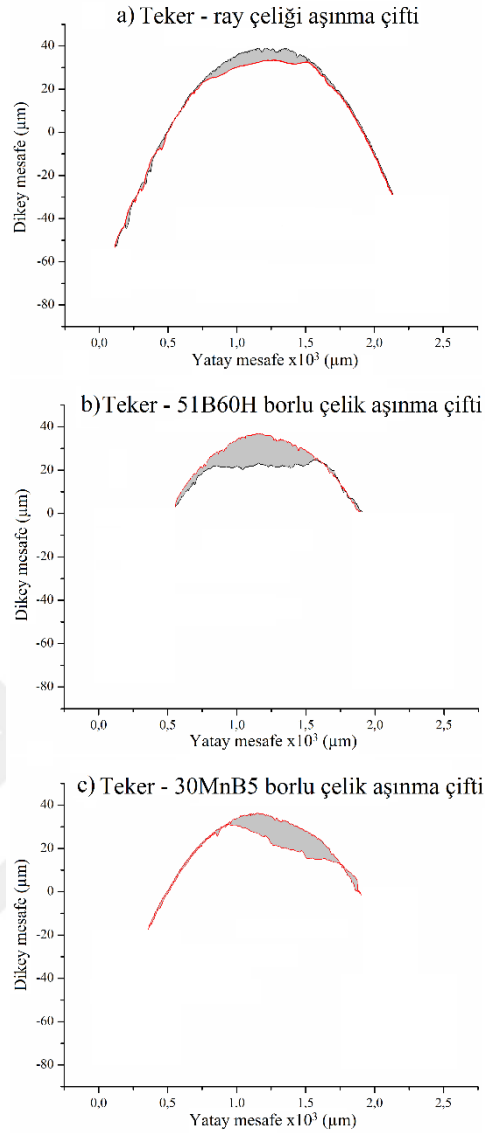
Deney koşulları	Malzeme	Aşınma alanı $\text{mm}^2 \times 10^{-6}$	Spesifik aşınma oranı $\text{mm}^3/\text{N.m} \times 10^{-6}$
Kuru	Standart ray	16686,28	3,7246
	51B60H borlu çelik	4321,5	0,9646
	30MnB5 borlu çelik	4536,67	1,0126
Islak	Standart ray	4481,46	1,003
	51B60H borlu çelik	-	-
	30MnB5 borlu çelik	-	-

Aşınma sonuçları değerlendirildiğinde ilk göze çarpan sonucun ıslak koşullar altında, 51B60H ve 30MnB5 borlu çeliklerinde kayda değer bir aşınma gözlenmemesidir. Bu durum deneyin ıslak koşullar altında yapılmasının yanı sıra sertlik değerlerinin 51B60H borlu çelik numunesinin, teker numunesine kıyasla 1,93 kat fazla, 30MnB5 borlu çeliği için ise 1,74 kat daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kuru koşullar altında ise beklenildiği gibi en çok aşınma miktarı standart ray numunesinde gerçekleşmiştir. İki farklı borlu çeliğin spesifik aşınma oranları birbirlerine çok yakın olup, standart ray numunesi borlu çeliklere göre 3 kattan daha fazla aşınmıştır. Genel olarak kuru koşullar altında yapılmış deney sonuçlarında, borlu çeliklerin daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu söylenebilir.

Aynı hesaplama prosedürleri izlenerek, teker numunesinin kuru ve ıslak şartlar altında standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numunelerinin karşısında ortalama aşınma alanları hesaplanmış sırası ile Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da gösterilmiştir. Ayrıca spesifik aşınma oranları da Çizelge 8.3'de verilmiştir.



Şekil 8.9 Kuru şartlar altında teker numunesinin a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları



Şekil 8.10 Islak şartlar altında teker numunesinin a) standart ray, b) 51B60H ve c) 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları

Çizelge 8.3 Kuru ve ıslak şartlar altında teker numunesinin standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numuneleri karşısında aşınma alanları ve spesifik aşınma oranları

Deney koşulları	Karşıt malzeme	Aşınma alanı $\text{mm}^2 \times 10^{-6}$	Spesifik aşınma oranı $\text{mm}^3/\text{N.m} \times 10^{-6}$
Kuru	Standart ray	36388,01	8,1223
	51B60H borlu çelik	111769,92	24,949
	30MnB5 borlu çelik	75210,75	16,788
Islak	Standart ray	4556,97	1,0172
	51B60H borlu çelik	8695,12	1,9409
	30MnB5 borlu çelik	7098,23	1,5844

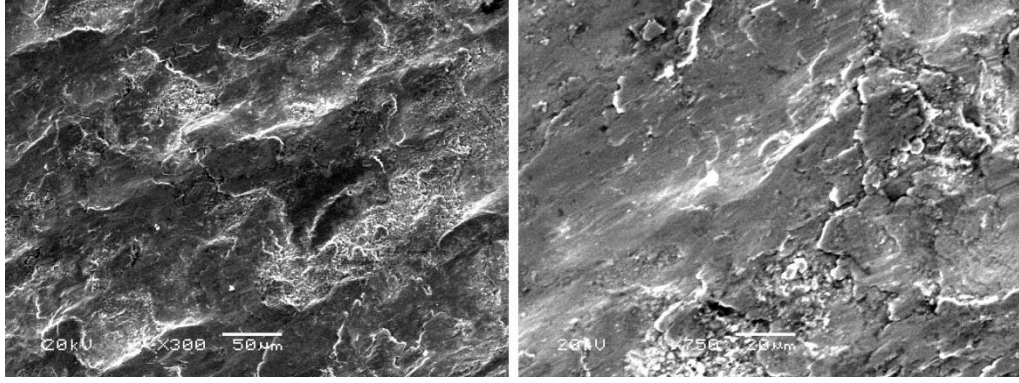
Kuru şartlar altında teker numunesinin aşınma oranları incelendiğinde, en çok aşınma oranı 51B60H borlu çelik numunesi karşısında oluşmuştur. Bu değer 30MnB5 borlu çeliğine göre 1,48 kat, standart ray numunesine göre ise 3,07 kat daha fazladır. Bu durum yine numunelerin sahip oldukları sertlik değeri ile açıklanabilir. Sertlik değeri açısından en yüksek değere sahip olan 51B60H borlu çeliği beklenildiği gibi teker numunesini en fazla aşındıran deney numunesi olmuştur. Islak koşullar altındaki aşınma oranı sonuçlarına bakıldığında ise, kuru şartlara nazaran ciddi oranda bir düşüş gözlenmiştir. Teker numunesini en fazla aşındıran numune yine 51B60H borlu çelik numunesi olmuş fakat, kuru şartlara göre yaklaşık 12 kat daha az aşındırmıştır. Dikkat çekici başka bir sonuç ise, teker numunesi karşısında test edilen numunelerin tamamı ıslak koşullar altında birbirlerine çok yakın oranlarda teker numunesini aşındırmışlardır. En fazla aşındıran 51B60H borlu çelik numunesi, standart ray numunesi ile kıyaslandığında neredeyse 2 katından daha az bir değerde teker numunesini aşındırmıştır.

8.5. SEM Sonuçları

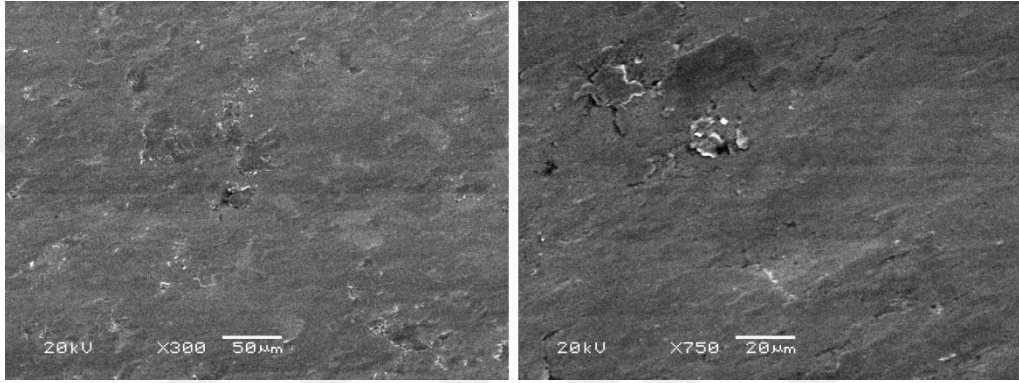
Aşınmış yüzeylerin SEM incelemeleri, hangi aşınma mekanizmalarının var olduğunun yorumlanması için gereklidir. Islak şartlar altında, teker ve ray numunelerinin spesifik aşınma oranlarının ciddi oranda düşmesinden ötürü, sadece kuru şartlar altında test edilmiş standart ray, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik yüzeylerinin SEM incelemelerine yer verilmiştir.

Teker numunesi karşısında standart ray numunesinin, 51B60H ve 30MnB5 borlu çelik numunelerinin kuru şartlar altındaki aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri Şekil 8.11'de verilmiştir. Standart ray numunesine ait aşınma bölgelerinin yüzey topografisi, mikro tepelikler ve vadi görünümünde pürüzlü bir yapıya sahiptir. Birbirine yakın sertlik değerine sahip aşınma çifti olan teker numunesinden, sıvanma şeklinde malzeme transferinin var olduğu söylenebilir. Bu, kuru ortam kayma – yuvarlanma aşınmasında beklenen yapışmayı yani adhezif aşınmayı temsil etmektedir. 51B60H borlu çelik numunesine ait aşınma bölgeleri, standart ray numunesinin aşınma bölgeleri ile kıyaslandığında, daha pürüzsüz bir yüzey topografisine sahip olduğu görülmektedir. Daha önce bahsedilen spesifik aşınma oranlarını göz önüne aldığımızda, 51B60H borlu çelik numunesinin en az aşınan ve teker numunesini en fazla aşındıran numune olması bu durumun kanıtı olduğu

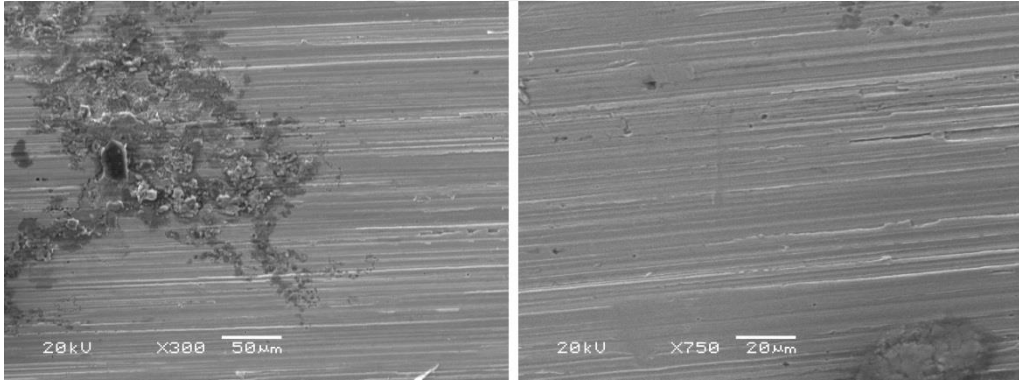
düşünülmektedir. 51B60H borlu çelik numunesi, teker numunesi karşısında aşındırıcı bir görev üstlenmiştir. Aşınmış yüzeylerin bazı bölgelerinde gömülme şeklinde malzeme transferinin izleri gözükmemektedir. Adhezif aşınma mekanizması, aşınma yüzeyinde tamamen hâkim olmasa da kısmen var olmuştur. 30MnB5 borlu çelik numunesinin aşınma yüzeyinin bazı bölgelerinde, sertlik olarak düşük değere sahip teker numunesinden malzeme transferi olarak yüzeye yapışmıştır. Bu adhezif aşınmanın var olduğunu göstermektedir. Aşınma yüzeyinde aynı zamanda pulluklama olarak adlandırılan mikro çiziklerde görülmektedir. Aşınma deneyleri süresince var olan yüksek temas basınçları ve sürtünmenin etkisi ile ara yüzey sıcaklığı artmaktadır. Ara yüzey sıcaklığının artması, metallerin oksidasyonunu artırarak oksit tabakalarını oluşturmaktadır. Daha sonra bu oksit tabakalar, uygulanan yüksek yük nedeni parçalanarak oksit partiküllerini meydana getirebilir. Teker numunesi ve 30MnB5 borlu çelik numunesi arasında, aşınma geometrisi nedeni ile tribolojik sistemden uzaklaştırılmamış oksit bazlı partiküllerin sebep olduğu üç elemanlı abrazif aşınmanın mikro çiziklere neden olduğu tahmin edilmektedir.



a) Standart ray numunesi



b) 51B60H borlu çelik numunesi



c) 30MnB5 borlu çelik numunesi

Şekil 8.11 Kuru şartlar altında aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri a) Standart ray numunesi, b) 51B60H borlu çelik numunesi, c) 30MnB5 borlu çelik numunesi

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hızlı tren üstyapısında kullanılan ray malzemesine alternatif olarak, 51B60H ve 30MnB5 borlu çeliklerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Borlu çeliklerin sertleşme kabiliyeti ile beraber mükemmel aşınma direnci sergiledikleri bilinen bir gerçektir. Borlu çeliklerin tribolojik özellikleri hakkında çalışmalar mevcut olsa da, ray malzemesi olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar literatürde çok nadir bulunmaktadır.

Borlu çeliklerden ve ray mantarından elde edilen numuneler, bir lokomotif tekerinden elde edilmiş numune karşısında, yüksek temas basınçlarının ve kayma – yuvarlanma hareketinin var olduğu disk üzerinde disk modeli ile aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Kuru şartlar altında spesifik aşınma oranları açısından bir kıyaslama yapılırsa, ray numunesine göre, 51B60H borlu çelik numunesi 3,86 kat, 30MnB5 borlu çelik numunesi ise 3,67 kat daha az aşınmıştır. Islak koşullar altında ise su yağlayıcı görevi üstlenerek, borlu çelikler için kayda değer bir aşınma tespit edilememiş, ray numunesinin spesifik aşınma oran değeri $1,003 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak belirlenmiştir. Teker numunesinin aşınma oranları incelendiğinde ise, en fazla aşındıran numune 51B60H borlu çelik numunesi, en az aşındıran ise geleneksel ray malzemesi olmuştur. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, aşınma dirençleri açısından borlu çeliklerin, hızlı tren hatlarında kullanılmakta olan geleneksel ray malzemesine göre daha iyi bir performans sergilediği söylenebilir.

Sertlik ölçümleri sonucunda ray numunesi 35 HRC, 51B60H borlu çelik numunesi 61 HRC, 30MnB5 borlu çelik numunesi 55 HRC ve ER9 sınıfı teker numunesi ise 31,5 HRC sertlik değerine sahiptir. Pratik ve teorik çalışmalara göre, teker malzemesinin sertliği sabit kalmak şartı ile, ray malzemesinin sertliği artması sonucunda teker aşınması hemen hemen sabit kaldığı belirtilmiştir. Bu durumda sertlik değeri, geleneksel ray malzemesine göre yüksek olan borlu çeliklerin, raylı sistem hatlarında kullanılması sonucunda daha az aşınmaya uğraması mümkündür. Bu durumun sonucu olarak, rayın bakım masrafları azalabilir, ray profilinin bozulma süresi uzayarak daha uzun ömürlü kullanılması sağlanabilir.

Raylı sistem araçlarının güvenli bir şekilde işletebilmesi açısından teker – ray arasındaki sürtünme katsayısının büyük bir önemi vardır. Güvenlik ve raylı sistem hatlarının planlanan zaman çizelgelemesine uyması açısından, çekiş ve frenleme esnasında sürtünme katsayısının belirli değerler arasında olması gerekmektedir. Aktif olarak kullanılan demiryolu hatlarında sürtünme katsayısı kuru şartlar için 0,5 – 0,7 aralığında, ıslak şartlar için ise 0,2 – 0,3 aralığında değişmektedir. Bu çalışmada, aşınma testleri 1,5 GPa Hertzian temas basıncı altında, 200 dev/dak hızda ve %5,18 kayma oranında gerçekleştirilmiştir. Kuru şartlar altında tespit edilen ortalama sürtünme katsayısı, geleneksel ray numunesi için 0,66 olarak tespit edilmiştir. Geleneksel ray malzemesine alternatif olarak önerilen 51B60H borlu çelik numunesi için 0,57 ve 30MnB5 borlu çelik numunesi için ise 0,54 olarak bulunmuştur. Islak şartlar altında ise geleneksel ray numunesi için 0,30 değeri elde edilmiş, alternatif numuneler olan 51B60H borlu çelik numune için 0,34 ve 30MnB5 borlu çelik numune için ise 0,27 olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu değerlerin, çekiş ve frenleme için gerekli optimum değerler arasında olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, borlu çeliklerin alternatif ray malzemesi olarak kullanılması, tribolojik açıdan incelenmiştir. Farklı deney parametreleri kullanılarak aşınma testleri genişletilebilir. Aşınma testlerine ek olarak üretilebilirlik, şekil verilebilirlik, kaynak edilebilirlik ve diğer mekanik özellikler (kırılma tokluğu, akma – kopma mukavemeti ve yorulma direnci) açısından da değerlendirilmelidir. Farklı kalitelere sahip borlu çeliklerin kullanımı araştırılmalı, ayrıca farklı ısıtma işlem parametreleri de geliştirilerek optimum metalürjik yapı elde edilmesi amaçlanmalıdır.

Bu çalışmada elde edilen tribolojik sonuçlar göz önüne alındığında, borlu çeliklerin raylı sistem hatlarında alternatif bir ray malzemesi olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbasi, S., Olofsson, U., Zhu, Y., Sellgren, U., 2013, Pin-on-disc study of the Effects of Railway Friction Modifiers on Airborne Wear Particles from Wheel-Rail Contacts, *Tribology International* 60, 136 – 139.
- Akbayır, Ö., 2005, Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 95s.
- Ay, G. M., Çelik, O.N., 2013, Inspection of Friction and Wear Properties of Railway Rails, *Engineering Science and Technology, An International Journal* 16 (2), 89 – 95.
- Ayday, A., 2013, Elektrolitik Plazma Teknolojisi ile Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 198s.
- Bhushan, B., 2001, *Modern Tribology Handbook*, CRC Press LLC (pdf form), ISBN 9780849384035, 1760p.
- Chandra, S., Agarwal M. M., 2007, *Railway Engineering*, Oxford University Press, ISBN-13:978-0-19-568779-8, 620p.
- Cuevas, O. A., Li, Z., Lewis, R., 2011, A Laboratory Investigation on the Influence of the Particle Size And Slip During Sanding on the Adhesion And Wear in the Wheel–Rail Contact, *Wear* 271, 14 – 24.
- Çakır, F. H., 2014, Hızlı Tren Ray Malzemelerinde Farklı Isıl İşlemlerin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s.
- Çakır, F. H., Bozkurt, F., Çelik O. N., Er, Ü., 2016, Tribological Examination of Hardened Two Types Boron Steel for Railway Applications, I. International Workshop on Construction and Electricity Applications on Vocatioanl Education, 30 November-1 December 2015, TC Anadolu Üniversitesi Yayınları, No:3236, 563 – 572.
- Çarboğa C., Kurt, B., Dal, S., 2016, 1560 ppm bor İlave Edilmiş AISI 1020 Çeliğine Isıl İşlem Yöntemlerinin Etkisi, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi Cilt 5(2)*, 124 – 129.
- Davis, J.R., 2001, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ISBN 978-0-871170-700-0, 279p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Er, Ü., 2003, Bor Yayınımla Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliklerin Aşınmaya Karşı Dayanımlarının ve Pulluk Uç Demirlerinde Uygulama Olanaklarının Araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s.
- Er, Ü., 2011, 15B35H Borlu Çeliğinin Kuru Kayma Koşullarında Sürtünme ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı, 75 – 82 , ISSN – 1302 – 3055.
- Er, Ü., 2009, Borlu Çelikler ve Tarımsal Mekanizasyonda Kullanım Alanları, 25. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, 1 – 3 Ekim, Isparta, 425 – 428.
- Er, Ü., Gaşan, H., 2006, Bazı Borlu Çeliklerin Toprak İşleme Aletlerinin Uç Demirlerinde Kullanımının Laboratuvar Koşullarında İncelenmesi, Tarımsal Mekanizasyon 23. Ulusal Kongresi, 6 – 8 Eylül, Çanakkale, 292 – 295.
- Erkaya, H. H., 2013, Raylı Sistemlerin Temelleri, (Practical Railway Engineering 2nd Edition Çeviri), Nobel, ISBN 978-605-133-716-6, 192s.
- Esveld, C., 2001, Modern Railway Track, Second Edition, TU Delft, Delft University of Technology, ISBN:90-800324-3-3, 654p.
- Gasik, M., 2013, Handbook of Ferroalloys Theory and Technology, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0080977539, 536p.
- Holmberg, K., Matthews, A., 2009, Coatings Tribology, Properties, Mechanisms Techniques and Applications in Surface Engineering, Second Edition, Tribology and Interface Engineering Series, No. 56, Elsevier, 560p.
- Innotrack, 2006, Definitive Guidelines on The Use of Different Rail Grades, Integrated Project No. TIP5CT-2006-031415.
- Iwnicki, S., 2006, Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Taylor & Francis Group, CRC Press, ISBN 9780849333217, 548p.
- Jimenez, J. A., Doncel, G. G., Ruano, O., 1995, Mechanical Properties of Ultrahigh Boron Steels, Advanced Materials (7), No2, 130 – 136.
- Kassfeldt, E., Lundmark, J., 2009, Tribological Properties of Hardened High Strength Boron Steel at Combined Rolling and Sliding Condition, Wear 267, 2287 – 2293.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Koyama, R., Tskukamoto, T., 1997, Boron added steel, The Sumitomo Search No:59.
- Lee, H. W., Kima, Y. H., Leea, S. H., Leea, S. K., Leeb, K. H., Parkc, J. U., and Sunga, J. H., 2007, Effect of Boron Contents on Weldability in High Strength Steel, Journal of Mechanical Science and Technology 21, 771 – 777.
- Lewis, R., Olofsson, U., 2009, Wheel-Rail Interface Handbook, Woodhead Publishing, ISBN 978-1-84-569678-8, 856p.
- Liu, Q. Y., Wang, W. J., Shen, P., Song, J. H., Guo, J., Jin, X. S., 2011, Experimental Study on Adhesion Behavior of Wheel/Rail Under Dry and Water Conditions, Wear 271, 2699 – 2705.
- Liu, Q. Y., Wang, W. J., Zhang, H. Y., Wang, Q. Y., Zhu, M. H., 2011, Study on the Adhesion Behavior of Wheel/Rail Under Oil, Water and Sanding Conditions, Wear 271, 2693 – 2698.
- Miranda, J.C., Ramalho, A., 2005, Friction and Wear of Electroless NiP and NiP+PTFE Coatings, Wear 259, 828 – 834.
- Olofsson, U., Telliskivi, T., 2003, Wear, Plastic Deformation and Friction of Two Rail Steels – A Full Scale Test and A Laboratory Study, Wear 254, 80 – 93.
- Özden, M. A., 2011, Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 107s.
- Öztürk, Z., Arlı, V., 2009, Demiryolu Mühendisliği, İstanbul Ulaşım A.Ş., 205s.
- Ramalho, A., 2015, Wear Modelling In Rail-Wheel Contact, Wear 330-331, 524 – 532.
- Ramalho, A., Esteves, M., Marta, P., 2013, Friction and Wear Behaviour of Rolling-Sliding Steel Contacts, Wear 302, 1468 – 1480.
- Sağlam, G., 2016, Çelik Dişli Sondaj Matkaplarının Borlama Yöntemi ile Takım Ömrünün Uzatılması, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, 70s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Santa, J.F., Toro, A., Lewis, R., 2016, Correlations Between Rail Wear Rates and Operating Conditions in a Commercial Railroad, *Tribology International* 95, 5 – 12.
- Schmidova, E., 2015, Strucutral Materials Lecture Notes, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice.
- Sirek, F., 2015, Deneysel Aşınma Modeli Verileri için Uygun Parametre Seçimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 47s.
- Stachowiak, G. W., Batchelor A. W., 2014, *Engineering Tribology 4th Edition*, Elsevier, ISBN 978-0-12-397047-3, 884p.
- Tamarelli, C. M., 2011, The Evolving Use of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, *Materials Science and Engineering*, University of Michigan, Student Intern, 42p.
- Ulutan, M., 2007, AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 268s.
- Ünlü, B. S., Yılmaz, S. S., 2006, Bor ve Borlamanın Kullanım Alanları, *Mühendis ve Makina*, Cilt 47, Sayı 552, 48 – 54.
- Voltr, P., 2013, Modelování Adhezní Vazby Kola a Kolejnice v Dynamice Pohonu Dvojkolí, University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, Doctoral Thesis, 182p.
- Wang W. J., Ding, H. H., He, C. G., Ma, L., Guo, J., Liu, Q. Y., 2016, Wear Mapping and Transitions in Wheel and Rail Under Different Contact Pressure and Sliding Velocity Conditions, *Wear*, 352-353, 1-8.
- Wang, W. J., Ding, H. H., Fu, Z. K., Guo, J., Liu, Q. Y., Zhu, M. H., 2015, Investigation on the Effect of Rotational Speed on Rolling Wear and Damage Behaviors of Wheel/Rail Materials, *Wear* 330-331, 563 – 570.
- Wang, W. J., He, C.G., Huang, Y.B., Ma, L., Guo, J., Liu, Q. Y., Zhu, M. H., 2015, Experimental Investigation on the Effect of Tangential Force on Wear and Rolling Contact Fatigue Behaviors of Wheel Material, *Tribology International* 92, 307 – 316.
- Watson, L., 2008, Boron Steel in Vehicles, Document for Discussion, online erişim <http://www.resqmed.com/BoronSteel1.pdf>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zajic, J., Hanus, P., Schmid, M., 2016, Evaluation of Operational Hardening of the Railway Wheels Surface Layers, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, 33rd International Colloquium 25 – 27 May, Western Tatras, Zuberec, Slovakia.
- Zelenka, J., Michalek T., 2014, Theory of Vehicles, Study Material, University of Pardubice, ISBN 978-80-7395-75-3, 81p.
- Zhu, Y., 2013, Adhesion In The Wheel – Rail Contact, KTH Royal Institute of Technology, Department of Machine Design, Doctoral Thesis, Stockholm.
- Zhu, Y., Chen, X., Wang, W., Yang, H., 2015, A Study on Iron Oxides and Surface Roughness in Dry and Wet Wheel-Rail Contacts, Wear 328-329, 241 – 248.
- Zhu, Y., Olofsson, U., Lyu Y., 2015, Wear Between Wheel and Rail: A pin-on-disc Study of Environmental Conditions and Iron Oxides, Wear 328-329, 277 – 285.
- Zhu, Y., Olofsson, U., Persson, K., 2012, Investigation of Factors Influencing Wheel-Rail Adhesion Using a Mini Traction Machine, Wear 292-293, 218 – 231.