



**DEMİRYOLLARINDA RAYLARDAKİ AŞINMA
HIZININ VE MİKTARININ EŞDEĞER KONİKLİĞE
ETKİSİ VE BAKIM PROSEDÜRLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Emre YİĞİT

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN**

**DEMİRYOLLARINDA RAYLARDAKİ AŞINMA HIZININ VE
MİKTARININ EŞDEĞER KONİKLİĞE ETKİSİ VE BAKIM
PROSEDÜRLERİNİN BELİRLENMESİ**

Emre YİĞİT

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

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN**

KARABÜK

Aralık 2021

Emre YİĞİT tarafından hazırlanan “DEMİRYOLLARINDA RAYLARDAKİ AŞINMA HIZININ VE MİKTARININ EŞDEĞER KONİKLİĞE ETKİSİ VE BAKIM PROSEDÜRLERİNİ BELİRLENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 08/12/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Emre YİĞİT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEMİRYOLLARINDA RAYLARDAKİ AŞINMA HIZININ VE MİKTARININ EŞDEĞER KONİKLİĞE ETKİSİ VE BAKIM PROSEDÜRLERİNİN BELİRLENMESİ

Emre YİĞİT

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Aralık 2021, 85 sayfa

Raylı sistemler, gelişmiş ülkelerde ulaşım ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler özellikle demiryolları için birçok avantaj sağlamaktadır ve demiryolları raylı sistemlerle birlikte birçok araştırma ve geliştirme konusunda teknolojik olarak birbirleriyle uyumludur. Zaman içerisinde geçen tren sayısı ve yük miktarı baz alınarak yapılan ölçümlerin rayı ve tekerleği aşındırdığı görülmüştür. Bu aşınma miktarlarının eşdeğer konikliğe etkisi araştırılmıştır. Eşdeğer koniklik tekerlek ve rayın profilleri ölçülerek bulunan bir değerdir.

Tekerlek-ray arasındaki temas açısı sırasıyla işletme güvenliği, deray koşulları, kurplardan geçiş esnasında tekerlek ve ray arasında ortaya çıkan kuvvetleri, sürüş konforunu ve ray yorulma riski gibi faktörleri etkilemektedir. Bu faktörler göz önüne

alındığında, tekerlek-ray temasının aslında ne denli karışık bir yapıya sahip olduğu ve araç dinamiği üzerinde ne kadar büyük etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, daha önceden belirlenmiş olan mevkide ray aşınım değerlerinin ve eşdeğer koniklik değerinin periyodik olarak ölçümleri alınmıştır. Demiryollarında çalışan araç tiplerinin çok çeşitli olması ve ray kaynaklı bakım faaliyetlerinin belirlenmesi için yapılan eşdeğer koniklik ölçümlerinde tekerlek aşınmaları göz önünde bulundurulmamış olup, ray üzerindeki aşınımın baz alınmıştır. Bu sebeple yaklaşık bir sene süresince belirlenmiş olan hat üzerindeki noktalarda yapılan ölçümlerin sonucunda aşınan ray profilinin eşdeğer konikliğe nasıl etki ettiği incelenmiştir.

Anahtar Kelime : Demiryolu, Ray, Eşdeğer Koniklik, Aşınma, Tekerlek-Ray Teması
Bilim Kodu : 91429

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF WEAR RATE AND AMOUNT ON RAILROAD RAILS ON EQUIVALENT CONICAL AND DETERMINATION OF MAINTENANCE PROCEDURES

Emre YİĞİT

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Asst. Prof. Mehmet Akif ERDEN

December 2021, 85 pages

Rail systems are widely used to carry and transportation in developed countries. These systems provide many advantages especially for railways and railways are technologically compatible with each other in many research and development issues together with rail systems. It has been observed that the measurements made based on the number of trains and the amount of load passing over time wear the rail and the wheel. The effect of these wear amounts on the equivalent conicity was investigated. Equivalent conicity is a value found by measuring the profiles of the wheel and rail.

The contact angle between the wheel and the rail, respectively, affects the factors such as operational safety, derail conditions, the forces occurring between the wheel and the rail during the transition from the curves, driving comfort and the risk of rail fatigue.

When these factors are taken into consideration, it is understood how complex the wheel-rail contact actually has and how much of an impact it has on vehicle dynamics. In this study, periodic measurements of the rail wear values and the equivalent conicity value were made at the location determined by obtaining all permissions from the institution. In the equivalent conicity measurements made to determine the wide variety of vehicle types working on the railways and to determine the maintenance activities based on the rail, wheel wear was not taken into account, and the wear on the rail was taken as a basis. For this reason, as a result of the measurements made at the points on the line determined for about a year, how the worn rail profile affects the equivalent conicity has been examined.

Key Words : Railway, Rail, Equivalent Conicity, Wear, Wheel-Rail Contact

Science Code : 91429

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında ilgi-alaka ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN'e ve bu tez konusunun oluşmasında yardımcı olan Demiryolu Bakım Daire Başkan Yard. Mehmet Soner BAŞ'a, tez fikrimin gelişmesinde büyük emeği olan Demiryolu Bakım Servis Müdür Yard. Şakir KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ölçüm cihazının kullanılması ve ölçüm yapılan yerdeki gerekli izinlerin alınması konusunda büyük yardımları bulunan Demiryolu Bakım Servis Müd. Murat Özgür GÜRBÜZ'e ve Demiryolu Bakım Müd. Ferdi KARADUMAN'a, periyodik ölçümlerin yapılmasında ve bu ölçümlerin değerlendirilmesinde iş arkadaşlarım olan Metalurji Malzeme Müh. Ümit YARDIM'a ve Makine Müh. Mehmet TOPCU'ya ve ne zaman olursa olsun bana yol gösteren ve tüm desteklerini benden esirgemeyen, bana her konuda abilik yapan meslektaşım Raylı Sistemler Müh. Mehmet Furkan TAŞLIYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve hoşgörü ile maddi-manevi destek olan kıymetli AİLEME teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
RAY ve TEKERLEK.....	2
2.1. RAY	2
2.1.1. Rayın Tarihi	2
2.1.2. Demiryolunun Tarihi	3
2.1.3. Ray Profilleri.....	4
2.1.4. Ray Çeşitleri.....	5
2.1.4.1. Oluklu Raylar	5
2.1.4.2. Çift Mantarlı Raylar	6
2.1.4.3. Tek Mantarlı Raylar (Vinyol Tipi).....	6
2.1.5. RAYLARIN BÖLÜMLERİ.....	6
2.1.6. RAYLARIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	7
2.1.7. RAYLARIN SINIFLANDIRILMASI.....	8
2.1.7.1. Profil Özelliklerine Göre	8
2.1.7.2. Ray Çelikleri Kalitesine Göre Sınıflandırılması.....	9
2.1.8. RAYIN MARUZ KALDIĞI KUVVETLER	10
2.1.8.1. Düşey Kuvvetler.....	11

	<u>Sayfa</u>
2.1.8.2. Yanal Kuvvetler.....	11
2.1.9. RAYIN MEKANİK DAYANIMI.....	12
2.2. TEKERLEK	14
2.2.1. Tekerlek Malzemesi.....	18
BÖLÜM 3	22
RAY – TEKER İLİŞKİSİ	22
3.1. ARAÇ DİNAMİĞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	28
3.2. RAYA ETKİYEN YÜKLER VE RAY GERİLMELERİ	31
3.2.1. Raya Etkiyen Yükler.....	33
3.2.1.1. Statik Yükler.....	33
3.2.1.2. Dinamik Yükler	37
3.2.2. Ray Gerilmeleri	38
3.2.2.1. Eğilme Gerilmeleri	39
3.2.2.2. Kayma Gerilmeleri	40
3.2.2.3. Termal Gerilmeler	41
3.2.2.4. Kalıntı Gerilmeleri.....	42
3.2.2.5. Tekerlek-Ray Temas Gerilmeleri	43
BÖLÜM 4	46
EŞDEĞER KONİKLİK	46
4.1. EŞDEĞER KONİKLİĞİN KULLANILMA ALANLARI.....	49
4.1.1. Hat Bakım Çalışmalarını Belirlemek Amacıyla.....	49
4.1.2. Araçların TİP Testi İçin.....	49
4.1.3. Araç Üreticileri Kendi Araçlarının Durumunu Görüp İyileştirmeler Yapmak Amacıyla.....	50
4.2. EŞDEĞER KONİKLİK HESAPLAMA YÖNTEMİ.....	50
4.2.1. Prensipler ve Tanım.....	50
4.2.2. Eşdeğer Konikliğin Belirlenmesi	53
4.2.2.1. Diferansiyel Denklemin Entegrasyonu	53
4.2.2.2. Konikliğin Hesaplanması	54
4.2.2.3. İşlem Basamakları.....	58

	<u>Sayfa</u>
4.2.2.4. Δr Fonksiyonunun Lineer Regrasyonu	61
BÖLÜM 5	65
CALİPRİ ÖLÇÜM CİHAZININ TANITILMASI	65
BÖLÜM 6	70
BAKIM FAALİYETLERİ	70
6.1. TAŞLAMA.....	70
6.1.1. Koruyucu Taşlama	73
6.1.2. Düzeltici Taşlama	75
6.1.3. Önleyici Taşlama	76
6.2. FREZELEME	77
6.2.1. Ray İşlemenin (Taşlama ve Frezeleme İşleminin) Yaraları.....	77
6.3. YAĞLAMA.....	78
6.3.1. Boden Yağlama Teknikleri	81
6.3.1.1. Sıvı Yağ ile Direkt Yağlama	81
6.3.1.2. Yağlama Çubuğu ile Yağlama	82
6.3.1.3. Endirekt Yağlama.....	82
BÖLÜM 7	84
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	84
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Ray çeşitleri	6
Şekil 2.2. Rayın bölümleri	7
Şekil 2.3. Sertlik değerlerine göre rayların adlandırılması	10
Şekil 2.4. Örnek kurp profili	12
Şekil 2.5. Perlitik ray malzemesi - ray dayanımı	13
Şekil 2.6. UIC 515 tekerinin kaba ölçüleri ile teknik resmi.....	14
Şekil 2.7. Tekerlek profilinin bölümleri.....	15
Şekil 2.8. Flanş boğazında oluşan tek nokta teması (a) ve çift nokta teması (b)	15
Şekil 2.9. Düz tekerlek şekli (a) ve dalgalı tekerlek şekli (b)	16
Şekil 2.10. Tekerlek parametreleri	16
Şekil 3.1. Eğimli teker ve rayın temas noktasının gösterimi.....	23
Şekil 3.2. Demiryolu hat standartları	24
Şekil 3.3. Çeşitli hat genişliği uygulamaları	24
Şekil 3.4. Rayların yol içerisine doğru eğimli olarak tespiti.....	25
Şekil 3.5. UIC 60 raylarının 1/20 ve 1/40 eğimle traversler üzerine tespiti.....	26
Şekil 3.6. Tek ve çift nokta teması.....	26
Şekil 3.7. Kurpta ray teker temas noktası	27
Şekil 3.8. Tekerlek bölümleri.....	28
Şekil 3.9. Ray profili	29
Şekil 3.10. Bir aks setinin salınım hareketi.....	30
Şekil 3.11. Kurpta aks setinin durumu	30
Şekil 3.12. Aks setine ait genel koordinat sistemi	31
Şekil 3.13. Vinyol ray üzerinde ray bölümleri	32
Şekil 3.14. Örnek ray üzerinde ray gerilme doğrultuları	33
Şekil 3.15. Yatay kurp içinde tekerleğin konikliği	35
Şekil 3.16. Örnek kesit üzerinde ray gerilmeleri.....	39
Şekil 3.17. Rayda ortaya çıkan maksimum gerilme noktaları	40
Şekil 3.18. Ray doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri	42

Şekil 3.19. Tekerlek-ray temas alanı.....	43
Şekil 3.20. Aliyman ve kurptaki tekerlek-ray temas alanları.....	44
Şekil 4.1. Dalga boyu.....	53
Şekil 4.2. $\Delta r = f y$ fonksiyonu ve $\tan \gamma e = f y$	55
Şekil 4.3. dx ve dy'nin gösterimi	55
Şekil 4.4. ds ve d Ψ 'nin gösterimi	56
Şekil 4.5. r_0, r_1, r_2 ve e 'nin gösterimi.....	56
Şekil 4.6. $\Delta r dy$ integralinin hesaplanması	59
Şekil 4.7. yem 'in saptanması, $\Delta r dy$ hesaplanması ve y 'nin saptanması.....	59
Şekil 4.8. $y e_{min} = f y$ ve $y e_{max} = f y$ fonksiyonlarının saptanması	60
Şekil 4.9. Sabit C değerinin saptanması.....	60
Şekil 4.10. $\Delta r dy$ integralinin hesaplanması.....	62
Şekil 4.11. yem 'in saptanması, $\Delta r dy$ hesaplanması ve y 'nin saptanması.....	63
Şekil 4.12. $y e_{min} = f y$ ve $y e_{max} = f y$ fonksiyonlarının saptanması	63
Şekil 5.1. Calipri C42.....	66
Şekil 5.2. Sistem arayüzü	67
Şekil 5.3. Cihazın kalibre edilmesi	68
Şekil 5.4. Ölçümün yapılması	68
Şekil 5.5. Ölçüm sonuçlarının okunması	69
Şekil 6.1. Taşlama makinesi.....	73
Şekil 6.2. Ray taşlama taşı	75
Şekil 6.3. Taşlama sonrası ray yüzeyi.....	76
Şekil 6.4. Araç üstü yağlama ekipmanları	81
Şekil 6.5. Katı yağlayıcı ile yağlama modeli	82
Şekil 6.6. Sabit yağlama sistemi	82
Şekil 7.1. Aşınma zaman grafiği.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Ray profil özellikleri	9
Çizelge 2.2. Ray çeliklerinin sınıflandırılması.....	9
Çizelge 2.3. EN 15313 standardına göre tekerlek parametreleri	17
Çizelge 2.4. EN 13262 standardında bulunan tekerlek çeliği sertliklerinin mukavemeti	18
Çizelge 2.5. Tekerlek malzeme sınıfı.....	18
Çizelge 2.6. Kimyasal bileşime göre malzeme sınıfı.....	19
Çizelge 2.7. BS5892 tekerlek malzeme sınıfının mekanik özellikleri	21
Çizelge 4.1. Hıza bağlı olarak eşdeğer koniklik değeri	48
Çizelge 7.1. Eşdeğer koniklik değerinin ölçüm tarihleri ve sonuçları	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

x	: Yolun uzunlaması yönünde tekerlek setinin yer değiştirmesi
y	: Yolun yanlamasına yönünde tekerlek setinin yer değiştirmesi
λ	: Saniye
Ψ	: X-Y düzleminde açının hareketi
e	: Temas noktaları arasındaki mesafe
r	: Her iki tekerleğin ortalama yuvarlanma yarıçapı
r_0	: Tekerleğin aliymandayki yarıçapı
r_1	: Sağ tekerin yuvarlanma yarıçapı
r_2	: Sol tekerin yuvarlanma yarıçapı
Δr	: Sağ ve sol tekerlek arasındaki yuvarlanma yarıçapları farkı
R	: Kurp yarıçapı
d_s	: d Ψ açısına karşılık gelen yolun kurp uzunluğu
$\tan \gamma_e$: Eşdeğer konikliği
$\tan \gamma_a$: Temas noktasındaki tekerleğin eğimi ve ray profilleri
\tilde{y}	: Dalga genişliği
y_{em}	: $\Delta r = 0$ olduğunda y değişikliği
V	: Aracın ileri yönündeki hareket hızı
Q	: Düşey kuvvet
Y	: Yanal kuvvet
B	: Flanş açısı
μ	: Sürtünme katsayısı
f	: Sürtünme kuvveti

KISALTMALAR

EN	: Avrupa Standardı
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
YHT	: Yüksek Hızlı Tren

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanlık tarihinden itibaren günümüze kadar, insan ve mal taşınmasının hızlı ve güvenli olması hemen hemen her toplumun hedefleri arasında var olmuştur. Ulaşımın icatları arasındaki ilk sırayı tekerlek almış olsa da demiryolunun ve uçağın keşfi de ciddi öneme sahiptir. Demiryolunun gelişmesi, endüstrinin gelişmesinden özellikle de sanayi devrimiyle beraber buhar gücünün daha fazla kullanımı ile birlikte hızlı bir gelişim göstermiştir. 20. yüzyılın başında elektrikli lokomotif teknolojisinin demiryolları içerisine girmesiyle demiryolu sektörü daha fazla gelişmiş ve 2. Dünya savaşı öncesinde ise sinyalizasyon ve kontrolün merkezden sağlanacağı sistemlerin gelişmesi ile 1950'li yıllarda şu anki demiryolları sektörü şekillenmeye başlamıştır.

Demiryolu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeyini belirleyen önemli bir sektördür ve hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Yük taşımacılığı, yolcu taşımacılığı ile birlikte savaş durumunda ise ülkelerin en önemli lojistik kaynağıdır. Yük taşımacılığının artık ülkeler arası yapıldığını hatta eski ticaret yollarının kullanıldığı görülmektedir. Raylı sistemlerde tecrübe arttıkça çeken ve çekilen araçların tasarımı da değişime uğramıştır. Yay sistemleri, gövde yapısı, teker ve dingiller değişen yüklemeye gerilmelere maruz kalmaktadır. Bozuk yollarda düşük hızlarla yolculuk etmek yerine demiryolunu kullanılarak daha hızlı daha sarsıntısız bir yolculuk yapmak mümkün olmaktadır. Ülkelerin gelişmişlik durumlarına göre yolcu taşıma sistemlerinde konvansiyonel trenlerin yanında tramvay, metro, monoray ve banliyölere sahiptir. Bu sistemlerle birlikte yolcu taşıma işleminin en önemli parametrelerinden bir tanesi konfordur. Konforlu taşımacılık yapabilmek günümüz şartlarında büyük çaba gerektiren bir işlemdir. Konforun sağlanabilmesi için altyapının, üstyapının ve aracın en iyi durumda olması ile birlikte hem araca hem de demiryolu hattında gerekli bakımların noksansız bir şekilde yapılmış olması gerekmektedir. Altyapı, üstyapı veya araçtan kaynaklanan hatalardan dolayı konforun

azaldığı durumlarda ray-tekerlek temas noktasında alışlagelmeyen bir sapmanın meydana geldiği görülecektir.

Demiryolunda seyir hızının ve vagonlarla çekilen yük miktarının artırılması altyapıya bağlı olarak doğru bir ray-tekerlek ilişkisiyle sağlanabilir. Burada ray ile tekerlek arasındaki geometrik ilişkiyi ifade eden eşdeğer koniklik kavramı karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde bu kavram demiryolları içerisinde birden fazla alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada bakım periyodlarını belirlemek üzere yol yenileme işlemi yeni yapılan bir demiryolu hattında periyodik ray profili ölçümleri yaparak buradaki aşınma miktarının zaman içerisindeki değişiminin eşdeğer konikliğe etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu ölçümler neticesinde bakım periyodları belirlenecektir. Doğru yapılan bakım çalışmaları demiryolu hattının daha sağlıklı, daha konforlu ve daha uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır. Zamanla aşınan raylarda kılcal çatlaklar, profilde bozulmalar vs. gibi kusurlar görülmeye başlanacaktır. Kusurlar arttıkça ray-tekerlek arasındaki optimum temas noktası zamanla değişerek konforlu ve güvenli seyahat imkanı azalacaktır. Bu durumun önüne geçmek veya kontrollü bir şekilde seyir etmesini sağlamak için periyodik ölçümler yapılarak bakım planı oluşturulmalıdır. Buradaki en uygun bakım prosedürü ilk olarak taşlama işlemidir. Demiryolu hattına ferş edilen ray, işletmeye açılmadan önce mutlaka taşlama işlemine tabi tutulmalıdır. Üretim esnasında ray hava ile temas ettiğinde yüzeyinde kısmi olarak karbon açığa çıkarır. Burada karbon ve oksijen tepkimeye girerek rayın yüzeyinde raydan daha az sert bir tabaka oluşmasına neden olur. Bu tabakanın adı dekarbürize tabakadır ve kalınlığı 0,3-0,5 mm arasındadır. Bu tabaka ray üzerinde homojen olarak bir dağılım göstermemektedir. Ray dekarbürize tabakadan arındırılmadığı süreçte ray yüzeyinde kusurların oluşması çok daha kısa süre içerisinde olacaktır. Taşlama işlemi, bu tabakayı taşıyarak demiryolu hattını daha sağlıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

RAY ve TEKERLEK

2.1. RAY

2.1.1. Rayın Tarihi

Demiryolları ile yük taşıma işinin başlangıç tarihini konusunda birçok kimseler farklı şeyler ifade etmiş olsalar belirli tarih yoktur. Bir kısmı buharla işleyen ilk lokomotifin keşfedildiği tarihi, demiryolculuğun başlangıcı olarak sayarlar. Başka bir kısım ise İngiltere ve Almanya'daki maden ocaklarında demirden yapılmış çubuklar üzerinde arabaların çekildiğini ileri sürerler ve demiryolculuğun başlangıç tarihini bu tarihten itibaren saymanın daha doğru olacağını finkindedirler. Başka bir kısım ise daha ileri giderek Hz. İsa'dan 200 sene evvel keşfedilmiş olan (buhar basısı) istimin 1680 senesinde Newton tarafından makine alanında yürürlüğe konmuş bulunduğunu ileri sürerek, demiryolculuğun başlangıcını bu tarihe kadar götürürler. Taşıma tekniğinin başlangıcı incelenirse, ilk insanların yüklerini yerde sürükleyerek çektikleri görülür. Düz kabul edilen bir yer üzerinde böyle bir çekmeye karşı gelen kuvvet, çekilen cisim ile yer arasında meydana gelen (f)sürtünme direnidir. Bu sayı cismin ve yerin cinsine göre değişkenlik gösterir. Toprak yolda 1.0-1.5, ağaç kaldırımında 0.18 ve asfaltta 0.075'e kadar düşer. İlk insanlar belirli bir kuvvetle daha fazla ağırlık çekebilmek için bu sürtünme direnimi sayısını azaltmaya yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu suretle ilk olarak yollarına bir sıra muntazam kaldırım döşeyerek bu sürtünme direnim sayısını 0.25'e düşürmüşlerdir. Zamanla buda yeterli görülmemiş ve kayan bir taşıt yerine tekerleklerin yuvarlanması ile hareket eden bir taşıt kullanmışlardır. Bu sayede sürtme sayısı bir kayma sayısı olacağı yerde bunun 1/10 değerine yakın değerde olan bir yuvarlanma sayısına çevrilmiş bulunur. Bu suretle $f = 0.025$ 'e düşmüş olan bu sayı, İngiltere ve Almanya'da maden ocaklarında yollara iki sıra kalas (madriye) döşemek ve arabaları bunun üzerinde yürütmek suretiyle $f = 0.018$ 'e kadar düşürülmüştür. Bazı kimseler, buralarda bu madriyelere "tram" dediği için "tramvay" isminin buradan geldiği söylenilir. Ağacın sürtmeye karşı mukavemeti

azdır. Bu sayede çabucak aşınan ağacı, madeni lama ve korniyerlerle kuvvetlendirme yönüne gitmişleridir. Bundan sonra madeni yol üzerindeki yuvarlanma sürtme sayısının daha küçük bulunduğu, hatta çeliğin çelik üzerindeki yuvarlanma sürtme sayısının 0.003 olduğu görülmüş ve 1767 ağaç tramlar terk edilerek yerine, *ray* ismi verilen fonttan madeni çubuklar konmuştur. 1808’de font yerine dövme demir, 1820’de (Con Berkinşav) tarafından demirin haddeden geçirilerek dökme demir yapılması icat edildikten sonra da dövme demir yerine dökme çelik kullanılmaya başlanmıştır [1].

Daha sonra demiryolu İngiltere’de atların çektiği faytonlar için yapılmış, 1797’de ise ilk gerçek demiryolu inşa edilmiştir.

1830’lu yılların başından itibaren birçok Avrupa kentlerinde ilk demiryolu hatları işlemeye başlamıştır ve günümüze gelen bu süreçte 20. yüzyılın başlarında maksimum kapasite ile çalışmışlardır. Demiryolunun gelişmesinin önemli sebeplerinden bir tanesi de yüksek hızlara ulaşabilme imkanını sağlamasıdır. 1835’te İngiltere’de 100 km/h, 1890’da Fransa’da 144 km/h, 1903 senesinde ise Almanya’da 213 km/h hızına ulaşılmıştır. Maksimum işletme hızları çok daha az olmasına rağmen (test hızının 1/2 veya 2/3’ü) rağmen, demiryolu ulaşımının hızlı gelişimine katkıda bulunmuştur [2].

Ray üretimi döküm şeklinde imal edilmektedir. Bu üretim proseslerinin büyük bir kısmı ray çeliği testleridir. Testler genellikle yorulma, yorulma çatlak büyüme, sertlik, gerilme, kırılma tokluğu, kimyasal bileşim ve kalıntı gerilme testleridir [3].

Ray üretiminde beklenmedik üretim hataları meydana gelebilmektedir. Üretim aşamasındaki bu hataların genel sebebi döküm kaynaklıdır. Ray çeliğinde oluşan bu hatalar; üretim hataları, uygun olmayan kurulum-kullanım ve rayın yorulmasından kaynaklı hatalar olarak adlandırılır [4].

2.1.2. Demiryolunun Tarifi

Jorj Stefeson’dan bugüne kadar mekanik kuvvet o kadar arttırılmıştır ki, artık büyük hızlarla büyük ölçüde taşıma işlemi yapılabilmektedir. Bundan ötürü bugün

demiryolunu “karada, ray denilen madeni çubuklar üzerinde mekanik kuvvetle çekilen taşıt arabaları içinde, büyük ölçüde ve büyük hızla, insan, eşya ve haberler taşıyan bir tesistir.” diye tarif eder [1].

Bu tariften, demiryolu tesisinin başlıca iki kısımdan meydana geldiği anlaşılır;

Bunlardan birincisinde yükleri taşıyan taşıtlar vardır. Bu taşıtlara vagon denir. Bu vagonlar insan ya da yük taşıma durumuna göre yük vagonu ve yolcu vagonu olmak üzere iki çeşitle adlandırılır. Ve bu vagonları çeken araçlara lokomotif adı verilir.

Demiryolu tesisinin ikinci kısmı ise çeken ve çekilen araçların üzerinde yuvarlanarak hareket ettikleri yoldur. Buna demiryolu adı verilir.

Raylı sistem araçlarının birbirine paralel olan iki rayın üzerinde hareket etmesini sağlayan çeşitli elemanlardan oluşan yapıya demiryolu adı verilir. Demiryolunu altyapı ve üstyapı olarak iki bileşenle açıklamak mümkündür. Balastlı bir demiryolu üstyapısı genel olarak raylar, ray bağlantı elemanları, ray plakaları ve pedleri, traversler, balastlardan oluşur [5].

Demiryolunun geçtiği yerlerde tabii arazideki çukur yerlerin doldurularak, yüksek yerlerin yarılarak veya tünel delinerek geçilmek suretiyle elde edilen, tesviye edilmiş (düzeltilmiş) toprak kısmına platform denir. Platform denilen zemin ile bu zemini elde edebilmek için yapılan sanat yapılarının tamamına altyapı denir. Platform, yarmalar, dolgular (dolmalar), tüneller, köprüler, geçitler, sağlamlaştırma ve önleme yapıları demiryolu altyapısını oluşturmaktadır [6].

2.1.3. Ray Profilleri

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

Rayın ergiyik haldeki çelik malzemesi yaklaşık 1250°C’de haddeleme işlemine tabi tutulur daha sonra yaklaşık 50°C’de ise düzeltme işlemi uygulanır. Düzeltme sırasında ray içinde kalıcı gerilmeler oluşur, daha sonra rayın içindeki kusurlar ultrasonik testlerle ve yüzeydeki kusurlar ise girdap akım yöntemi ile tespit edilir.

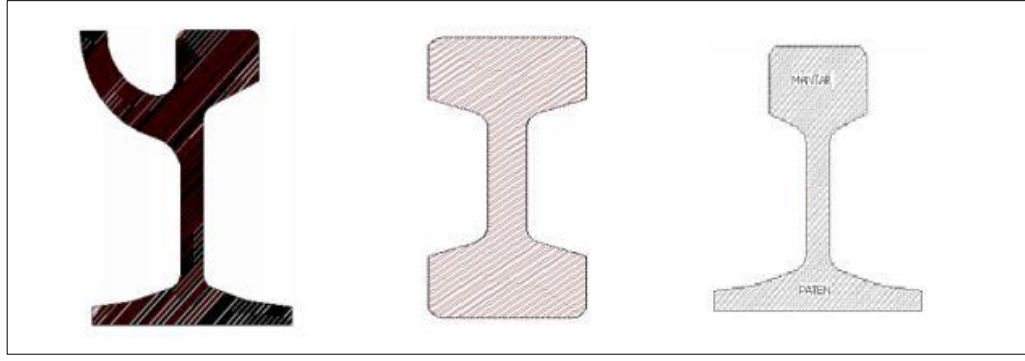
Ray profillerinin karşılaması gereken özellikleri aşağıdadır;

- Hareket alanı yeterince geniş olmalıdır. Çünkü tekerlek ve ray arasındaki ilişkiden oluşan yüzey basıncını en aza indirecek edecek şekilde imal edilmelidir.
- Rayın ömrünün uzun olması için mantar kısmı yeteri kadar aşınmaya izin vermelidir.
- Ray gövdesi, taşıma kapasitesi ve esneme mukavemeti açısından yeterli kalınlığa sahip olmalıdır.
- Ray kesiti, yatay ve dikey olarak maruz kalacağı yüklere karşı yeteri kadar dayanıklı olmalıdır.
- Faydalı gerilme akışına ulaşmak için geçiş alanları yeterli yarıçapa sahip olmalıdır.
- Statik sebeplerden dolayı ağırlık merkezi yaklaşık ray yüksekliğinin yarısı kadar olmalıdır [7].

2.1.4. Ray Çeşitleri

2.1.4.1. Oluklu Raylar

Bu ray tipi genellikle hafif raylı sistem araçlarının (tramvay gibi) kullandığı hatlarında tercih edilir. Ayrıca demiryolu ve karayolunun kesiştiği yerlerde de kullanılırlar. BoStrab standardına göre oluk en az 13mm derinlikte olmalıdır ama eğer boden ucu daire yarıçapı 3mm’den büyükse, fazla olan miktar kadar oluk derinliği artırılmalıdır. Oluk derinliği maksimum aliymanda 45 mm ve kurplarda 60 mm olmalıdır. Günümüzde tramvay hatlarının aliymanlarında tek mantarlı (Vinyol) rayların kullanıldığı sadece kurb bölgesinde oluklu rayları kullanıldığı örnekler görülmektedir.



Şekil 2.1. Ray çeşitleri.

2.1.4.2. Çift Mantarlı Raylar

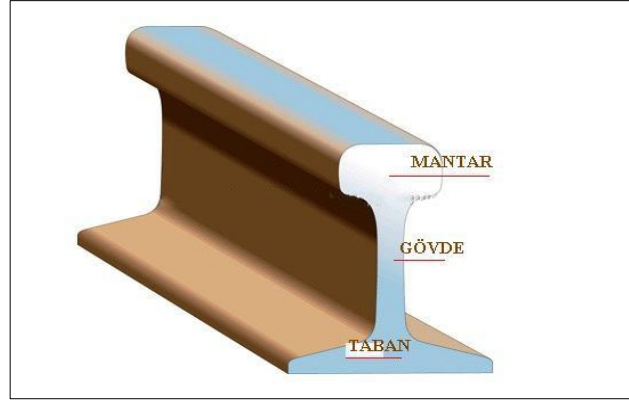
Bu tip raylar simetrik bir yapıya sahip olarak altta ve üstte olmak üzere iki adet mantara sahiptir. Bu ray çeşidinin oluşmasındaki asıl fikir zamanla aşınacak ve deforme olacak olan ray mantarının değiştirilerek rayın diğer tarafının kullanılması amaçlanmıştır. Fakat rayın üst mantarı aşınırken alt tarafta kalan mantar zaman içerisinde korozyona uğradığı görülmüştür. Bu yüzden bu ray tipinin çok fazla kullanışlı olmadığı anlaşıldı. En son olarak bu rayı İngilizler 1938 yılında kullanmayı bıraktılar. Günümüzde ise Fransa'nın bazı bölgelerinde ikinci dereceden hatlarda kullanılmaktadır.

2.1.4.3. Tek Mantarlı Raylar (Vinyol Tipi)

Amerika'lı Stevens tarafından ilk defa 1832 yılında yapılmış olan tek mantarlı raylar ülkemizde ve dünyada halen kullanılmaktadır. Ancak Vinyol ismini almasının sebebi ise bu ray tipinin geniş anlamda kullanımı sağlayan kişi İngiliz mühendis Vinyol olmasıdır [7].

2.1.5. RAYLARIN BÖLÜMLERİ

- **Mantar:** Rayın tekerlekle temas ettiği yükün üst yapıya geldiği kısımdır.
- **Gövde:** Mantardan gelen yükleri tabana iletir. Kırılmayacak kadar kalın, fakat fazla maliyetli olmayacak kadar ince bir şekilde imal edilir.
- **Taban:** Ray gövdesinin altındaki kısma taban denir. Taban, raya gelen yükleri daha geniş bir yüzeyde traverse iletir. Aynı zamanda rayın traverse bağlantısı tabandan yapılır.



Şekil 2.2. Rayın bölümleri.

2.1.6. RAYLARIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Raylar tarih boyunca farklı kimyasal bileşimde üretilmiştir. Bunlar perlitik, yüksek manganlı östenitik, beynitik, martenzit ve diğer ray çeliği birleşimlerinden meydana gelmektedir [8]. Ray çeliğinin içerisinde demirden farklı olarak karbon, silis, manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Bunlardan karbon, silis ve manganezin belirli miktarı, rayı daha dayanıklı hale getirmesi açısından önemlidir. Fosfor ve kükürt ise çeliğin içerisinde tamamen çıkarılmayan zararlı elementlerdir.

- **Karbon:** çeliğin sertliğini artırıcı etkiye sahiptir, ancak malzemenin içerisinde bulunan karbon daha gevrek olmasına neden olur. Ray çeliği içindeki karbon miktarı çelik kalitesine göre değişkenlik gösterir. (Yaklaşık olarak % 6 ila % 8,2 arasında)
- **Silis;** çeliğin korozyona uğramasını zorlaştıran bir element tipidir. Silis malzemenin daha akıcı, yoğun, ince zerreli ve homojen olmasını sağlar. Ray çeliği içindeki silis miktarı % 1,3 ila % 8 arasında olmalıdır.
- **Manganez;** çeliği aşınma direncini artırıcı davranışta bulunarak, çeliğin daha dayanıklı olmasını sağlar. Ray çeliği içindeki manganez miktarı % 8,5 ila % 12,5 arasında olmalıdır.
- **Fosfor;** çeliğe sertleştirici bir davranış kazandırmasına rağmen, elastitenin düşürülmesinde karbondan daha fazla etkilidir. Bu nedenle rayın içerisinde % 3'ten fazla fosfor olmamalıdır.

- **Kükürt;** ray çeliğinin içerisinde olmasını istemediğimiz maddedir. Rayın içerisinde tamamen çıkarılmaması sebebiyle %3'e kadarı kabul edilebilir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber daha fazla ağırlıkta yük çekebilecek lokomotifler geliştirilmiştir. Artan taşıma gücü daha fazla dingil basıncı ile yüksek hızlarda işletmecilik yapma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu durum raydaki istenilen mukavemet değerinin ray kesitinin büyütülmesi ile sağlanabileceğini göstermiştir. UIC standartlarına göre ray çeliğinin çekme mukavemeti en az 880 N/mm² olarak tayin edilmiştir. Kimyasal yapısında değişiklik yapılmak suretiyle daha sert imal edilen raylarda kırılma riski daha yüksektir ve üzerinden geçen tekerleklerin daha çabuk aşınmalarına sebep olur. Daha yumuşak imal edilen raylar ise çok çabuk aşındığından ekonomik olmamaktadır. Bu yüzden, ray aşınmayacak kadar sert ve kırılmayacak kadar esnek yapıda olmalıdır. Raylar aşınmaya karşı daha dirençli hale getirilmek istenilirse, ray mantarları ısıtılarak geçirilerek sertleştirilir. Bu sertleştirme işlemi için, rayların mantar kısmı elektrik veya gaz kullanılarak 1050 °C'ye kadar ısıtılır. Daha sonra sıcaklık saniyede 3-4 °C derece oranında azaltılarak 500 °C'ye düşürülür. Bu şekilde rayın sertlik oranı 280 HBW'den 360 HBW (Brinell sertlik sayısı) değerine yükseltilir. Ray uçlarında ve mantarında yapılan bu sertleştirmeler sonucunda derinliği 14 mm ile 40 mm arasında değişen sert bir bölge elde edilir.

2.1.7. RAYLARIN SINIFLANDIRILMASI

2.1.7.1. Profil Özelliklerine Göre

Raylar daha önceleri kullanıldıkları hat bölgesine göre, daha sonraları ise bir metresinin ağırlığına göre sınıflandırılmıştır. Ankara tipi ray, Kayseri tipi ray, Bağdat tipi ray 39.520 kg/m tipi ray ve 46.303 kg/m tipi raylar buna örnek olarak sayılabilir.

Rayların görünüşleri aynı olmasına rağmen farklı isimlerle adlandırılmasının yol açtığı karışıklıkları önlemek amacıyla, TCDD Genel Müdürlüğü rayların tanımlanmasında UIC standartlarına uygun hareket edilmesini kararlaştırmıştır.

Çizelge 2.1. Ray profil özellikleri.

Yeni İsmi	Eski İsmi	Rayın Birim Ağırlığı		Taban Genişliği	Yüksekliği	Mantar Genişliği
		TCDD 15. SERİ	kg/m			
60 E1	UIC 60	TCDD 15. SERİ	60.340 kg/m	150 mm.	172 mm.	72 mm.
		EN 13674-1	60.210 kg/m			
60 E2	---	EN 13674-1	60.030 kg/m.	Mantar profili farklı makas rayı		
49 E1	DIN S 49	TCDD 15. SERİ	49.430 kg/m	125 mm.	149 mm.	67 mm.
		EN 13674-1	49.390 kg/m			
49 E2	S 49 T	TCDD 15. SERİ	49.050 kg./m	125 mm.	148 mm.	67 mm.
		EN 13674-1	49.100 kg./m			
46 E2	S 46 (U33)	TCDD 15. SERİ	46.303 kg./m	134 mm.	145 mm.	64 mm.
		EN 13674-1	46.270 kg./m			
--	S 39	TCDD 15. SERİ	39.520 kg./m	120 mm.	138 mm.	62 mm.

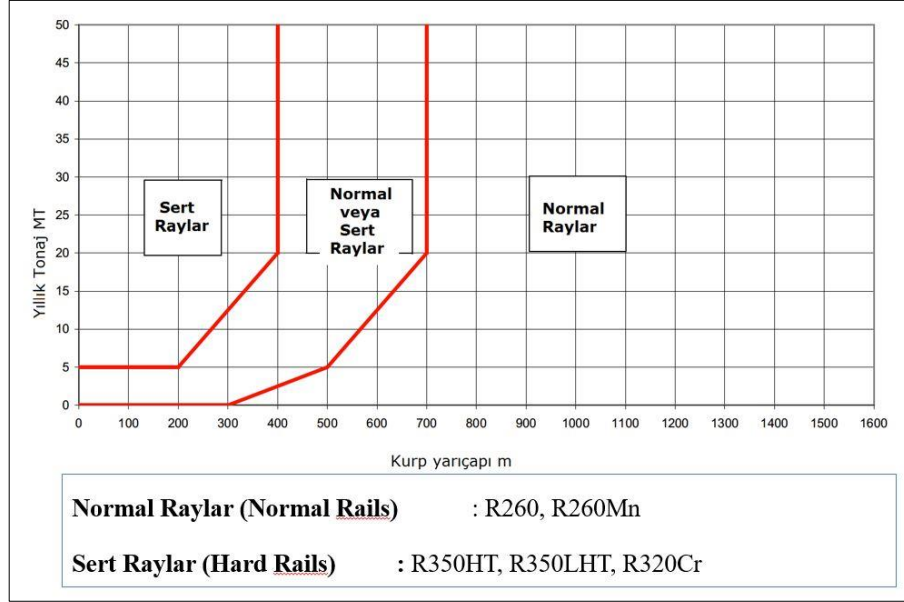
2.1.7.2. Ray Çelikleri Kalitesine Göre Sınıflandırılması

Demiryolu hattında kullanılan ray çelikleri zamanla teknolojinin ve bilimin gelişmesiyle daha mukavemetli ve sertlik miktarları artırılarak imal edilmektedir.

Çizelge 2.2. Ray çeliklerinin sınıflandırılması.

Çeliğin Sertliği		Asgari Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Sertliği (HBW)	Tanımlama	Çizgisel Gösterimi
Çelik İsmi	Çelik Numarası				
R200	1.0521	680	200 – 240	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmemiş	Çizgisel gösterimi yok
R220	1.0524	780	220 – 260	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmemiş	=====
R260	1.0623	880	260 – 300	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmemiş	=====
R260Mn	1.0624	880	260 – 300	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmemiş	=====
R320Cr	1.0915	1080	320 – 360	Alaşımlı (1 %Cr) Isıl işlem görmemiş	=====
R350HT	1.0631	Mantar 1175 Gövde 880	350 – 390	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmüş	=====
R350LHT	1.0632		350 – 390	Alaşimsız (C-Mn) Isıl işlem görmüş	=====

Demiryolu hattında kullanılan ray profilleri EN 13674-1 nolu standartta, makas ve kruvazmanlarda kullanılan ray profilleri ise EN 13674-2 nolu standartta tanımlanmıştır.



Şekil 2.3. Sertlik değerlerine göre rayların adlandırılması.

2.1.8. RAYIN MARUZ KALDIĞI KUVVETLER

Çeken ve çekilen araçların tekerlekleriyle doğrudan doğruya temas halinde bulunan, dolayısıyla alt yapıya emniyetle aktarılması gerekli bütün kuvvetlere ilk aşamada maruz kalan ray üst yapının en önemli elemanıdır. Yuvarlanma ray üzerinde olduğundan buradaki süreksizlik noktalarına (eğrilik, düşüklük, yuvarlanma yüzeyindeki bozukluk vs.) maruz kalan durumlarda bu etki olduğu gibi tekerleğe ve azalarak alt yapıya intikal eder. Düşük hızlarda pek önemsenmeyecek bu kusurlardan bazıları özellikle hız 100 km/h 'i geçtikten sonra özellikle önem kazanır. Bu sebeple ray, özellikle yuvarlanma yüzeyi düzgün ve kusursuz olmalıdır. Rayın genel durumu hakkındaki bu özelliklerden başka; üzerinde hareket eden yüklere sürekli deformasyona uğramadan dayanabilmeli ve elastik deformasyonların miktarı sarsıntıya sebep olmayacak düzeyde olmalıdır. Yukarıdaki şarta göre oldukça yüksek mukavemetli olması gereken ray, aynı zamanda gevrek olmamalıdır.

2.1.8.1. Düşey Kuvvetler

Rayı düşey doğrultuda eğilmeye çalıştıran çeken ve çekilen araçların tekerlerinden raya intikal eden kuvvetlerdir.

2.1.8.2. Yanal Kuvvetler

Oluşan bu kuvvetleri aliymanda (doğru yola) etki eden kuvvetler, kurba etki eden kuvvetler ve eksenel kuvvetler olmak üzere üç başlıkta inceleyeceğiz.

Aliymanda etki eden yanal kuvvetler

Çeken ve çekilen araçların tekerlerinin konik olması, dingile sıkı sıkıya bağlı bulunması, herhangi bir sebeple yuvarlanma dairesi yarıçaplarının değişmesiyle demiryolculukta *lase* hareketi denilen sünizoidal bir hareketi doğurur.

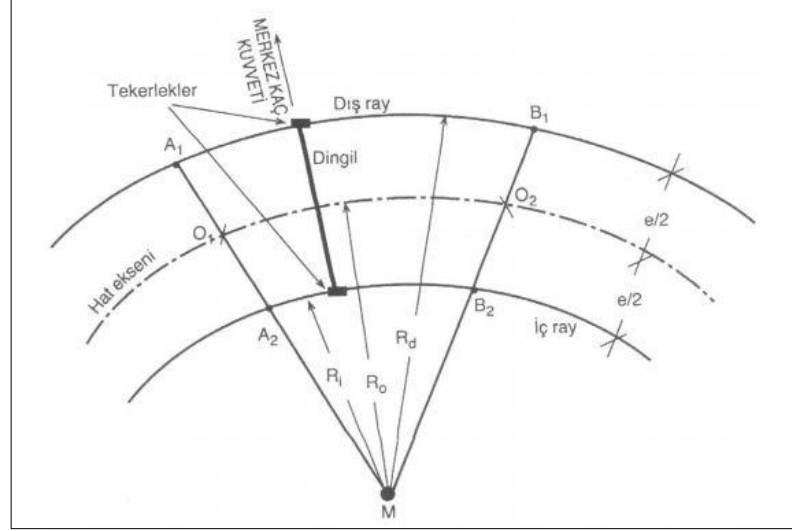
Dingillerin rahat hareketini sağlamak amacıyla rayın iç yüzü ile boden arasında oynama payı denilen 10 mm'lik bir fark vardır. Tekerleklerin raya temas ettikleri noktalardaki yarıçapları (yuvarlanma daireleri yarıçapı) eşit olduğu müddetçe dingilin hareketi doğrusaldır.

Aynı mil üzerinde hareket eden tekerleklerin r_1 ve r_2 yarıçaplarının herhangi bir sebeple birbirinden çok azda olsa farklılaşması, büyük yarıçaplı olanın küçük yarıçaplı olanın tarafında doğru daire yayı çizmeye zorlar. Bunun sonucunda da deray diye tabir ettiğimiz çeken ve çekilen araçların ray hattından çıkması durumu oluşabilir.

Kurbalarda etkiyen yanal kuvvetler

Demiryolu araçlarında dingiller otomobilde olduğu gibi bir direksiyonla eksen tarafında dönmezler, ray demiryolu araçlarına kılavuzluk eder. Yarıçap farklarının müsaade ettiği eğriden daha dar bir kurb çizmeye zorlanan dingillerin dış tekerine raydan bir yanal kuvvet etki eder buna kılavuzlama kuvveti denir. Bu kılavuzlama kuvvetinden farklı olarak deverin fazla veya az olmasından dolayı da yanal kuvvetler meydana gelir.

Gerek alıyman gerekse kurlblarda mevcut olan bu yanal kuvvetlerden başka rayların projede öngörülen durumlardan uzaklaşması örneğın bir dizinin diğır diziye göre yüksek olması, yolun sağa sola kayması yanal kuvvetleri doğurur.



Şekil 2.4. Örnek kurlp profili.

Raya Tesir Eden Eksenel Kuvvetler

Genellikle aracın duruş ve kalkış durumunda oluşan frenaj ve demeraj kuvvetleri, contalardaki vuruntular özellikle sürekli kaynaklı raylardaki genişleme kuvvetleri spesifik ray özelliklerinin bilinmesiyle kolayca hesaplanabilir [9].

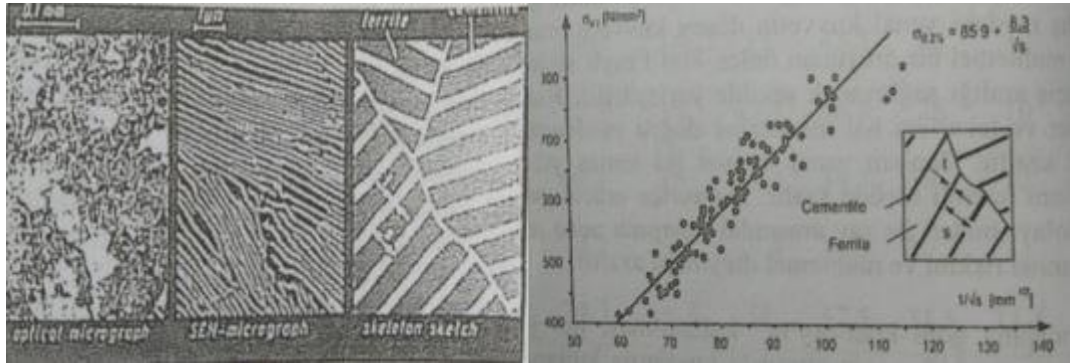
2.1.9. RAYIN MEKANİK DAYANIMI

Demiryollarında genelde en yaygın biçimde kristalleşme şartlarına göre isimlendirilen perlitik raylar kullanılmaktadır. Perlitik ray malzemesi, ferrit ve sementitlerden meydana gelen damarlı bir kristal yapıdır. Rayın mekanik özellikleri (aşınma dayanımı, çekme mukavemeti, tokluğu) sementit (Fe_3C) lamelleri arasındaki mesafe, lamel kalınlıkları ve dane ebatı ile belirlenir.

Sementit lameller arasındaki mesafe miktarı düştükçe rayın akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artar, bu mesafe azaldıkça çekme dayanımına göre akma dayanımı oranı daha fazla artar. Lameller arası mesafe alaşım elementleri oranlarına veya soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir [10].

Raylar tekerleklerin yuvarlanma yüzeyi ile devamlı temas halinde olduklarından dolayı birbirlerini sürekli olarak aşındırırlar. Rayın mukavemeti tekerleğin yuvarlanma yüzeyine göre fazla olması tekerleğin raydan daha fazla aşınmasına, tekerleğin yuvarlanma yüzeyi ise raydan daha yüksek mukavemetli olması ise rayın tekerleğe göre daha fazla aşınmasına sebep olacaktır. Buradaki asıl amaç ray ve tekerleğin yuvarlanma yüzeyi ile beraberce aşınmasının en düşük düzeyde tutarak ikisinin de ömrünü uzun tutmak olacaktır.

Ray çeliğinin dayanıklılığının artması çeliğin içyapısını değiştirmekle, karbon miktarını artırıp, içerisine manganez eklemekle elde edilebilir. Bu durum ise rayda uzama miktarının azalmasına yani kırılma davranışın artmasına sebep olur. Rayda aşınma mukavemetinin yüksek olması istendiği gibi kopma uzamasının da %10'dan az olması istenmez.



Şekil 2.5. Perlitik ray malzemesi-ray rayanımı.

Demiryolu ile taşıma hızının ve yük kapasitesinin artması ray çeliğinin kalitesinin artmasındaki en büyük sebeplerinden biridir. 1882'de maksimum çekme dayanımı 50 kg/mm² iken günümüzde 70 kg/mm² ile 120 kg/mm² arasındadır. Ray çeliğinin mekanik dayanımının artırılması daha gevrek bir davranış göstermesiyle beraber ani kırılmalara yol açabilir. Bu yüzden, daha fazla dayanım kırılma etkideki artışları beraberinde getireceğinden istenmeyen bir durumdur.

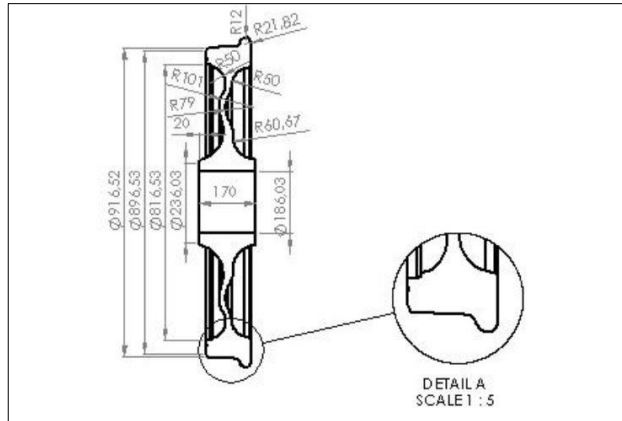
Ray çeliklerini iki çeşitte sınıflandırabiliriz.

- Normal çelik sınıfı, %0,4-0,5 karbon, maksimum çekme dayanımı 70-90 kg/mm^2
- Sert çelik sınıfı, %0,7-0,8 karbon, kurlarda kullanılır, maksimum çekme dayanımı 90-120 kg/mm^2

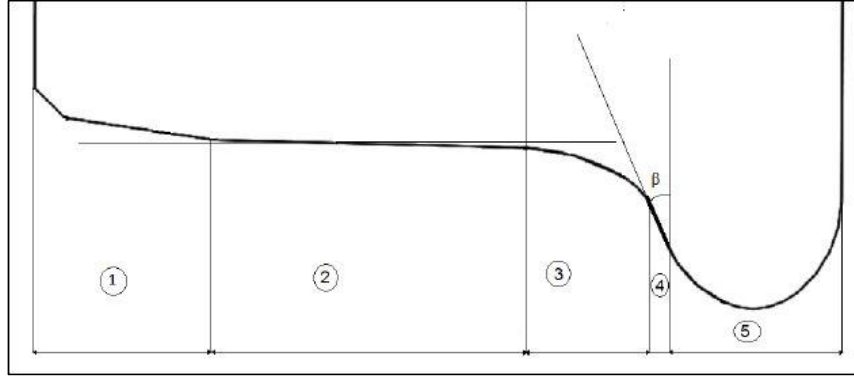
R200 (700) ve R260 (900A) raylar dayanıklılık özelliklerini içerisinde bulundurduğu karbon miktarına bağlı olarak kazanırken, R260Mn (900B) tipi raylar ise dayanıklılık özelliklerini içerisinde bulundurduğu manganez miktarından elde etmektedir. R260 tipi rayın kaynak özelliği daha iyi olduğu için Avrupa'da çoğunlukla standart ray olarak kullanılmaktadır. R350 HT, R260 rayın ısıl işleme mantarı sertleştirilmiş halidir. R350 LHT ise krom oranı %0,3 ile sınırlandırılmış düşük alaşımly ısıl işleme sertleştirilmiş raydır.

2.2. TEKERLEK

Hattın yönüne göre, ray üzerinde yuvarlanarak hareketi sağlayan tekerlekler, araçların seyir emniyeti açısından birinci derecede sorumlu elemanlardır. Bu nedenle raylar ile uyumlu olması gerekir. Tekerleklerin ray üzerindeki bölümleri aşağıdaki gibidir.



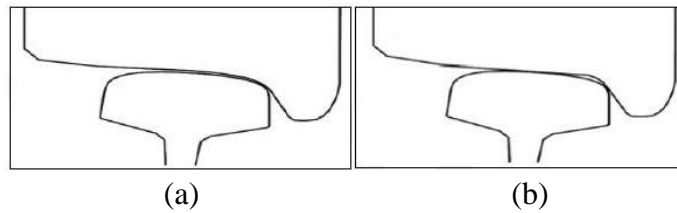
Şekil 2.6. UIC 515 tekerinin kaba ölçüleri ile teknik resmi.



Şekil 2.7. Tekerlek profilinin bölümleri (1: Pah bölgesi 2: Yuvarlanma yüzeyi 3: Flanş boğazı 4: Flanş düzlüğü 5: Flanş kalınlığı) [11].

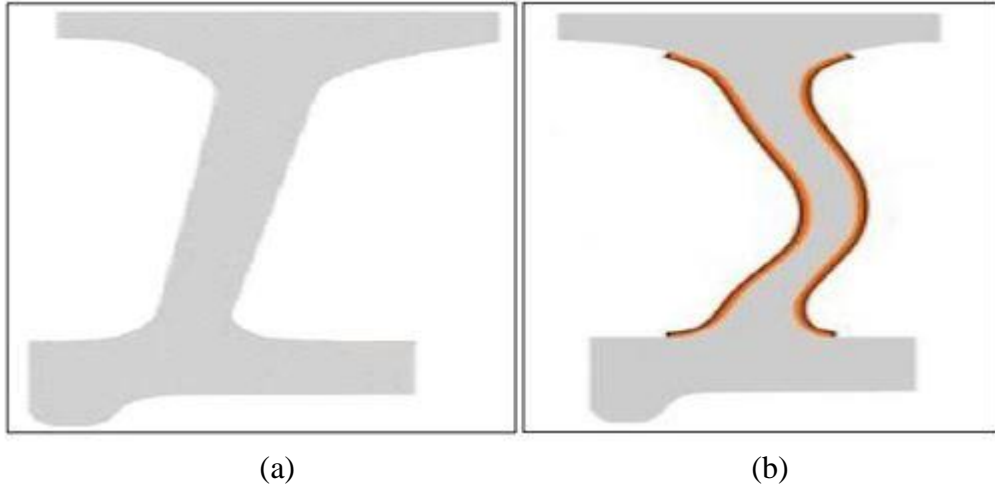
Tekerleğin dışına verilen pah ile makas geçişlerinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Yuvarlanma yüzeyi belirli bir eğimde olup, tekerlek konikliği (λ) ile gösterilir. Kurplarda, dış ve iç ray üzerindeki tekerlerin aynı devri yapması istenir. Tekerlek konikliği sayesinde çap farkı sağlanarak, tekerleklerin devir sayıları eşitlenmeye çalışılır ve araçların dönüşü daha kolaylaşır. Aliymanda doğrusal hareket edildiği varsayılırsa, bir aksa bağlı iki tekerleğin yuvarlanma çapları eşit olur. Fakat bu durum, pratikte tam olarak gerçekleşemez ve iki tekerlek arasında çap farkından dolayı tekerlek seti hat üzerinde salınım hareketi yapar.

Flanş boğazındaki yuvarlatma çapı ile ray mantarının köşesindeki yuvarlatma çapı eşit ya da çok az derecede büyük olması gerekmektedir. Bu bölgedeki temas dar kurplarda gerçekleşir. Flanş boğazındaki yuvarlatma çapı, ray mantarının köşesinin yuvarlatma çapından bariz şekilde büyük olması halinde tek nokta teması olur. Bu durum, büyük yüzeysel basınçlar ve aşırı aşınmalar meydana getirir. Küçük olması halinde ise iki nokta teması oluşur ve flanş açısından dolayı flanş sürtünme yüzeyleri meydana gelir. Bu nedenle çapların yeterince eşit olması gerekmektedir. Kurplarda meydana gelen tek nokta ve iki nokta tekerlek-ray teması Şekil 2.8'deki gibidir.



Şekil 2.8. Flanş boğazında oluşan tek nokta teması (a) ve çift nokta teması (b)

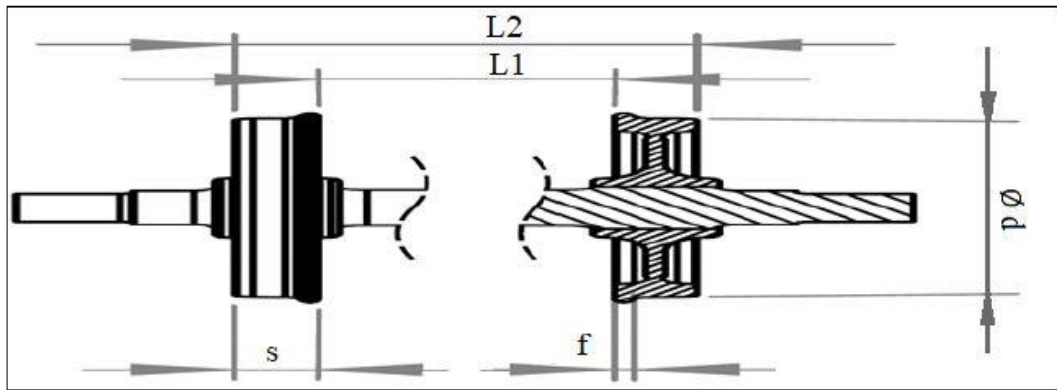
Tekerlekler Şekil 2.9'daki gibi, dalgalı veya düz bir şekilde üretilmiş olabilir. Trenlerde ve vagonlarda farklı tekerlek çeşitleri görmek mümkündür. Ancak günümüzdeki tekerlek ve fren sistemlerine ayrılan alan yeteri kadar geniş olmadığı için lokomotif ve metrolarda tekerin düz şekil daha yaygındır. Dalgalı şekil ise vagonlarda daha çok kullanılan tekerlek formudur. Tekerleklerin yuvarlanma çapı ise 400-1200 mm arasında değişmektedir.



Şekil 2.9. Düz tekerlek şekli (a) ve dalgalı tekerlek şekli (b).

- Metro: 400-650 mm,
- Yük trenlerinde: 800-900 mm,
- Yüksek hızlı trenlerde: 840-1200 mm.

Şekil 2.10'deki güvenli demiryolu trafiği için kabul edilebilir değerler, Çizelge 2.4 teki gibidir (EN 15313).



Şekil 2.10. Tekerlek parametreleri.

Çizelge 2.3. EN 15313 standardına göre tekerlek parametreleri.

Kriter	En 15313 İçerisindeki Bölümü	Tekerlek Çapı (mm)	Limit Değeri	
			Minimum	Maksimum
Flanş Kalınlığı (f)	6.2.1.3	$330 \leq d \leq 760$	27,5	33
		$760 \leq d \leq 840$	25	
		$840 < d$	22	
Flanş Açısı (β)	6.2.1.4	-	6,5	-
Tekerleklerin Sırt Yüzü Arası Mesafesi (L1)	6.2.1.5	$330 \leq d \leq 760$	1359	1363
		$760 \leq d \leq 840$	1358	
		$840 < d$	1357	
Tekerleklerin Sırt Yüzü Arası Mesafesi (L2)	6.2.1.6	$330 \leq d \leq 760$	1415	1426
		$760 \leq d \leq 840$	1412	
		$840 < d$	1410	
Tekerlek Genişliği (s)	6.2.1.10	-	135	Tolerans -2,+1
		-	140	

Flanş açısı, genellikle 65-75° değerleri arasındadır. Dar kurplarda, yüksek yanal yükler oluşmaktadır ve yanal yükler arttıkça trenin deray (tekerleğin raydan çıkma) etme riskini artırmaktadır. Nadal kriterine göre, flanş açısı küçüldükçe tekerleğin raydan çıkma riski artmaktadır.

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan\beta - \mu}{1 + \mu \tan\beta} \quad (2.1)$$

Demiryolu tekerleklerinin temel malzemesi, alaşımlı ve alaşımsız çeliktir. Neredeyse %95'lik kısmı haddelenmiş çelikten geriye kalan kısım ise döküm çelikten oluşmaktadır. ER1-ER9 arasındaki sertliklerde malzeme standartları bulunmaktadır. ER1'den ER9'a doğru malzeme sertliği artmaktadır. En yaygın kullanılanları ER6, ER7, ER8 ve ER9'dur. Yük vagonlarında ER6 ve ER7, metro ve yolcu vagonlarında ER8 ve yüksek hızlı trenlerde ER8 ve ER9 sertlikteki çelikler kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4. EN 13262 standardında bulunan tekerlek çeliği sertliklerinin mukavemeti.

Çelik Sertliği	Akma mukavemeti (N/mm ²)	Asgari çekme mukavemeti (N/mm ²)
ER6	≥500	780/900
ER7	≥520	820/940
ER8	≥540	860/980
ER9	≥580	900/1050

2.2.1. Tekerlek Malzemesi

Demiryolunda kullanılan monoblok tekerlek malzeme sınıfı GM/RT2466 standardı olarak adlandırılır. Belirli araç uygulamaları için kullanılan tekerlek sınıfı BS 5892 Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Tekerlek malzeme sınıfı.

Tekerlek Tipi	Tekerlek malzeme sınıfı (BS 5892 VE UIC 812-3)
Yük taşıma için, entegre fren diskli tekerlek	R7E
Yük taşıma için, montajlı fren diskli tekerlek	R8E
Diğer yük taşıma için tekerlekler	R7T ve R8T
Tüm yolcu taşıma aracı ve diğer tekerlekler	R8T

Tekerin ısıtım işlem ve kimyasal bileşimine göre malzeme sınıfı belirlenir. Kimyasal bileşim karakterleri belirlenir.

Çizelge 2.6. Kimyasal bileşime göre malzeme sınıfı.

Kimyasal Bileşim	D sınıfı (tipik)	R7 Sınıfı (maks)	R8 Sınıfı (maks)
C	0,61	0,52	0,56
Si	0,33	0,40	0,40
Mn	0,7	0,80	0,80
P	0,027	0,04	0,04
S	0,022	0,04	0,04
Cr	0,30	0,30	0,30
Cu		0,30	0,30
Mo	0,05	0,08	0,08
Ni	0,20	0,30	0,30
V		0,05	0,05
Cr+Mo+Ni		0,60	0,60

Tekerlekle üretiminde kullanılan alaşım elementlerinin etkisi ise şu şekildedir:

Karbon(C): Çeliklerin temel alaşım elementidir. Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzama ve şekillenebilirlik kabiliyetini ise azaltır. Döküm işlemi için kolaylaştırıcı bir faktördür. Şekillendirme işlemi yapılacak olan çeliklerde karbon yüzdesi düşük olmalı, dayanıklılık özelliklerinin yüksek olması istenilen durumlarda ise çeliğin karbon yüzdesi daha fazla olmalıdır. Tren tekerleklerinde bulunan C miktarı ülkelere göre 0,4 ile 0,6 aralığında değişim göstermektedir.

Mangan(Mn): Üretim aşamasında çeliğin içerisinde bulunan elementlerden bir tanesidir. Çeliğin mukavemetini arttıran etkiye sahiptir. Bununla beraber rayın, sertleşebilme ve kaynak kabiliyetini de artırır. Manganın en önemli özelliği kükürtle MnS bileşiği yapması ve demir kükürt FeS bileşiği oluşumunu engellemesidir. Ayrıca, yüzeyde FeS sıcak kırılabilirliğe sebep olur. Genellikle oksijenle aktivitesi yüksektir. Tren tekerleklerinde Mn oranı 0,6 ile 0,9 aralığında değişiklik göstermektedir.

Silisyum(Si): Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastitesini artırır. Çelik yapısındaki Si miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan istenmeyen tabaka oluşma ihtimali artar. Elektriksel akım kaybını engelleyen bir element tipidir. Silisyum oksijenle aktivitesi

yüksektir. Tren tekerleklerinde üretim yöntemi ve ülkelere göre 0,3 ile 0,5 aralığında bulunmaktadır.

Fosfor (P): Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırıcı etkiye sahip bir elementtir. Uzama ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılma yaradır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır. Fosfor, çelik içerisinde üretim işle aşamasında kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri sebebiyle elden geldiği kadarıyla yapıdan uzaklaştırılmaya çalışılan element tipidir. Tren tekerleği için müsaade edilen maksimum değer 0,02'dir.

Kükürt (S): Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz alçak ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılma sebeptir ve haddeleme işlemini zorlaştırır. Fosfor gibi istenmeyen yabancı maddeler olarak kabul edilen bir elementtir. Normal şartlarda tren tekerleklerinde hiç istenmez ancak 0,015 değerine kadar kabul edilebilir.

Krom(Cr): Çeliğin esnekliğini azaltsa da mukavemet özelliğini arttıran bir alaşım elementidir. Cr, çeliğin ısıya dayanımını artırır. Krom, dengesi kolayca bozulmayan karbürü meydana oluşturur. Çelikte her %1,0 oranındaki Cr yüzdesi artışına karşılık, çekme dayanımında yaklaşık olarak 8-10 kg/mm² lik bir artış görülür. Üretici firmanın isteğine göre tekerleklerde 0,2 ile 0,4 arasında bulunabilir.

Nikel(Ni): Darbe tokluğunu ve tavlı çeliklerde mukavemeti yükseltici özellik gösterir. Çeliğin dayanımını mangan ve silisyuma göre nikel daha fazla artırır. Çelikte nikel, özellikle kromla beraber bulunduğu zaman sertliğin derinliklere inmesini sağlar. Krom nikelli çelikler, tren frenlemesinde meydana gelen ısıya ve bunun sonucu oluşan kabuklaşmaya dayanımlıdır.

Molibden(Mo): Tane büyümesini önler, mukavemeti artırır. Çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Ancak, tekerleklerde yüksek oranlarda fazla sertlik verdiği için 0,05 oranına kadar izin verilmektedir.

Vanadyum(V): Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını artırıcı etkiye sahiptir. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır. Vanadyum, tane küçültücü ve karbürleme etkisi ile mikro alaşımlı çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir. Çeliklerin ısı dayanımını arttırmaktır. Dövme yöntemi ile üretilen tekerleklerde maksimum 0,06 ya kadar izin verilirken mikro alaşımlı döküm tekerleklerde daha yüksek değerlere izin verilebilmektedir.

Bakır(Cu): Akma ve çekme dayanımını artırır, yüzde olarak uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Korozyon direncini yükseltici davranışta bulunur. Tren tekerleklerinde içerisinde 0,3 miktarında bulunur.

Tren tekerleği çeliklerinde ana alaşım elementleri Mn ve Si olmasıyla birlikte V, Ti vb. elementlerle mikro alaşım yapabilmektedir. Amaç uzun ömürlü, ısıya ve aşınmaya dayanıklı demiryolu tekerleği üretmektir. Örneğin, yüksek oranda Si ve düşük oranda Cr içeren kombinasyon ile tekerlek tam olarak sertleşebilir. Böylelikle fren gibi ısıya neden olan durumlarda yapısını koruyabilen kararlı perlitik yapı büyük oranda oluşur. Bu yapı sürtünen yüzeyde 50 mm derinliğe kadar inebilmektedir. Belli limitlerde mikro alaşımlamaya gidildiğinde tekerlerin raya temas eden kısmı daha fazla sertleştirilemez, dolayısıyla aşınır ve bu aşınma yaklaşık 150–200 bin km civarında 10 mm'yi bulur. Alaşım standartları aynı zamanda üretim yöntemine göre değişebilmektedir.

Çizelge 2.7. BS5892 tekerlek malzeme sınıfının mekanik özellikleri.

Tekerlek Malzeme Sınıfı	Çekme Gerilmesi (MPa)	Minimum Elengasyon	Sertlik Brinell (HB)
R7T	820-940	%14	241-277
R7E	780-940	%14	229-277
R8T	860-980	%13	255-285
R8E	820-980	%13	241-285
D sınıfı	960	%20	

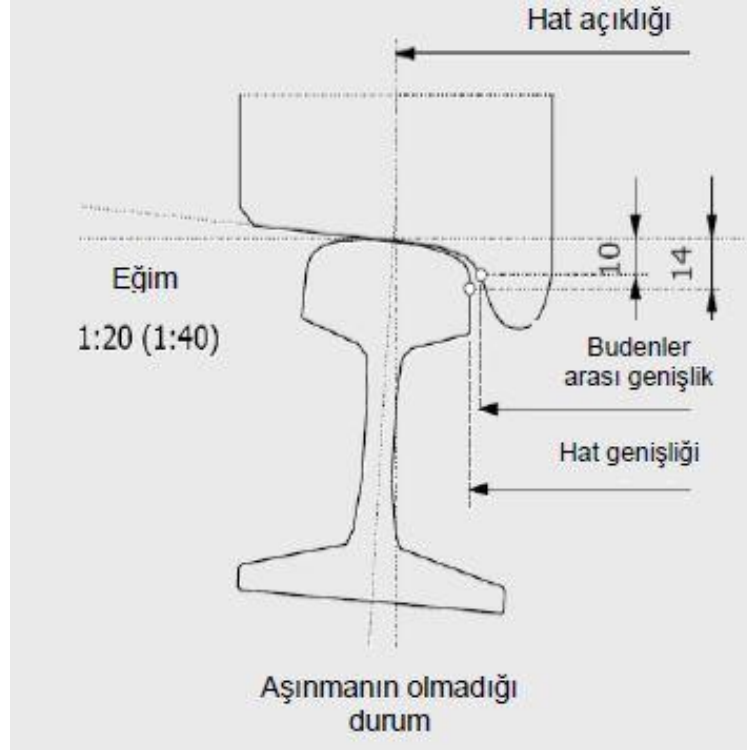
BÖLÜM 3

RAY – TEKER İLİŞKİSİ

Tekerlek-ray etkileşimi demiryolları teknolojisi alanındaki en önemli konulardan biridir. Bu durum taşıma kapasitesinin ve günlük sefer sayılarının ülkemizde fazla olması nedeniyle kaliteli, güvenli ve konforlu seyahat için bu elemanların periyodik olarak bakımının yapılması gerekmektedir. Bakımı yapılması gereken en önemli elemanlardan biriside şüphesiz raylardır. Raylarda meydana gelen aşınmalar, üretimden kaynaklı hatalar, kırılmalar ve çatlayıp dökülmeler gibi birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Tekerlek-ray arasındaki ilişki işletme güvenliği, deray durumu, kurplardan geçiş sırasında tekerlek ve ray arasında ortaya çıkan kuvvetlerin, sürüş konforunu ve ray yorulma riski gibi faktörleri etkilemektedir.

Demiryolu araçları, tekerlerin rayların üzerindeki yuvarlanmaları ile hareket ederler. Bu hareketin gerçekleşmesi ve demiryolu araçları ile demiryolu hattının birbirlerine uyumu için belli genişliklerin sağlanması gerekmektedir.

Ekartman (Hat Genişliği): Demiryolu hattı içerisindeki bir yolda en basit ifadeyle iki ray arasındaki mesafeyi ifade eden bu tanım ülkemizde ve birçok Avrupa ülkesinde 1435 mm kabul edilir ve ray üst yüzeyinden 14 mm aşağısından ölçülmelidir. Ray üst yüzeyinden 14 mm altında ölçümün yapılmasındaki amaç, bu bölgenin ray mantarındaki bozulmalar ve yanal aşınmalardan en az etkilenen bölge olmasıdır. Bu bölge ray mantar yüzeyinin $r = 13$ mm yarıçaplı kısmına denk gelmektedir. Hat genişliği özellikle hat bakım çalışmalarında dikkate alınır ve 1435 mm'den sapmalar konumuna göre belirli toleranslar doğrultusunda düzeltilir.



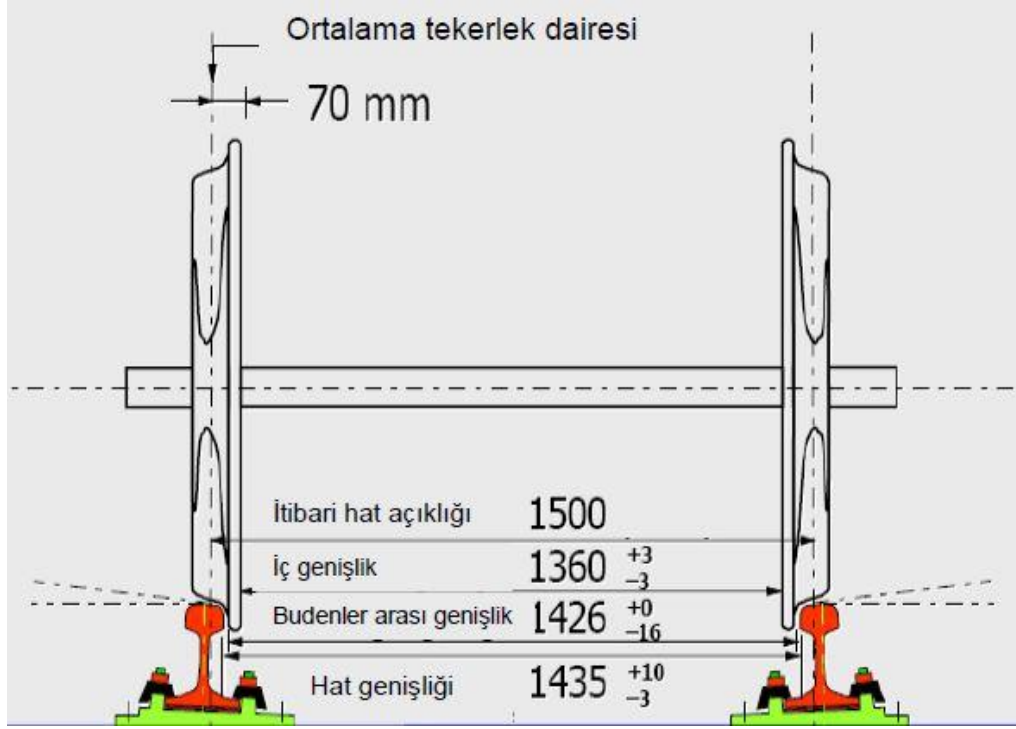
Şekil 3.11. Eğimli teker ve rayın temas noktasının gösterimi [12].

Hat Açıklığı: Tekerlerin eksenden eksene uzaklığını, yani ortalama tekerlek dairesini gösteren eksenler arasındaki mesafedir. İtibari hat açıklığı 1500 mm'dir. Bu genişlik özellikle üstyapı elemanlarındaki düşey ve yatay yüklerin konumu vb. hesaplamalarda kullanılır.

Hat Eksenleri Arasındaki Açıklık: Demiryolu hattı içerisinde birden fazla hat olduğu durumlarda yan yana iki veya daha fazla yolun eksenleri arasındaki mesafeyi ifade eden bu değer demiryolu güvenliğini sağlamak için 4 m olması gerekmektedir.

Bodenler Arası Genişlik: Ray Her iki tekerlek bodeni arasındaki mesafeyi ifade eden bu değer ray üst yüzeyinden 10 mm aşağıdan ölçülmektedir. İki boden dış yüzeylerinin arası 1426 mm'dir.

İç Genişlik: Tekerlek iç yüzeyleri arası mesafe olarak tanımlanır ve bu mesafe 1360 mm'dir.



Şekil 3.12. Demiryolu hat standartları [12].

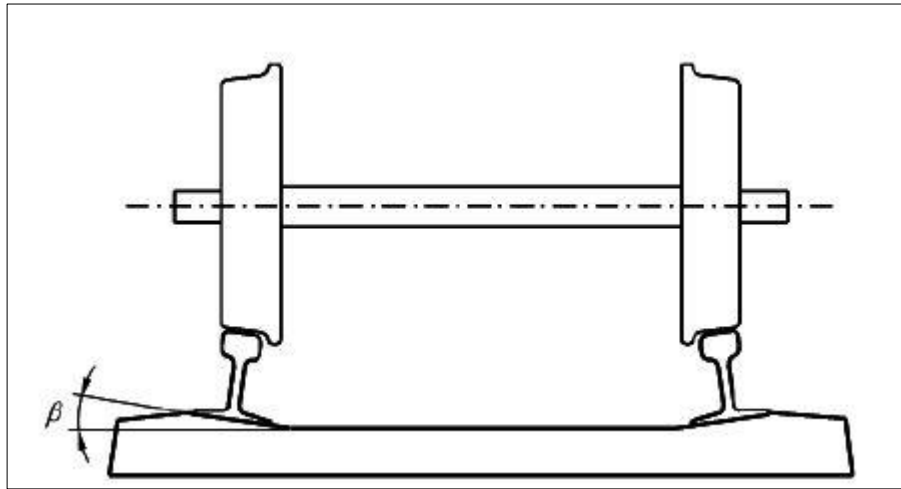
Demiryolu hatları ekartmanın uzunluğuna göre standart, dar ve geniş ekartmanlı hatlar olmak üzere üç çeşittir. Hat genişliği 1435 mm olan hatlar standart, bu değer altında ekartman genişliğine sahip olan hatlar dar ve 1435 mm'den daha büyük ekartman genişliğine sahip olan hatlara geniş hatlar olarak isimlendirilir.

Açıklık ↕	İsim ↕	Hat (km) ↕	Kullanım ↕
1000	Metre	95.000	Güneydoğu Asya, Hindistan, Arjantin, Brezilya, Bolivya, Şili, İsviçre, Doğu Afrika (Dünyadaki toplam hattın %7'si)
1067	Cape	112.000	Orta ve Güney Afrika, Endonezya, Japonya, Tayvan, Yeni Zelanda, Filipinler (Dünyadaki toplam hattın %9'u)
1435	Standart	720.000	Avrupa, Arjantin, ABD, Kanada, Çin, Kuzey Kore, Güney Kore, Avustralya, Orta Doğu, Afrika, Meksika, Küba, Panama, Venezuela, Peru, Uruguay, Filipinler, Japonya (Dünyadaki toplam hattın %60'ı)
1520	Rus	220.000	Rusya, Estonya, Letonya, Litvanya, Gürcistan, Moğolistan (Dünyadaki toplam hattın %17'si)
1524	Rus	5.865	Finlandiya
1600	İrlanda	9.800	İrlanda, Avustralya, Brezilya
1668	İberya	15.394	Portekiz, İspanya
1676	Hint	77.000	Hindistan, Pakistan, Arjantin, Şili (Dünyadaki toplam hattın %6.55'i)

Şekil 3. 13. Çeşitli hat genişliği uygulamaları [13].

Doğrusal yollarda her iki tekerleğin beraber yuvarlanarak kat ettiği mesafeleri aynıdır. Ancak kurplarda anı mesafede iç rayın uzunluğu dış rayın uzunluğuna göre daha kısa

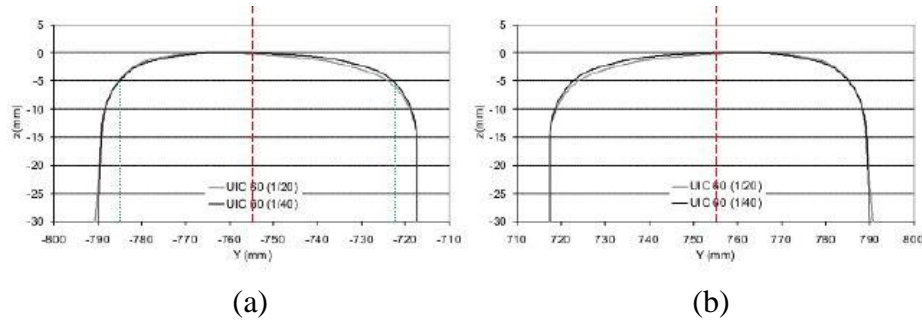
olduğundan, dış raya temas eden tekerlek iç ray üzerinde giden tekerleğe öre daha uzun bir mesafeyi kat etmesi gerekmektedir. Bu nedenle tekerlekler konik şekilde imal edilmiştir, bu sayede aliymanda eğer yanal yönde hafif bir yer değiştirme olursa dingillere merkezci bir kuvvet uygulanır. Kurplarda merkezkaç kuvvetiyle birlikte dış raya temas eden tekerleğin yuvarlanma yüzündeki koniklik sebebiyle konik kısmın büyük çapı üzerinde, kurbun iç rayına temas eden tekerlek ise konik kısmın küçük çapı üzerinde dönerek bu olumsuz davranışı ortadan kaldırmaya çalışmıştır. Tekerleklerden iletilen yüklerin tam olarak ray mantarının orta eksenine gelmesini sağlamak için raya demiryolu hattının iç yönüne doğru aynı eğim verilir. Bu eğim ülkelerin kullandıkları demiryolu standartlarına göre değişiklik gösterse de 1:20 veya 1:40'tır. Ray mantarı üzerine merkezi olarak etki eden kuvvetten sonra, 1:20 eğimle traverslere tespit edilmiş raylar tercih edilmeye başlanmıştır. Ayrıca tekerlek ray ilişkisini düzenlemek ve bozulmaları en aza indirmek için raylar yol içerisine doğru 1:40 ya da 1:20 eğimli olarak döşenirler. Hollanda'da NP 46 profilli raylar 1:20 konikliğe sahiptir. UIC 54 ve 60 rayları ise 1:40 konikliğe sahiptir [12].



Şekil 3.14. Rayların yol içerisine doğru eğimli olarak tespiti [12].

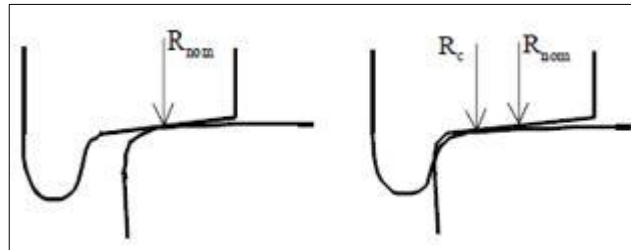
Tekerleğin rayla temas ettiği noktanın konik, rayların ise düşey durumda olması halinde tekerlek rayla çizgi teması yapacağından ray yüzeyine iletilen büyük basınçlar oluşur. Tekerlek ray ilişkisini daha güzel bir noktaya çekmek için, yani ray-tekerlek temas yüzeyini artırmak için, raylar yol içerisine doğru 1/20 eğimli olarak döşenmektedir. Bu sayede daha fazla yuvarlanma, daha az kayma ve daha az aşınma

olur. Bir diğ er ifade ile, ray üzerinde daha fazla yuvarlanma ve daha az aşınma elde edebilmek için, tekerler silindir de ğ il konik ř ekilde imal edilir.



Şekil 3.15. UIC 60 raylarının 1/20 ve 1/40 eğimle traversler üzerine tespiti a) Sol ray b) Sağ ray [12].

Fakat konik profilin bazı dezavantajları vardır. Bunlar eğer tekerleğin yuvarlanma çapı rayından küçükse tek nokta teması oluşması ve eşitse çift nokta teması oluşmasıdır. Tek nokta temasında rayda aşırı gerilme sonucu aşınma daha fazla olur. Çift nokta teması, dingilin kurp geometrisine göre radyal ayarlama imkanı olmadığı durumda meydana gelir. Bojini ilk dingili kurba girdiği zaman dış raya belli bir çarpma açısı ile kuvvet uygular. Bu kuvvet sonrası oluşabilecek deray durumunu önlemek için tekerleklerin boden kısımları vardır. Bodenin ray mantarının kenarına temas etmesi durumunda büyük miktarda yanal kuvvetler ve bu sürtünmeden doğacak olan aşınmalar meydana gelir. Bodenin çarpması ile tekerlekler hattın içine doğru kayar ve rayda sürtünme kuvvetine neden olur. Çift nokta temasında dingilin çok az miktarda yanal yer değiştirmesinde bile temas noktasının atlaması konforun azalmasına sebep olmaktadır [14].



Şekil 3.16. Tek ve çift nokta teması [15].



Şekil 3.17. Kurpta ray teker temas noktası [16].

Bir demiryolu aracı dingillerin bağlı olduğu ve birincil süspansiyonlarla sönümlenen ve bojilerdeki ikincil süspansiyonlarla yataklanan bir gövdeyi içerir. Tekerleklerin kılavuzlanması prensipte iki şekilde sağlanır.

Basıncın bileşkesi ileri yönde kaydığı için tekerlek yükü ile birlikte bir moment oluşacaktır. Yuvarlanma direnci adı verilen bu moment yenilerek hareketin gerçekleşmesi gerekir. Temas alanında oluşan teğetsel kuvvetler sürtünmeye bağlıdır ve tahrikli tekerlekler veya frenleme sırasında önemli miktarlarda olabilir.

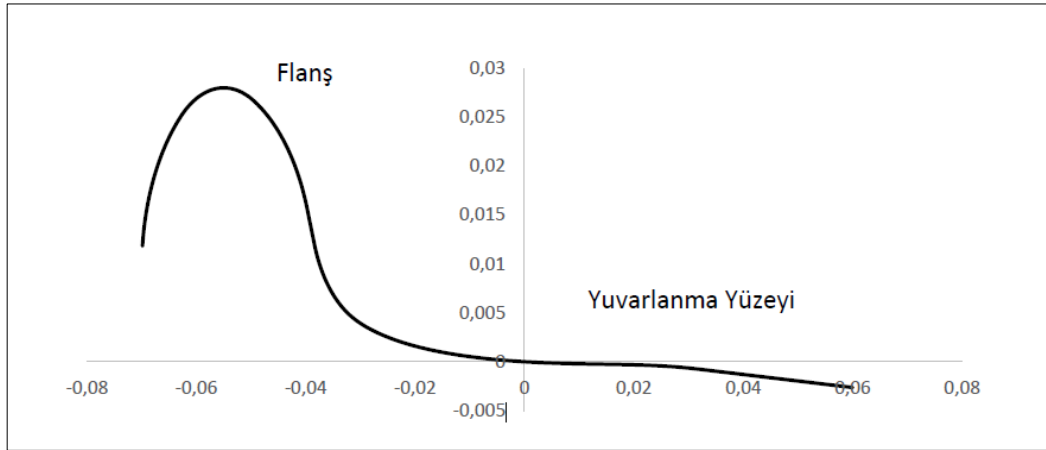
Boden teması olmayan konik bir tekerlek profili için temas açısı yatay düzlemdeki hareket ile birlikte sabittir (bütün tekerlek takımının x eksenindeki dönme hareketi görmezden gelinirse). Fakat genel profil için, yuvarlanma yarıçapında olduğu gibi temas açısı yatay düzlemdeki hareket ile değişir ve temas açısı parametresi yuvarlanma yarıçapı farkına benzer bir şekilde tanımlanır. Boden temasının olmadığı yerlerde, temas açısı farkının temel etkisi her tekerlekte temas kuvvetinin farklı yatay bileşenlerini vermesidir. Bu da tekerlek seti üzerindeki net yanal kuvvette eşittir.

Boden üzerindeki temas açısının alıyman yollardaki deray koşullarında ve özellikle dar yarıçaplı kurplarda büyük bir önemi vardır. Verilen bir boden için maksimum Y/Q değeri, boden ve rayın üst kısmı arasındaki maksimum temas açısı olarak verilir ki bu da yeni bir boden için boden açısı olarak kabul edilir [15].

Boyuna ve yanal yönlerdeki kayma hareketi dışında üçüncü bir hareket daha vardır. Sürtünme kuvvetlerinin iletimine katılan bu patinaj veya dairesel kayma tekerlek-ray arasındaki temas alanının tekerlek takımının dönme eksenine paralel olmadığı zaman ortaya çıkar. Patinaj meydana geldiği zaman tekerlek-ray arasındaki göreceli hareketler kısmen elastik burulma ve kısmen kayma ile gerçekleşir. Temas alanında farklı yön ve miktarlarda kuvvetler vardır ve toplam eşdeğer kuvvet yanal yöndedir. Patinaj kuvveti düşük konikliğe sahip tekerlerin yanal kuvvetlerini tamamen dengeleyebilir ve bu durumda normal kuvvetlerin her iki raydaki beklenen yayılma kuvvetleri çok daha az olur [17].

3.1. ARAÇ DİNAMİĞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Raylı sistem aracının dinamiğini belirleyen temel ekipman aks setidir. Aks seti aracın hareketini ve yönlendirilmesini sağlar. Tekerlekler belirli bir profilde olup bu profilin yuvarlanma yüzeyi konik bir biçimdedir. Ray-tekerlek arasındaki aşınma nedeniyle bu profil değişir. Aşınma nedeniyle değişen tekerlek profili hem düz yolda hem de kurplarda araç dinamiği ve sürüş stabilitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.



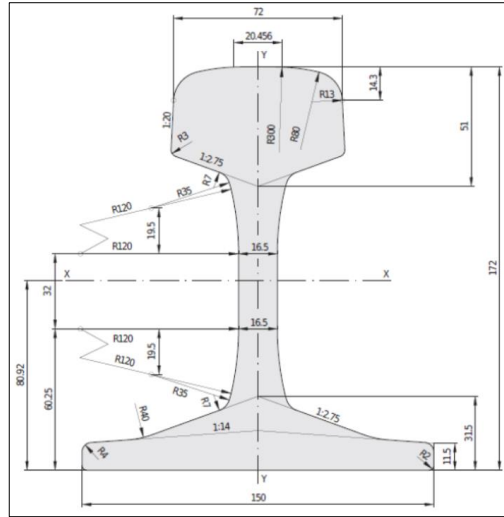
Şekil 3.18. Tekerlek bölümleri.

Tekerleğe verilen koniklik sayesinde kurp bölgesinde sağ ve sol tekerlekler arasında yarıçap farkı oluşur. Bu fark sayesinde aracın kurp performansı artırılır. Aracın kurp performansını eşdeğer koniklik belirler. Eşdeğer koniklik ise bu yarıçap farkının aks uzunluğuna oranıdır.

$$\gamma_{eş} = \frac{\Delta r}{2l} \quad (3.1)$$

Bu çalışmada incelenen tekerleğin koniklik değeri 1:20 olup tekerlek genişliği 129 mm'dir. Eşdeğer koniklik ise aracın hareketine bağlı olup sürekli değişim göstermektedir. Eğer eşdeğer koniklik yüksek ise kurp performansı artarken düz yoldaki salınım hareketi de artar. Bu durum ise konforu azaltırken flanş aşınmalarını artıran faktördür.

Araç dinamiğini belirleyen bir diğer faktör ise ray profilidir. Ray profili de ray-tekerlek arasındaki temasın şeklini ve bu temasın hangi noktalardan olacağını belirler. Dolayısıyla aşınma bu temasa göre hem ray üzerinde hem tekerlek üzerinde şekillenir.

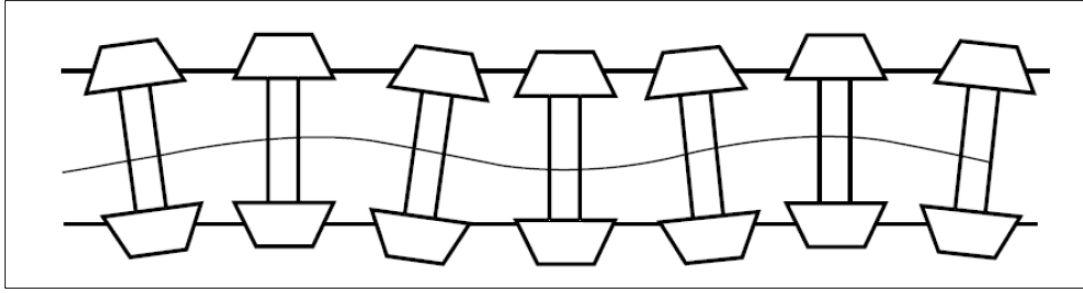


Şekil 3. 19. Ray profili [18].

Aks setinin ray üzerindeki hareketi ise ray ve tekerlek profilleri ile beraber küçük yol düzensizliklerinden kaynaklı olarak salınım hareketi şeklindedir. Bu kinematik hareket Klingel tarafından aşağıdaki gibi ifade edilir.

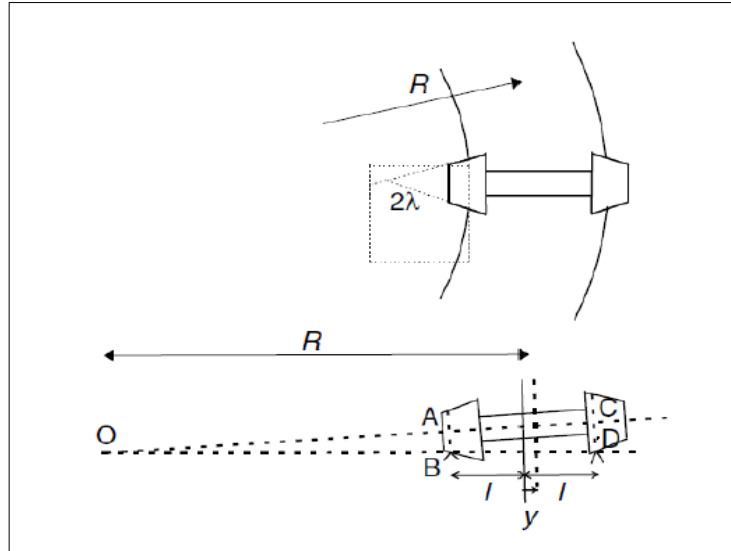
$$\lambda = 2\pi(R_0 \frac{1}{\gamma_{eş}})^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Burada λ salınımın dalga boyunu ifade ederken, l temas noktaları arasındaki uzaklığın yarısını ve R_0 ise tekerlek yarıçapını ifade eder.



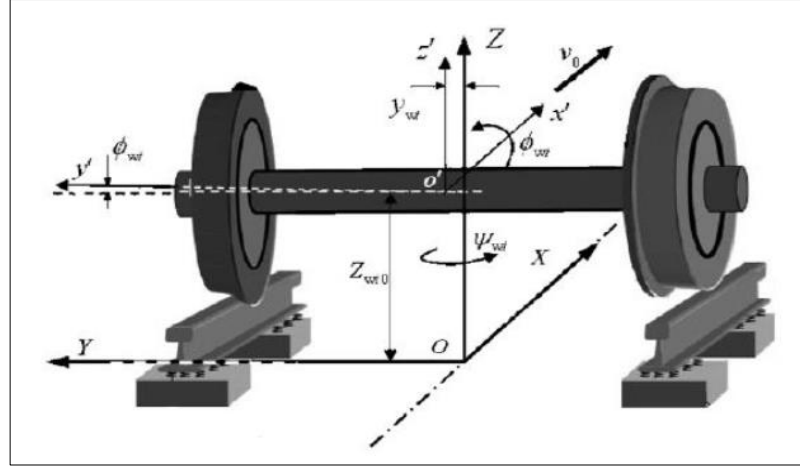
Şekil 3.20. Bir aks setinin salınım hareketi.

Aks setinin kurplardaki davranışı ise daha önce bahsedildiği gibi tekerlek profilindeki koniklik sebebiyle bir yarıçap farkı oluşacak şekildedir. Bu hareket sonucunda aks setinin yatay düzlemde yapmış olduğu yer değiştirme ise Redtenbacher tarafından şekil 3.11'deki gibi tanımlanmıştır [19].



Şekil 3.11. Kurpta aks setinin durumu [20].

Ray-tekerlek arasındaki temas sırasında hem ray hem de tekerlek yer değiştirme yapar. Bu durum ise problemi bir derece daha kompleks hale getirir. Eğer rayın sabit olduğunu kabul eder isek bir aks seti iki bağımsız serbestlik derecesine sahiptir. Bir aks setine ait koordinat sistemi ise şekil 3.12'de görüldüğü gibi tanımlanır. Bu koordinat sistemi yardımıyla aracın genel hareketi tanımlanır. Bu hareketin analizi sonucunda tekerleklere gelen kuvvetler, aracın hız bilgisi, yer değiştirmeler vb. genel parametreler belirlenir. Daha sonra bu parametrelerden yararlanarak temas bölgesindeki bölgesel kuvvetler, temas noktası, temas alanı gibi parametreler bulunur.



Şekil 3.12. Aks setine ait genel koordinat sistemi.

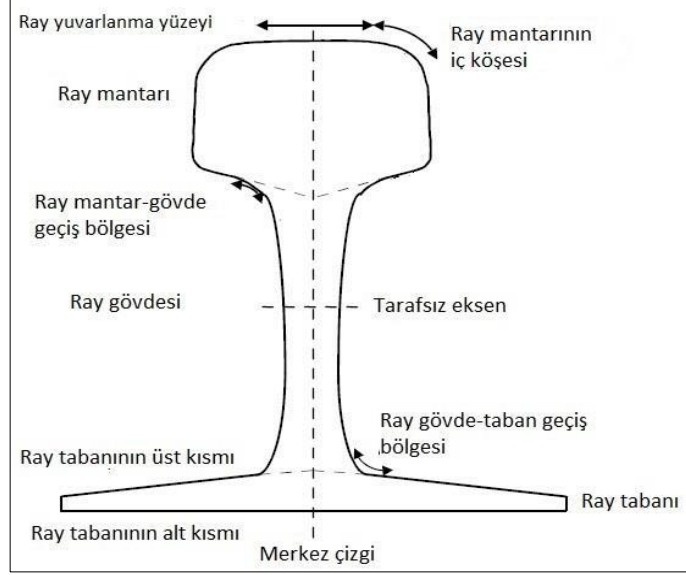
3.2. RAYA ETKİYEN YÜKLER VE RAY GERİLMELERİ

Üstyapı elemanlarının en önemlilerinden biri olan tekerleklerle birlikte gelen tüm yükü traverslere ileten raylar, demiryolu hat içerisinde yük dağıtım sürecini başlatan ilk elemandır. Raylar hem üretim hem de işletimi aşamalarında düşey, yanal ve boyuna doğrultuda yüklerle maruz kalmaktadır. Bu maruz kalınan yükler ve bu yüklerin etkileri aşağıda belirtilmiştir.

- Rayın üretim aşamasındaki doğrultma işleminden kaynaklanan iç gerilmeler,
- Düşey yönde etki eden dingil yükleri,
- Tren hareketi doğrultusunda oluşan kuvvetler,
- Ray mantarındaki ve hat geometrisindeki meydana gelen bozulmalarından kaynaklanan dinamik kuvvetler,
- Sıcaklık değişiminden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
- Hızlanma ve frenleme kuvvetlerinden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
- Atmosferik etkilerdir.

Bu yükler; ray üretiminde doğrultma işlemi nedeniyle meydana gelen kalıntı gerilmelerine, düşey dingil yükleri sebebiyle oluşan eğilme gerilmelerine, uzun kaynaklı raylarda sıcaklık etkisine bağlı oluşan termal gerilmelere, tekerlek-ray temas

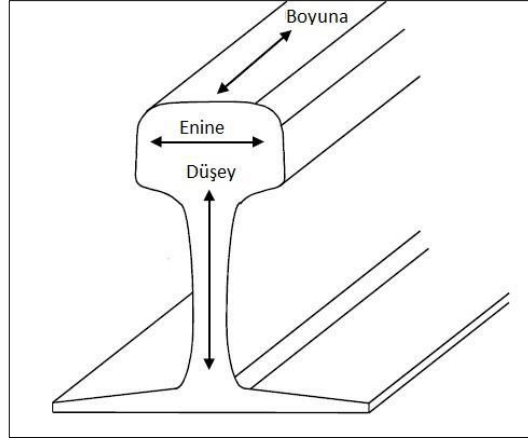
kuvvetleri sonucu ray mantarında ortaya çıkan temas gerilmelerine ve yüksek frekanslı darbe yükleri nedeniyle oluşan dinamik gerilmelere yol açar. Belirli olan tüm ray kusurları çeşitli ray gerilmelerinin ortaya çıkması ve ilerlemesi nedeniyle meydana gelir.



Şekil 3.13. Vinyol ray üzerinde ray bölümleri.

Rayın tekerlek ile temas eden kısmı mantarın üst yüzeyinde bulunan yuvarlanma yüzeyidir. Kurplarda tekerlek-ray temas yüzeyinin genişliği, tekerlek ve ray profillerine bağlı olarak 20 mm'den 60-70 mm'ye kadar değişkenlik gösterebilmektedir. Ray mantarının iç köşesi rayın özellikle kurplardaki bir başka önemli kısmıdır. Bu kısım, rayın tekerlek bodeni ile temas eden bölümdür. Hattın kurplu kesimlerinde de verdiğimiz iç raya oranla dış rayın daha yüksek kot miktarına sahip olma durumu dış raylarda, tekerlek ve ray profillerine bağlı olarak temas bölgesinin genişliğini 15 mm ila 25 mm arasında bir değer olmasına sebep olur.

Raya etki eden yükler ve bu yükler sonucunda ortaya çıkan ray gerilmeleri; ray kesiti üzerinde rayın boyuna, düşey ve enine doğrultusunda ilerler. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi boyuna etki eden yük doğrultusu; rayın üst yüzeyi uzunluğu boyunca etkileyen yükleri, rayın enine etki eden yük doğrultusu; rayın genişliği içinde etkileyen yükleri ve düşey yönde etki eden yük doğrultusu; raya dik olarak etkileyen yükleri tanımlamakta kullanılmaktadır.



Şekil 3.14. Örnek ray üzerinde ray gerilme doğrultuları.

3.2.1. Raya Etkiyen Yükler

Demiryollarında raylara etki eden yükleri, statik yükler ve dinamik yükler olmak üzere 2 ana bileşenden oluşmaktadır. Statik yükler; araçtan iletilen toplam yük ve ağırlık kuvvetlerine bağlı olarak hattın karp ve makas bölgelerinde oluşan merkezkaç ve merkezci kuvvetlerden meydana gelir. Dinamik yükler ise hat geometrisi ve üstyapı bozuklukları, ray kusurları ve tekerlek yüzeyi kusurları gibi sebeplerle, özellikle yüksek hızlarda ortaya çıkan yüklerdir.

3.2.1.1. Statik Yükler

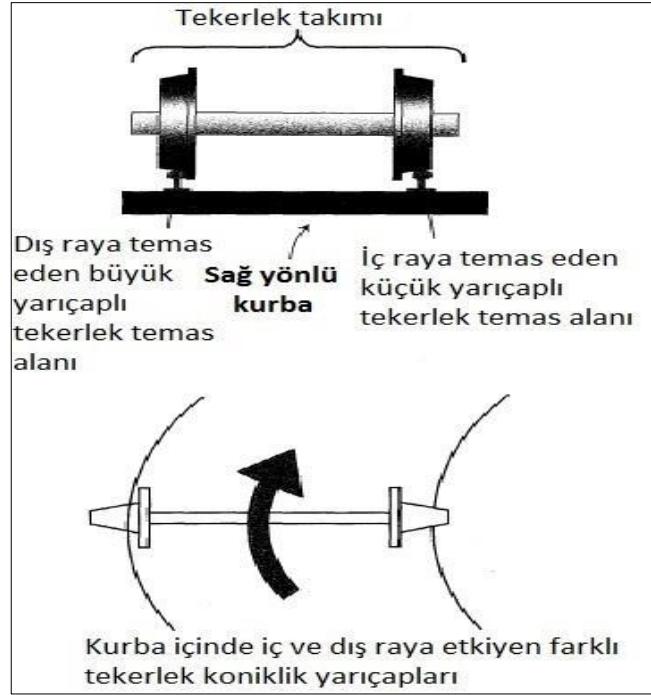
Statik yükler düşey yük, yanal yük ve boyuna yük olmak üzere 3 temel bileşenden oluşmaktadır. Düşey yükler, rayın üzerine etki eden tekerleklerden iletilen yükler tarafından meydana gelmektedir. Düşey olarak iletilen tekerlek yükleri, demiryolu üstyapısının teknik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan temel parametrelerden biridir ve dingil yükünün yarısı kadar değer alır. Günümüz demiryollarında kullanılan tipik dingil yükleri: yüksek hızlı hatlar için maksimum 200 Kn, karma trafikli hatlar için maksimum 225 kN ve ağır yük hatları (Avustralya) için maksimum 360 kN'dur.

Raya etki eden statik tekerlek yük miktarı, kurplarda uygulana dever miktarına göre değişkenlik gösterebilir. Kurplarda dever miktarlarına ve işletme hızına bağlı olarak, iç raya gelen ve dış raya gelen tekerlek yükü %20 ila %30 arasında farklılık gösterebilir. Bu durumla beraber tren hızı arttıkça tekerlek yükünde dinamik artışlar

meydana gelebilir. Bu artışlar, hat geometrisiyle tren bojileri arasındaki etkileşimin düşey yöndeki dinamikleri ile ilgilidir. Son olarak, rayın mantar yüzeyinde oluşan kusurlar ile tekerlekte oluşan fiziksel bozunumlar her ray-tekerlek temasında darbe yükleri ortaya çıkaracaktır. Asıl oluşan düşey yükler, statik yüklere, dinamik yüklerin ve darbe yüklerinin eklenmesiyle oluşur ve statik tekerlek yükü değerinden daha büyük bir değer alır.

Statik yüklerin oluşmasına etki eden bir diğer bileşen ise yanal yüklerdir. Yanal yükler, özellikle kurplarda meydana gelen ve ray mantarına direkt etki eden temel yük durumlarından biridir. Kurptaki yarıçap miktarı azaldıkça tren kurptan geçerken oluşan merkez kaç kuvvetini dengeleyemediğinden önemli yanal kuvvetler oluşturur. Bu durumun nedeni, demiryolu araçlarının rijit dingillere sahip olmasıdır.

Rijit yapıdaki dingil sistemleri, tekerleklerin birbirinden bağımsız bir şekilde hareket etmesine izin vermemektedir. Bu durumda, kurp içindeki dış ray uzunluğunun, iç ray uzunluğuna göre daha fazla olması, tekerleklerin konik bir şekilde imal edilmiş olmasıyla dengelenmeye çalışılır. Dış raya temas eden tekerlek daha fazla mesafe kat edeceği için tekerleğin ray ile temas eden yarıçapı daha büyük; daha kısa mesafe kat edilecek olan iç rayda ise tekerleğin ray ile temas eden yarıçapı daha küçüktür. Şekil 3.15'te, kurp içerisinde farklı iç ve dış ray uzunluklarını dengelemek için kullanılan ve tekerleklerin konikliğinden faydalanılarak temas noktasına göre farklı yarıçaplı tekerlek koniklik durumu açıkça görülmektedir. Bu koniklik miktarı ray-tekerlek temas noktası doğru ayarlanmadığı zaman dış rayda kat edilen mesafe ile iç rayda kat edilen mesafe birbirini dengelemeyeceği için zamanla iç rayda derin ondülasyonlar oluşmaya başlayacaktır. Bu durumda optimum ray-tekerlek temasını ayarlamak için kurp çapı ve dever miktarını doğru ayarlamak gerekmektedir.



Şekil 3.15. Yatay kurp içinde tekerleğin konikliği.

Şekil 3.15'te görüldüğü gibi, kurp içerisinde hareket eden aracın tekerleklerinin konik bir şekilde imal edilmesinden dolayı raya temas eden kısımlarının yarıçapları farklılık göstermektedir. Tekerleklerin temas noktalarındaki bu yarıçap farklılığı, kurptan geçerken iç ve dış ray uzunlukları arasındaki farklılığı dengelemeye çalışır. Oluşan bu hareket genellikle yarıçapı büyük olan kurplarda görülmektedir. Kurp yarıçapı küçüldükçe, tekerleklerin koniklik yarıçapı, tekerleklerin kat ettiği mesafe farklılıklarını dengelemede yetersiz kalır ve sonuç olarak tekerlek, ray üzerinde kayar. Bu durum sonucunda ondülasyonlar oluşur. Bu duruma kurba etki eden merkezkaç kuvveti de eklenince, tekerlek bodeni, dış rayın mantarının iç köşesine temas eder. Bodenin, dış ray mantarının iç köşesine temas etmesiyle rayda oldukça büyük yanıl yükler meydana gelerek ray profilini bozacak miktarda aşınmalar görülecektir.

Oluşan yanıl yüklerin büyüklükleri; dingil yükü, boji tasarımı ve elastik sönümleme katsayısı gibi araçla ilgili teknik parametrelere ve kurp yarıçapı, dever gibi hattın geometrik özelliklerine bağlı olarak değişir.

Yarıçapı 600 metreden daha kısa olan demiryolunun kurplu bölgelerinde meydana gelen yanıl yükler, kurp mesafesi boyunca belirli bir değerde sabittir. Büyük yarıçaplı

kurplarda ise araç yüksek hızda seyrederken tekerlek takımı ve aracın salınım/dalgalanma davranışı yapması durumunda dinamik yanal yükler oluşur.

Statik yükleri meydana getiren etmenlerden biriside, boyuna yüklerdir. Boyuna yükler, aşağıdaki etkilerin sebebiyle oluşur:

- Uzun kaynaklı raylarda sıcaklıktan dolayı meydana gelecek olan etkilerden doğacak olan boyuna termal kuvvetler,
- Demiryolu araçlarının hızlanması (demeraj) ve fren yapması sebebiyle (frenaj) meydana gelen boyuna mekanik kuvvetler,
- Rayın imal aşamasında meydana gelen iç gerilmeler ve rayların kaynak işlemi sonrasında soğuma ile oluşan büzülme gerilmelerinden doğan boyuna kuvvetler.

Sıcaklıktan dolayı meydana gelen boyuna kuvvetler, rayın nötr sıcaklığı ile gerçek sıcaklığı arasındaki fark nedeniyle ortaya çıkar. Bu kuvvetler, özellikle sıcaklık değişimi ne olursa olsun, orta kısmında sabit bir bölge bulunacak uzunluğa sahip olan ve gerilim dengelemesi 72 metreden uzun, 180 metreden kısa olan raylarda yani uzun kaynaklı raylarda meydana gelir. Rayların uzun kaynaklı olmaları demiryolu hat bakımını kolaylaştıran faktörlerden birisi olmakla beraber gürültü ve titreşimi kontrol ederek seyahat güvenliğini arttıran önemli bir faktördür [21]. Ray nötr sıcaklığı ile gerçek sıcaklığı arasındaki farktan kaynaklanan uzunluğunda meydana gelmesi beklenen değişim, uzun kaynaklı raylarda gerçekleşemez ve bu nedenle rayda basma veya çekme kuvvetleri gibi termal gerilme kuvvetleri ortaya çıkar.

Demiryolu araçlarının hız ve fren yapma evrelerinde ortaya çıkan mekanik kaynaklı boyuna kuvvetler ise tamamen trenin hareketiyle alakalı bir durumdur. Hızlanma evresinde harekete geçen dingiller, tekerlek ve ray arasındaki statik sürtünme nedeniyle demiryolu hattında boyuna kuvvetlerin oluşmasına sebep olur. Hareket etmeye başlayan dingilin hemen önündeki yolda boyuna çekme kuvvetleri, ardında bıraktığı yolda ise boyuna basınç kuvvetleri oluşur. Bu boyuna kuvvetlerin büyüklüğünü, tekerlekten iletilen yük ile adezyon katsayısı belirlemektedir.

Trenin fren yapma evresinde ise fren hareketine başlayan tekerlekler, raya direkt etki edecek ciddi derecede boyuna kuvvet oluştururlar. Fren yapan aracın ilk dingili önündeki yolda, hızlanma durumunda oluşacak olan basma gerilmelerinin tersi yönünde basma kuvveti oluşacaktır. Fren durumuna geçen dingilin hemen ardında bıraktığı yolda ise çekme gerilmeleri oluşur. Araçta bulunan birçok dingil için frenleme hareketi yaptığında etkilenecek mesafe 30 metreye kadar çıkabilir. Bu miktar aracın tipi ve uzunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Frenleme sebebiyle oluşan boyuna kuvvetler, sıcaklıktan dolayı oluşan boyuna kuvvetlerin %15'ine kadar ulaşabilir ve bu nedenle gerekli hassasiyet gösterilmelidir.

Boyuna kuvvetler aracın hızlanma ve fren yapma durumunda 55 kN değerine kadar çıkabilir. Elektrikli araçlar için fren hareketine geçme durumunda oluşan kuvvetler, dingil yükünün %12'si ile %15'i arasında değişmektedir. Aynı değerler dizel araçlarda dingil yükünün %18'i, yük vagonları için ise dingil yükünün %25'i kadardır.

3.2.1.2. Dinamik Yükler

Demiryolu içerisindeki üstyapı kaynaklı bozukluklar, ray tekerlek ile temas noktalarında oluşan hatalar ve tekerlek yapısındaki kusurlar, raya etki eden dinamik yükler oluşmasına sebep olur. Oluşan bu dinamik etkiler, özellikle hız miktarı arttığa raya etki eden statik yükleri ve gerilmeleri ciddi derecede artırır. Raya etki eden dinamik yüklerin oluşmasına neden olan başlıca etkenler:

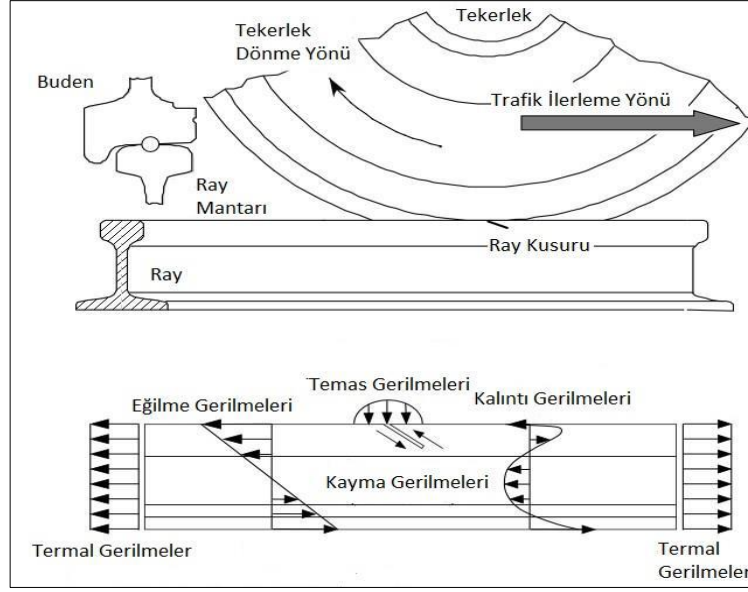
- Demiryolu hat geometrisinin yatay ve düşey yöndeki bozuklukları,
- Balast yatağı ve demiryolu altyapısındaki kusurlardan meydana gelen düzensizlikler,
- Ray bağlantı noktaları ve kaynaklardan dolayı oluşan çökmeler,
- Rayın tekerlek ile temas noktasındaki ondülasyonlar,
- Dar yarıçaplı kurpların i raylarında oluşan ondülasyon ve apletler,
- Tekerlek düzleşmesi dediğimiz apleti gibi yapısal bozukluklara sahip tekerlekler,
- Hat ve araçtaki rijitlik değişimleri,
- Aracın elastik sönümlenme sistemi ile ilgili olan doğal titreşimleridir.

3.2.2. Ray Gerilmeleri

Raylı sistem araçları ile demiryolu hattı arasındaki temas ve sıcaklık değişimi gibi çevresel etkilerden sebebiyle oluşan düşey, yanal ve boyuna kuvvetler sonucu rayda çeşitli gerilmeler ortaya çıkar. Ray kusurlarının başlamasındaki ve ilerlemesi aşamasındaki önemli etkiye sahip olan başlıca ray gerilmeleri şunlardır:

- Eğilme gerilmeleri,
- Kayma gerilmeleri,
- Termal gerilmeler,
- Kalıntı gerilmeleri,
- Tekerlek-ray temas gerilmeleri.

Ray gerilmeleri, özellikle boyuna doğrultuda birbirine eklenerek rayda önemli etkiler meydana gelmesine sebep olur. Eğilme gerilmeleri, kalıntı gerilmeleri ve termal gerilmeler; demiryolu üstyapı tasarım aşaması boyunca önemli rol oynarken, tekerlek-ray arası temas gerilmeleri ise demiryolu hattı bakımı süresince etkilidir. Ray yorulma kusurları; esas olarak tekerlek-ray temas gerilmeleri, eğilme gerilmeleri ve kayma gerilmelerinin etkisi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Özellikle temas gerilmeleri; rayda yorulma kusurlarına, yüzey kusurlarına ve aşınma problemlerine yol açar. Bu gerilmelere ek olarak, kalıntı gerilmeleri ve termal gerilmeler de yorulma kusurlarının gelişmesine etki eder. Şekil 3.17’de ray kusurlarının oluşmasında etkili olan önemli ray gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 3.16. Örnek kesit üzerinde ray gerilmeleri.

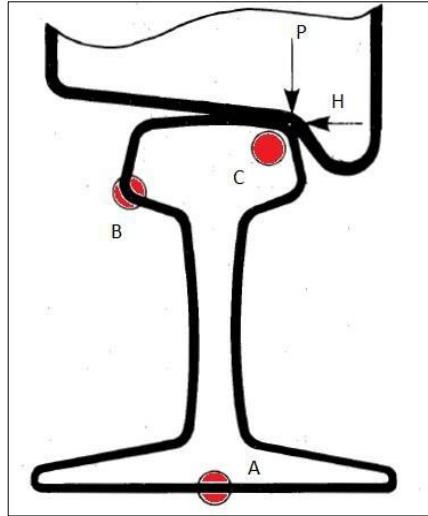
3.2.2.1. Eğilme Gerilmeleri

Eğilme gerilmeleri, tekerleklerden raya iletilen yanal ve düşey yükler sebebiyle oluşmaktadır. Tekerlek, ray yüzeyinde herhangi bir noktadan geçtiğinde, uyguladığı kuvvetler nedeniyle rayda düşey ve yanal eğilme gerilmelerin oluşumunda etkili olur. Tekerlektten iletilen düşey yükler rayın, mesnet görevi yapan traversler arasında düşey yönde eğilmesine yol açar. Bu durumun sonucunda, ray tabanında boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir. Rayın mantar kısmının ray gövdesi üzerinde düşey yönde eğilmesinin bir başka sebebi ise bu oluşan düşey yüklerin neden olduğu etkidir. Bu durumda, rayın mantar ile gövdenin birleşim yerinde oluşan gerilmeler boyuna yönde çekme gerilmeleridir. Ayrıca, tekerlekte oluşan apleti sebebiyle tekerleğin çukurlaşmış tarafı tekerlek her tam tur attığında ray ekseninden bir miktar uzaklıkta oluşan ve raya etki eden düşey yükler, rayda burkulma etkisine yol açar. Bu durumun sonucunda, ray gövdesinde düşey yönde çekme gerilmeleri ve ray mantarının gövde ile birleştiği noktada boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir.

Tekerlektten raya iletilen yanal yükler, ray mantarının, ray tabanına göre yana doğru hareket etmesine neden olur ve bu durumda ray gövdesinde çekme gerilmelerinin oluşmasına sebep olur. Yanal yükler, rayın mantarının gövdesi ile birleştiği yerde boyuna yönde çekme gerilmelerinin de artmasına yol açar. Rayın yorulma kusurlarının

oluşumunda raya tekerlerden iletilen bu yanal yüklerin neden olduğu eğilme gerilmeleri belirli ölçüde bir etkidir. Fakat ray kusurlarının oluşmasındaki en büyük sebep, düşey yüklerin neden olduğu eğilme gerilmeleridir.

Demiryolu üstyapısının tasarımı yapılırken, rayın taban merkezinde oluşan maksimum eğilme gerilmeleri dikkate alınır. Şekil 3.17’de, ray kesiti örneğinde rayın hangi bölgelerinde gerilmelerin oluştuğu gösterilmektedir. P yükü tekerlerden gelen düşey yükleri ve H yükü ise yatay kurplarda oluşan ve yanal tekerlek yüklerini belirtmektedir. Şekildeki A noktası, tekerleklerden gelen düşey yükler sebebiyle rayın taban merkezinde oluşan eğilme gerilmelerini göstermektedir. B noktası, demiryolu hattının kurplu kesimlerinde, tekerlek bodeni tarafından yüksek kotlu dış rayın mantarına etki eden yanal yüklerin sebebiyle ray mantarının alt kenarında ortaya çıkan eğilme gerilmelerini göstermektedir. C noktası ise ray mantarının iç köşesine etki eden tekerlek-ray temas gerilmelerini göstermektedir.



Şekil 3.17. Rayda ortaya çıkan maksimum gerilme noktaları.

3.2.2.2. Kayma Gerilmeleri

Tekerleklerden raylara aktarılan yükler, ray kesitinde eğilme gerilmeleriyle beraber kayma gerilmelerinin de meydana gelmesine sebep olmaktadır. Kayma gerilmeleri, ray bağlantılarının cebireli kullanıldığı yerlerde, rayın gövde kısmında bir veya birden fazla açılmış cebire delikleri çevresinde oluşan kusurların temel sebebidir. Bu sebeple,

günümüzün modern demiryolu hatlarında cebireli ray bağlantılarının olumsuz etkilerini azaltmak için makaslar dahil hiç nefes alma bölgesi bulunmayan ray uzunluğu 180 metre ve daha fazla olan gerilim dengelenmesi yapılmış olan raylara yani sürekli kaynaklı raylara (SKR) geçilmiştir.

Kayma gerilmelerinin oluşumuna etki eden bir diğer sebep ise ray-tekerlek temas kuvvetleri sonucu oluşan kuvvetlerdir. Oluşan bu kuvvetler neticesinde, ray yüzeyinin 5-6 mm aşağı kısmında maksimum kayma gerilmeleri meydana gelir. Bu kayma gerilmelerinin büyüklüğü, genellikle tekerlek-ray temas gerilmelerinin %30'u kadardır.

3.2.2.3. Termal Gerilmeler

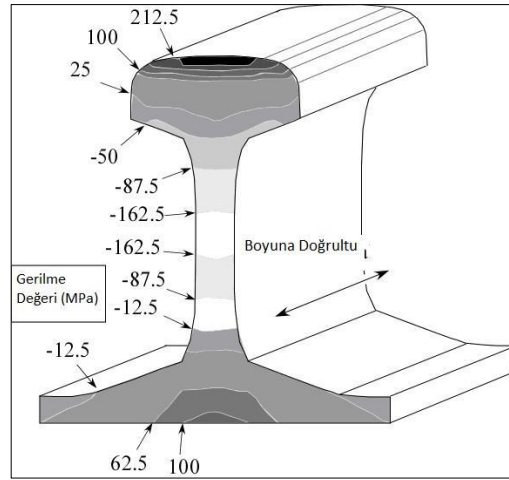
Bu gerilme çeşidi çoğunlukla demiryolu hattındaki uzun kaynaklı raylarda meydana gelmektedir. Bu gerilmeler, rayın gerçek sıcaklığı ile son 50 yılın ortalaması alınarak bulunan ve her ile göre değişkenlik gösteren ray nötr sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle meydana gelen ısıl genleşme ve büzülme olayları ile ilgilidir. Rayda oluşan boyuna gerilme kuvvetlerinin sıfır olduğu ve rayların birbirine kaynaklandığı sıcaklık değeri, nötr sıcaklık değeri olmalıdır. Eğer ray sıcaklığı, ray nötr sıcaklığından fazla ise özellikle yaz mevsiminde meydana gelen ısıl genleşme nedeniyle ray uzunluğunda artış meydana gelmesi beklenir, fakat uzun kaynaklı raylarda ray uzunluğu değişmeyeceği için rayda boyuna yönde basınç gerilmeleri meydana gelir. Bu durum; rayda burulma etkisine neden olur ve hatta deray riski oluşturur. Ray sıcaklığının, ray nötr sıcaklığından değerinin altında kaldığı özellikle kış aylarında ise boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler, tekerlek yüklerine ek bir statik yük olarak raya etki eder ve ray kusurlarının, rayın enine düzleminde gelişmesini kolaylaştırır. Çekme termal gerilmeleri maksimum değerine ulaştığı özellikle soğuk kış aylarında ray kırılması riski oldukça yüksektir.

Uzun kaynaklı raylarda oluşan termal gerilmeleri hesaplamak için, ray sıcaklığı ile ray nötr sıcaklığı arasındaki fark, rayın ısıl genleşme katsayısı ve rayın elastisite modülü çarpılır. Uzun kaynaklı raylarda oluşan termal gerilmeler, 138 MPa değerine kadar çıkabilmektedir. Termal gerilmeler, cebire ile bağlantı sağlanmış raylarda yoğun

olarak görülmemekle birlikte, bakımı iyi yapılmamış cebire bağlantı noktalarında ortaya çıkabilir.

3.2.2.4. Kalıntı Gerilmeleri

Rayda, herhangi bir dış yüke maruz kalmadan var olan gerilmelere “kalıntı gerilmeleri” denir. Kalıntı gerilmeleri, ray üretim aşamasındaki ısıl işlem, doğrultma işlemi ve ray mantarı sertleştirme işlemlerinde ortaya çıkar. Bu duruma ilave olarak raylar birbirine kaynaklanırken, ray çeliğinin ve/veya kaynak metalinin genleşme ve büzülme özellikleri farklı olmasından dolayı ray kaynak bölgelerinde kalıntı gerilmeleri meydana gelir. Ray üretimi aşamasındaki doğrultma işlemi sonrasında ray mantarında ve ray tabanının merkezinde çekme kalıntı gerilmeleri, ray gövdesinde ve ray tabanının uç kenarlarında ise basınç kalıntı gerilmeleri meydana gelir. Şekil 3.18’deki örnek ray kesitinde, ray imalat sürecindeki doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Ray doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri.

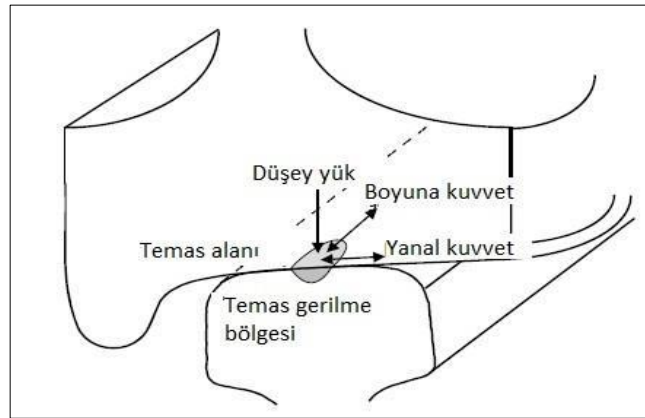
Raydaki kalıntı gerilmeleri farklı davranışlar göstermektedir. Demiryolu hattı işleme açıldıktan sonra ray taşıdığı yüklerle beraber mantar yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmeleri, plastik deformasyon sebebiyle basınç gerilmelerine dönüşür. Ray imalatı aşamasında oluşan kalıntı gerilmelerinin aksine ray kaynak işlemi sırasında oluşan kalıntı gerilmeleri; ray mantarının büyük bir kısmında ve ray tabanında basınç gerilmeleri, ray gövdesinde ise çekme gerilmeleri olarak meydana gelir. Mantarı

sertleştirilmiş raylarda ise, rayın gövde kısmında düşey yönde çekme gerilmeleri oluşur. Bu rayların mantar ve tabanında ise boyuna yönde çekme gerilmeleri oluşur.

Kalıntı gerilmeleri, ray kesiti içinde öngörülemeyen herhangi bir noktada ortaya çıkabilir ve ray kusurlarının oluşumunda ana etmendir. Ray üretimindeki aşamasında bir takım değişik metotlar kullanarak kalıntı gerilmelerinin miktarı azaltılabilir. Rayı taşlama işlemi, üretimdeki ısıl işlem aşamasında görülen ve ray yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmelerini en aza indiren faktördür. Kaynak sırasında oluşan kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü ise kaynağın türüne ve soğuma hızı gibi kaynak işlemi içerisinde yer alan parametrelere dayanır. Kalıntı gerilmeleri; sonlu elemanlar yöntemiyle ve buna alternatif olarak tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ölçmek mümkündür.

3.2.2.5. Tekerlek-Ray Temas Gerilmeleri

Ray-tekerlek ilişkisi sonucu oluşan kuvvetler, temas gerilmelerine sebep olur. Temas gerilmesi ile beraberinde oluşan kuvvetler; tekerleklerden iletilen yükler ile çekim, frenleme ve yönlendirmeden kaynaklanan ray-tekerlek teması alanında oluşan kuvvetlerdir. Şekil 3.19’da örnek bir ray kesiti üzerinde tekerlek-ray temas alanındaki düşey, yanal ve boyuna kuvvetler birlikte etki edebilir.

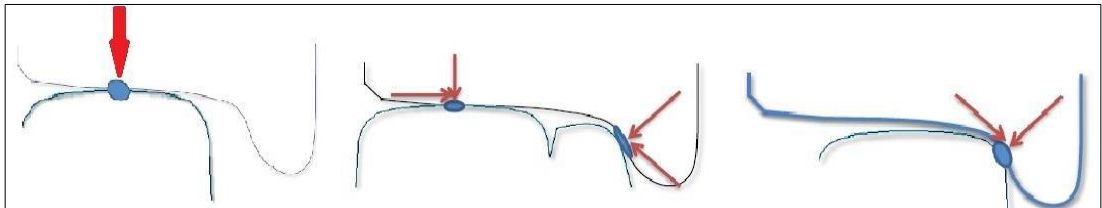


Şekil 3.19. Tekerlek-ray temas alanı.

Tekerlek-ray temas gerilmelerini hesaplamak için Hertz analizi kullanılır. Hertz analizine göre temas gerilmesi, temas alanı ve temas alanına dik olarak etki eden yük oranında değişim göstermektedir. Temas alanı, eliptik şekildedir. Temas alanının boy yönündeki uzunluğu 10-12 mm arasında, en yönündeki uzunluğu ise 5-8 mm arasında bir değerdir. Bu alan temas noktasındaki tüm yükü taşıyan küçük bir alandır. Temas alanının eni ve boyu; tekerlek ve ray mantarının yarıçapı, tekerlek ve rayın birbirleriyle etkileşim pozisyonu ve temas alanına dik olarak etki eden yükün değerine bağlı olarak değişmektedir.

Aliymanda, ray-tekerlek temas noktası genellikle merkezi yerdedir, yani tekerleklerden iletilen yükler, ray yüzeyinin eksenine denk gelecek şekildedir. Bu durumda tekerlek ile ray arasında tek bir temas noktası var demektir. Aliymandaki tek nokta temas gerilmeleri, ray mantarının merkezinde yoğunlaşır.

Demiryolu hattının kurplu kesimlerinde ise ray-tekerlek teması iki farklı şekilde oluşabilir. Bu durumun nedeni, özellikle dar yarıçaplı kurplarda ortaya çıkan yanıl kuvvetler sebebiyle tekerleğin boden kısmının, dış rayın mantarına temas etmesidir. Çift nokta temasındaki ilk temas, tekerlek bodeni ile ray mantarının iç köşesi arasında, ikinci temas noktası ise tekerlek sırtı ile ray mantarının üst yüzeyi arasındadır. Alternatif olarak, kurbun içinde tek nokta teması da gerçekleşebilir; fakat bu temas, aliymandaki tek nokta temasından farklıdır. Kurbun dış rayında görülen tek temas noktasında, tekerlek bodeni ile tekerlek sırtı arasındaki bölüm, ray mantarının iç köşesine temas eder. Bu şekilde oluşan temas halinde, kurbun içindeki düşey ve yanıl yüklerin birlikte etki ettiği tek bir temas noktası vardır ve buna bağlı olarak oldukça büyük temas gerilmeleri meydana gelir. Şekil 3.20’de, aliymandaki merkezi tek nokta teması, kurptaki çift nokta teması ve yine kurptaki tek nokta teması görülmektedir.



Şekil 3.20. Aliyman ve kurptaki tekerlek-ray temas alanları.

Tekerlek-ray temas alanında oluşan ana kuvvetler, tekerleklere iletilen yükün doğrultusuna göre belli bir açıyla hareket eden kesme kuvvetleridir. Bu kesme kuvvetleri; tekerlek yüklerine, tekerlek yarıçapına, ray üst yüzeyinin yarıçapına ve uygulanan çekim kuvvetine bağlı olarak değişir. Düşük çekim kuvvetlerinde, ray mantarında meydana gelen maksimum gerilme, tekerlek-ray temas yüzeyinin 2-4 mm kadar aşağısındadır. Çekim kuvveti arttıkça, maksimum gerilme değeri artar ve ray-tekerlek temas yüzeyine daha yakın bir noktada meydana gelir. Ray-tekerlek temas gerilmesi, demiryollarında karşımıza çıkacak en tehlikeli unsurlardan biri olan yorulma kusurlarının oluşumundaki en büyük sebeplerden bir tanesidir. Birçok kez tekrarlanan ray-tekerlek temasında, temas gerilmelerinden dolayı ray çeliğinde yorulma kusurları oluşur veya rayın içerisinde var olan kusurlar, yorulmanın etkisiyle artar.

BÖLÜM 4

EŞDEĞER KONİKLİK

En genel tanımıyla eşdeğer koniklik ray ile teker arasındaki geometrik ilişkiyi ifade eder.

Demiryolunda temas geometrisini tanımlamak büyük ölçüde kullanılan ve iyi bilinmesi gereken parametredir [22].

Eşdeğer koniklik, tekerlek setinin yatay hareketinin bir fonksiyonudur. Demiryolu araçlarını ile ray arasındaki dinamik etkileşimi araştırırken kullanılan bir parametredir. Bu parametre, hattın alıyman ve geniş yarıçaplı kurpları için tekerlek ve raylar arasındaki temas davranışını tanımlar. Eşdeğer koniklik, konikliği bulunmayan tekerleklere verilir. Eşdeğer koniklik; tekerlek ve ray profiline, aşınmaya, iki ray arasındaki hat genişliğine (ekartman) ve ray eğimine bağlıdır. Aşınmamış tekerleğin koniklik oranı, eğimin tanjantına eşittir [11].

Ray-tekerlek ilişkisi demiryolu teknolojisi içerisindeki en önemli unsurlardan bir tanesidir. Ray ve tekerlek arasındaki veya tekerlek takımı ve araç arasındaki temas açısı sırasıyla işletme güvenliğini, deray koşullarını, kurplardan geçiş esnasında tekerlek ve ray arasında ortaya çıkan kuvvetleri, sürüş konforunu, tekerlek ve rayların aşınmasını ve rayın yorulma riski gibi faktörleri etkiler. Bu faktörler göz önüne alındığında, tekerlek-ray temasının aslında ne denli karışık bir yapıya sahip olduğu ve araç dinamikleri üzerinde ne kadar büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılabilir [22].

Tekerlek-ray teması araç dinamikleri araştırmacıları ve tekerlek-ray bakım mühendisleri açısından her zaman önemli bir konu olmuştur. Dinamik teker-ray ilişkisi gerilimi bilgisi; mukavemet ve yorulma ömrü değerlendirmesi, tekerlek profiline ve ray

mantarının aşınması gibi konular için önemlidir. Ayrıca yeni tekerlek ve ray profili optimizasyonunda bir ölçüt olarak da kullanılabilir [23].

Tarihte, tekerlek-ray boylamasına temas kuvvetinin ilk teorik modeli Amerika Birleşik Devletleri'nde Carter tarafından ortaya konmuştur. Daha sonra, İngiltere'den Johnson ve Hollanda'dan Kalker bu konu hakkında temel bilgiler sunmuşlardır [24].

Tekerlek-ray ilişkisiyle alakalı en önemli parametrelerden biri, tekerlek ile ray arasındaki açının tanjantı olarak tanımlanan eşdeğer koniklik değeridir. Eşdeğer koniklik değerinin standartlarda tanımlanmış değerden farklı bir değer göstermesi durumunda demiryolu ve araç güvenliği, deray durumu, kurplardan geçişlerde oluşan kuvvetler, sürüş konforu, tekerlek-ray aşınması ve ray ömrü gibi konular olumsuz yönde etkilenecektir. Bu sebeple eşdeğer koniklik konusunun tam olarak anlaşılması ve standartlara uygun bir şekilde düzenli olarak kontrolünün yapılması büyük öneme taşımaktadır [25].

Demiryollarında rayın birden fazla görevi olmakla beraber en önemlilerinden bir tanesi de tekerlek ile sağladığı optimum temas açısıyla beraber aracın sürüş dinamiğine katkı sağlamasıdır. Bu durumun en önemli parametresini eşdeğer koniklik olduğunu söyleyebiliriz. Yüksek hızlı trenleri tekerlek setleri bir dingile sabitlenmiş rijit bir yapıya sahiptirler. Bu dingille rijit durumda olan tekerleklere verilen koniklik ile sağlanan eşdeğer koniklik sonucunda klingel hareketi denilen devamlı tekerlek temas yarıçapı değişimi ile harmonik hareket sağlanır. Ancak oluşan bu klingel hareketi eşdeğer konikliğin hıza göre kiritik değeri aşması durumunda takip hareketine yol açar böylece araç güvenliği ve sürüş konforu tehlikeye girer. Takip hareketinde tekerlek bodeni ray kenarına devamlı çarparak alıymanda ve geniş yarıçaplı kurplarda boden tırmanması olayı sonucu deraya yol açabilir. Belirlenen hareket deray edecek seviyeye ulaşmasa bile demiryolu hattının içerisinde öngörülmeven ve düzeltilmesi zor olan bozulmalara yol açacaktır. Hız miktarı arttıkça eşdeğer koniklik değerinin daha düşük bir değerde olması gerekir böylece hafif yanall salınımlarla sürüş dinamiği korunmuş olur [26].

Çizelge 4.1. Hıza bağlı olarak eşdeğer koniklik değeri [27].

Hız (km/h)	Eşdeğer Koniklik Değeri
$V \leq 140$	≤ 0.50
$140 \text{ km/h} < V \leq 200$	≤ 0.40
$200 \text{ km/h} < V \leq 230$	≤ 0.35
$230 \text{ km/h} < V \leq 250$	≤ 0.30
$250 \text{ km/h} < V \leq 280$	≤ 0.25
$280 \text{ km/h} < V \leq 350$	≤ 0.15

Eşdeğer koniklik ray-tekerlek tasarımının ve demiryolu içerisinde yapılan bakımların farklılıklarına bağlı olarak ray-tekerlek temas ilişkisini karşılaştırma fırsatı sunmaktadır. Bu fırsatı sağlarken doğrusallaştırma yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşım tekerleğin yuvarlanma yarıçapındaki değişimindeki lineer olmayan bağımlılığın lineer olanla değiştirilmesini içerir. Lineer bağımlılığın açılal katsayısı eşdeğer konikliklerdir. Dünya üzerinde bulunan çeşitli demiryolları içerisinde eşdeğer konikliği belirlemek için ortak kurallara uyulması gerekmektedir. Bu sebeple Uluslararası Demiryolu Birliği UIC 519 standart tarafından tanımlanan eşdeğer koniklik hesaplama ilkeleri kullanılmaktadır [28].

Eşdeğer koniklik belirli bir aracın tekerlek takımı için dinamik kararsızlıkların miktarını gösteren bir ölçüdür. Bu yüzden sadece fiziksel bir parametreyle belirlenmemektedir. Eşdeğer koniklik değeri tekerlek için gerekli bakım veya yenilenme durumu belirlemek için kullanılmaktadır [29].

Araçların çalışma dengesi söz konusu olduğunda ise tekerlerin ve rayların aşınmamış durumları göz önünde bulundurularak eşdeğer koniklik değerinin istenilen değerde olması gerekmektedir. Herhangi bir aşınmış tekerlek veya rayın araç stabilitesini direkt olarak etkileyeceği gerçeği göz ardı edilmez ancak araç henüz demiryolu hattındaki görevine başlamadan önce yapılan bu testlerde aşınma durumu göz ardı edilebilir. Bu stabilite testleri için genellikle alıyman ve büyük yarıçaplı kurplar tercih edilir [30].

4.1. EŞDEĞER KONİKLİĞİN KULLANILMA ALANLARI

4.1.1. Hat Bakım Çalışmalarını Belirlemek Amacıyla

Hat bakım çalışmalarını belirlemek amacıyla eşdeğer koniklik değerinin bilinmesi gerekmektedir. Buradaki yapılan işlem hattın durumunu görmek amacıyla eşdeğer koniklik değeri ideal tekerlek profili alınarak sadece ray profili ölçülerek bulunmaktadır. Burada demiryolu ortak paydadır. Çünkü üzerinden yük trenleri, konvansiyonel trenler, banliyö trenleri ve diğer demiryolu araçları(buraj, mobil demiryolu aracı vs.) geçmektedir. Hepsinin tekerlek tipi ve durumu farklı olacağı için burada sadece raylar ölçülerek çıkan eşdeğer koniklik değerine göre bakım çalışmaları planlanmalıdır. Cihaz burada ideal tekerlek profilinde rayın gezdiği yerleri ve rayın tekerlekle temas etme ihtimalinin olduğu yerleri kıyaslayarak temas noktası bulunmaktadır. Bulunan bu temas noktası yine eşdeğer koniklik formülü içerisinde bulunan tekerin raya temas ettiği noktaların ara mesafesini (bu mesafe aracın y eksenindeki hareketine göre değişiklik gösterir) bularak hesaplamaktadır. Buradaki en önemli parametre temas noktalarıdır.

4.1.2. Araçların TİP Testi İçin

Bu yöntemi kullanan araçlar için en ideal yöntem; araçlarda instrumented wheelset denilen bir tekerlek takımı mevcuttur. Bu tekerlek takımında gerilim ölçen bir cihaz vardır. Buradan gelen veriler için bir telemeter sistem vardır. Bu telemeter sistem ile tekerlekten gelen gerilim değerleri aracın içerisine radyo dalgaları ile gönderilmektedir. Bu sistemin kullanılmasında amaç raylardan tekerlere gelen dikey ve yatay kuvverleri hesaplamak ve temas noktasını bulmaktır. Eşdeğer koniklik değeri temas noktalarının değişmesiyle değişkenlik gösteren bir değerdir. Araç alıymanda giderken kendi y ekseninde bir sinüs hareketi yapar. Bu hareketin miktarını aracın durumu ve yolun durumu belirlemektedir. Bu y ekseninde yapılan hareketin durumuna bakılarak eşdeğer koniklik değeri hesaplanır. Bu yöntem dünyanın kabul ettiği bir yöntemdir. Ancak demiryolu hattı bakımı için bu yöntemi sürekli kullanmak imkan dahilinde değildir.

4.1.3. Araç Üreticileri Kendi Araçlarının Durumunu Görüp İyileştirmeler Yapmak Amacıyla

Bu yöntemde ray ideal olarak kabul edilerek tekerlekler ölçülür ve tekerlekteki aşınma miktarına göre çıkan eşdeğer koniklik değeri aracın stabil olup olmayacağını öngörmek amacıyla önemlidir. Calipri ile yapılan bu ölçümlerde tekerleğin boden kalınlığı, boden yüksekliği ve kök açısı görülmektedir. Tüm bunlara bakılarak araç bakımı planlanmaktadır.

Örneğin burada ölçülen eşdeğer koniklik değeri 0,4–0,5 arasındaysa bu profilde olan bir aracın yola çıktığında, aracın stabilitesinin bu durumdan çok etkileceği, yüksek hızlarda aracın çok büyük titreşimlere maruz kalacağını, emniyetinin risk teşkil ettiğini söyleyebiliriz.

Eşdeğer koniklik aracın çalışma dinamiği performansı ve asıl olarak çalışma stabilitesi ile ilgili önemli bir parametredir. Yüksek seviyede olan eşdeğer koniklik değeri bojilerin dengesiz çalışması riskine yol açarken bojilerin dalgalanma hareketi ile araç gövdesindeki normal değerlerde olan titreşim arasındaki rezonans nedeniyle araç gövdesinin ve bojilerin bileşik salınımına yol açar. Düzgün bir çalışma davranışı ile birlikte 3mm'lik bir genlik ile eşdeğer koniklik değeri 0,1–0,25 arasında olmalıdır [22].

4.2. EŞDEĞER KONİKLİK HESAPLAMA YÖNTEMİ

Hem eşdeğer konikliğin hem de bu parametrenin önemli rol oynadığı diğer tüm etmenleri karşılaştırabilmek amacıyla eşdeğer konikliğin aynı prensiplere hesaplanması gerekmektedir. Eşdeğer konikliğin belirlenmesi aracın dinamik işleyiş davranışını açıklama açısından çok önemlidir.

4.2.1. Prensipler ve Tanım

- Bir yol üzerinde ataletsiz şekilde giden serbest bir tekerlek setinin kinematik hareketi aşağıdaki diferansiyel denklem ile tanımlanır.

$$y'' + \frac{v^2}{e \cdot r_0} \Delta r = 0 \quad (4.1)$$

- Eşdeğer konikliğin hesaplanmasıyla ilgili sonuçları sınırlamadan bu çalışmada aracın ileri hareket hızı V şeklinde sabit sayılabilir:

$$V = \frac{dx}{dt} \quad (4.2)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \frac{dy}{dx} \quad \text{ve} \quad \frac{d^2y}{dt^2} = V^2 \frac{d^2y}{dx^2} \quad (4.3)$$

Bu nedenle:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\Delta r}{er_0} = 0 \quad (4.4)$$

Diferansiyel denklem şu şekli alır.

- Tekelekleri γ açılı konik profilli bir tekerlek seti olması durumunda:

$$\Delta r = 2y \tan \gamma \quad (4.5)$$

- Diferansiyel denklem bu durumda şu şekli alır:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{2 \tan \gamma}{er_0} y = 0 \quad (4.6)$$

Çözümü λ 'in dalga boyu ile bir sinüs dalgası olan sabit katsayılı ikinci dereceden bir diferansiyel denklem:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{er_0}{2 \tan \gamma}} \quad (\text{KLİNGEL Formülü}) \quad [31] \quad (4.7)$$

Tekerlekler konik profilli değil ise lineer diferansiyel denklemin $\tan \gamma'$ nin $\tan \gamma_e$ ile değiştirilerek uygulamaya devam edilebilmesi için lineerleştirme yöntemleri kullanılabilir. Tanım açısından eşdeğer koniklik yanlamasına (lateral) hareketi söz konusu tekerlek seti ile aynı kinematik dalga boyuna sahip konik tekerlekli bir tekerlek

setinin koni açısının teğet $\tan \gamma_e$ 'sine eşittir. Bu durum sadece aliymanda ve geniş yarıçaplı kurplarda geçerlidir.

Eşdeğer koniklik hesaplamaları yaparken bazı kurallar unutulmamalıdır.

- Ray ve tekerlek rijit olarak düşünülmalıdır.
- Bir teorik tekerlek dönme sırasında simetriktir.
- Bir teorik ray düzdür ve tek bir profil ile temsil edilmektedir.
- Gerçek bir ray 100 m'lik bir hat kesimi üzerinde düzenli şekilde bölünmüş en az 11 eşit parça ile tanımlanır.
- Tekerlek rayın içerisine geçmez; sadece nokta temasları dikkat alınır.

Gerçek bir tekerlek birbirinden 90° ayrı yerlerde bulunan ortalama 4 tekerlek bölümünün ortalamasını alarak belirlenen ortalama bir profilin kullanılmasıyla belirlenebilir.

Belli herhangi bir tekerlek ve ray profili için (teorik veya gerçek) yol üstündeki tekerlek setinin \tilde{y} yansal hareketi ile bağlantılı $\tan \gamma_e$ eşdeğer konikliğini belirlemek mümkündür.

Bu aşağıdaki aşağıdaki prosedürü takip ederek yapılır:

- Gerçek ray profillerinin ölçümü veya teorik profiller için teorik bir hesaplama ile tekerlek ve ray profillerinin belirlenmesi
- Yol üstündeki tekerlek setinin her y eksenindeki yanlamasına hareketi ile sağ ve sol tekerlerin yuvarlanma yarıçaplarının arasındaki fark $\Delta r = r_1 - r_2$ vererek $\Delta r = f(y)$ karakteristiğini belirleme:
- Yol üstündeki tekerlek setinin \tilde{y} yanlamasına hareketi için eşdeğer konikliğini belirleme

Tüm bu durumlar ilerleyen konularda açıklanacaktır.

Yuvarlanma yarıçapı farkı (Δr) belirlerken tekerlerin kartezyen koordinatlarını belirlemek için her tekerleğin gerçek yarıçaplarının dikkate alınması gereklidir.

Yol üzerindeki bir tekerlek setinin yanlamasına hareketi için sağ ve sol taraf arasındaki yuvarlanma yarıçap farkınını veren $\Delta r = f(y)$ karakteristiği, merkezi bir pozisyona göre ve maksimum $\Delta y = 0,2\text{mm}$ 'lik adımlarda $\Delta r = r_1 - r_2 = 5\text{ mm}$ hesaplanmaktadır [31].

4.2.2. Eşdeğer Konikliğin Belirlenmesi

4.2.2.1. Diferansiyel Denklemin Entegrasyonu

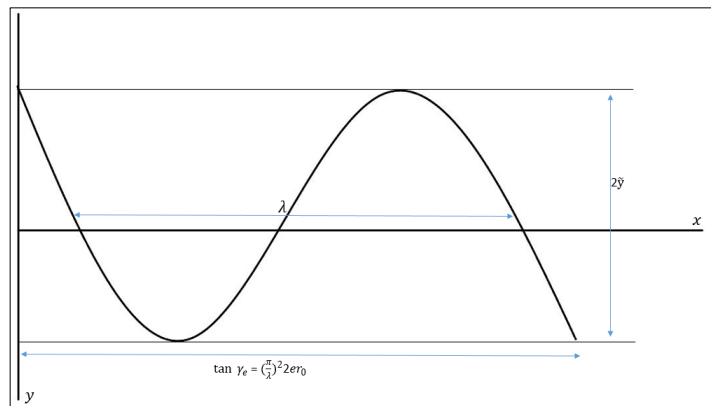
$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\Delta r}{er_0} = 0 \quad (4.8)$$

Aşağıdaki ilk koşullarla birlikte önceden belirlenen $\Delta r = f(y)$ özelliği kullanarak:

$$y = y_0 \quad \text{için} \quad x = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \text{için} \quad x = 0 \quad (4.10)$$

İlk genişlik olan y_0 ya dayalı bu entegrasyon, $2\tilde{y}$ değerindeki bir uçtan bir uca genişlik ve λ dalga genişliği ile tekerlek setinin periyodik hareketine yol açmaktadır.



Şekil 4.1. Dalga boyu.

Uygulanabilirlik açısından koniklik, 1mm'den 8mm'ye kadar \tilde{y} deki değişikliklerle ilgili olarak değerlendirilmektedir. $\Delta r = f(y)$ özelliği çok fazla lineer değilse veya aşırı yükselmekler gösterirse bile maksimum değer olan 8 mm'ye asla ulaşamaz [31].

4.2.2.2. Konikliğin Hesaplanması

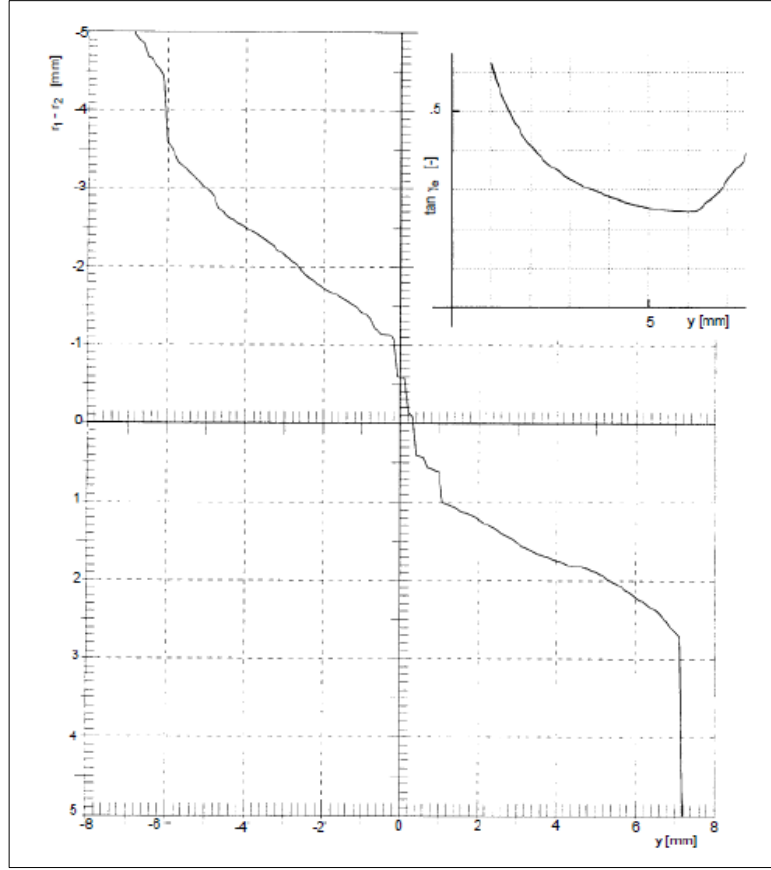
Tekerlek setinin gerçek hareketinden koniklik \tilde{y} genliği şu şekilde hesaplanır.

Klingel formülü uygulanarak;

$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{er_0}{2 \tan \gamma}}$ buradan $\tan \gamma = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 2 er_0$ ya da $2\tilde{y}$ aralığı içerisinde bulunan $\Delta r = f(y)$ karakteristiği kısmına en küçük kareler türü linear regrasyon uygulayarak eğimi $2 \tan \gamma_e$ 'e eşittir.

Pratik olması açısından koniklik \tilde{y} 'den 1 ila 8 mm arasındaki değişiklikler için değerlendirilir.

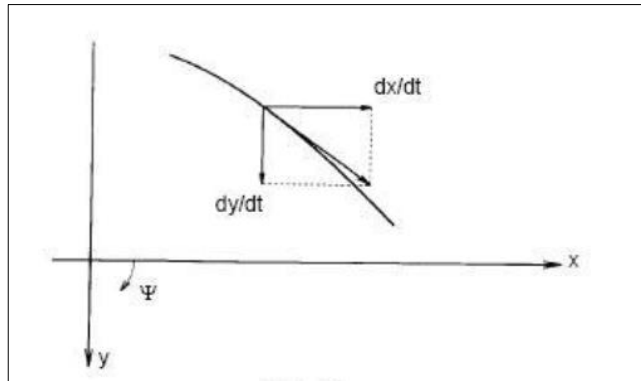
Δr fonksiyonu ve konikliğin gösterilmesi ile ilgili örnek şekil 4.2'tedir.



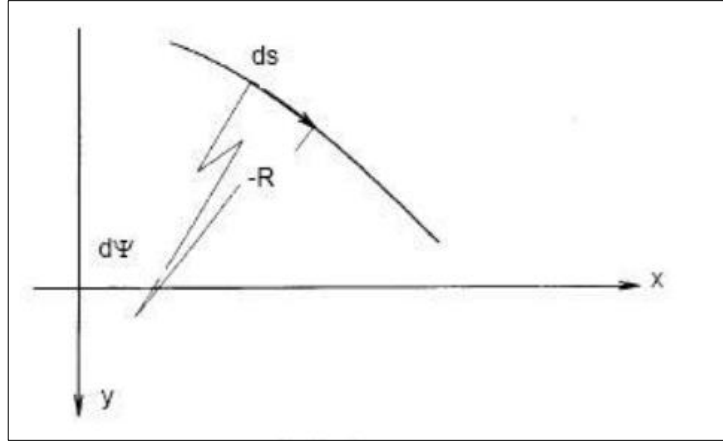
Şekil 4.2. $\Delta r = f(y)$ fonksiyonu ve $\tan \gamma_e = f(y)$ [31].

Tekerlek setinin yol üzerindeki hareketi açı baz alınarak formüleleştirilebilir.

$$\psi = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{dy}{dx} \quad (4.11)$$



Şekil 4.3. dx ve dy'nin gösterimi.



Şekil 4.4. ds ve $d\Psi$ 'nin gösterimi [31].

$$ds = -R d\Psi \quad (4.12)$$

Küçük açı Ψ için, $ds \cong dx$

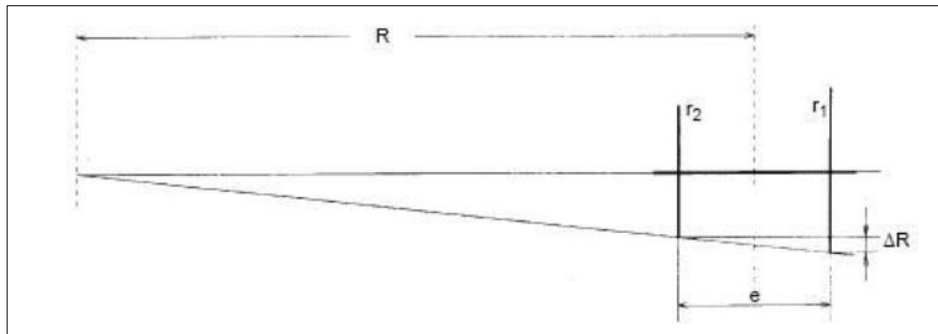
$$dx = -R d\Psi \quad (4.13)$$

Denklem 1 dikkate alındığında şu çıkarılabilir;

$$\Psi = \frac{dy}{dx} = -\frac{dy}{Rd\Psi} \quad (4.14)$$

Dolayısıyla;

$$\Psi d\Psi = -\frac{dy}{R} \quad (4.15)$$



Şekil 4.5. r_0, r_1, r_2 ve e 'nin gösterimi.

$$\frac{R}{e} = \frac{\frac{r_1+r_2}{2}}{r_1-r_2} \quad (4.16)$$

Her tekerleğin nominal yarıçapı $\frac{r_1+r_2}{2} = r_0$ olduğu yerde;

$$\Delta r = r_1 - r_2 \quad (4.17)$$

Ve e; sağ ve sol ray-tekerlek temas noktaları arasındaki mesafedir. (yaklaşık olarak 1500 mm'dir).

Buradan;

$$R = \frac{er_0}{\Delta r} \quad (4.18)$$

Denklem 4.15'teki R'yi değiştirerek, şunu elde ederiz:

$$\Psi d\Psi = \frac{-\Delta r dy}{er_0} \quad (4.19)$$

Entegrasyon ile;

$$\frac{\Psi^2}{2} = -\frac{1}{er_0} [\int \Delta r dy + C] \quad (4.20)$$

Bu entegrasyon ile $y_{e\ min}$ 'den başlayan ($\Psi_{e\ min} = 0$) ve $y_{e\ max}$ 'a ($\Psi_{e\ max} = 0$) çıkan dalga genişliğinin yarısına denk gelen yol ve özellikle güzergah üzerindeki tekerlek setinin hareketini elde etmek için kullanılmaktadır.

Tekerlek setinin yol üzerindeki hareketi, aşağıdaki entegrasyon yardımı ile elde edilmektedir.

$$dx = \frac{1}{\Psi} dy \quad \text{veya} \quad x = \int \frac{dy}{\Psi} \quad (4.21)$$

Dikkat: Denklem 5 , $\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\Delta r}{er_0} = 0$ diferansiyel denkleminin eşittir.

Aslında:

$$\frac{d\Psi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (4.22)$$

Ve diferansiyel denklem şu şekli alır;

$$\frac{d\Psi}{dx} + \frac{\Delta r}{er} = 0 \quad (4.23)$$

ile;

$$dx = \frac{dy}{\Psi} \quad (4.24)$$

Bu yüzden;

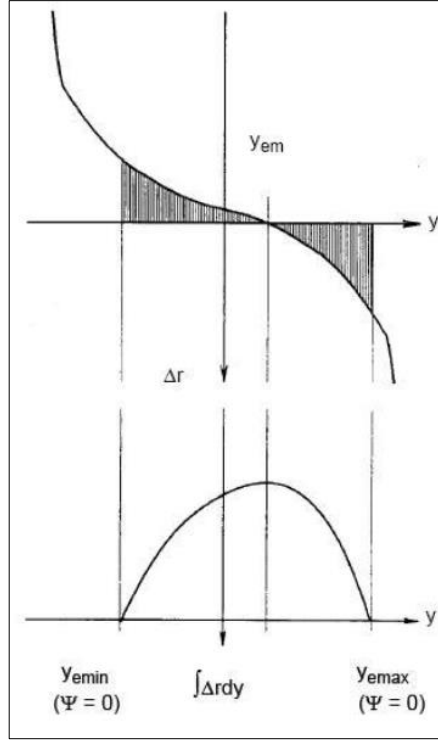
$$\frac{\Psi}{dy} d\Psi + \frac{\Delta r}{er_0} = 0 \quad (4.25)$$

Şu şekilde;

$$\Psi d\Psi = - \frac{\Delta r dy}{er_0} \quad [31] \quad (4.26)$$

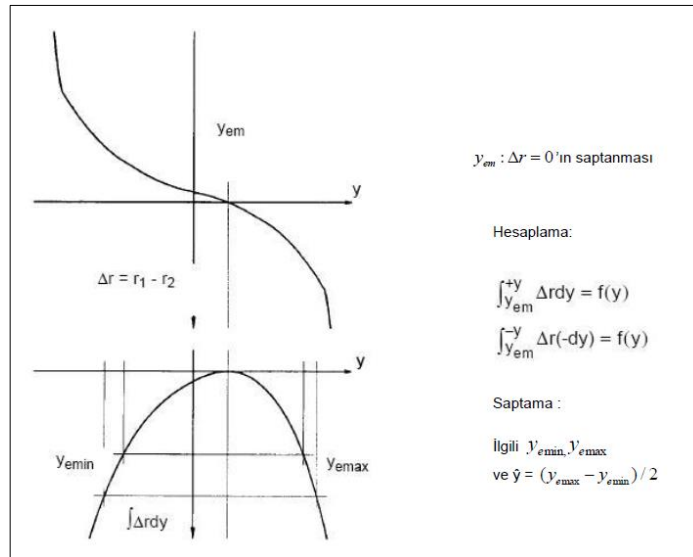
4.2.2.3. İşlem Basamakları

Δr fonksiyonu $r_1 - r_2 = f(y)$ denkleminin dayanarak $\Delta r = 0$ 'a denk gelen y_{em} değerini aşağıdaki grafik yardımıyla bulunmalıdır.



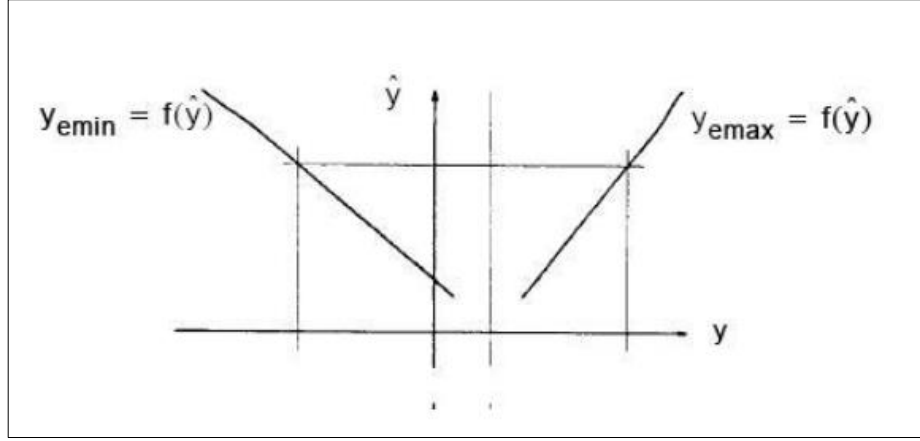
Şekil 4.6. $\int \Delta r dy$ integralinin hesaplanması [31].

y_{em} 'den başlayarak $dy = +0,1 \text{ mm}$ 'den $+y$ basamaklarına kadar ve y_{em} 'den başlayarak $dy = -0,1 \text{ mm}$ 'den $-y$ basamaklarıyla $S(y) = -\int \Delta r dy$ fonksiyonu ve y_{emin} ve y_{emax} 'in genişliklerini belirleyerek ortalama yanlmasının \tilde{y} hareketi hesaplanmalıdır.



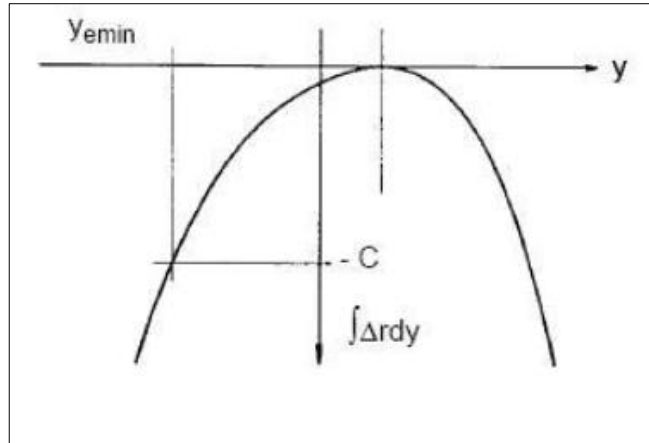
Şekil 4.7. y_{em} 'in saptanması, $\int \Delta r dy$ hesaplanması ve \tilde{y} 'nin saptanması.

- İlgili minimum ve maksimum $y_{e\min}$ ve $y_{e\max}$ genişliklerinin $2\tilde{y}$ tekerlek setinin verilen bir yanlamasına hareket için bulunmasını sağlayan $y_{e\min} = f(\hat{y})$ ve $y_{e\max} = f(\hat{y})$ fonksiyonları bulunmalıdır.



Şekil 4.8. $y_{e\min} = f(\hat{y})$ ve $y_{e\max} = f(\hat{y})$ fonksiyonlarının saptanması.

- Verilen \tilde{y} hareketi için $\tan \gamma_e$ değeri hesaplanmalıdır.
 - İlgili $y_{e\min}$ için $\Psi_{e\min} = 0$ olacak şekilde denklem 4.20'den sabit C değeri bulunmalıdır.



Şekil 4.9. Sabit C değerinin saptanması.

- Aşağıdaki sonucu elde etmek için denklem 4.19'u entegre ederek Ψ açısı hesaplanmalıdır.

$$\Psi = \sqrt{\frac{-2}{e r_0} - [\int \Delta r dy + C]} \quad (4.27)$$

$dy = 0,1$ mm basamaklarıyla;

- Tekerlek seti hareketinin apsisi hesaplanmalıdır.

$$y_{e \min} \text{ ve } y_{e \max} \text{ arasında } x = f(y) = \int \frac{dy}{\Psi} \quad (4.28)$$

Bu tekerlek setinin kinematik hareketinin λ dalga genişliğinin saptanmasına müsaade etmektedir.

Bir çok durumda, entegrasyon $y_{e \min}$ 'den $y_{e \max}$ 'a kadar olan aralıkta sadece tek bir basamakta yapılmaz. Bu yüzden dalga genişliği x , $dx = \frac{dy}{\Psi}$ eklenerek hesaplanmalıdır, bu vasıtaıyla dy basamağı $\leq 0,1$ mm olmalıdır.

- Klingel formülünü uygulayarak eşdeğerlik koniklik hesaplanmalıdır.

$$\tan \gamma = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 2 er_0 \quad (4.29)$$

4.2.2.4. Δr Fonksiyonunun Lineer Regrasyonu

Lineer Δr fonksiyonu için, Δr fonksiyonunun eğimi $2 \tan \gamma_e$ 'ye eşittir.

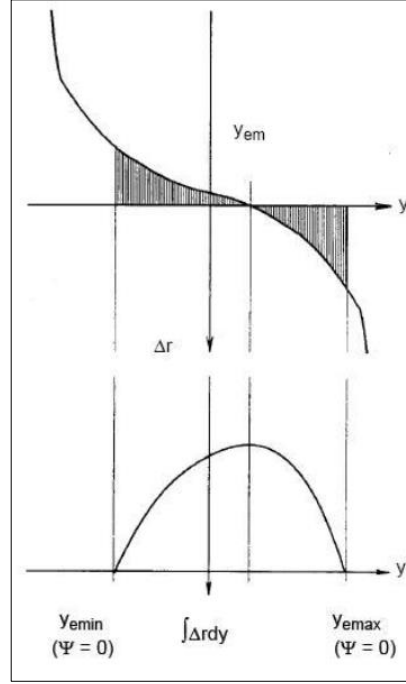
Lineer olmayan Δr fonksiyonu için lineer regrasyonun eğimi, yaklaşık $2 \tan \gamma_e$ 'yi vermektedir.

$2\tilde{y}$ aralığı için Δr fonksiyonunun regrasyonu $y_{e \min}$ ve $y_{e \max}$ 'in dalga boyunun gerçek şeklinin minimum ve maksimum genişliği olduğu yerde $y_{e \min}$ ve $y_{e \max}$ arasında yapılmalıdır.

Simetrik Δr fonksiyonları için $y_{e \min}$ ve $y_{e \max}$ ortalama \tilde{y} genişliğine eşittir; ancak simetrik olmayan Δr fonksiyonları için $y_{e \min}$ ve $y_{e \max}$ normalde \tilde{y} genişliğine sahip değildir.

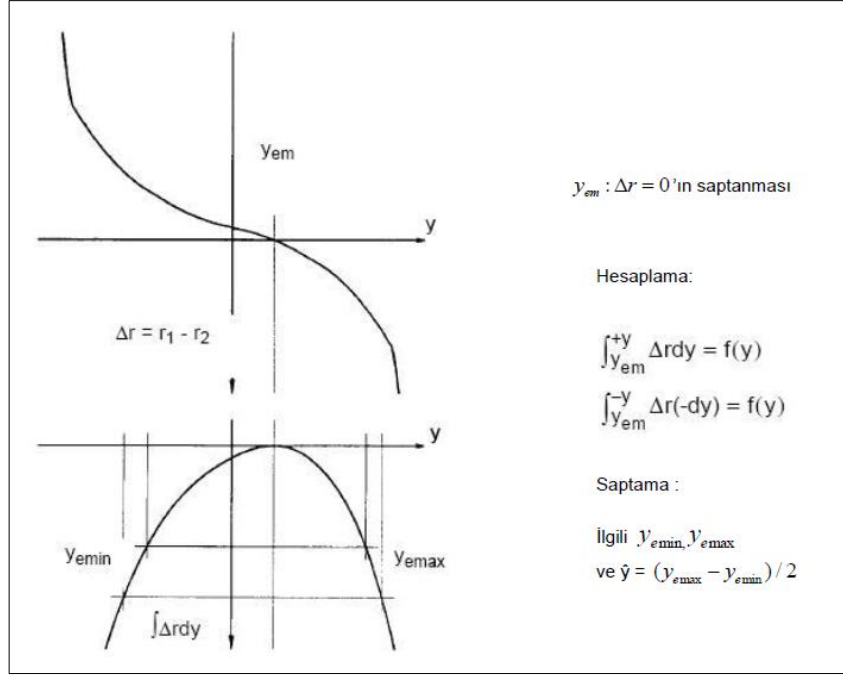
İşlem Basamakları

$\Delta r = r_1 - r_2 = f(y)$ fonksiyonuna dayanarak $\Delta r = 0$ 'a denk gelen y_{em} değeri bulunmalıdır.



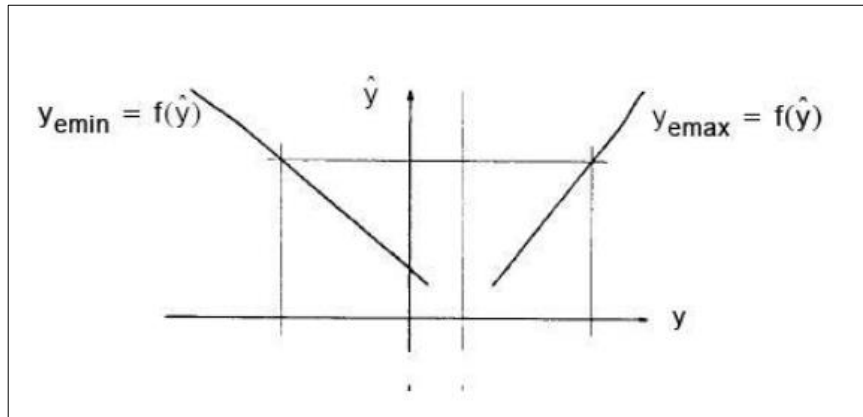
Şekil 4.10. $\int \Delta r dy$ integralinin hesaplanması [31].

y_{em} 'den başlayarak $dy = +0,1 \text{ mm}$ 'den $+y$ basamaklarına kadar ve y_{em} 'den başlayarak $dy = -0,1 \text{ mm}$ 'den $-y$ basamaklarıyla $S(y) = -\int \Delta r dy$ fonksiyonu ve y_{emin} ve y_{emax} 'in genişliklerini belirleyerek ortalama yanlamasının \tilde{y} hareketi hesaplanmalıdır.



Şekil 4.11. y_{em} 'in saptanması, $\int \Delta r dy$ hesaplanması ve \hat{y} 'nin saptanması.

İlgili minimum ve maksimum y_{emin} ve y_{emax} genişliklerinin $2\hat{y}$ tekerlek setinin verilen bir yanlamasına hareket için bulunmasını sağlayan $y_{emin} = f(\hat{y})$ ve $y_{emax} = f(\hat{y})$ fonksiyonları bulunmalıdır.



Şekil 4. 12. $y_{emin} = f(\hat{y})$ ve $y_{emax} = f(\hat{y})$ fonksiyonlarının saptanması.

y_{emin} ve y_{emax} aralığında Δr fonksiyonunun lineer regresyonu hesaplanmalıdır ve B = regresyon eğimi olduğu yerde eşdeğer konikliğinin $\tan \gamma_e = \frac{B}{2}$ olarak hesaplanmalıdır.

$\Delta r = f(y)$ özelliği iki adet düz hat kesimine benzetilebilecek, orijinde $2\tilde{y}$ aralığının üzerinde önemli bir asimetriklik gösterirse, iki adet $\tan \gamma_{e,p}$ ve $\tan \gamma_{e,n}$ konikliklerini elde etmek için bölümlerin her birine (pozitif ve negatif) bir regrasyon uygulaması gerekmektedir. Eşdeğer konikliği aşağıdaki formül ile elde edilebilir.

$$\tan \gamma_e = \left[\frac{2}{\frac{1}{\sqrt{\tan \gamma_{e,p}}} + \frac{1}{\sqrt{\tan \gamma_{e,n}}}} \right]^2 \quad (4.30)$$

BÖLÜM 5

CALİPRİ ÖLÇÜM CİHAZININ TANITILMASI

Bu bölümde tez çalışması için yapılan ölçümlerin aşamaları ve nasıl yapıldığı anlatılmaktadır. Makine Calipri marka olup C-42 serisidir. 2018 yılında TCDD kendi bünyesine 8 adet almıştır. Calipri C-42, tekerlek setlerinin, rayların ve makasların ölçümleri için kullanılan bir ölçüm cihazıdır. Opto-elektronik ölçme cihazı, entegreli bir kamera ve ayrıca bir lazer yardımıyla, ölçümlerini tamamlar. Özel yazılım ile algılanan verileri birkaç saniye içinde değerlendirir ve bunları kullanıcıya gösterir. Hassas olmayan bir elle yönlendirme, patentli bir eğim düzeltme ile tekrar kompanse edilir. Bu nedenle, cihazın hassas yönlendirilmesi veya tam nesneye doğru tutulması zorunlu değildir. İlaveten akustik ve görsel sinyaller ve bildirimler, kullanıcıya ölçüm sırasında yol gösterir.

- Tekerlek profili
- Lastik kalınlığı
- Fren diski
- Tekerlek açıklığı
- Tekerlek çapı
- Ray profili
- Oluklu ray
- Dairesel – aksenal açıklık
- Makas
- Eşdeğer koniklik gibi modüller bu cihaz ile ölçülebilir.

Tez çalışmasında buradaki kullanılan modül Eşdeğer koniklik ve ray profilidir. Ölçüme başlamadan önce bir ölçüm planı oluşturmak gerekmekte ve bu ölçüm planı ise bir ölçüm nesnesi içermelidir. Bir ölçüm planının içereceği ölçüm nesnesi sayısı sınırsızdır. Ayrıca ölçüm planının özellikleri de belirlenebilir, örneğin tren numarası,

kilometre durumu, ray tipi, sağ ray ve sol rayın yerleri vb. Bir ölçüm nesnesi, ölçülecek nesnenin resminden oluşmaktadır, örneğin bir trenin tekerlek takımı. Her ölçüm nesnesi için istenilen sayıda ölçüm noktası eklenebilir. Her ölçüm noktası Calipri'nin bir ölçümüne karşılık gelmektedir.

Bir ölçüm noktası aşağıdaki bilgileri içerir:

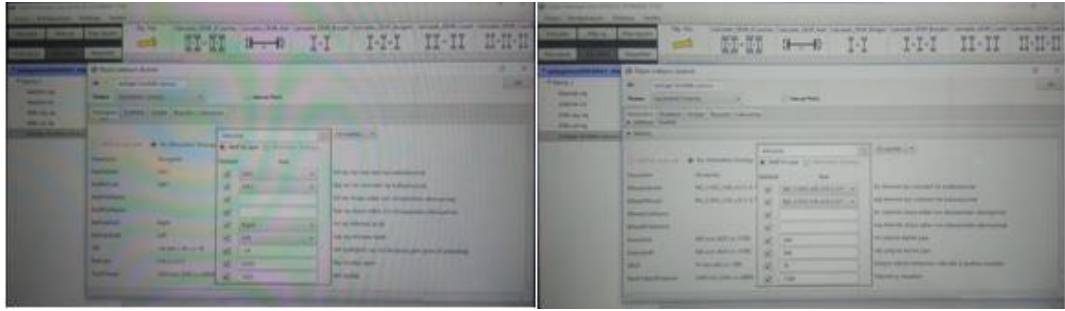
- Ölçüm yöntemi: Ne tür bir nesnenin ölçülmesi gerekiyor, örneğin tekerlek profili, fren diski.
- Parametre: Bu bilgiler ölçüm noktasının nasıl ölçüldüğünü ve sonuçların nasıl değerlendirilmesi gerektiğini tanımlar.
- Boyutlar: Hangi ölçüm büyüklükleri belirlenmelidir, örneğin tekerlek genişliği, qR ölçüsü.
- Toleranslar: Her bir ölçüm büyüklüğü için izin verilen sınır ölçülerini tanımlar.
- Özellikler: Ölçüm noktasına özgü özellikler, örneğin eksen, taraf vb. tanımlanabilir.

Bu çalışmada eşdeğer konikliği ölçmek için belirlenen pilot bölgedeki 100 metreyi 11 eşit parçaya bölerek demiryoluna göre sağ ray ve sol rayın zaman içerisindeki aşınmalarına bağlı olarak değişen eşdeğer koniklik değerlerini incelenmiştir.



Şekil 5.1. Calipri C42.

Planı oluştururken tüm değerler doğru girilmelidir. Çünkü eşdeğer koniklik değerinin doğru okunabilmesi için girilen her bir değer önemlidir. Demiryolu hattının bilgileri iki ray arası mesafe dediğimiz ekartman genişliği **1435 mm**, ray tipi hatta en çok kullanılan iki tipten biri olan **60E1**, hat açıklığının ray üst kotuna göre göreceli yüksekliği **14 mm** aşağısı olarak belirlenmiş olup kaynak kontrolü, ekartman ölçümü vs. gibi işlemlerde bu kot değeri dikkate alınır, araçların tekerlerinde mevcut olan koniklikten dolayı bizde daha bir temas açısı oluşturmak için raya **1/40** değerinde ray montaj eğimi verilmektedir.



Şekil 5. 2. Sistem arayüzü.

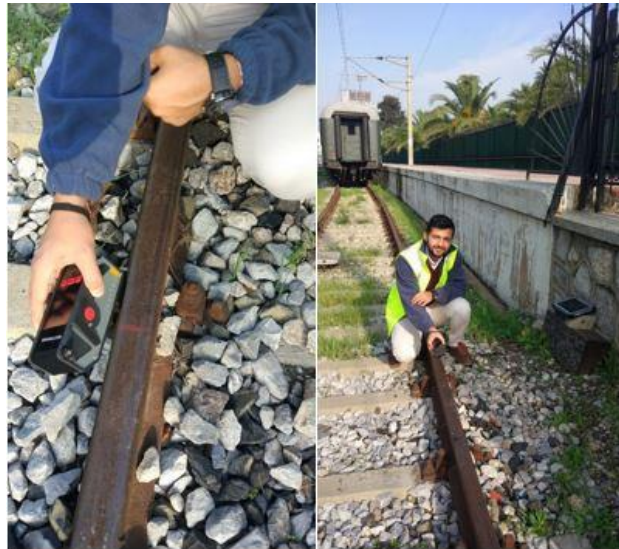
Tekerlek bilgileri için ise öncelikle en çok kullanılan modellerden biri olan **S1002** tekerlek tipi seçilir ve kendi içerisinde boden yüksekliği boden genişliği gibi bilgileri doğru girilmelidir, tekerlek çapı **900 mm** , iki teker arası iç mesafe **1360 mm**, ve çalışma dairesi noktasının tekerlek iç tarafına mesafesi **70mm** olarak girilmelidir. Aslında tekerleğe verilen koniklik değeri ilk başta tekerlek modeli seçerken cihaz otomatik olarak aldığı için bu önemli değer girilmemektedir.

Yapılan ve yapılacak olan tüm ölçümlerden sağlıklı veriler elde etmek için belirli aralıklarla bu cihazı kalibre etmek gerekiyor. Bu aralıkları kullanıcı ölçüm planına ve sıklığına göre belirlemelidir.



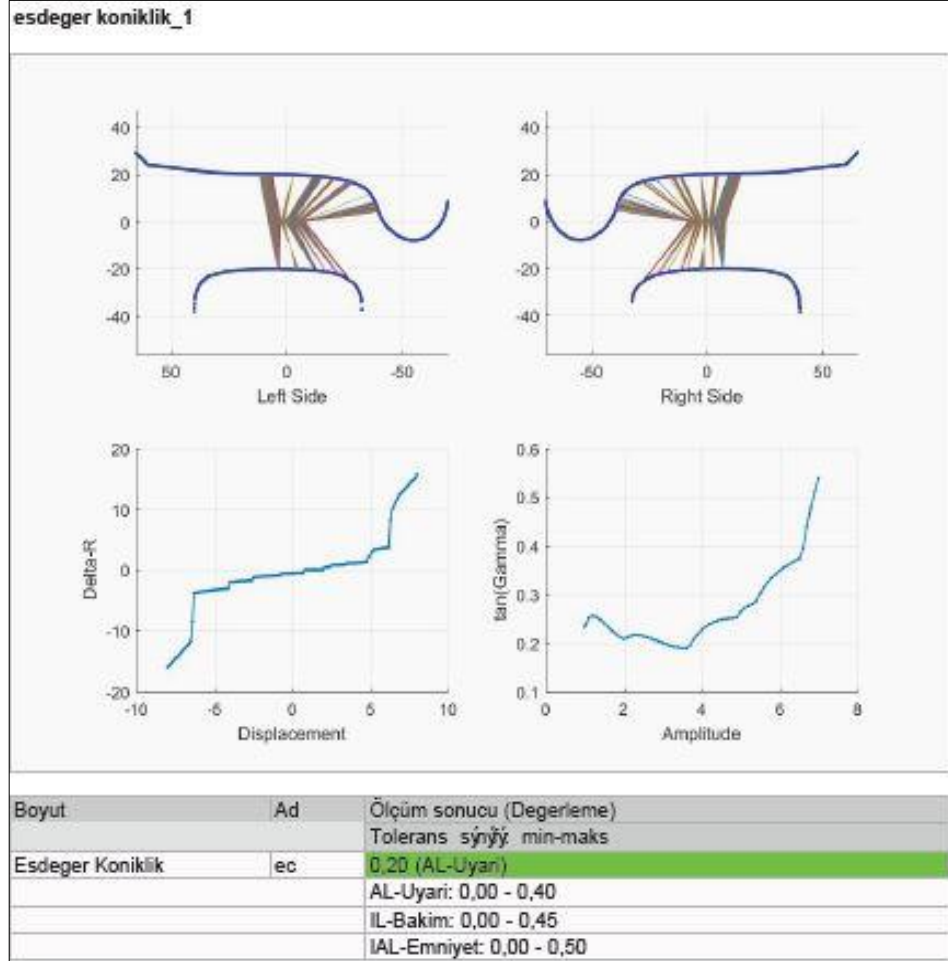
Şekil 5.3. Cihazın kalibre edilmesi.

Kalibre işlemi yapıldıktan sonra ölçüm için seçilen bölge iyi bir şekilde analiz edilerek sağlıklı bir şekilde ölçüm işlemine başlanabilir. Dikkat edilmesi gereken nokta ise; sağ ve sol rayların yerlerinin oluşturduğumuz plana göre doğru teker temasını sağlamak olmalıdır. Sağ teker sol ray, sol raya da sağ teker teması sağlanırsa kesin olarak yanlış sonuç elde edilecektir.



Şekil 5.4. Ölçümün yapılması.

Yapılan ölçümlerin sonuçlarını pdf formatında almak mümkündür. Sonrasında yapılması gereken iş elde edilen sonuçları doğru bir şekilde analiz ederek çıkan sonuçlara göre bakım ve düzeltme işlemleri planlanmalıdır.



Şekil 5.5. Ölçüm sonuçlarının okunması.

BÖLÜM 6

BAKIM FAALİYETLERİ

6.1. TAŞLAMA

Demiryolunun sembolü olan raylar üstyapının en önemli elemanıdır. Rayların yuvarlanma yüzeyinin kalitesi demiryolu işletmesinin güvenliğini ve konforunu doğrudan etkiler. Rayın yuvarlanma yüzeyindeki geometrik düzensizlikler dinamik yükün artmasına neden olur. Tekerleklerin düzgün bir yuvarlanma yüzeyine sahip olabilmesi için rayların kesit şekillerinin ve diğer özelliklerinin korunması gerekmektedir. Bu sebeple rayların imalatı, taşınması, istiflenmesi, montajı ve işletme tarafından yapılacak olan bakım işlemlerinin özel bir itina ile yapılması gerekmektedir. Ray yüzeyinde üretimden gelen ya da sonradan oluşmuş olan düzensizlik ve ray kusurlarının giderilmesi amacıyla aşındırıcı taş yardımıyla yüzeyinden belli kalınlıkta ray kaldırılması suretiyle rayın istenen forma getirilmesi ve hatalarının giderilmesi işlemine “taşlama” denir.

Taşlama işlemi, rayın yüzeyinden malzeme kaldırılmasını, ray yüzeyi kusurlarının oluşumunun engellenmesini veya yavaşlatılmasını ve enine ve/veya boyuna ray profilinin standart profiline getirilmesi için rayın enlemesine veya ray boyu oluşan aşınmanın eşitlenmesini içerir.

Ray profilini korumak, ray ömrünün artırılması, hat bakım masraflarının azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlama amacıyla ray taşlama işlemi yapılır. Bu işlem yapılırken;

- Ondülasyonların önüne geçmek için boyuna profil korunmalı
- Ray-tekerlek temasında eşdeğer konikliğın sağlanması için enine profil korunmalı
- Ray kusurlarına göre kaldırılan metal kalınlığı limitlerine dikkat edilmeli

- Gürültünün 12dBA altına düşürülmesi için yüzey pürüzlülüğüne dikkat edilmelidir.

Demiryollarında hızların ve yolcu konforunun artması, dingil yükleri ve trafiğin yoğunlaşması hattaki bozulmaların çeşitlenerek artmasına neden olacaktır. Rayda oluşacak geometrik hatalar ya ray üretiminden kaynaklanan ray yüzeyleri hataları ya da tekerlek teması sonucu oluşan ondülasyonlardır. Bu ray kusurlarını temizlemenin en uygun çözümü rayların taşlanmasıdır.

Ondülasyonlar dalga derinliği 0,05mm'nin üzerine çıktığında gürültü seviyesinde bir artışa ve dalga derinliği 0,1 mm'in üstüne çıktığında ise üst yapı bakım maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Ondülasyonlar beton traversli ve kötü durumdaki bir üst yapının servis ömrünü %30 azaltmaktadır. Planlar dahilinde yapılan taşlama işlemleri yol geometrisinin bakım aralığını %30-50 artırır [10].

Ondülasyonlar;

- Hattın salınım frekansının yüksek olmasına,
- Ray gerilmelerinin artmasına,
- Taşıtların daha fazla yorulmasına,
- Trenlerin daha fazla enerji kaybetmesine,
- Beton traverslerin çatlamasına, bağlantı elemanlarının gevşemesine,
- Klipslerin ve pedlerin aşınmasına,
- Altyapı ve balastın planlanandan daha kısa zamanda bozulmasına,
- Gürültünün 5-15 dB(A) kadar artmasına sebep olur.

Dinamik kuvvetlerin azalması için en etkili ve en çok kullanılan yöntemlerden birisi taşlamadır. Taşlama, sadece boyuna profil vermek için değil aynı zamanda rayın yanal profilinin düzeltilmesi içinde kullanılır. Yanal profil vermek ray aşınmasını ve metal akmasını azaltır, rayın iç gerilme dağılımını kontrol eder, tekerlek profilini korur ve araç hareketini iyileştirir.

Metalurjik araştırmalar sonucunda, optimum taşlama derinliği olarak 0,1 mm'lik bir yükseklik ve yeni olan raydaki taşlama işlemi için 0,3 mm'lik bir yükseklik bulunmuştur. Yani ondülasyonları taşlamak için en az iki pas (taşlama geçişi) gerekmektedir. Yeni raylar için en az 6 pas taşlama yapılmalıdır [32].

Taşlama sonrasında ray yüzeyinde rayın yandığını gösteren mavimsi bir izin olmaması istenir. Ray taşlama sonrasında ray-tekerlek temas yüzeyinin ray mantarı ortasında ve 25-30 mm arasında olması istenmektedir.

Zamanla dalga derinliği artan ray tabakasında gerekli olan taşlama işlemi için uygulanacak paso sayısı hızlı bir Şekilde artmaktadır; yani taşlama işlemini dalga derinliği az iken yapmak daha ekonomik olacaktır. Bu durumda raydaki dalga derinliklerinin büyük olması demiryolu üstyapısında telafisi mümkün olmayan zararlara sebep olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle dalgalı ray oluşumunun, sıkı bir programla izlenerek, rayların zamanında taşlanması yol bakımını açısından önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir.

TCDD'nin sahip olduğu ray taşlama makinesi Şekil 6.1'deki gibidir. Demiryolu hatlarında, makaslarda ve kruvazmanlarda, rayların bir teki veya ikisi aynı anda, dairesel taşlama taşlarıyla ray mantarının yeniden profillendirilmesini sağlar. Rayların üstünde bulunan ondülasyon, apak, kaynak fazlalıkları vb. kusurları gidererek hattı EN 13231-3'te belirtilen toleranslara getirilir.

Makine ile komple ray mantarı üst yüzeyinden; 70 derece iç yan yüzeyinden, 5 derece dış yan yüzeyine kadar olan bölgeyi taşlama kabiliyetine sahiptir.

Taşlama işlemi uygulama amacına göre 3 ana başlıkta incelenebilir.



Şekil 6.1. Taşlama Makinesi.

6.1.1. Koruyucu Taşlama

Ray yorulmalarının ve hatalarının işin başında fark edilip büyümelerine izin vermeden yapılan taşlama işlemidir. Muhtemel ray kırıklarını önlemek ve sürekli sorunsuz bir hat işletimini sağlamak amacıyla koruyucu taşlama yapılmalıdır. Ray mantarı üzerinde dingil yüklerinden dolayı ince bir tabakada malzeme kristal kafes örgüsünün bozulmasına ve mekanik özelliğinin zayıflamasına ray yorulması adı verilir. Zamanla yorulma belirtileri gösteren ray kontrollü bir şekilde yapılan koruyucu taşlama işlemi ile ortalama 0,3 mm taşlanarak temizlenir [7].

Kurplarda iç ve dış raydaki aşınmayı azaltmak için sert raylar kullanıldığı takdirde yeni mantar profilini tekerlek geçişine uygun olması için taşlanarak düzeltilir [33].

- Rayda kritik RCF (Yuvarlanma Temas Yorulması) çatlaklarının oluşmasının önlenmesine yardımcı olur, diğer ray kusurlarının oluşmasını ve büyümesini önler.
- Rayın enine profilini standartlar içinde tutar.
- Ondülasyonlar gibi boyuna düzensizliklerin oluşmasının önlenmesine ve rayın boyuna profilinin limitler dâhilinde kalmasına yardımcı olur.

- Ray profilinin korunması, aşınmayı azaltır ve gerek raylarda gerekse demiryolu araçlarının tekerleklerinde kusurların oluşumunu azaltır.
- Kaynak çikintıları ve korozyonun temizlenmesi sağlanır.
- Ray döşenirken ray ve travers toleransından kaynaklanan ray eğimi hataları koruyucu taşlama ile düzeltilebilir.

Koruyucu taşlamanın amacı, rayın kusurlarının ilerleme hızının düşürülmesi ve ray yüzeyindeki kusur büyüklüklerinin emniyetli sınırları içinde kontrol altına alınarak, ray ömrünün uzatılmasıdır. Böylece rayın, aşınması azaltılır ve hizmet ömrü uzatılır.

Ray-tekerlek temasının olduğu bölgede yorulmadan dolayı aynı rayda birkaç kara nokta görülür. Bu kusur sonra rayın yanal çatlmasına ve en sonunda ray kırılmasına neden olur. Bu kusur hızlı hatlarda (160-200 km/sa) ile dingil yükü fazla ve düşük hıza sahip hatlarda görülmektedir.

Ray yorulması kara noktalar dışında iki farklı hataya da neden olur.

- Kabuklanma: Kırılmalara neden olan önemli bir sorundur.
- Yontulma: Özellikle kurpların dış rayında 3-5 mm aralıklarla, hareket yönüne göre 45° açıda ince paralel çatlaklar başlangıcıdır.

Bunlar daha sonra rayın yanal çatlmasına neden olur.

Ray profilinin taşlanması ile ray mantarı üzerinde oluşan mekanik özelliği zayıflamış ve karbonu kaybolmuş tabaka temizlenmiş olur. Ray yüzeyinden 0,3 mm'lik bir tabaka kaldırılarak kara nokta oluşması önlenmiş olur. Bu amaçları sağlamak için taşlama pas sayıları, taşların açıları ve tipi ile makinenin hızı en uygun şekilde ayarlanır. Fransız çelik endüstrisi ray kabul aşamasında karbonize olmuş rayları kontrol ederler. Ray yüzeyinden 0,5 mm derinlikte tanecikli ferrit yapının olması kabul edilmez [34].



Şekil 6. 2. Ray taşlama taşı.

Etkin bir koruyucu taşlama programı, rayın ömrünün arttırılması ve rayın ömrü boyunca durumunun iyileştirilmesinin sağladığı gibi ray taşlama faaliyetleri nedeniyle oluşan aşınma ve diğer bakım faaliyetlerine ilişkin giderler arasında bir denge sağlar. Burada amaç, bir yandan emniyeti sağlarken, diğer taraftan da raydan azami ekonomik ömrün elde edilmesidir. Yeni demiryolu hatları işletmeye alındıktan sonra en geç 6 ay içerisinde koruyucu taşlama yapılmalıdır.

Demiryolu hattında makineli tamiratların bitmesine müteakip, ray taşlama işlemi yapılacak ve taşlama işleminden sonra tamirat makineleri ile taşlama yapılan bölgede hat üzerinden 100 bin ton yük geçmesine kadar tamirat yapılmayacaktır. Yeni hatlarda koruyucu taşlamada ortalama 0,3 mm metal kaldırması yapılacaktır.

6.1.2. Düzeltici Taşlama

Düzeltici taşlama, programlanmış koruyucu taşlama faaliyetlerinin bir parçası olmayan taşlama işlemidir. Genellikle muayeneler sırasında tespit edilen ve derhal müdahaleyi gerektiren ray kusurlarının giderilmesinde bu yöntem başvurulur. Bu yöntem ile geometrik düzensizlikler, örneğin ciddi durumdaki kısa dalga boylu ondülasyonlar, derin kısa dalgalanmalar ve yanal profil deformasyonları yok edilir.

Taşlama işlemi, muayeneler dışındaki gözlemler, boyuna ray profilinde trenlerin geçişi sırasında aşırı gürültüye veya seyahat kalitesinin düşmesine neden olan değişimler nedeniyle tetiklenir. Taşlama makinesindeki taşların raya olan temas açısının iki etkisi vardır. Ray mantarının küçük yarıçaplı iç ve arka köşelerinde taşlama taşı yuvarlanma yüzeyine göre çok daha fazla metal taşlar. Temas alanı daha az olduğu için değme basıncı daha fazla olacaktır ve taşlama çalışması daha etkin olmaktadır. Taşlama taşının basıncı çok önemlidir. En iyi sonucu almak için basınç sabit kalmalıdır. Tüm dalga oluşumları taşlama ile tamamen temizlenmelidir. Temizlenemeyen dalgalar daha sonra büyüyerek ondülasyonların oluşumunu daha hızlı gerçekleştirir.



Şekil 6.3. Örnek taşlama öncesi ve sonrası ray yüzeyi.

6.1.3. Önleyici Taşlama

Kusurların ciddiyetini belirlemek için bir ölçüm çalışması yoktur. Ölçümlerle tespit edilemeyen kusurlar için başka parametreler kullanılır. Örneğin yüzey yorulması

sadece tahribatsız muayene ile fark edilebilir. Bu durumda yorulmuş tabaka milyon gros tonla (MGT) ifade edilen belli bir tonajdan sonra taşlanır. Bu tip periyodik bir taşlamaya önleyici taşlama adı verilir [7].

Yeni yapılan ve yol yenileme işlemi gören hatlarda üretim sonrası oluşan dekarbürize tabakayı kaldırmak amacıyla taşlama işlemi yapılır. Yaklaşık 0,5 mm derinliğinde olan bu tabaka ray çeliğinin sertliğini taşımamaktadır. Trenlerin konforlu ve emniyetli seyirleri için bu tabakanın taşlama ile kaldırılması gerekmektedir. Bu işleme profil uyumlaştırma taşlaması da denmektedir.

6.2. FREZELEME

Raydan taşlamaya göre daha malzemenin kaldırılması gereken durumlarda frezeleme yapılır. Freze yapılma sebepleri;

- Yıpranmış bir ray profilinin standart profile getirilmesi,
- Büyük ray yüzeyi kusurlarının giderilmesi için,

Frezeleme, kusurun düzeltilmesi için zaman ve maliyet açısından çok fazla sayıda taşlama yapılması gerektiren durumlarda tercih edilmelidir. Raya frezeleme işlemi son derece etkilidir ve bazı durumlarda, yüksek taşlama maliyeti nedeniyle kullanılmayacak hale gelmiş olan rayların tekrar kullanılması için frezeleme yapılır.

6.2.1. Ray İşlemenin (Taşlama ve Frezeleme İşleminin) Yaraları

- Gerekli enine profilin elde edilmesi ve konikliğin kontrol edilerek tekerlek-ray temas yüzeyinde kuvvetlerin azaltılması için ray mantarına doğru kuvvetlerin düzenli ve sürekli dağılımını sağlamak,
- Ekartman köşesi ve ray omzu üzerindeki temas gerilimi azaltan, enine profilin elde edilmesi,
- Kaynak bölgelerinde oluşan kusurların giderilmesi,
- Temas yorulması çatlaklarına neden olan veya neden olması muhtemel yorulma kusuru söz konusu olan ray yüzeylerindeki kusurların giderilmesi,

- Ondülasyon oluşumunun ve gelişiminin kontrol altına alınması için rayın boyuna profilinin kontrol altına alınması.

6.3. YAĞLAMA

Ray tekerlek ilişkisinde sürtünme, araç frenlemesinde, aşınma ve ray-tekerlek teması sonucunda yorulma hasarında, tekerlek ve ray kusurlarının oluşmasında, taşımacılığın gerçekleşmesinde ve aderans dediğimiz ray teker tutunması olayında önemli rol oynamaktadır.

Tüm Dünya demiryolu kuruluşları; ray ve tekerlek aşınmasını kontrol etmek, kurb yanal kuvvetlerini azaltmak ve trenin enerji (yakıt) tüketiminde önemli tasarruflar elde etmek amacıyla demiryollarında uzun yıllardır ray-tekerlek temas yüzeyine yağlama işlemi uygulanmaktadır. Bu yağlama işlemi genellikle yol kenarındaki yağlayıcılar vasıtasıyla veya araç üstü kullanılan sistemler ile boden ve tekerin yuvarlanma yüzeyi yağlanarak yapılmaktadır.

Demiryollarında zamanla taşınan yük miktarını (tonajını) artırmak için artan aks yükleri ve verimlilik gereksinimleri, ray ve tekerlek aşınmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Tarihsel süreçte aks yükleri ve tren kütlesi arttıkça yağlamanın önemi artmıştır. Ekipman teknolojisindeki gelişmeler ray ömrünün artırılmasında, ray aşınmasının azaltılmasında ve bakım gereksinimlerinde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Hat kenarı yağlama ve araç üstü yağlamanın etkin kullanımı ile aşınma, gürültü, titreşim ve enerji tüketiminde azalma olduğu gibi demiryolunda tekerlek ve ray ömrü uzatılmaktadır.

Demiryolu taşımacılığına etki eden faktörler; ray/tekerlek profili, geometrisi ve yüzey durumu, taşıt dinamiği ve hareketi, kullanılacak yağın akışkanlığı ve yağlama kapasitesi, çalışma sıcaklığı, sıcaklık, nem, yağış gibi çevresel iklim şartları, yağın kullanma özellikleri, tekerin patinaj ve tırmanma hareketi olarak sıralanabilir. Yağlama sistemlerinin kullanım yerindeki taşımacılık şartları, iklim şartları ve yol durumu göz önünde bulundurularak elde edilecek verilerle performanslar denenerek

belirlenebilir. Yağlama sırasında kullanılan yağ performansının değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda belirtilmiştir.

- Pompalanabilirlik için uygun çalışma sıcaklığı,
- Yüksek kalıcılık veya bozulma süresi,
- Taşıma mesafesi (uzun olmalı),
- Akma noktası (düşük olmalı),
- Damlama noktası olarak uygun sıcaklık,
- Katkı maddeleri ve aşınma direnci,
- İyi yağlama kapasitesi,
- İyi tutunma ve gerekli sürtünmeyi sağlama,
- Suya karşı direnci,
- Farklı uygulama teknolojilerine uygunluk,
- Kimyasal kararlılık ve çözünme,
- Tıkanmaya karşı iyi performans
- Biyolojik bozunma ve teoksisite.

Literatür araştırmalarında; araç üstü boden yağlama ve hat kenarı yağlama konusunda birçok deneysel çalışma yapıldığı görülmüş ve bu çalışmalardan edinildiği üzere demiryollarında etkin şekilde yağlamanın faydaları aşağıda belirtilmiştir.

Etkili yapılacak hat kenarı ray yağlaması ve araç üstü tekerlek boden yağlaması aşınma oranını azaltarak hem tekerin hem de rayın ömrünü uzatır. Ayrıca;

- a. Tekerlek / ray etkileşimi ile ilişkili olarak yakıt/enerji tüketimini azaltır.

Transportation Technology Center Inc (TTCI USA) kuruluşu yaptığı çalışmada;

- i. Hat kenarı yağlayıcı kullanılması ile %15,
- ii. Sadece tekerlek yüzeyi yağlaması ile %39,
- iii. Teker yüzeyi ve boden yağlamasının birlikte uygulanması ile %65 enerji tasarrufu sağlandığı yer almaktadır.

- iv. Kuru hava şartlarında yapılan iyi bir yağlama ile yakıt tüketiminde %30'luk bir tasarruf sağlandığı,
- v. Dar yarıçaplı kurpların olduğu hat üzerinde %5-15 arasında yakıt tüketiminde tasarruf sağlandığı gösterilmiştir.
- vi. Amerika Birleşik Devleti Ulusal Demiryolu kuruluşu tarafından yapılan tekerlek yüzeyi yağlama sisteminde;
- vii. Tren yüklü iken %10,2 boşta iken %5,2, ortalamada ise %7,7'lik bir enerji tasarrufu sağlandığı ampirik olarak gösterilmiştir. [35] Güney Afrika Cumhuriyeti'nde Spoornet firmasının yaptığı araştırmada;
- viii. 200 m kurp yarıçapında teker ve rayda yağlama yapıldığında %51'lik bir enerji tasarrufu olduğu,
- ix. Güney Afrika Cumhuriyeti'nde Richards Bay Coal hattında yapılan çalışmada;
- x. Teker ve rayda yapıldığında %28'lik bir enerji tasarrufu olduğu belirtilmektedir.

b. Tekerlek / ray etkileşimi ile ilişkili olarak gürültü azalır.

c. Bakım zaman aralığını artırır. Kanada pasifik demiryolu şirketinin yaptığı bir araştırmada;

- i. Ray aşınmasını azalttığı; hat kenarı yağlama sistemi taşlama periyodunu önleyerek, kenar aşınmasında %80 ve mantar üst yüzeyi aşınmasında %50 iyileştirme sağladığı,
- ii. Travers ve ray bağlantı eleman hasarlarının azaltıldığı,
- iii. Yanal kuvvetleri azaldığı,
- iv. Tren enerji tüketiminin azaldığı,
- v. Tekerlek ömrünü uzattığı görülmüştür [36].

Tekerlek ve ray arasındaki metal teması sonucu oluşan yüksek düzeyde aşınma, aşırı ses ve konfor kaybını engellemek için yağlama sistemleri geliştirilmiştir. Raylar açıkta çalışan ve dinamik yüke maruz kalan elemanlardır.

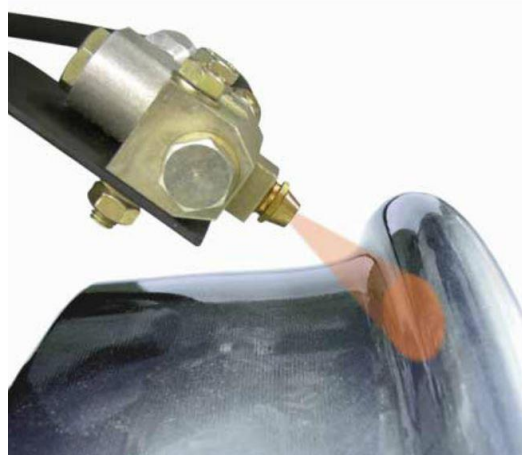
Boden tekerleğin en çok aşınan kısmıdır. Özellikle kurb (Viraj) bölgelerinde trenin bütün yükü boden üzerinden raya yaslanır. Boden ne kadar iyi yağlanırsa tekerleğin ömrü o kadar uzun olacaktır. Bodeni aşınan bir tekerleğin tornası sırasında normal

tornalamaya göre yaklaşık olarak 3 kat fazla talaş alınır. Sayısal bir örnek vermek gerekirse boden kalınlığı 32 mm olması gereken bir tekerleğin ölçümde aşınma sonucu boden kalınlığının 28 mm'ye düştüğünü varsayalım. Boden kalınlığını tekrar 32 mm'ye çıkarmak için çaptan yaklaşık olarak 12 mm düşmemiz gerekecektir. Ayda 1 mm aşınan bir tekerlek için bu şu anlama gelir; Tekerleğin ömrü bodenin incelmesi sonucu yaklaşık olarak 12 ay kısalmaktadır.

6.3.1. Boden Yağlama Teknikleri

6.3.1.1. Sıvı Yağ ile Direkt Yağlama

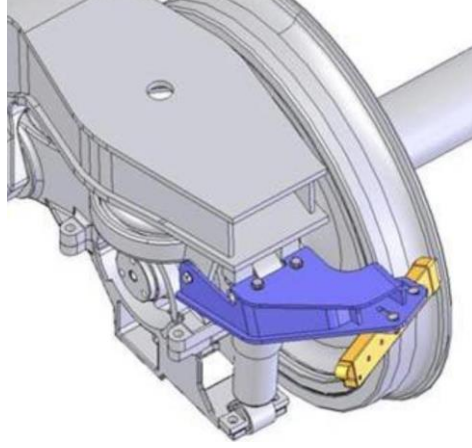
Hava, yağı çok ince bir tabaka hâlinde yaklaşık 8 saniye süreyle nodüllerden püskürtür. Püskürtme süresinde, boden yüzeyine yapışan yağ, bodenin rayla temasından dolayı rayı yağlar ve arkadan gelen tekerleklerin bodenlerini de ray vasıtası ile yağlayarak aşınmaları önler. Yağın tekrar püskürtülmesi gidilen mesafeye ve demiryolu hattının durumuna bağlı olarak değişmektedir. Kurplu yollarda 2 sn. aralıklarla yağlama yapılır. Bu süre toplam 5 dakikayı geçmez. Ayrıca lokomotifin hızı 9 km/h altına düşerse yağlama sistemi otomatik olarak devre dışı kalmaktadır. Hız 9 km/h üzerine çıkınca sistem kendi kendine çalışmaya başlamaktadır. Lokomotif markizinde bulunan arıza ihbar, yağ seviyesi ihbar ve sistem devrede işaretleri ile cihazın durumu takip edilir ve bir buton vasıtası ile cihazın çalışması test edilir.



Şekil 6.4. Araç üstü yağlama ekipmanları.

6.3.1.2. Yağlama Çubuğu ile Yağlama

Burada çubuk halindeki katı yağlayıcı, hareketli tekerlek flanşına bastırılır. Bu sistem günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan bir sistem değildir.



Şekil 6.5. Katı yağlayıcı ile yağlama modeli.

6.3.1.3. Endirekt Yağlama

Raylar sabit olarak yağlanır. Buradaki işlem raya sabit bir şekilde tutturulan sensör ile üzerinden kaç tane aks geçtiğini sayabilen ve bu sayıya göre yağlama periyodunu ayarlayabilen sistemdir. Üzerinden geçen trenin bodeni yağı raydan alır.



Şekil 6.6. Sabit yağlama sistemi.

Tüm sistemlerde kullanılan en önemli sistem elemanı yağdır ve yağların seçimi çok önemlidir. Kullanılacak yağların özellikleri;

- Doğada çözünebilme,
- Sürtünmeyi azaltma,
- Sesi azaltma,
- Aşınmayı azaltma,
- Enerji tasarrufu sağlama,
- Çalışma sıcaklığı -45 °C ile +120 °C arasında olmalı
- Yağın iletkenliği sinyalizasyon sistemine uygun olmalı,
- Sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışında yanma özelliği olmamalı,
- Ray yüzeyinde film tabakası oluşturacak özellikte ve özel metal uyumu sayesinde yüksek taşınabilirlik kabiliyetinde olmalı,
- Bakım aralıklarını arttırarak genel bakım maliyeti düşürmelidir.

BÖLÜM 7

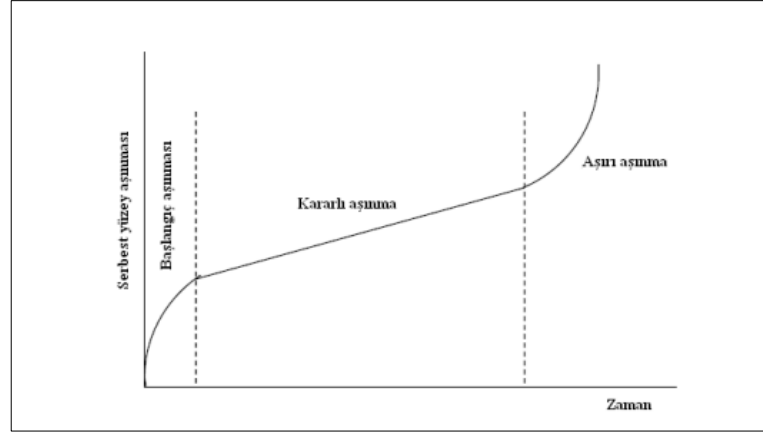
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Deneyin yapıldığı kontrol alanı Çiğli – Menemen istasyonları arası km: 26+400 - 26+500 arasında seçilmiştir. Bu bölgenin seçilme sebebi hattın yol yenileme çalışmaları 25.07.2019 tarihinde yapılmış olması, kurpta bulunmaması ve ana hat (hattı cari) olmasıdır. İlk ölçüm 19.12.2019 tarihinde alınmıştır. Buradaki 100 metre 11 eşit parçaya bölünerek her 10 metrede bir eşdeğer koniklik ve ray profili ölçümü 2 ayda bir alınarak hattın ortalama eşdeğer koniklik değerini ve zaman içerisinde raydaki aşınmaları karşılaştırarak analiz edilmiştir.

Çizelge 7.1. Eşdeğer koniklik değerinin ölçüm tarihleri ve sonuçları.

Nokta	19.12.2019	11.02.2020	14.04.2020	21.07.2020	22.09.2020	13.11.2020	20.11.2020
1	0,31	0,31	0,3	0,26	0,24	0,26	0,2
2	0,29	0,32	0,31	0,27	0,26	0,25	0,22
3	0,31	0,28	0,28	0,23	0,25	0,26	0,23
4	0,3	0,29	0,25	0,21	0,26	0,24	0,21
5	0,3	0,3	0,27	0,23	0,25	0,28	0,21
6	0,3	0,27	0,24	0,24	0,2	0,23	0,21
7	0,28	0,31	0,28	0,27	0,25	0,26	0,19
8	0,26	0,26	0,24	0,24	0,25	0,26	0,22
9	0,33	0,28	0,29	0,29	0,28	0,27	0,19
10	0,3	0,31	0,25	0,26	0,24	0,22	0,18
11	0,32	0,28	0,25	0,24	0,21	0,22	0,21
Ort.	0,3	0,291818	0,269090	0,249090	0,244545	0,25	0,206363

Yapılan bu çalışmada 1 sene boyunca yapılan ray profili aşınma ölçümleri sonucunda rayın tekerleğe göre zaman içerisinde temas noktasını iyileştirici bir aşınma davranışı gösterdiği görülmüştür. Ancak yol yenileme çalışması yakın zamanda yapıldığı için bu aşınma davranışı aşınma zaman grafiğindeki 1. evre olan başlangıç (rodaj) evresidir. Bir sonraki aşama olan kararlı aşınmadan itibaren aşınma hızı ve miktarının zaman içerisinde ivmeli bir şekilde artacağı bilinmektedir.



Şekil 7.1. Aşınma Zaman Grafiği [37].

Bu periyodik ölçümü alınan hattın üzerinden senede yaklaşık 60 milyon ton yük geçmektedir ve demiryollarında kullanılan hat bakım el kitabına göre alıyman hatlarda 60 milyon ton yük geçtikten sonra ray taşlama işlemi yapılması gerekmektedir. Kararlı aşınma evresinde ray profilinde negatif etkili aşınma meydana gelecek olup bu durum ray tekerlek ilişkisini olumsuz yönde etkileyecek ve eşdeğer koniklik değerini hat kriterlerine göre optimum seviyenin üzerine çıkaracaktır. Bu sebepten koruyucu ray taşlama işlemi yaklaşık 1 sene sonra yapılmış ve eşdeğer koniklik değeri optimum seviyeye getirilmiştir. Bu tarihten itibaren eşdeğer koniklik değeri göz önünde bulundurularak her 60 milyon ton yük geçişinden sonra taşlama işleminin yapılması gerekmektedir.

Yapılan bu çalışma sonucunda zaman içerisinde elde edilen ölçümlerden bir veri oluşacak ve bu veriler neticesinde bakım planları belirlenecektir. Bu sayede periyodik veya anlık yapılan bakım çalışmalarından ziyade önleyici bakım çalışmaları oluşturulacaktır. Bu sayede yol yenileme işlemi veya sadece ray yenileme işlemi yapılan yerlerde elde edilen verilere bakılarak hat üzerinde yorum yapabilmek ve oluşabilecek bazı kusurları henüz başlamadan gidermek mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Berkmen, E., “Demiryollar”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul (1944).
2. Profillidis, V., “Railway Engineering”, *Ashgate Publishing Company*, Brokfield (1995).
3. Saarna, M. and Laanso, A., “Rail and rail weld testing”, *4th Internatinal DAAAM Conference* (2004).
4. Cannon, D. F., Edel, K. O., Grassie, S. L., and Sawley, K., “Detection of defect in rails by means of guided waves”, *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*, 865-887 (2003).
5. Elkhoury, N., Hitihamillage, L., Moridpour, S. and Robert, D., “Degradation prediction of rail tracks: a review of the existing literatüre”, *The Open Transportation Journal*, 12:88-104 (2018).
6. İnternet: Bilgiç, Ş., “Demiryolu”, <https://web.ogu.edu.tr/Storage/akalin/Uploads/demiryolu-dersnotu-1-2017.pdf> (2021).
7. Arlı, V., “Demiryolu Mühendisliği”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul (2015).
8. Schilke, M., “Degradation of railway rails from a materials point of view”, PhD Thesis, *Department of Materials and Manufacturing Technology Chalmers University Of Technology*, Göteborg (2013).
9. Kumbasar, F., “Üstyapı ve Demiryolu Mekaniği”, *Gürsoy Matbaacılık Sanayii*, Ankara (1972).
10. Lichtberger, B., “Track Compendium; Formation, Permanent Way, Meintenance”, *Eurail Tetzlaff-Hestra GmbH & Co*, Hamburg (2005).
11. Deveci, A., “Tekerlek-Ray Etkileşimi”, Konya (2018).
12. İnternet: “Demiryolu Hat Açıklığı”, https://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu_hat_açıklığı (2021).
13. Arlı, V. ve Öztürk, Z., “Ray-Tekerlek İlişkisi”, *İstanbul Ulaşım A.Ş.*, İstanbul (2009).

14. Iwnicki, S., Spiriyagin, M., Cole, C. and McSweeney, T., “Handbook of Railway Vehicle Dynamics”, *CRC Press*, ABD (2020).
15. Jussel, D. D., “Temas Geometrisi ve Eşdeğer Koniklik” (2010).
16. Günel, E., Biçer, U. ve Kara, G., “Demiryolu işletmeciliğinde eşdeğer konikliğin önemi” (2012).
17. Ferrara, R., “A numerical model to predict train induced vibrations and dynamic overloads”, *University of Montpellier* (2014).
18. TCDD, “Ray-tekerlek aşınmaları araştırma raporu”, *TCDD*, Ankara (1999).
19. Wickens, A., “Fundamentals Of Rail Vehicle Dynamics”, *Master E-book*, ISBN 0-203-97099-3 (2005).
20. Rajanna, S., Shivanand, H. K. and Akash Deep B. N., “World Academy of Science”, *Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* (2009).
21. Polach, O., “Wheel Profile Design for The Targeted Conicity and a Wide Contact Spreading”, *8th International Conference n Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009)*, Firenze (2009).
22. Fujie, X., Zhan, F. and Zhang W., “On the complete theory of geometrical contact between wheels and rails”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 8 (2000).
23. Agin, O., “Hızlı tren hatlarında yeni ray profili”, *Demiryolu Mühendisliği*, 6(27): 27-33 (2017).
24. İnternet: Arslan, E., “Eşdeğer Konikliğin Elle Ölçülmesi”, <https://elvanarslanet.wordpress.com/2021/06/24/esdeger-konikligin-elle-olculmesi/> (2021).
25. Gerlici, J., Domin, G., Cherniak, G. and Lack, T., “Calculated estimation of railway wheels equivalent conicity influence on critical speed of railway passenger car”, *MATEC Web of Conferences* (2018).
26. Trilla, A. and Cabre, X., “Determining the Equivalent Conicity for Railway Wheelset”, *Annual Conference of The Prognostics and Health Management Society*, Barcelona (2018).
27. Zacher, M., Grabner, G., Nicklisch, D., Polach, O. and Eickhoff, B., “A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails”, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 1-19 (2015).
28. İnternet: Alias, J., “Merkmale der Wellenförmigen Abnutzung der Schinen”,

<https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/schienen/verschleiss-und-schienenfehler> (2021).

29. İnternet: “U.S Departman Of Transportation”, <https://www.fra.dot.gov> (2021).
30. Keskin, A., Yayla, K., Ünal, S., Tulumtaş, H., Serdar, O. ve Sütöğlü, A., “Ray Teker Aşınması”, *TCDD* (2018).
31. Özdemir, K. ve Çakır, M., “Kesme parametrelerinden başlangıç aşınmasına etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Emre YİĞİT, ilk, orta ve lise öğrenimini Ordu, Batman, Konya ve Osmaniye olmak üzere farklı şehirlerde tamamladı. 2012-2017 yıllarında Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2018 yılında TCDD Alsancak Demiryolu Bakım Müdürlüğü'nde Mühendis olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaktadır.