



**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA RAY
TAŞLAMA YÖNTEMİYLE YENİDEN
PROFİLLENDİRİLEREK RAYIN KULLANIM
ÖMRÜNÜN UZATILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

Eskişehir 2025

**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA RAY TAŞLAMA YÖNTEMİYLE
YENİDEN PROFİLENDİRİLEREK RAYIN KULLANIM ÖMRÜNÜN
UZATILMASI**

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper UĞUR)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Durmuş Furkan ÇÖMEZ'in YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA RAY TAŞLAMA YÖNTEMİYLE YENİDEN PROFİLLENDİRİLEREK RAYIN KULLANIM ÖMRÜNÜN UZATILMASI başlıklı çalışması 30/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Üye

: Dr.Öğr.Üyesi Fatih BOZKURT

Üye

: Dr.Öğr.Üyesi Kadir Berkhan AKALIN

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

30/06/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ęrencisi Durmuş Furkan ÇÖMEZ, YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA RAY TAşLAMA YÖNTEMİYLE YENİDEN PROFİLENDİRİLEREK RAYIN KULLANIM ÖMRÜNÜN UZATILMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

ÖZET

YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA RAY TAŞLAMA YÖNTEMİYLE YENİDEN PROFİLENDİRİLEREK RAYIN KULLANIM ÖMRÜNÜN UZATILMASI

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2025

Danışman: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper UĞUR)

Bu çalışmada, yüksek hızlı tren raylarında yapılan makina ile taşlama işleminin etkinliği incelenmiştir. Taşlama işlemi, ray yüzeyindeki düzensizlikleri gidermek, aşınmayı kontrol altına almak ve tekerlek-ray etkileşimini optimize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Taşlama işleminin doğruluğunu ve başarısını değerlendirmek için DQM, RMF ve Wilmec cihazlarıyla yapılan ölçümler kullanılmıştır. DQM cihazı ile rayın enkesit profili ve mevcut aşınma durumu belirlenmiş, RMF cihazı ile ray yüzeyindeki ondülasyonlar ölçülmüş ve Wilmec cihazı ile taşlama sırasında kaldırılan metal miktarı hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler, makina ile taşlama işleminin büyük ölçüde başarılı olduğunu ve ray yüzeyindeki düzensizliklerin önemli oranda giderildiğini göstermektedir. Ancak, bazı bölgelerde daha hassas düzeltmeler gerektiği tespit edilmiş ve bu alanlarda elle taşlama yapılmıştır. Son olarak, elle taşlama işlemi sonrasında Railstraight Wave cihazı ile yapılan ölçümler, taşlama işleminin başarılı olduğunu ve ray yüzeyinin ideal profile yaklaştığını doğrulamıştır. Bu çalışma, makina ile taşlamanın yüksek hızlı tren hatlarında etkili bir bakım yöntemi olduğunu ve gerektiğinde elle taşlama ile desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Yüksek hızlı tren, Makine ile taşlama, Elle taşlama, Ray Kusurları.

ABSTRACT

EXTENDING THE LIFESPAN OF HIGH-SPEED RAILWAYS BY RE-PROFILING WITH THE RAIL GRINDING METHOD

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

Department of Railway System Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömür AKBAYIR

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Alper UĞUR)

This study investigates the effectiveness of machine grinding on high-speed train rails. The grinding process was carried out to eliminate surface irregularities, control wear, and optimize the wheel-rail interaction. To assess the accuracy and success of the grinding process, measurements were taken using DQM, RMF, and Wilmec devices. The DQM device was used to determine the cross-sectional profile and existing wear condition of the rail, the RMF device measured the rail surface undulations, and the Wilmec device calculated the amount of metal removed during the grinding process. The measurements indicate that the machine grinding process was largely successful and that significant surface irregularities were eliminated. However, in some areas, more precise adjustments were required, and manual grinding was performed in those regions. Finally, measurements taken with the Railstraight Wave device after the grinding process confirmed that the grinding was successful and that the rail surface closely approached the ideal profile. This study demonstrates that machine grinding is an effective maintenance method for high-speed railways and, when necessary, should be supported by manual grinding.

Keywords: High-speed train, Machine grinding, Manual grinding, Rail defects.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve rehberliğiyle akademik gelişimime değerli katkılarda bulunan, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ömür AKBAYIR'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin yönlendirmeleri, yapıcı eleştirileri ve akademik birikimi bu çalışmanın şekillenmesinde belirleyici olmuştur.

Çalışmalarımın yürütülmesi sürecinde gerekli altyapı ve teknik desteklerin sağlanmasında katkıda bulunan, mensubu olmaktan onur duyduğum T.C. Devlet Demiryolları (TCDD) kurumuna ve katkı sunan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, sabır ve anlayışlarıyla manevi desteğini esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Durmuş Furkan ÇÖMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
GÖRSELLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Ray Taşlama Süreciyle İlgili Teorik ve Model Yaklaşımlar	3
1.2. Literatür Taraması	7
1.3. Demiryolu Bakımı	10
1.3.1. Önleyici bakım.....	11
1.3.2. Düzeltici bakım.....	12
1.3.3. Yenileme.....	13
1.4. Ray Taşlama	14
1.4.1. Yüzey kusurlarının kontrolü.....	16
1.4.2. Profil taşlama süreçleri ve uygulama teknikleri	22
1.5. Ray Yorgunluğunu Kontrol Etmek İçin Profil Taşlama.....	24
1.6. Taşlama Yöntemi ile Ray Aşınmasının Azaltılması.....	25
1.7. Ray Taşlamada Yağlama İşlemi	26
1.8. Profil Taşlamanın Faydaları	27
1.9. Profil Taşlamasında Karşılaşılan Sorunlar	28

2. YÖNTEM	29
2.1. Loram Rgi 8 Ray Taşlama Makinesi.....	29
2.2. Mecno Service Ms20s.....	30
2.3. RGH 20 C Model Taşlama Makinesi	31
2.4. DQM.....	32
2.5. RMF.....	33
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	38
3.1. Ray Kusurlarını Değerlendirme	38
3.2. RMF Ölçümleri Değerlendirme.....	42
3.3. DQM Cihazı Ölçün Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49
3.3.1. Taşlama öncesi dqm ölçümleri.....	49
3.3.2. Taşlama sonrası dqm ölçümleri.....	52
3.4. Wilmec ETM Cihazıyla Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	58
3.5. Makine Taşlama Sonucu Genel Değerlendirme.....	62
3.5.1. Yol yüzeyi taşlama izleri.....	63
3.5.2. Pürüzlülük	65
3.6. Ek Taşlama İhtiyacı Olan Bölgelerde Elle Taşlamalar	66
3.6.1. Elle taşlama işlemi sonrası analiz	68
3.6.2. Yol yüzeyi eğim değişikliklerinin değerlendirilmesi	71
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKÇA.....	78
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Koruyucu taşlama periyodu (TCDD, 2013)	16
Tablo 3.1. RMF taşlama öncesi durum	43
Tablo 3.2. RMF taşlama sonrası durum	47
Tablo 3.3. DQM sağ ray ölçümleri	55
Tablo 3.4. DQM sol ray ölçümleri	56
Tablo 3.5. Wilmec ETM cihazı sağ ray taşlama öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları	59
Tablo 3.6. Wilmec ETM cihazı sağ ray metal kaldırma ölçüm sonuçları	59
Tablo 3.7. Wilmec ETM cihazı sol ray ön ve arka ölçüm sonuçları	60
Tablo 3.8. Wilmec ETM cihazı sol ray metal kaldırma ölçüm sonuçları	60
Tablo 3.9. Taşlama öncesi ölçümler	72
Tablo 3.10. Taşlama sonrası ölçümler	72
Tablo 3.11. Eğim değişikliklerinin yüzey düzeltme etkinliği üzerindeki etkisi	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ray Profili (Cannon & Pradier, 1996).....	22
Şekil 2.1. Enine profil ölçümleri ve rayın profilendirilmesi	33
Şekil 3.1. RMF taşlama öncesi(a) ve sonrası(b) ray profil grafikleri	45
Şekil 3.2. RMF taşlama öncesi ve sonrası karşılaştırma	48
Şekil 3.3. DQM taşlama öncesi ölçümler	50
Şekil 3.4. DQM taşlama sonrası ölçümler	53
Şekil 3.5. 3.bölgede alınan taşlama öncesi ve sonrası karşılaştırma	56
Şekil 3.6. Ray taşlama öncesi ve sonrası aşınma profili.....	57
Şekil 3.7. Ray taşlama sonrası ölçüm	61
Şekil 3.8. Ray yüzeyi pürüzlülük ölçümü.....	65
Şekil 3.9. Ray profili elle taşlama öncesi ve sonrası ölçüm (a-b-c)	69

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1.1. Ray tekerlek temasına bağlı yüzey çatlakları	14
Görsel 1.2. Ray taşlama araçları	15
Görsel 1.3. Kusur türleri (Başaran, Akbayır , Fidan, Sertsöz, & Öztürk, 2024).....	16
Görsel 1.4. Ray yüzey kusurları örnekleri	18
Görsel 1.5. Ray profil taşlama işlemi	21
Görsel 2.1. LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi (Loram, 2023)	30
Görsel 2.2. Mecno Service Ms20s (Mecno Service, 2023).....	31
Görsel 2.3. RGH 20 C model taşlama makinesi (railway, 2024).....	32
Görsel 2.4. Ölçüm cihazları (Daimler, 2017) (Vogel & Plötscher, 2025)	36
Görsel 3.1. Patinaj kusuru	38
Görsel 3.2. Pullanma ve mikro oyuklar	39
Görsel 3.3. Mikroskobik yorulma	39
Görsel 3.4. Ray yüzeyindeki çizilmeler	40
Görsel 3.5. Metal kayıpları ve ezilmeler	40
Görsel 3.6. Squat kusuru	41
Görsel 3.7. Kabuk atma.....	41
Görsel 3.8. Soğuk yaralanma	42
Görsel 3.9. Taşlama sonrası çizgisel kusur ve ondülasyonun giderilmesi	62
Görsel 3.10. Taşlama sonrası mikro oyuklar ve pullanma kusuru giderilmiş.....	62
Görsel 3.11. Taşlama sonrası ray profili taşlama izleri ölçümleri	64
Görsel 3.12. Pürüzlülük ölçümleri	66
Görsel 3.13. Taşlama öncesi dijital derinlik ölçüm.....	67
Görsel 3.14. Taşlama sonrası dijital derinlik ölçüm	67
Görsel 3.15. Elektronik master ölçüm cihazı ve ölçüm	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
BA	: Kahverengi Ergitilmiş Alümina
DQM	: Dynamic Quality Measurement
DBM	: Demiryolu Bakım Müdürlüğü
ETM-01-02	: Avustralya Demiryolu Taşlama Standardı
Km	: Kilometre
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
RMF	: Rail Measurement Framework
SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
YHT	: Yüksek Hızlı Tren
ZA	: Zirkonyum Alümina
%	: Yüzde

1. GİRİŞ

Son yıllarda, özellikle yüksek hızlı trenler için demiryolu altyapısının bakımı, emniyetli ve verimli ulaşım sistemlerine duyulan artan talep nedeniyle önemli bir konu haline gelmiştir. Çeşitli bakım teknikleri arasında, ray taşlama işlemi, rayların bütünlüğünü korumak, sürüş konforunu iyileştirmek ve hem ray hem de tekerlek aşınmasını azaltmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Taşlama işlemi, yüzeydeki düzensizlikleri ortadan kaldırmak, ray profili hatalarını düzeltmek ve tekerlek-ray etkileşimini optimize etmek amacıyla yapılmaktadır; bu da yüksek hızlı demiryolu için oldukça önemlidir.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya ilişkin teorik çerçeve ve literatür taramasından sonra demiryolu bakımı ile ilgili genel bir bakış sunulmaktadır. Demiryolu bakımının genel anlamı ve süreçleri, bakım türleri, bakım stratejilerinin önemine dair bilgiler verilmiştir. Önleyici bakım, düzeltici bakım ve yenileme gibi bakım türleri hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir. Ray taşlama süreci ve taşlama yöntemleri ile ilgili detaylar sunulmuştur. Bu bölümde, ray taşlama işleminin amacı, yüzey kusurlarının kontrolü, profil taşlama teknikleri, ray şekillendirme ve tekerlek-ray etkileşiminin yönetimi gibi konulara derinlemesine değinilmiştir. Ayrıca, taşlama işlemiyle ray yorgunluğunun kontrol edilmesi ve aşınma oranlarının azaltılması gibi konulara da açıklık getirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde yöntem kısmı yer almaktadır. Bu bölümde taşlama işlemi için kullanılan ekipmanlar detaylı olarak anlatılmıştır. Bu kapsamda ele alınan ekipmanlar; LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi, Mecno Service Ms20s, RGH 20 C model taşlama makinesi ile DQM, RMF ve Wilmec cihazları şeklindedir. Söz konusu taşlama makinelerinin özellikleri görsellerle desteklenerek sunulmuştur.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise bulgular kısmı yer almaktadır. Bu bölümde, makina ile yapılan taşlama işlemine ait bulgular, yapılan ölçümler ve cihazlar üzerinden detaylı değerlendirmeler yapılmıştır. RMF ölçüm sonuçları, DQM cihazı ölçüm sonuçları, Wilmec ETM cihazı ölçüm sonuçları gibi başlıklar altında taşlama işlemi öncesi ve sonrası yapılan ölçümler karşılaştırılmıştır. Bu ölçümlere dayanarak taşlama işleminin etkinliği detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, bazı bölgelerde daha hassas taşlama gereksinimi olduğunda elle taşlama işlemi yapılmış ve bunun sonuçları raporlanmıştır. Sonuç kısmında ise, yapılan çalışmaların genel değerlendirmesi ve bu çalışmanın önerileri yer almaktadır.

Bu çalışma, yüksek hızlı tren (YHT) raylarında yapılan makina taşlama uygulamasına odaklanmış olup, taşlama işleminin etkinliğini çeşitli ölçüm teknolojileri ile detaylı bir şekilde incelemektedir. Taşlamanın başarısını değerlendirmek amacıyla, DQM, RMF, Wilmec ve pürüzlülük ölçüm cihazlarıyla yapılan ölçümler kullanılmıştır.

Bu ölçümler, rayın profilini, yüzey ondülasyonlarını ve taşlama işlemi sırasında kaldırılan malzeme miktarını kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi sağlamıştır. Çalışmanın sonuçları, makina ile taşlamanın büyük ölçüde başarılı olduğunu ve ray yüzeyindeki düzensizliklerin önemli oranda giderildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde daha hassas düzeltmeler gerektiği ve bu bölgelerde elle taşlama yapılmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, makina taşlamanın yüksek hızlı tren hatlarında etkili bir bakım yöntemi olduğunu ve gerektiğinde elle taşlama ile desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın yapılmasının temel nedeni, yüksek hızlı tren hatlarında ray taşlama işlemlerinin etkinliğini değerlendirmektir. Ray yüzeyindeki düzensizliklerin giderilmesi, aşınmanın kontrol altına alınması ve tekerlek-ray etkileşiminin optimize edilmesi, demiryolu hatlarının güvenliği ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek hızlı trenlerin daha stabil ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için rayların sürekli olarak bakımı yapılmalı ve yüzeydeki deformasyonlar düzeltilmelidir. Bu bağlamda, makina ile taşlama işleminin etkilerini ölçmek ve farklı ölçüm cihazlarıyla (DQM, RMF, Wilmec) bu işlemin doğruluğunu belirlemek, bu bakım yönteminin etkinliğini ortaya koymak amacıyla yapılmıştır.

Çalışma, özellikle ray taşlamada makina kullanmanın verimliliğini ve bazı durumlarda elle taşlamanın gerekliliğini de gözler önüne sermektedir. Ray taşlama işlemi, sadece rayın geometrisinin düzeltilmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda trenin emniyetli bir şekilde çalışabilmesi için önemli bir bakım yöntemidir. Bu çalışmada, makina ile taşlama yapılan bölgelerde sağlanan düzeltilmiş ray yüzeylerinin etkinliği, ölçüm sonuçları ve performans göstergeleri ile somut bir şekilde ortaya konmuştur. Yüksek hızlı tren sistemlerinde bakım süreçlerinin optimize edilmesi, sistemin güvenliğini ve operasyonel verimliliğini artıracaktır. Ray yüzeyindeki düzensizliklerin doğru bir şekilde tespit edilmesi, gereksiz maliyetlerin önüne geçilmesi ve trenlerin daha uzun süre güvenli bir şekilde çalışabilmesi sağlanacaktır. Bu çalışma, makina ile taşlama ve gerektiğinde elle taşlama yöntemlerinin kombinasyonunu değerlendirerek, demiryolu bakımında en uygun yöntemlerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

1.1. Ray Taşlama Süreciyle İlgili Teorik ve Model Yaklaşımlar

Demiryolu taşımacılığında ray-taş temas yüzeyinde oluşan etkileşimler, raylarda meydana gelen aşınma, yorgunluk ve bakım ihtiyacını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, ray taşlama uygulamalarını anlamlandırmak ve mühendislik açısından temellendirmek amacıyla tekerlek-ray temas teorileri, aşınma modelleri ve bakım stratejileri gibi çeşitli kuramsal yaklaşımlara başvurulmaktadır.

Hertz temas teorisi, ray-taş temasındaki baskının ve temas alanının tahmininde kullanılan en temel teorilerden biridir. Teori, 1881 yılında Heinrich Hertz tarafından geliştirilmiştir ve iki elastik yarı uzayın teması sonucunda meydana gelen normal temas basıncı, temas alanının şekli ve elastik deformasyonları açıklamayı amaçlamaktadır. Hertz temas teorisinin özellikle ray taşlama süreçleriyle ilişkisi, temas alanındaki basınç yoğunluklarının yüzey deformasyonlarına neden olmasıyla ortaya çıkmaktadır. Zamanla bu deformasyonlar, yuvarlanma yorgunluğu (rolling contact fatigue) ve mikro çatlak oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Dolayısıyla ray profilinin taşlama yoluyla periyodik olarak düzeltilmesi, Hertz temelli basınç dağılımının kontrollü kalmasını sağlamaktadır ve yüzey ömrünü uzatmaktadır. (Bhardawaj ve Sharma, 2019, s.1-12).

Kalker'in (1982) geliştirdiği lineer teori, longitudinal, lateral ve spin kayma türlerini dikkate alarak elastik yarı uzay varsayımıyla çalışmaktadır. Bu teoride kayma kuvvetleri, kayma oranlarıyla doğrusal ilişkilidir. Kalker (1982) daha sonra FASTSIM algoritmasını geliştirerek, bu süreci sayısal olarak hızlandırmıştır. Bu algoritma, sadeleştirilmiş yuvarlanma teması teorisini baz alarak, kayma (sliding) ve kayma kuvveti (sliding force) ilişkisini hızlı şekilde modellemeye olanak tanımıştır. FASTSIM'in temel işleyiş mekanizması, kontak alanını eliptik olarak kabul ederek, bu alanı küçük dilimlere böler ve bu dilimler boyunca kayma hızlarını, elastik yer değiştirmeleri ve gerilmeleri hesaplar. Bu sayede, kayan (slip) ve yapışan (adhesion) bölgeleri ayırarak, gerçek temas alanındaki karmaşık gerilme dağılımını basit ama etkili bir biçimde simüle edebilir. Algoritmanın en büyük avantajlarından biri, önceki algoritmalara göre 15–25 kat daha hızlı çalışmasıdır. Bu, özellikle demiryolu sistemlerinde sürekli olarak değişen temas koşullarının modellenmesinde zaman açısından büyük kazanç sağlanmasını kolaylaştırmaktadır. FASTSIM, Kalker'in daha önce geliştirdiği Contact programının sınırlamalarını aşmak için oluşturulmuştur. Örneğin CONTACT yalnızca yarı elastik ortamları varsayar ve yüksek eliptik oranlarda ($a / b > 2$) çözüm üretilmezken, FASTSIM

bu sınırlamayı elastik temel model yaklaşımıyla büyük ölçüde hafifletmiştir. (Kalker, 1982, s. 1-13).

Adams (1864), ray ile tekerlek arasındaki sürtünme kuvvetlerini “engel teşkil eden sürtünme” (impedimental friction) olarak tanımlamıştır. Özellikle tekerleklerin konik yapısının teoride düz çizgide sürtünmesiz hareketi mümkün kıldığı, ancak pratikte bu durumun ray eğrilikleri, yüzey düzensizlikleri ve araç rijitliği nedeniyle başarısız olduğunu vurgulamıştır. Adams (1864), ray yüzeyinde "parlayan iz (glint)" oluşumunun kayma etkisiyle oluştuğunu belirtmiştir. Parlayan iz, demiryolu raylarının tekerleklerle temas eden yüzeylerinde, özellikle aşırı kayma veya sürtünmeden kaynaklı lokal sıcaklık artışı sonucu oluşan metalik parlıtya sahip, cilalanmış yüzey izleridir. Bu izler genellikle ray taşlama yapılmamış, profil bozulmuş ya da yoğun yük ve hız altında kalan ray bölümlerinde görülmektedir. Adams (1864), bu izlerin saf yuvarlanma (rolling) hareketi ile değil, kayma hareketi sonucu oluştuğunu vurgulamıştır. Ray ve tekerlek yüzeyi arasında küçük ama sürekli kaymalar olduğunda mikroskobik metal parçacıkları raydan kopacağını, yüzeyde ısıl yıpranma ve plastisitenin artacağını ve yüzeyin zamanla parlak hale geleceğini belirtmiştir. Bu parlaklık, özellikle tekerleğin fazla hızlandığı veya yavaşladığı yerlerde artacağını ve tren geçtikten sonra ray üstünde gümüşü, neredeyse ayna benzeri izler şeklinde görülmektedir. Bu izlerin mühendisler için temas bozukluğu, yağlama eksikliği veya profil bozulması gibi problemlerin habercisi olacağını vurgulamıştır. Ayrıca izlerin ray taşlama uygulamasının ya eksik ya da zamanlamasının geciktiğini göstermektedir. Bu durumun da aşırı yüke veya kötü süspansiyon dizaynına işaret edebileceğini belirtmiştir (Adams, 1864, s. 411–416).

Mackenzie (1883), ray üzerindeki eğriliklerde oluşan tekerlek hareketini “tehlike unsuru” olarak ele almıştır. Özellikle dış ön tekerleğin rayı tırmanma eğilimini (rail climbing tendency), flanş sürtünmesi ve yay sistemleriyle ilişkili olarak tanımlanmıştır. Özellikle dış ön tekerleğin ray üzerinde yukarı doğru tırmanma eğilimi (rail climbing tendency), tekerlek flanşlarının ray kenarına uyguladığı yan kuvvetler ve bu kuvvetlere karşılık gelen yay sistemlerinin tepkisi ile ilişkilendirilmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında, özellikle altı tekerlekli, rijit aks yapısına sahip lokomotiflerin ray eğrilğine uyum sağlamakta zorlanmaları etkili olmaktadır. Mackenzie (1883), düşük hızlarda bile dış ön tekerleğin flanşının ray başlığına doğru bir yan basınç uyguladığını ve bu basıncın, yeterli olduğu takdirde tekerleğin ray üzerine tırmanmasına neden olabileceğini belirtmiştir. Bu durumun, özellikle flanş-rak yüzeyinde yetersiz yağlama, yüksek

sürtünme katsayısı ya da yay rijitliğinin zayıf kalması gibi etkenler nedeniyle daha da tehlikeli hale geldiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşımı, sadece ray yüzeyindeki aşınma süreçlerini değil aynı zamanda trenin dinamik stabilitesi ve yolcu güvenliği açısından da ray taşlama uygulamalarının stratejik önemini ortaya koymaktadır. Çünkü rayın profilinin bozulması, tekerleğin doğru hat izinde ilerleyememesine, bunun da sistemsel sarsıntı, sürtünme artışı ve nihayetinde raydan çıkma riskine yol açabileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, ray taşlama yalnızca teknik bir bakım işlemi değil, aynı zamanda bir güvenlik önlemi olarak ele alınmıştır (Mackenzie, 1883, s. 1–8).

Ray taşlama işleminin mühendislik analizinde, yüzey kalitesi, aşınma davranışı ve yapısal ömür gibi birçok değişkene bağlı olarak şekillenen fiziksel süreçlerin doğru modellenmesi, bakım stratejilerinin optimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, son yıllarda ray-taş temasına ilişkin sayısal modelleme ve deneysel doğrulamalara dayalı sistematik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Öğütme Kuvveti Modeli, ray taşlama sırasında oluşan toplam öğütme kuvvetini taş basıncı, taşın dönme hızı ve tane yapısına göre hesaplayan fiziksel bir kuvvet model olarak tanımlanmaktadır. Bu modelde öğütme parametrelerinin değişimine göre malzeme kaldırma miktarı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerin simülasyon destekli tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Ding vd. (2020), çalışmalarında aşlama taşı yüzeyinde yer alan aşındırıcı tanelerin dağılımı, çıkıntı yükseklikleri ve şekilleri dikkate alınarak detaylı bir 3B modelleme gerçekleştirilmiştir. DEFORM-3D yazılımı ile yapılan sonlu eleman simülasyonları, taşlama basıncının ve taşın dönme hızının öğütme kuvveti üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Modelin geçerliliği, deneysel verilerle doğrulanmış ve bir düzeltme katsayısı ile simülasyon-hata oranı azaltılmıştır. Model, taşlama verimliliğinin artırılması ve yüzey kalitesinin kontrolü amacıyla parametre optimizasyonu yapılmasına olanak tanımaktadır. (Ding, Han ve Zhou, 2020, s. 1254-1264).

Yorulma Tabanlı Kırık Büyüme Modeli, raylarda oluşan çatlakların büyümesini belirli bir trafik yükü eşiğinde öngören ve olasılık temelli hesaplamalarla arıza sıklığını tahmin eden bir yorulma analiz modelidir. Modelde kırık büyümesini mekanik analizlerle ilişkilendirerek bakım planlamasında kullanılacak risk tabanlı bir karar destek sistemi oluşturulması amaçlanmaktadır. Sonlu elemanlar modeli (SEM) yöntemi ile ray üzerindeki gerilme dağılımları hesaplanmakta, bu mekanik çıktılar daha sonra Bayesian olasılık modeliyle birleştirilmektedir. Yaklaşık Bayes Hesaplama çerçevesi kullanılarak, çatlak büyüme senaryoları üzerinden arıza sıklığı tahmin edilmiştir. Model, klasik

istatistiksel yöntemlerden %20 daha iyi performans göstermiştir ve bakım periyotlarının belirlenmesinde kullanıma uygundur. Ghofrani vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada model, klasik istatistiksel yöntemlerden %20 daha iyi performans göstermiştir ve bakım periyotlarının belirlenmesinde kullanıma uygun olarak belirtilmiştir. (Ghofrani, 2019, s. 153-172).

Enerji Tabanlı Malzeme Kaldırma Modeli, ray taşlama işlemi sırasında harcanan enerji ile kaldırılan malzeme hacmi arasındaki ilişkiyi tanelerin konumu, geometrisi ve kesme kuvvetleri üzerinden hesaplayan bir enerji verimlilik modeli olarak açıklanmaktadır. Modelde, taşlama parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla enerji tasarruflu ve verimli taşlama stratejilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Model, taş yüzeyindeki aşındırıcı tanelerin geometrik ve konumsal dağılımına dayalı olarak her bir tanenin oluşturduğu kesme kuvvetini hesaplamakta ve bu kuvvetleri taşın dönme hızı ve ileri besleme hızıyla birleştirerek toplam enerji tüketimini öngörmektedir. Modelin çıktıları, farklı taş hızları altında enerji verimliliğinin nasıl değiştiğini göstermekte ve enerji tasarruflu taşlama stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Zhi, Li ve Zarembski, 2015, s. 21-30).

Varlık Yönetimi Tabanlı Temas Ön Değerlendirme Modeli, tekerlek ve ray temas yüzeyindeki koniklik, yuvarlanma yarıçapı farkı ve temas noktası gibi geometrik parametreler üzerinden ray aşınması riskini analiz eden ön değerlendirme modelidir. Modelde, aşınma ve hasara yatkınlık göstergelerinin işletme öncesinde belirlenerek taşlama ve bakım sürelerinin optimizasyonuna katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Boyacıoğlu (2022), tarafından gerçekleştirilen çalışmada ray-tekerlek temas noktaları, eşdeğer koniklik ve yuvarlanma yarıçapı farklılıkları gibi parametreler üzerinden analiz edilmiştir. Yeni ve aşınmış profillerin karşılaştırmalı değerlendirmesi, ray aşınmasının özellikle dar kurplarda daha yüksek olduğunu göstermiş ve taşlama stratejisinin bu doğrultuda şekillendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Boyacıoğlu, 2022, s. 84-96).

Gerçekleştirilen çalışmalar, ray taşlama süreçlerinin mühendislik temelli olarak değerlendirilmesi, sadece yüzey düzeltmeye yönelik mekanik bir işlem olmanın yanı sıra, rayın yapısal bütünlüğünü, güvenliğini ve hizmet ömrünü doğrudan etkileyen çok boyutlu bir konu olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, temas mekaniğine dayalı teoriler (örn. Hertz (1881) ve Kalker (1982), dinamik stabiliteye ilişkin yapısal risk analizleri (örn. Mackenzie (1883) ve Adams (1864) ve taşlama işleminin enerji ve verimlilik boyutunu irdeleyen modeller, ray profili yönetiminde teknik altyapının önemli

bileşenleri haline gelmiştir. Ayrıca yorulma tabanlı kırık büyüme ve varlık yönetimi ön değerlendirme modelleri, modern demiryolu sistemlerinde bakım stratejilerinin zamanında ve veriye dayalı biçimde uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Söz konusu teorik ve model yaklaşımlar, ray-taş temasının sadece bir fiziksel etkileşim değil aynı zamanda süreklilik arz eden, optimizasyon gerektiren ve güvenlik boyutu yüksek bir mühendislik uygulamaları olduğunu göstermektedir (Adams, 1864, s. 411–416).

1.2. Literatür Taraması

Ray taşlama uygulamalarının etkinliğini ve mühendislik başarısını değerlendirebilmek için hem ulusal hem de uluslararası düzeyde yürütülmüş araştırmalardan elde edilen bulgular önem taşımaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, rayların yeniden profilendirilmesi, taşlama yöntemlerinin uygulanabilirliği, analizler ve titreşim etkileri gibi çeşitli açılardan konuya yaklaşmaktadır. Bu bölümde, ulusal ve uluslararası gerçekleştirilmiş çalışmaların amaçları, kullandıkları yöntemsel yaklaşımlar ve elde ettikleri temel bulgular sunulmuştur.

Öztürk ve Arlı (2014, s. 100-110.) çalışmalarında, balastlı demiryolu hatlarında ray-tekerlek etkileşiminden kaynaklanan dinamik yüklerin, rayların yapısal davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada sonlu elemanlar yöntemiyle balastlı üstyapı sisteminin nümerik modeli oluşturulmuş ve model üzerinde harmonik yükleme altında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Modelin geçerliliğini sınamak amacıyla sahada çekiş darbe testleri uygulanmış ve elde edilen titreşim verileri analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, mesnet aralığındaki raylarda oluşan dinamik eğilme momentlerinin, statik değerlere oranla yaklaşık sekiz ile dokuz kat arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca rezonans durumlarında ray çökmelerinde %60'a, eğilme momentlerinde ise %40'a varan artışlar raporlanmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, demiryolu altyapısının değerlendirilmesinde klasik statik analizlerin yetersiz kaldığı ve dinamik etkilerin mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır (Öztürk ve Arlı, 2014, s. 100-110).

Uhlmann vd. (2016, s.287-293) çalışmalarında, ray taşlama işlemlerinde kullanılan proses parametrelerinin (taş çevresel hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği) ray yüzey pürüzlülüğü ve yüzey altı sertlik yapısı üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Laboratuvar ortamında kuru koşullarda gerçekleştirilen taşlama deneylerinde, Berlin tramvay hattında kullanılan S49 tipi çelik raylar işlenmiş ve farklı parametre kombinasyonları denenmiştir.

Ölçümler için yüzey pürüzlülüğü cihazları, Barkhausen gürültü analizörleri ve mikrosertlik test cihazları kullanılmıştır. Sonuçlar, taşlama parametrelerinin yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu, örneğin, çevresel hız arttıkça pürüzlülüğün azaldığını ve düşük talaş derinliklerinde daha düşük mikrohasar gözlemlendiğini göstermiştir. Ayrıca, Barkhausen gürültüsünün yüzey sertlik profiliyle ters orantılı olduğu bulunmuş, bu da yöntemin hasar tespiti için kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Çalışmada, ray taşlama süreçlerinin yüksek üretkenlik ile minimum yüzey hasarı arasında denge kurulacak şekilde optimize edilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır (Uhlmann vd., 2016, s.287-293).

Lin vd. (2018) çalışmalarında, ray taşlama sürecinde taşlama parametrelerinin yüzey sıcaklığı ve taşlama yanığı davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, yarı yapay tremolit yöntemi kullanılarak farklı taşlama basıncı, taş dönme hızı ve tane boyutlarına sahip taşlarla deneysel testler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde U71Mn çeliği ray numuneleri kullanılmış, taşlama sırasında oluşan sıcaklık, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, yanık derecesi ve beyaz aşındırma tabakası kalınlığı gibi parametreler ölçülmüştür. Bulgular, taşlama sıcaklığının 600 °C'yi aştığında yüzeyde beyaz aşındırma tabakası oluştuğunu, 735 °C üzerine çıkıldığında ise yapının martensite dönüştüğünü ve 802 °C seviyelerinde taşlama ve meneviş çatlaklarının ortaya çıktığını göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda oksitlenmenin arttığı ve beyaz aşındırma tabakası kalınlığının ciddi oranda büyüdüğü gözlemlenmiş; taşın tane boyutu küçüldükçe temas yoğunluğunun artmasıyla maksimum sıcaklığın yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca, yanık derecesine göre yüzey renginin sarıdan maviye, maviye ve nihayetinde mora dönüştüğü, bu renk geçişlerinin mikro yapı ve sertlik değişimleriyle doğrudan ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda, ray taşlamada taşlama parametrelerinin dikkatli seçilmemesi durumunda mikro yapı dönüşümlerine, yüzey çatlaklarına ve erken yüzey bozulmalarına yol açabilecek ciddi termal hasarlar oluşabileceği vurgulanmıştır (Lin vd., 2018, s.151-162).

Zhang vd., (2018) çalışmalarında, ray taşlama sürecinde taşlama yönü ve taşlama geçiş sayısının malzeme kaldırma davranışları üzerindeki etkileri, üç boyutlu sonlu eleman analizine dayalı simülasyon yöntemiyle incelemişlerdir. Araştırmada Al_2O_3 aşındırıcı taş ve U71Mn ray malzemesi kullanılarak, DEFORM-3D yazılımı ile oluşturulan modelde taş aşınması, kaldırılan ray hacmi, taşlama oranı, yüzey pürüzlülüğü ve taşlama kuvvetleri gibi değişkenler ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Simülasyon

sonuçları, taşlama geçiş sayısı arttıkça taş aşınmasının arttığını, kaldırılan ray hacmi, taşlama oranı ve yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığını göstermiştir. Bunun yanında taşlama yönünün değiştirilmesinin, taş aşınmasını azalttığı ancak kaldırılan ray hacmini, taşlama oranını, yüzey pürüzlülüğünü ve taşlama kuvvetini artırdığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, taşlama yönü değişiminin taşın performansını olumlu yönde etkilediğini ancak yüzey kalitesinde bozulmaya yol açtığını, dolayısıyla uygulamada bu iki faktör arasında denge kurulması gerektiğini vurgulamaktadır (Zhang vd., 2018, s.1-20).

Wang vd. (2020) çalışmalarında, taşlama taşının aşındırıcı malzemesi (ZA-zirkonyum korundum, BA-kahverengi ergitilmiş alümina) ve sertliğinin ray taşlama verimi ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmişlerdir. Çalışmada sekiz farklı taş kullanılmıştır. Taşların beşi farklı aşındırıcı karışımlarına, dördü ise değişen sertlik derecelerine sahip olduğu belirtilmiştir. Deneyler, kuru ortamda sabit taşlama parametreleriyle yürütülmüş ve çıkarılan malzeme miktarı, yüzey pürüzlülüğü, beyaz aşındırma tabakası, artık gerilmeler ve taş aşınma türleri değerlendirilmiştir. Bulgular, ZA içeren taşların BA'ya göre daha fazla malzeme kaldırdığını, yüzeyi daha pürüzlü hale getirdiğini ancak daha az yanık ve daha ince beyaz aşındırma tabakası oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, taş sertliği arttıkça yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmeler azalmış ve beyaz aşındırma tabakası kalınlığı ise artmıştır. BA taşlarında yüzey yanıkları daha belirgin gözlenmiş, ZA taşlarında ise kırılma tipi daha baskın olmuştur. Sonuç olarak, taş malzemesi ve sertliği hem taşlama etkinliğini hem de ray ömrünü belirleyen temel değişkenler olarak tanımlanmıştır (Wang vd., 2020, s. 1-20).

Ilinykh, Yurkana ve Aksenov (2021, s. 388-396), çalışmalarında, demiryolu ray taşlama işlemlerinde üretim sürecinin bilgi sistemleriyle desteklenerek otomatikleştirilmesi ve böylece insan faktörünün etkisinin azaltılması hedeflenmiştir. Çalışmada ray profili tamiri için geliştirilen asimetrik profil geometrisinin tasarımına yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuş ve bu kapsamda ray başı aşınma miktarına, kurp yarıçapına ve kullanım süresine bağlı olarak minimum metal kaldırmayı hedefleyen bir matematiksel model geliştirilmiştir. Model, taşlama arabalarının eğim açılarının ve gerekli basınç kuvvetlerinin hesaplanmasını da içeren bir algoritma ile desteklenmiştir. Elde edilen modelin sahaya entegrasyonu için Kotlin tabanlı bir yazılım geliştirilmiş ve bu yazılımın RShP-48 ve RR-48 tipi ray taşlama trenlerinde uygulanabileceği belirtilmiştir. Geliştirilen yazılım, eğimli ray bölümlerinde taşlama öncesi planlama sürecinde kullanılmakta, manuel veya otomatik veri girişiyle rayın iç ve dış hatlarındaki

aşınma verilerini değerlendirerek profilin gerekli eğim ve talaş kaldırma miktarlarını hesaplamaktadır. Çalışma sonunda, ray taşlama sürecinin sayısallaştırılmasının üretkenliği artırdığı, aşırı metal kaldırmayı önleyerek ray ömrünü uzattığı ve bakım planlamasında daha rasyonel kararlar alınmasına imkân sağladığı ortaya konmuştur (Ilinykh, Yurkova ve Aksenov, 2021, s. 388-396).

Arslan (2023) çalışmasında, Ankara–Eskişehir YHT hattında mobil ray taşlama makinesi kullanılarak döner taşlama yönteminin yeniden profillendirme süreçlerinde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle hattın mevcut teknik durumu analiz edilmiş, ray yüzey kusurlarının derinliği, enine ve boyuna profil sapmaları saha verileriyle belirlenmiştir. Belirlenen ölçümlere dayanarak, yaklaşık 0,5 mm’lik metal kaldırma işlemi gerçekleştirilmiş ve hem düzeltici hem de koruyucu taşlama uygulanmıştır. Taşlama işlemi sonrasında yapılan lazerli profil ölçümleriyle hat boyunca boyuna ve enine profil kalite düzeyleri değerlendirilmiş; elde edilen sonuçlarda taşlama sonrası profil kalitesinin istenen tolerans aralıklarına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ray yüzeyindeki ondülasyonların azaltıldığı, eşdeğer koniklik hatalarının giderildiği ve ray-tekerlek etkileşiminin iyileştirildiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, döner taşlama metodunun yüksek hızlı tren hatlarında hem etkin hem de uygulanabilir bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur (Arslan, 2023, s. 38-53).

1.3. Demiryolu Bakımı

Demiryolları hem şehir içi ulaşımında hem de şehirlerarası taşımacılıkta kritik bir öneme sahiptir. Ancak, demiryolu sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için düzenli ve kapsamlı bir bakım gereklidir (Bilgiç, Yalınız ve İça, 2017). Demiryolu bakımı, sadece rayların fiziksel sağlamlığını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda trenlerin, sinyalizasyon sistemlerinin ve diğer altyapı unsurlarının sorunsuz işlemesine katkı sağlar. Demiryolu hatları sürekli olarak yüksek basınç, titreşimlere ve çevresel etkilere maruz kalır. Ağır yük taşımacılığı, değişken hava koşulları ve sürekli kullanım, raylarda ve bağlantı noktalarında deformasyonlara neden olabilir. Bu nedenle bakım çalışmaları, kazaların önlenmesi, taşımacılık kapasitesinin artırılması ve uzun vadeli maliyetlerin düşürülmesi açısından kritik rol oynar.

1.3.1. Önleyici bakım

Önleyici bakım, demiryolu altyapısının güvenliğini ve işlevselliğini sürdürebilmek için temel bir yaklaşımdır (Çeliktaş ve Ünlü, 2018). Bu süreç, rayların, traverslerin ve balastların düzenli olarak kontrol edilmesini ve muhtemel sorunların daha ciddi arızalara dönüşmeden önce tespit edilmesini içerir. Demiryolu sistemleri, sürekli kullanım nedeniyle zamanla yıpranır ve bu yıpranma erken fark edilmezse güvenlik risklerini artırabilir (Koçak, 2014). Bu bakım türü, bu riskleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda daha uzun ömürlü ve dayanıklı bir altyapı sağlar.

Raylarda oluşan deformasyonlar, traverslerde meydana gelen çatlaklar veya balastların sıkışma ya da dağılma problemleri, başlangıçta küçük görünse de zaman içinde büyük arızalara yol açabilir. Bu tür arızalar, yüksek onarım maliyetleri ve operasyonel aksamalara neden olurken, yolcu ve yük taşımacılığı hizmetlerinde de güven kaybına yol açabilir. Önleyici bakım, bu tür sorunların önüne geçerek işletmenin güvenilirliğini ve etkinliğini artırır (Göçener, 2012).

Önleyici bakım, demiryolu işletmelerine birçok uzun vadeli avantaj sunar. İlk olarak, arıza risklerini azaltarak plansız ve maliyetli onarımların önüne geçer. Beklenmedik arızalar genellikle daha pahalı müdahaleler gerektirir ve bu süreçte işletmenin durması nedeniyle gelir kayıpları yaşanır. Düzenli bakım, bu kayıpların önüne geçerek finansal sürdürülebilirliği destekler. Ayrıca, düzenli bakım altyapının ömrünü uzatır (Sarıgüzel, 2021). Raylar, traversler ve balastlar düzenli kontrol ve müdahale sayesinde daha uzun süre dayanıklılığını korur. Bu durum, yeniden inşa veya büyük çaplı yenileme maliyetlerini azaltarak işletme bütçesine katkıda bulunur. Önleyici bakımın bir diğer avantajı ise operasyonel sürekliliktir. Demiryolu hattındaki beklenmedik kesintiler en aza indirgenerek yolcuların memnuniyeti sağlanır ve taşımacılık faaliyetleri kesintisiz bir şekilde sürdürülür (Kaya, 2019).

Günümüzde önleyici bakım süreçleri, teknolojinin sağladığı olanaklarla daha verimli hale gelmiştir. Örneğin, ultrasonik tarama cihazları raylardaki deformasyonları tespit ederken, balastların sıkışma durumunu analiz eden sensörler bakım ekiplerine hassas veriler sunar. Bunun yanı sıra, dronlarla yapılan görsel denetimler, altyapının genel durumunu değerlendirmede önemli bir rol oynar. Bu teknolojiler, sorunları erken aşamada tespit ederek bakım çalışmalarının doğruluğunu ve hızını artırır (Tabak, 2014).

Önleyici bakım, demiryolu altyapısını korumanın ötesinde, işletmenin geleceğini güvence altına almak için kritik bir yatırımdır. Düzenli ve planlı bakım çalışmaları, büyük

çaplı arızaları önleyerek hem maliyetlerin azalmasını sağlar hem de sistemin güvenilirliğini artırır. Demiryolu işletmelerinin önleyici bakım politikalarını bir öncelik haline getirmesi, güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik bir taşımacılık için kaçınılmazdır (Gürgenli, 2021).

1.3.2. Düzeltici bakım

Düzeltici bakım, demiryolu altyapısında meydana gelen hasarların onarılması amacıyla yapılan müdahaleleri ifade eder. Bu bakım türü, raylarda, traverslerde, balastlarda veya sinyalizasyon sistemlerinde meydana gelen arızaların giderilmesini kapsar (Çelikle ve Ünlü, 2018, s. 483-504). Özellikle acil durumlarda hızlı müdahaleyi gerektiren düzeltici bakım, sistemin işlevselliğini yeniden kazanmasını sağlar. Raylarda çatlak oluşması veya kopma gibi fiziksel hasarlar, demiryolu güvenliğini ciddi şekilde tehlikeye atabilir. Bu tür durumlarda, hasarlı rayların yenileriyle değiştirilmesi, düzeltici bakımın temel uygulamalarından biridir. Benzer şekilde, sinyalizasyon sistemlerindeki arızalar, tren trafiğini aksatarak operasyonel süreçlerde kesintilere yol açabilir. Düzeltici bakım kapsamında bu tür sorunlar hızlı bir şekilde çözülerek sistemin normal işleyişine dönmesi sağlanır (Lafçi ve Öztekin, 2020, s. 66-78).

Düzeltici bakım, arızaların ortadan kaldırılması açısından önemli bir rol oynar. Özellikle beklenmedik durumlarda devreye giren bu bakım türü, işletmenin operasyonlarına devam etmesini sağlar. Ancak bu yaklaşımın bazı sınırlamaları bulunmaktadır (Birinci, 2007). Arızalar genellikle plansız bir şekilde meydana geldiğinden, düzeltici bakım süreçleri zaman ve maliyet açısından beklenenden daha yüksek olabilir (Tabak, 2014). Ayrıca, arızanın kapsamına bağlı olarak tren trafiğinde gecikmeler yaşanabilir ve müşteri memnuniyeti olumsuz etkilenebilir. Öte yandan, düzeltici bakım sırasında yalnızca mevcut arıza giderildiği için altyapının genel durumu gözden kaçabilir. Bu durum, ilerleyen süreçlerde benzer sorunların tekrar ortaya çıkma riskini artırabilir. Bu nedenle düzeltici bakımın, önleyici bakım ve planlı bakım stratejileriyle entegre bir şekilde uygulanması, sistemin daha sürdürülebilir bir şekilde işletilmesini sağlar.

Düzeltici bakım süreçleri, modern teknolojilerle daha hızlı ve etkin hale getirilebilmektedir. Örneğin, raylardaki çatlakları veya kopmaları tespit etmek için kullanılan akustik sensörler ve termal kameralar, arıza tespit sürecini hızlandırır.

Sinyalizasyon sistemlerindeki arızaların giderilmesinde ise otomatik tanılama yazılımları devreye girerek bakım ekiplerine zaman kazandırır. Bu teknolojiler, arızaların kaynağını daha kısa sürede belirleyerek bakım sürecinin etkinliğini artırır (TCDD, 2013).

Düzeltilici bakım, demiryolu altyapısında meydana gelen arızaların giderilmesinde kritik bir role sahiptir. Ancak bu bakım türü, yüksek maliyet ve operasyonel kesintiler gibi zorluklar barındırdığından, önleyici bakım uygulamalarıyla desteklenmelidir. Modern teknolojilerin kullanımıyla birlikte, düzeltilici bakım süreçleri daha hızlı ve etkin hale gelmiş, işletmelerin bu tür arızalarla başa çıkma kabiliyeti artmıştır (TCDD, 2017, s. 25).

1.3.3. Yenileme

Yenileme, demiryolu hattının kullanım ömrünü doldurduğu ve artık onarım veya rutin bakım ile sürdürülebilir olmadığı durumlarda uygulanan kapsamlı bir müdahale sürecidir (Gürgenli, 2021). Bu süreçte eski raylar, traversler ve balast malzemeleri tamamen yenileriyle değiştirilir. Yenileme, yalnızca demiryolu hattının güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sistemin performansını ve dayanıklılığını artırır. Zamanla, sürekli kullanım, çevresel faktörler ve doğal aşınma nedeniyle demiryolu altyapısı yıpranır. Raylarda çatlaklar, traverslerde deformasyonlar veya balastların yetersizliği gibi sorunlar, hattın taşıma kapasitesini ve operasyonel verimliliğini olumsuz etkiler. Bu tür sorunlar yalnızca lokal onarımlarla giderilemeyecek kadar kapsamlı hale geldiğinde, yenileme kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelir (European Committee for Standardization, 2017).

Yenileme süreci, altyapının hem güvenliğini hem de işlevselliğini yeniden kazandırır. Eski rayların daha modern ve dayanıklı raylarla değiştirilmesi, trenlerin daha yüksek hızlarda ve güvenli bir şekilde seyahat etmesine olanak tanır. Aynı şekilde, travers ve balastların yenilenmesi, hattın taşıma kapasitesini artırarak hem yolcu taşımacılığında hem de yük taşımacılığında daha yüksek verimlilik sağlar (Karatürk, 2021). Bir diğer önemli avantaj, yenileme çalışmalarının gelecekteki bakım ve onarım ihtiyaçlarını azaltmasıdır. Modern malzemeler ve teknolojiler kullanılarak yapılan yenileme, hattın dayanıklılığını artırır ve altyapının uzun süreli kullanımını mümkün kılar. Bu da işletme maliyetlerinde önemli bir tasarruf sağlar (Kaya, 2019).

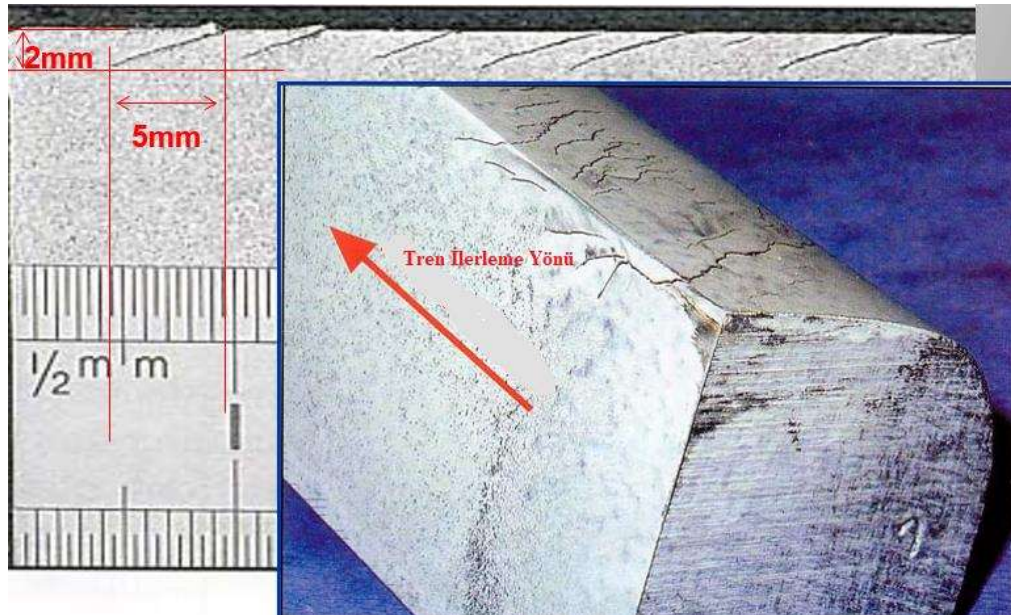
Yenileme süreçlerinde teknolojinin kullanımı, çalışmaların hem hızını hem de etkinliğini artırmaktadır. Örneğin, eski rayların ve traverslerin kaldırılması, yeni

malzemelerin yerleştirilmesi ve balastın düzenlenmesi gibi işlemler, modern makinelerle daha kısa sürede ve daha hassas bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, yenileme öncesinde altyapının genel durumunu değerlendirmek için lazer tarama, dron görüntüleme ve yer radarı gibi teknolojiler kullanılabilir. Bu yöntemler, yenileme için gerekli olan planlamanın daha doğru yapılmasını sağlar (Bilgiç, Yalınız ve İça, 2017, s. 40-45).

Demiryolu hattı yenileme çalışmaları, yalnızca bir onarım süreci değil, aynı zamanda altyapıyı geleceğe hazırlama sürecidir. Eski ve yıpranmış malzemelerin tamamen yenilenmesi, demiryolu sisteminin performansını artırırken, güvenlik standartlarını da en üst düzeye çıkarır. Yenileme, modern malzemeler ve teknolojilerin entegrasyonu ile, demiryolu işletmeciliğinin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini destekleyen temel bir yatırımdır (Lafçi ve Öztekin, 2020, s. 66-78).

1.4. Ray Taşlama

Ray taşlama, demiryolu raylarının aşınma, deformasyon ve yüzey bozulmalarının giderilmesi amacıyla uygulanan kritik bir bakım işlemidir. Bu yöntem, ray yüzeyinin istenilen profil ve geometrik özelliklerinin yeniden kazandırılması sayesinde, demiryolu sistemlerinin güvenliğini, verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamada önemli bir rol oynamaktadır (Dornfeld, 2014, s. 63-66).



Görsel 1.1. Ray tekerlek temasına bağlı yüzey çatlakları



Görsel 1.2. *Ray taşlama araçları*

Ray taşlama işlemi, belirlenen hedef ve ulaşılmak istenen sonuçlara göre genel olarak iki geniş kategoriye ayrılmaktadır: yüzey kusurlarını gidermek için ray taşlama ve aşınma giderme odaklı ray taşlama. Her iki ray taşlama yöntemi de, uygulamanın yapıldığı demiryolu hattının özelliklerine, rayın kullanım süresine ve çevresel koşullara bağlı olarak farklı metodolojiler gerektirmektedir. TCDD koruyucu ray taşlama işlemi belirli periyotlarda yapılmaktadır

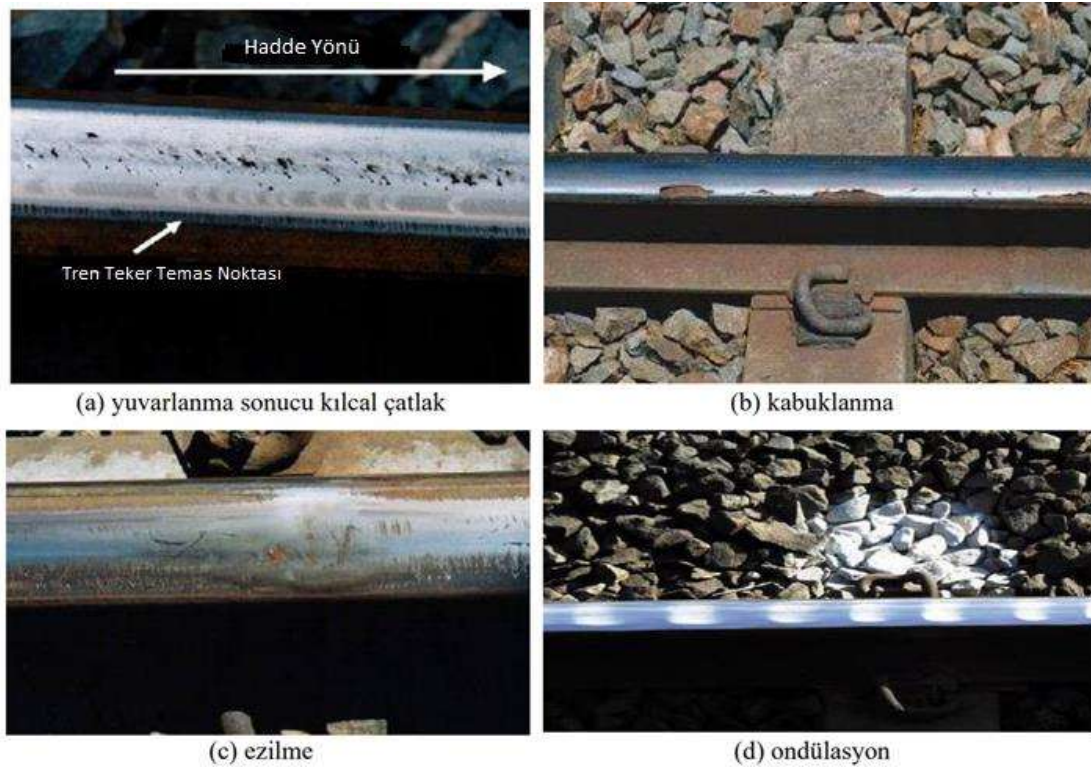
Tablo 1.1. Koruyucu taşlama periyodu (TCDD, 2013)

Hatlar	Yol Geometrisi	Periyot
Konvensiyonel	Kurp Yarıçapı ≤ 2500 m	Her 15-20 milyon tonda bir
Konvensiyonel	Kurp Yarıçapı >2500 m ve Aliyman.	Her 40-60 milyon tonda bir
HT ve YHT	Kurp Yarıçapı ≤ 2500 m	Her 10-15 milyon tonda bir
HT ve YHT	Kurp Yarıçapı >2500 m.	Her 15-20 milyon tonda bir
HT ve YHT	Alyiman	Her 20-30 milyon tonda bir

Günümüzde modern ray taşlama teknolojileri, gerçek zamanlı ölçüm sistemleri, bilgisayar destekli kontrol mekanizmaları ve otomatik ayar algoritmalarıyla donatılmıştır. Bu teknolojik yenilikler sayesinde işlemin hassasiyeti artarken operasyonel verimlilik de en üst düzeye çıkarılmaktadır (Zarembski, 2005).

1.4.1. Yüzey kusurlarının kontrolü

Ray başının üst yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar, mekanik dayanımı düşürerek güvenlik risklerine ve operasyonel verimsizliklere yol açabilmektedir. Bu nedenle, ray yüzeyinde oluşan kusurların etkin bir şekilde tespit edilmesi ve uygun taşlama teknikleriyle giderilmesi, demiryolu sistemlerinde sürdürülebilirlik ve uzun ömür açısından büyük önem taşımaktadır (Zarembski, 2005, s. 59-68).



Görsel 1.3. Kusur türleri (Başaran, Akbayır, Fidan, Sertsöz, & Öztürk, 2024)

Ray başı yüzeyinde oluşan kusurların giderilmesi süreci, geleneksel olarak “ray düzeltme” olarak adlandırılan yöntem kapsamında ele alınmaktadır. Geleneksel ray düzeltme işlemi, esas olarak, yüzeyde oluşan aşınmaların ve deformasyonların belirli standartlara göre düzeltilmesini kapsayan bir taşlama işlemidir. Bu süreç, ray başındaki yüzey kusurlarını gidererek, demiryolu araçları ile ray arasındaki dinamik etkileşimi optimize eder ve böylece aşırı yüklemelerden kaynaklanan olumsuz etkileri en aza indirir (Zarembski, 2005, s. 59-68).

Ray taşlamanın geleneksel odak noktası, ray başının üst yüzeyindeki kusurların kontrolüdür (Schoech, 2009). Bu yüzey kusurları, dikey tekerlek-ray dinamik aktivitesinin başladığı alanlar olarak kabul edilir. Dolayısıyla, bu kusurların kontrolü, dikey dinamikleri, gürültüyü, titreşimi ve dikey darbe kuvvetlerini azaltır. Bu tür taşlama, geleneksel olarak kusurlar belirdikten sonra yapılan remedial (iyileştirici) bir işlem olarak kabul edilse de, preventif bakım taşlaması sayesinde kusurların daha erken tespit edilip giderilmesi sağlanmış ve bu da operasyonel etkileri ve maliyetleri azaltmıştır.

Planlı taşlama kullanımı, bu yüzey kusurlarının daha oluşmaya başladığı ve daha “sık” olduğu dönemde yakalanıp giderilmesini sağlar. Bu durum, bu kusurların neden olduğu dinamik yüklerin ve ray ile diğer iz yapısındaki zararların azaltılmasına yol açar (Malkin ve Guo, 2008).

Bazı durumlarda, belirli yüzey kusurlarının gelişimi, örneğin düşük ray oluklanmaları (genellikle yük demiryollarında görülür), profil taşlama kullanımı ile önemli ölçüde yavaşlatılmış veya tamamen engellenmiştir (Darafon, Warkentin ve Bauer, 2013). Modern uygulamalarda, yüzey kusurlarının kontrolü için taşlama genellikle profil taşlama ile birleştirilerek daha kapsamlı bir ray taşlama faaliyeti oluşturulmaktadır. Ayrıca, profil taşlama ile daha temiz, daha dayanıklı ray çeliklerinin ve/veya gelişmiş yağlama uygulamalarının kullanılmasıyla da ek faydalar elde edilmiştir.

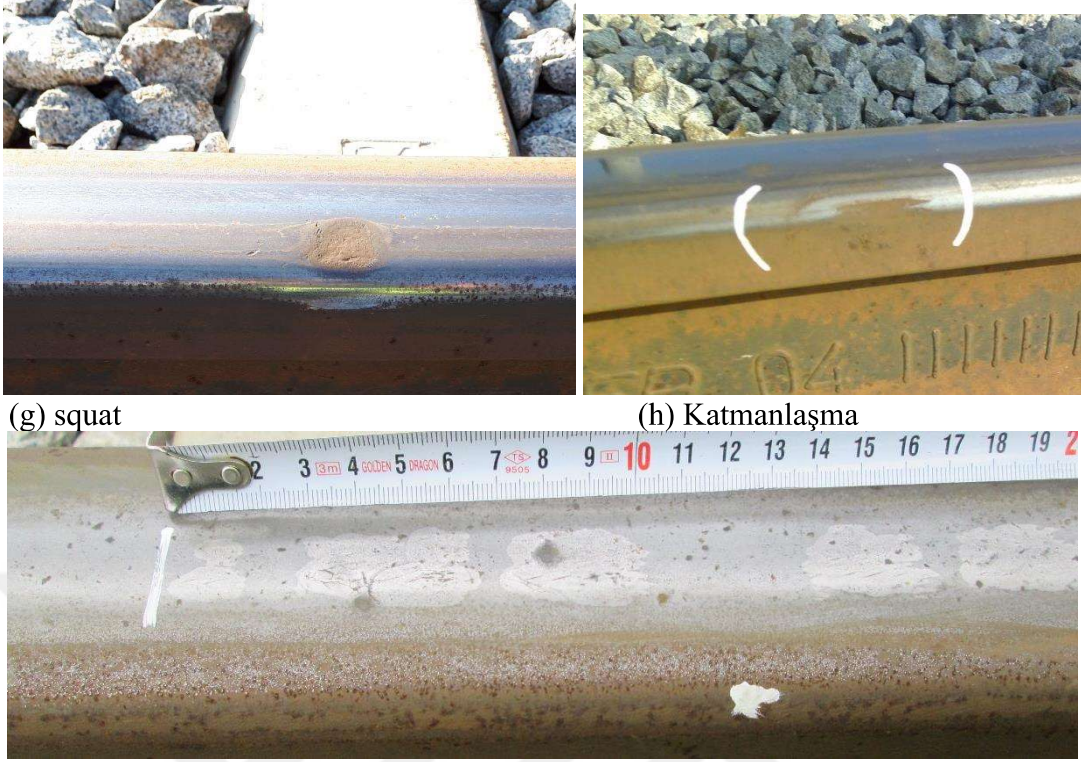
Ray başındaki yüzey kusurlarının kontrol edilmemesi durumunda, demiryolu sisteminde çeşitli mekanik ve dinamik olumsuzluklar meydana gelmektedir. Özellikle dikey tekerlek-ray etkileşimi, yüzey kusurlarının bulunduğu noktalarda ani darbelere ve düzensiz titreşimlere neden olabilir. Bu tür darbeler, zamanla rayın mekanik yorgunluğunu artırarak çatlak oluşumuna yol açabilir. Ayrıca, ray yüzeyinde düzensizliklerin oluşması, tekerleklerde düzensiz aşınmalara sebep olarak bakım maliyetlerini artırabilir (Cao vd., 2013, s. 937-945).

Bununla birlikte, ray yüzeyindeki mikro seviyedeki deformasyonlar, gürültü seviyelerini yükselterek tren işletmeciliğinde konfor seviyesini düşürebilir. Ayrıca, titreşimlerin artması, demiryolu altyapısının genel dayanıklılığını olumsuz etkileyerek bakım periyotlarının sıklaştırılmasını zorunlu hale getirebilir. Bu nedenle, ray başındaki kusurların giderilmesi yalnızca güvenlik açısından değil, aynı zamanda işletme maliyetlerinin düşürülmesi açısından da büyük bir önem taşımaktadır. Ray yüzeyinde meydana gelen kusurlar, oluşum mekanizmalarına ve demiryolu işletmesine olan etkilerine bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu kusurların her biri, özel taşlama teknikleri gerektirmekte olup, etkin bakım süreçleri için önceden belirlenmiş protokollere uygun olarak giderilmektedir (Agarwal ve Rao, 2013, s. 65, 68-78).

TCDD hatlarında en çok karşılaştığımız ray kusurları görsel 1.4 de sınıflandırılmıştır.



Görsel 1.4. Ray yüzey kusurları örnekleri



(l) tekerlek yanığı

Görsel 1.4. (Devam) Ray yüzey kusurları örnekleri

Oluklanmalar (Ondülasyonlar): Oluklanmalar, özellikle yoğun yük taşımacılığının gerçekleştirildiği hatlarda, ray yüzeyinde meydana gelen tekrarlı tekerlek geçişleri sonucunda oluşan dalgalı aşınma şeklidir. Oluklanmalar, ray boyunca düzensiz yük dağılımına sebep olarak titreşim ve gürültü seviyelerinin artmasına yol açar. Bu tür deformasyonlar, yüksek hassasiyetli taşlama makineleri kullanılarak düzeltilmekte olup, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasıyla birlikte gürültü ve titreşim de kontrol altına alınmaktadır.

Belirli Anormallikler: Ray yüzeyinde, üretim süreçlerinden veya uzun süreli kullanım sonucu meydana gelen ray mantarı yüzeyinin ezilmesi/yassılaşma gözlemlenebilmektedir. Bu anormallikler, belirli bölgelere uygulanan lokal taşlama işlemleri ile giderilmektedir.

Motor veya Tekerlek Yanıkları: Elektrikli trenlerin yüksek akım geçişi nedeniyle ray yüzeyinde termal yanıklar oluşabilmektedir. Bu yanık bölgeler, ray başı malzemesinin mikro yapısını değiştirerek mekanik dayanımı olumsuz yönde etkileyebilir. Özellikle sıcaklık değişimlerinin neden olduğu metal yorgunluğu, ilerleyen süreçte çatlaklara yol açabilir. Bu tür kusurların giderilmesi için özel taşlama teknikleri ve ısıya dayanıklı aşındırıcı diskler kullanılmaktadır.

Darbe Almış ve/veya Uyuşmayan Ray Ek Yerleri: Ray ek yerlerinde meydana gelen hizalama sorunları, tekerleklerin ray üzerinde düzensiz hareket etmesine neden olarak darbe etkisi yaratır. Bu durum hem tekerleklerin hem de rayın daha hızlı aşınmasına sebep olur. Ek yerlerinde meydana gelen bu tür problemler, hassas taşlama işlemleri ile düzeltilerek yüzey pürüzlülüğü minimize edilir.

Kaynak Düzensizlikleri: Ray bağlantılarında uygulanan kaynak işlemleri, bazı durumlarda yüzeyde düzensizliklere sebep olabilir. Kaynak sonrası meydana gelen bu düzensizliklerin giderilmesi için düzgün profillemeye taşlaması uygulanmaktadır.

Ray Başı Hasarları: Ağır yük taşımacılığı, ray başında çeşitli çatlakların ve hasarların oluşmasına neden olabilir. Bu çatlaklar, zamanında müdahale edilmediğinde ray kırılmalarına yol açabilir. Ray başı hasarlarını gidermek amacıyla, taşlama işlemi katmanlı aşındırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmekte ve böylece rayın servis ömrü uzatılmaktadır.

Soyulma veya Pul Pul Dökülme (Shelly Noktalar): Shelly noktalar, ray başının yüzeyinde küçük çukurcuklar şeklinde oluşan malzeme kayıplarıdır. Özellikle ağır aks yüküne maruz kalan hatlarda sıkça görülmektedir. Bu tür hasarlar, kademeli taşlama yöntemi kullanılarak giderilmektedir.

Katmanlaşma (Ölçü Köşesi Katmanlaşması): Rayın iç kenarında meydana gelen bu tür katmanlaşmalar, genellikle uzun süreli yanal yüklemelerin bir sonucu olarak oluşmaktadır. Bu deformasyonların giderilmesi için yanal yüzey taşlama yöntemleri uygulanmaktadır.

Yüzey Darbesi / Ezilmiş Ray Başı: Yüksek hızlarda tekerlek darbeleri, ray başının belirli noktalarında ezilmeye ve deformasyona yol açabilir. Bu tür kusurlar, özel basınç kontrollü taşlama makineleri ile düzeltilmektedir.

Plastik Akış (Dudak, Akışkan Ray): Plastik akış, ray yüzeyinde malzemenin yanal olarak yer değiştirmesiyle oluşur. Bu tür deformasyonlar, ince hassas taşlama işlemleri ile giderilerek ray yüzeyi yeniden düzenlenmektedir.

Günümüzde, ray yüzey kusurlarının kontrolü için uygulanan taşlama işlemleri, yalnızca kusurların giderilmesine yönelik değil, aynı zamanda rayın genel profilinin korunmasını sağlayan bütünsel bir bakım stratejisi olarak uygulanmaktadır (Agarwal ve Rao, 2013, s. 65, 68-78). Profil taşlama: ray şekillendirme ve tekerlek-ray etkileşiminin yönetimi

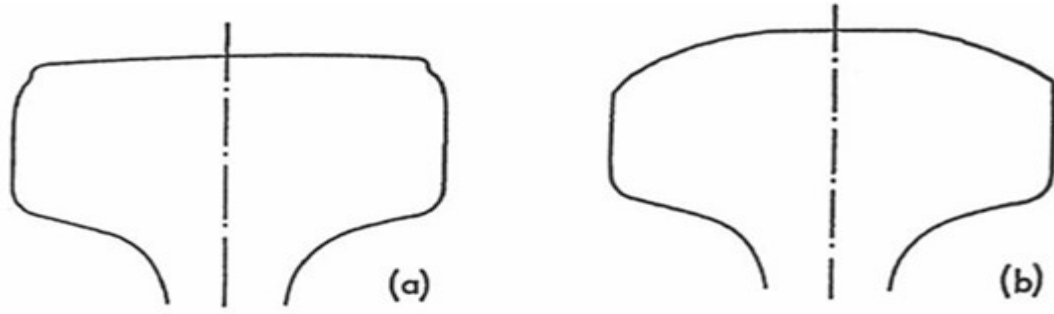
Ray profil taşlama, demiryolu hatlarında tekerlek ve ray arasındaki etkileşimi optimize etmek, aşınmayı azaltmak ve sistemin genel performansını artırmak amacıyla gerçekleştirilen kritik bir bakım sürecidir. Geleneksel taşlama yöntemleri genellikle ray yüzeyindeki kusurları gidermeye odaklanırken, profil taşlama ray başının belirli bir kontur veya profil kazanmasını sağlayarak demiryolu araçlarının ray ile olan temasını düzenlemeye yönelik bir mühendislik yaklaşımı sunar.



Görsel 1.5. Ray profil taşlama işlemi

Profil taşlama sayesinde, tekerlek ve ray arasındaki temas alanı optimize edilir, ray başının aşınma ömrü uzatılır ve sistemin güvenliği artırılır. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, yalnızca mevcut aşınmayı gidermekle kalmayıp ilerleyen aşınma süreçlerini de kontrol altına alarak öngörülebilir bir bakım stratejisi oluşturmaktır. Profil taşlama ile geleneksel kusur giderme taşlaması arasındaki en önemli farklardan biri, işlem sonucunda ray yüzeyinin sadece düzleştirilmesi yerine belirli bir kontur kazandırılmasıdır (Tepic, Tanackov ve Stojic, 2011, s. 379-384).

Geleneksel taşlama yöntemleri, ray başındaki aşınmaları ve düzensizlikleri gidererek yüzeyi pürüzsüz hale getirmeyi amaçlar. Ancak profil taşlama, ray başının özel bir forma getirilmesini sağlayarak, tekerlek ile ray arasındaki etkileşimi yönetmeye yönelik bir optimizasyon sunar.



(a) Kusur giderme taşlaması sonrası “düz” profil (b) Profil taşlama sonrası “konturlu” profil

Şekil 1.1. Ray Profili (Cannon & Pradier, 1996)

Görsel 1.3’te gösterildiği gibi, geleneksel taşlama genellikle ray yüzeyinde meydana gelen aşınma veya yüzey kusurlarını düzelterek yüzeyi düzleştirme eğilimindedir. Şekil 1.1 b’de ise profil taşlamanın ray başına belirli bir kontur kazandırarak, tekerlek ile ray arasındaki temas noktalarının düzenlenmesini sağladığı görülmektedir (Cannon ve Pradier, 1996, s. 191, 1-13).

Bu bağlamda profil taşlamanın sağladığı temel avantajları (International Union of Railways, 2002):

- Tekerlek ve ray arasındaki temas noktalarının optimize edilmesi, aşınmayı dengeli bir şekilde dağıtarak ray ömrünü uzatır.
- Titreşim ve gürültünün azaltılması, demiryolu sistemlerinde yolculuk konforunu artırır ve altyapı ömrünü uzatır.
- Tekerlek flanş aşınmasının kontrol edilmesi, ray bozulmalarını ve bakım maliyetlerini minimize eder.
- Yanal ve dikey yüklerin dengelenmesi, tekerlek ve ray arasındaki kayma ve sürtünmeyi azaltarak enerji verimliliğini artırır.

1.4.2. Profil taşlama süreçleri ve uygulama teknikleri

Profil taşlama, belirlenen ray profiline uygun olarak gerçekleştirilmesi gereken hassas bir işlemdir. Bu işlem sırasında kullanılan taşlama makineleri, bilgisayar kontrollü sistemler ve lazer tarama teknolojileri ile desteklenerek, hedeflenen profil doğrultusunda ray yüzeyine aşındırma işlemi uygulanır.

Profil taşlamanın bir diğer uygulaması, konvansiyonel üç parçalı yük vagonu bogisinin direksiyonunu geliştirmek ve böylece ölçü yüzeyi aşınmasını azaltmaktır. Bu uygulama, 1970’lerin sonlarında Batı Avustralya madencilik demiryolları tarafından

başlatılmış ve yüksek ve düşük raylar için ayrı profiller geliştirilmiştir (özellikle "avlanma" aşınmasının görüldüğü düz hatlar için) (Vesković vd., 2012, s. 221-224).

Bu profil taşlama kavramı, tekerlek setinin konisitesinden kaynaklanan direksiyonun geliştirilmesi amacıyla tasarlanmıştır (Vesković vd., 2012, s. 221-224). Bu konisiteden kaynaklanan tekerlek yarıçapları arasındaki farkı kullanarak, "yuvarlanma yarıçapı farkı" yardımıyla, eğri boyunca yüksek ve düşük raylar arasındaki uzunluk farkını telafi etmek mümkündür. Bu, dış tekerleğin, daha büyük yarıçaplı kısmında ve iç tekerleğin, daha küçük yarıçaplı kısmında kaymasını sağlar (Popović, Brajovic ve Puzavac, 2011, s. 17-29).

Bu, 3 dereceyi aşmayan eğrilerde flanş aşınmasını ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir (1:20 tekerlek konisitesine dayalı olarak) ve aslında Avustralya'da yapılan deneyler, bu uygulamanın aşınma ömründe %70 ile %80 arasında artış sağladığını bildirmiştir (Popović, Brajovic ve Puzavac, 2011). Son araştırmalar, Amerikan Demiryolları Birliği tarafından yapılan araştırmalar, tek noktalı uyumlu temas kullanılarak daha iyi eğri performansı (azaltılmış saldırı açısı ve tekerlek-ray aşınması ile kendini gösteren) elde edilebileceğini öne sürmektedir (International Union of Railways, 2007). Bu durum, her bir taşlama profilinin tüm ana ray sorunlarını çözmeyeceğini ve bu nedenle her bir belirli problem veya problem sınıfının seçilen taşlama profili ile başlanmadan önce tanımlanması gerektiğini de desteklemektedir.

Profil taşlamanın önemli bir bileşeni olan kontur taşlama, rayın orijinal profilini geri kazandırmaya yönelik bir işlemdir. Bu süreç, özellikle rayın doğal aşınma eğilimi nedeniyle zamanla kaybolan orijinal formunun yeniden elde edilmesini amaçlar. Profil taşlama ise orijinal ray formunun dışında özel bir profil oluşturmak için gerçekleştirilir. Bu, özellikle yüksek hızlı tren hatları, metro sistemleri ve ağır yük taşımacılığı yapılan hatlarda, ray başının belirli bir forma getirilerek tekerleklerle olan temasının optimize edilmesini sağlar. Profil Taşlama Teknikleri: Profil taşlama işlemi, kullanılan yöntemle bağlı olarak farklı tekniklerle uygulanabilir (Contuzzi, Campanelli ve Ludovico, 2011, s. 113-121).

- Düzlemsel Taşlama: Ray başının genel aşınmasını gidermek ve yüzeyde pürüzsüz bir yapı elde etmek için kullanılır.
- Kontur Taşlama: Ray başının orijinal tasarımına uygun olarak taşlanmasını sağlar.
- Özel Profil Taşlama: Ray başına spesifik bir form kazandırarak, tekerlek-ray etkileşimini yönlendirmek için kullanılır.

Profil taşlamanın en önemli fonksiyonlarından biri, tekerlek-ray temas noktalarını belirli bir düzende kontrol altına almasıdır. Doğru profil seçimi ve taşlama teknikleri sayesinde (Stock ve Pipan, 2011, s. 125-133).

- Aşınma hızının dengelenmesi sağlanır.
- Raydan kaynaklanan gürültü ve titreşim seviyeleri minimize edilir.
- Ray yüzeyi üzerindeki mikro çatlak oluşumu geciktirilir.

Profil taşlamanın uygulanması, demiryolu altyapısının ömrünü uzatırken bakım maliyetlerini de önemli ölçüde azaltır. Özellikle yüksek aks yüküne sahip hatlarda ve sık kullanım gerektiren metro sistemlerinde profil taşlama, ray deformasyonlarının kontrol altında tutulmasını sağlayarak operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Bu bağlamda profil taşlamanın demiryolu performansına olan katkıları:

- Ray aşınmasını azaltarak bakım periyotlarını uzatır.
- Trenlerin enerji tüketimini düşürerek işletme maliyetlerini minimize eder.
- Yolcu konforunu artırarak ray yüzeyi kaynaklı titreşimleri ve gürültü seviyesini düşürür.
- Demiryolu altyapısının uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlar.

Profil taşlamaya başlamadan önce, ele alınacak problem veya problem sınıfının dikkatlice belirlenmesi gerekir. Her durumda, taşlanmış profillerin trafikle birlikte zamanla bozulduğu unutulmamalıdır. Yapılan bir testte, test edilen profiller yalnızca 10 MGT (yağlanmamış ağır aks yükü taşıyan yük trenlerinde) dayanabilmiş ve 20 MGT trafik sonrasında tamamen kaybolmuştur. Bu, profillerin sürekli bakım gerektirdiğini ve ray bakım taşlamanının düzenli ve belirli aralıklarla yapılması gereken sürekli bir faaliyet olduğunu göstermektedir.

1.5. Ray Yorgunluğunu Kontrol Etmek İçin Profil Taşlama

Profil taşlama, ray başının kesitsel şeklinin (profil) taşlama yoluyla kontrol edilmesi yöntemini ifade eder ve bu, yüzey yorgunluğu kusurlarını kontrol etmek için kullanılmıştır. Bu kusurlar, yüksek rayın ölçü köşesinde soyulma, düşük rayın orta kısmında çatlama ve yüksek rayın ölçü köşesinde katmanlaşma (shelling) gibi alt yüzey yorgunluğu kusurlarını içerir. Bu kusurlar, genellikle ağır aks yükü taşıyan yük taşımacılığı operasyonlarında görülür ve Kuzey Amerika yük demiryolları tarafından en sık bildirilen fayda alanını temsil eder.

Profil taşlamanın önemli bir uygulaması, flanş aşınmasına yol açabilecek şiddetli eğrilerde yüksek rayın ölçü köşesinde tek noktalı temasın neden olduğu yüksek temas gerilmelerini kontrol etmektir. Bu yüksek gerilmeler, ölçü köşesinde yorgunluk sorunlarına, çatlama ve soyulmaya yol açabilir. Yüksek rayın ölçü köşesi taşlanarak, bu temas noktası bu köşeden uzaklaştırılır ve ray başının daha merkezi bir konumuna kaydırılır. Daha keskin eğrilerde, flanş ile rayın ölçü yüzeyi arasında ikinci bir temas noktası oluşabilir ve bu da "iki noktalı" temas meydana getirir. Bu, tekerlek-ray temas alanını iki noktaya böler ve her bir noktadaki temas gerilmesini azaltır, bu da hem yüzey yorgunluğu soyulmasını hem de alt yüzey yorgunluğu katmanlaşmasını (shelling) azaltabilir (Contuzzi, Campanelli ve Ludovico, 2011, s. 113-121). Bu ölçü köşesi taşlama yaklaşımı, yüzey yorgunluğu nedeniyle zarar görmüş ray çeliğinin aşındırılarak ortadan kaldırılmasına ve maksimum ray gerilmesi noktası (içteki) yeniden konumlandırılmasına olanak tanır. Bu, iyi yağlanmış raylar veya yüksek sertlikte ray çelikleri kullanıldığında, aşınma oranı önemli ölçüde azaldığı için özellikle önemlidir.

Ancak, son araştırmalar, tekerlek-ray temasındaki bu değişikliğin, bir noktalı temastan iki noktalı temasa geçişin, boji dönüş performansında bozulmalara yol açabileceğini ve buna bağlı olarak tekerlek-ray flanş kuvvetlerinde bir artışa neden olabileceğini öne sürmektedir (International Union of Railways, 2007). Bu da ölçü köşesi aşınmasında artışa yol açabilir, eğer başka bir önlem alınmazsa. Bu nedenle, bu tür ölçü köşesi profil taşlaması, özellikle ray yorgunluğu ve flanş aşınmasının ön planda olduğu bölgelerde kullanılmalıdır.

1.6. Taşlama Yöntemi ile Ray Aşınmasının Azaltılması

Ray profil taşlamanın, tekerlek-ray etkileşimini, temas noktalarını ve dolayısıyla ray aşınmasını kontrol etmek amacıyla kullanımı, 1970'lerin sonlarında Batı Avustralya'daki madencilik demiryollarında geliştirilmiş ve uygulanmıştır (Johansson ve Nielsen, 2003). 1980'lerin başında Kuzey Amerika'da ilk tam otomatik ray taşlama treni RMS-1 ile tanıtılmıştır (Papaelias, Roberts ve Davis, 2008, s. 367–384). Bu ilk profil taşlama uygulamasının odağı, geleneksel üç parçalı yük vagonu boji takımlarının yönlendirilmesini optimize etmek olmuştur (Cannon vd., 2003, s. 865–886).

Sonuç olarak, asimetrik ray başı profilleri geliştirilmiş, yani yüksek ve düşük raylar için ayrı profiller belirlenmiştir. Ayrıca, düz hatlarda görülen "hunting" aşınmasını kontrol etmek amacıyla özel profiller tasarlanmıştır. Profil taşlama konsepti, tekerlek

takımının konik yapısından kaynaklanan yönlendirme etkisini kullanacak şekilde geliştirilmiştir, Bu koniklik nedeniyle, dış tekerlek daha büyük yarıçaplı bölgeye, iç tekerlek ise daha küçük yarıçaplı bölgeye oturur. Buna "yuvarlanma yarıçapı farkı" denir ve yüksek ray ile düşük ray arasındaki uzunluk farkını telafi etmeye yardımcı olur (Ağlan ve Fateh, 2006, s. 393–410). Bu durum, tekerlek takımının kaymasını ve uzunlamasına "sürünme" kuvveti oluşmasını sağlar. Bu kuvvet, aksları radyal konuma yönlendirmeye yardımcı olarak dar virajlarda flanş aşınmasını azaltır ve 3 dereceden küçük eğrilerde tamamen ortadan kaldırabilir (1:20 tekerlek konikliği baz alınarak) Avustralya'daki uygulamalarda %70-80 oranında daha uzun ray ömrü sağladığı rapor edilmiştir (Australian Rail Track Corporation, 2009).

1.7. Ray Taşlamada Yağlama İşlemi

Ray bakım taşlaması, etkili yağlama, kaliteli ray kullanımı, hata testleri ve rayın ilk pozisyonunda maksimum ömrünü elde etme arzusu ile bütünleşmiş bir genel ray bakım programının parçası olarak en iyi şekilde kullanılır (Fan, Dixon, Edwards ve Jian, 2007).

Bu, özellikle orta ve ağır eğrili hatlarda ağır yük taşıyan demiryolu sistemlerinde bulunan sert ray bozulma ortamı için doğrudur. Yağsız veya yetersiz yağlanmış hatlarda, ray bozulması genellikle eğrinin yüksek rayında şiddetli yapışkan aşınma şeklinde olur ve ray aşınması, ray değiştirme işleminin ana nedeni haline gelir. Ancak, iyi yağlanmış hatlarda, ray aşınması önemli ölçüde azalır ve bu da ray üzerinde yorgunluk "hasarının" birikmesine ve yüzey (ve alt yüzey) yorgunluğu gelişmesine olanak tanır (örneğin, yüksek rayın ölçü köşesi gibi) (Song vd., 2011, s. 546-550).

Ray ömrü ile yağlama arasındaki bu ilişki, Pueblo, Colorado'daki FAST test parkurunda yapılan kontrollü testlerin sonuçlarını gösteren Şekil 3'te açıkça görülmektedir (Thomas, Dey ve Heyder, 2010, s. 361–365). Yağsız bir ortamda, bu eğrideki ray, 80-100 milyon ton (MGT) ağır aksiyonlu trafik sonrasında değiştirilmesi gerekti. Ancak ray tamamen yağlandığında, aşınma hızı 10 kat azalarak, aynı trafik koşullarında rayın 1000 MGT ömrü olduğu öngörüldü. Ancak, bu uzatılmış aşınma ömrü sağlanmadan önce, ray ciddi yorgunluk hataları yaşamaya başladı ve %5 hata seviyesine (bu, birçok demiryolunun aşırı yorgunluk hataları nedeniyle ray değiştirdiği nokta) yaklaşık 180 MGT sonra ulaşılmıştı, bu da rayın 1000 MGT'lik potansiyel aşınma ömründen çok önceydi (Takahashi vd., 2009, s. 240–247).

Rayın aşınma ömrü potansiyeline daha yakın bir şekilde yaklaşabilmesi için, biriken ray yorgunluğunun kontrol edilmesi gereklidir. Ray profil taşlaması, maksimum tekerlek-ray temas gerilmelerini azaltarak ve yorgunluk hasarına uğramış metalin yorgunluk hataları gelişmeden önce uzaklaştırılması ile rayın yorgunluk ömrünü uzatma potansiyeline sahiptir. Gerçekten de test verileri, profil taşlamanın, eğri rayının yorgunluk ömrünü 300 ile 400 milyon ton (MGT) arasında uzatma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Haidemenopoulos vd. 2006). Bu, rayın ömrünün bir kat daha uzatılması anlamına gelir ve demiryolu için önemli bir ekonomik fayda sağlar.

1.8. Profil Taşlamanın Faydaları

Ray bakım taşlaması, ray performansında iyileşmelere ve ray ömründe artışa yol açtığı kanıtlanmıştır. Bu ray ömrü uzaması, genellikle ray metalurjisi, çelik temizlik standartları, yağlama uygulamaları vb. alanlardaki iyileştirmelerle birlikte görülse de çoğu zaman izole edilmesi zordur. Ancak, ray taşlaması, ölçülebilir ray ömrü uzamaları ve ray performansındaki iyileşmelerin yanı sıra, azalmış dinamik tekerlek-ray yüklemesi ile ilişkili ikincil faydalar sağlamaktadır (Esveld, 2001).

Ray taşlamanın etkisi, çoğu zaman ray çeliklerinde ve yağlama uygulamalarındaki eşzamanlı iyileştirmeler nedeniyle "gizli" kalabilse de birkaç demiryolu şirketi ray ömründe önemli artışlar kaydedebilmiştir. Bu artışı büyük ölçüde ray profil taşlamasına atfetmişlerdir. Bu, Burlington Northern Railroad örneğinde olduğu gibi, burada ortalama ray ömründe %50 ile %300+ oranında iyileşmeler rapor edilmiştir ve bu uzamanın ana faktörü olarak ray taşlaması belirtilmiştir (Kerr, 2012). Canadian National Railways de, artan yağlama, iyileştirilmiş ray çelikleri ve ray profil taşlamanın kombinasyonu sayesinde ray ömründe bazen %500'e kadar önemli artışlar rapor etmiştir. Ayrıca, düzenli olarak doğru taşlama yapılmadığı takdirde rayın "potansiyel hizmet ömrünün %95'ini kaybedebileceğini" belirtmişlerdir.

CP Rail örneğinde, ray taşlamanın ray ömrü üzerindeki etkisi Şekil 4'te açıkça görülmektedir (Kerr, 2012). Bu şekil, 1987 ile 1995 yılları arasındaki yeni ray döşeme mesafelerinde dramatik bir azalma gösterirken, aynı dönemde ray taşlama mesafesindeki artışı doğrudan yansıtmaktadır. Diğer faktörler, örneğin iyileştirilmiş yağlama ve metalurji, yeni ray ihtiyacındaki bu önemli azalmaya katkıda bulunmuş olsa da CP, ray taşlamasını ray hizmet ömrünün dramatik bir şekilde uzamasındaki kilit faktör olarak kabul etmektedir (Hesse ve Cawley, 2007, s. 318–326).

1.9. Profil Taşlamasında Karşılaşılan Sorunlar

Ray profil taşlaması, demiryollarına ray ömrü uzaması ve ray yapısı ile taşıma araçlarına zararların azaltılması gibi belirgin faydalar sağlasa da taşlama işlemi, tekerlek-ray temas ortamını değiştirerek uygun şekilde ele alınmadığı takdirde istenmeyen davranışlara yol açma potansiyeline sahiptir (Dornfeld, 2014, s. 63-66).

Bu tür endişe verici bir alan, tekerlek-ray temas noktalarındaki değişimle ilişkili yönlendirme kuvvetlerindeki değişikliklerdir. Daha önce belirtildiği gibi, tekerlek-ray temasını tek nokta temasından iki nokta temasına değiştirmek, vagon dönüş performansında kötüleşmeye yol açabilir ve bununla birlikte tekerlek-ray flanş kuvvetlerinde bir artışa neden olabilir. Bu da ray yüzeyinin aşınmasını artırır ve özellikle virajlarda rayın devrilme potansiyelini yükseltir. Bu durum, özellikle hem yüksek hem de düşük rayların kuru olduğu (örneğin, ray taşıyıcının hemen arkasında) veya yüksek rayın yağlanmış, düşük rayın kuru olduğu bir ortamda (bu durum yüksek yan yükler oluşturur) endişe verici olabilir (Choi vd., 2013, s. 619-625).

Ancak, daha önce belirtildiği gibi, iki nokta taşlaması, ray yorgunluğunu kontrol etmede en etkili yöntemdir. Dolayısıyla, eğer ana ray değiştirme kriteri yorgunluksal bozulmalar ise, yorgunluğun kontrol edilmesi, aşınmanın artmasına rağmen daha önemli olabilir. Bu durum, Burlington Northern Railroad'da 1984 ile 1995 yılları arasında yapılan ray taşlaması ile yorgunluk (detay kırılmaları) arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır Darafon vd. (2013, s. 1715-1724.) 1983 ile 1988 yılları arasında Burlington Northern, temel bir "iki nokta" temas yapılandırması kullanarak profil taşlaması yapmış ve detay kırılmalarının oranını nispeten düşük tutmuştur. 1988 ile 1990 yılları arasında, Burlington Northern daha hafif bir "uyumlu" taşlama modeline geçmiş ve bunun sonucunda detay kırılma hatalarının artışını ve 6,5 milyon doları aşan maliyetle bazı ray kırılmalarını içeren kaza oranlarını gözlemlemiştir (1990 ile 1991 yılları arasında Burlington Northern, daha agresif bir "iki nokta" profil taşlamasına geri dönmüş ve tekrar detay kırılma türündeki yorgunluk hatalarında bir azalma yaşamıştır (Agarwal ve Rao, 2013, s. 68-78).

2. YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde taşlama işlemi için kullanılan ekipmanlar tanıtılmış ve özellikleri sunulmuştur. Ray taşlama, ray yüzeyindeki düzensizlikleri gidererek trenlerin güvenli ve konforlu bir şekilde seyretmesini sağlamak ve rayların hizmet ömrünü uzatmaktadır. Ray taşlama işlemlerinde çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Bu kapsamda LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi, Mecno Service Ms20s, RGH 20 C Model Taşlama Makinesi, DQM, RMF ve Wilmec cihazları ayrı alt başlıklar olarak ele alınmış ve kullanılan araçlar aşağıda sunulmuştur.

2.1. Loram Rgi 8 Ray Taşlama Makinesi

LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi, demiryolu hatlarında ray profilinin korunması ve yüzey kusurlarının giderilmesi amacıyla kullanılan ileri teknoloji bir bakım aracıdır. Bu makine, özellikle yüksek hızlı ve yoğun kullanıma maruz kalan hatlarda rayların ömrünü uzatmak, sürüş güvenliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için tasarlanmıştır. LORAM RGI-8'in fiziksel ölçüleri uygulamaya göre değişebilmekle birlikte, yaklaşık 10,1 fit (3,3 metre) genişliğinde ve 13,8 fit (4,2 metre) yüksekliğindedir. Makinenin aks başına düşen maksimum ağırlığı 24,8 ton olup bu değer, ray altyapısının taşıma kapasitesine göre optimize edilmiştir. Bu sayede hem yüksek taşlama kapasitesi sağlanmakta hem de altyapıya zarar vermeden operasyon yapılabilir. Makinenin çekirdeğini oluşturan taşlama sistemi, 16 adede kadar bağımsız öğütme motoruyla donatılmıştır. Her motor, yaklaşık 30 ile 40 beygir gücünde (22–30 kW) olup kendi taşlama diskine enerji sağlar. Bu yapı, farklı ray profillerine ve aşınma tiplerine göre özelleştirilebilir taşlama stratejileri uygulanmasına olanak tanır. Taşlama sırasında makinenin hareket hızı yaklaşık 3–32 km/saat arasında değişebilirken, taşlama işlemi sırasında bu hız yaklaşık 3–11 km/saat düşürülerek işlem hassasiyeti artırılır. Geniş taşlama açısı kapasitesi ($\pm 7^\circ$ eksenel dönme ve 100° toplam taşlama alanı) sayesinde makine, ray başında homojen bir taşlama profili oluşturabilir ve özel aşınma durumlarına müdahale edebilir. Aşağıda yer alan şekilde LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi görülmektedir.



Görsel 2.1. *LORAM RGI-8 ray taşlama makinesi (Loram, 2023)*

2.2. Mecno Service Ms20s

Mecno Service taşlama makinelerinin en dikkat çekici özelliği, firmaya özgü patentli tanjansiyel aşındırıcı disk sistemi ile donatılmış olmalarıdır. Bu sistem, ray profiline mükemmel uyum sağlayarak yüksek taşlama kalitesi sunmakta ve aynı zamanda taşlama işlemi sırasında oluşabilecek mikro çatlakları minimize etmektedir. Tanjansiyel taşlama diskinin açılı yerleşimi sayesinde, rayın baş kısmına homojen bir temas sağlanarak daha dengeli ve kontrollü bir taşlama işlemi gerçekleştirilir. Aşağıda Mecno Service Ms20s taşlama makinesi verilmiştir. (Mecno Service, 2023).



Görsel 2.2. *Mecno Service Ms20s (Mecno Service, 2023)*

2.3. RGH 20 C Model Taşlama Makinesi

Taşlama projeleri kapsamında Eskişehir 82 DBM, Harsco marka RGH 20 C model taşlama makinesi ile yürütülen bir ray taşlama projesidir. Bu makine, TS EN 13231-5 standardına uygun şekilde geliştirilmiş olup hem sıcak hem de soğuk demiryolu hatlarında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kendinden tahrikli yapısı sayesinde, harici bir çekici araca ihtiyaç duymadan raylar üzerinde serbest hareket edebilir. Üzerinde entegre edilmiş çeşitli ölçüm sistemleriyle donatılmış olan bu makine, yalnızca taşlama değil aynı zamanda taşlama öncesi ve sonrası ölçüm işlemlerini de gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Makine üzerinde toplam 20 adet taşlama taşı bulunmaktadır. Bu taşlar, ray başı profilini istenilen geometrik forma getirmek ve yüzeydeki düzensizlikleri gidermek için senkronize şekilde çalışır. Ölçüm sistemleri açısından oldukça donanımlı olan Eskişehir 82 DBM, hem boyuna hem de enine profil ölçümü yapabilen “on-board” sistemlerle donatılmıştır. Bu sistemler, taşlama öncesi ray yüzeyinin durumunu belirleyip işlem sonrası değişiklikleri karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Taşlama sonrası yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde de gelişmiş sistemler kullanılmaktadır. Pürüzlülük ölçümü, taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazları ile gerçekleştirilmekte, bu sayede taşlama sonrası yüzeyin mikrometrik düzeyde incelenmesi sağlanmaktadır. Aşağıda RGH 20 C Model Taşlama Makinesi sunulmuştur.

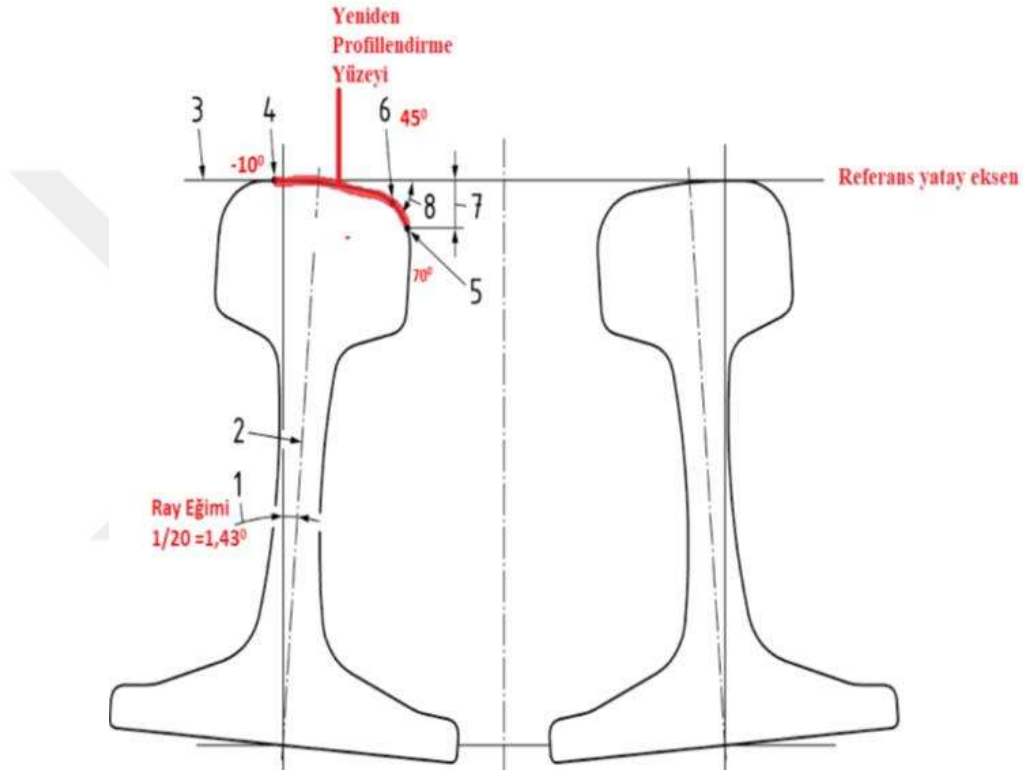


Görsel 2.3. *RGH 20 C model taşlama makinesi (railway, 2024)*

2.4. DQM

DQM (Dynamic Quality Measurement) cihazı, ray yüzeyindeki geometrik kusurları ve düzensizlikleri tespit eden bir cihazdır. DQM cihazı, demiryolu raylarının enine kesit profilini yüksek hassasiyetle ölçmek amacıyla kullanılan gelişmiş bir ölçüm ekipmanıdır. Ray taşlama işleminin etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, taşlama öncesi ve sonrası ray yüzeyindeki geometrik değişikliklerin belirlenmesi için DQM cihazı ile sahada doğrudan ölçümler yapılmıştır. DQM cihazı, rayın enine kesitini tarayarak, profil bozulmaları, aşınma düzeyi ve yüzey düzgünlüğü gibi parametreleri dijital olarak kaydetmektedir. Bu sayede, rayın zaman içindeki deformasyonları, taşlama işleminin fiziksel etkileriyle birlikte değerlendirilebilmektedir. DQM'ye ek olarak DQM3 Dijital Kesit Ölçüm Sistemi de gelişmiş ölçüm cihazlarından biridir. DQM3, demiryolu sahasında doğrudan ray başı kesitlerini yüksek hassasiyetle ölçmeye olanak tanıyan taşınabilir bir cihazdır. Cihaz, Bluetooth teknolojisi üzerinden tablet bilgisayara bağlı olarak çalışmakta, ölçüm verilerini anlık olarak işleyip görselleştirmektedir. $\pm 0,05$ mm altında ölçüm belirsizliği ile hassas sonuçlar sunmaktadır. DQM3 sistemi, lazer destekli profil tarayıcısı ile temassız bir biçimde ray yüzeyindeki deformasyonları ölçer. Ayrıca isteğe bağlı DGM modülü sayesinde hat açıklığı da dijital olarak ölçülebilmektedir.

(Daimer, 2017). Ölçüm sürecinde elde edilen veriler, rayın yüksekliği, omuz ve taban bölgelerindeki profil değişimleri ile, taşlama sonrası hedeflenen yüzey standardına ne ölçüde yaklaşıldığını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Bu doğrultuda mevcut çalışmada DQM cihazından elde edilen yüksek çözünürlüklü enine kesit profilleri, ray taşlama uygulamasının fiziksel etkilerini sayısal olarak ortaya koymada temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Enine profil ölçümleri ve rayın profilendirilmesi

2.5. RMF

RMF (Rail Measurement Framework) cihazı, demiryolu ray yüzeyindeki ondülasyon (periyodik dalga tipi deformasyonlar), mikro-geometrik düzensizlikler ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreleri mikrometre hassasiyetinde ölçebilen gelişmiş bir analiz sistemidir. Bu cihaz, özellikle ray taşlama işlemi sonrası yüzey kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. RMF cihazı, ray yüzeyini sensörlü bir ölçüm kafasıyla lineer olarak tarayarak, dalga boyu, yükseklik ve derinlik bazında 2D yüzey profili oluşturur. Ölçülen veriler, gelişmiş filtreleme algoritmaları sayesinde dalga boylarına göre ayrıştırılarak, yüzeydeki bozulmalar detaylı şekilde analiz edilir. Bu çalışmada RMF, taşlama işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere aynı ray segmentinde (sağ

hat yönü) karşılaştırmalı analiz için kullanılmıştır. Bu çalışmada, ölçüm tarihi 8 Mart 2025 olup, ölçüm yapılan ray bölgesi 399,87 metrelik bir kesittir. Cihazın elde ettiği veriler sayesinde ray yüzeyindeki ondülasyon seviyeleri mikrometre bazında tespit edilmiş, taşlama işleminin fiziksel etkinliği sayısal olarak belgelenmiştir. Özellikle farklı dalga boyu filtreleriyle yapılan analizler, taşlama sonrası yüzey düzgünlüğündeki iyileşmeyi ve bakım stratejilerinin doğruluğunu gözler önüne sermiştir. RMF cihazından elde edilen ölçüm çıktıları, yalnızca mevcut yüzey durumunu analiz etmekle kalmayıp; aynı zamanda gelecekteki bakım ve taşlama planlarının optimize edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Böylelikle, trenlerin sürüş konforu, hız güvenliği ve ray ömrü gibi kritik performans parametreleri açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Ölçüm, EN 13231-3:2012 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. EN 13231-3:2012 standardı, demiryolu raylarının tekrar profillendirilmesi (örneğin taşlama yoluyla) sonrasında yapılması gereken geometrik ve yüzeysel ölçümlerin nasıl yapılacağını ve bu ölçümlere dair kabul kriterlerini belirleyen Avrupa standardıdır. Bu standart, 40 kg/m ve üzerindeki raylar için geçerli olup sadece taşlama işleminin uygulanma yöntemini değil, aynı zamanda uygulama sonrası değerlendirilecek fiziksel parametreleri ve bu değerlere ilişkin kabul sınıflarını da tanımlamaktadır. Rayların hem boyuna hem de enine yönlerde geometrik doğruluğunun sağlanması, yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesi ve işlem sırasında kaldırılan metal miktarının sınırlandırılması temel amaçlar arasında yer almaktadır. Standartta göre, boyuna profil değerlendirmesi dalga boyu aralıklarına göre (örn. 10–30 mm, 30–100 mm, 100–300 mm, 300–1000 mm) yapılmakta ve üç farklı ölçüm yaklaşımı ile kabul sınırları belirlenmektedir; hareketli ortalama RMS genlik, hareketli ortalama tepeden tepeye genlik ve belirli bir limit değeri aşan düzensizliklerin sayısıdır. Kabul edilen sınıflandırmalara göre, Sınıf 1 daha yüksek yüzey kalitesi ve düşük ondülasyon seviyesi gerektirirken, Sınıf 2 ekonomik nedenlerle daha esnek toleranslar sunmaktadır. Örneğin, 30–100 mm dalga boyu aralığında RMS genlik limitleri 0,004 mm olarak belirlenmiş ve bu değeri aşan alanlar, yolun %5'inden fazlasını oluşturmamalıdır. Tepeden tepeye genlik için aynı aralıkta 0,010 mm sınırı konmuş ve benzer şekilde kabul oranı %5 ile sınırlandırılmıştır. Eğer bu değerlerin üzerinde sapmalar varsa, ray taşlama işlemi ilgili kesitte reddedilir ya da yeniden işlem yapılması gerekebilir. Enine profil değerlendirmelerinde ise ölçülen ray profili, referans profille karşılaştırılır ve sapmalar ölçülür. Burada da Sınıf Q, Sınıf R ve Sınıf S olmak üzere üç sınıflandırma yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarında örneğin 0,6 mm sapma sınırının %90'ını geçmeyen bir sonuç Sınıf

Q için kabul edilirken, daha geniş toleranslar Sınıf R ve S için tanımlanmıştır. Taşlama sırasında kaldırılan metal miktarı için belirli bir tolerans aralığı öngörülmüş olup, bu miktarın alt ve üst sınırları sözleşme bazlı belirlenmektedir. Ölçümler, ISO 3611 standardına uygun mikrometrelerle gerçekleştirilmekte ve rayın belirli noktalarında tekrar profillemeye öncesi ve sonrası yapılan karşılaştırmalarla metal kaybı hesaplanmaktadır. Genellikle ray tepesinden 15 mm içeriye kadar olan bölgede yapılır ve 5 noktada ölçüm yeterli kabul edilmektedir. Fazla metal kaldırılması halinde rayın yapısal bütünlüğü tehlikeye girebileceğinden, bu durumda işlem reddedilir. Son olarak, yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesi ISO 4287 ve ISO 4288 standartları uyarınca Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) parametresi ile yapılır. Ölçüm sonucu Ra değeri genellikle 10 µm sınırını aşmamalıdır. Ölçülen altı farklı noktadan yalnızca biri bu sınırı geçebilir. Eğer bu değer %16'sından fazlası bu sınırın üzerinde ise taşlama işlemi başarısız sayılır. Bu kapsamda, taşlama sonrası yapılan görsel değerlendirme de dikkate alınarak ray yüzeyinde sürekli, düzgün ve talaşsız bir yapı beklenir. Bu kriterler, taşlama işleminin yalnızca yüzey düzleştirme değil, aynı zamanda ray profilinin uzun ömürlü, güvenli ve düşük titreşimli bir hale getirilmesini sağlayan hassas bir mühendislik süreci olduğunu göstermektedir. EN 13231-3:2012 standardına uygun şekilde değerlendirilmesini sağlayan onaylı bir diğer ölçüm sistemi de RMF1100 – Mobil Ray Ondülasyon Ölçüm Sistemi'dir. Cihaz, ray yüzeyini 2 mm aralıklarla tarayarak dalga boyları 10 mm ile 1000 mm arasında olan ondülasyonları belirler. Tekerlekli sensör sistemi sayesinde rayın gerçek primer profilini yakalayabilmekte, bu da sapma ve deformasyonların ayrıntılı analizini mümkün kılmaktadır (Vogel ve Plötscher, 2025).



Görsel 2.4. Ölçüm cihazları (Daimler, 2017) (Vogel & Plötscher, 2025)

Wilmec ise, ray taşlama işlemi sonrasında yüzeyden çıkarılan metal miktarını hassas bir şekilde ölçmek için tasarlanmış bir cihazdır. Wilmec, taşlama işlemi sırasında metal kaldırma miktarını yüksek hassasiyetle belirleyerek, taşlama işleminin etkinliğini ve işlem sırasındaki malzeme kaybını sayısal verilerle raporlamaktadır. Bu cihaz, taşlama sonrasında kalan talaş miktarını ölçerek, fazla metal kaldırılmasının önlenmesine ve işlem sırasında optimum metal kaybı seviyesinin belirlenmesine yardımcı olur. Bu veriler, rayın yapısal bütünlüğünü korumak ve ray ömrünü uzatmak için bakım planlamasında kritik rol oynamaktadır. Ayrıca, metal kaldırma miktarının doğru ölçülmesi, taşlama işlemi sırasında ray yüzeyinde gereksiz aşınma ya da malzeme kaybının engellenmesini sağlar. Çalışma kapsamında elde edilen Wilmec verileri ETM-01-02 (Avustralya Demiryolu Taşlama Standardı) standardı kapsamında değerlendirilmiş olup, taşlama işleminin hedeflenen düzeyde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini kontrol etmek ve gelecekteki

bakım faaliyetlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmıştır. ETM-01-02 standardı ray taşlama işleminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla ray yüzeyinden kaldırılan metal miktarının ölçülmesini zorunlu kılmaktadır. Standartta özellikle temas bölgesindeki deformasyonların giderilmesi ve ray profilinin yeniden kazandırılması amacıyla, her taşlama döngüsünde minimum 0,2 mm'lik metalin kaldırılması gerektiği açıkça belirtilmiştir. Bu gereklilik, taşlama işleminin yalnızca yüzeyde kozmetik düzeltmeler yapmakla kalmayıp, aynı zamanda raydaki yapısal kusurların giderilmesini hedeflediğini göstermektedir. Wilmec ETM cihazı, ray yüzeyinden kaldırılan bu metal miktarını yüksek hassasiyetle ($\pm 0,01$ mm toleransla) ölçerek, taşlama işleminin bu gereklilikleri sağlayıp sağlamadığını doğrulamayı sağlamaktadır. Cihaz, ray üzerinde belirli aralıklarla (örneğin her 5 veya 10 metrede bir) yapılan ölçümlerle, taşlama derinliğinin ray boyunca homojen olup olmadığını da ortaya koyaktadır. ETM-01-02 standardında, taşlama sonrası yüzey yüksekliğindeki değişimlerin tutarlı olması, yani lokal olarak aşırı taşlama veya eksik taşlama yapılmaması gerektiği vurgulanır. Wilmec cihazı, bu tür düzensizlikleri tespit ederek hem homojenlik kontrolü sağlar hem de taşlama kalitesini sayısal verilerle belgeler. Ayrıca, ETM-01-02 standardı, taşlama işleminin ardından yapılan ölçümlerin kayıt altına alınmasını ve raporlanmasını zorunlu kılmaktadır. Wilmec ETM cihazı ile elde edilen veriler, bu gerekliliği karşılayacak şekilde sayısal, görsel ve grafiksel olarak çıktılar sunabilmektedir. Wilmec cihazı, ETM-01-02'nin teknik gereklerine uygunluğu sayesinde taşlama işleminin doğruluğunu ve kalitesini bilimsel olarak destekler nitelikte veri sağlamaktadır. Ray taşlama öncesi ve sonrası veriler, sağdan soldan yapılan ölçümler ve yükseklik düzenlemeleri açısından karşılaştırılacaktır. Ray yüzeyindeki pürüzlülükler ve yükseklik farkları arasındaki değişiklikler incelenerek taşlama işleminin etkinliği ölçülecektir (Australasian Railway Association, 2012). Wilmec ETM cihazına ek olarak Wilmec HT1, taşlama işleminden sonra ray yüzeyinden kaldırılan metal miktarını $\pm 0,015$ mm hassasiyetle ölçen elektronik kontrollü bir ölçüm sistemi de mevcuttur. Bu sistem kompakt tasarımı sayesinde demiryolu hattında istenilen noktada kolaylıkla konumlandırılabilir. Cihaz, ray üzerine sabitlenen bir referans braketi aracılığıyla aynı noktada tekrarlı ve karşılaştırmalı ölçümler yapılmasına olanak sağlar. Ölçüm verileri dijital ekran üzerinden anlık olarak izlenebilir ve tarih-saat damgalı çıktı olarak alınabilir (Wilme (Wilmec, 2022)). Mevcut çalışmada Wilmec ETM cihazı kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde, taşlama işlemi sonrasında elde edilen ölçüm sonuçları ışığında ray yüzeyindeki fiziksel değişimler ve iyileşmeler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. DQM, RMF ve Wilmec cihazları ile yapılan ölçümler karşılaştırmalı olarak analiz edilerek taşlama işleminin ray profiline, ondülasyonlara ve metal kaldırma miktarına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen bulgular, ray yüzeyinde taşlama öncesine kıyasla belirgin bir düzgünleşme ve iyileşme sağlandığını ortaya koymakta, bunun yanında bazı lokal bölgelerde makine taşlamasının yetersiz kaldığı ve elle taşlama uygulamasına ihtiyaç duyulduğu da tespit edilmiştir. Her bir ölçüm cihazından elde edilen veriler, taşlama uygulamasının etkinliğini teknik olarak belgelendirerek, bakım stratejilerinin optimizasyonu açısından önemli çıktılar sunmuştur.

3.1. Ray Kusurlarını Değerlendirme

Ölçüm sonuçları sunulmadan önce aşağıda taşlama işlemleri öncesi ray görsellerine yer verilmiştir.



Görsel 3.1. Patinaj kusuru

Görsel 3.1’de ray tekerlek teması sonrası oluşan patinaj kusuru görülmektedir. Düzgün taşlama ile kusurlu bölgenin giderilmesi mümkündür.



Görsel 3.2. *Pullanma ve mikro oyuklar*

Görsel 3.2’de ray yüzeyinde pullanma ve mikro oyukların olduğu bir kusur bulunmaktadır. Bu, ray taşlama ihtiyacının çok net bir göstergesidir. Aksi takdirde bu oyuklar büyüyerek tekerlek ile ray temasını bozar ve konfor/kararlılık sorunlarına yol açabilir.



Görsel 3.3. *Mikroskobik yorulma*

Görsel 3.3’te tekerlek-ray temasında oluşan mikroskobik yorulma (Rolling Contact Fatigue - RCF) başlangıcı olmuş ray kusuru görülmektedir.



Görsel 3.4. Ray yüzeyindeki çizilmeler

Görsel 3.4'te ray yüzeyinde çizilmeler mevcut. Koruyucu taşlama ile yüzeyin düzeltilmesi mümkündür. Eğer çiziklerin derinliği >1 mm ise, düzeltici taşlama önerilir.



Görsel 3.5. Metal kayıpları ve ezilmeler

Görsel 3.5'te ray yüzeyinde lokal küçük metal kayıpları ve ezilmeler mevcuttur.



Görsel 3.6. *Squat kusuru*

Görsel 3.6’da tekerlek ray etkileşimi sırasında oluşan tekrarlı yükleme, yüzey gerilmeleri ve yuvarlanma temasında meydana gelen squat kusuruna örnektir. Gözle muayene, ultrasonik test, manyetik partikül testi yapıp ilerlemeyen bir kusursa düzeltici taşlama aksi takdirde ray değişimi önerilir.



Görsel 3.7. *Kabuk atma*

Görsel 3.7’de yer alan kabuk atma, ray malzemenin küçük parçalar halinde yüzeyden koparak ayrılması durumudur. Bu kusur, düzeltici taşlama ile giderilerek ray kullanım ömrü önemli ölçüde artırılır.



Görsel 3.8. Soğuk yaralanma

Görsel 3.8’de ray yüzeyinde tekrarlayan şekilde soğuk yaralanmaya bağlı kusur oluşmuştur. Düzeltici taşlama ile kusur giderilmiştir.

3.2. RMF Ölçümleri Değerlendirme

RMF cihazı, ray taşlama işleminin yüzey kalitesine olan etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Ray ondülasyonu, ray yüzeyinde zamanla oluşan, periyodik dalgalanma şeklinde belirginleşen bir deformasyon türüdür. Bu tür düzensizlikler, trenlerin güvenli bir şekilde seyahat etmesini engelleyebilir ve rayların bakım gereksinimlerini artırabilir. Ondülasyon, genellikle tren tekerlekleri ile ray arasındaki sürekli etkileşim sonucu ortaya çıkar ve taşlama işlemiyle bu bozulmaların giderilmesi hedeflenir. RMF cihazı, bu tip yüzey düzensizliklerini mikrometre seviyesinde tespit ederek, taşlama uygulamasının ne kadar başarılı olduğunu sayısal verilerle ortaya koymaktadır.

Taşlama işlemi öncesinde ve sonrasında yapılan ölçümler, RMF cihazı ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalar, ray yüzeyindeki ondülasyon seviyelerindeki değişiklikleri gözler önüne sermiştir. Bu sayede, taşlama sonrası ray profilindeki iyileşmeler teknik olarak belgelenmiş; yüzey kalitesindeki artış, tren hızları, sürüş güvenliği ve sistem ömrü açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler, sadece mevcut durumun değerlendirilmesi için değil, aynı zamanda gelecekteki bakım stratejilerinin planlanmasında da önemli bir temel oluşturmuştur. RMF cihazı tarafından sağlanan yüksek hassasiyetli ondülasyon verileri, bakım faaliyetlerinin doğruluğunu doğrulamak ve demiryolu sisteminin performansını sürekli olarak iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmada incelenen ray, sağ taraf olup, hareket yönü ön ölçüm olarak belirtilmiştir. Yapılan ölçümün mesafesi 399,87 metre olarak kaydedilmiş olup, ölçüm tarihi 8 Mart 2025, saat 15:01'dir. Grafiklerde, farklı filtre aralıklarında (dalga boylarına göre) ray yüzeyindeki kusurlar ve dalga aşınmaları incelenmiştir. Bu analiz, rayın yapısal durumu hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır. Dalga boylarına göre yapılan filtrelemelerle, ray yüzeyindeki düzensizlikler ve ondülasyon seviyeleri tespit edilmiş ve taşlama işlemi öncesindeki mevcut yüzey kalitesi hakkında kapsamlı veriler elde edilmiştir.

Tablo 3.1'de, farklı dalga boyu aralıklarında tespit edilen kesinti oranları verilmiştir. Bu kesinti oranları, ray yüzeyindeki düzensizliklerin yoğunluğunu ve yapısal bozulmaların dağılımını göstermek için kullanılmıştır.

Tablo 3.1. RMF taşlama öncesi durum

10< λ ≤30 mm		30< λ ≤100 mm		100< λ ≤300 mm		300< λ ≤1000 mm	
Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray
2,1	1,2	2,8	1,7	4,9	3,8	8,1	8,5
2,1	1,1	2,6	1,4	4,6	3,1	6,9	7,8
1,9	1	2,4	1,4	4,2	3,1	6,6	7,6
2,1	1	2,6	1,4	4,7	3,1	7,1	7,8
2,2	1,3	2,8	1,7	4,8	3,4	7,3	8,2
2,1	1,3	2,7	1,7	4,5	3,4	7,5	8,7

Bu oranlar, RMF taşlama öncesi ray yüzeyindeki mikro-geometrik kusurların derecesini belirlemek ve taşlama işleminin ne kadar etkili olacağına karar vermek için önemli bir göstergedir.

- 10-30 mm Aralığı: Bu aralıkta kısa dalga boylu mikro kusurlar ve yüzey aşınmaları tespit edilmiştir. Ortalama değerler, sol rayda 2,1 mm, sağ rayda 1,2 mm ile 1,3 mm aralığında değişmektedir. Bu veriler, kesinti oranı açısından değerlendirildiğinde %5 eşik değerinin altında kalmakta, dolayısıyla ray yüzeyinde ciddi bir bozulma olmadığını göstermektedir. Bu tür kusurlar tren güvenliği açısından önemli bir risk oluşturmamakla birlikte, yüzey düzgünlüğü açısından göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak taşlama işlemi için acil müdahale gerektirmez.

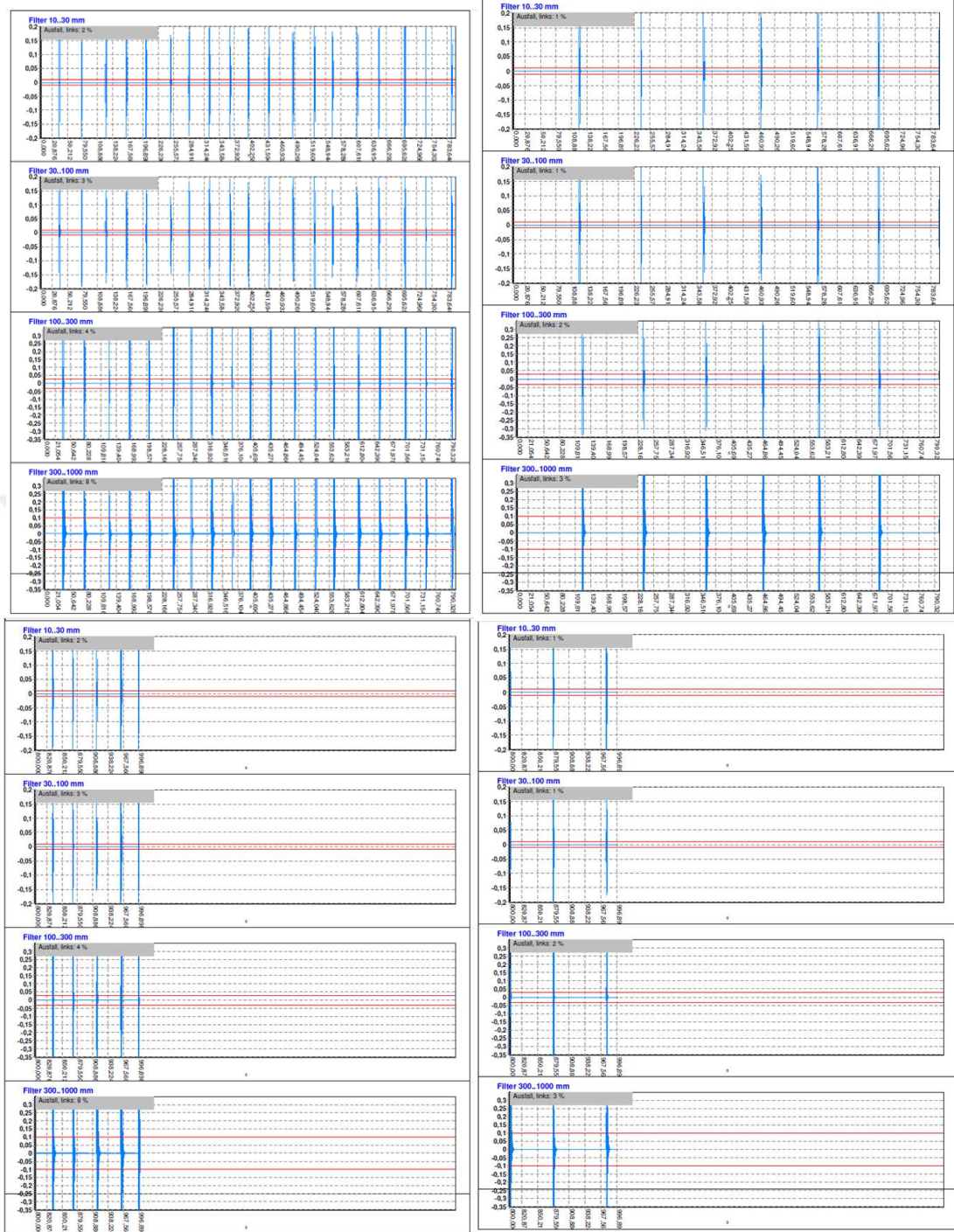
- 30-100 mm Aralığı: Orta dalga boylu yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği bu aralıkta, sol rayda değerler 2,4–2,8 mm; sağ rayda ise 1,4–1,7 mm arasında değişmektedir. Bu değerler, %5 sınırının altında olmakla birlikte, ray yüzeyinde deformasyonların başladığını göstermektedir. Özellikle 1,7 mm'ye ulaşan sağ ray değerleri, yolcu konforunu ve tekerlek–ray etkileşimini etkilemeye başlayabileceğini

işaret etmektedir. Bu nedenle, bu deformasyonların ilerlemesini önlemek amacıyla periyodik bakım uygulamaları önerilmektedir.

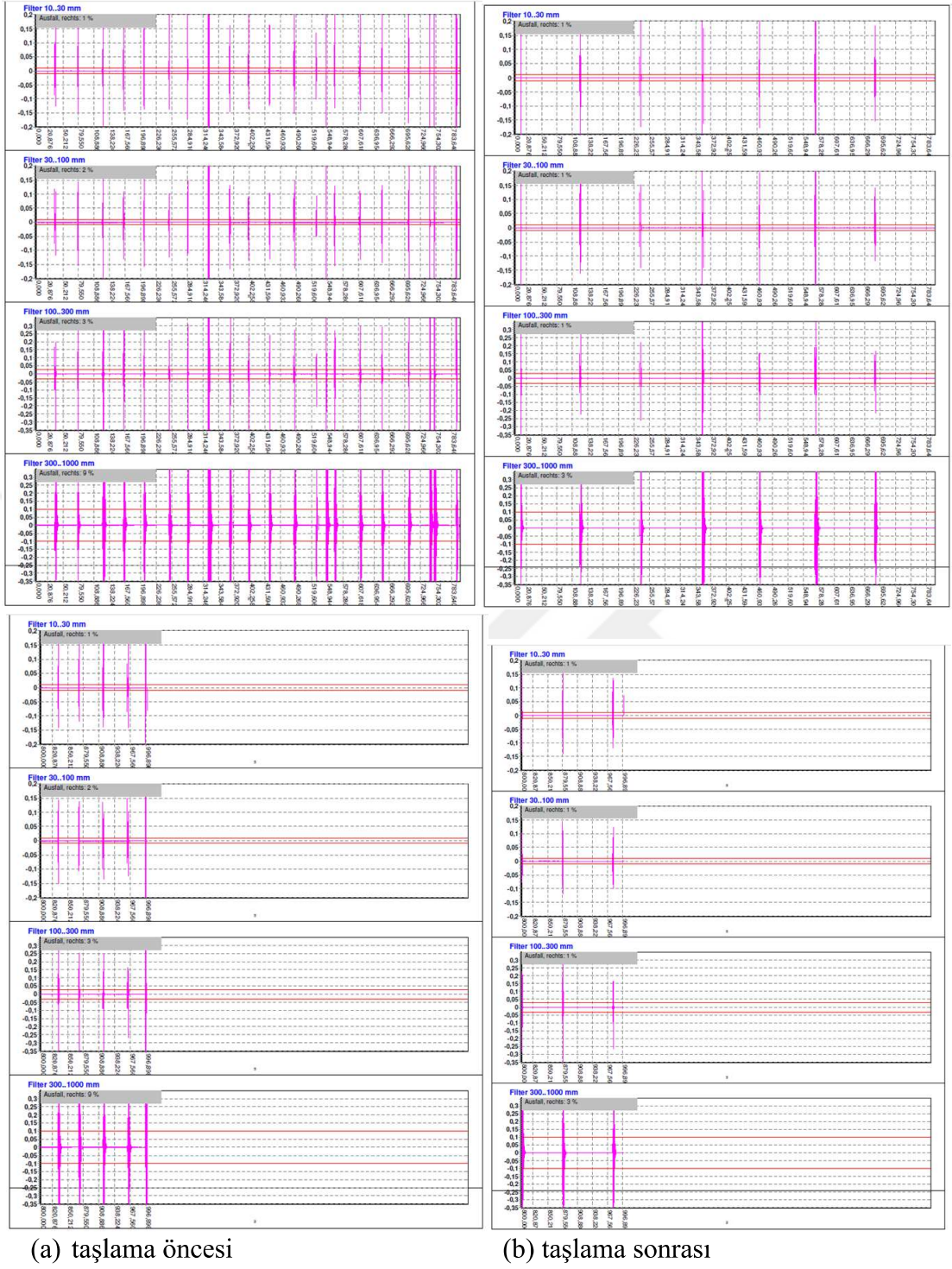
- 100-300 mm Aralığı: Uzun dalga boylu bozulmaların yer aldığı bu aralıkta, sol rayda 4,2–4,9 mm, sağ rayda ise 3,1–3,8 mm arasında değerler tespit edilmiştir. Bu deformasyonlar, ray geometrisinde yapısal değişimlere neden olabilecek büyüklüktedir. Her iki rayda da gözlemlenen değerlerin %5 eşik sınırına oldukça yakın olması, bu bölgelere taşlama uygulanması gerektiğini ve izleme programlarına alınmasının önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu aralıktaki bozulmaların ilerlememesi için taşlama işleminin hızla gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

- 300-1000 mm Aralığı: Bu dalga boyu aralığında ölçülen değerler oldukça yüksektir: sol rayda 6,6–8,1 mm, sağ rayda 7,6–8,7 mm arasında değişmektedir. Bu değerler, izin verilen maksimum %5 kesinti oranını aşmakta ve rayda ciddi mikro-geometrik bozulmaların bulunduğunu açıkça göstermektedir. Bu bozulmaların hem yolcu konforu hem de ray altyapısının güvenliği üzerinde olumsuz etkileri olabilir. Taşlama işlemi bu bölgelerde zorunlu hale gelmiş olup, daha ileri düzeyde yapısal müdahaleler de değerlendirilmelidir.

İlk olarak, 100-300 mm ve 300-1000 mm aralıklarında belirlenen yüksek kesinti oranları nedeniyle ray taşlama işleminin acil olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bölgelerdeki dalga aşınmalarının ilerlemesi durumunda, ray altyapısında kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir ve bu da demiryolu sisteminin güvenliğini tehlikeye atabilir. İkinci olarak, ray yüzeyindeki dalga aşınmalarını önlemek amacıyla periyodik olarak ray kontrol ve analizlerinin yapılması önerilmektedir. Düzenli bakım ve izleme çalışmaları hem taşlama işleminin etkinliğini artırır hem de uzun vadede güvenli ve konforlu bir ulaşım sağlanmasına yardımcı olur. Bu analizler, gelecekteki taşlama işlemleri için yönlendirici veriler sunacaktır. Son olarak, elde edilen veriler doğrultusunda kapsamlı bir ray bakım ve taşlama programı oluşturulmalıdır. Bu program, ray altyapısının uzun ömürlü olmasını ve yolculuk güvenliğinin korunmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Periyodik bakım ve izleme ile, taşlama işlemi yalnızca mevcut deformasyonları düzeltmekle kalmaz, aynı zamanda uzun vadeli bakım stratejilerinin bir parçası haline gelir.



Şekil 3.1. RMF taşlama öncesi(a) ve sonrası(b) ray profil grafikleri



Şekil 3.1. (Devam) RMF taşlama öncesi(a) ve sonrası(b) ray profil grafikleri

Şekil 3.1’de RMF taşlama öncesi (a) ve RMF taşlama sonrası (b) profil grafiklerini göstermektedir. Ray taşlama işlemi sonrası yapılan RMF analiz 13 Mart 2025, 16:00:42’de yapılmıştır. Analize göre, ray yüzeyindeki pürüzlülük seviyelerinde tüm dalga boyu aralıklarında belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. RMF cihazı, taşlama işleminden önceki ve sonraki ray yüzeyindeki ondülasyonu mikrometre seviyesinde

ölçerek, yüzeydeki iyileşmeyi hassas bir şekilde kaydetmiştir. Aşağıdaki tabloda, taşlama işlemi sonrası tespit edilen kesinti oranları verilmiştir. Bu oranlar, ray yüzeyindeki iyileşmeyi ve taşlama işleminin etkinliğini göstermektedir.

Tablo 3.2. RMF taşlama sonrası durum

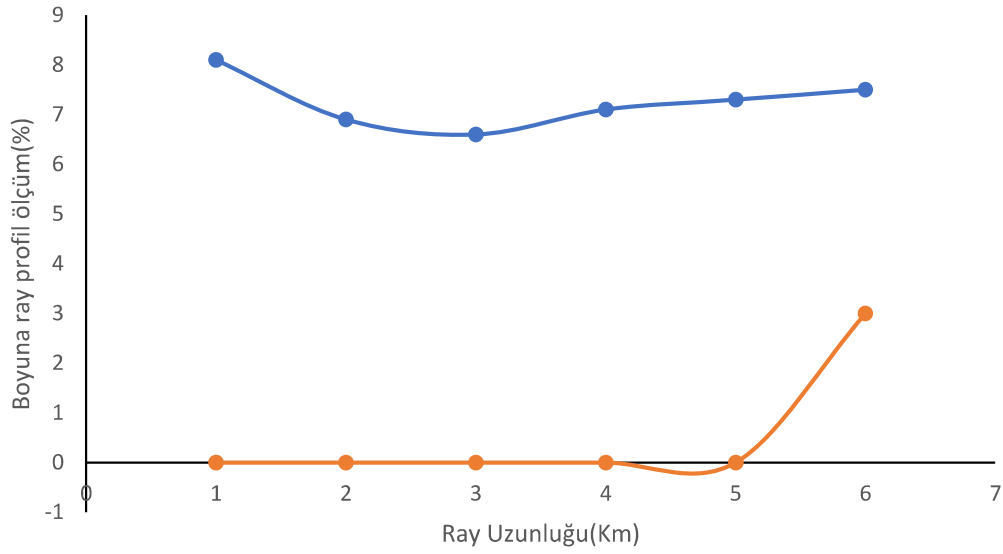
10< λ ≤30 mm		30< λ ≤100 mm		100< λ ≤300 mm		300< λ ≤1000 mm	
Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray	Sol Ray	Sağ Ray
1,2	0,8	1,6	1,1	2	1,3	3,4	3,6
1	0,7	1,3	1	1,7	1,1	3,1	3,1
1	0,6	1,3	0,9	1,7	1,1	2,8	3
1	0,7	1,3	0,9	1,7	1,1	3,2	2,9
1	0,6	1,3	0,9	1,5	0,9	2,7	2,6
1,0	0,6	1,3	0,9	1,7	1,2	3,0	3,0

• 10-30 mm Aralığı: Taşlama işlemi sonrası, 10-30 mm dalga boyu aralığında gözlemlenen değerler, sol rayda 1,0–1,2 mm, sağ rayda ise 0,6–0,8 mm arasında değişmektedir. Taşlama öncesine kıyasla belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Tüm değerler %5 sınırının oldukça altında kalmış, bu da mikro-geometrik düzensizliklerin büyük ölçüde giderildiğini ve ray yüzeyinin düzgünleştiğini göstermektedir. Bu sonuç, kısa dalga boylu kusurların başarılı şekilde elimine edildiğini ve yolculuk konforu açısından olumlu etki sağlandığını ortaya koymaktadır.

• 30-100 mm Aralığı: Taşlama sonrası ölçümler sol rayda 1,3–1,6 mm, sağ rayda ise 0,9–1,1 mm arasında yer almaktadır. Öncesinde bu aralıkta 2,4–2,8 mm değerleri kaydedilmişti. Bu durum, orta dalga boylu deformasyonların taşlama işlemiyle büyük ölçüde azaltıldığını ve ray–tekerlek etkileşiminde daha kararlı bir yüzey elde edildiğini göstermektedir.

• 100-300 mm Aralığı: Bu dalga boyu aralığında da iyileşme belirgindir. Sol rayda değerler 1,5–2,0 mm, sağ rayda ise 0,9–1,3 mm arasında değişmektedir. Taşlama öncesi bu değerler 4,2–4,9 mm gibi yüksek seviyelerdeydi. Bu, taşlamanın sistem güvenliği açısından başarılı bir müdahale olduğunu kanıtlamaktadır.

Ölçümü yapılan değerlere göre 300< λ ≤1000 mm dalga boyu aralığı referans alınarak şekil 3.2 deki karşılaştırma grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.2. RMF taşlama öncesi ve sonrası karşılaştırma

• 300-1000 mm Aralığı: En uzun dalga boyuna sahip bu aralıkta taşlama öncesi 6,6–8,7 mm arasında olan yüksek değerler, işlem sonrasında sol rayda 2,7–3,4 mm, sağ rayda ise 2,6–3,6 mm’ye düşürülmüştür. Bu, yüzeyin ciddi biçimde iyileştirildiğini göstermekte ve kritik bozulmaların büyük oranda ortadan kaldırıldığını ifade etmektedir. Tüm değerler %5 kesinti sınırının altında seyretmektedir. Bu durum, taşlama işleminin yalnızca yüzey düzeltimi değil, aynı zamanda altyapı güvenliğinin korunması açısından da etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ray taşlama işlemi sonrası elde edilen RMF ölçüm sonuçları, taşlama uygulamasının yüksek verimlilikle gerçekleştirildiğini ve ray yüzeyindeki pürüzlülüğün önemli ölçüde düzeldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 10-30 mm dalga boyu aralığında tam iyileşme sağlanırken, diğer aralıklarda %1 gibi düşük kesinti oranları ile taşlama işleminin başarılı olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar, taşlama işleminin tren yolculuk konforunu artıracaklarını, bakım maliyetlerini azaltacaklarını ve genel olarak ray altyapısının ömrünü uzatacaklarını göstermektedir. Ancak, 300-1000 mm aralığındaki yüksek frekanslı dalga aşınmalarının tamamen giderilememesi, düzenli bakım ve periyodik izlemelerin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu tür kusurların tamamen ortadan kaldırılması için ilerleyen dönemlerde daha fazla taşlama ve iyileştirme işlemlerine ihtiyaç duyulabilir. Sonuç olarak, taşlama işlemi, ray yüzeyinde önemli iyileşmeler sağlamış olup, sistemin güvenliği ve yolculuk konforu açısından pozitif etkiler yaratacaktır. Bununla birlikte,

belirli aralıklardaki küçük kusurların tamamen giderilmesi için ek bakım ve taşlama stratejilerinin planlanması önerilmektedir.

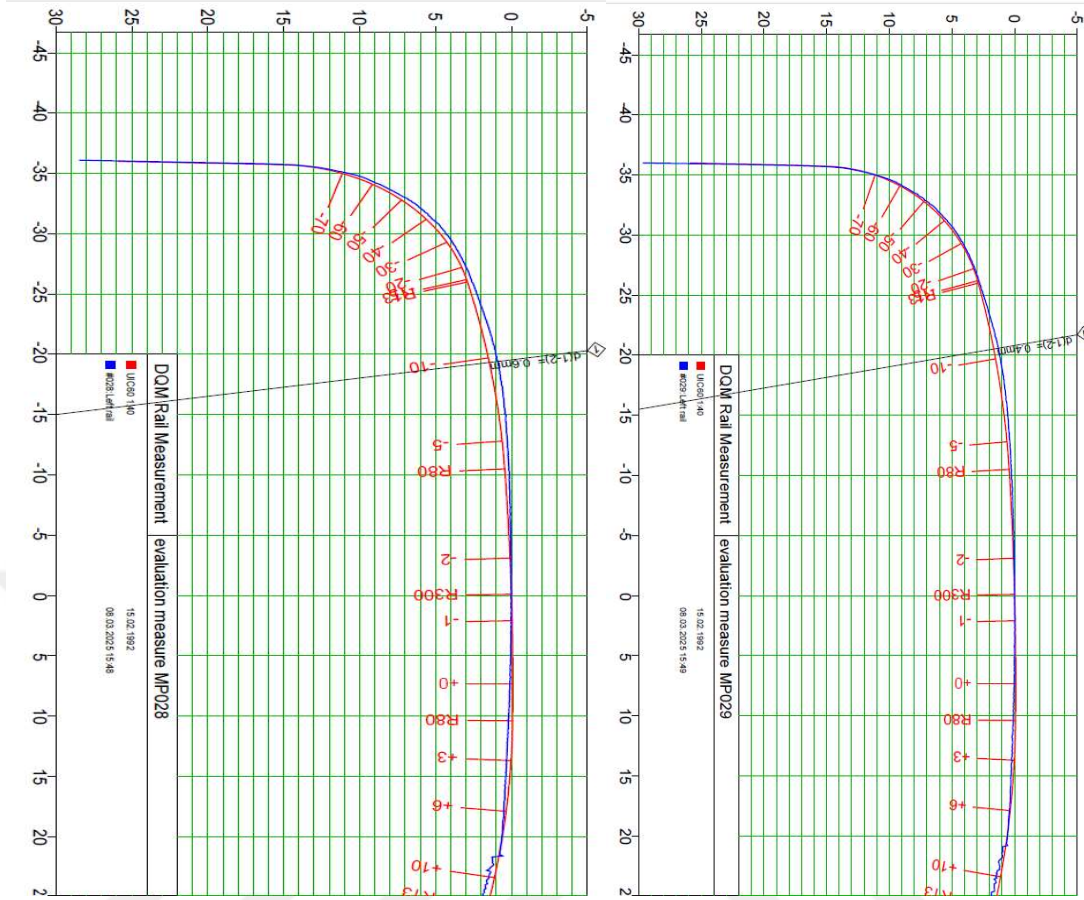
3.3. DQM Cihazı Ölçün Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DQM ölçüm sonuçlarının taşlama öncesi ve taşlama sonrasında elde edilen veriler detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

3.3.1. Taşlama öncesi dqm ölçümleri

Taşlama öncesi yüksek hızlı tren raylarının enine kesit profilinin ve mevcut aşınma durumunun değerlendirilmesi için DQM ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te sonuçları veriler ölçüm, 1. hat üzerinde, 421+500 kilometre noktasında yapılmıştır. Bu ölçüm, ray profilindeki düzensizliklerin ve aşınma seviyelerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş olup, taşlama işleminin gerekliliğini ortaya koymak için temel veriler sunmuştur.

Ray taşlama işlemi, ray yüzeyindeki düzensizliklerin giderilmesi, aşınmanın kontrol altına alınması ve tekerlek-ray etkileşiminin optimize edilmesi için kritik bir bakım süreci olarak kabul edilmektedir. Taşlama işlemi sırasında, ray yüzeyindeki yerel deformasyonlar, açısal sapmalar ve eğrilik yarıçaplarının düzeltilmesi sağlanarak, rayın geometrik yapısının ideal düzeye getirilmesi amaçlanmaktadır. Ölçüm verileri, rayın mevcut enine kesit profilinin geometrik analizine dayanmaktadır. Bu analiz, ray yüzeyindeki aşınma miktarlarını, açısal sapmaları ve eğrilik yarıçaplarını ortaya koymaktadır. Grafiklerde yer alan kırmızı renkteki eğriler ve değerler, rayın mevcut yüzey profilindeki düzensizlikleri yansıtmaktadır. R80 ve R300 gibi eğrilik yarıçapı değerleri, rayın farklı kesitlerinde oluşan aşınmanın büyüklüğünü ve keskinliğini belirlemede kullanılan önemli parametrelerdir.



Şekil 3.3. (Devam) DQM taşlama öncesi ölçümler

DQM cihazı taşlama öncesi grafikleri, rayın enine kesit profilini yüksek hassasiyetle ölçer. Bu ölçümler sırasında, ray yüzeyindeki eğrilik yarıçapları (R80 ve R300 gibi), aşınma derinlikleri, açısal sapmalar gibi kritik parametreler analiz edilmiştir. Bu veriler, ray yüzeyindeki aşınma seviyelerinin yanı sıra, profil bozulmalarının boyutlarını ve yerlerini belirlemeyi mümkün kılar. Grafiklerdeki kırmızı renkte gösterilen eğriler, mevcut aşınma miktarlarını ve açısal sapmaları temsil etmektedir. Bu eğriler, rayın farklı bölümlerinde oluşan aşınmanın yoğunluğunu ve keskinliğini gözler önüne sermektedir. Mavi çizgi, rayın ideal geometrik profilini temsil ederken, kırmızı çizgi mevcut profilin düzensizliklerini yansıtmaktadır.

- Üst Yüzeyde Aşınma: Rayın üst yüzeyinde belirgin aşınmalar gözlemlenmiştir. Bu aşınmalar, özellikle yüksek hızda çalışan trenlerin etkisiyle oluşan mekanik zorlamaların bir sonucu olarak, rayın yüzeyinde yerel deformasyonlara neden olmuştur.

- İç Kenar Bölgesindeki Düzensizlikler: Rayın iç kenar bölgesinde, özellikle dinamik yüklerin yoğun olduğu alanlarda daha fazla aşınma ve eğrilik gözlemlenmiştir. Bu bölgelerdeki düzensizlikler, taşlama işlemi için öncelikli alanları işaret etmektedir.

- Açısal Sapmalar: Aşınmanın derinliği ve açısal sapmalar, belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu sapmalar, taşlama işlemi sırasında düzeltilmesi gereken bölgeleri belirlemektedir.

Ölçüm sonuçları, taşlama işleminin yapılacağı bölgeleri belirlemek için önemli veriler sunmaktadır. Özellikle rayın üst yüzeyindeki ve iç kenarındaki aşınmaların giderilmesi, profilin yeniden şekillendirilmesi ve açısal sapmaların düzeltilmesi için taşlama işlemi gereklidir. Bu işlem, ray yüzeyindeki düzensizliklerin giderilmesi, aşınmanın kontrol altına alınması ve tekerlek-ray etkileşiminin optimize edilmesi için kritik bir bakım süreci olarak öne çıkmaktadır.

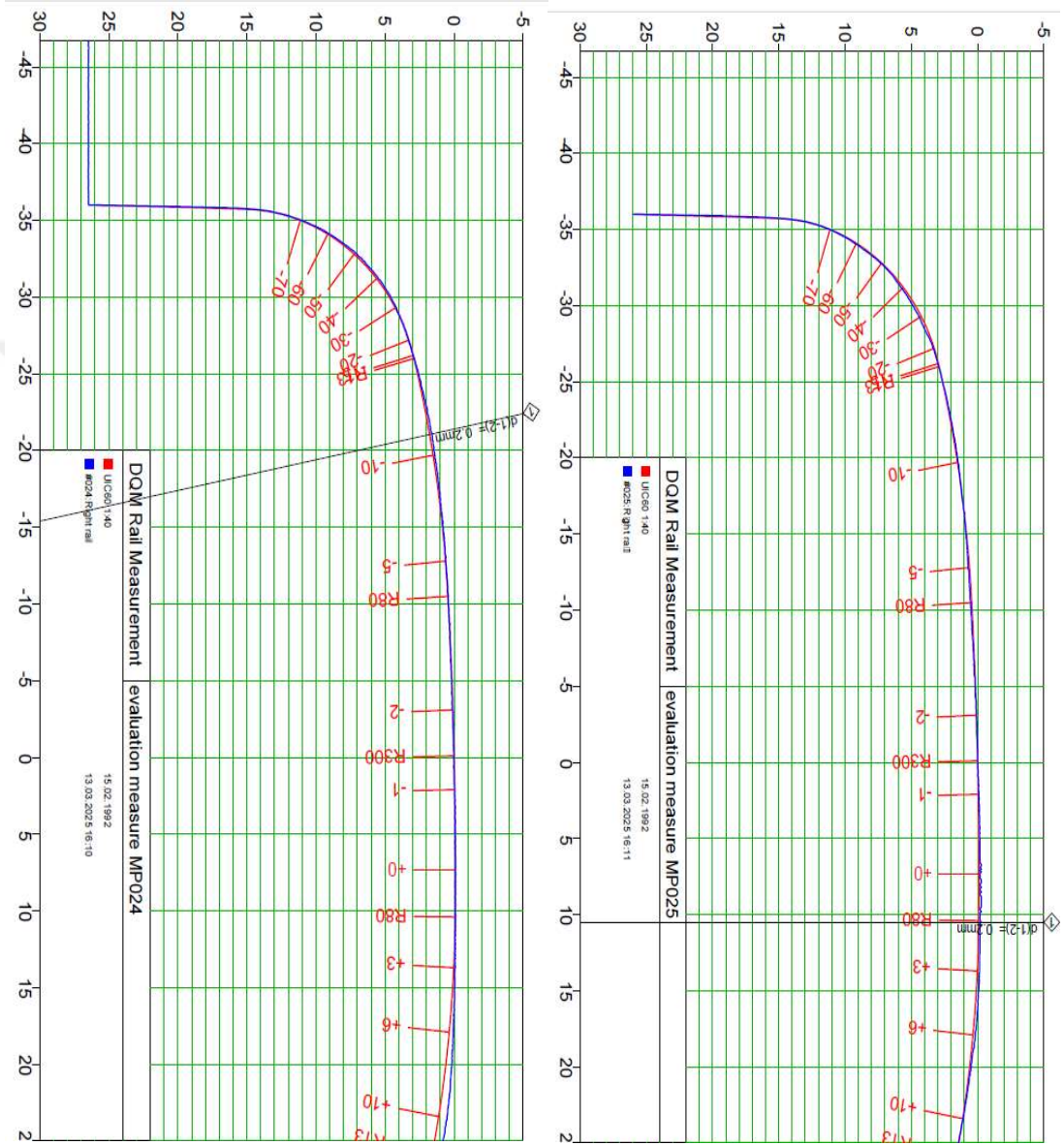
Ray taşlama işlemi öncesinde yapılan ölçümler, ray yüzeyindeki aşınma ve düzensizlikleri göstermektedir. Grafiklerde, taşlama öncesindeki ray profilinin kırmızı kesikli çizgi ile gösterildiği, mevcut aşınmanın yaklaşık -10 birime ulaştığı tespit edilmiştir. Rayın üst yüzeyinde ve iç kenar bölgelerinde belirgin aşınmalar gözlemlenmiş olup, bu bölgelerde yerel deformasyonlar ve profil değişiklikleri meydana gelmiştir. Eğrilik yarıçapı değerleri (R80 ve R300) incelendiğinde, özellikle bu alanlarda düzensizliklerin yoğunlaştığı ve rayın çeşitli kesitlerinde farklı seviyelerde aşınma olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, taşlama işleminin gerekliliğini ve mevcut profilin ideal ray geometrisinden ne kadar sapma gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.3.2. Taşlama sonrası dqm ölçümleri

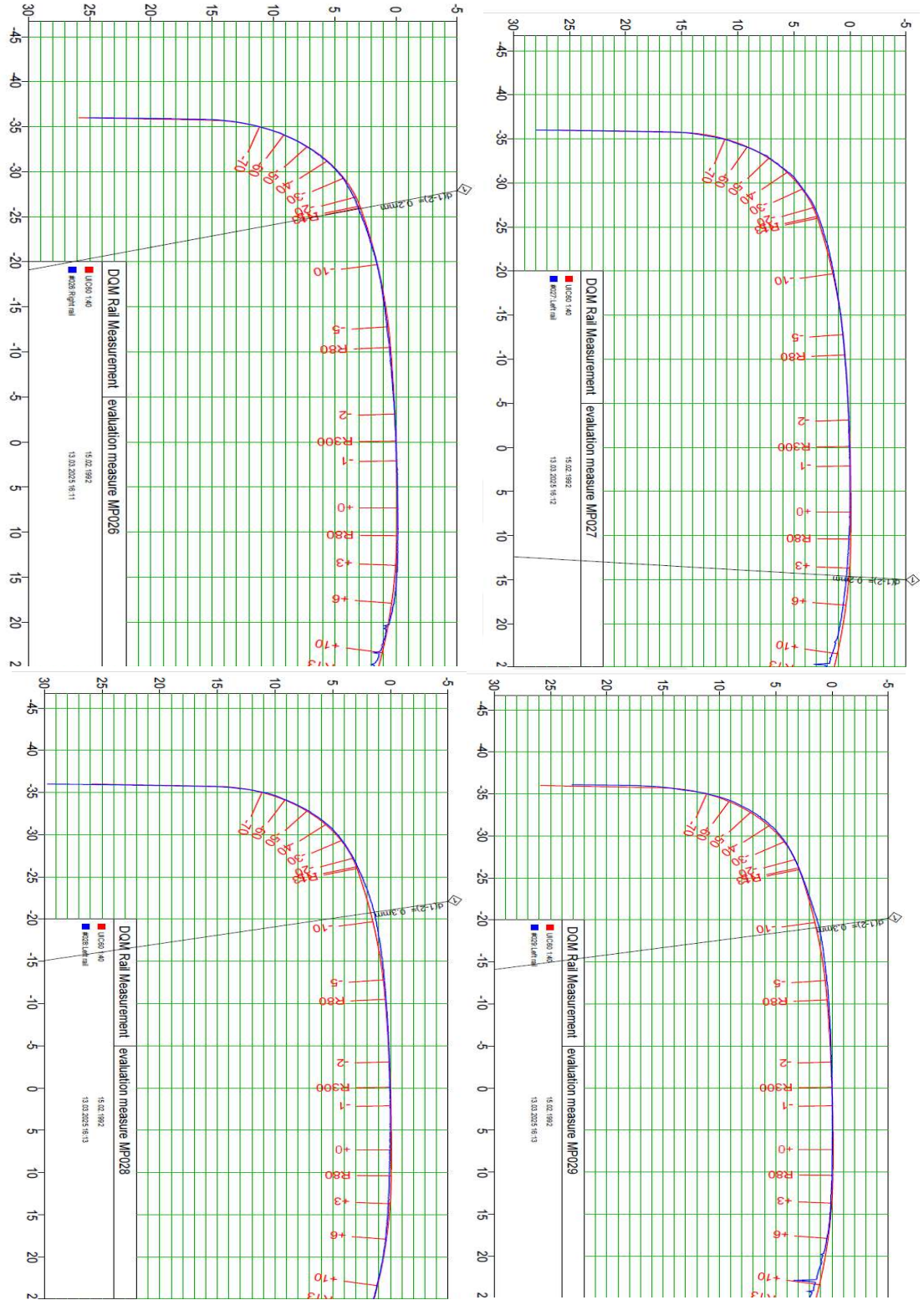
Taşlama işlemi sonrasında, ray yüzeyindeki iyileşmeleri değerlendirebilmek amacıyla tekrar DQM ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, taşlama işleminden önceki ve sonraki ray profilindeki değişiklikleri karşılaştırmak için kullanılmıştır. Yapılan ölçümler, ray yüzeyindeki geometrik düzensizliklerin giderilip giderilmediğini, aşınmanın düzeyini ve ray profilindeki genel iyileşmeyi gösteren değerleri sunmaktadır. Taşlama sonrası yapılan DQM ölçümleri, rayın enine kesit profilindeki değişiklikleri tespit etmek amacıyla aynı cihaz ve ölçüm yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, taşlama işleminin etkinliğini değerlendirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Ölçüm sonuçları, rayın yüzeyindeki açısal sapmalar, aşınma derinlikleri ve eğrilik yarıçapları gibi parametrelerin iyileşme seviyelerini göstermektedir.

Şekil 3.4'te, taşlama sonrası elde edilen DQM ölçüm sonuçlarına ilişkin grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde, taşlama işlemi öncesinde ve sonrasında elde edilen profil değerleri karşılaştırılmıştır. Kırmızı çizgiler, taşlama öncesi mevcut ray profilini, mavi

çizgiler ise taşlama sonrası elde edilen ideal ray profilini göstermektedir. Grafikler, ray yüzeyindeki düzensizliklerin nasıl iyileştirildiğini ve taşlama işleminin profil üzerinde ne kadar etkili olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 3.4. DQM taşlama sonrası ölçümler



Şekil 3.4. (Devam) DQM taşlama sonrası ölçümler

Taşlama işlemi sonrasında elde edilen veriler, ray yüzeyindeki iyileşmeleri net bir şekilde göstermektedir. Taşlama sonrası profil, mavi çizgi ile gösterilmiştir ve önceki aşınmaların büyük ölçüde düzeltildiği, aşınma miktarının yaklaşık %80 oranında azaldığı

tespit edilmiştir. Kırmızı çizgi ile gösterilen taşlama öncesi profil ile mavi çizgi arasındaki fark belirgin şekilde küçülmüştür. Özellikle aşınmış bölgelerin düzeltilmesiyle birlikte, ray yüzeyinin daha homojen hale geldiği, eğrilik yarıçaplarının daha dengeli bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu iyileşme, tekerlek-ray etkileşiminin optimize edilmesine ve yüzeydeki düzensizliklerin önemli ölçüde giderilmesine olanak sağlamaktadır.

$$\text{Aşınma Giderilme Oranı (\%)} = (10 - 2) / 10 \times 100 = 80\% \quad (3.1)$$

3.1 numaralı denklem, taşlama işlemi öncesi ve sonrası ölçülen ray yüzeyi düzensizlik değerlerine dayanarak, aşınma giderilme oranını yüzdesel olarak hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Denklemden yer alan “10” ifadesi, taşlama işleminden önce ray yüzeyinde ölçülen düzensizlik seviyesini; “2” ifadesi ise taşlama işlemi sonrasında kalan düzensizlik miktarını göstermektedir. Bu iki değer arasındaki fark, yani (10 - 2), taşlama işlemiyle giderilen düzensizlik miktarını temsil etmektedir. Bu fark, başlangıç değeri olan 10’a bölünerek, elde edilen sonuç yüzdeyle ifade edilmek üzere 100 ile çarpılmaktadır. Sonuç olarak, ray yüzeyindeki düzensizliklerin %80 oranında giderildiği hesaplanmaktadır. Bu oran taşlama işleminin etkinliğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Yukarıdaki grafik, taşlama işlemi öncesinde ve sonrasında ray yüzeyindeki aşınma miktarlarını karşılaştırmaktadır.

Kırmızı kesikli çizgi, taşlama öncesindeki ray profiline ait olup, maksimum aşınmanın yaklaşık -10 birime ulaştığını göstermektedir. Taşlama sonrası profil aşınma miktarının yaklaşık -5 birimden daha az seviyelere indirildiğini göstermektedir.

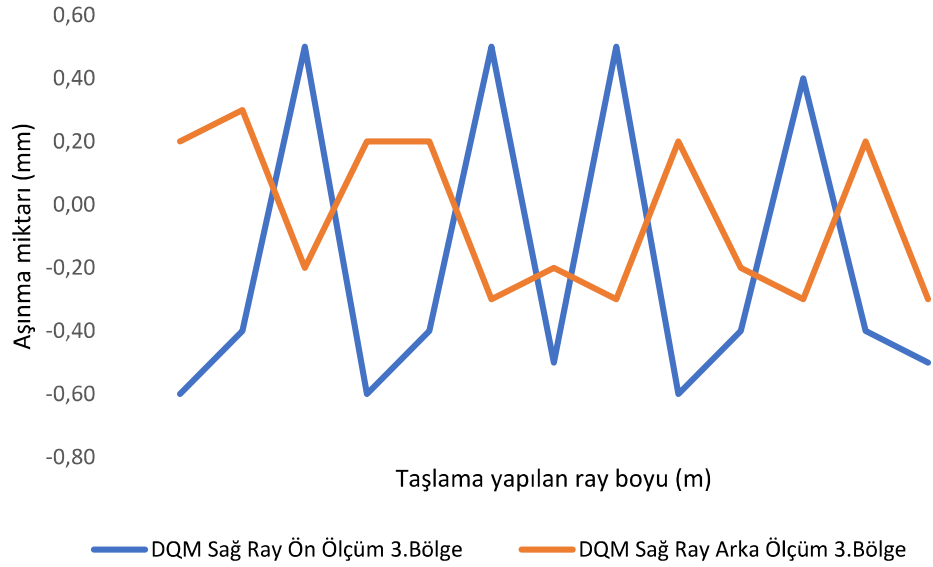
Tablo 3.3’te ve Tablo 3.4’te DQM ölçümlerinin sağ ve sol raydaki ölçüm öncesi ve ölçüm sonrası oranları verilmiştir.

Tablo 3.3. DQM sağ ray ölçümleri

Sağ Ray							
Ortalama	DQM Ön Ölçüm			Ortalama	DQM Arka Ölçüm		
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge		1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge
0,47	-0,40	-0,40	-0,60	0,27	-0,30	-0,30	0,20
0,43	-0,40	-0,50	-0,40	0,27	0,20	-0,30	0,30
0,43	-0,40	-0,40	0,50	0,27	-0,30	-0,30	-0,20
0,47	-0,40	-0,40	-0,60	0,27	0,30	-0,30	0,20
0,40	-0,40	-0,40	-0,40	0,27	0,30	-0,30	0,20
0,47	-0,50	-0,40	0,50	0,30	-0,30	-0,30	-0,30
0,47	-0,40	0,50	-0,50	0,27	-0,30	0,30	-0,20
0,47	-0,40	-0,50	0,50	0,30	0,30	-0,30	-0,30
0,47	-0,40	-0,40	-0,60	0,27	0,30	-0,30	0,20
0,40	-0,40	-0,40	-0,40	0,20	0,20	-0,20	-0,20
0,50	-0,60	-0,50	0,40	0,27	0,30	-0,20	-0,30
0,50	-0,60	-0,50	-0,40	0,20	0,20	0,20	0,20
0,47	-0,40	0,50	-0,50	0,23	0,20	0,20	-0,30

Tablo 3.4. DQM sol ray ölçümleri

Sol Ray							
Ortalama	DQM Ön Ölçüm			Ortalama	DQM Arka Ölçüm		
	1.Bölge	2.Bölge	3. Bölge		1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge
0,43	-0,40	-0,50	-0,40	0,27	-0,30	0,20	-0,30
0,47	-0,60	-0,40	-0,40	0,27	0,30	0,30	0,20
0,43	-0,5	-0,40	-0,40	0,27	-0,20	0,30	-0,30
0,47	0,60	-0,40	-0,40	0,23	0,20	-0,20	-0,30
0,43	-0,50	0,40	-0,40	0,23	-0,20	0,20	-0,30
0,43	-0,40	-0,50	-0,40	0,23	0,20	0,20	-0,30
0,43	0,40	-0,50	-0,40	0,23	-0,20	-0,30	-0,20
0,47	-0,60	-0,40	-0,40	0,27	0,30	-0,30	0,20
0,47	-0,50	-0,40	-0,50	0,23	0,20	-0,30	-0,20
0,40	0,40	-0,40	-0,40	0,27	0,30	-0,30	0,20
0,40	-0,40	-0,40	-0,40	0,27	-0,30	-0,20	-0,30
0,50	-0,50	-0,60	-0,40	0,30	0,30	0,30	-0,30
0,43	-0,40	-0,50	-0,40	0,20	-0,20	0,20	0,20

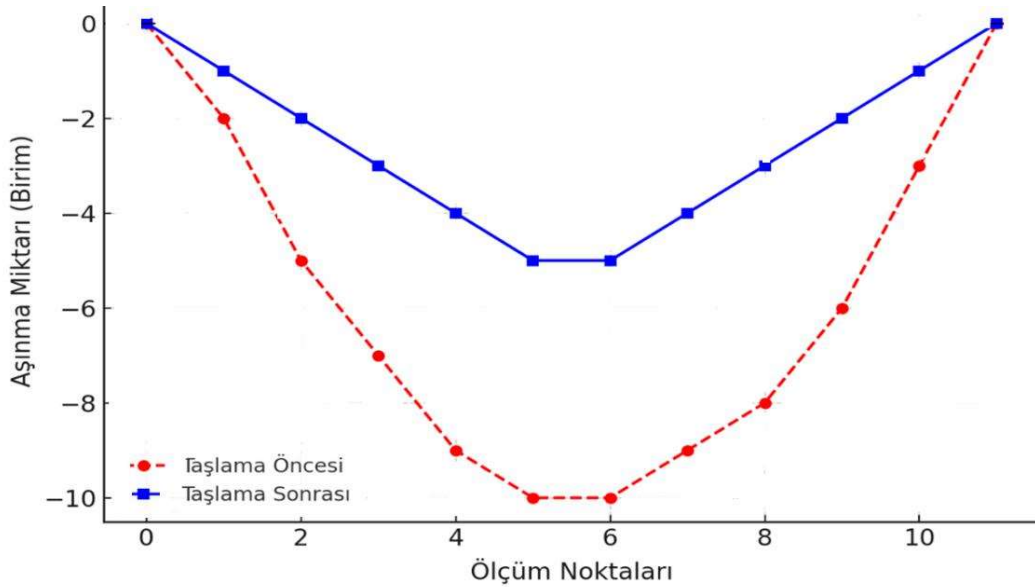
**Şekil 3.5.** 3.bölgede alınan taşlama öncesi ve sonrası karşılaştırma

Taşlama öncesi ölçümlerde sağ rayda ortalama değerler genellikle 0,43–0,50 mm aralığında olup, özellikle 1., 2. ve 3. bölge değerlerinde negatif yönlü sapmalar belirlenmiştir (örn.-0,60). Bu sapmalar, ray yüzeyinde profil bozulmaları ve dalgalanmalar olduğunu göstermektedir. Taşlama sonrası (arka ölçüm) elde edilen değerlerde ise ortalamalar 0,20–0,27 mm düzeyine düşmüş, 1. ve 2. bölge profillerindeki negatif sapmalar da belirgin biçimde azalmıştır. Bu durum, taşlama uygulamasının ray geometrisinde önemli bir düzeltme sağladığını ve yüzey düzgünlüğünü artırdığını göstermektedir. Özellikle, tüm ölçüm noktalarında taşlama sonrası değerlerin homojenliği, işlem etkinliğini ve makineyle yapılan uygulamanın tutarlılığını ortaya

koymaktadır. Bu veriler, taşlama süreci sonunda hem konfor hem de tekerlek-ray etkileşimi açısından hedeflenen geometrik iyileşmenin büyük ölçüde başarıldığını kanıtlamaktadır.

Sol raya ait DQM ölçüm verileri incelendiğinde, taşlama işleminin ray profilinde anlamlı bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Taşlama öncesi ortalama değerler genellikle 0,43–0,50 mm arasında değişmekte olup, özellikle 1., 2. ve 3. bölgelerdeki sapmalar -0,40 ile -0,60 mm aralığında seyretmektedir. Bu sapmalar, profilin ray ekseninden önemli ölçüde saptığını ve enine kesitte geometrik düzensizlikler oluştuğunu göstermektedir. Taşlama işlemi sonrasında bu değerlerde belirgin bir düşüş gözlenmiş ortalamalar 0,20–0,27 mm aralığına inmiş ve bölgesel sapmalar -0,20 ila -0,30 mm seviyelerine gerilemiştir. Bu azalmalar, ray başı geometrisinin hedeflenen profile yaklaştığını ve sapmaların minimum seviyeye indirildiğini ortaya koymaktadır. Sol rayda tüm ölçüm noktalarında gözlemlenen bu iyileşme, taşlama uygulamasının etkili ve homojen biçimde gerçekleştirildiğini ray-tekerlek etkileşimi ve güvenlik açısından olumlu bir düzeltme sağlandığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, ray altyapısının güvenliğini ve yolculuk konforunu artıran başarılı bir taşlama işleminin gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 3.6. Ray taşlama öncesi ve sonrası aşınma profili

Yüksek hızlı tren raylarında gerçekleştirilen taşlama işleminin etkileri, taşlama öncesi ve sonrası ray profili ölçümleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. İlk görsel, taşlama öncesi ray profiline ilişkin verileri içermekte olup, ray yüzeyindeki aşınma ve

düzensizlikleri göstermektedir. Bu aşamada, kırmızı çizgiyle gösterilen mevcut profil ile mavi çizgiyle belirtilen referans profil arasındaki fark belirgin olup, ray yüzeyinde özellikle üst bölge ve iç kenarlarda önemli aşınmalar gözlemlenmiştir. Eğrilik yarıçapları (R80 ve R300) incelendiğinde, rayın farklı kesitlerinde düzensizliklerin meydana geldiği anlaşılmaktadır.

Taşıma işlemi sonrasında elde edilen ikinci görselde, ray profili üzerinde gerçekleştirilen düzeltmeler net bir şekilde görülmektedir. Mavi ve kırmızı çizgiler arasındaki farkın önemli ölçüde azaldığı, yani taşıma işlemi sonucunda rayın ideal profiline yaklaştığı gözlemlenmektedir. Özellikle rayın aşınmış bölgelerinin düzeltilmesiyle birlikte, yüzeyin homojen hale getirildiği ve eğrilik yarıçaplarının daha dengeli bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, tekerlek-ray etkileşiminin iyileştirildiğini ve ray yüzeyindeki düzensizliklerin minimize edildiğini göstermektedir.

Taşıma öncesi ve sonrası profiller karşılaştırıldığında, taşıma işleminin ray yüzeyi üzerindeki olumlu etkileri açıkça ortaya çıkmaktadır. Taşıma işlemi sayesinde aşınma ve deformasyonlar giderilmiş, rayın temas yüzeyi optimize edilerek demiryolu hattının performansı artırılmıştır. Bununla birlikte, taşıma sonrası ray profili, ideal profil ile büyük ölçüde örtüşmekte olup, bakım sürecinin etkinliğini kanıtlamaktadır. Bu düzeltmeler, rayın hizmet ömrünü uzatırken, aynı zamanda titreşim ve gürültü seviyelerinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır.

3.4. Wilmec ETM Cihazıyla Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ray taşıma işlemi, demiryolu hatlarında ray yüzeyinin düzeltilmesi, aşınmanın azaltılması ve trenlerin güvenli seyahat edebilmesi için kritik bir bakım sürecidir. Bu çalışma kapsamında, taşıma işlemi sonrası elde edilen ölçüm değerleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ölçümler, Wilmec ETM cihazı kullanılarak alınmıştır. Cihaz, ray yüzeyindeki yükseklik farklılıklarını mikrometre hassasiyetinde ölçerek taşıma işleminin etkinliğini değerlendirmektedir. Ölçümler, hat boyunca belirlenen spesifik noktalarda gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm noktalarının belirlenmesinde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Taşıma sonrası yüzey pürüzlülüğünün tespiti
- Yükseklik değişimlerinin ölçülmesi
- Ray taşıma işleminin homojenliğinin değerlendirilmesi

Aşağıda yer alan tablolarda Wilmec ETM cihazı ölçümleri sonucu elde edilen sağ ve sol raya ait ön ve arka ölçümler ile metal kaldırma değerleri verilmiştir.

Tablo 3.5. Wilmec ETM cihazı sağ ray taşlama öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları

Sağ Ray									
Ön Ölçüm					Arka Ölçüm				
1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
2,207	2,214	2,224	2,211	2,202	2,583	2,605	2,582	2,584	2,578
2,216	2,210	2,226	2,216	2,205	2,583	2,588	2,598	2,598	2,582
2,209	2,215	2,226	2,216	2,202	2,591	2,572	2,605	2,581	2,588
2,200	2,223	2,221	2,238	2,201	2,584	2,609	2,582	2,588	2,577
2,203	2,208	2,192	2,213	2,192	2,579	2,575	2,582	2,591	2,582
2,205	2,214	2,189	2,216	2,224	2,596	2,588	2,582	2,592	2,598
2,206	2,209	2,195	2,212	2,205	2,586	2,590	2,582	2,588	2,597
2,206	2,213	2,197	2,216	2,206	2,588	2,597	2,587	2,594	2,585
2,217	2,196	2,205	2,227	2,196	2,598	2,589	2,581	2,590	2,593
2,219	2,209	2,225	2,219	2,208	2,586	2,593	2,581	2,585	2,598
2,213	2,221	2,207	2,228	2,217	2,584	2,587	2,581	2,589	2,596

Tablo 3.6. Wilmec ETM cihazı sağ ray metal kaldırma ölçüm sonuçları

1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
0,382	0,358	0,373	0,366	0,366
0,388	0,376	0,371	0,379	0,378
0,362	0,383	0,348	0,363	0,387
0,398	0,362	0,419	0,376	0,377
0,380	0,382	0,388	0,384	0,374
0,392	0,384	0,372	0,395	0,388
0,381	0,404	0,372	0,389	0,382
0,395	0,368	0,403	0,377	0,372
0,385	0,370	0,382	0,367	0,393

Tablo 3.5, Tablo 3.6, Wilmec ölçüm sonuçlarına göre sağ rayda gerçekleştirilen taşlama işlemi ölçümler arasındaki fark üzerinden hesaplanan metal kaldırma miktarını bölgesel olarak detaylandırmaktadır. Ortalama kaldırılan metal kalınlığı 0,370 mm ile 0,383 mm arasında değişmekte olup, tüm değerlerin belirli bir aralıkta toplanması, taşlama işleminin kontrollü ve istikrarlı bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Özellikle 1. ve 2. bölgelerde değerler genellikle 0,365–0,382 mm, 3., 4. ve 5. bölgelerde ise 0,350–0,392 mm arasında yoğunlaşmıştır. Bu durum, makine taşlamanın tüm ray kesiti boyunca eşit derinlikte işleme gerçekleştirdiğini ve ray başı profilinde istenen düzeltmenin sağlandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, belirgin bir bölgesel sapma ya da aşırı kaldırma olmadığı için rayın yapısal bütünlüğünün korunduğu söylenebilir. Metal kaldırma miktarları, hedeflenen 0,35–0,40 mm teknik aralığında seyrederek aşındırma

işleminde optimum malzeme kaldırıldığını ve hem konfor hem de güvenlik açısından ideal ray profiline ulaşıldığını kanıtlamaktadır. Sonuç olarak, sağ rayda yapılan taşlama işlemi hem profil düzeltme hem de yüzey yenileme açısından başarılı bir uygulamadır. Wilmec cihazı ile elde edilen ölçüm sonuçları taşlama işleminin sistematik ve güvenli biçimde uygulandığını göstermektedir.

Tablo 3.7. Wilmec ETM cihazı sol ray ön ve arka ölçüm sonuçları

Sol Ray									
Ön Ölçüm					Arka Ölçüm				
1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
2,214	2,225	2,206	2,221	2,210	2,596	2,583	2,579	2,587	2,576
2,216	2,207	2,226	2,214	2,204	2,604	2,583	2,597	2,593	2,582
2,216	2,207	2,227	2,222	2,213	2,578	2,590	2,575	2,585	2,600
2,187	2,221	2,188	2,221	2,208	2,585	2,583	2,607	2,597	2,585
2,202	2,209	2,193	2,210	2,204	2,582	2,591	2,581	2,594	2,578
2,198	2,197	2,212	2,198	2,210	2,590	2,581	2,584	2,593	2,598
2,205	2,194	2,209	2,197	2,211	2,586	2,598	2,581	2,586	2,593
2,196	2,214	2,194	2,215	2,210	2,591	2,582	2,597	2,592	2,582
2,211	2,218	2,201	2,220	2,202	2,596	2,588	2,583	2,587	2,595
2,221	2,208	2,227	2,219	2,204	2,587	2,592	2,581	2,586	2,590
2,209	2,226	2,214	2,221	2,206	2,588	2,590	2,583	2,591	2,599

Tablo 3.8. Wilmec ETM cihazı sol ray metal kaldırma ölçüm sonuçları

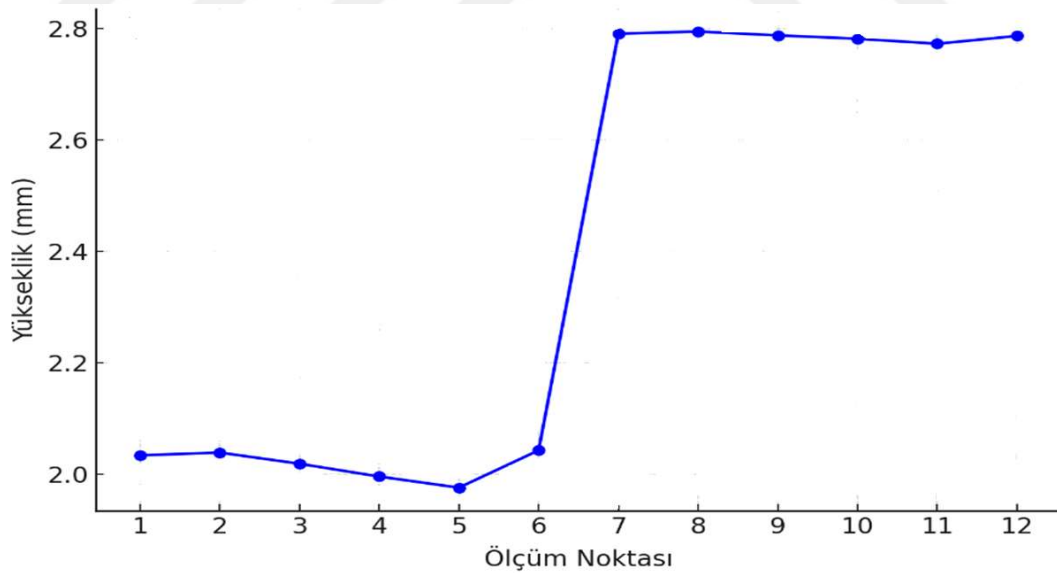
1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
0,382	0,358	0,373	0,366	0,366
0,388	0,376	0,371	0,379	0,378
0,362	0,383	0,348	0,363	0,387
0,398	0,362	0,419	0,376	0,377
0,380	0,382	0,388	0,384	0,374
0,392	0,384	0,372	0,395	0,388
0,381	0,404	0,372	0,389	0,382
0,395	0,368	0,403	0,377	0,372

Tablo 3.7, Tablo 3.8 göre sol rayda ortalama metal kaldırma miktarı değerleri 0,369 mm ile 0,396 mm arasında değişmekte olup, tüm ölçüm noktaları teknik olarak hedeflenen 0,35–0,40 mm aralığında kalmıştır. Bu durum, taşlama işleminin hem yüzey yenileme hem de profil düzeltme açısından istenilen derinlikte yapıldığını ve rayın geometrisinin kontrollü biçimde iyileştirildiğini göstermektedir. Bölgesel analizlere bakıldığında, 1. bölge değerleri 0,362–0,398 mm, 3. bölge değerleri ise 0,348–0,404 mm arasında değişmektedir. En yüksek kaldırma değeri 3. bölgede 0,404 mm ile ölçülmüş ve bu durum, yerel olarak daha fazla bozulma bulunan bir bölgede daha etkin taşlama uygulandığını göstermektedir. Bununla birlikte, hiçbir bölgede aşırı metal kaldırma tespit edilmemiştir; bu da ray yüzeyinde gereksiz malzeme kaybının önlenmiş olduğunu ortaya

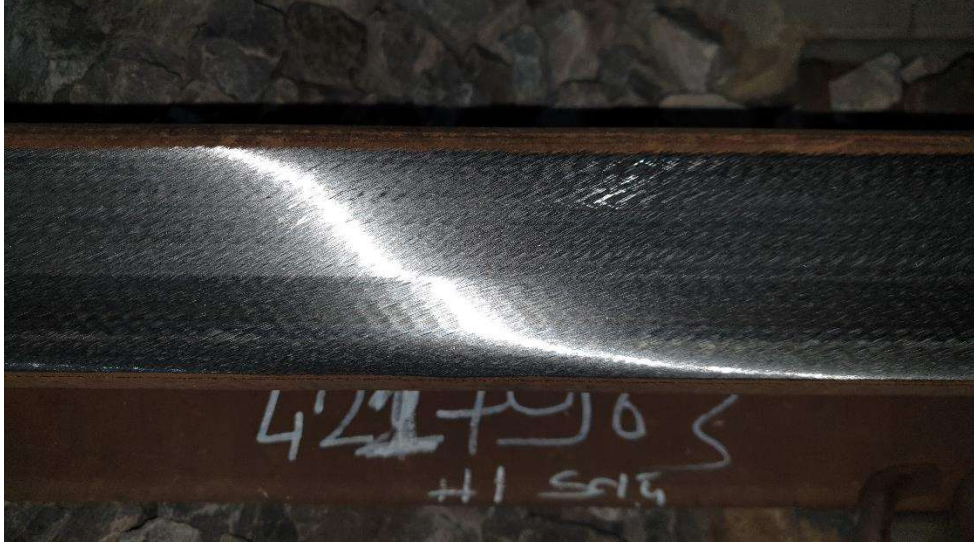
koyar. Değerlerin 5. bölgede dahi 0,366–0,393 mm aralığında seyretmesi, taşlamanın tüm enkesit boyunca homojen olarak uygulandığını doğrulamaktadır. Sonuç olarak, sol rayda gerçekleştirilen taşlama uygulaması, ray profilinde teknik olarak istenilen düzeltme derinliğine ulaşmış ve tüm ölçüm bölgelerinde yüzey düzgünlüğünü artırmıştır. Metal kaldırma miktarının hem ortalama hem bölgesel olarak dengeli oluşu, işlemin operatör kontrolünde, sistematik ve mekanik olarak tutarlı biçimde yürütüldüğünü göstermektedir. Bu durum hem ray altyapısının ömrünü uzatmakta hem de taşlama sonrası izlenebilir kalite kontrolünü sağlamaktadır.

Bu ölçümler, ray yüzeyindeki yükseklik değişimlerini ortaya koymaktadır. Genel olarak, taşlama sonrası yüzey iyileşmesine rağmen belirli bölgelerde yükseklik farklılıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, Wilmec ETM raporu doğrultusunda yapılan analizlerde şu bulgulara ulaşılmıştır:

- Taşlama sonrası yüzeyde belirli seviyede iyileşme sağlanmıştır.
- Ölçüm değerleri belirli bir standarda uyum sağlamakla birlikte, bazı bölgelerde ek taşlama ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir. Genel ortalama yükseklik değeri 2,45 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Ray taşlama sonrası ölçüm



Görsel 3.9. Taşlama sonrası çizgisel kusur ve ondülasyonun giderilmesi

Ray yüzeyinde taşlama sonrası belirgin bir düzelme görülmekte olup, pürüzlü ve kusurlu alanlar ortadan kalkmış, yüzey düzgünlüğü sağlanmıştır.



Görsel 3.10. Taşlama sonrası mikro oyuklar ve pullanma kusuru giderilmiş

Taşlama işlemi sonrası, yüzeydeki mikro çatlaklar ve dalga izleri tamamen ortadan kalkmış, ray kusursuz hale gelmiştir.

3.5. Makine Taşlama Sonucu Genel Değerlendirme

Makina ile yapılan ölçüm sonuçları:

Makina ile yapılan ölçümlerde taşlama işlemi öncesi ve sonrası durumları net bir şekilde ortaya koymaktadır.

- DQM Cihazı (Makina ile Ölçüm Sonuçları):
 - Ölçüm Sonuçları:
 - Minimum: +0,00 mm
 - Maksimum: +0,19 mm
 - Mutlak: +0,19 mm

DQM cihazı ile yapılan makina ölçümleri, ray yüzeyindeki enine kesit profilindeki bozulmaları ve aşınmaları göstermiştir.

- RMF Cihazı (Makina ile Ölçüm Sonuçları):
 - Ölçüm Sonuçları:
 - 10-30 mm: %0
 - 30-100 mm: %1
 - 100-300 mm: %1
 - 300-1000 mm: %1

RMF cihazı ile yapılan ölçümler, taşlama sonrası düzeltilen dalga boyu aralıklarını ve ray yüzeyindeki genel iyileşmeyi göstermektedir.

- Wilmec Cihazı (Makina ile Ölçüm Sonuçları):
 - Ölçüm Sonuçları:
 - Metal Kaldırma Miktarı: 1,5 mm (ortalama)

Wilmec cihazı ile yapılan ölçümler, taşlama sonrası yüzeyde kalan metal kaldırma miktarının önemli ölçüde azaldığını ve yüzeyin homojenleştiğini ortaya koymaktadır.

Yapılan ölçümler, taşlama işleminin ray yüzeyindeki düzensizlikleri önemli ölçüde düzelttiğini ve ray profilinin ideal hale getirildiğini göstermektedir. DQM, RMF ve Wilmec cihazları ile elde edilen sonuçlar, taşlama işleminin etkinliğini kanıtlamaktadır. Ray yüzeyindeki metal kaldırma, ondülasyon ve geometrik düzensizlikler taşlama işlemi ile minimize edilmiştir. Elle taşlama işlemi, özellikle küçük düzensizliklerin giderilmesi ve daha homojen bir yüzey elde edilmesi için etkili bir yöntem olmuştur.

3.5.1. Yol yüzeyi taşlama izleri

Ray taşlama işleminde, disk ray yüzeyine açılı şekilde temas eder. Ancak taşlama kafasının ayarı doğru yapılmazsa, disk ray üzerinde dar bir bölgede sabit şekilde iz

bırakır. Bu izler taşlama izi veya fasetta izi olarak tanımlanır. Eğer taşlama izleri standartların dışında ise:

- Ray yüzeyinde düzensizlik yaratabilir.
- Tekerlek teması açısından istenmeyen mikro profiller oluşturabilir.
- Titreşim ve gürültü seviyesini artırabilir.
- Rayın servis ömrünü azaltabilir.

Taşlama diskinin doğru açıda ayarlanması, dengeli besleme ve disk basıncı kullanılması, taşlama makinesinin düzenli kalibrasyonu ve taşlama sonrası sık sık ölçümler ile önlenabilir.

Maksimum taşlama izi genişliği;

Ekartman köşesinde (Rayın R13 mm yarıçaplık alanında) 4mm, Omuzda (Rayın R80 mm yarıçaplık alanında) 7 mm, Ray mantarında (R300mm yarıçaplık alanında) 10 mm olmalıdır. 100mm'lik bir ray uzunluğu boyunca taşlama izi genişliğinde maksimum değişim taşlama izinin maksimum genişliğinin %25'i olmalıdır.

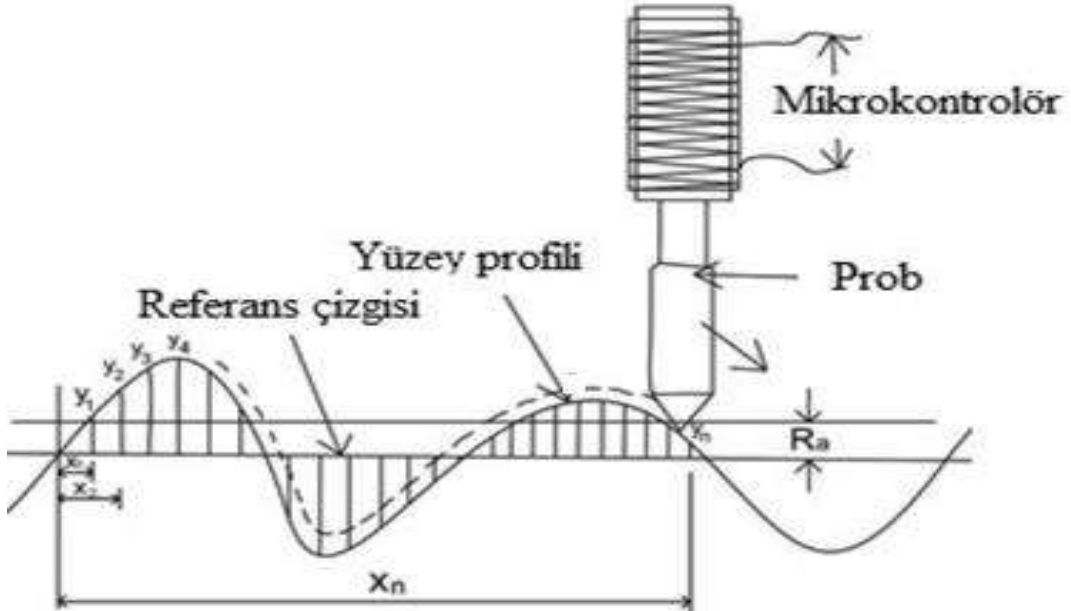


Görsel 3.11. Taşlama sonrası ray profili taşlama izleri ölçümleri

Ray yüzeyinde oluşan paralel faseta çizgileri, taşlamanın kontrollü gerçekleştirildiğini göstermekte olup, yüzey kalitesini olumsuz etkileyecek bir bozulma gözlemlenmemiştir.

3.5.2. Pürüzlülük

Taşlama sonrası pürüzlülük ölçümleri her 1000 metrede bir olmak üzere yolun karakteristik yüzeyini yansıtacak şekilde ölçülmüştür. EN ISO 4287 standardına göre tanımlanan maksimum aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (R_a) 0,01 mm (10 μ m) olacaktır.



Şekil 3.8. Ray yüzeyi pürüzlülük ölçümü



Görsel 3.12. Pürüzlülük ölçümleri

Yapılan taşlama işlemi sonrası ölçülen pürüzlülük değeri örnek: $R_a = 0,84 \mu m$, yüzeyin düzgünlüğünü ve işlemin kalitesini göstermektedir. Bu değer, rayda dalga, çatlak ya da erken aşınma risklerini minimize edecek düzeydedir.

3.6. Ek Taşlama İhtiyacı Olan Bölgelerde Elle Taşlamalar

Ray taşlama işlemi sonrasında, bazı bölgelerde hala belirgin düzensizlikler ve aşınmalar gözlemlenmiş olup, bu bölgelerde ek taşlama ihtiyacı doğmuştur. Taşlama işlemi sonrası yapılan detaylı analizler ve ölçümler, özellikle rayın iç kenarları ve üst yüzeyinin bazı kısımlarında hala aşınma derinliklerinin ideal seviyenin üzerinde olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, taşlama işlemi sırasında tam olarak düzeltilmeyen veya daha fazla malzeme kaldırılması gereken bölgelerde ek müdahaleyi gerektirmiştir.

Ray yüzeyinin profillemeye işlemi sonrası hedef geometriye uygunluğunu ve aşınma durumunu belirlemek amacıyla dijital bir gösterge (digital indicator) cihazı kullanılarak profil kontrolü gerçekleştirilmiştir.



Görsel 3.13. Taşlama öncesi dijital derinlik ölçüm

Yapılan ölçümde dijital ekran üzerinde -0,68 mm değer okunmuştur. Bu değer, ray yüzeyinde belirli bir referans profil çizgisine göre olan negatif sapmasını (aşınmayı) göstermektedir. Bu tür ölçümler, rayın kullanım ömrü boyunca oluşan deformasyonları kayıt altına almak ve bakım planlamasını daha sağlıklı şekilde yapmak açısından kritik öneme sahiptir.



Görsel 3.14. Taşlama sonrası dijital derinlik ölçüm

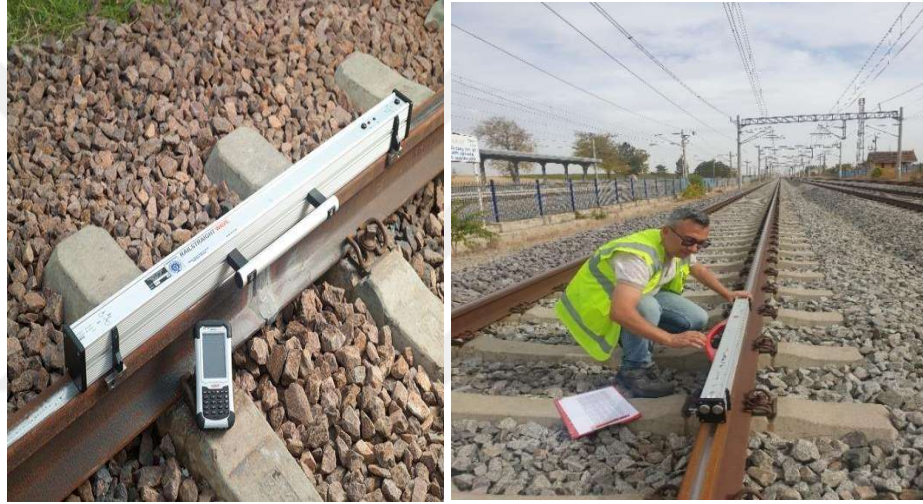
Yapılan ölçümde dijital ekran üzerinde -0,02 mm değer okunmuştur. Bu değer, ray mantarının belirli bir referans profil çizgisine göre olan negatif sapmasını (aşınmayı veya taşlama sonrası profil kaymasını) göstermektedir.

Bu bölgelerdeki aşınmaların giderilmesi ve yüzeyin daha homojen hale getirilmesi amacıyla elle taşlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elle taşlama, özellikle makine ile yapılan taşlamada ulaşılamayan dar ve karmaşık alanlarda uygulanmış, ray yüzeyinin düzgünlüğü ve eğrilik yarıçapları optimize edilmiştir. Elle taşlama işlemi, taşlama makinelerinin erişemediği hassas bölgelerde, özellikle iç kenarlarda yer alan aşınmaların giderilmesi için kritik bir adım olmuştur.

Elle taşlama işlemi sonucunda, bu bölgelerdeki düzensizlikler büyük ölçüde giderilmiş, rayın yüzeyi daha homojen bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu ilave müdahale, taşlama işleminin başarısını artırmış ve ray yüzeyinin genel kalitesini iyileştirmiştir. Ayrıca, bu sayede rayın ideal profilinin tam olarak sağlanması ve uzun vadeli güvenlik ile performansın garanti altına alınması mümkün olmuştur.

Ölçüm Cihazı:

- Cihaz Adı: Railstraight Wave
- Cihaz Kimliği: GT 22-17-290
- Ürün: Goldschmidt Group



Görsel 3.15. Elektronik mastar ölçüm cihazı ve ölçüm

3.6.1. Elle taşlama işlemi sonrası analiz

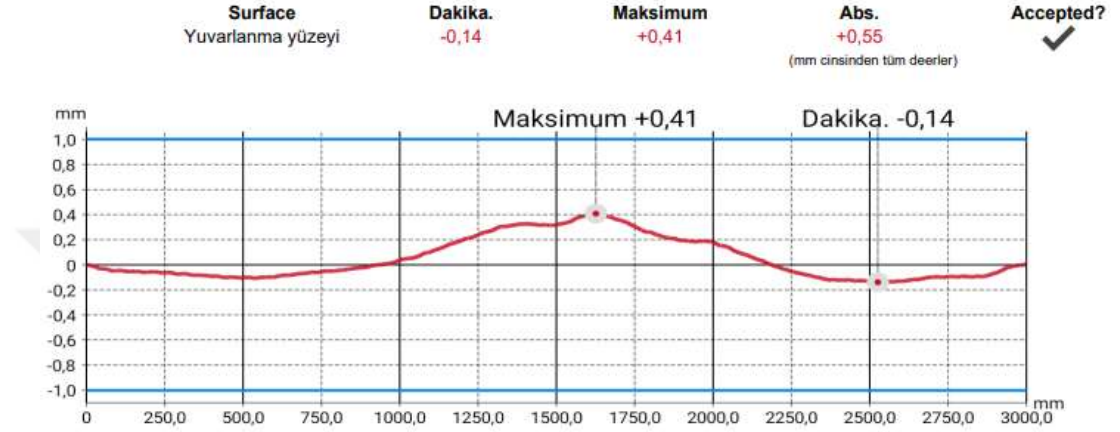
Elle taşlama işlemi, yüksek hızlı tren raylarında yerel deformasyonların ve aşınmaların giderilmesi amacıyla uygulanmış olup, taşlama sonrası yapılan ölçümlerle işlemin etkinliği değerlendirilmiştir. Ölçüm cihazı Railstraight Wave ile gerçekleştirilen ölçümler, ray yüzeyindeki geometrik profilin doğruluğunu ve taşlama işlemi sonrasında elde edilen düzeltmeleri ortaya koymuştur.

Tüm ölçüm verileri mm cinsinden olup, ölçüm cihazı tarafından sağlanan veriler, ray yüzeyindeki aşınma ve deformasyonların düzeltilme oranını yansıtmaktadır.

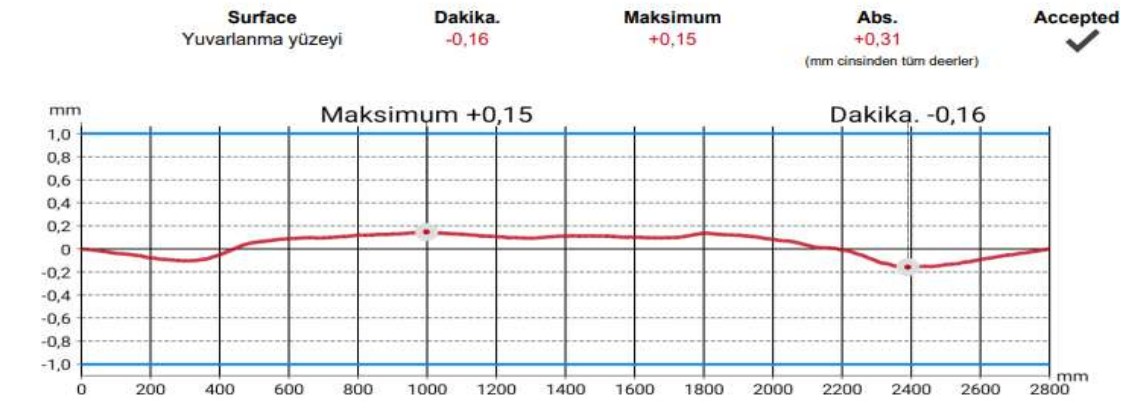
Ölçümler, 0–3000 mm uzunluğundaki ray kesitinde yapılmış ve tolerans sınırları içinde kalınmıştır.

Ölçüm verileri, ray yüzeyindeki düzensizliklerin ve aşınmaların düzeltildiğini ve taşlama işleminin etkili bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Minimum (+0,00 mm)

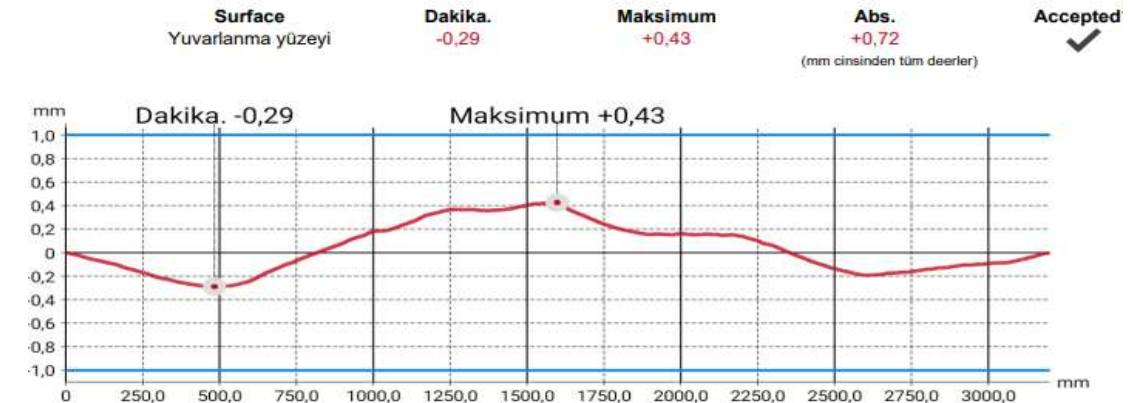
değeri, ölçülen ray yüzeyinin en iyi durumda olduğunu ve herhangi bir aşırı düzensizlik bulunmadığını gösterirken, Maksimum değeri ise, rayda belirli bölgelerde küçük ama kabul edilebilir seviyelerde kalan düzensizlikleri işaret etmektedir. Mutlak değeri ise, en fazla ölçülen deformasyon miktarını göstermektedir. Bu sonuç, taşlama işlemi sonrasında ray yüzeyinin oldukça iyi bir hale geldiğini, ortaya koymaktadır.



Taşlama öncesi ray profili (a)

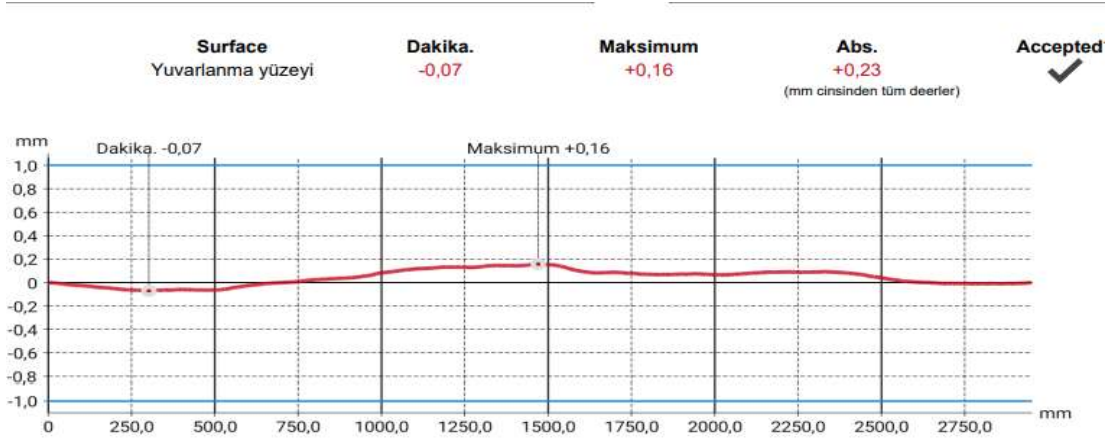


Taşlama sonrası ray profili (a)

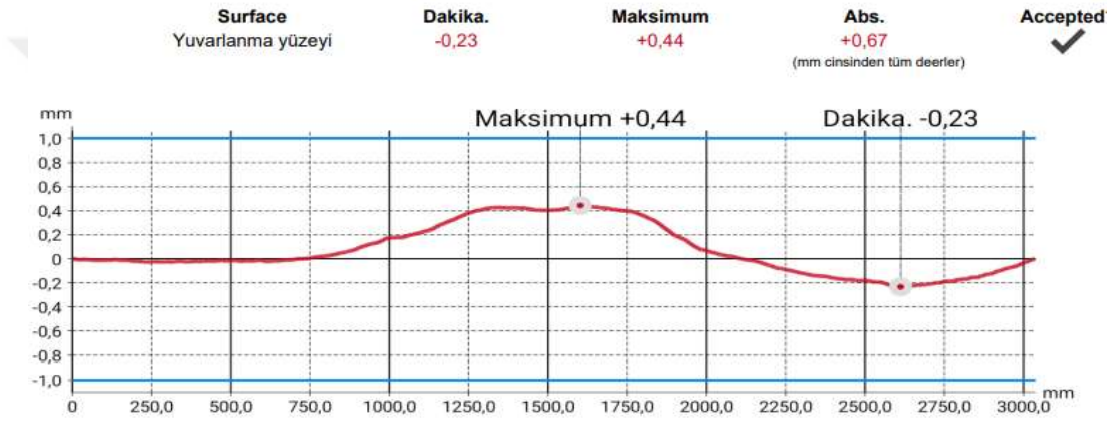


Taşlama öncesi ray profili (b)

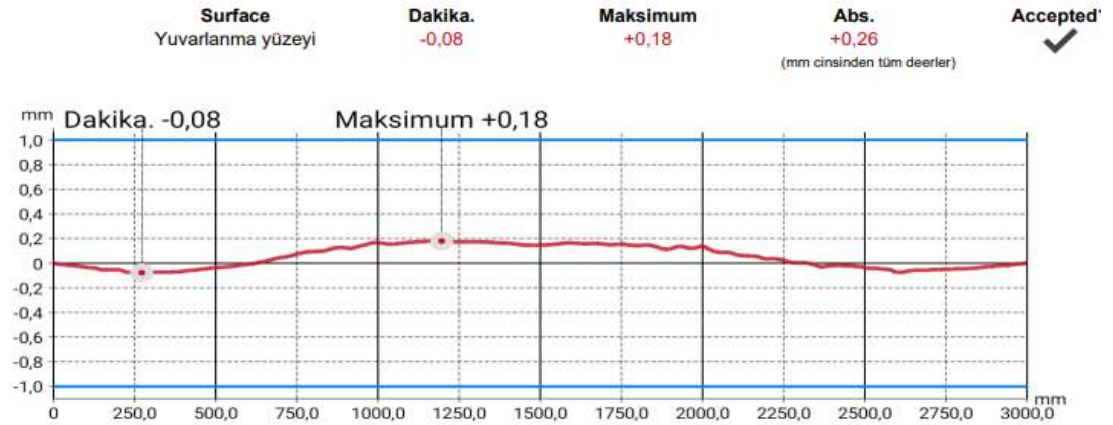
Şekil 3.9. Ray profili elle taşlama öncesi ve sonrası ölçüm (a-b-c)



Taşılama sonrası ray profili (b)



Taşılama öncesi ray profili (c)



Taşılama sonrası ray profili (c)

Şekil 3.9. (Devam) Ray profili elle taşılama öncesi ve sonrası ölçüm (a-b-c)

Yeniden profileleme işlemi sonrası ray yüzeyinde yapılan profil kontrolleri, ölçüm cihazları yardımıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Yeniden profileme işlemi sonrası ray yüzeyinde yapılan profil kontrolleri, ölçüm cihazları yardımıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Grafik verileri:

- Maksimum değer: +0,16 mm ile +0,44 arasındadır
- Mutlak sapma (Abs.): 0,23 mm ile 0,73 arasındadır

Ölçüm 0 ile 2750 mm uzunluğundaki ray yüzeyinde ve profil toleransları içerisinde kalınarak yüzey düzgünlüğü başarılı yapılmış bir şekilde sağlanmıştır. Kırmızı çizgi, gerçek ölçüm verilerini temsil ederken, siyah çizgi hedef profili göstermektedir. Aradaki farklar oldukça minimal olup, rayın servis güvenliğini ve sürüş konforunu etkilemeyecek düzeydedir. Yapılan taşlama ve gerekli görülen noktalardaki manuel müdahaleler, ray yüzeyinde hedeflenen geometrik profilin başarıyla elde edilmesini sağlamıştır. Ölçüm sonuçları, tüm tolerans kriterlerini karşılamakta ve ray profilinin standarda uygun olduğunu göstermektedir.

3.6.2. Yol yüzeyi eğim değişikliklerinin değerlendirilmesi

Yol yüzeyleri, güvenli sürüş koşullarını sağlamak için belirli eğim değerlerine sahip olmalıdır. Yüzeydeki eğim, suyun birikmesini önlemek ve yolun yapısal bütünlüğünü korumak açısından önemlidir. Taşlama işlemi, bozulmuş yol yüzeylerini düzeltmek ve yolun daha güvenli hale gelmesini sağlamak için yapılan önemli bir yöntemdir. Bu rapor, taşlama işleminin yol yüzeyindeki eğim değişikliklerini nasıl düzelttiğini ve bu değişikliklerin yolun performansına olan etkisini incelemektedir.

Yol yüzeyinin düzgünlüğü, eğim değerlerinin uygun sınırlar içinde olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Taşlama işlemi, yüzeydeki bozuklukları düzeltmeye ve eğim farklarını azaltmaya yönelik bir uygulamadır. Ancak, her kilometre noktasındaki eğim farklarının ve yüzey düzeltme başarı oranlarının ne kadar iyileştiği, taşlama işleminin etkinliğini gösterecek önemli veriler sunmaktadır.

Bu raporda, taşlama öncesi ve sonrası ölçülen eğim değerleri karşılaştırılmış, yüzey düzeltme etkinliği hesaplanmıştır. Kilometre noktalarındaki eğim farkları, taşlama sonrası düzeltme oranları ile detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tablo 3.9. Taşlama öncesi ölçümler

Kilometre Numarası	Sol Dizi (mm)	Sağ Dizi (mm)	Eğim (Sol Dizi)	Eğim (Sağ Dizi)
374+295	1,637	0	1,637	0
374+331	1,579	0	1,579	0
374+403	1,917	1,876	1,917	1,876

Tablo 3.9. taşlama öncesi yol yüzeyinin eğim değerlerini sunmaktadır. Veriler, her kilometre noktasında sol ve sağ dizilerdeki ölçümleri içermektedir. Sol dizi genellikle yolun dış şeridini, sağ dizi ise yolun iç şeridini temsil etmektedir. Burada görülen yüksek eğim farkları, taşlama işleminin gerekliliğini gösteren bir göstergedir. Taşlama öncesinde, özellikle 374+295 ve 374+331 kilometre noktalarında sol dizilerde yüksek eğim farkları dikkat çekmektedir.

Tablo 3.10. Taşlama sonrası ölçümler

Kilometre Numarası	Sol Dizi (mm)	Sağ Dizi (mm)	Eğim (Sol Dizi)	Eğim (Sağ Dizi)
374+295	0	0,36	0	0,36
374+331	0,31	0	0,31	0
374+403	0,28	0,37	0,28	0,37

Tablo 3.10. taşlama işlemi sonrasında ölçülen eğim değerlerini göstermektedir. Taşlama sonrası sol ve sağ dizilerdeki eğim farkları önemli ölçüde azalmıştır. 374+295 kilometre noktasındaki sol dizi eğimi sifıra indirilirken, sağ dizi eğimi de 0,36 mm olarak ölçülmüştür. Diğer kilometre noktalarındaki eğim farklarında da belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 3.11. Eğim değişikliklerinin yüzey düzeltme etkinliği üzerindeki etkisi

Kilometre Numarası	Taşlama Öncesi Yüzey Durumu	Taşlama Sonrası Yüzey Durumu	Yüzey Düzeltme Başarı Oranı (%)
374+295	Yüksek eğim farkı	Düşük eğim farkı	78,05
374+331	Yüksek eğim farkı	Orta seviyede düzeltme	19,6
374+403	Yüksek eğim farkı	Düşük eğim farkı	17,1

Tablo taşlama öncesi ve sonrası eğim değerlerindeki değişiklikleri göstermektedir. Her kilometre noktasındaki eğim farklarının ne kadar azaldığını göstermektedir. Örneğin, 374+295 kilometre noktasında sol dizi eğimi tam anlamıyla sifıra inmiştir, sağ dizi ise 0,36 mm'lik bir eğim farkı ile düzeltilmiştir. Diğer kilometre noktalarında da benzer şekilde eğim farklarında iyileşmeler sağlanmıştır.

Taşlama sonrası, toplam eğim değerlerinde büyük bir azalma gözlemlenmiştir. 374+295 kilometre noktasındaki toplam eğim farkı 1,277 mm'ye düşerken, 374+400 kilometre noktasındaki toplam eğim farkı 3,143 mm'ye düşmüştür. Bu, taşlama işleminin yol yüzeyine etkisinin ne kadar başarılı olduğunu gösteren önemli bir veri sunmaktadır.

Tablo 3.11 her kilometre noktası için taşlama işlemi öncesindeki ve sonrasındaki yüzey durumunu karşılaştırmakta olup, yüzey düzeltme başarı oranlarını da içermektedir. 374+295 kilometre noktasındaki yüzey düzeltme başarı oranı %78,05 ile oldukça yüksek bir başarı göstermektedir. Diğer kilometre noktalarındaki başarı oranları ise, uygulanan taşlama işleminin etkinliğinin değişen koşullara göre nasıl etkilendiğini gözler önüne sermektedir.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, yüksek hızlı tren raylarının taşlama öncesi ve sonrası yüzey durumunu değerlendirmek amacıyla makine ile taşlama işlemi gerçekleştirilmiş ve taşlama sürecinin etkinliğini ölçmek için dört farklı cihaz kullanılmıştır: DQM, RMF, Wilmec ve pürüzlülük ölçüm cihazı. Her bir cihaz, taşlama işleminin etkilerini belirlemek ve ray yüzeyindeki düzensizliklerin giderilmesine yönelik yapılan iyileştirmeleri incelemek için kullanılmıştır.

DQM cihazı, rayın enine kesit profilini ölçerek, taşlama işlemi öncesi ve sonrası yüzeydeki deformasyonları tespit etmiştir. Taşlama öncesinde, ray yüzeyinde belirli bölgelerde aşınmaların yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle rayın üst yüzeyinde ve iç kenar bölgelerinde ciddi deformasyonlar ve aşınmalar bulunmaktaydı. DQM cihazı, bu bölgelerdeki profildeki bozulmaların büyüklüğünü yüksek hassasiyetle ölçerek, taşlama işleminin gerekliliğini ortaya koymuştur.

Taşlama sonrası yapılan ölçümler, ray yüzeyinin önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. Aşınmanın büyük bir kısmı giderilmiş ve rayın kesit profili daha düzgün bir hale gelmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, taşlama işleminden sonra profilin ideal geometrisi ile uyumlu hale geldiği, aşınmanın yaklaşık %80 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu iyileşme, tekerlek-ray etkileşiminin optimize edilmesine ve demiryolu hattının uzun ömürlü olmasına katkı sağlamaktadır.

RMF cihazı, ray yüzeyindeki ondülasyonları (dalgalı yüzey bozulmaları) ölçen bir cihazdır. Taşlama öncesi ölçümler, özellikle 100-300 mm ve 300-1000 mm aralıklarında yüksek kesinti oranlarına işaret etmiştir. Bu durum, ray yüzeyinde belirgin dalga şekli bozulmalarının olduğunu ve taşlama işlemi ile bu bozulmaların düzeltilmesi gerektiğini göstermektedir.

Taşlama sonrası yapılan RMF ölçümleri, ray yüzeyindeki ondülasyonların büyük ölçüde giderildiğini ve yüzeydeki düzensizliklerin azaldığını ortaya koymuştur. Kesinti oranlarının önemli ölçüde düştüğü ve yüzeyin daha homojen bir hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu gelişme, taşlama işleminin ray yüzeyinin kalitesini artırmak için ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

Wilmec cihazı, taşlama işlemi sırasında metal kaldırma miktarını ölçen bir cihazdır. Taşlama öncesi ve sonrası ölçümler, taşlama işlemi ile kaldırılan malzeme miktarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Taşlama öncesi ölçüm sonuçları, ray yüzeyinde belirli

bölgelerde yüksek metal kaldırma ihtiyacı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle aşınmış ve deformasyona uğramış alanlarda daha fazla malzeme kaldırılacağı tespit edilmiştir.

Taşlama sonrası ölçümler, kaldırılan metal miktarının önemli ölçüde azaldığını ve ray yüzeyinin daha stabil hale geldiğini göstermiştir. Bu, taşlama işleminin hem yüzey düzeyinde iyileşme sağladığını hem de uzun vadeli bakım maliyetlerini düşürdüğünü göstermektedir.

Makine ile yapılan taşlama işlemi, üç farklı ölçüm cihazı (DQM, RMF ve Wilmec) ile yapılan analizler sonucunda, ray yüzeyindeki önemli düzensizliklerin büyük ölçüde giderildiğini ortaya koymuştur. DQM cihazı, rayın kesit profilindeki iyileşmeyi; RMF cihazı, yüzey ondülasyonlarındaki azalmayı; Wilmec cihazı ise metal kaldırma miktarındaki düşüşü göstermiştir. Tüm bu sonuçlar, taşlama işleminin demiryolu hattının güvenliği, konforu ve uzun ömrü açısından ne denli önemli bir bakım süreci olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, makine ile taşlama işlemi sayesinde ray yüzeyi optimize edilmiş, aşınma ve deformasyonlar giderilmiş, rayın performansı artırılmıştır. Bu iyileştirmeler, demiryolu hattının güvenliğini ve sürüş konforunu artırmakla birlikte, bakım maliyetlerinin de düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Makine ile yapılan taşlama işlemi sonrasında yapılan ölçümler, ray yüzeyindeki önemli düzensizliklerin büyük ölçüde giderildiğini göstermiştir. Ancak, bazı bölgelerde taşlama işlemi yeterli olmamış ve elle taşlamaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu bölgeler, özellikle taşlama işlemi sırasında daha fazla metal kaldırılması gereken ve aşınmanın yoğunlaştığı alanlar olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde, taşlama cihazlarının etkinliği sınırlı kalmış ve elle müdahale edilmesi gerekmiştir.

Elle taşlama işlemi, özellikle küçük yüzey deformasyonlarının giderilmesi ve mikro düzeydeki aşınmaların düzeltilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elle müdahalede, daha hassas bir düzeltme yapılabilmiş ve ray yüzeyi daha düzgün hale getirilmiştir. Bu işlemin ardından yapılan ölçümler, ilgili bölgelerdeki düzensizliklerin giderildiğini ve yüzey profilinin iyileştiğini göstermektedir.

Genel Değerlendirme:

Makine ile yapılan taşlama işlemi, üç farklı ölçüm cihazı (DQM, RMF ve Wilmec) ile yapılan analizler sonucunda, ray yüzeyindeki önemli düzensizliklerin büyük ölçüde giderildiğini ortaya koymuştur. Ancak, bazı noktalarda taşlama cihazlarının etkinliği sınırlı kalmış ve elle müdahale gerekmiştir. DQM cihazı, rayın kesit profilindeki

iyileşmeyi; RMF cihazı, yüzey ondülasyonlarındaki azalmayı; Wilmec cihazı ise metal kaldırma miktarındaki düşüşü göstermiştir.

Ray taşlama öncesi yapılan ölçüm ve kontrollerde hem dikey hem yatay olarak büyüyerek rayı zayıflatabilecek hatalar tespit edilmiştir. Bu kusurlar müdahale edilemeden kontrolsüz halde bırakıldığında büyük güvenlik risklerine dönüşürler. Tüm bu sonuçlar, doğru ölçüm ve ray taşlama işlemi ile her bir kusur sorun haline gelmeden önce tespit edilerek demiryolu hattının güvenliği, konforu ve uzun ömrü açısından ne denli önemli bir bakım süreci olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, taşlama işlemi sayesinde ray yüzeyi optimize edilmiş, aşınma ve deformasyonlar giderilmiş, rayın performansı artırılmıştır. Bununla birlikte, elle yapılan taşlama müdahaleleri, özellikle makine taşlamasının yeterli olmadığı alanlarda önemli bir rol oynamış ve ray yüzeyinin homojen hale getirilmesini sağlamıştır. Bu iyileştirmeler, demiryolu hattının güvenliğini ve sürüş konforunu artırmakla birlikte, bakım maliyetlerinin de düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Öneriler:

1. Düzenli Taşlama ve Bakım Programlarının Oluşturulması: Taşlama işlemi, ray yüzeyindeki düzensizlikleri ortadan kaldırarak demiryolu hattının güvenliğini ve verimliliğini artırmaktadır. Bu nedenle, düzenli aralıklarla taşlama işlemleri yapılması, ray yüzeyinin ideal durumda tutulmasını sağlar. Önerimiz, taşlama işlemlerinin belli periyotlarla planlanarak uygulanması, özellikle yüksek dinamik yüklerin etkisiyle aşınmanın hızlandığı bölgelerde bu işlemlerin daha sık gerçekleştirilmesidir.

2. Elle Taşlama İhtiyacı Olan Bölgelerde Daha Hassas Ölçümler Yapılması: Makine ile taşlama işlemi genellikle yeterli sonuçlar verse de, bazı bölgelerde elle müdahale gereklidir. Bu tür bölgelerin belirlenmesi için daha hassas ölçüm cihazlarının kullanılması önerilmektedir. Özellikle DQM, RMF ve Wilmec cihazları ile yapılan ölçümler sonucu elle taşlamaya ihtiyaç duyulan noktalar tespit edilmiştir. Bu bölgelerin daha net bir şekilde belirlenmesi, elle taşlama ihtiyacının azaltılmasına yardımcı olacaktır.

3. Yeni Teknolojilerin Entegre Edilmesi: Taşlama işleminin etkinliğini artırmak için yeni nesil taşlama makineleri ve ölçüm cihazları ile teknolojik gelişmeler takip edilmelidir. Bu tür yenilikçi cihazlar, taşlama işleminin doğruluğunu artırabilir ve daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Ayrıca, otomatik taşlama makinelerinin,

elle taşlamaya duyulan ihtiyacı minimize edecek şekilde optimize edilmesi faydalı olacaktır.

4. Rayların Durumuna Göre Özelleştirilmiş Taşlama Stratejileri Geliştirilmesi: Ray yüzeyindeki düzensizliklerin farklı boyutlarda olması, taşlama işlemlerinin özelleştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Önerimiz, rayların durumu ve yüzeydeki deformasyon derecesine göre taşlama stratejilerinin geliştirilmesidir.

Bu sayede, belirli bölgelerde daha fazla malzeme kaldırılması sağlanarak, işlemlerin daha etkili hale gelmesi mümkün olacaktır.

5. İleriye Dönük İzleme Sistemlerinin Kurulması: Taşlama işlemi sonrası ray yüzeyindeki iyileşmelerin takibi, gelecekteki bakım çalışmalarının planlanmasında önemlidir. Bu nedenle, taşlama işlemi sonrasında sürekli izleme sistemlerinin kurulması önerilmektedir. Bu sistemler, ray yüzeyindeki değişiklikleri zaman içinde takip ederek, erken aşamada müdahalelerin yapılmasına olanak tanıyacaktır.

6. Eğitim ve Eğitim Programlarının Güncellenmesi: Taşlama işlemi ve kullanılan ölçüm cihazları hakkında personel eğitimlerinin sürekli olarak güncellenmesi gereklidir. Cihazların doğru kullanımı ve bakım süreçlerinin etkinliği, taşlama işleminin başarısını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, personelin teknolojik gelişmelere ve yeni cihazlara adaptasyonunun sağlanması amacıyla eğitim programlarının düzenli olarak güncellenmesi önerilmektedir.

7. Taşlama Sonrası Performans İzlemesi ve Değerlendirme: Taşlama işlemi sonrasında yapılan ölçümler, işlem sonucunda elde edilen performans gösterse de, süreçlerin izlenmeye devam edilmesi önemlidir. Bu bağlamda, taşlama sonrası yapılan iyileştirmelerin etkinliğini belirlemek için düzenli performans izleme ve değerlendirme çalışmaları yapılmalıdır. Böylece, taşlama işleminin ne kadar etkili olduğu sürekli olarak kontrol edilebilir ve gerektiğinde iyileştirme çalışmaları yapılabilir.

8. Çevresel Faktörlerin Taşlama İşlemine Etkisi: Çevresel faktörler, ray yüzeyindeki aşınma oranını etkileyebilir. Bu nedenle, taşlama işlemleri sırasında ortam sıcaklığı, nem oranı gibi çevresel faktörlerin göz önünde bulundurulması önerilmektedir. Çevresel koşullara göre taşlama işlemi parametrelerinin optimize edilmesi, daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adams, W. B. (1864). On the impedimental friction between wheel tire and rails, with plans for improvement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 411–416.
- Agarwal, S. and Rao, P. (2013). Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65, 68-78.
- Aglan, H. and Fateh, M. (2006). Fatigue damage tolerance of bainitic and pearlitic rail steels. *International Journal of Damage Mechanics*, 15, 393–410.
- Ar-ge, T. (2017). TCDD emniyet yönetim sistemi el kitabı. Ankara: Tufan Ofset.
- Arslan, E. (2023). Yüksek hızlı tren hatlarında rayların yeniden profilendirilmesinde döner taşlama metodunun uygulanabilirliği: Ankara-Eskişehir hattı örneği. *Demiryolu Mühendisliği* (17), 38-53.
- Australasian Railway Association. (2012). *Rail grinding management: Performance based standards*. Rail Industry Safety and Standards Board. (ETM-01-02).
- Australian Rail Track Corporation. (2009). *Manual for non-destructive testing of rail*. Australia.: ARTC.
- Başaran, M., Akbayır, Ö., Fidan, M., Sertsöz, M. ve Öztürk, M. (2024). Ray Yüzey Kusurları ve Ray Kırıklarının Evrişimli Artık Ağ Modeli ile Sınıflandırılması. *Demiryolu Mühendisliği* (19), 160-170.
- Bhardawaj, S., Sharma, R. and Sharma, S. (2019). Development and advancement in the wheel-rail rolling contact mechanics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 691, s. 1-12. Montreal, Canada: IOP Publishing Ltd.
- Bilgiç, Ş., Yalınız, P. ve İça, S. (2017). Demiryollarında bakım ve onarım faaliyetlerinin yol geometrisi kalitesine etkilerinin araştırılması: Kütahya-Afyonkarahisar demiryolu hattı örneği. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 12(1), 40-45.
- Birinci, B. (2007). *The Marshall Plan in Turkey: A critical evaluation of United States' interests in the plan and its effects on the Republic*. Yüksek lisans Tezi. İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi.
- Cannon, D. and Pradier, H. (1996). Wear. *Wear*, 191, 1-13.
- Cannon, D., Edel, K., Grassie, S. and Sawley, K. (2003). Rail defects: An overview. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26, 865–886.
- Cao, Y., Guan, J., Li, B., Chen, X. and Yang, J. (2013). Modeling and simulation of grinding surface topography considering wheel vibration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66((5-8)), 937-945.
- Choi, H., Lee, D., Song, C. and Lee, J. (2013). Choi, H.-Y., Lee, D.-H., Song, C. Y. and Lee, J. Optimization of rail profile to reduce wear on curved track. 14(4), *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(4), 619-625.
- Contuzzi, N., Campanelli, S. and Ludovico, A. (2011). 3D finite element analysis in the selective laser laser melting process. *International Journal of Simulation Modelling*, 10(3), 113-121.

- Çeliktaş, B. ve Ünlü, N. (2018). Risk değerlendirme karar matrisi yöntemi kullanarak örnek bir risk değerlendirme raporunun oluşturulması. *JASS Studies- The Journal of Academic Social Science Studies*, 65, 483-504.
- Darafon, A., Warkentin, A. and Bauer, R. (2013). 3D metal removal simulation to determine uncut chip thickness, contact length, and surface finish in grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(12), 1715-1724.
- Ding, H., Han, Y., Zhou, K., Huang, Y., Shi, L., Guo, J. and Wang, W. (2020). Grinding force modeling and experimental verification of rail grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering*, 234(8), 1254-1264.
- Dornfeld, D. A. (2014). Moving towards green and sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(1), 63-66.
- Esveld, C. (2001). (2001). *Modern railway track*. Netherlands: MRT Productions.
- European Committee for Standardization. (2017). *Railway applications—Track—Track geometry quality, Part 5: Geometric quality levels—Plain line, switches and crossings (EN 13848-5:2017)*.
- Fan, Y., Dixon, S., Edwards, R. and Jian, X. (2007). Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head. *NDT&E International*, 40, 471-477.
- Ghofrani, F., Pathak, A., Mohammadi, R., Aref, A. and He, Q. (2020). Predicting rail defect frequency: An integrated approach using fatigue modeling and data analytics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 101-115.
- Göçener, M. (2012). *Demiryollarında iş sağlığı ve güvenliği*.
http://www.isgum.gov.tr/rsm/file/isgdoc/IG12-demiryollarinda_isg.pdf (Erişim tarihi: 19.06.2021)
- Gürgenli, M. G. (2021). *Yol yapım bakım ve onarım çalışmalarında risk analizi*. Yüksek lisans tezi. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi.
- Hesse, D. and Cawley, P. (2007). Defect detection in rails using ultrasonic surface waves. *Insight*, 49, 318-326.
- Ilinykh, A., Yurkova, E. and Aksenov, V. (2021). Informatization of the production process of rail grinding in transit. *Transportation Research Procedia*, 54, 388-396.
- International Union of Railways. (2002). *UIC Code 712: Rail defects* (4th ed.).
- International Union of Railways. (2007). *UIC Code 725: Treatment of rail defects* (1st ed.).
- Investigation of rolling contact fatigue cracks in a grade 900A rail steel of a metro track. (tarihsiz). *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29, 887-900.

- Johansson, A. and Nielsen, J. (2003). Out-of-round railway wheels: Wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217, 135–146.
- Kalker, J. J. (1982). A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact. *Vehicle System Dynamics*, 11(1), 1-13.
- Karatürk, B. (2021). *İş sağlığı ve güvenliğinde risk analizi: Karayolları yapım çalışmalarından bir uygulama*. Yüksek lisans tezi. Gaziantep: Hasan Kalyoncu Üniversitesi.
- Kaya, C. (2019). *Demiryolu hatlarının emniyetin sağlanması ile ilgili risk analizleri*. Yüksek lisans tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Kerr, M. (2012). *Rail defects handbook*. Australia: Australian Rail Track Corporation.
- Koçak, Y. (2014). *Demiryolu emniyet yönetim sisteminin risk analiz yöntemleri*. Yüksek lisans tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- Lafçi, Ö. ve Öztekin, A. (2020). Risk assessment of sea rescue activities on search/rescue ships using L type matrix method. *COMU Journal of Marine Science and Fisheries*, 3(2), 66-78.
- Lin, B., Zhou, K., Guo, J., Liu, Q. and Wang, W. (2018). Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. *Tribology International*, 22, 151-162.
- Mackenzie, J. (1883). Resistance on railway curves as an element of danger. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 74(4), 1–8.
- Malkin, S. and Guo, C. (2008). *Grinding technology: Theory and application of machining with abrasives*. Industrial Press Inc.
- Out-of-round railway wheels: Wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. (2003). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217, 135–146.
- Öztürk, Z. ve Arlı, V. (2014). Balastlı hatta ray-tekerlek titreşimlerinin demiryolu dinamiğine etkisinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 100-110.
- Papaelias, M., Roberts, C. and Davis, C. (2008). A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 222, 367–384.
- Popović, Z., Brajovic, L. and Puzavac, L. (2011). Rail defects due to rolling contact fatigue. *Materijali i konstrukcije*, 54(2), 17-29.
- Radović, V. (2012). *Upravljanje defektima usljed zamora šinskog čelika*. Master's thesis Podgorica: Građevinski fakultet,.
- Sarıgüzel, E. E. (2021). *Raylı sistemlerde risk analizi ile sistem emniyeti ve kalitesinin artırılması*. Yüksek lisans tezi. İstanbul: Medeniyet Üniversitesi.
- Schoech, W. (2009). New rail maintenance trends in Europe: anti-headcheck-profiles and preventative cyclic grinding. In *AusRAIL PLUS 2009*. Adelaide, South Australia.

- Song, Z., Yamada, T., Shitara, H. and Takemura, Y. (2011). Detection of damage and crack in railhead by using eddy current testing. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3, 546-550.
- Stock, R., and Pipan, R. (2011). *Wear*, 271, 125-133.
- Tabak, Ç. (2014). *Demiryollarındaki kaza istatistikleri veritabanı, risk azaltma yöntemleri, alınan önlemler ve Avrupa'daki örneklerinin kıyaslanması*. Uzmanlık tezi. Ankara:Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.
- Takahashi, S., Sasaki, T., Kondoh, Y. and Hirose, Y. (2009). Residual stress evaluation of railway rails. *International Centre for Diffraction Data*, 240–247.
- TCDD. (2013). *TCDD hat bakımı el kitabı*. Ankara: TCDD Yol Dairesi Başkanlığı.
- Tepic, J., Tanackov, I. and Stojic, G. (2011). Ancient logistics – Historical timeline and etymology 18(3), *Technical Gazette*, 379-384.
- Thomas, H., Dey, A. and Heyder, R. (2010). Eddy current test method for early detection of rolling contact fatigue (RCF) in rails. *Insight*, 52, 361–365.
- Uhlmann, E., Lypovka, P., Hochschild, L. and Schröer, N. (2016). Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. *Wear*, 366, 287-293.
- Vesković, S., Tepić, J., Ivić, M., Stojić, G. and Milinković, S. (2012). Model for predicting the frequency of broken rails. *Metallurgija*, 51(2), 221-224.
- Wang, R., Zhou, K., Yang, J., Ding, H., Wang, W., Guo, J. and Liu, Q. (2020). Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors. *Wear*, 454, 1-20.
- Zarembski, A. M. (2005). *The art and science of rail grinding*. Simmons-Boardman Book.
- Zhang, S., Zhou, K., Ding, H., Guo, J., Liu, Q. and Wang, W. (2018). Effects of grinding passes and direction on material removal behaviours in the rail grinding process. *Materials*, 11(11), 2293. *Materials*, 11(11), 1-20.
- Zhi, S., Li, J. and Zarembski, A. (2015). Grinding motor energy saving method based on material removal model in rail grinding processes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2, 21-30
- http-1: <https://loram.com/maintenance-of-way/rail-maintenance/production-rail-grinding/rgi/> (Erişim tarihi: 26.02.2025)
- http-2: <https://www.mecnoservice.com/prodotti/macchine-molatrici/> (Erişim Tarihi: 08.03.2025)
- http-3: <https://daimler.info/en/measuring-devices/dgm-en/> (Erişim tarihi: 03.05.2025)
- http-4: <http://www.wilmec.it/en/8-english/42-wilmec-ht1-grinding-depth-measuring-gauge.html> (Erişim tarihi: 19.05.2025)
- http-5: <https://www.vogelundploetscher.de/news/vogel-plotscher-auf-der-iaf-2025/> (Erişim tarihi: 25.05.2025)

EKLER

EK 1. Ray yeniden profilendirme sonrası günlük kontrol raporu

RAY YENİDEN PROFİLLENDİRME (RAY TAŞLAMA) İŞ SONU GÜNLÜK KONTROL RAPORU

Rapor No:
Tarih:

Sıra No	Hat Kesimi (Ankara Eskişehir)	Çalışma Yapılan Hat km'si	Taşıma Yapılan Alan (Hat m)	*Boyuna Profil (Grafik Değerlendirmesi, Tüm dalga boyları, Ondulasyon vs. maksimum değeri (%5))	*Ortalama Enine Profitten Sapma (maksimum ±0.3mm)	% Profil Kalite İndeksi (min %90)	Puruzluluk Değeri, Ra (maks. 10µm veya [0.01mm])	Geçiş Eğimi (tanjant) (maksimum 1/3000)	**Ortalama Metal Kalıdırma Miktarı	Taşıma (fazeta) izlerinin Ölçüm ve Kontrolü	Ray Yüzey Kontrolü (Menevirleşme - ray üstü taşıyıcı temizliği, ray dizisi kontrolü vs.)	Hatın Livre Hızı (km/h)	TUM ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (Teknik Şartname, EN 13231-3, EN 13231-5)
1	Hat 2 Sağ	375+087 374+256	831	10<A≤30 mm 30<A≤100 mm 100<A≤300 mm 300<A≤1000 mm	3.6 1 0.3 0.1	98%	3.161	0.1 0.1	831 0.3	Uygun / Uygun Değildir	Kontrol edildi / UYGUN	Uygun	UYGUNDUR
2	Hat 2 Sol	375+087 374+256	831	10<A≤30 mm 30<A≤100 mm 100<A≤300 mm 300<A≤1000 mm	3.5 1 0.2 0.1	93%	2.576	0.1 0.1	831 0.3	Uygun / Uygun Değildir	Kontrol edildi / UYGUN	Uygun	UYGUNDUR
3													
4													

NOT: Tüm ölçümler hat üzerinde o vardiya için ölçülerek Firmaca "UYGUN" olarak değerlendirildiği takdirde yol işletme hızında aşılabilecektir.

* Boyuna profil ve enine profil ölçüm verileri rapor ekinde EK olarak verilecektir.

** Ortalama metal kalıdırma derinliği aynı vardiyada ölçülecektir. Ölçülmemesi halinde sonraki vardiyalarda (en fazla 7 takvim günü içerisinde) her rapor için ayrıca raporlanacaktır.

Varsa EK AÇIKLAMALAR:
(Makine durumu, personel vs)

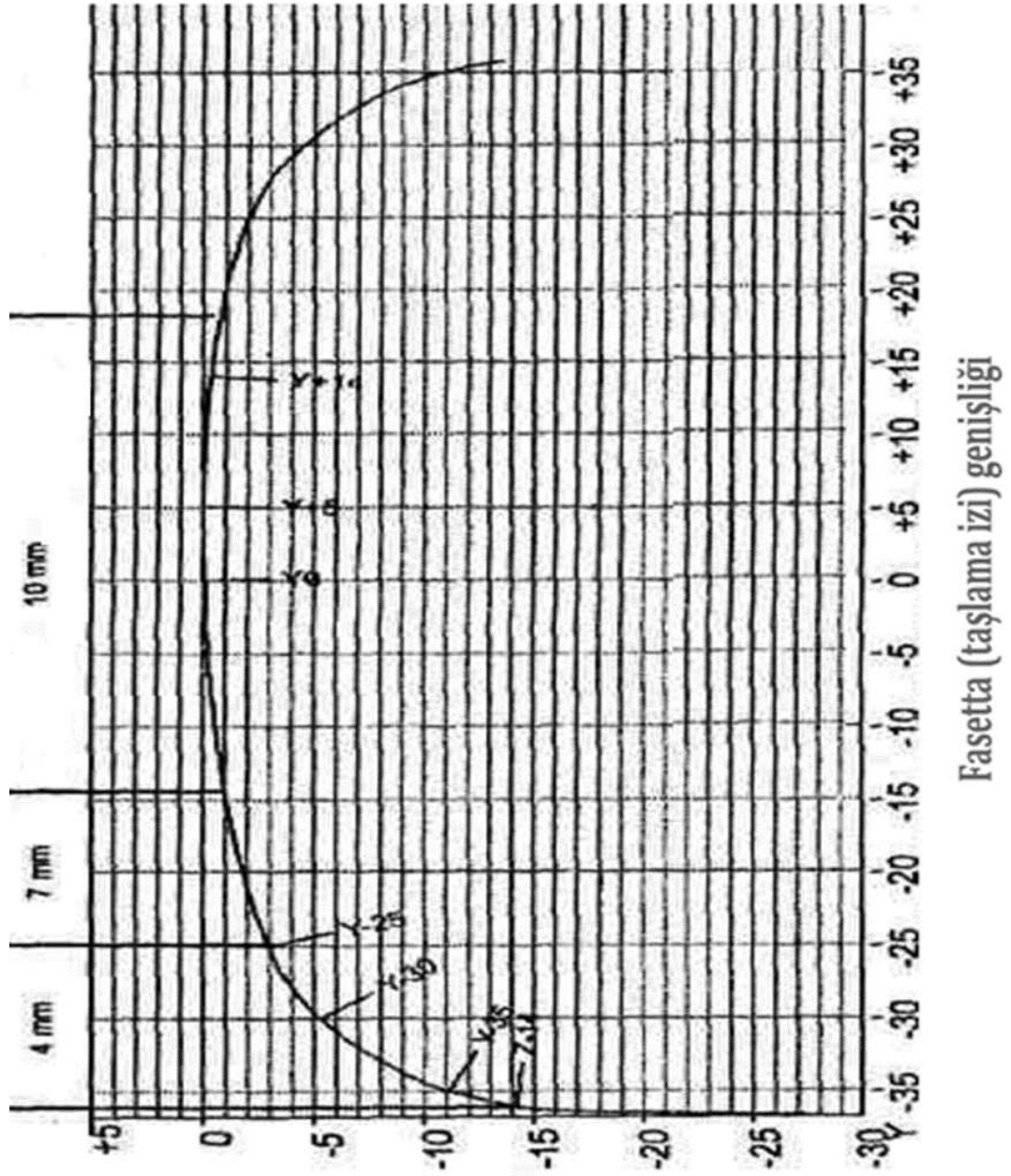
Makinenin hatta girdiği saat :
Makinenin filli olarak işe başlama saat :
İşin filli olarak bitirildiği saat :
Makinenin hattan çıktığı saat :

YÜKLENİCİ TEMSİLCİLERİ/REFAKAT GÖREVLİSİ

Ray taşlaması sonrası hatta yapılan ölçüm, yolun gözle muayenesi ve yapılan kontrollerde yolun livre hızında açılmasında bir sakınca olmadığı ve hat gabarisi dahilinde herhangi bir yabancı cismin bulunmadığını taahhüt ederiz.

Adı-Soyadı, Görevi, İMZA Adı-Soyadı, Görevi, İMZA

EK 2. Ray taşlama fasetta izi kontrol grafiği



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0001-9051-2290

Ad Soyad : Durmuş Furkan ÇÖMEZ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2012, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Merkezi, Uluslararası Kaynak Mühendisliği
- 2006, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği
- 2015-Günümüz, Mühendis, TCDD, 8.Bölge Müd. Eskişehir 82 Yht Yol Bakım Onarım Müdürlüğü
- 2014-2015, Mühendis, TCDD, 7.Bölge Müd. Afyonkarahisar Yol Bakım Servisi Müdürlüğü
- 2010-2014, Mühendis, TCDD, 4.Bölge Müd. Sivas Yol Bakım Servisi Müdürlüğü

İş Deneyimleri:

- Eskişehir-Polatlı YHT Hatlarında Koruyucu ve Düzeltici Ray Taşlama Yapılması
- Yht Hatlarında Ray Kaynak Kusurlarının Lokal Olarak Elle Ray Profil Taşlama Makinesi ile Giderilmesi
- Eskişehir-Polatlı YHT Hatlarında Ray Kaynak Yapılması
- Afyonkarahisar-Kütahya-Akşehir İstasyonları Arası Ray Kaynak Yapılması
- Sivas -Samsun İstasyonları Arası Ray Kaynak Yapılması
- Erzurum -Kars İstasyonları Arası Ray Kaynak Yapılması
- Erzincan -Sivas (Divriği) Arası Hat Kesiminde Ray Kaynak Yapılması