İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAY KUSURLARININ ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazal YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAY KUSURLARININ ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazal YILMAZ
(501101412)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101412 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hazal YILMAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"RAY KUSURLARININ ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ "** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Haluk GERÇEK** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sinan YARDIM .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Günümüz demiryolu hatlarındaki trafiğin artışı ve raya etkiyen yüksek dingil yükleri nedeniyle, rayda ortaya çıkan kusurlar büyük önem kazanmıştır. Ray kusurlarına bağlı olarak meydana gelen ray kırılmaları, demiryolu araçlarının raydan çıkma riskini doğuracağı için bu tür bir felaket senaryosundan kaçınmak hayati önem arz etmektedir. Bu bağlamda, rayların, kusurlara karşı tahribatsız muayene yöntemleri ile kontrol edilmesi, demiryollarının güvenliğinin sağlanmasındaki en önemli adımlardan biridir. Bu çalışmada, örnek bir demiryolu hattı üzerindeki ray kusurları ultrasonik yöntemle incelenmiş ve ray gerilmeleri ile ray kusurları arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Yüksek lisans çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren ve karşılaştığım her sorunda beni dinleyerek yol gösteren saygı değer hocam Prof. Dr. Zübeyde Öztürk'e çok teşekkür ederim. Çalışmayı destekleyen kurum İstanbul Ulaşım A.Ş.'ye ve tez kapsamında ultrasonik ölçümlerin yapılmasındaki yardımlarından ötürü Şişhane-Hacıosman Metrosu Hat Bakım Şefi Doğan Sürmen'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmam ile ilgili yaşadığım sorunlarda, yol göstererek sorunları çözmemde yardımcı olan başta Doç. Dr. İsmail Şahin olmak üzere Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'ndaki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tezin yazılması sırasında, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili arkadaşlarım Selin Tuncer, Pınar Acar ve İlhami Sönmez'e çok teşekkür ederim. Küçük yaşımdan itibaren, okumanın en büyük erdem olduğunu ve insanın kendine yapacağı en büyük yatırımın okumak olduğunu söyleyerek beni yetiştiren ve bu mesleği seçmemde çok büyük etkileri olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2014

Hazal YILMAZ
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 4
2. RAYA ETKİYEN YÜKLER VE RAY GERİLMELERİ **7**
2.1 Raya Etkiyen Yükler 9
2.1.1 Statik yükler 10
2.1.2 Dinamik yükler 13
2.2 Ray Gerilmeleri 13
2.2.1 Eğilme gerilmeleri 15
2.2.2 Kayma gerilmeleri 16
2.2.3 Termal gerilmeler 17
2.2.4 Kalıntı gerilmeleri 17
2.2.5 Tekerlek-ray temas gerilmeleri 19
3. RAY KUSURLARI **23**
3.1 Ray Kusurları 26
3.1.1 Ray mantarında oval boşluk 27
3.1.2 Ray mantarında yatay çatlak 28
3.1.3 Ray mantarında düşey çatlak 29
3.1.4 Ray mantarında kısa dalga boylu ondülasyon 30
3.1.5 Ray mantarında uzun dalga boylu ondülasyon 31
3.1.6 Ray mantarında yanal aşınma 33
3.1.7 Ray mantarında düşey aşınma 34
3.1.8 Yuvarlanma yüzeyinin kabuklanması 34
3.1.9 Ray mantarında iç köşe kabuklanması 35
3.1.10 Ray mantarında kılcal çatlak 36
3.1.11 Ray mantarında tekerlek yanığı 38
3.1.12 Ray mantarı yüzeyinde çökme 39
3.1.13 Ray mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak 40
3.1.14 Ray gövde-taban birleşim yerinde yatay çatlak 41
3.1.15 Ray gövdesinde düşey çatlak 42
3.1.16 Ray gövdesinde ve tabanında korozyon 43
3.1.17 Ray gövdesinde çapraz çatlak 44
3.1.18 Ray tabanında düşey çatlak 44
3.2 Ray Kaynağı Kusurları 45
3.2.1 Alüminotermit ray kaynağı kusurları 45

3.2.2 Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak 50
3.2.3 Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak 50
3.2.4 Yakma alın kaynağı kusurları 51
3.2.5 Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak 53
3.2.6 Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak 54
3.2.7 Elektrik ark kaynağı kusurları 54
3.2.8 Elektrik ark kaynak gövdesinde yatay çatlak 55
3.2.9 Elektrik ark kaynak kesitinde enine çatlak 55
4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ 57
4.1 Ultrasonik Yöntem 58
4.1.1 Ultrasonik dalga üretimi ve ultrasonik problar 59
4.1.2 Ultrasonik muayene çeşitleri 62
4.1.3 Rayların ultrasonik yöntem ile muayenesi 63
4.2 Girdap Akımları Yöntemi 65
4.2.1 Rayların girdap akımları yöntemi ile muayenesi 66
4.2.2 Girdap akımları yöntemi ile ultrasonik yöntemin birlikte kullanımı 67
4.3 Radyografi Yöntemi 68
4.4 Sıvı Penetrant Yöntemi 71
4.5 Manyetik İndüksiyon Yöntemi 73
4.6 Raylara Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Karşılaştırılması 75
5. ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMİN SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ 77
5.1 Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı 78
5.2 Hatta Kullanılan Ultrasonik Muayene Aracı 80
5.3 Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda Ultrasonik Yöntem Uygulaması 86
5.3.1 Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 87
5.3.2 Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 96
5.3.3 Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme ... 102
5.3.4 Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki hat kesimi incelemesi 105
5.3.5 Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme . 108
5.3.6 Kocatepe-Otogar İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 110
5.3.7 Otogar-Terazidere İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 112
5.3.8 Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme .. 115
5.3.9 Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 118
5.3.10 Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme ... 120
5.3.11 Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 121
5.3.12 Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasındaki hat kesimi incelemesi .. 122
5.3.13 Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme .. 124
5.3.14 Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 125
5.3.15 Yenibosna-DTM İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 126
5.3.16 DTM-Havalimanı İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme 128
5.4 Farklı Ray Kaynağı Türlerinin Ray Kusurlarına Etkisinin İncelenmesi 129
5.4.1 Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde inceleme 129
5.4.2 Yakma alın kaynaklı hat kesiminde inceleme 132
5.4.3 Alüminotermit ve yakma alın kaynaklı hat kesimlerinin karşılaştırması 134
6. RAY GERİLMELERİ VE RAY KUSURLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI 137
6.1 Dinamik Etki Katsayısı ve Tekerlek Yüklerinin Hesaplanması 138
6.2 Ray Tabanındaki Eğilme Gerilmelerinin Hesaplanması 142
6.3 Raydaki Termal Gerilmelerin Hesaplanması 147

6.4 Ray Mantarındaki Tekerlek-Ray Temas Gerilmelerinin Hesaplanması 149
6.5 Ray Mantarındaki Kayma Gerilmelerinin Hesaplanması 157
6.6 Hızlanma ve Frenleme Nedeniyle Oluşan Boyuna Kuvvetin Hesaplanması . 159
6.7 Ray Gerilmelerinin Sınır Değerler İçinde Kaldığının Kontrolü..... 160
6.8 Ray Gerilmelerinin Ray Kusurlarına Etkisinin İncelenmesi..... 162
7. SONUÇLAR 169
KAYNAKLAR 177
ÖZGEÇMİŞ..... 181

KISALTMALAR

DTM **:** Dünya Ticaret Merkezi
MİY **:** Manyetik İndüksiyon Yöntemi
TSE **:** Türk Standartları Enstitüsü
UIC **:** Uluslararası Demiryolu Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Ultrasonik yöntem-girdap akımları yöntemi karşılaştırması [45]. 67
Çizelge 5.1 : Betona tespitli üstyapı kesiti kesiti [49].. 79
Çizelge 5.2 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 87
Çizelge 5.3 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 89
Çizelge 5.4 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının türlere göre dağılımı. 92
Çizelge 5.5 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 92
Çizelge 5.6 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 97
Çizelge 5.7 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 97
Çizelge 5.8 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının türlere göre dağılımı. 99
Çizelge 5.9 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 99
Çizelge 5.10 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 102
Çizelge 5.11 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 103
Çizelge 5.12 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 104
Çizelge 5.13 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 105
Çizelge 5.14 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 106
Çizelge 5.15 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 107
Çizelge 5.16 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 109
Çizelge 5.17 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 111
Çizelge 5.18 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri. 111
Çizelge 5.19 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 113
Çizelge 5.20 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri. 114
Çizelge 5.21 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 116
Çizelge 5.22 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri. 117
Çizelge 5.23 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 119
Çizelge 5.24 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 122
Çizelge 5.25 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri. 123
Çizelge 5.26 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 125
Çizelge 5.27 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 126
Çizelge 5.28 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri. 127
Çizelge 5.29 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri. 129
Çizelge 5.30 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 130
Çizelge 5.31 : Alüminotermit kaynak kusurlarının özellikleri. 131
Çizelge 5.32 : Alüminotermit kaynaklı kesimde ray kusurlarının özellikleri. 131
Çizelge 5.33 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı. 132
Çizelge 5.34 : Yakma alın kaynak kusurlarının özellikleri. 133
Çizelge 5.35 : Yakma alın kaynaklı kesimde ray kusurlarının özellikleri. 134
Çizelge 6.1 : Yatay kurbalarda ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükleri. 142
Çizelge 6.2 : Komşu tekerlek yükleri için μ değeleri tablosu. 146
Çizelge 6.3 : Hertz katsayıları tablosu [62]. 154
Çizelge 6.4 : Raydaki en büyük eğilme gerilmesi için güvenlik katsayıları [64]. 161
Çizelge 6.5 : Hattın farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri ve kusur sayıları. 164

Çizelge 6.6 : Hattın farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri ve kusur sayıları..... 166
Çizelge 6.7 : Hattın farklı kesimlerindeki km başına ray kusuru sayıları..... 167

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kusurlu raylar ile kırılan rayların karşılaştırılması [7]..... 2
Şekil 2.1 : Vinyol ray üzerinde ray bölümleri [23]..... 8
Şekil 2.2 : Örnek ray üzerinde ray gerilme doğrultuları [23]. 9
Şekil 2.3 : Örnek ray üzerinde ray gerilme düzlemleri [23]. 9
Şekil 2.4 : Yatay kurba içinde tekerlek koniklik mekanizması [25]..... 11
Şekil 2.5 : Örnek ray kesiti üzerinde ray gerilmeleri [27]. 14
Şekil 2.6 : Rayda ortaya çıkan maksimum gerilmelerin yerleri [26]..... 16
Şekil 2.7 : Ray doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri [27]. 18
Şekil 2.8 : Tekerlek-ray temas alanı [23]..... 19
Şekil 2.9 : Aliyman ve yatay kurbada tekerlek-ray temas alanları [28]. 20
Şekil 3.1 : Örnek ray kesiti üzerinde ray kusurları [13]. 27
Şekil 3.2 : Ray mantarında oval boşluk kusuru [29]. 28
Şekil 3.3 : Ray mantarında yatay çatlak kusuru [29]..... 29
Şekil 3.4 : Ray mantarında düşey çatlak kusuru [29]. 30
Şekil 3.5 : Ray yüzeyinde kısa dalga boylu ondülasyonlar [29]..... 31
Şekil 3.6 : Ray yüzeyinde uzun dalga boylu ondülasyonlar [23]. 32
Şekil 3.7 : Ray mantarında yanal aşınma kusuru [29]. 34
Şekil 3.8 : Ray yuvarlanma yüzeyindeki kabuklanma kusuru [29]. 35
Şekil 3.9 : Ray mantarında iç köşe kabuklanması [23]. 36
Şekil 3.10 : Ray mantarının iç köşesinde kılcal çatlak kusurları [23]. 37
Şekil 3.11 : Ray yüzeyinde tekrarlı tekerlek yanığı kusuru [29]. 39
Şekil 3.12 : Ray yüzeyinde çökme kusuru [23]..... 40
Şekil 3.13 : Ray mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlak kusuru [29]. 41
Şekil 3.14 : Ray gövde-taban birleşim yerinde yatay çatlak kusuru [29]..... 42
Şekil 3.15 : Ray gövdesinde düşey çatlak kusuru [29]..... 42
Şekil 3.16 : Ray tabanında korozyon kusuru [29]. 43
Şekil 3.17 : Ray gövdesinde çapraz çatlak kusuru [29]..... 44
Şekil 3.18 : Ray tabanında düşey çatlak nedeniyle oluşan kırık [29]..... 45
Şekil 3.19 : Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak [29]. 50
Şekil 3.20 : Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak [29]. 51
Şekil 3.21 : Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak [29]..... 53
Şekil 3.22 : Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak [29]..... 54
Şekil 3.23 : Elektrik ark kaynak kesitinde enine çatlak kusuru [29]. 56
Şekil 4.1 : Ultrasonik yöntemle tespit edilen hata ekosu 60
Şekil 4.2 : Rayların manuel ultrasonik muayenesi. 64
Şekil 4.3 : Fransa'da kullanılan ultrasonik test treni [41]..... 65
Şekil 4.4 : Rayların girdap akımları yöntemi ile muayenesi [45]..... 67
Şekil 4.5 : Radyografi yönteminin temel çalışma prensibi [42]. 70
Şekil 4.6 : Sıvı penetrant yöntemi uygulama aşamaları [42]..... 71
Şekil 4.7 : Birlikte çalışan manyetik indüksiyon/ultrasonik test aracı [5]..... 75
Şekil 5.1 : Betona tespitli üstyapı kesiti kesiti [49]. 79

Şekil 5.2 : Ahşap traversli üstyapı kesiti [49]. 79
Şekil 5.3 : Beton traversli üstyapı kesiti [49]..... 80
Şekil 5.4 : Örnek hat üzerinde ultrasonik muayene çalışması. 81
Şekil 5.5 : Ultrasonik ölçüm aracındaki ultrasonik problar. 82
Şekil 5.6 : Sistemin ultrasonik test şemaları [50]. 82
Şekil 5.7 : Ultrasonik probların raydaki ölçüm alanları [51]. 83
Şekil 5.8 : Ultrasonik cihazın ekranı üzerinde görülen ray kusuru sinyalleri. 84
Şekil 5.9 : Ray kusuru sinyallerinin bilgisayar ortamındaki görüntüsü. 85
Şekil 5.10 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hat üzerindeki kilometresi. 95
Şekil 5.11 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hat üzerindeki kilometresi. 101
Şekil 5.12 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 104
Şekil 5.13 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 108
Şekil 5.14 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 110
Şekil 5.15 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 112
Şekil 5.16 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 115
Şekil 5.17 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi..... 118
Şekil 5.18 : Ray kusurlarının boyutlarıyla birlikte hattaki kilometresi..... 120
Şekil 6.1 : Rastgele değişkenin, farklı σ_x aralıklarında kalma olasılığı [65]. 139
Şekil 6.2 : Zimmerman yönteminde kullanılan demiryolu çerçevesi [56]. 143
Şekil 6.3 : Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı dingil düzeni..... 146
Şekil 6.4 : Tekerlek-ray temas alanı [59]..... 149
Şekil 6.5 : Aliyman ve yatay kurbadaki farklı tekerlek-ray temasları [60]. 150
Şekil 6.6 : Aliymanda tekerlek-ray temas alanı [28]. 151
Şekil 6.7 : Yatay kurbada tekerlek-ray temas alanı. 151

RAY KUSURLARININ ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ VE RAY GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde, demiryolu hatlarındaki trafiğin artması, tren hızlarının yükselmesi ve dingil yüklerinin artması nedeniyle mevcut demiryolu üstyapısına önemli yükler etki etmektedir. Buna bağlı olarak, raylarda görülen kusurlar daha önemli hale gelmiş; rayların kusurlara karşı kontrol edilmesi ve bakımının yapılması büyük önem kazanmıştır. Hat üzerinde tespit ve kontrol edilmeyen ray kusurları, zaman içinde trafik yükleri altında yatay, düşey ve boyuna doğrultularda ilerleyerek ray kırılmalarına ve kazalara neden olmaktadır. Bu nedenle, güvenli ve konforlu bir demiryolu işletimi için rayların, kusur riskine karşı düzenli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Hattaki ray kusurlarını tespit etmek için kullanılan en etkili yöntemler; tahribatsız muayene yöntemleridir. Bu yöntemler içinde ultrasonik yöntem; güvenilir, etkili ve uygulanabilirliği yüksek oluşu nedeniyle tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan metottur.

Bu çalışmanın amacı, ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda meydana gelen ray kusurlarını tespit etmek, UIC (Uluslararası Demiryolu Birliği) tarafından yayınlanmış 712 R kodlu "Ray Kusurları" adlı Standarda göre sınıflandırmak, ray kusurlarının özelliklerini, rayın hangi bölümlerinde ortaya çıktığını ve hattın hangi kesimlerinde yoğunlaştığını, nedenleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak irdelemek ve rayda meydana gelebilecek gerilmeleri hesaplayarak, ray gerilme seviyesi-bozulma arasındaki ilişkiyi araştırmaktır.

Çalışmada öncelikle, ray kusurlarının meydana gelmesindeki temel etkenler olan raya etkiyen yükler ve ray gerilmeleri hakkında bilgi verilmiştir. Raya etki eden statik ve dinamik yükler açıklandıktan sonra, bu kuvvetler sonucu rayda meydana gelen eğilme gerilmeleri, kalıntı gerilmeleri, termal gerilmeler, tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmelerine değinilmiştir.

Ray gerilmelerinin ardından, genellikle bu gerilmeler sonucu oluşan ray kusurları hakkında bilgi verilmiştir. Ray kusurlarını tanımlarken, UIC 712 R Standardı esas alınmış ve rayda görülen kusurlar, "ray kusurları" ve "ray kaynağı kusurları" olmak üzere 2 ana bölümde incelenmiştir. UIC sınıflandırmasına göre, başlıca ray ve kaynak kusurlarının karakteristik özellikleri, oluşma nedenleri ve kusurların giderilmesine yönelik yöntemler, çeşitli görsellerle desteklenerek açıklanmıştır.

Çalışmanın devamında, hattaki ray kusurlarını tespit etmek için tüm dünyada yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri anlatılmıştır. Rayların, yüzeysel ve içsel kusurlara karşı kontrolünde kullanılan başlıca yöntemler olan ultrasonik yöntem, girdap akımları yöntemi, radyografi yöntemi, sıvı penetrant yöntemi ve manyetik indüksiyon yöntemine değinilmiştir. Her bir yöntemin temel çalışma prensibi açıklanmış ve bu yöntemlerin, rayların tahribatsız muayenesindeki

performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yöntemlerin değerlendirilmesinde; farklı ray kusuru tiplerini tespit etme başarısı, muayene hızı ve kullanım oranı gibi parametreler dikkate alınmıştır.

Çalışma kapsamında, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın tamamında, rayların ultrasonik muayene ile kontrolü yapılmıştır. Uygulanan ultrasonik yöntemde, bünyesinde bulunan ultrasonik problar vasıtasıyla ray içine ultrasonik dalgalar gönderen ve raydaki herhangi bir kusurdan yansıyan bu dalgaları alarak işleyen, bu sayede kusurun yeri ve boyutu hakkında bilgi veren ultrasonik muayene aracı kullanılmıştır. Ultrasonik dalgaların üretilmesi, aktarılması ve alınması; muayene aracı sistemi üzerine kurulu olan ultrasonik problar içine monte edilmiş piezoelektrik kristaller tarafından gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik ölçüm aracında, her bir rayın otomatik ölçümü için 6'şar adet olmak üzere toplam 12 adet ultrasonik prob kullanılmıştır. Bu problar ile ray mantarı, gövdesi ve tabanında ultrasonik ölçüm gerçekleştirilerek, ray kesitinin tamamı, kusurlara karşı taranmıştır.

Ultrasonik ölçümün sonuçları, hatta birbirini takip eden istasyonlar arasındaki her bir hat kesimi bazında değerlendirilmiştir. Her bir hat kesiminde tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının boyutu, rayda/kaynakta bulunduğu bölge ve hat üzerinde bulunduğu kilometre belirlenmiştir. Tespit edilen kusurların, ray ve kaynaklarda görülme oranı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ardından, bu kusurların, UIC 712 R kodlu standarda göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Ultrasonik ölçümün sonuçları, hatta kullanılan farklı ray kaynağı türleri (alüminotermit kaynak ve yakma alın kaynağı) bazında da değerlendirilmiştir. Tespit edilen ray kusurlarının, hattın farklı ray kaynağı kullanılan kesimlerindeki davranışı, nedenleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Çalışmanın devamında, ray gerilmeleri ile ray kusurları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun için öncelikle, rayda meydana gelen eğilme gerilmeleri, termal gerilmeler, tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Ray tabanındaki eğilme gerilmesini hesaplamak için Winkler tarafından ortaya atılan ve Zimmerman tarafından geliştirilen "sürekli elastik temel üzerine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş" hesap yöntemi kullanılmıştır. Raydaki termal gerilmeler, Schramm tarafından geliştirilen formülle hesaplanmıştır. Ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmelerinin hesabı, Hertz Teorisi'ne göre yapılmıştır. Kayma gerilmeleri ise Hertz Teorisi esas alınarak, Eisenmann'ın formülüne göre hesaplanmıştır. Tekerlek ve ray arasındaki temas, hattın yatay kurba ve aliyman bölgelerinde birbirinden farklı olduğu için bu bölgelerdeki tekerlek-ray temas gerilmeleri ile kayma gerilmeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca, hattın istasyon bölgelerinde, demiryolu aracının frenleme hareketleri nedeniyle ortaya çıkan boyuna kuvvetlerin hesabında, Lichtberger'in formülü kullanılmıştır.

Hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon kesimlerindeki ray gerilmeleri belirlendikten sonra, hatta ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurlarının; bu kesimlerdeki dağılımı incelenmiştir. Aliyman, yatay kurba ve istasyon kesimlerindeki "km başına düşen ray kusuru sayıları" hesaplanarak, bu bölgelerde hesaplanan ray gerilmeleri ile ilişkisi irdelenmiştir. Ray gerilmelerinin, ray kusurlarının boyutu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ise yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgelerinde tespit edilen ray kusurlarının ortalama boyutu belirlenmiş ve bu bölgelerde hesaplanan ray gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın sonucunda, hat genelinde ultrasonik yöntemle tespit edilen kusurların büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında meydana geldiği belirlenmiştir. Hattaki "km

başına düşen ray kusuru sayısı"nın en yüksek olduğu kesimin, Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki kesim olduğu tespit edilmiştir. Alüminotermit kaynaklı hat kesimlerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın, yakma alın kaynaklı hat kesimlerinden yüksek olması ve alüminotermit kaynaklardaki kusur oranının, yakma alın kaynaklarındaki kusur oranından fazla olması; alüminotermit kaynakların, yakma alın kaynaklarına göre daha kötü bir performans gösterdiği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte; hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların, ray kaynaklarında yoğunlaştığı görülmüştür. Alüminotermit kaynaklarda görülen kusurların büyük çoğunluğunun mantar bölgesinde, yakma alın kaynaklarında görülen kusurların büyük çoğunluğunun ise gövde bölgesinde bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Hattın yatay kurba bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değerinin, aliyman bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimleri için, ray gerilmelerinin daha yüksek olduğu yatay kurba bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı", ray gerilmelerinin daha düşük olduğu aliyman bölgelerindeki değerden fazladır. Benzer şekilde, ray gerilmelerinin daha yüksek olduğu istasyon bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı", aliymandaki değerden yüksektir. Ayrıca, ray gerilmelerin yüksek olduğu yatay kurba bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu en fazla iken, ray gerilmelerinin düşük olduğu aliyman bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu en düşüktür. Bu çalışmanın nihayetinde, raya etkiyen gerilmeler arttıkça, "km başına düşen ray kusuru sayısı" ve ray kusurlarının ortalama boyutunun arttığı sonucuna varılmıştır.

INVESTIGATION OF RAIL DEFECTS WITH ULTRASONIC INSPECTION METHOD ON MODEL TRACK AND DETERMINATION OF RAIL STRESSES

SUMMARY

Nowadays, existing railway superstructures have been highly affected by the loads which are caused by the increased traffic on railway lines, higher train speeds and heavier axle loads. Therefore, rail defects have become more vital in point of the safety of railway operation. Importance of the inspection of rail defects and maintenance of the defective rails on the track has increased substantially. Rail defects, which cannot be detected or controlled on the track, progress in the horizontal, vertical and longitudinal directions under traffic loads in the course of time. The propagation of flaws in rails has the risk of rail breakage and train accidents such as derailments. For this reason, rails in-service have to be inspected systematically for internal and surface defects in order to provide a safe and comfortable railway operation. The most effective methods to detect defective rails are the non-destructive testing methods. Ultrasonic inspection method is the most commonly used non-destructive testing method owing to its high reliability, effectiveness and applicability.

The aim of this study is to detect rail defects on Aksaray-Havalimanı Light Rail Transit Line using ultrasonic inspection method, to classify the defects according to the International Union of Railways (UIC) Catalogue of Rail Defects with the code of 712 R, to examine the characteristics of the defects, to find out the rail sections and track sections where the defects occur most and to investigate the relationships between rail stresses and rail defects by calculating the rail stresses that can probably occur in the rail.

In this study firstly the major loads on rails and rail stresses which are the main factors that can lead to rail defects are explained. Static and dynamic loads on rails including vertical wheel loads, lateral loads and longitudinal loads such as acceleration, braking and thermal forces are defined. Then rail stresses that occur due to these loads on rails are explained in detail. Major rail stresses involving bending stresses in the rail foot center, thermal stresses, wheel-rail contact stresses in the rail head, residual stresses and shear stresses in the rail head are mentioned.

After explaining the essential rail stresses, rail defects that generally originate from these stresses are stated. Rail defects are defined and classified according to UIC Catalogue of Rail Defects coded 712 R. Based on this classification, rail defects are divided into two main groups as “rail defects” and “rail welding defects”. Rail defect types originating from manufacturing defects, damages caused by improper installation and rail fatigue are illustrated in detail. Important rail head defect types consisting of tache oval, horizontal cracking, vertical cracking, short-pitch and long-pitch corrugation, lateral wear, vertical wear, shelling of gauge corner, head checking, shelling of running surface, wheel burn and squat are explained with figures. Besides, essential rail web defects types including horizontal cracking at the

web-head fillet radius, vertical cracking, horizontal cracking at the web-foot fillet radius, diagonal cracking around bolt holes and corrosion defect are mentioned. Then significant rail foot defects such as vertical cracking and corrosion defect are stated. Rail welding defects are also explained on the basis of different rail welding processes. Alumino-thermic welding defects involving transverse cracking of the profile and horizontal cracking of the web are defined. Next, flash-butt welding defects such as transverse cracking of the profile and horizontal cracking of the web are described. Finally, electric arc welding defects including transverse cracking of the profile and horizontal cracking of the web are stated. In accordance with UIC classification of rail flaws; basic characteristics and reasons for occurrence of all types of rail defects are mentioned. In addition to this, information about the removal of defective rails and maintenance procedures are given briefly.

Afterwards, non-destructive inspection methods which have been commonly used in rail maintenance works so as to detect rail defects in the track are explained. Main non-destructive testing methods used for controlling rail against surface and internal defects are stated as ultrasonic method, eddy-current method, radiographic method, liquid penetrant method and magnetic induction method. In this study, the operation principles and the performance of each method in rail testing are analysed comparatively. Parameters including the ability of detecting various rail defect types, rail inspection speed and frequency of use are considered for the evaluation of the performance of different non-destructive methods.

In the scope of this study, rails in Aksaray-Havalimanı Light Rail Transit Line are inspected by the ultrasonic testing method. Ultrasonic inspection is performed by using an ultrasonic inspection car which has the bearing capacity of 2 persons on it. Both 2 rails in the track are inspected simultaneously by the ultrasonic inspection car with the inspection speed of 5 km/h. Fundamentally, ultrasonic probes within the inspection car carry out the ultrasonic inspection process of rails. There are six ultrasonic probes for per rail (totally 12 probes) in the ultrasonic inspection car which can inspect the rail head, rail web and rail foot. Ultrasonic probes involve piezoelectric crystals which have the ability of producing, transmitting and receiving ultrasonic waves that check the entire rail section against defects. First of all, ultrasonic waves produced by the ultrasonic probes are transmitted to the rail. Ultrasonic waves scan the whole rail section and if the waves meet any defect in the rail, they reflect from the defect strongly. Then reflected waves are received by the ultrasonic probes again. Ultrasonic probes process the changes in the properties of the ultrasonic waves and results of this operation are displayed in the monitor of the ultrasonic inspection car. Thus defects in rail are determined by the field work. In the final step, results of the ultrasonic inspection are evaluated by office work. Location and size of the detected rail defects are determined at this stage.

Results of the ultrasonic inspection are evaluated on the basis of successive track sections including 17 track sections between the stations in the track. In every track section, properties of detected rail defects and rail welding defects are stated in detail. Basic characteristics of defects involving size, position in the rail section and location in the track are determined and presented in tables. In every track section, the “number of rail defects per km” is calculated and the distribution of defects in rail and rail welds is analysed comparatively. After that, defect rates in rail welds in the relevant track sections are determined. According to UIC classification of rail defects, detected rail defects are interpreted about which type of rail defects that they can probably be. In addition to this, results of ultrasonic inspection are evaluated on

the basis of different rail welding types used in the track. Properties of rail defects in the track sections with alumino-thermic welding and flash-butt welding are examined comparatively.

Afterwards, relationships between rail defects and rail stresses are investigated. In order to analyse the effect of rail stresses on the rail defects, rail stresses including bending stresses, thermal stresses, wheel-rail contact stresses and shear stresses are calculated. Firstly, dynamic impact factor and dynamic vertical wheel load in the track are determined by Eisenmann's formula. Secondly, rail bending stress at the rail foot centre is calculated according to Winkler and Zimmerman's method which considers the rail as an infinite beam supported on a continuous linear elastic foundation. Next, thermal stresses in rail due to the changes in temperature are computed by Schramm's formula. Wheel-rail contact stresses in the rail head depending on the wheel load and wheel-rail contact are determined according to Hertz Theory. Lastly, shear stresses in the rail head related to wheel-rail contact are calculated by Hertz Theory and Eisenmann's formula. In the alignment and horizontal curve sections of the track, contact between wheel and rail are different from each other, so wheel-rail contact stresses and shear stresses are calculated separately for the alignment and horizontal curve sections. Furthermore, in the station sections of the track, longitudinal forces due to braking of the railroad cars are considered according to Lichtberger's formula.

After determining rail stresses in the alignment, horizontal curve and station sections of the track, distribution of rail defects in the alignment, horizontal curve and station sections are investigated. "Number of rail defects per km" is calculated for the alignment, horizontal curve and station regions and the relationship between "number of rail defects per km" and rail stresses is analysed. Another evaluation in this study is performed so as to investigate the effect of rail stresses on the size of rail defects. For this purpose, the average size of rail defects in the alignment, horizontal curve and station regions are calculated. Then relationship between the average size of rail defects and rail stresses in these regions are analysed.

At the end of the study, the majority of rail defects detected by the ultrasonic inspection are found to occur at rail welding. Track section where the "number of rail defects per km" has the maximum value is determined as the track section between Aksaray and Emniyet Stations. According to the results of ultrasonic inspection, "number of rail defects per km" in the alumino-thermic welded track sections is higher than "number of rail defects per km" in the flash-butt welded track sections. Besides, defect rate in alumino-thermic welds is higher than the defect rate in flash-butt welds. As a result, alumino-thermic welds in the track are found to perform poorly than the flash-butt welds in the track. On the other hand, rail defects detected in both alumino-thermic and flash-butt welded track sections are concentrated at the rail welds. While the majority of alumino-thermic weld defects occur in the head region of the weld, the majority of flash-butt weld defects arise in the web region of the weld.

According to the results of calculation of rail stresses, total rail stresses acting on rail in the horizontal curve sections are greater than the total rail stresses acting on rail in the alignment sections. For both alumino-thermic and flash-butt welded track sections, "number of rail defects per km" in the horizontal curve regions is higher than the "number of rail defects per km" in the alignment regions. Similarly, "number of rail defects per km" in the station regions, where the rail stresses are

higher than alignment regions, is found to be higher than the “number of rail defects per km” in the alignment regions. In addition to this, average size of rail defects in the horizontal curve sections where rail stresses are relatively high is determined to be greater than the average size of rail defects in the alignment sections where rail stresses are lower. Consequently, as the rail stresses increase, average size of rail defects and “number of rail defects per km” are found to increase.

1. GİRİŞ

Günümüzde, demiryolu hatlarındaki raylar, zaman içinde yapısal bütünlüklerinin bozulmasına yol açan önemli derecede büyük eğilme, kayma ve tekerlek-ray temas gerilmelerine, plastik deformasyona ve aşınmaya maruz kalmaktadır [1]. Modern demiryolu hatlarında, ray tarafından karşılanan dinamik dingil yükleri oldukça büyüktür. Bu dingil yüklerine bağlı olarak, normal işletim koşulları altında, demiryolu aracının tekerleği ile ray arasındaki temas gerilmeleri 1500 MPa değerine kadar ulaşırken, uygun olmayan tekerlek-ray teması sonucu raya etkiyen temas gerilmeleri 4000 MPa değerine kadar çıkmaktadır [2]. Raya etkiyen bu tür yüksek gerilmeler, ray kusurlarının oluşumundaki temel etkendir [3]. Rayda meydana gelen kusurlar, genel olarak 3 ana başlık altında incelenmektedir [4]:

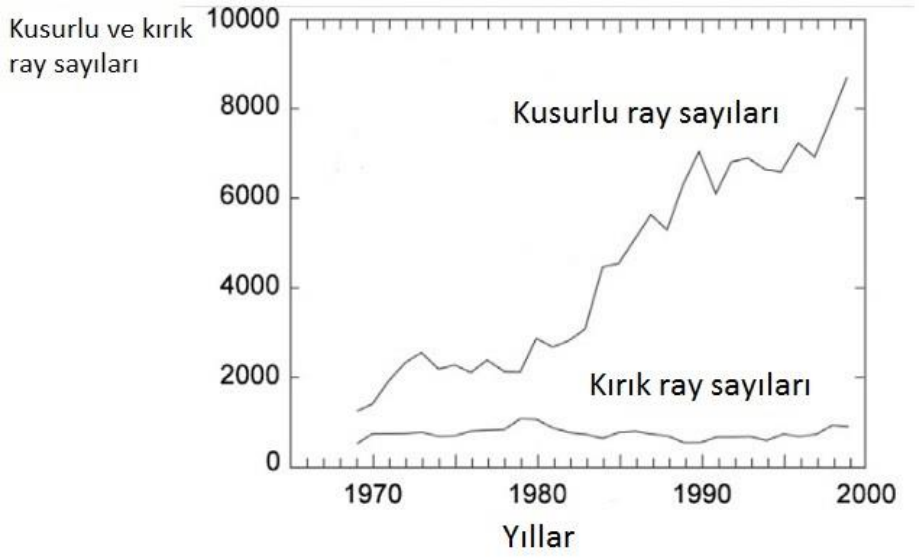
1. Ray imalatı aşamasında oluşan kusurlar,
2. Uygun olmayan nakliye, montaj ve kullanım koşullarının neden olduğu kusurlar,
3. Ray yorulması kusurları.

Ray kusurları, demiryolu sanayisinde, 150 yıldan daha uzun süredir önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir. Hat üzerinde tespit ve kontrol edilemeyen ray kusurları; zaman içinde trafik yükleri altında yatay, düşey ve enine doğrultularda ilerlemekte ve sonuç olarak ray kırıkları meydana gelmektedir. Ray kırıkları, genel olarak derayman (trenin raydan çıkması) olayı ile sonuçlanmamakla birlikte, kimi durumlarda kırılan raylar, trenin raydan çıkmasına neden olmaktadır [5]. Örneğin, 2000 yılında İngiltere'de, Hatfield İstasyonu'nun 1 km güneyinde, yüksek hızlı bir tren, rayların kırılması sonucu raydan çıkmıştır. Bu tren kazasında 4 yolcu yaşamını yitirmiş ve 70'den fazla yolcu yaralanmıştır. Trenin raydan çıkmasının nedeni, hattın yatay kurba kesimindeki dış rayların kırılması ve ardından parçalanmasıdır. Yapılan incelemeler sonucunda, kırılan rayların yuvarlanma yüzeyinde çok sayıda yorulma çatlağı tespit edilmiştir. Bu yorulma çatlaklarının özelliği; rayda derinlere inerek ray gövdesi ve tabanına ulaştığında, ray yüzeyindeki diğer yorulma çatlaklarının da

genişlemesine ve derinlere doğru ilerlemesine yol açmasıdır. Bu sayede, ray yüzeyindeki yorulma çatlakları, zaman içinde trafik yükleri altında derinlere doğru ilerlemiş ve ardından tüm ray kesitinin kırılmasına neden olmuştur [6].

Ray kırılmalarının, genellikle derayman olayına sebep olacak kadar dramatik sonuçları yoktur. Bununla birlikte, ray kırılmalarını en aza indirmek, dünya üzerindeki tüm demiryolu kurumlarının başlıca amaçlarından biridir. 1969 ile 1999 yılları arasında, İngiltere demiryolu ağında yapılan 30 yıllık ray kırılması istatistiği çalışması, her yıl ortalama 767±128 ray kırılması yaşandığını göstermektedir. Raya yüksek dingil yüklerinin etkidiği ağır yük taşımacılığı yapılan hatlar, yolcu taşımacılığı yapılan hatlara göre ray kırılmalarından daha çok etkilenmektedir [7]. Ray kusurları, genel olarak tüm demiryolu kurumlarına ciddi bir ekonomik yük getirmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde, ray kırılmalarının ve kırılmaları önlemek için uygulanan yöntemlerin toplam maliyeti, yılda yaklaşık olarak 2 milyar €'dur [8].

1969 ile 1999 yılları arasında, İngiltere demiryolu ağında yapılan ray kusurlarıyla ilgili bir araştırma, tespit edilen kusurlu raylar ile kırılan raylar arasındaki şu ilişkiyi ortaya çıkarmıştır: 30 yıllık süre boyunca, hatta tespit edilen ve daha sonra kaldırılan kusurlu rayların sayısı sürekli olarak artmış, ray kırılmaları ise neredeyse sabit kalmıştır. Şekil 1.1'de, 1969-1999 yılları arasında, İngiliz Demiryolları'nda tespit edilen kusurlu raylar ile kırılan rayların sayılarını gösteren grafik verilmiştir [7].



Şekil 1.1 : Kusurlu raylar ile kırılan rayların karşılaştırılması [7].

Kusurlu raylar ile kırık raylar arasındaki bu ilişki; ray kusurlarına karşı gerekli önlemler alınıp hattaki kusurlu raylar tespit edildikçe ve ardından hattan

kaldırıldıkça, ray kırılmalarının 30 yıllık süreç boyunca neredeyse sabit kaldığını göstermektedir. Yani, hattaki kusurlu rayların tespit edilmesi ve kaldırılması, ray kırılmalarının tümüyle olmasa da önemli ölçüde önüne geçilmesini sağlamaktadır [7].

Ray kusurlarının ilerlemesini önlemek, ray kırılmalarını azaltmak, demiryolu hatlarının güvenliğini en yüksek seviyeye çıkarmak, ray bakım prosedürlerinin verimliliğini artırmak, ray bakım maliyetlerini ve ray kusurlarının sebep olduğu olası kazaların maliyetlerini en aza düşürmek için rayların, kusur riskine karşı düzenli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Ray kusurlarına karşı etkili ray kontrolü ve uygun bakım prosedürleri uygulanarak, potansiyel ray kırılmaları ve derayman riski azaltılabilir [5]. Hattaki ray kusurlarını tespit etmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biri, tahribatsız muayene yöntemleridir. Tahribatsız muayene yöntemleri; günümüz demiryollarında kullanılan ray kesitlerinden, servis ömrü boyunca gösterebilecekleri en yüksek performansı elde etmeye yarar. Tahribatsız muayene yöntemleri ile raylar; içsel ve yüzeysel kusurlara karşı doğru, güvenilir ve etkili bir şekilde kontrol edilir. Bu yöntemlerin en önemli özelliklerinden biri de hat üzerindeki demiryolu trafiğini aksatmayacak şekilde, uygun bir hızda ray kontrolünün yapılmasına izin vermesidir [9].

Ray kusurlarını tespit etmek amacıyla tahribatsız muayene yöntemlerinin uygulanmasına, ilk olarak 1877 yılında başlanmıştır [8]. Bundan yaklaşık 50 yıl sonra, Dr. Elmer Sperry, manyetik indüksiyon sensörlerini kullanarak dünyanın ilk ray muayene aracını “Sperry” adıyla, A.B.D.’de üretmiştir [10]. 1953 yılına kadar, manyetik indüksiyon yöntemi, rayların kusurlara karşı yüksek hızda kontrolü için kullanılan tek tahribatsız muayene yöntemi olmuştur. 1953 yılında, Sperry ray muayene aracına ultrasonik problar monte edilmiştir; böylece raydaki kusurların belirlenmesi için manyetik indüksiyon yöntemi ile ultrasonik yöntem birlikte kullanılmaya başlanmıştır. 1959 yılında ise, tümüyle ultrasonik problar vasıtasıyla ray kusuru kontrolü yapan ilk ultrasonik ray muayene aracı üretilmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte, rayların tahribatsız muayenesinde kullanılan yöntemlere, girdap akımları yöntemi, sıvı penetrant yöntemi, radyografi yöntemi ve akustik emisyon yöntemi eklenmiştir.

Günümüzde tahribatsız muayene yöntemleri; bu tür tahribatsız deney yöntemlerini uygulamak üzere özel bir eğitim almış ve ilgili kurumlar tarafından

sertifikalandırılmış hat bakım mühendisleri tarafından yapılmaktadır. Ray üzerinde yapılan tahribatsız muayeneler sonucu elde edilen ölçüm verileri, yine hat bakım mühendisleri tarafından yorumlanır ve değerlendirilir. Buna bağlı olarak rayların, kusurlara karşı durumu belirlenmiş olur. Tahribatsız muayene yöntemleri, taşınabilir ölçüm cihazları kullanılarak manuel olarak uygulanabileceği gibi, ray kusuru kontrolü yapmak üzere özel olarak tasarlanmış test trenleri kullanılarak da yapılabilir. Hat bakım mühendislerinin manuel olarak uyguladığı yöntemlerde, genellikle ray muayene hızı düşüktür. Çeşitli tahribatsız muayene yöntemlerinin, özel olarak tasarlanan test trenleri vasıtasıyla uygulandığı yöntemlerde ise ray muayene hızı yüksektir. Mevcut test trenlerindeki ray muayene hızı, 40 km/sa ile 100 km/sa arasında değişmektedir. Fakat bu tür test trenlerinde, ray muayene hızı arttıkça, ray kusurlarını tespit etme hassasiyetinin düştüğü bilinmektedir [9].

Çelik üreticileri, ray üretimi aşamasında meydana gelen kusurları en aza indirmek için ray üretim teknolojisini sürekli olarak geliştirmektedir [11]. Ray üretimi aşamasında meydana gelen yüzeysel kusurları tespit etmek için otomatik optik kameralar ve girdap akımları yöntemleri kullanılmakta, içsel kusurları tespit etmede ise ultrasonik yöntem kullanılmaktadır. Ray üretim ve doğrultma aşamalarında ortaya çıkan kalıntı gerilmeleri; ultrasonik, elektro-manyetik veya radyografik yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Benzer şekilde, demiryolu işletimi altındaki rayların kontrolü de yaygın olarak ultrasonik yöntem ve manyetik indüksiyon yöntemi ile yapılmaktadır [12]. Bu yöntemler içinde ultrasonik yöntem; etkili, güvenilir ve uygulanabilirliği yüksek oluşu nedeniyle tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, A.B.D. demiryollarında, ray kusurlarını tespit etmek için kullanılan ana yöntem ultrasonik yöntemdir; manyetik indüksiyon yöntemi ise ultrasonik yöntemi tamamlayıcı bir sistem olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, Avustralya, Hindistan, Japonya ve ülkemizde de rayların tahribatsız muayenesinde kullanılan temel yöntem ultrasonik yöntemdir [13].

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak, örnek bir demiryolu hattı üzerinde meydana gelen ray kusurlarını tespit etmek, UIC tarafından yayınlanmış 712 R kodlu "Ray Kusurları" adlı Standarda göre sınıflandırmak, ray kusurlarının özelliklerini, rayın hangi bölümlerinde ortaya çıktığını ve hattın hangi

kesimlerinde yoğunlaştığını, nedenleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak irdelemek ve rayda meydana gelebilecek gerilmeleri hesaplayarak, ray gerilme seviyesi-bozulma arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Ultrasonik yöntemin uygulandığı örnek hat olarak Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı seçilmiştir. Bu seçimin nedeni, 1989 yılında hizmet vermeye başlayan bu hattın 24 yıldır demiryolu işletimi altında olması nedeniyle rayda bulunan olası kusurlar açısından çeşitlilik içermesidir. Bunun yanında, hatta alüminotermit ray kaynağı ve yakma alın kaynağı olmak üzere 2 farklı ray kaynağı türü kullanılması; tespit edilen ray kusurlarının, farklı ray kaynağı türlerindeki davranışını inceleme olanağı sunmuştur.

Bu çalışmadan önce, ray kusurlarının, tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenmesine dair pek çok çalışma yapılmıştır. Ray mantarında meydana gelen yorulma çatlaklarını tespit etmek amacıyla, kusur içeren örnek ray numuneleri üzerinde ultrasonik yüzey dalgaları kullanılarak ultrasonik yöntem uygulanmıştır. [14]. Ray mantarındaki yüzey çatlaklarını incelemek için yapılan bir başka çalışmada, ultrasonik yöntemin özel bir alanı olan elektro-manyetik akustik problar ile örnek ray kesitleri üzerinde ölçüm yapılmıştır. Raya temas etmeden ray kusuru taraması yapabilme özelliğine sahip elektro-manyetik akustik problar tarafından üretilen ultrasonik yüzey dalgalarının, çeşitli kusurlar içeren örnek ray numunelerinin mantar bölgesindeki yüzey çatlakları ile etkileşime girmesi incelenmiştir [15]. Ray kusurlarının, girdap akımları yöntemi ile belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, laboratuvarda yapay olarak kusurlar işlenmiş örnek bir ray numunesinde ölçüm yapılmıştır. İncelenen numunenin mantar bölgesine 2 farklı ray kusuru tipi işlenmiş ve girdap akımları sinyalleri ile farklı ray kusuru tipleri arasındaki ilişki araştırılmıştır [16]. Girdap akımlarıyla ilgili yapılan bir başka çalışmada, hem seçilen örnek hatlarda, hem de laboratuvarda ray numuneleri üzerinde ölçüm yapılarak ray mantarındaki yorulma kusurlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır [17]. Rayların, radyografik yöntemle incelenmesi üzerine yapılan bir araştırmada, raylardaki kalıntı gerilmelerinin dağılımını ölçmek için X ışınları yöntemi kullanılmıştır [18]. Ray tabanındaki korozyon kusurlarını tespit etmek için kullanılan ultrasonik, radyografik, girdap akımları ve termografi yöntemlerinin performansı, karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir [19]. Bunların yanında, raylarda uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinin birlikte kullanımı ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Ray kusurlarını tespit etmek için kullanılan test trenlerinde, ultrasonik yöntem ile girdap akımları

yönteminin birlikte uygulanması incelenmiş ve bu yöntemlerin birbirini tamamlayıcı yönde çalışmasından ötürü test sisteminin başarıya ulaştığı görülmüştür [20]. Ray kusurlarının, tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenmesine yönelik bir başka çalışmada, Atina Metro Hattı üzerindeki yorulma kusurları araştırılmıştır. Hattaki yorulma çatlaklarının başlangıç ve ilerleme aşamaları ile geometrik özelliklerini incelemek için manyetik parçacık yöntemi uygulanmıştır [21]. Bu tez çalışmasından önce, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı için ray kusurlarının tespit edilmesi, değerlendirilmesi ve ray gerilmeleri ile ilişkisinin incelenmesini içeren bir çalışma yapılmadığı için bu çalışma özgündür.

Çalışma kapsamında, hatta ultrasonik muayene sonucu tespit edilen ray kusurlarının, ray ve ray kaynaklarında görülme oranı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının boyutu, rayda/kaynakta bulunduğu bölge ve hat üzerinde bulunduğu kilometre belirlenmiştir. Ardından, bu kusurların, UIC 712 R kodlu "Ray Kusurları" adlı Standarda göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Son olarak, tespit edilen ray kusurlarının, hatta kullanılan farklı ray kaynağı (alüminotermit kaynak ve yakma alın kaynağı) türlerindeki görülme sıklığı, karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Çalışmanın devamında, ray gerilmeleri ile ray kusurları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Ray gerilmelerinin; ray kusurlarının ortaya çıkması ve ray kusurlarının boyutu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon gibi farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri hesaplanmıştır. Ardından, ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurlarının; aliyman, yatay kurba ve istasyon kesimlerindeki dağılımları ile bu bölgelerde hesaplanan ray gerilmeleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Ray gerilmelerinin, ray kusurlarının boyutu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ise hattın yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgelerinde tespit edilen ray kusurlarının ortalama boyutu belirlenmiş ve bu bölgelerde hesaplanan ray gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır.

2. RAYA ETKİYEN YÜKLER VE RAY GERİLMELERİ

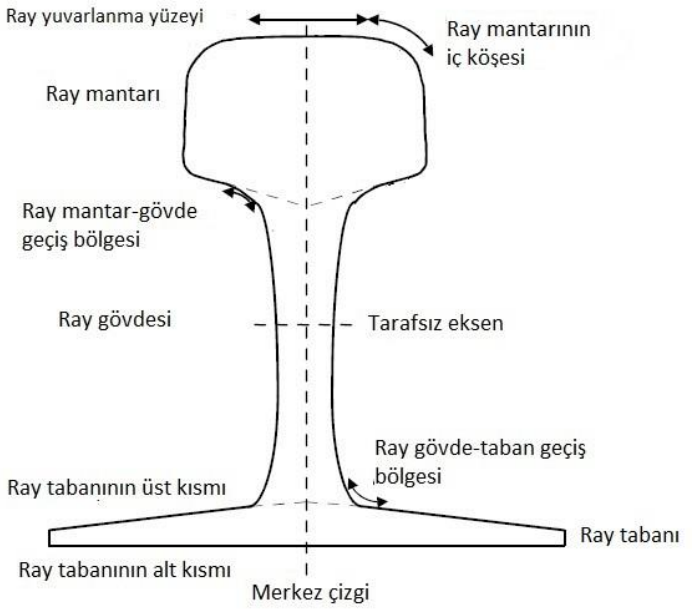
Ray, demiryolu araçlarının tekerleklerine doğrudan temas ederek tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan en önemli üstyapı elemanlarından biridir. Üzerine etkiyen her bir tekerlek yükünü traverslere aktaran raylar, demiryolu hattında yük dağıtım sürecini başlatan hat elemanıdır. Raylar genel olarak, üretim ve demiryolu işletimi aşamalarında düşey, yanal ve boyuna doğrultuda yükler tarafından yüklenir. Rayların, üretim ve işletim sırasında maruz kaldığı kuvvetler ve etkiler:

1. Ray üretimindeki doğrultma işleminden kaynaklanan iç gerilmeler,
2. Düşey dingil yükleri,
3. Tren hareketi doğrultusundaki kuvvetler,
4. Hat yüzeyi ve hat geometrisi bozulmalarından kaynaklanan dinamik kuvvetler,
5. Sıcaklık değişiminden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
6. Hızlanma ve frenleme kuvvetlerinden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
7. Atmosferik etkilerdir.

Bu yükler; ray üretiminde doğrultma işlemi nedeniyle meydana gelen kalıntı gerilmelerine, düşey dingil yükleri sonucu oluşan eğilme gerilmelerine, uzun kaynaklı raylarda sıcaklık etkisine bağlı oluşan termal gerilmelere, tekerlek-ray temas kuvvetleri sonucu ray mantarında ortaya çıkan temas gerilmelerine ve yüksek frekanslı darbe yükleri nedeniyle oluşan dinamik gerilmelere yol açar [22]. Belli başlı tüm ray kusurları ise çeşitli ray gerilmelerinin ortaya çıkması ve ilerlemesi nedeniyle meydana gelir.

Raya etkiyen yüklerin, ray gerilmelerinin ve bunların sonucu olarak ortaya çıkan ray kusurlarının doğru anlaşılması için ray kusurlarının yoğun olarak ortaya çıktığı ray bölümleri irdelenmelidir. Şekil 2.1'de, konvansiyonel ve yüksek hızlı demiryolu hatlarında yaygın olarak kullanılan Vinyol tipi örnek bir ray kesiti üzerinde belli

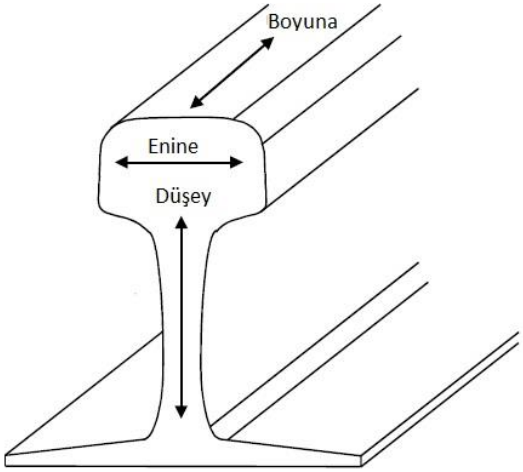
başlı ray bölümleri gösterilmiştir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere ray; mantar, gövde ve taban olmak üzere 3 ana bölümden meydana gelmektedir [23].



Şekil 2.1 : Vinyol ray üzerinde ray bölümleri [23].

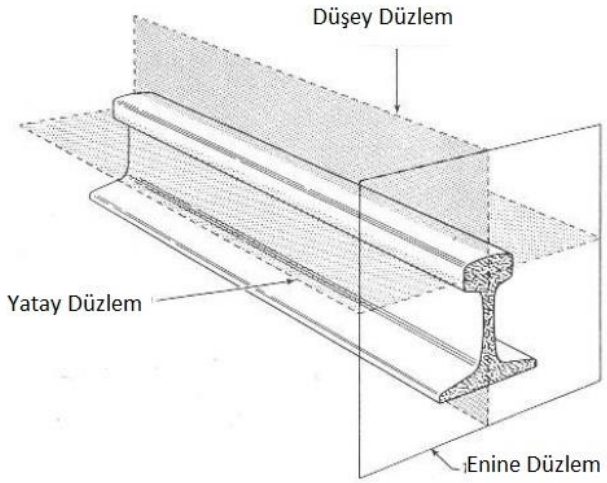
Ray mantarı, tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan rayın üst bölgesini oluşturur. Ray mantarının üst kısmında bulunan yuvarlanma yüzeyi, rayın tekerlek ile temas eden kısmıdır. Yatay kurba içindeki düşük kotlu iç raylarda ve aliymanda, tekerlek-ray temas yüzeyinin genişliği, tekerlek ve ray profillerine bağlı olarak 20 mm'den 60-70 mm'ye kadar değişebilmektedir. Ray mantarındaki bir başka önemli kısım ise ray mantarının iç köşesidir. Bu kısım, rayın tekerlek budeni ile temas eden bölümüdür. Hattın yatay kurbalı kesimlerinde dever verilen yüksek kotlu dış raylarda, tekerlek ve ray profillerine bağlı olarak temas bölgesinin genişliği 15 mm ila 25 mm arasında değişmektedir. Ray gövdesi, ray mantarı ile ray tabanı arasında kalan bölgedir. Ray tabanının üst kısmı, ray bağlantı elemanları ile temas eden ray bölümüdür. Ray tabanının alt kısmı ise rayın traverslerle veya ray pedleriyle temas eden kısmıdır.

Raya etkiyen yükler ve ortaya çıkan ray gerilmeleri; ray kesiti üzerinde boyuna, düşey ve enine doğrultularda ilerler. Şekil 2.2'de, raya etkiyen yükleri ve gerilmeleri betimlede kullanılan doğrultular, örnek ray kesiti üzerinde gösterilmiştir [23]. Şekil 2.2'ye göre boyuna doğrultu; ray yuvarlanma yüzeyi uzunluğu boyunca etkiyen yükleri, enine doğrultu; ray genişliği içinde etkiyen yükleri ve düşey doğrultu; raya dik olarak etkiyen yükleri tanımlamakta kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 : Örnek ray üzerinde ray gerilme doğrultuları [23].

Raya gelen yükleri ve gerilmeleri betimlemede kullanılan düzlemler, Şekil 2.3'de örnek bir ray kesiti üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.3'e göre düşey düzlem; ray uzunluğuna dik doğrultuda ve düşey yönde ilerleyen gerilmeleri, yatay düzlem; ray uzunluğu boyunca yatay yönde ilerleyen gerilmeleri ve enine düzlem; ray kesiti boyunca enine yönde ilerleyen gerilmeleri belirtmek için kullanılmaktadır [23].



Şekil 2.3 : Örnek ray üzerinde ray gerilme düzlemleri [23].

2.1 Raya Etkiyen Yükler

Demiryolu üstyapısında ray üzerine etkiyen yükler, statik ve dinamik yükler olmak üzere 2 ana bölümde incelenmektedir. Statik yükler; toplam araç ağırlığı ile hattın yatay kurba ve makas bölgelerinde ortaya çıkan merkezkaç ve merkezcil kuvvetlerden meydana gelir. Dinamik yükler ise hat geometrisi ve üstyapı

bozuklukları, ray ve tekerlek yüzeyi kusurları gibi nedenlerle, özellikle yüksek hızlarda ortaya çıkan yüklerdir.

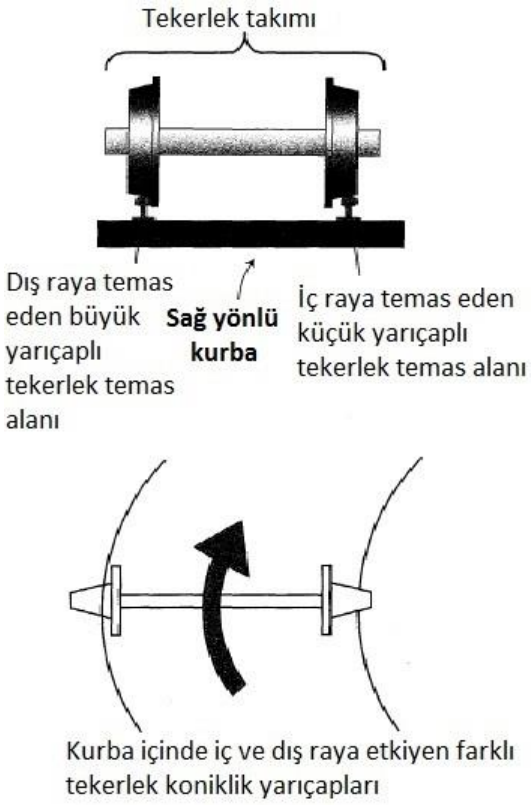
2.1.1 Statik yükler

Statik yüklerin düşey yük, yanal yük ve boyuna yük olmak üzere 3 temel bileşeni vardır. Düşey yükler, ray üzerine etkiyen tekerlek yükleri tarafından oluşturulur. Düşey tekerlek yükleri, demiryolu üstyapısının teknik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan temel parametrelerden biridir ve dingil yükünün yarısı kadar değer alır. Günümüz demiryollarında kullanılan tipik dingil yükleri: yüksek hızlı hatlar için maksimum 200 kN, karma trafikli hatlar için maksimum 225 kN ve ağır yük hatları (Avustralya) için maksimum 360 kN'dur [24].

Raya etkiyen statik tekerlek yükünün değeri, yatay kurp bölgelerinde raya verilen dever miktarına bağlı olarak değişebilir. Yatay kurbalarda, dever miktarına ve işletme hızına bağlı olarak, iç ve dış raya gelen tekerlek yükü %20 ila %30 arasında farklılık gösterebilir. Bunun yanında, tren hızı arttıkça tekerlek yükünde dinamik artışlar meydana gelebilir. Bu durum, hat geometrisiyle tren bojileri arasındaki etkileşimin düşey dinamikleri ile ilgilidir. Son olarak, tekerlek, ray mantarı yüzeyinde bulunan kusurlu bölgelerin üzerinden geçtiğinde veya yapısal bozukluklar içeren tekerlekler kullanıldığında darbe yükleri ortaya çıkabilir. Bu yükler de benzer şekilde statik tekerlek yüklerine artış getirir. Darbe yüklerinin oluşmasına neden olan etkiler, ileride detaylıca açıklanacak olan ondülasyonlar, rayda tekerlek yanığı kusurları ve düzleşmiş tren tekerlekleri gibi ray ve tekerlek kusurlarıdır. Gerçek düşey yükler, statik tekerlek yüklerine yukarıda bahsedilen dinamik yüklerin ve darbe yüklerinin eklenmesiyle oluşur ve statik tekerlek yükü değerinden daha büyük bir değer alır [23].

Statik yüklerin bir diğer önemli bileşeni yanal yüklerdir. Yanal yükler, özelllikle yatay kurbalarda ortaya çıkarak ray mantarına etkiyen temel yük durumlarından biridir. Kurba yarıçapı azaldıkça (kurbanın eğrilik derecesi arttıkça), tren kurba içinden geçtiğinde önemli yanal kuvvetler meydana gelir. Bu durumun sebebi, demiryolu araçlarının rijit dingillere sahip olmasıdır. Rijit dingiller, tekerleklerin birbirinden bağımsız olarak farklı hareket etmesine izin vermez. Bu durumda, kurba içindeki dış ray uzunluğunun, iç ray uzunluğuna göre daha fazla olması, tekerlek konikliği ile dengelenmeye çalışılır. Daha uzun mesafe katedilen dış rayda,

tekerleğin ray ile temas eden yarıçapı daha büyük; daha kısa mesafe katedilen iç rayda ise tekerleğin ray ile temas eden yarıçapı daha küçüktür. Şekil 2.4'de, yatay kurba içindeki farklı iç ve dış ray uzunluklarını dengelemek için kullanılan farklı yarıçaplı tekerlek konikliği mekanizması görülmektedir [25].



Şekil 2.4 : Yatay kurba içinde tekerlek koniklik mekanizması [25].

Şekil 2.4'de görüldüğü üzere, iç ve dış ray üzerinde seyreden tekerleklerin raya temas eden kısımlarının yarıçaplarındaki bu farklılık, tekerlek takımında yuvarlanma yarıçapı farklılığına neden olur. Yuvarlanma yarıçapı farklılığı, kurbadan geçerken iç ve dış ray uzunlukları arasındaki farklılığı dengelemeye çalışır. Bu mekanizma daha çok, büyük yarıçaplı kurbalar için geçerlidir. Kurba yarıçapı küçüldükçe, tekerleklerin koniklik yarıçapı, farklı ray uzunluklarını dengelemede yetersiz kalır ve sonuç olarak tekerlek, ray üzerinde kayar. Bu duruma, kurbada etkiyen merkezkaç kuvveti de eklenince, tekerlek budeni, dış rayın mantarının iç köşesine temas eder. Budenin, dış ray mantarının iç köşesine temas etmesiyle rayda oldukça büyük yanal yükler meydana gelir [25].

Yanal yüklerin büyüklüğü; dingil yükü, boji tasarımı ve elastik sönümleme katsayısı gibi araçla ilgili teknik parametrelere ve yatay kurba yarıçapı gibi hattın geometrik özelliklerine bağlı olarak değişir. Yarıçapı 600 metreden daha küçük olan keskin

kurplarda yanal yükler, kurp boyunca belli bir değerde sabit kalır. Öte yandan, görece büyük yarıçaplı kurplarda, yüksek hızda hareket ederken tekerlek takımı ve aracın salınım/dalgalanma hareketi yapması durumunda dinamik yanal yükler meydana gelir.

Statik yüklerin son bileşeni, boyuna yüklerdir. Boyuna yükler, aşağıdaki etkiler nedeniyle meydana gelir:

1. Uzun kaynaklı raylarda sıcaklık etkisine bağlı olarak oluşan boyuna termal kuvvetler,
2. Demiryolu araçlarının hızlanması ve frenlemesi nedeniyle oluşan boyuna mekanik kuvvetler,
3. Ray üretimi aşamasında oluşan içsel ray gerilmeleri ve rayların kaynaklanması sonrasında oluşan büzülme gerilmelerine bağlı olarak ortaya çıkan boyuna kuvvetler.

Sıcaklık etkisi kaynaklı boyuna kuvvetler, rayın nötr sıcaklığı ile gerçek sıcaklığı arasındaki fark nedeniyle ortaya çıkar. Bu termal boyuna kuvvetler, özellikle uzun kaynaklı raylarda meydana gelir. Ray nötr sıcaklığı ile gerçek sıcaklığı arasındaki farktan dolayı ray uzunluğunda meydana gelmesi beklenen değişim, uzun kaynaklı raylarda gerçekleşemez ve bu nedenle rayda basınç veya çekme termal gerilmeleri ortaya çıkar.

Demiryolu araçlarının hızlanma ve frenleme evrelerinde ortaya çıkan mekanik kaynaklı boyuna kuvvetler ise tren hareketi ile ilgilidir. Hızlanma evresinde harekete başlayan dingiller, tekerlek ve ray arasındaki statik sürtünme nedeniyle hatta boyuna kuvvetler oluşturur. Hareket başlayan dingilin önündeki yolda boyuna çekme kuvvetleri, ardında bıraktığı yolda ise boyuna basınç kuvvetleri oluşur. Bu boyuna kuvvetlerin büyüklüğü, tekerlek yükü ve adezyon katsayısına bağlıdır. Sıcaklık kaynaklı boyuna kuvvetlerin %5'ini aşmayan hızlanma kaynaklı boyuna kuvvetler ihmal edilebilir.

Trenin frenleme evresinde ise frenleyen tekerlekler, raya önemli derecede boyuna kuvvet uygular. Frenleyen ilk dingilin önündeki yolda, hızlanma durumunun aksine basınç gerilmeleri oluşur. Frenleyen dingilin ardında bıraktığı yolda ise çekme gerilmeleri oluşur. Genellikle tüm dingiller, frenleme prosedüründe yer aldığı için frenlemeden etkilenen hat kesiminin uzunluğu 30 metreye kadar çıkabilir. Frenleme

nedeniyle oluşan boyuna kuvvetler, sıcaklık kaynaklı boyuna kuvvetlerin %15'ine kadar ulaşabilir ve bu nedenle dikkate alınmalıdır. Hızlanma ve frenleme süresince oluşan boyuna kuvvetler 55 kN değerine kadar ulaşabilir. Elektrikli araçlar için frenleme kuvvetleri, dingil yükünün %12'si ila %15'i arasında değişmektedir. Dizel araçlar için frenleme kuvvetleri dingil yükünün %18'i, yük vagonları için ise dingil yükünün %25'i kadardır [24, 25].

2.1.2 Dinamik yükler

Demiryolu hattının üstyapısındaki bozukluklar, ray yüzeyinde bulunan düzensizlikler ve tekerlek yapısındaki kusurlar, rayda dinamik yükler oluşmasına neden olur. Dinamik etkiler, özellikle yüksek hızlarda raya etkiyen statik yükleri ve gerilmeleri önemli ölçüde artırır. Rayda dinamik yükler oluşmasına sebep olan başlıca etkenler:

1. Yatay ve düşey hat geometrisi bozuklukları,
2. Balast yatağı ve temel zemini oturmasından kaynaklanan düzensizlikler,
3. Ray kaynakları ve bağlantı noktalarındaki çökmeler,
4. Ray yuvarlanma yüzeyindeki ondülasyonlar,
5. Dar yarıçaplı yatay kurbaların düşük kotlu iç raylarında tekerlek patinaj izleri,
6. Tekerlek düzleşmesi gibi yapısal bozuklukları bulunan tekerlekler,
7. Hat ve araçtaki rijitlik değişimleri,
8. Aracın elastik sönümleme sistemi ile ilgili olan doğal titreşimleridir.

Demiryolu üstyapısını boyutlandırırken ve tahkik ederken, raya etkiyen dinamik yükler dikkate alınmalıdır. Dinamik yükleri hesaplamak için statik yük (tekerlek yükü), dinamik etki katsayısı ile çarpılır. Uluslararası demiryolu kurumları, dinamik etki katsayısını hesaplamak için çeşitli ampirik formüller kullanmaktadır. Bu formüllerde dinamik etki katsayısı; tren hızı, tekerlek yarıçapı, tekerlek yükü, aracın ağırlık merkezi, hat kalitesi, hat rijitliği, yatay kurbalarda dever eksikliği, kurba yarıçapı ve hat bakım durumuna bağlı olarak değişmektedir [22, 24, 26].

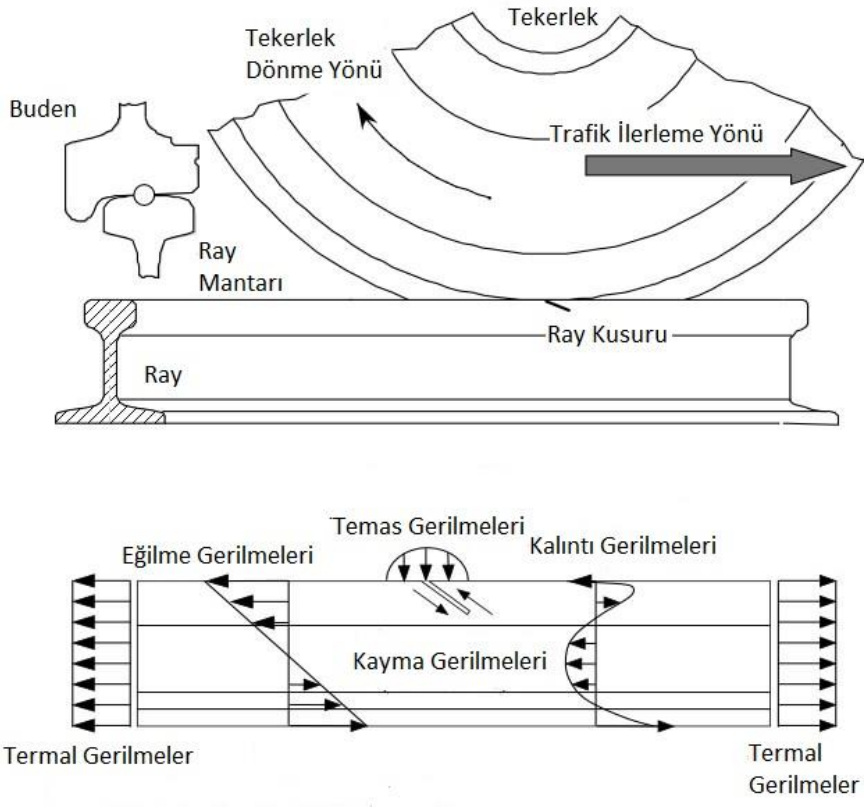
2.2 Ray Gerilmeleri

Demiryolu aracı ile hat arasındaki etkileşim ve sıcaklık değişimi gibi çevresel etkilerden ötürü meydana gelen düşey, yanal ve boyuna kuvvetler sonucu rayda

çeşitli gerilmeler ortaya çıkar. Ray kusurlarının oluşmasında ve ilerlemesinde önemli etkiye sahip olan başlıca ray gerilmeleri şunlardır:

1. Eğilme gerilmeleri,
2. Kayma gerilmeleri,
3. Termal gerilmeler,
4. Kalıntı gerilmeleri,
5. Tekerlek-ray temas gerilmeleri.

Ray gerilmeleri, özellikle boyuna doğrultuda birbirine eklenerek rayda önemli etkiler oluşmasına yol açar. Eğilme gerilmeleri, kalıntı gerilmeleri ve termal gerilmeler; demiryolu üstyapısı tasarımı sürecinde önemli rol oynarken, tekerlek-ray temas gerilmeleri hat bakım sürecinde etkili olur. Ray yorulma kusurları; esas olarak tekerlek-ray temas gerilmeleri, eğilme gerilmeleri ve kayma gerilmeleri etkisi sonucu ortaya çıkar. Özellikle temas gerilmeleri; rayda yorulma kusurlarına, yüzey kusurlarına ve aşınma problemlerine yol açar. Bu gerilmelere ek olarak, kalıntı gerilmeleri ve termal gerilmeler de yorulma kusurlarının gelişmesine etki eder. Şekil 2.5'de, ray kusurlarının oluşumuna etki eden önemli ray gerilmeleri görülmektedir.



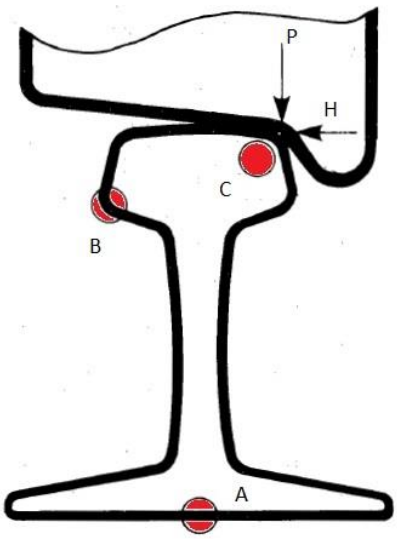
Şekil 2.5 : Örnek ray kesiti üzerinde ray gerilmeleri [27].

2.2.1 Eğilme gerilmeleri

Eğilme gerilmeleri, düşey ve yanal tekerlek yükleri nedeniyle meydana gelir. Tekerlek, ray yuvarlanma yüzeyinde bir noktanın üzerinden geçtiğinde, uyguladığı kuvvetler nedeniyle rayda düşey ve yanal eğilme gerilmeleri oluşur. Düşey tekerlek yükleri, rayın, mesnet görevi yapan traversler arasında düşey yönde eğilmesine yol açar. Bu durumda, ray tabanında boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir. Düşey yüklerin neden olduğu bir başka etki ise ray mantarının, ray gövdesi üzerinde düşey yönde eğilmesidir. Bu durumda, ray mantarı-gövdesi birleşim yerinde boyuna yönde çekme gerilmeleri oluşur. Ayrıca, çukurlaşmış tekerlekler tarafından ray merkez çizgisinden bir miktar uzaklıkta raya etkiyen düşey yükler, rayda burkulma etkisine yol açar. Bunun sonucunda, ray gövdesinde düşey yönde çekme gerilmeleri ve mantar-gövde birleşim yerinde boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir.

Yanal tekerlek yükleri, ray mantarının, ray tabanına göre yana doğru hareket etmesine neden olur ve bu durumda ray gövdesinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Yanal yükler, ray mantarı-gövdesi birleşim yerinde boyuna yönde çekme gerilmelerinin de artmasına yol açar. Yanal yüklerin neden olduğu eğilme gerilmeleri, ray yorulma kusurlarının oluşumuna belli bir miktar katkı sağlar. Fakat ray kusurlarının meydana gelmesindeki asıl etken, düşey yüklerin neden olduğu eğilme gerilmeleridir [8, 23, 27].

Demiryolu üstyapısının tasarımı ve tahkiki yapılırken, ray tabanı merkezinde meydana gelen maksimum eğilme gerilmeleri dikkate alınır. Şekil 2.6'da, örnek ray kesiti üzerinde gerilmelerin ortaya çıktığı ray bölümleri gösterilmektedir [26]. Şekildeki P yükü düşey tekerlek yüklerini ve H yükü yatay kurbalarda ortaya çıkan yanal tekerlek yüklerini belirtmektedir. Şekildeki A noktası, düşey tekerlek yükleri nedeniyle ray tabanı merkezinde meydana gelen eğilme gerilmelerini göstermektedir. B noktası, hattın yatay kurbalı kesimlerinde, tekerlek budeni tarafından yüksek kotlu dış rayın mantarına etkiyen yanal yükler nedeniyle ray mantarının alt kenarında ortaya çıkan eğilme gerilmelerini göstermektedir. C noktası ise, ileride daha detaylı açıklanacak olan ray mantarının iç köşesine etkiyen tekerlek-ray temas gerilmelerini göstermektedir.



Şekil 2.6 : Rayda ortaya çıkan maksimum gerilmelerin yerleri [26].

Ray kesitinde ortaya çıkan eğilme gerilmelerini hesaplamak için kullanılan analitik yöntemlerde, rayın, sabit yatak katsayılı sürekli bir elastik temel tarafından desteklenen, sonsuz uzunlukta bir kiriş olduğu varsayılır. Böylelikle, travers gibi ayrık mesnetlerin etkisi doğrudan hesaba katılmaz. Fakat travers aralığının, elastik temel katsayısı üzerinde dolaylı bir etkisi vardır. Elastik temel üzerinde uzanan kiriş yöntemiyle ray üzerine etkiyen eğilme momentlerinin, eğilme gerilmelerinin ve rayın düşey çökmesinin hesabı, Winkler tarafından bulunmuş ve Zimmermann tarafından geliştirilmiştir. Eğilme gerilmelerini hesaplamak için kullanılan bir başka yöntem ise sonlu elemanlar yöntemidir [8, 26].

2.2.2 Kayma gerilmeleri

Tekerlek yükleri, ray kesitinde eğilme gerilmelerinin yanı sıra kayma gerilmelerinin de oluşmasına neden olur. Kayma gerilmeleri, cebireli ray bağlantılarında, ray gövdesinde açılmış cebire delikleri çevresindeki kusurların temel sebebidir. Bu nedenle, günümüzün modern demiryolu hatlarında cebireli ray bağlantılarının olumsuz etkilerini azaltmak için uzun kaynaklı raylara geçilmiştir.

Kayma gerilmelerinin ortaya çıktığı bir başka durum ise tekerlek-ray temas kuvvetleri sonucu oluşur. Tekerlek-ray temas gerilmeleri nedeniyle, ray mantarı yüzeyinin 5-6 mm aşağısında maksimum kayma gerilmeleri meydana gelir. Bu kayma gerilmelerinin değeri, genellikle tekerlek-ray temas gerilmelerinin %30'u kadardır [26, 27].

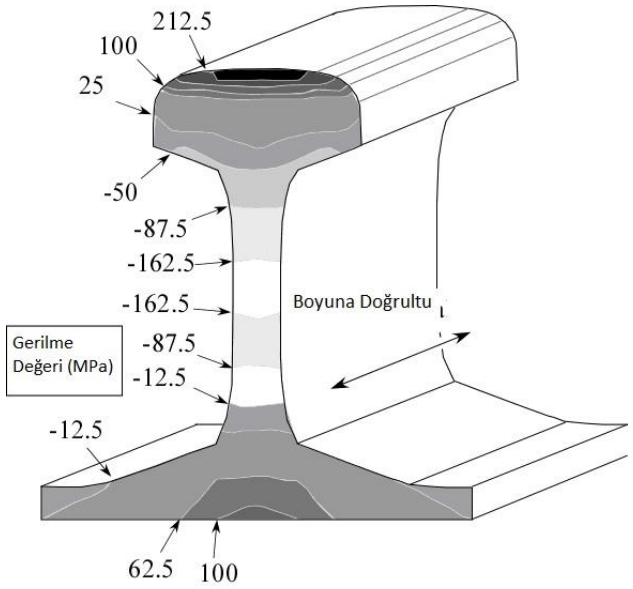
2.2.3 Termal gerilmeler

Termal gerilmeler, genellikle uzun kaynaklı raylarda ortaya çıkar. Bu gerilmeler, rayın gerçek sıcaklığı ile ray nötr sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ısıl genleşme ve büzülme olayları ile ilgilidir. Ray nötr sıcaklığı, raydaki boyuna gerilmelerin sıfır olduğu ve rayların birbirine kaynaklandığı sıcaklık değeridir. Eğer ray sıcaklığı, ray nötr sıcaklığından fazla ise ısıl genleşme nedeniyle ray uzunluğunda artış meydana gelmesi beklenir, fakat uzun kaynaklı raylarda ray uzunluğu değişemeyeceği için rayda boyuna yönde basınç gerilmeleri meydana gelir. Bu durum; rayda burkulma etkisine neden olur ve derayman (trenin raydan çıkması) riski doğurur. Ray sıcaklığının, ray nötr sıcaklığından düşük olduğu durumlarda ise boyuna yönde çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler, tekerlek yüklerine ek bir statik yük olarak raya etki eder ve ray kusurlarının, rayın enine düzleminde gelişmesini kolaylaştırır. Çekme termal gerilmelerin en yüksek değerine ulaştığı soğuk kış aylarında ray kırılması riski oldukça yüksektir.

Uzun kaynaklı raylarda meydana gelen termal gerilmeleri hesaplamak için, ray sıcaklığı ile ray nötr sıcaklığı arasındaki fark, rayın ısıl genleşme katsayısı ve rayın elastisite modülü çarpılır. Uzun kaynaklı raylarda ortaya çıkan termal gerilmeler, 138 MPa değerine kadar çıkabilmektedir. Termal gerilmeler, cebireli raylarda esasen yoğun olarak görülmemekle birlikte, bakımı iyi yapılmamış cebire bağlantı noktalarında ortaya çıkabilir [23, 27].

2.2.4 Kalıntı gerilmeleri

Rayda, herhangi bir dış yük etkisi olmaksızın var olan gerilmelere "kalıntı gerilmeleri" denir. Kalıntı gerilmeleri, ray üretim aşamasındaki ısıl işlem, doğrultma işlemi ve ray mantarı sertleştirme aşamalarında ortaya çıkar. Buna ek olarak, raylar birbirine kaynak yoluyla birleştirilirken, ray çeliğinin ve/veya kaynak metalinin farklı genleşme ve büzülme özelliklerinden dolayı ray kaynak bölgelerinde kalıntı gerilmeleri oluşur. Ray üretimi aşamasındaki doğrultma işlemi sonrasında ray mantarında ve ray tabanının merkezinde çekme kalıntı gerilmeleri, ray gövdesinde ve ray tabanının uç kenarlarında ise basınç kalıntı gerilmeleri meydana gelir. Şekil 2.7'de, örnek bir ray kesiti üzerinde, ray imalat sürecindeki doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri gösterilmektedir [27].



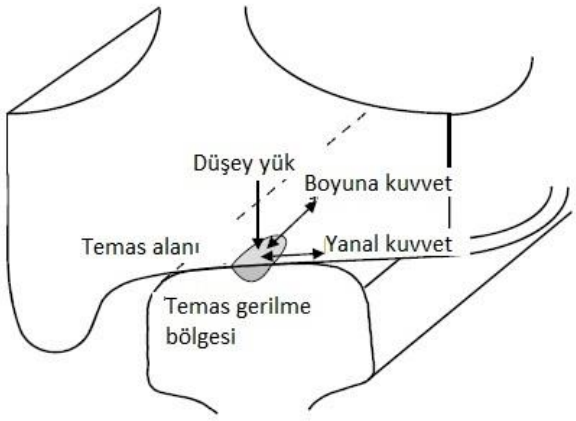
Şekil 2.7 : Ray doğrultma işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri [27].

Raydaki kalıntı gerilmelerinin karakteristikleri oldukça çeşitlidir. Demiryolu hattı işletime açıldıktan sonra ray üzerinden birkaç tekerlek geçişiyle birlikte ray mantarının yüzeyindeki kalıntı gerilmeleri, plastik deformasyon nedeniyle basınç gerilmelerine dönüşür. Ray imalatı aşamasında oluşan kalıntı gerilmelerinin aksine ray kaynak işlemi sırasında oluşan kalıntı gerilmeleri; ray mantarının büyük bir kısmında ve ray tabanında basınç gerilmeleri, ray gövdesinde ise çekme gerilmeleri olarak ortaya çıkar. Mantarı sertleştirilmiş raylarda, ray gövdesinde düşey yönde çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu rayların mantar ve taban kısmında ise boyuna yönde çekme gerilmeleri oluşur.

Kalıntı gerilmeleri, ray kesiti içinde herhangi bir noktada ortaya çıkabilir ve ray kusurlarının oluşumuna önemli etki yapabilir. Kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü, ray üretim yönteminde birtakım değişiklikler yapılarak kısmen azaltılabilir. Ray taşlama, üretim aşamasında ısıl işlemden kaynaklanan ve ray mantarının yüzeyinde meydana gelen kalıntı gerilmelerini büyük ölçüde azaltır. Ray kaynak işleminden kaynaklanan kalıntı gerilmeleri ise kaynağın türüne (alüminotermit kaynak, yakma alın kaynağı, elektrik ark kaynağı) ve soğutma hızı gibi kaynak işlemi parametrelerine dayanır. Kalıntı gerilmeleri; üretim süreci, kaynak işlemi ve başlangıçtaki servis yükleri dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanabilir. Alternatif olarak, çeşitli tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemlerini kullanarak kalıntı gerilmelerini ölçmek mümkündür.

2.2.5 Tekerlek-ray temas gerilmeleri

Tekerleğin raydan geçişi sırasında, tekerlek ve ray arasındaki temas alanında meydana gelen kuvvetler, temas gerilmelerine neden olur. Temas gerilmesi oluşturan kuvvetler: tekerlek yükleri ile çekim, frenleme ve yönlendirmeden kaynaklanan tekerlek-ray temas alanındaki kuvvetlerdir. Oldukça büyük değerlere ulaşan tekerlek yüklerinin, travers ve balast gibi diğer üstyapı elemanlarına aktarılmasından önce hat yapısına etkidiği ilk alan olan tekerlek-ray temas alanındaki gerilmeler, ciddi seviyelere ulaşabilir. Örneğin, temas basınç gerilmeleri rutin olarak 1500 MPa değerine ulaşırken, uygun olmayan tekerlek-ray teması dolayısıyla 4000 MPa'ı geçen gerilmeler meydana gelebilir [8]. Şekil 2.8'de, örnek bir ray kesiti üzerinde tekerlek-ray temas alanı görülmektedir [23]. Şekilde görüldüğü üzere, temas alanına düşey, yanal ve boyuna kuvvetler birlikte etki edebilir.



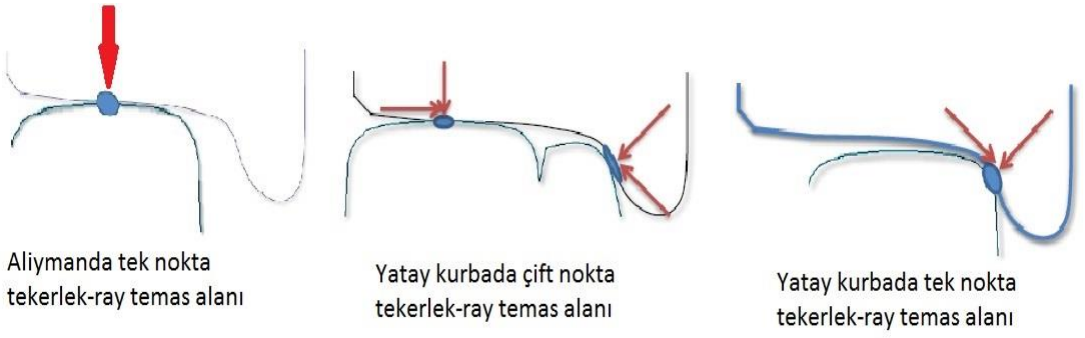
Şekil 2.8 : Tekerlek-ray temas alanı [23].

Tekerlek-ray temas gerilmelerini hesaplamak için Hertz analizi kullanılır. Hertz analizine göre temas gerilmesi, temas alanı ve temas alanına dik olarak etkiyen yüke bağlı olarak değişmektedir. Temas alanı, eliptik bir şekle sahiptir. Temas alanının boyuna yönde uzunluğu 10-12 mm arasında, enine yönde uzunluğu ise 5-8 mm arasında değer almaktadır. Tüm tekerlek yükünü karşılayan bu küçük alandır. Temas alanının eni ve boyu; tekerlek ve ray mantarının yarıçapı, tekerlek ve rayın birbirine etkime pozisyonu ve temas alanına dik olarak etkiyen yükün değerine bağlı olarak değişmektedir [26].

Aliymanda, tekerlek-ray teması genellikle merkezidir yani tekerlek yükleri, ray yüzeyinin merkezine doğru etki eder. Bu durumda tekerlek ile ray arasında tek bir temas noktası vardır: tekerlek sırtı, ray mantarının üst yüzeyinin orta kısmına doğru

etkir. Aliymandaki tek nokta teması gerilmeleri, ray mantarının merkezinde yoğunlaşır.

Hattın yatay kurbalı kesimlerinde ise tekerlek-ray teması 2 noktada gerçekleşebilir. Bu durumun sebebi, özellikle dar yarıçaplı kurbalarda ortaya çıkan yanal kuvvetler nedeniyle tekerlek budeninin, yüksek kotlu dış rayın mantarına temas etmesidir. Çift nokta temasındaki ilk temas noktası, tekerlek budeni ile ray mantarının iç köşesi arasında, ikinci temas noktası ise tekerlek sırtı ile ray mantarının üst yüzeyi arasındadır. Alternatif olarak, yatay kurba içinde tek nokta teması da gerçekleşebilir; fakat bu temas, aliymandaki merkezi tek nokta temasından farklıdır. Yatay kurbanın dış rayında görülen tek temas noktasında, tekerlek budeni ile tekerlek sırtı arasındaki bölüm, ray mantarının iç köşesine temas eder. Bu temas durumunda, kurba içindeki düşey ve yanal yüklerin birlikte etki ettiği tek bir temas noktası vardır ve buna bağlı olarak oldukça büyük temas gerilmeleri meydana gelir [25]. Şekil 2.9'da, aliymandaki merkezi tek nokta teması, yatay kurba içindeki çift nokta teması ve yatay kurba içindeki tek nokta teması görülmektedir [28].



Şekil 2.9 : Aliyman ve yatay kurbada tekerlek-ray temas alanları [28].

Tekerlek-ray temas alanında meydana gelen ana kuvvetler, yükleme doğrultusuna göre belli bir açıyla hareket eden kesme kuvvetleridir. Bu kuvvetler; tekerlek yüklerine, tekerlek yarıçapına, ray üst yüzeyinin yarıçapına ve uygulanan çekim kuvvetine bağlı olarak değişir. Görece düşük çekim kuvvetlerinde, ray mantarında meydana gelen maksimum gerilme, tekerlek-ray temas yüzeyinden 2-4 mm kadar aşağıda ortaya çıkar. Çekim kuvveti arttıkça, maksimum gerilme değeri artar ve tekerlek-ray temas yüzeyine daha yakın bir noktada meydana gelir. Tekerlek-ray temas gerilmeleri, ray kusurlarının en tehlikeli türlerinden biri yorulma kusurlarının oluşumundaki en büyük etkendir. Binlerce kez tekrarlanan tekerlek-ray geçişinden

sonra, temas gerilmelerine bağlı olarak ray çeliğinde yorulma kusurları oluşur veya rayda var olan kusurlar, yorulma etkisiyle gelişir [23].

Ray gerilmeleri, ray kusurlarının oluşumundaki en önemli sebeplerden biridir. Bu çalışmada incelenen hat olan Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki raylara etkiyen eğilme gerilmeleri, kayma gerilmeleri, termal gerilmeler ve tekerlek-ray temas gerilmeleri, tezin ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı olarak hesaplanmıştır.

3. RAY KUSURLARI

Başlıca ray kusurlarının ortaya çıkması ve ilerlemesinin temel sebebi ray gerilmeleridir. Rayda meydana gelen eğilme gerilmeleri, kayma gerilmeleri, kalıntı gerilmeleri, tekerlek-ray temas gerilmeleri ve termal gerilmeler, ray kusurlarının oluşmasına ve zaman içinde metal yorulması etkisiyle ilerlemesine neden olur [23]. Kusurlu raylar, hat üzerinde 3 farklı şekilde bulunur: hasarlı ray, çatlak ray ve kırık ray. Çatlak ray, ray uzunluğu boyunca rayın herhangi bir yerinde, ilerlemesi durumunda rayın kırılmasına yol açacak yapısal boşluklar içeren raylara denir. Kırık ray, 2 veya daha fazla parçaya ayrılmış raylara ve ray yapısında 50 mm'den uzun ve yuvarlanma yüzeyinden 10 mm'den derin boşluklar bulunduran raylara denir. Hasarlı ray ise kırık veya çatlak ray kategorisine girmeyen; fakat genellikle ray yüzeyinde kusur bulunduran raylara denir.

Ray kusurları, ray üzerinde 3 farklı bölgede meydana gelebilir: ray uç bölgeleri, ray kaynak bölgeleri ve bu 2 bölgenin dışında kalan ray bölgeleri. Ray uç bölgeleri, cebire deliklerinin bulunduğu ray sonlarıdır. Ray kaynak bölgeleri ise ray uçlarının birbirine birleştirildiği kaynak merkez çizgisinin her iki tarafından 10 cm uzaklığa kadar uzanan alandır. Son bölge ise ray uç bölgeleri ile kaynak bölgeleri dışında kalan alanı kapsar [29].

Ray kusurlarının sınıflandırılmasında birkaç farklı yaklaşım vardır. İlk yaklaşımda ray kusurları, 2 ana bölümde incelenir:

1. Ray mantarı yüzeyinde meydana gelen yüzey kusurları,
2. Ray mantarı yüzeyinin altında meydana gelen iç kusurlar.

Her 2 kusur tipi de ray yorulması kaynaklı kusurlar olarak düşünülse de gerçek oluşum mekanizmaları ve ilgili kritik gerilmeleri birbirinden farklıdır. Yüzey kusurları genellikle, hat üzerindeki trafik yoğunluğu ve dingil yüklerindeki artış nedeniyle meydana gelir. Yüzey kusurlarına örnek olarak, ileride daha detaylı açıklanacak olan ray mantarındaki kılcal çatlaklar ve çökme kusurları verilebilir. İç kusurlar ise daha çok ray üretimindeki metalürjik hatalar nedeniyle ortaya çıkar ve

milyonlarca kez tekrarlanan tekerlek-ray teması sonrası yorulma etkisiyle gelişir. Rayda görülen iç kusurlara örnek olarak oval boşluk ve boyuna düşey çatlak kusurları verilebilir.

Ray kusurlarını bir başka sınıflandırma şeklinde ise kusurlar, 2 ana başlık altında incelenmektedir:

1. Ray kaynakları ile ilgili kusurlar,
2. Ray kalitesi ile ilgili kusurlar.

Ray kaynaklarıyla ilgili kusurlar, rayları birbirine birleştirerek uzun kaynaklı ray elde etme teknolojisinde yaygın olarak kullanılan alüminotermit ray kaynağı, yakma alın kaynağı ve elektrik ark kaynağı kusurlarını içerir. Ray kalitesiyle ilgili kusurlar ise rayın üretim koşulları, metalürjik özellikleri ve mekanik dayanımı gibi özellikleri nedeniyle meydana gelen kusurları içermektedir. Bu kusurlara örnek olarak oval boşluk ve ray mantarında yatay çatlak kusurları verilebilir [30].

Ray kusurlarının son sınıflandırılma biçiminde ise kusurlar 3 ana başlık altında incelenmektedir:

1. Ray imalatı aşamasında oluşan kusurlar,
2. Uygun olmayan nakliye, montaj ve kullanım koşullarının neden olduğu kusurlar,
3. Ray yorulması kusurları.

Ray imalatı aşamasında oluşan kusurlar, çelik ve ray üretimi teknolojisiyle ilgilidir. Bu tür imalat kusurlarına örnek olarak, genellikle ray mantarındaki hidrojen çatlakları nedeniyle meydana gelen oval boşluk kusurları, metal olmayan yabancı maddeler ve segregasyon kusurları verilebilir. Uygun olmayan nakliye, montaj ve kullanım koşullarının neden olduğu kusurlara örnek olarak, patinaj yapan tekerleklerin rayda bıraktığı tekerlek yanığı kusurları verilebilir. Ray çeliği dayanımının düşmesine neden olan ray yorulması kusurları ise en tehlikeli kusur tipidir ve "yuvarlanma temas yorulması" olarak da bilinir. Yorulma kusurlarının başlangıç sebebi; raydaki imalat hataları, metalürjik, mekanik, termal hatalar veya uygun olmayan kullanım koşulları ile ilgili değildir. Bu kusurlar, tekerlek-ray temas alanındaki yüksek gerilmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yüksek temas gerilmeleri, ray yüzeyinde oldukça büyük kayma gerilmelerine yol açar ve zaman

içinde tekrarlı yükler altında, ray çeliğinde yorulma başlar. Bu nedenle yorulma kusurlarının ilk ortaya çıktığı yerler, ray yüzeyi veya ray yüzeyine çok yakın olan noktalardır. Bu tür yorulma kusurlarına örnek olarak ray mantarı yüzeyindeki kılcal çatlaklar, iç köşe kabuklanmaları ve ray yüzeyindeki çökmeler verilebilir. Ray yüzeyinde başlayan kılcal çatlak gibi yorulma kusurları, zamanla ray kesitinde derinlere doğru gelişir ve tespit edilemediği takdirde ray kırılmalarına yol açar. Yorulma kusurları, ortaya çıktığı bölgede hemen hemen sürekli bir form aldığı için oldukça tehlikelidir. Herhangi bir yorulma çatlağında meydana gelen kırılma, hemen yakınındaki raydaki gerilmeleri artırır ve rayın daha fazla kırılmasına ve ayrışmasına yol açar.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ray çeliği türlerinin çoğunda, yorulma kusurları ortaya çıkmaktadır. Kılcal çatlak kusurları, özellikle yatay kurbaların yüksek kotlu dış rayında görülür ve bunların bir kısmı, ray kesitinde enine yönde ilerleyerek daha derine iner. Ray yüzeyindeki çökme kusurları ise daha çok aliymanda ve büyük yarıçaplı yatay kurbalarda görülür. Bu yorulma kusurları da kılcal çatlaklara benzer şekilde zaman içinde ray kesitinde daha derine inerek ray kırılmasına yol açabilir. Yorulma kusurları; artan işletme hızları, dingil yükleri, trafik yoğunluğu ve çekim (cer) gücü nedeniyle gelecekte de en önemli ray kusuru tiplerinden biri olacaktır [8, 31].

Raylarda yaygın olarak görülen ve tespit edilmediği takdirde ray kırılmalarına yol açacak belli başlı ray kusurları, Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) tarafından UIC 712 R kodlu "Ray Kusurları" adlı bültende yayınlanmıştır. Bu bültende ray kusurları; rayda ortaya çıktığı konuma, görünüşüne ve ortaya çıkma sebeplerine göre sınıflandırılmıştır. Ray kusurlarının her birine, toplam 3 veya 4 rakamdan oluşan bir kod numarası verilmiştir. Bu kod numaralarındaki ilk rakam, kusurun raydaki konumunu belirtmektedir. Örneğin, "1" ile başlayan kusurlar ray uç bölgelerinde meydana gelen kusurları, "2" ile başlayan kusurlar ray uç bölgeleri dışında meydana gelen kusurları, "3" ile başlayan kusurlar raya etkiyen darbe yükleri nedeniyle oluşan kusurları ve "4" ile başlayan kusurlar ray kaynak bölgelerinde meydana gelen kusurları göstermektedir.

Ray kusurlarına verilen kod numaralarındaki 2. rakam ise kusurun, ray profilindeki konumunu belirtmektedir. Örneğin, "0" rakamı kusurun tüm ray kesitinde olduğunu, "1" rakamı kusurun ray mantarında bulunduğunu, "2" rakamı kusurun ray mantarı

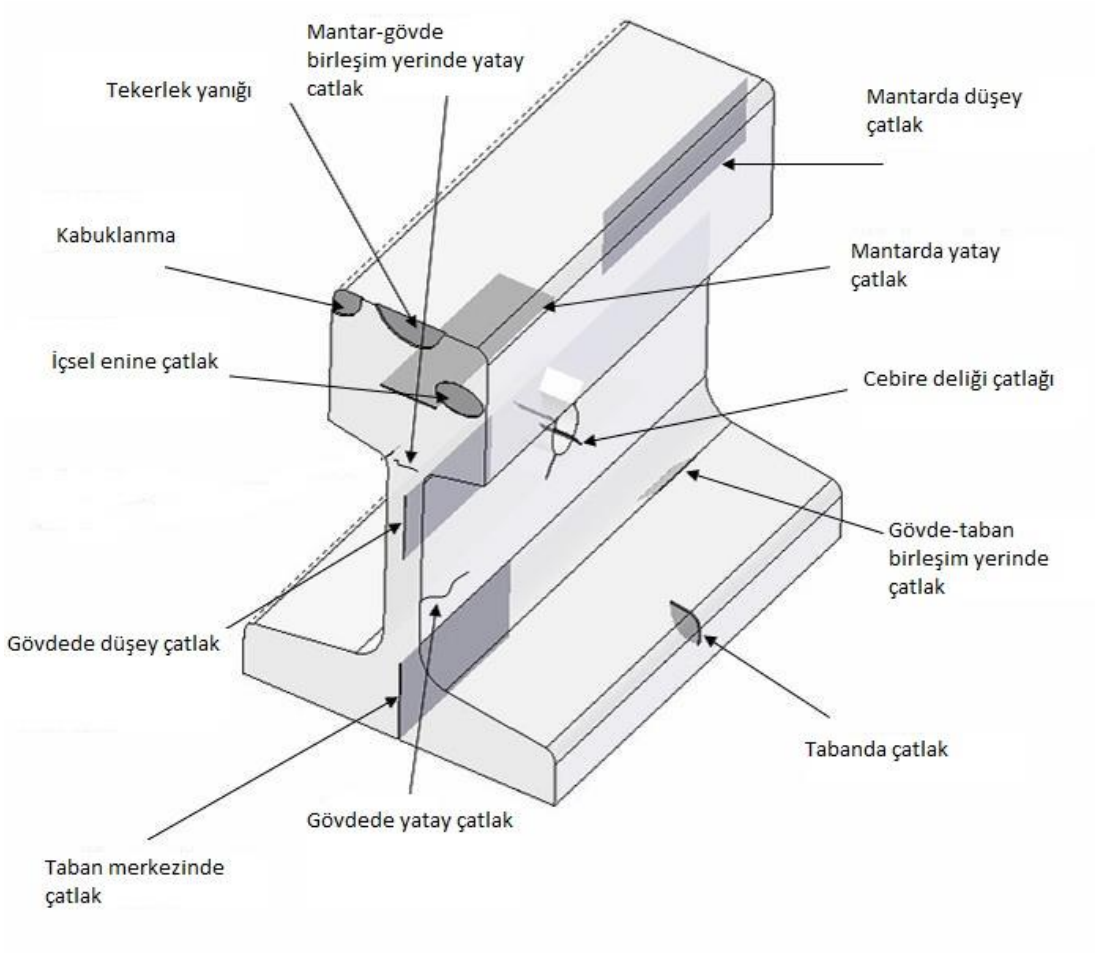
yüzeyinde bulunduğunu, “3” rakamı kusurun ray gövdesinde bulunduğunu ve “4” rakamı kusurun ray tabanında bulunduğunu göstermektedir. Ray kusuru kodlarındaki 2. rakamın temsil ettiği bir başka özellik ise ray kaynaklarında ortaya çıkan kusurların, hangi kaynak türünde olduğunu belirtmesidir. Burada, “1” rakamı yakma alın kaynağı ile yapılan raylardaki kusurları, “2” rakamı alüminotermit kaynaklı raylardaki kusurları ve “3” rakamı elektrik ark kaynağı ile yapılan raylardaki kusurları göstermektedir.

Ray kusurlarına verilen kod numaralarındaki 3. rakam, ray kusurlarının yapısını, oluşma nedenini veya doğrultusunu belirtmektedir. Örneğin, “1” rakamı ray kesitinde enine yöndeki kusurları, “2” rakamı yatay yöndeki kusurları, “3” rakamı düşey yöndeki kusurları, “4” rakamı korozyon kusurlarını ve “5” rakamı tekerlek yanığı kusurlarını göstermektedir. Ray kusuru kod numaralarındaki 4. rakam ise gerektiği takdirde kusurla ilgili ek özellikleri belirtmek için kullanılmaktadır. UIC 712 R “Ray Kusurları” bülteninde toplam 55 farklı ray kusuru anlatılmıştır [29].

Bu tez çalışmasında, rayda görülen kusurlar; “ray kusurları” ve “ray kaynağı kusurları” olmak üzere 2 ana bölümde incelenmiştir. Ray kusurları, cebire deliklerinin yakınındaki ray sonlarında ve ray sonları dışındaki bölgelerde görülen kusurları içermektedir. Bu kusurlar, “ray kaynağı bölgeleri dışında görülen ray kusurları” olarak da nitelendirilebilir. Ray kaynağı kusurları ise ray uçlarının birbirine birleştirildiği alüminotermit kaynak, yakma alın kaynağı ve elektrik ark kaynağı bölgelerinde görülen kusurları içermektedir. Ray ve kaynak kusurlarını tanımlarken UIC 712 R bültenindeki ray kusuru sınıflandırması esas alınmıştır.

3.1 Ray Kusurları

Ray kusurları, ray kaynak bölgeleri dışında kalan alanlarda görülen ray kusurlarını içermektedir. Bu kusurlar, ray profili üzerinde ray mantarında, gövdesinde veya tabanında meydana gelebilir. Fakat kusurların yoğunlaştığı alanlar, ray mantarı ve ray mantarı yüzeyidir. Şekil 3.1’de, örnek bir ray kesiti üzerinde, günümüzün modern demiryolu hatlarında sıklıkla karşılaşılan ray kusurlarının şematik bir gösterimi bulunmaktadır [13].



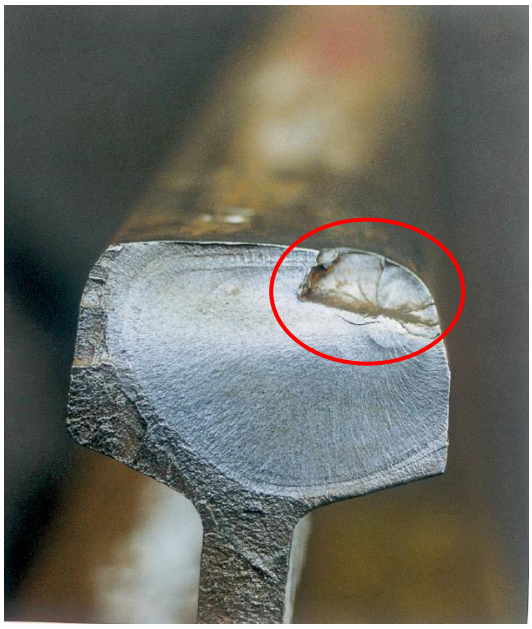
Şekil 3.1 : Örnek ray kesiti üzerinde ray kusurları [13].

3.1.1 Ray mantarında oval boşluk

Ray mantarında oval boşluk kusuru, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 111 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 211 kodunu alır. Mantardaki oval boşluk kusurları, ray yüzeyinin 10-15 mm altında ortaya çıkan yüzey altı kusurlardır. Bu tür kusurlar, üretim hatası nedeniyle meydana gelir ve zaman içinde trafik yükleri altında, mantarda enine bir çatlak olarak ilerler. Bu özelliği ile aynı zamanda bir yorulma kusuru olma özelliği de taşır. Oval boşluk kusurları özellikle, ray üretimi aşamasında ray çeliğinde oluşan aşırı hidrojen kalıntıları sebebiyle ortaya çıkar. Bunun dışında, ray mantarındaki içsel bir kusurdan, yatay bir çatlaktan, ray kaynak işleminde yapılan hatalardan veya istisnai olarak rayın oldukça derin bir iç köşe kabuklanmasından kaynaklanır [29, 30].

Oval boşluk kusurları; raydaki eğilme gerilmeleri, termal gerilmeler ve kalıntı gerilmelerinin birleşik etkisiyle rayın enine düzleminde ilerler. Belli bir süre sonra çatlak, ray mantarının üst yüzeyine ulaşır ve görülebilir hale gelir. Bu aşamada, rayın

kırılma olasılığı oldukça yüksektir. Oval boşluk yorulma çatlağı, kırılma yaşanmadan önce kesin olarak tespit edilemez. Öte yandan, diğer kusurlardan farklı olarak ray mantarı yüzeyinde görülen eğimli bir enine çatlak, genellikle bu tür bir yorulma çatlağının belirtisi olarak algılanır. Bu kusur, görülebilir hale gelmeden önce bir kırılma yaşanırsa, mantarın iç kısmında kusurun yayılma yönünü gösteren pürüzsüz ve parlak bir alan belirir. Çatlak, ray yüzeyine ulaşır ulaşmaz bu alan oksitlenmeye başlar ve görülebilir hale gelir. Ray güvenliği açısından oldukça tehlikeli olan oval boşluk kusurları, aynı rayda tekrarlı olarak meydana gelebilir ve çoklu kırılmalara yol açarak rayda büyük boşluklar oluşmasına neden olabilir. Şekil 3.2'de, raylarda sıklıkla karşılaşılan ray mantarında oval boşluk kusuru görülmektedir [29].



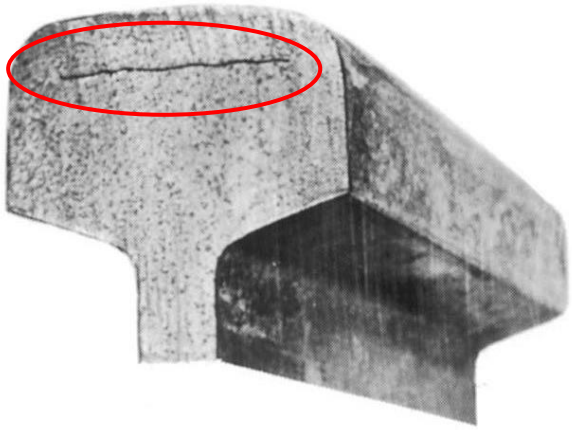
Şekil 3.2 : Ray mantarında oval boşluk kusuru [29].

Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntem ile tespit edilebilen oval boşluk kusurları, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalı; ilerleyen aşamalarda ise kusurlu ray kısmı değiştirilmelidir. Oval boşluk kusurunun yüksekliği 25 mm'den fazla ise ray, 2 hafta içinde veya geçici cebire ile önlem alınırsa 6 hafta içinde kesilmelidir. Kusurun yüksekliği 10 ila 25 mm arasında ise ray, 1 yıl içinde kesilmelidir. Eğer kusurun yüksekliği 10 mm'den daha küçük ise ray, gözlem altında tutulmalıdır [32].

3.1.2 Ray mantarında yatay çatlak

Ray mantarında yatay çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 112 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 212 kodunu alır.

Mantardaki yatay çatlaklar, üretim hatası nedeniyle meydana gelir. Ray üretim aşamasındaki yabancı madde kalıntıları ve segregasyon sonucu mantarda yatay çatlaklar oluşur. Bu kusurlar, ray mantarının üst kısmının kademeli olarak ayrılmasıyla karakterize edilir. Mantar bölgesi içinde herhangi bir noktadan başlayan yatay çatlaklar, ray yuvarlanma yüzeyine paralel olacak şekilde ilerler. Ray mantarında küçük bir çatlak olarak ortaya çıkan bu tür kusurlar, kimi zaman düşey bir çatlak ile beraber görülür veya ray içinde derinlere doğru ilerleyerek enine çatlaklara yol açar. Kusurun ilerleyen aşamalarında, genellikle ray sonlarında ezilme ve yuvarlanma yüzeyinde genişleme görülür. Son aşamada ise rayın bir parçası koparak ayrılır. Eğer mantardaki boşluk 10 mm'den daha derin ve 50 mm'den daha uzun ise raydaki bu ayrışma, "kırılma" olarak nitelendirilir [25, 29]. Şekil 3.3'de, ray mantarında yatay çatlak kusurlarına bir örnek görülmektedir [29].



Şekil 3.3 : Ray mantarında yatay çatlak kusuru [29].

Ray mantarında yatay çatlak kusurları, hat üzerinde görsel muayene veya ultrasonik muayene ile tespit edilebilir. Tespit edilen kusurlar, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalı; ilerleyen aşamalarda ise kusurlu ray kısmı değiştirilmelidir. Yatay çatlak boyunun 20 cm'den uzun olduğu durumlarda, ray 2 hafta içinde veya geçici cebire ile önlem alınırsa 6 hafta içinde kesilmelidir. Çatlak boyu 5 ila 20 cm arasında ise ray 1 yıl içinde kesilmelidir. 5 cm'den daha küçük yatay çatlakların olması durumunda ray, gözlem altında tutulmalıdır. Eğer çatlak boyu 20 cm'den fazlaysa ve yön değiştiriyorsa, ray derhal kesilmelidir [32].

3.1.3 Ray mantarında düşey çatlak

Ray mantarında düşey çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 113 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 213 kodunu alır.

Mantardaki düşey çatlaklar, üretim hatası nedeniyle meydana gelir. Ray üretim aşamasında ortaya çıkan yabancı madde kalıntıları ve segregasyon nedeniyle oluşur. Ray mantarını kademeli olarak iki parçaya ayıran bu tür çatlaklar, ray gövdesine paralel bir düzlem boyunca uzanır. Kusur, yuvarlanma yüzeyine ulaştığında, yüzeyde siyah bir çizgi olarak ortaya çıkar. Bu aşamada, yuvarlanma yüzeyinde yerel çökme ve çatlağın yüzeye açılmasından kaynaklanan ray mantarında genişleme sorunları ortaya çıkar. Mantardaki düşey çatlaklar, kimi durumlarda ray kesitinde derinlere doğru ilerleyerek mantar-gövde birleşim yerine kadar uzanabilir. Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen düşey çatlaklar olması durumunda ray kesiti ivedilikle değiştirilmelidir [25, 29]. Şekil 3.4'de, ray mantarında düşey çatlak kusuru görülmektedir [29].



Şekil 3.4 : Ray mantarında düşey çatlak kusuru [29].

3.1.4 Ray mantarında kısa dalga boylu ondülasyon

Ray mantarında ondülasyonlar; aşınma, yorulma veya ray metalinin plastik akması gibi hasar mekanizmaları sonucu meydana gelir. Ondülasyonlar, genellikle birincil seviyede bir derayman riski teşkil etmemesine rağmen ray ömrünü kısaltır, ray bağlantı elemanlarını gevşetir, balastın bozulmasına sebep olur ve yolcu konforunu düşüren gürültü ve titreşimlerin artmasına yol açar. Ondülasyonlar, kısa dalga boylu ve uzun dalga boylu olmak üzere 2 çeşittir [30].

Ray mantarında kısa dalga boylu ondülasyonlar (UIC ray kusuru kodu 2201), trafik yükleri nedeniyle oluşur. Bu tür kusurlar genellikle, raya 20 tondan daha düşük olan

hafif dingil yüklerinin etkidiği ve yolcu taşımacılığı yapılan hatlarda ortaya çıkar. Kısa dalga boylu ondülasyonların sebebi, tekerleğin ray üzerindeki tekrarlı kayma hareketi sonucu meydana gelen aşınmadır. Bu kusurlar özellikle, demiryolu aracının hızlanma ve frenleme hareketleri ile tekerleğin ray üzerindeki yanal hareketi sebebiyle oluşur. Kısa dalga boylu ondülasyonlar; ray yuvarlanma yüzeyinde birbirini periyodik olarak ardarda takip eden parlak tepeler ve karanlık çukur bölgeler ile karakterize edilir. Bu tür ondülasyonların dalga boyu 3 ila 8 cm arasında değişmektedir; ondülasyonların derinliği ise 0,2-0,3 mm'den daha azdır [23, 29]. Bu tür kusurlar, ray taşlaması ile giderilebilir [33]. Şekil 3.5'de, ray yüzeyindeki kısa dalga boylu ondülasyonlar görülmektedir [29].



Şekil 3.5 : Ray yüzeyinde kısa dalga boylu ondülasyonlar [29].

3.1.5 Ray mantarında uzun dalga boylu ondülasyon

Ray mantarında uzun dalga boylu ondülasyonlar (UIC ray kusuru kodu 2202) , trafik yükleri nedeniyle meydana gelir. Bu tür kusurlar genellikle, raya 20 tondan daha fazla olan ağır dingil yüklerinin etkidiği ve yük taşımacılığı veya karma (yolcu-yük) taşımacılık yapılan hatlarda ortaya çıkar. Uzun dalga boylu ondülasyonlar, aşırı yüksek tekerlek-ray temas gerilmeleri nedeniyle ray metalinin plastik akması sonucu oluşur. Yüksek temas gerilmelerine ve dolayısıyla ray metalinin plastik akmasına sebep olan faktörler:

1. Yüksek tekerlek yükleri,
2. Yüksek tren hızları,

3. Ray kaynakları ve cebireli ray bağlantılarındaki düşük noktalar (dinamik darbe yükleri yaratır),
4. Yüksek hat rijitliği (dinamik yükleri ve darbe yüklerini artırır),
5. Küçük tekerlek yarıçapları (tekerlek-ray temas gerilmelerini artırır),
6. Tekerlek ve ray profillerinin birbirine uymamasıdır.

Uzun dalga boylu ondülasyonlar, ray yuvarlanma yüzeyinde, ideal düz profile göre daha belirgin ve inişli-çıkışlı olan çökmeler ile karakterize edilir. Bu tür ondülasyonlarda, ray yüzeyindeki tepe ve çukur bölgelerin görünüşünde, parlaklık açısından herhangi bir farklılık yoktur. Ondülasyonların dalga boyu, 8 ila 30 cm arasında; derinliği ise 0,1 ila 2 mm arasında değişmektedir. Bu tür kusurlar, ray taşlaması ile giderilebilir [23, 29]. Şekil 3.6'da, ray yüzeyindeki uzun dalga boylu ondülasyonlar görülmektedir [23].



Şekil 3.6 : Ray yüzeyinde uzun dalga boylu ondülasyonlar [23].

3.1.6 Ray mantarında yanal aşınma

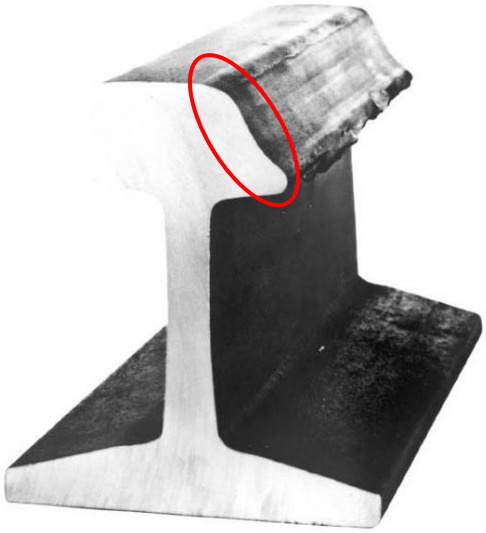
Ray mantarında yanal aşınma (UIC ray kusuru kodu 2203), trafik yükleri nedeniyle meydana gelen raydaki metal kaybıdır. Ray mantarındaki yanal aşınma oranını etkileyen faktörler:

1. Kurba yarıçapı,
2. Rayın metalürjik yapısı,
3. Ray yağlama,
4. Dingil yükü,
5. Trafik yoğunluğu,
6. Tren hızıdır.

Yanal aşınma, özellikle yatay kurbalarda, tekerlek budeninin dış rayın iç köşesine temas etmesi sonucu oluşan yüksek tekerlek-ray temas gerilmeleri nedeniyle ortaya çıkar. Aynı kurba içinde, cebire delikleri çevresindeki yanal aşınma, sinüsoidal bir görünüm alır. Rayda görülen yanal aşınma, aşağıdaki durumlarda ray kusuru oluşumuna neden olur:

1. Yanal aşınma, hat bakımına zarar veren bir seviyeye gelmişse (hat açıklığı değerinde aşırı bir artma olmuşsa),
2. Ray profilinin zayıflaması sonucu ray kırılması riski doğmuşsa.

Rayda görsel muayene veya ray aşınmasını ölçen çeşitli cihazlar vasıtasıyla tespit edilebilen yanal aşınma kusurları, başlangıç aşamasında gözlem altında tutulmalı ve aşınma miktarı sürekli ölçülmelidir. Aşınmanın ileri seviyelerinde ise ray kesiti değiştirilmelidir [25, 29]. Şekil 3.7'de, ray mantarında yanal aşınma kusuru görülmektedir [29].



Şekil 3.7 : Ray mantarında yanal aşınma kusuru [29].

3.1.7 Ray mantarında düşey aşınma

Ray mantarında düşey aşınma (UIC ray kusuru kodu 2204), yanal aşınmaya benzer şekilde trafik yükleri nedeniyle oluşur. Düşey aşınma, genel olarak bir ray kusuru sayılmamakla birlikte, kimi durumlarda rayın ortalama düşey aşınma seviyesini aşan anormal aşınma meydana gelebilir. Bu anormal düşey aşınma, ray profilinde zayıflamaya neden olarak ray kırılmasına yol açabilir. Rayda, görsel muayene veya ray aşınmasını ölçen çeşitli cihazlar vasıtasıyla tespit edilebilen anormal düşey aşınma kusurları bulunması durumunda, kusurlu ray kesiti değiştirilmelidir [29].

3.1.8 Yuvarlanma yüzeyinin kabuklanması

Ray mantarındaki yuvarlanma yüzeyinin kabuklanması (UIC ray kusuru kodu 2221), trafik yükleri nedeniyle ortaya çıkan yorulma kusurlarına bir örnektir. Bu kusurlar, ray yüzeyinin altında başladığı için ray çeliğinin metalürjik yapısı, kusurun başlangıcında önemli rol oynar. Ray üretim aşamasında oluşan oksik kalıntıları ve kalıntı gerilmeleri, kabuklanma kusurlarına neden olur [29, 30]. Ray yüzeyinden birkaç milimetrede aşağıda başlayan kabuklanma kusurları ortaya çıkmadan önce, yuvarlanma yüzeyinin dalgalı bir şekilde deforme olduğu görülür. Zaman içinde, kusur ilerler ve ray yüzeyinden bir parça metal ayrılır. Kabuklanma kusurları, ray yüzeyindeki tekil kusurlardan biri değildir; genellikle birkaç farlı bölgede birden görülür. Rayda, görsel muayene veya ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür kusurların olması durumunda, ray yüzeyi onarılmalı veya ray kesiti değiştirilmelidir. Şekil 3.8'de, ray yuvarlanma yüzeyindeki kabuklanma kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.8 : Ray yuvarlanma yüzeyindeki kabuklanma kusuru [29].

3.1.9 Ray mantarında iç köşe kabuklanması

Ray mantarında iç köşe kabuklanması (UIC ray kusuru kodu 2222), trafik yükleri nedeniyle ortaya çıkan yorulma kusurlarındandır. Ray mantarının iç köşesinde ilk olarak, rastgele aralıklı olarak dağılmış uzun ve karanlık noktalar görülür. Bu noktalar, ray metalindeki ayrışmanın ilk göstergesidir. Kusurun belli bir ilerleme periyodundan sonra, ray yuvarlanma yüzeyinin iç köşesinde önce çatlaklar oluşur, ardından da kabuklanma meydana gelir. Mantarın iç köşesindeki kabuklanmalar, kimi zaman oldukça yoğunlaşır. Bu aşamada trafik yüklerinin de etkisiyle oluşan raydaki metal akması, yuvarlanma yüzeyinde yerel çökmelere sebep olur.

Genel olarak, ray mantarındaki iç köşe kabuklanmaları, yüksek tekerlek-ray temas gerilmelerine maruz kalan yatay kurbaların yüksek kotlu dış rayında yoğun olarak görülür. Rayda, görsel muayene veya ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür kusurlar, başlangıç aşamasında gözlem altında tutulmalıdır. Kusurun ilerleyen aşamalarında ise ray kesiti değiştirilmelidir [29]. Şekil 3.9'da, ray mantarının iç köşesindeki kabuklanma kusurları görülmektedir [23].



Şekil 3.9 : Ray mantarında iç köşe kabuklanması [23].

3.1.10 Ray mantarında kılcal çatlak

Ray mantarında kılcal çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 2223), genellikle yatay kurplarda yüksek tekerlek-ray temas gerilmelerine maruz kalan dış rayların iç köşesinde görülen yorulma kusurlarıdır. Kılcal çatlaklar; tekerlek-ray temas alanındaki kayma gerilmeleri, ray çeliğinin izin verilen limitlerini aştığında ortaya çıkar. Temas alanındaki kayma gerilmelerini ve dolayısıyla kılcal çatlak oluşumunu etkileyen faktörler:

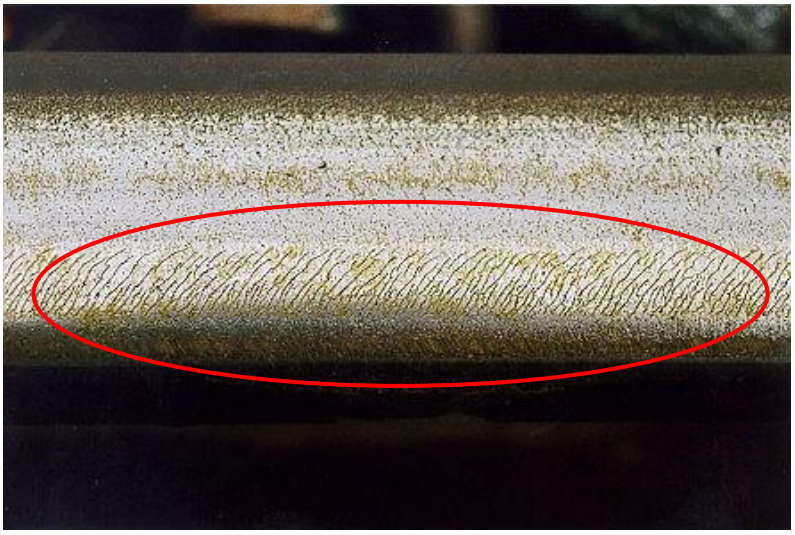
1. Tekerlek yükleri,
2. Hat geometrisi,
3. Aracın boji karakteristikleri,
4. Tekerlek ve raydaki düşey düzensizlikler,
5. Raya verilen dever oranı,
6. Tekerlek yarıçapı,
7. Tekerlek-ray temas alanındaki tekerlek ve rayın yarıçaplarıdır.

Kılcal çatlaklar, rayların iç köşesinde düzenli veya düzensiz aralıklarla, küçük ve birbirine paralel ince çatlaklar olarak görülür. Birbirini takip eden iki kılcal çatlak arasındaki mesafe, yerel koşullara ve ray çeliği sınıfına bağlı olarak 1 mm'den birkaç cm'ye kadar değişebilir. Bu tür kusurlar, ray kaynak bölgelerinde de ortaya çıkabilir. Çünkü kaynaklı ray profilleri, normal ray profillerine göre bazı farklı özellikler

göstermektedir ve bu farklılıklar, tekerlek-ray temas gerilmelerinde önemli etkilere yol açmaktadır. Genel olarak kılcal çatlaklar, 4 ana kategoride incelenir:

1. Hafif seviyede kılcal çatlaklar: en uzun çatlağın boyu 10 mm'den daha küçüktür.
2. Orta seviyede kılcal çatlaklar: en uzun çatlağın boyu 10 mm ila 19 mm arasındadır.
3. Ciddi seviyede kılcal çatlaklar: en uzun çatlağın boyu 20 ila 29 mm arasındadır.
4. Çok ciddi seviyede kılcal çatlaklar: en uzun çatlağın boyu 30 mm'den daha büyüktür.

Ray mantarının iç köşesindeki kılcal çatlaklar, kimi zaman pullanma eşliğinde ortaya çıkar. Ray mantarı içindeki ince çatlaklar, 10° ila 15° arasında değişen bir açıyla ilerleyerek genellikle birkaç mm derinliğindeki maksimum derinliğine ulaşır. Ardından, yuvarlanma yüzeyine paralel olarak ilerler. Ray kesitinde enine yönde ilerleyen kılcal çatlaklar nedeniyle ray kırılmaları meydana gelebilir [23, 25, 29, 30]. Şekil 3.10'da, ray mantarının iç köşesindeki kılcal çatlak kusurları görülmektedir [23].



Şekil 3.10 : Ray mantarının iç köşesinde kılcal çatlak kusurları [23].

Rayda, görsel muayene ve ultrasonik yöntem ile tespit edilebilen bu yorulma kusurları, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalı ve ray taşlama ile giderilmeye çalışılmalıdır. Tespit edilen kılcal çatlak yüksekliği, ray merkezinde 5 mm'den veya ray kenarında 20 mm'den fazla ise ray 2 hafta içinde kesilmeli veya

geçici cebire ile önlem alınırsa 6 hafta içinde kesilmelidir. Kusur yüksekliği, ray kenarında 5 ila 20 mm arasında ise ray 1 yıl içinde kesilmelidir. 5 mm'den daha küçük kusurların olması durumunda ray, gözlem altında tutulmalıdır [32].

3.1.11 Ray mantarında tekerlek yanığı

Ray mantarındaki tekerlek yanığı kusurları, ray yüzeyinde tekil olarak görülmesi halinde UIC 2251 kodunu, tekrarlı olarak görülmesi halinde ise UIC 2252 kodunu alır. UIC 2251 kodlu tekil tekerlek yanığı kusurları, trafik yükleri nedeniyle oraya çıkar. Hareket halindeki tekerleğin, ray üzerinde kayması sonucu ray yüzeyinde eliptik şekilli bir tabaka oluşur. Bu tabaka, ray mantarında yatay veya enine yönde gelişebilir. Tabakanın yatay yönde ilerlemesi sonucu bozulma, yerel kabuklanma kusuruna döner. Bu durumda, tekrarlı trafik yükleri altında kusur, derinlere doğru ilerlemez fakat ray yuvarlanma yüzeyinde çökme meydana gelir.

Tabakanın, ray mantarında enine yönde ilerlemesi ise ray gövdesine karşı gelişen iç kusurların oluşmasına neden olur. Bu tür iç kusurlar nedeniyle yuvarlanma yüzeyinde çökme meydana gelir. Belli bir müddet sonra, iç kusurlar ray yüzeyine ulaşır ve ray kırılmasına yol açabilir.

Rayda, görsel muayene ile tespit edilebilen tekil tekerlek yanığı kusurları bulunması durumunda, enine yönde çatlak içermeyen kusurlar sürekli gözlem altında tutulmalıdır. Başlangıç aşamasındaki tekerlek yanığı kusurları, ray taşlama ile giderilmelidir. Enine yönde çatlak içeren kusurlar için ise geçici cebire ile önlem alınmalı ve kusurlu ray kesiti değiştirilmelidir.

UIC 2252 kodlu tekrarlı tekerlek yanığı kusurları, trafik yükleri nedeniyle meydana gelir. Demiryolu aracının harekete başladığı, frenlediği veya tekerlek kaymasının tekrarlı olarak meydana geldiği hat kesimlerinde, yuvarlanma yüzeyi dalgalı bir görünüm alır. Tekrarlı tekerlek yanığı kusurları, yuvarlanma yüzeyinde bir dizi küçük çatlakların ortaya çıkmasıyla karakterize edilir. Bu çatlaklar, ray kesitinde derinlere doğru inebilir ve özellikle soğuk havalarda rayın gevrekliğini artırarak ray kırılmasına neden olabilir. Tekrarlı tekerlek yanığı kusurları, demiryolu araçlarının frenlediği ve harekete geçtiği istasyon bölgelerinde yoğun olarak görülür. Şekil 3.11'de, ray yüzeyinde tekrarlı tekerlek yanığı kusuru görülmektedir [29].



Şekil 3.11 : Ray yüzeyinde tekrarlı tekerlek yanığı kusuru [29].

Bu tür kusurlar, tekil tekerlek yanığı kusurlarında olduğu gibi görsel muayene ile tespit edilir. Ray yüzeyi, dalgalı bir görünüme sahip olan raylar sürekli gözlem altında tutulmalıdır. Hafif dereceli tekerlek yanıkları ray taşlama ile giderilmelidir. Tekerlek yanığı kusurları, ray yüzeyinin iç köşesine doğru uzayan raylar ise değiştirilmelidir [29].

3.1.12 Ray mantarı yüzeyinde çökme

Ray mantarındaki çökme kusurları (UIC ray kusuru kodu 227), ray yüzeyi başlangıçlı yorulma kusurlarındandır. Bir çökme kusuru, öncü çatlak ve artçıl çatlak olmak üzere 2 ayrı çatlaktan oluşur. Öncü çatlak, trafik yönünde ilerlerken artçıl çatlak, ters yönde ve öncü çatlaktan daha hızlı ilerler. Bu kusurlar, tekerlek-ray temas şeridinin genişlemesi ve yerel çökmesi ile ray yuvarlanma yüzeyinde görülebilir hale gelir. Çökme kusurları genellikle, dairesel yay şeklinde çatlaklar içeren karanlık noktalar ile beraber görülür. Çatlak, ilk aşamada ray mantarı içinde sığ bir açıyla ilerler. 3 ila 5 mm arasında bir derinliğe ulaştıktan sonra ray kesitinde enine yönde ilerleyerek derinlere iner ve ray kırılmasına sebep olabilir. Ray yüzeyindeki çökme kusurları, çoğunlukla alüminotermit kaynaklarda ve yakma alın kaynaklarında görülür. Bunun yanında, ondülasyonlu bölgelerde de ortaya çıkabilir. Bu tür kusurlar, ray yüzeyinde çok sayıda ve rastgele dağılmış olarak bulunur. Bu durum, rayda önemli boşluklar yaratan birden fazla ray kırılmasına yol açabileceği için oldukça tehlikelidir.

Çökme kusurları; genellikle aliymanda ray yüzeyinin orta kısmında ve orta dereceli yatay kurplarda (800-1600 m yarıçaplı) dış rayın iç köşesinde, UIC 2223 kodlu kılcal çatlak kusurları ile birlikte görülür [29, 30]. Bu nedenle çökme kusurları, yuvarlanma yüzeyi çökmesi ve iç köşe çökmesi olarak 2 kategoride incelenir. Yuvarlanma yüzeyi çökmesi, genellikle aliymanda meydana gelir ve bazı tekerlek kayması türleriyle ilgili olan termal çekim gücü etkileriyle başlar. İç köşe çökmeleri ise yatay kurbalarda, yüksek tekerlek-ray temas gerilmelerine maruz kalan dış rayların iç köşesinde ve makaslarda ortaya çıkar. Şekil 3.12'de, ray yüzeyindeki çökme kusurları görülmektedir [23].



Şekil 3.12 : Ray yüzeyinde çökme kusuru [23].

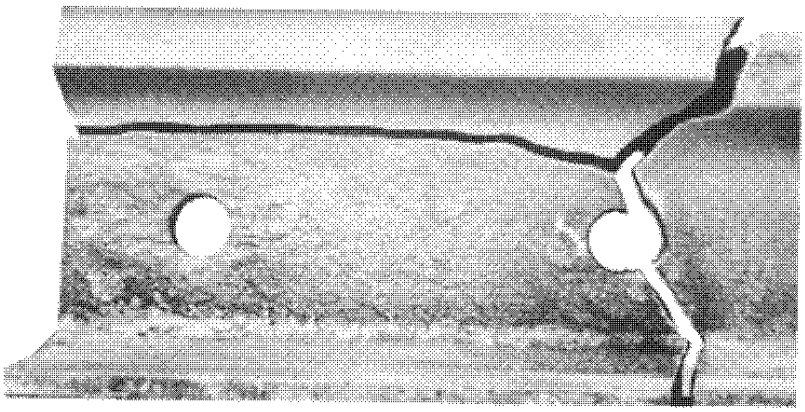
Rayda, görsel muayene veya ultrasonik yöntem ile tespit edilebilen çökme kusurları, başlangıç aşamasında sürekli gözlem altında tutulmalıdır. İleri aşamalarda ise ray güvenliğini tehdit eden kusurlu ray kesiti değiştirilmelidir [29].

3.1.13 Ray mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak

Rayın mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 1321 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 2321 kodunu alır. Bu tür kusurlar, genellikle üretim hatasından kaynaklanır ve ray mantarını gövdeden ayırma eğiliminde çalışır. Başlangıç aşamasında, mantar-gövde birleşim şeridine paralel yönde ilerleyen bu çatlaklar, ilerleyen zamanlarda ray mantarına doğru yukarı yönde veya ray tabanına doğru aşağı yönde bir eğri şeklinde gelişir. Kimi durumlarda ise her iki yönde eşzamanlı olarak ilerleyebilir. Çatlağın en son aşamasında ise ray mantarı, gövdeden ayrılır ve rayda parçalanma meydana gelir [29].

Rayın mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlaklar, kimi durumlarda karayolu-demiryolu hemzemin geçitlerinde ortaya çıkar. Hemzemin geçitlerde, asfalt esaslı dolgu malzemelerinden kaynaklanan asidik etkiler, ray mantarının gövdeyle birleştiği yerde bir korozyon yorulma kusuru başlamasına neden olur. Ardından, hemzemin geçit bölgesindeki çakıllar, yatay kurbalarda aşırı hız veya dış raya verilen uygun olmayan dever nedeniyle ray mantarı ekzantirik olarak yüklenir ve bu kusur ilerler [9].

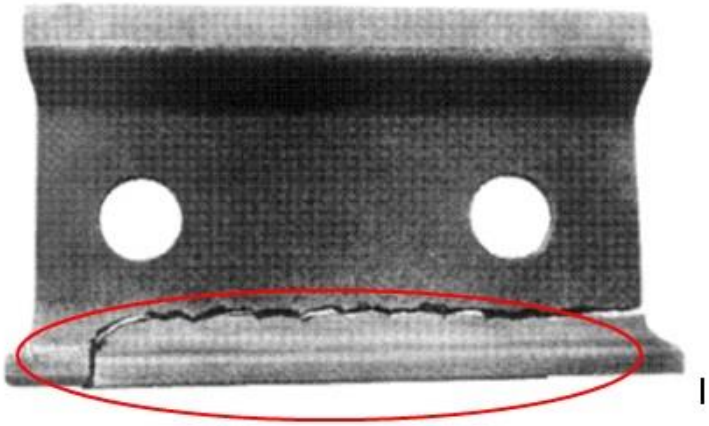
Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür çatlakların olması durumunda, kusurlu ray kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.13'de, rayın mantar-gövde birleşim yerinde başlayıp ray mantarına ve tabanına doğru ilerleyen yatay çatlak kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.13 : Ray mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlak kusuru [29].

3.1.14 Ray gövde-taban birleşim yerinde yatay çatlak

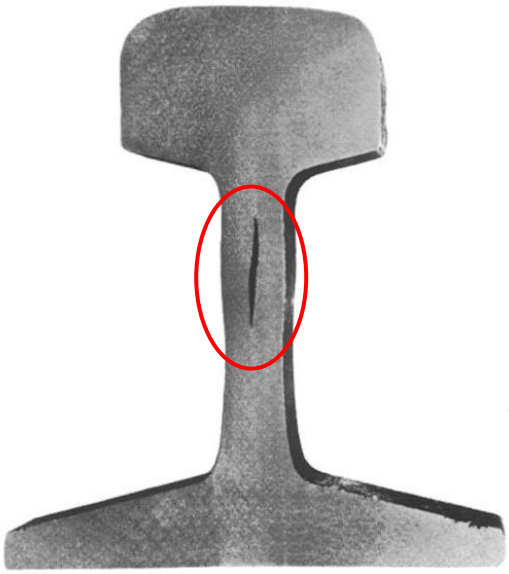
Rayın gövde-taban birleşim yerindeki yatay çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 1322 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 2322 kodunu alır. Rayın gövde-taban birleşim yerindeki yatay çatlaklar, genellikle üretim hatasından kaynaklanır ve ray tabanını gövdeden ayırma eğiliminde çalışır. Başlangıç aşamasında, gövde-taban birleşim şeridine paralel yönde ilerleyen bu tür çatlaklar, ileri aşamalarda genellikle aşağı yönde bir eğri şeklinde gelişerek ray tabanının gövdeden kopmasına neden olur. Kimi durumlarda ise cebire deliklerinin çevresinden geçerek yukarı yönde bir eğri şeklinde gelişen bu çatlaklar, rayda parçalanmaya sebep olur. Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür çatlakların olması durumunda, kusurlu ray kesiti değiştirilmelidir. Şekil 3.14'de, rayın gövde-taban birleşim yerindeki yatay çatlak kusuru görülmektedir [29].



Şekil 3.14 : Ray gövde-taban birleşim yerinde yatay çatlak kusuru [29].

3.1.15 Ray gövdesinde düşey çatlak

Ray gövdesindeki düşey çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 133 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 233 kodunu alır. Ray gövdesindeki düşey çatlaklar, üretim hatası nedeniyle meydana gelir. Bu tür kusurlar, ray üretimi aşamasında, ray gövdesinde oluşan büzülme boşluklarından kaynaklanır ve ray gövdesinde boyuna yönde ilerleyen düşey çatlaklar ile karakterize edilir. Gövdedeki düşey çatlaklar, rayda başka bir kusur ile birlikte görülüp görülmemesinden bağımsız olarak ray kırılmasına neden olur. Bazı istisnai durumlarda, ray gövdesinin her iki yüzünde şişme ve kusurun üst hizasındaki yuvarlanma yüzeyinde hafif bir çökme görülür [9, 29]. Şekil 3.15'de, ray gövdesindeki düşey çatlak kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.15 : Ray gövdesinde düşey çatlak kusuru [29].

Rayda, görsel muayene veya ultrasonik yöntem ile tespit edilebilen bu tür kusurlar, başlangıç aşamasında sürekli gözlem altında tutulmalıdır. İleri aşamalarda ise ray güvenliğini tehdit eden kusurlu ray kesiti değiştirilmelidir [29].

3.1.16 Ray gövdesinde ve tabanında korozyon

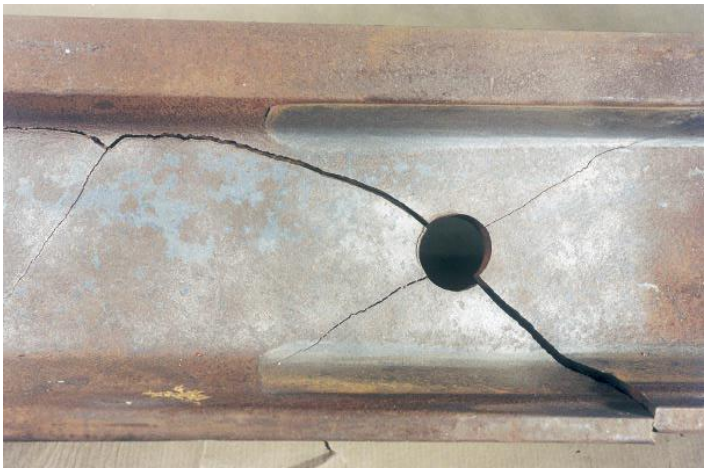
Ray gövdesindeki korozyon kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 134 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 234 kodunu alır. Ray tabanındaki korozyon kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 154 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 254 kodunu alır. Gövde ve tabandaki bu tür kusurlar, trafik yükleri nedeniyle meydana gelir. Tüneller ve karayolu-demiryolu hemzemin geçitleri gibi bazı özel hat kesimlerinde, hava ve sudaki kimyasal maddeler, korozyon oluşumunu tetikler. Ayrıca, doğada elektrokimyasal olarak meydana gelebilir. Zaman içinde, korozyon nedeniyle ray gövdesi veya tabanından ayrılan pas parçaları, gövde ve taban kalınlığının sürekli olarak düşmesine yol açar. Son aşamada ise ray kesitindeki azalmaya bağlı olarak gövde veya tabanda kırılma meydana gelir. Kimi durumlarda kırılma, ray tabanının alt yüzündeki küçük bir korozyon çatlağından kaynaklanır. Bu tür kırılmalar, ani olarak meydana gelir. Şekil 3.16'da, ray tabanındaki korozyon kusurları görülmektedir. Rayda, görsel muayene ile tespit edilebilen korozyon kusurları ile karşılaşılması durumunda, ray kesiti ivedilikle değiştirilmelidir [29].



Şekil 3.16 : Ray tabanında korozyon kusuru [29].

3.1.17 Ray gövdesinde çapraz çatlak

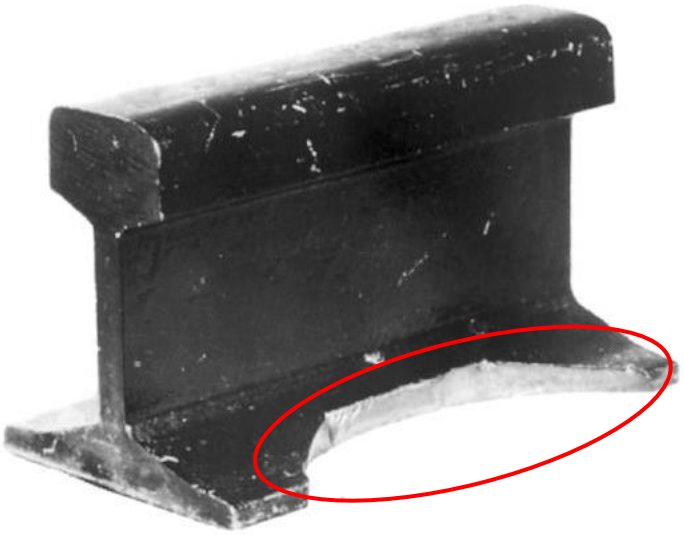
Ray gövdesinde, cebire delikleri çevresinde görülen çapraz (yıldız şeklindeki) çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 135), trafik yükleri nedeniyle oluşur. Bu tür çatlaklar, cebire delikleri çevresinden 45°'lik açı ile başlayarak diyagonal şekilde ilerler ve rayda kırılmaya neden olur. Bu kusurların meydana gelme olasılığı, büyük oranda cebire deliklerinin açılma kalitesine bağlıdır. Özel tekniklerle açılan düzgün bir delik yüzeyi, kusur riskini azaltmaktadır. Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen düşey çatlaklar olması durumunda, ray kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.17'de, ray gövdesinde, cebire delikleri çevresinde ortaya çıkan çapraz çatlaklar görülmektedir [29].



Şekil 3.17 : Ray gövdesinde çapraz çatlak kusuru [29].

3.1.18 Ray tabanında düşey çatlak

Ray tabanındaki düşey çatlak kusurları, ray sonlarında görülmesi halinde UIC 153 kodunu, ray sonları dışındaki bölgelerde görülmesi halinde ise UIC 253 kodunu alır. Tabandaki düşey çatlaklar, üretim hatası nedeniyle meydana gelir. Ray üretiminin haddeleme aşamasında oluşan ve ray tabanının alt kısmının orta bölgesinde küçük çizgiler halinde bulunan bu kusurlar, zaman içinde trafik yükleri altında düşey çatlaklara dönüşür. Bu çatlaklar son aşamada, özellikle soğuk havalarda rayın ani kırılmasına yol açar. Boyuna düşey çatlaklar, aynı rayın birkaç farklı bölümünde görülebilir ve çoklu kırılmaya bağlı olarak rayda büyük bir boşluk oluşturabilir. Bu tür çatlakların bir başka özelliği ise aynı dökümden üretilmiş raylarda adeta bir salgın halini almasıdır. Rayda, görsel muayene ile tespit edilebilen düşey çatlaklar ile karşılaşılması durumunda, kusurlu ray kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.18'de, ray tabanında düşey çatlak nedeniyle oluşan kırılma görülmektedir [29].



Şekil 3.18 : Ray tabanında düşey çatlak nedeniyle oluşan kırık [29].

3.2 Ray Kaynağı Kusurları

Ray uçlarının birbirine birleştirildiği ray kaynakları, demiryolu hattı üzerinde ray kusurlarının yoğun olarak görüldüğü bölgelerin başında gelmektedir. Kaynak merkezinin her iki tarafından 10 cm uzaklığa kadar uzanan alan "kaynak bölgesi" olarak adlandırılır. Bu bölgede meydana gelen herhangi bir kusur ise "kaynak kusuru" olarak nitelendirilir. Ray kaynağı kusurları, ray uçlarının birbirine birleştirildiği alüminotermit ray kaynaklarında, yakma alın kaynaklarında ve elektrik ark kaynaklarında görülen kusurları kapsar. Kaynak yapımı sırasında ortaya çıkan yetersiz ergime, gözeneklilik, yabancı madde kalıntıları ve malzemenin mekanik özelliklerinin heterojen dağılımı gibi kaynak kusurları, zaman içinde yorulma etkisiyle ilerler ve ray kırılmasına sebep olabilir.

3.2.1 Alüminotermit ray kaynağı kusurları

Termit denilen malzemenin, ateşe dayanıklı potalar içerisinde eritilerek iki ray arasında bırakılan kaynak aralığına akıtılması ve katılaştırılması suretiyle yapılan kaynağa "alüminotermit ray kaynağı" denir. Termit malzemesi, demir oksit (Fe_2O_3) ve alüminyum (Al) karışımından oluşmaktadır. Aluminotermit reaksiyonlar ise yüksek sıcaklıkta metal oksitler ile alüminyum metali arasında oluşan ekzotermik reaksiyonlardır. Termite 1300°C'lik bir ısı tatbik edildiğinde, Bağıntı (3.1)'deki alüminotermit reaksiyon oluşur:

$$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Fe + Al_2O_3 + 850\ kJ \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu reaksiyon sırasında demir oksit-alüminyum karışımı, sıcaklığı 2500°C civarında olan bir eriyik haline gelir. 15 ila 30 saniye süren reaksiyon sırasında, demir metali (Fe) ağır olduğu için alta çöker ve alüminyum oksit (Al_2O_3) yani cüruf hafif olduğu için potanın üst kısmında toplanır. Potanın alt kısmından açılan delikten bir kalıbın içine akıtılan eriyik, kalıp içinde bulunan ray uçlarını da eriterek birleştirir ve kalıbın şeklini alır. Son olarak, fazlalıklar sıyrıldığında düzgün kaynaklanmış bir ray profili elde edilir.

Alüminotermit ray kaynağı yapım aşamaları, sırasıyla aşağıdaki maddeleri içerir:

1. Contaların hazırlanması,
2. Kaynak aralığının ayarlanması,
3. Mastarlama,
4. Kalıpların bağlanması,
5. Potanın hazırlanması,
6. Ön tavlama,
7. Döküm,
8. Kalıbın alınması,
9. Kaynak fazlalığının sıyrılması,
10. Ön taşlama,
11. İnce taşlama,
12. Temizleme.

Alüminotermit kaynaklar, kusurların yoğun olarak görüldüğü ray kaynak türlerinden biridir. Bu kaynaklardaki hatalar, kaynak yapım prosedüründe yer alan aşamalarda yapılan hatalar ve kaynak yapımı sırasında yapılan hataların kaynakta meydana getirdiği kusurlar olarak 2 ana bölümde incelenebilir. Kaynak yapımı aşamasında yapılan hatalar: conta ayar hataları, kalıp bağlama hataları, ön ısıtma hataları, döküm hataları, sıyırma hataları, taşlama hataları ve diğer hatalardır.

Conta ayar hataları şunlardır:

1. Yüksek veya düşük kaynak,
2. Yanal veya düşey eksen kaçıklıkları,

3. Kaynak aralığının az ya da fazla bırakılması (toleranslara uyulmaması),
4. Ayar kamalarının sağlıksız tespiti,
5. Rayların delik, çatlak, eziklik kontrolü yapılmadan ve ray başlarını bu kusurlardan arındırmadan conta ayarının yapılması,
6. Ray başlarının dik eksende kesilmemesi,
7. Contanın mantar ve tabanının her iki yanında eşit boşluk bırakılmaması,
8. Kesme işleminde ray kesme makinesi yerine şaloma kullanılması,
9. Contanın yağ, kir ve pastan arındırılmaması.

Kalıp bağlama hataları, aşağıdaki hatalardan ötürü meydana gelir:

1. Pota ayağının sağlam bağlanmaması,
2. Şalomanın alınması sırasında kalıbın bozulması-kırılması,
3. Kalıpların kaynak boşluğunu ortalamaması,
4. Kalıp mengenesinin kalıbı ortalamaması ve mengenenin fazla sıkılması,
5. Kalıp bağlanırken kalıp iç kısmına kum vb. yabancı madde girmesi, kalıp içinin temizlenmemesi,
6. Cüruf tablası ile kalıp arasında boşluk bırakılması.

Ön ısıtma hataları, aşağıdaki hatalardan ötürü meydana gelir:

1. Uygun olmayan brülörle tavlama yapılması,
2. Alev boyu ve gaz basınçlarının iyi ayarlanmaması,
3. Tavlama süresine uyulmaması,
4. Şaloma yüksekliğinin uygun olmaması,
5. Ön ısıtmanın fazla veya az yapılması.

Döküm hataları, aşağıdaki hatalardan ötürü meydana gelir:

1. Soğuk pota ile döküm yapılması,
2. Potanın kalıbı ortalamaması,
3. Pota yüksekliğinin fazla olması,
4. Otomatik baganın erken veya geç açılması,

5. Eksik termit porsiyonu kullanılması,
6. Nemlenmiş termitlerin kurutularak kullanılması,
7. Kalıba uygun olmayan termit kullanılması.

Sıyırma hataları, aşağıdaki hatalardan ötürü meydana gelir:

1. Sıyırma bıçaklarının ağzının bozuk olması,
2. Kaynak çok sıcakken sıyırma yapılması,
3. Sıyırma bıçağının veya saplı keskinin derine dalması,
4. Sıyırma bıçaklarının kullanılan raya uygun olmaması,
5. Fazla malzeme bırakarak sıyırma yapılması.

Taşlama hataları, aşağıdaki hatalardan ötürü meydana gelir:

1. Uygun olmayan ekipman ile taşlama yapılması,
2. Kaynak sıcakken ince taşlama yapılması,
3. Taşın bir noktada sabit tutularak taşlanması,
4. Taşlama sırasında mastar kullanılmaması.

Kaynak yapımı sırasında yapılan diğer hatalar ise şunlardır:

1. Yağışlı havalarda yeterli önlem alınmadan kaynak yapılması,
2. Sıcaklıktaki ani değişiklikler nedeniyle kaynak bölgesinde çekme gerilmesinin oluşması,
3. Rayı çeken ve tutan ekipmanların, kaynak soğumadan alınması,
4. Kaynak soğumadan üzerinden tren geçirilmesi.

Alüminotermit kaynak yapımı sırasında yapılan hatalar, bu şekilde listelendikten sonra bu hataların kaynakta meydana getirdiği kusurlar incelenebilir. Kaynak yapımı sırasında yapılan hataların, kaynakta yol açtığı kusurlar:

1. Soğuk kaynaklar,
2. Metal yetersizliği,
3. Kaynak metaline cüruf ve kum karışması,
4. Profil bozulmaları,

5. Gözenekli kaynak,
6. Yetersiz nüfuziyet,
7. Ray gövdesinde çatlaklardır.

Soğuk kaynak kusurları; tav yetersizliği, kaynak aralığının az bırakılması, kalıbın kaynak aralığını ortalamaması, rayların dik olarak kesilmemesi, ray başlarının düzgün olmaması ve otomatik baganın geç açılması nedeniyle meydana gelir.

Metal yetersizliği; kaynak aralığının toleranslar haricinde fazla bırakılması, kalıp-termit porsiyonu – ray uyuşmazlığı, ergimiş metalin boşa akması ve kaynak metali katılaşmadan sıyırma yapılması sebebiyle oluşur.

Kaynak metaline cüruf veya kum karışması; otomatik baganın erken açılması, kalıp kapağının yerine konmaması veya iyi kapatılmaması, potanın iyi ayarlanmaması, az kaynak porsiyonu kullanılması, kalıp mengenesinin fazla sıkılması ve farklı kesitlerde ray kullanılması nedeniyle meydana gelir.

Profil bozulmaları; conta ayarının iyi yapılmaması, kaynak soğumadan tren geçirilmesi, ayar kamalarının kaynak soğumadan yerinden çıkarılmaları, sıyırma bıçaklarının derine daldırılması ve kaynak sıcakken ince taşlama yapılması sebebiyle oluşur.

Gözenekli kaynaklar; kalıbın iyi kurutulmaması, potanın veya kalıp tapasının yetersiz kurutulması, kalıp tapasının iyi yerleştirilmemesi ve kullanılan termitin ıslak olması veya kurutularak kullanılması nedeniyle meydana gelir.

Yetersiz nüfuziyet; yanlış kalıp hizası, porsiyonun soğuk veya geç dökülmesi, yetersiz ön ısıtma, yanlış şaloma kullanılması, yanlış ön ısıtma gaz basıncı, yanlış kaynak boşluğu, yanlış porsiyon seçimi ve yanlış kalıp kullanılması nedeniyle meydana gelir.

Ray gövdesinde çatlamalar; kaynak öncesi raylardaki delikli kısımların kesilmemesi, ray kesilmesi gerektiğinde şaloma kullanılması ve düzgün kesim yapılmaması, kaynak sırasında ani soğumalar sebebiyle oluşur [34, 35].

Alüminotermit ray kaynaklarında görülen kusurlar, UIC'nin "Ray Kusurları" adlı bülteninde, kaynak gövdesinde yatay çatlaklar ve kaynak kesitinde enine çatlaklar olarak 2 bölümde incelenmektedir.

3.2.2 Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak

Alüminotermit kaynak gövdesindeki yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 422), genellikle kaynaktan önce ray uçlarında kesme işlemi yapılmayan durumlarda ortaya çıkar. Cebire deliklerinden başlayarak kaynak gövdesini geçen yatay çatlaklar, bitişikteki rayın taban veya mantar bölgesine doğru uzanır ve kırılmaya neden olur. Öte yandan, cebire deliklerinin olmadığı raylarda bu tür kusurlar daha az görülür. Ray tabanındaki küçük bir çatlaktan başlayan bu kusurlar, kaynak gövdesi boyunca yatay doğrultuda ilerler. Ardından düşey doğrultuda ilerleyerek ray mantarına veya tabanına ulaşır ve kırılmaya neden olur. Ray kaynağında, görsel muayene veya ultrasonik yöntemle tespit edilebilen alüminotermit kaynak kusurları olması durumunda, kusurlu kaynak ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.19'da, alüminotermit ray kaynağı gövdesindeki yatay çatlak kusuru görülmektedir [29].



Şekil 3.19 : Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak [29].

3.2.3 Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak

Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 421), kaynak işlemi sırasında oluşan gözenekli yapılar, cüruf gibi yabancı madde kalıntıları ve hizalama hataları nedeniyle meydana gelir. Bu tür kusurlar, ray profili enkesitine yakın bir düzlem boyunca ilerler [29, 30]. Bu kusurlar;

1. Kaynak tabanının altından başlayıp bitişiğindeki raya, enine düzlem boyunca ilerleyen çatlaklar,
2. Kaynağın düşey düzleminde ilerleyen çatlaklar,

3. Kaynağın yakınındaki düşey bir düzlemde başlayıp ilerleyen çatlaklar olarak görülür.

Ray kaynağında görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu kusurlar, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalıdır. İlerleyen aşamalarda ise geçici cebire ile önlem alınmalı ve kusurlu kaynak kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.20'de, alüminotermit kaynak kesitindeki enine çatlaklar görülmektedir [29].



Şekil 3.20 : Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak [29].

3.2.4 Yakma alın kaynağı kusurları

Yakma alın kaynağı, bir direnç basınç kaynak yöntemidir. Kaynak yapılacak rayların ağız kısımları, düzgünce tıraşlanarak erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Daha sonra, belirli bir basınçla birbirine alın alına yapıştırılır. Kaynak basıncı, sıcaklık ve zaman; malzemenin kendi kimyasal ve fiziksel özelliklerini bozmayacak şekilde ayarlanır. Bunun için gerekli kaynak ısısı, elektrik akımının aktığı kontak noktasının direnci ve yüzeyler arasındaki ark ile sağlanır. Uygulanan eksenel basınç ile erimiş metal ve oksitler dışarı sürülerek ana metal bir miktar yığmaya uğratılır. Yakma alın kaynağı; elektrik ark sistemi ile ray başları eritilip, iki ray birleştirilerek yapıldığı için kaynakta hiçbir ilave madde (elektrot, eritici madde, koruyucu gaz vb.) kullanılmamaktadır.

Yakma alın kaynağı, atölyelerde sabit yakma alın kaynağı makineleriyle ve sahada mobil yakma alın kaynak makineleriyle yapılır. Atölyelerde, sabit alın kaynağı

makineleri ile raylar belirli uzunluğa kadar (168 veya 180 m gibi) kaynaklanır. Kaynaklanan raylar, özel taşıma vagonları ile kullanım yerlerine sevk edilir. Mobil yakma alın kaynak makineleri ile sahada yapılan kaynak işleminin uygulama ve gereksinimleri de atölyedeki kaynak yapımına benzer şekilde olur [36]. Yakma alın kaynağı uygulama aşamaları aşağıdaki gibidir:

1. Hizalama,
2. Yakma,
3. Ön ısıtma,
4. Yanma,
5. Şişirme,
6. Soğutma.

Yakma alın kaynaklarında, kaynak bölgesindeki kalıntı gerilimlerinin varlığı ve malzemenin mekanik özelliklerinin heterojen dağılımı nedeniyle kusurlar meydana gelir. Kaynak tamamlandıktan sonra, kaynağın mantar ve taban bölgesinde basınç kalıntı gerilimleri, gövde bölgesinde ise çekme kalıntı gerilimleri ortaya çıkar. Yakma alın kaynaklarında yoğun olarak görülen kusurlar:

1. Mikro gözenekli yapı,
2. Oksidasyon oluşumu,
3. Kaynak bölgesindeki gevrek yapıdır.

Mikro gözenekli yapı, genellikle ön ısıtma prosedürüne bağlı olarak ortaya çıkan bir kusurdur. Bu tür kusurlar, ray çok yüksek sıcaklıklarda ön ısıtmaya tabi tutulduğunda oluşur. Bu kusurlar meydana geldiğinde, kaynağın iki tarafındaki ısıdan etkilenmiş bölgede bulunur. Mikro gözenekli yapıdan, kontrollü ön ısıtma ile sakınılabilir. Tüm kesit alanı boyunca, ön ısıtmanın üniform olmasına ve ray içine uygulanan sıcaklık artırımının (dereceli olarak) bağlantı yüzeyindeki her noktada aynı olmasına dikkat ederek yüksek güçte ön ısıtma, kısa bir süre için yapılmalıdır.

Bağlantı yüzeylerinde oksidasyon oluşumu, genellikle yakma işlemi sırasında ortaya çıkar. Bu tür oksit birikintileri, ray kaynaklarına uygulanan statik eğilme ve darbeli yorulma testlerinde istenmeyen sonuçlara neden olur veya doğrultmada kırılmaya yol açar. Bu tür zararlı oksitlerin belirli seviyeler altında tutulabilmesi için yakma

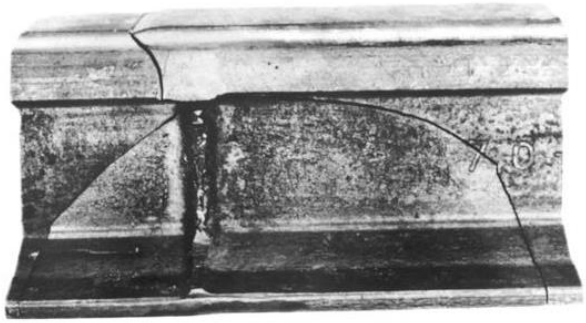
işlemine, baştan sona kadar yavaş yavaş artan şekilde devam edilerek metal yüzeyinin oksijenden korunması sağlanmalıdır.

Kaynak bölgesindeki gevrek yapı, kaynak işlemindeki yetersiz şişirme nedeniyle meydana gelir. Eğer bağlantı yetersiz şişirilmişse, ergimiş metal boşluklar içinde birikimini muhafaza edebilir. Şekillendirmeden (katılaştıktan) sonra kendine özgü karakteristik döküm yapısı ile bu bölge kaynak bölgesi olarak adlandırılır. Bu döküm yapısı nedeniyle kaynak bölgesi sıcak haddelenmiş ray çeliğinden çok daha fazla gevrektir (kırılgandır) ve bu gevrekliğe eklenen sementit tortuları ihtiva eder. Kaynak bölgesindeki gevrek yapı, yüksek şişirme basıncı ile önlenebilir. Ayrıca, yavaş yavaş artan şekilde yapılan yakma, yakma sonucunda oluşan kraterlerin miktarını azaltarak buna yardımcı olur. Yüksek şişirme basıncı aynı zamanda, diğer hataların önlenmesine yardım eder. Basınç, mikro-gözenekli yapı oluşumunu önlemek ve kaynak metalinde oluşan oksitlerin zararını azaltmak için yeterli derecede yüksek olmalıdır [37].

Yakma alın kaynaklarında görülen kusurlar, UIC'nin "Ray Kusurları" adlı bülteninde, kaynak gövdesinde yatay çatlaklar ve kaynak kesitinde enine çatlaklar olarak 2 bölümde incelenmektedir.

3.2.5 Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

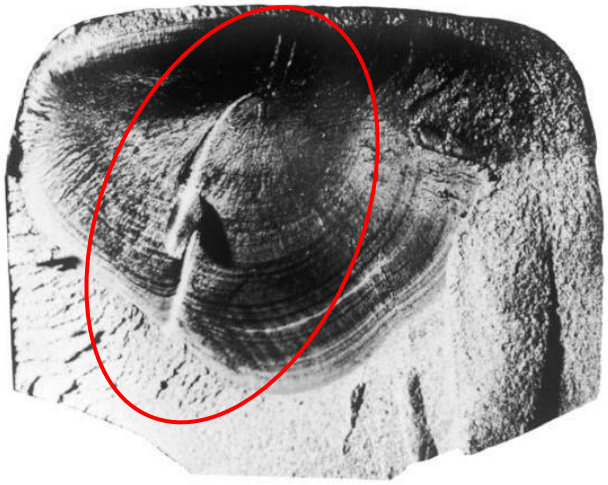
Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 412), kaynağın gövde kısmında bir eğri şeklinde gelişir ve bitişikteki raylarda yukarı veya aşağı yönde ilerleyerek kırılmaya neden olur. Kimi durumlarda, bu tür yatay çatlaklar, hem aşağı hem yukarı yönde gelişebilir. Ray kaynağında görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür kusurların olması durumunda, kusurlu kaynak kesiti ivedilikle değiştirilmeli ve yeni kaynak yapılmalıdır. Şekil 3.21'de, yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.21 : Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak [29].

3.2.6 Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak

Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 411), rayın mantar veya taban kısmında başlayıp enine yönde devam eden çatlaklar olarak görülür. Bu tür kusurlar, kaynak kesitinin mantar veya taban kısmında bulunan içsel bir kusurdan başlayarak ilerler ve kırılmaya yol açar. Kırılmanın yapısı, mantar kısmında düzgün ve parlak bir nokta veya taban kısmında karanlık bir nokta ile karakterize edilir. Ray kaynağında görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu kusurlar, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalıdır. İlerleyen aşamalarda ise geçici cebire ile önlem alınmalı ve kusurlu kaynak kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.22'de, yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.22 : Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak [29].

3.2.7 Elektrik ark kaynağı kusurları

Yakma alın kaynağı ve alüminotermit kaynağın yapılamadığı yerlerde, rayları birleştirmek için elektrik ark kaynağı metodu uygulanır. Rayda büyük oranda karbon bulunduğu için, ark kaynağı için özel bir ısıl işlem uygulanır. Kaynak başlamadan önce, contanın her iki tarafından en az 10 cm'lik kısımda bütün ray kesiti ısıtılır. Ray kesiti, 680 MPa çekme dayanımlı raylar için 300°C ve 880 MPa çekme dayanımlı raylar için 400°C'ye kadar ısıtılır. Bütün kaynak işlemi süresince, sıcaklığın bu değerlerin altına düşmesine izin verilmez. Aksi takdirde, dolgu malzemesinin ana malzemeye yapışması yeterli olmayabilir. Kaynaktan sonra, kaynağın her 2 tarafından 1 m'lik kısım yaklaşık 100°C'ye kadar ısıtılır.

Conta kaynak elektrotu, çatlamaları önlemek için yüksek uzama katsayısı, yüksek darbe dayanımı ve düşük sertleşme noktası özelliklerine sahip olmalıdır. Düşük sertleşme noktası; kaynak cürufunun kolaylıkla akabilmesini ve hemen sertleşmeden kolaylıkla ayrılabilmesini sağlar, böylece kaynak herhangi bir kesintiye uğramadan yapılabilir. Kaynakta, çentik ve dalgalanmalar oluşmamalıdır. Ray sonlarında, alevle kesmeden dolayı oluşan çapaklar eritilerek temizlenmelidir [26].

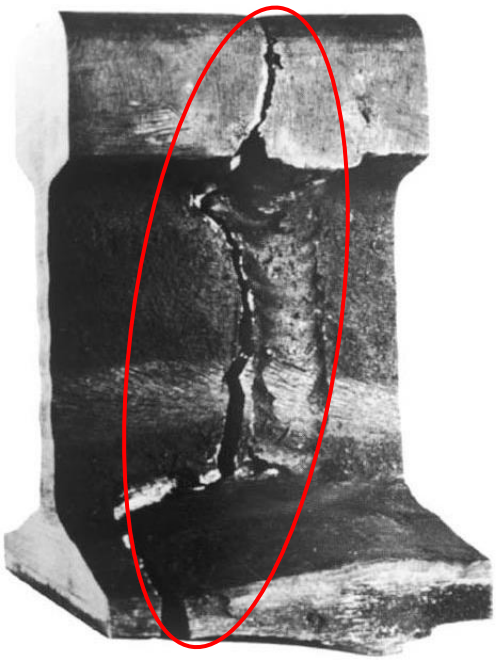
Elektrik ark kaynaklarında görülen kusurlar, UIC'nin "Ray Kusurları" adlı bülteninde, kaynak gövdesinde yatay çatlaklar ve kaynak kesitinde enine çatlaklar olarak 2 bölümde incelenmektedir [29].

3.2.8 Elektrik ark kaynak gövdesinde yatay çatlak

Elektrik ark kaynak gövdesinde yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 432), genellikle ray uçlarının, kaynak öncesinde kesilmediği durumlarda ortaya çıkar. Ray gövdesindeki cebire deliklerine bağlı olarak oluşan bu çatlaklar, kaynak gövdesi boyunca ilerleyerek kaynağın bitişiğindeki rayın mantarına veya tabanına ulaşır ve kırılmaya neden olur. Ray kaynağında görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu tür kusurların olması durumunda, kusurlu kaynak kesiti ivedilikle değiştirilmeli ve yeni kaynak yapılmalıdır.

3.2.9 Elektrik ark kaynak kesitinde enine çatlak

Elektrik ark kaynak gövdesinde yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 431), genellikle kaynağın dış yüzeyinde görülebilir çatlaklardır ve ileri aşamalarda rayın kırılmasına sebep olurlar. Bu tür kusurlar, kaynakta yabancı madde kalıntıları ve gözeneklilik gibi kaynak kusurları nedeniyle ortaya çıkar ve zaman içinde yorulma etkisiyle ilerler. Kırılma alanı, genellikle karanlık bir nokta ile karakterize edilir. Ray kaynağında görsel muayene ve ultrasonik yöntemle tespit edilebilen bu kusurlar, başlangıç aşamasında sürekli denetim altında tutulmalıdır. İlerleyen aşamalarda ise geçici cebire ile önlem alınmalı ve kusurlu kaynak kesiti ivedilikle değiştirilmelidir. Şekil 3.23'de, elektrik ark kaynak kesitinde enine çatlak kusurları görülmektedir [29].



Şekil 3.23 : Elektrik ark kaynak kesitinde enine çatlak kusuru [29].

4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Demiryolu hattı üzerinde kontrol edilmeyen ray kusurları ve çatlakları, zaman içinde trafik yükleri altında yatay, düşey ve boyuna doğrultularda ilerleyerek ray kırılmalarına neden olmaktadır. Ray kırılmaları ise trenin raydan çıkması (derayman) gibi oldukça tehlikeli sonuçları olan kazalara sebebiyet vererek maddi ve manevi kayıplara yol açmaktadır. Olumsuz etkileri çok büyük olan bu tür demiryolu kazalarını önlemek için rayların düzenli olarak, çatlak ve kusur riskine karşı muayene edilmesi gerekmektedir. Demiryolu üstyapısında yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri, rayların, çatlak ve kusur riskine karşı kontrolü için güvenilir ve uygun maliyetli sistemlerdir. Raylarda uygulanan başlıca tahribatsız muayene yöntemleri:

1. Ultrasonik Yöntem,
2. Girdap Akımları Yöntemi,
3. Radyografi Yöntemi,
4. Sıvı Penetrant Yöntemi,
5. Manyetik İndüksiyon Yöntemi,

Raylar, yüzeysel ve içsel hatalara karşı, tahribatsız muayene yöntemleriyle sistematik olarak kontrol edilmelidir. Raylar; üretim sürecinde, yüzey altı içsel kusurlara karşı ultrasonik muayene yöntemiyle, yüzeysel kusurlara karşı ise otomatik optik kameralar ve girdap akımları yöntemiyle muayene edilir. İşletme altındaki rayların tahribatsız muayenesinde, ultrasonik ve girdap akımları yöntemleriyle beraber radyografi yöntemi, manyetik indüksiyon yöntemi ve görsel muayene yöntemi kullanılmaktadır [5, 38].

Tahribatsız muayene; malzemenin herhangi bir şekilde bütünlüğünü ve kullanılabilirliğini bozmadan, yüzeyinde ve iç yapısında bulunan hatalarının ve metalürjik durumunun test edilmesidir. Tahribatsız muayene, kalite kontrolün bir bölümü olup, üretimin ve güvenli hizmetin tamamlayıcı bir parçasıdır. Yapılan muayenenin verimliliği için deneyi gerçekleştiren operatörün gerekli eğitimleri almış

olması şarttır. Operatör, malzemede bulunabilecek önemli hataları tahmin etmeli ve bu hataları etkin ve ekonomik şekilde belirleyecek tahribatsız muayene yöntemini seçmelidir [39].

4.1 Ultrasonik Yöntem

Ultrasonik dalgaların malzeme içerisine; ultrasonik dalga üretebilme ve dalgaları algılayabilme özelliğine sahip olan "problar" aracılığıyla bir demet halinde gönderilmesi ve malzemenin iç yapısına bağlı olarak değişimlere uğrayan dalga demetinin, malzemeden çıktığı anda kullanılan prob veya bir başka prob tarafından alınarak değişimlerin saptanmasına "ultrasonik muayene" denir. Ultrasonik muayene yöntemi, insan kulağının duyacağı (20 Hz ile 20 kHz) seviyeden bir hayli yüksek frekansta olan ses dalgaları ile yapılmaktadır. Bu yöntemde, malzemedeki hataları tespit etmek için 0,2 ila 25 MHz aralığındaki yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılmaktadır. Buradaki "Hz" (Hertz), frekans birimi olup saniyedeki bir titreşime eşdeğerdir. Bu yüksek frekanslı ses dalgalarına, "ultrasonik dalgalar" denir. Ultrasonik dalgaların malzeme içinde yayılması, test edilecek malzemenin atomları ve molekülleri arasındaki bağ kuvvetlerine, esneklik sınırları içerisinde etki edilmesiyle sağlanır. Ultrasonik dalgalar, malzeme içinde ilerlerken, akustik empedansta (malzemenin ses yayılmasına karşı gösterdiği direnç) meydana gelen değişim sonucu ara yüzeylerden kuvvetle yansırlar. Çatlaklar, ince tabaka toplanmaları, büzülmeler, çukurlar, boşluklar, gözenekli kısımlar gibi malzemenin iç yapısındaki süreksizlikler, ara yüzey oluşturdukları için ultrasonik yöntemle tespit edilebilmektedir [40].

Ultrasonik yöntemde, ultrasonik problar ve ultrasonik cihaz olmak üzere 2 temel muayene bileşeni vardır. Ultrasonik yöntem, genel olarak 4 ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Ultrasonik cihaz ile verici proba elektrik sinyalleri gönderilir. Prob, kendisine gelen elektrik sinyallerini, piezoelektrik kristalleri vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürerek ultrasonik ses dalgalarını oluşturur.
2. Oluşan ultrasonik dalgalar, verici prob tarafından malzeme içine gönderilir. Malzeme içinde yayılan ses dalgaları, malzemenin diğer ucundan veya malzeme içindeki bir kusurdan yansır.

3. Malzemenin diğer ucundan ve içsel bir kusurdan yansıyarak geri dönen ultrasonik dalgalar, alıcı prob tarafından algılanır. Ultrasonik dalgalar, prob içerisindeki piezoelektrik kristallere basınç uygulayarak kristalde elektrik sinyalleri oluşturur.
4. Alıcı probda meydana gelen elektrik sinyalleri, ultrasonik cihaza gönderilir. Cihazın dijital ekranında gözüken ilk ve son yankılar, parça boyunu ifade eder, arada çıkan yankı ise hata yankısı olup, kusurun yeri ve büyüklüğü hakkında bilgi verir.

Ultrasonik muayenede, kimi durumlarda verici ve alıcı prob birbirinden farklıdır; bu durumda 2 ayrı prob kullanılır. Kimi durumlarda ise verici ve alıcı prob aynı probtur; yani tek bir prob kullanılır. Ultrasonik muayene yapılırken, probun temas edeceği yüzeyin düzgünlüğü ve temizliği son derece önemlidir. Aksi takdirde, muayene yapılacak malzemenin prob temas yüzeyindeki olası pürüzler ve kir, pas, kabarmış boya gibi maddeler, akustik empedans farkı oluşturacağından cihazın yanlış değerler göstermesine ve yanılsamaya neden olacaktır. Bu nedenle prob, muayene yüzeyine temas ettirildiğinde, ses dalgalarının malzeme içine nüfuz edebilmesi için uygun bir temas sıvısı (su, yağ vb.) kullanılmalıdır [39].

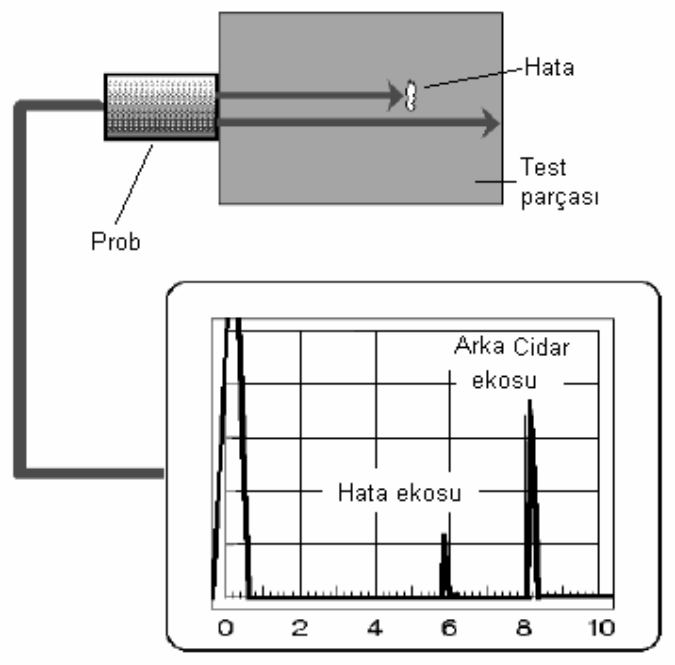
4.1.1 Ultrasonik dalga üretimi ve ultrasonik problar

Ultrasonik dalgaların üretiminde ve algılanmasında "prob" adı verilen düzenekler kullanılır. Probların yapımında çoğu zaman "piezoelektrik" özelliğe sahip kristaller kullanılır. Piezoelektrik özellik ile yüksek frekanslarda enerji üretimi sağlanır. Piezoelektrik etki gösteren bazı malzemeler: kuvartz, lityum sülfat ve baryum titanattır. Ultrasonik muayenede en çok kullanılan ise baryum titanat seramiğidir.

Piezoelektrik kristaller, belirli yönlerde basınç veya çekme kuvvetine maruz kaldıklarında, elastik deformasyonla birlikte yüzeylerinde eksi ya da artı elektriksel yüklenme oluşur. Bu olaya, "piezoelektrik olay" denir. Diğer taraftan, bu kristallere belirli frekanslarda elektrik gerilimi uygulandığında, kristaller o frekansta boyut değişimi yani titreşim yaparlar. Bu olaya ise "ters piezoelektrik olay" denir. Piezoelektrik etki ile üretilen titreşimlerin, malzeme içerisine gönderilebilmesi için prob, doğrudan veya dolaylı olarak muayene yüzeyi ile temas etmelidir.

Prob, bir enerjiyi başka bir enerji şekline dönüştüren düzenektir. Ultrasonik problar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye (ultrasonik enerji) ve mekanik enerjiyi de

elektrik enerjisine dönüştürürler. Ultrasonik muayenede genellikle, biri alıcı prob, biri de verici prob olmak üzere 2 adet prob kullanılır. Verici proptaki piezoelektrik kristalde, elektrik titreşimlerinin mekanik titreşimlere dönüştürülmesi ile ultrasonik dalgalar üretilir ve malzeme içine gönderilir. Bu işlem, verici proptaki kristallerin "ters piezoelektrik olay" özelliği sayesinde yapılır. Malzeme içinde yayılan ultrasonik dalgalar, farklı akustik özellikteki bölgelerin ara yüzeylerinden kısmen geçer veya yansır. Yansıyarak alıcı proba gelen bu dalgalar, probun piezoelektrik kristali tarafından tekrar elektrik titreşimlerine dönüştürülür. Bu işlem, alıcı proptaki kristallerin "piezoelektrik olay" özelliği sayesinde yapılır. Daha sonra, bu elektrik sinyalleri, bir katod ışınları tübü ekranı olan ultrasonik cihazın ekranında, malzeme iç yapısının habercisi olan yankılar (ekolar) şeklinde görülür. Ekran üzerinde gözlenen yankının konumuna göre, kusurun malzeme içindeki koordinatları hesaplanabilir. Ayrıca yankının genliği, kusurun büyüklüğü hakkında bilgi verir [40]. Şekil 4.1'de, hem alıcı hem verici prob olarak çalışan bir ultrasonik prob tarafından tespit edilen malzeme içindeki hatanın, ultrasonik cihaz ekranındaki hata ekosu (yankısı) görülmektedir [39].



Şekil 4.1 : Ultrasonik yöntemle tespit edilen hata ekosu [39].

Ultrasonik problar tarafından üretilen ve malzeme içinde yayılan ultrasonik dalga çeşitlerinin en önemlileri 3 tanedir:

1. Boyuna dalgalar,

2. Enine dalgalar,
3. Yüzey (Rayleigh) dalgaları.

Boyuna dalgalara, basınç dalgaları da denir. Bu dalga türü, yayıldığı ortamın parçacıklarını sıkışmaya ve gevşemeye zorlayarak hareket eder ve dalganın yayılma yönü, titreşim yönü ile aynıdır. Boyuna dalgalar; katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilirler. Enine dalgalarda titreşim yönü, yayılma yönüne dik olduğu için bu dalgalar kesme dalgaları olarak da bilinir. Enine dalgalar, yayıldıkları ortam parçacıklarını çapraz yönde çekmeye zorlar ve bu yüzden sadece katılarda yayılabilirler. Sıvı ve gaz maddelerde, moleküller veya atomlar arası mesafe, katılara göre çok büyük olduğu için bunlar arasındaki çekme kuvveti, birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmemekte ve dalga, hızla zayıflamaktadır. Yüzey dalgaları, Rayleigh dalgaları olarak da bilinir. Bu dalga türü, sadece malzeme yüzeyinde yayılabilmektedir. Yüzey dalgaları, malzeme içindeki yüzey ve yüzeye yakın çatlakların tespitinde, enine ve boyuna dalgalara göre daha başarılıdır. Bu dalgalar, karmaşık şekilli malzemelerin yüzey testinde kullanılabilir.

Ultrasonik problar; normal prob, açılı prob, çift kristalli prob, geciktirme probu ve daldırma probu olmak üzere 5 çeşittir. Normal problar, yüzey girişine dik bir şekilde ultrasonik titreşimler yayar. Prob, malzeme içerisine boyuna dalgalar gönderir ve malzemenin arka yüzeyinden veya malzeme içindeki bir kusurdan yansıyan dalgalar ile muayene yapılır. Açılı problarda, piezoelektrik eleman ve temas yüzeyi arasında sabit bir açı vardır. Açılı problar, enine dalga üretir ve özellikle kaynak dikişlerinin muayenesinde kullanılır. Çift kristalli problarda, kristallerin biri verici, diğeri ise alıcı olarak çalışır. Bu tür problar, özellikle yüzeye yakın hataların incelenmesinde kullanılır. Boyuna dalga üretir ve bu dalgaları algılarlar. Geciktirme probları, kalınlık ölçümü ve yüzeye yakın hataların yüksek hassasiyetle incelenmesinde başarılıdır. Daldırma probları ise su ortamında, malzeme ve prob suya daldırılarak ultrasonik ölçüm yapıldığında kullanılır. Bu tür problar, hızlı muayeneye olanak verir. Probun sızdırmaz olması önemlidir.

Prob seçiminde; demet yönü, frekans ve kristal boyutu dikkate alınır. Demet yönü seçiminde, önce normal veya açılı problardan birine karar verilir. Frekans seçiminde, malzeme kalınlığı ve metalürjik yapı ile görülebilecek en küçük hata boyutu göz önüne alınır. Mümkün mertebe yüksek frekans ile çalışmak, hem daha küçük

hataların algılanmasını sağlar hem de ayırma gücünü iyileştirir. Frekans seçiminde asıl belirleyici faktör, malzemenin tane boyutudur. Tane boyutu büyüdükçe, artan saçılma ve soğurulmayı azaltmak için düşük frekansları seçmek gerekmektedir. Ayrıca, malzeme kalınlığı arttıkça frekans düşürülmelidir. Yüksek frekans, kaba taneli malzemede saçılmaya ve ekranda fazladan sinyallerin oluşmasına neden olur.

4.1.2 Ultrasonik muayene çeşitleri

Başlıca ultrasonik muayene çeşitleri 3 tanedir:

1. Geçiş (iletim) yöntemi,
2. Rezonans yöntemi,
3. Darbe-yankı (yansıma) yöntemi.

Geçiş yönteminde, bir verici ve bir de alıcı prob olmak üzere toplam 2 prob kullanılır. Malzemenin bir yüzüne alıcı, diğer yüzüne verici prob yerleştirilir. Parça içinden geçerek alıcı proba ulaşan ses enerjilerinin farklı oluşu, test parçası içinde hatalar olduğunu gösterir. Bu yöntemde, hatanın pozisyonunu tam olarak tespit etmek mümkün değildir. Hata içeren parçalarda, ekranda, hatanın büyüklüğüne göre daha düşük değerde sinyaller oluşur. Çünkü bu durumda, ses dalgalarının bir kısmı, yansımaya uğrayacağı için alıcı proba ulaşamaz. Hatasız bir malzemede ise ultrasonik dalgalar, hiçbir engele rastlamadan geçerler ve ekrandaki sinyal, maksimum değere ulaşır. Bu yöntem, genellikle sacların ve boruların muayenesinde kullanılır.

Rezonans yönteminde, rezonansı elde etmek için deney parçası içine ultrasonik dalgalar sürekli olarak gönderilir. Malzeme içine daha önce gelen, ön ve arka cidarlarda birçok kez yankılanan ultrasonik dalgalar, arkadan yeni gelen dalgalarla farklı frekansta iseler birbirini zayıflatırlar (sönümlendirirler). Eğer bu dalgalar, aynı frekansta iseler birbirini kuvvetlendirirler. Bu takdirde, malzeme içinde sönümlenmeyen sürekli dalgalar oluşur. Bu olay, kendini yüksek genlik ile belli eder. Bu duruma ultrasonik frekans denmektedir. Deney parçası içinde rezonansın oluşması için ön ve arka yüzeylerden yansımaların büyük kayıpla olmaması, yansımadan sonra dalgaların yine geldikleri doğrultuda geriye dönmeleri yani başka doğrultulara saparak kaybolup gitmemeleri gerekir. Bunun için deney parçası, paralel yüzlü ve yüzeyleri pürüzsüz olmalıdır. Rezonans durumu; deney parçasının

uzunluğu, ultrasonik yarım dalga boyuna veya bunun tam katlarına eşit olduğunda oluşur. Bu yöntem genellikle, ultrasonik yöntemle kalınlık ölçümlerinde kullanılmaktadır.

Darbe-yankı yöntemi, en yaygın ultrasonik muayene yöntemidir. Ses demeti, tek taraftan verici ve alıcı olarak çalışan proba gönderilir. Hata içermeyen malzemelerde, bir ön cidar, bir de arka cidar yankısı elde edilir. Hata içeren malzemelerde ise, hatadan yansıyan ses dalgaları, bu 2 sinyal arasında bir hata sinyali (yankısı) oluşturur. Bu yöntemde, sürekli ses ötesi demeti yerine düzenli olarak kısa impulslar gönderilir. Her impuls; deney parçası içinde belli bir hızla giderek hata veya arka cidara çarpıp geri döner. Bu hız, ses dalgasının o malzeme içindeki ses hızına eşit olup, malzemeye ait bir sabittir. Ses yansıyıp geri döndüğünde, bu defa aynı prob alıcı olarak çalışır ve yansıyan dalganın şiddeti ile orantılı olarak ölçü aletine elektrik sinyali verir. Belli bir malzeme için ses ötesi dalgaların gönderilmesi ve geri dönmesi arasında geçen süreden, hatanın yüzeyden olan uzaklığı tespit edilebilir. Bu yöntem aynı zamanda, arka cidar yankısını aldığı için malzeme kalınlığı ölçümünde de kullanılabilir. Yankı sinyallerinin gösterilmesi ve ses demetinin yolculuk sürelerinin ölçülmesi, bir katot ışınları tüpü ekranı üzerinden yapılır [40].

4.1.3 Rayların ultrasonik yöntem ile muayenesi

Rayların tahribatsız muayenesinde, tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan yöntem ultrasonik yöntemdir. Ultrasonik ray kontrolü, elle manuel olarak yapılabileceği gibi, sürülen el arabaları üzerine yerleştirilmiş portatif ultrasonik problar kullanılarak veya ultrasonik problar taşıyan yüksek hızlı özel test araçları kullanılarak yapılabilir. Şekil 4.2'de, İstanbul Ulaşım A.Ş.'de uygulanan ultrasonik yöntemlerden biri olan manuel ultrasonik muayene görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bu muayene, bir adet ultrasonik prob, temas sıvısı ve ultrasonik cihaz ile yapılmaktadır. Manuel ultrasonik muayenede, alıcı ve verici olarak çalışan normal bir prob, raya ultrasonik dalgalar gönderir. Prob ile ray arasındaki temas yüzeyini pürüzsüzleştirmek ve sürekli kılmak için temas sıvısı olarak yağ kullanılır. Muayene sonucunda, ultrasonik cihazın ekranında görülen sinyaller, raydaki olası kusurlar hakkında bilgi verir.



Şekil 4.2 : Rayların manuel ultrasonik muayenesi.

Ultrasonik ray kontrolünde, darbe-yankı yöntemi kullanılır ve muayene edilen rayın yapısal bütünlüğü hakkında bilgi edinilir. Kusurlar, rayın farklı bölümlerinde bulunabileceği için enerji, birkaç farklı açıdan raya iletilmelidir. Bir başka deyişle, normal problar ve açılı problar birlikte kullanılır. Kusurların algılanma olasılığını artırmak için kullanılan sapma açıları 0^0, 37^0, 45^0 ve 70^0'dir.

Ultrasonik muayene trenlerinde, problar, rayla temas eden kayıcı bir taşıyıcı bünyesinde bulunur. Muayene treni, hat boyunca hareket ettikçe, ultrasonik problar, ray yüzeyine püskürtülen suyu kullanarak ray ile bağlantı kurar. Test trenlerinde erişilen muayene hızı 40 km/sa'den 80 km/sa'e kadar çıkmaktadır. Fakat özellikle test treni tarafından saptanan hataların manuel olarak da doğrulanması gereken durumlarda gerçek muayene hızı 15 km/sa kadardır. Yeni nesil test trenlerinde ise erişilen muayene hızı 100 km/sa'e kadar çıkmaktadır. Ancak muayene araçlarının bu hız değerlerindeki güvenilirliği hakkında sınırlı bilgi vardır.

Genel olarak ultrasonik muayene trenleri, derin yüzey kırılmalarının ve ray mantarı ve gövdesinde bulunan iç kusurların tespitinde başarılıdır. Buna karşın, ray yuvarlanma yüzeyindeki 4 mm'den daha küçük yuvarlanma teması yorulma kusurları algılanamaz. Bu tür yüzey kusurları, ultrasonik test renleri tarafından genellikle tespit edilemez. Ultrasonik test trenleri, ray tabanındaki korozyon gibi bazı kusurları da

saptayamaz, çünkü rayın bu kısmı kısmen taranabilmektedir [5]. Şekil 4.3'de, Fransa'da kullanılan bir ultrasonik test treni görülmektedir [41].



Şekil 4.3 : Fransa'da kullanılan ultrasonik test treni [41].

4.2 Girdap Akımları Yöntemi

Girdap akımları yöntemi, yüzey ve yüzeye yakın süreksizliklerin belirlenmesi için uygun bir yöntem olup, elektrik iletkenliğine sahip olan bütün metal ve alaşımlarına uygulanabilir. Bu yöntem ile malzeme içindeki çatlak ve korozyon gibi kusurlar tespit edilebileceği gibi malzemenin iletkenlik ölçümü de yapılabilir [42].

Girdap akımları yöntemi, temel olarak elektromanyetizmaya dayanmaktadır. Klasik girdap akımları yönteminde; bir üreteç, bir test bobini ve bir gösterge kullanılmaktadır. Üreteç, manyetik alanı oluşturan test bobinine, alternatif akım (AC) sağlar. Üzerinden alternatif akım geçen bobin, iletken bir malzemeye yaklaştırılırsa malzemenin içinde girdap akımları indüklenir. İndüklenen girdap akımları, ilave bir manyetik alan meydana getirir. Bu alan, bizzat onu uyaran bobin veya başka bir bobin tarafından tespit edilebilir. Malzemede, girdap akımlarının oluştuğu bölgede bir süreksizlik varsa, malzeme ile süreksizlik arasındaki elektrik direnci farkından dolayı girdap akımları farklı bir yörünge izlemek zorunda kalır. Bunun sonucunda, akım miktarı ve manyetik alan değişir. Girdap akımlarındaki bu değişimler, dedektör bobin tarafından algılanır ve okuma cihazına gönderilir. Okuma cihazı; ibreli bir cihaz veya katot ışını tüpü şeklinde olabilir ve "gösterge" olarak adlandırılır.

Gösterge; malzemenin, girdap akımlarını ne şekilde etkilediğini kaydeder ve böylece malzeme içindeki kusurlar tespit edilir [43, 44].

4.2.1 Rayların girdap akımları yöntemi ile muayenesi

Girdap akımları yönteminin ray muayenesinde kullanılması, özellikle yüzey kusurlarının tespitinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, son yıllarda rayların tahribatsız muayenesinde girdap akımları yöntemi yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem, elle manuel olarak yapılabileceği gibi, sürülen el arabaları üzerine yerleştirilmiş portatif girdap akımı sensörleri kullanılarak veya girdap akımı sensörleri taşıyan yüksek hızlı özel test trenleri kullanılarak yapılabilir.

Ray kontrolünde kullanılan klasik girdap akımı sensörleri, bir uyarıcı ve bir algılayıcı sensör olmak üzere 2 tanedir. Ray mantarı yüzeyinde bir manyetik alan yaratmak için, uyarıcı sensöre alternatif akım verilir. Manyetik alandaki değişiklikler, ray mantarı yüzeyinin hemen altında, girdap akımlarının başlamasına neden olur. Girdap akımları tarafından yaratılan ikincil manyetik alandaki değişiklikler, arama bobini tarafından, indüklenen voltaj formunda algılanır. Eğer kontrol edilen alan, kusur içermiyorsa, sensörün özdirenci aynı kalır. Öte yandan, ray mantarında yüzeysel veya yüzeye yakın bir kusur varsa, girdap akımları, ikincil manyetik alanda dalgalanmalara neden olacak şekilde bozulur. Bu durum, öz dirençte değişikliğe yol açar. Böylece, öz direnç sinyalindeki değişikler saptanarak ray mantarındaki yüzeysel veya yüzeye yakın kusurlar tespit edilir. Girdap akımları yöntemi ile tespit edilebilen ray kusurları: kılcal çatlaklar, iç köşe kabuklanmaları, tekerlek yanıkları, ray taşlama kalıntıları, ray yüzeyinde çökmeler, uzun ve kısa dalga boylu ondülasyonlardır.

Konvansiyonel ultrasonik problar, yüzeye açılan küçük kusurların veya yüzeye yakın olan kusurların tespit edilmesinde sınırlı kapasiteye sahiptir. Girdap akımı sensörleri ise yuvarlanma teması yorulması, tekerlek yanıkları ve kısa mesafeli ondülasyonlar gibi yüzey kusurlarının tespitinde daha başarılıdır. Öte yandan, girdap akımı sensörleri, yer değişimine karşı oldukça hassastır. Bu nedenle, prob, ray mantarı yüzeyinden, 2 mm uzaklığı geçmeyecek sabit bir nokaya yerleştirilmelidir. Muayene sırasında oluşabilecek yer değişimlerine dikkat edilmelidir [5]. Şekil 4.4'de, girdap akımları yöntemi ile ray kontrolü görülmektedir [45].



Şekil 4.4 : Rayların girdap akımları yöntemi ile muayenesi [45].

4.2.2 Girdap akımları yöntemi ile ultrasonik yöntemin birlikte kullanımı

Ultrasonik yöntem ile raydaki içsel kusurlar, girdap akımları yöntemiyle ise ray yüzeyindeki kusurlar başarıyla tespit edilir. Rayların kontrolünde, tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bu iki tahribatsız muayene yönteminin karşılaştırması Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Ultrasonik yöntem-girdap akımları yöntemi karşılaştırması [45].

Girdap Akımları Yöntemi	Ultrasonik Yöntem
Yüzey hatalarını bulmakta iyi.	Yüzey hatalarını bulmakta zayıf.
Yüzeye yakın hataları orta derecede bulur.	Yüzeye yakın hataları bulmakta zayıf.
Derin yüzey altı hataları bulmakta zayıf.	Yüzey altı hatalarını bulmakta iyi.
Hata tespitinde, hatanın yönü önemli değildir.	Hata tespitinde, hatanın yönü önemlidir.
Temas sıvısı gerektirmez.	Temas sıvısı gerektirir.
Yüksek hızda muayene yapılabilir.	Muayene hızı daha düşüktür.

Yüksek hızlı ray muayenesi için girdap akımları teknolojisindeki gelişmeler, ultrasonik dönüştürücülerin, yüzey ve yüzeye yakın kusurların saptanmasındaki performansına tamamlayıcı etki yapmıştır. Ultrasonik yöntemin yüzey altı içsel kusurları tespit etmedeki başarısı ve girdap akımları yönteminin yüzey kusurlarını tespit etmedeki başarısı birleştirilerek, birlikte çalışan ultrasonik-girdap akımları

sistemli test trenleri elde edilmiştir. Sensörler, problara ray hattı boyunca yön veren bir taşıyıcı üzerine yerleştirilir. Muayene boyunca, problara yön vermek oldukça önemlidir, aksi takdirde test yüzeyinden uzaklaşmalar olacağı için sinyaller ve hassasiyet olumsuz etkilenir. Algılanan kusurun konumu ve kritikliği hakkında güvenilir bilgi elde etmek zorlaşır. Birlikte çalışan ultrasonik-girdap akımları test trenlerinin muayene hızı genel olarak 75 km/sa'dir; fakat 100 km/sa'e ulaşan yüksek hızlar da elde edilmiştir. Girdap akımları sinyali, 100 km/sa'in üzerindeki hızlardan bile etkilenmediği halde aynı hız değerinde, ultrasonik probların performansı olumsuz etkilenir. Raydaki muhtemel iç kusurların algılanması zorlaşır [5].

4.3 Radyografi Yöntemi

Radyografi yöntemi, oldukça hassas bir muayene yöntemi olması ve muayene sonuçlarının kalıcı olarak kaydedilebilir olmasından dolayı sanayide en yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, ferro-manyetik olan ve ferro-manyetik olmayan metaller ve diğer tüm malzemelere uygulanabilir.

Radyografik yöntemde, muayene edilecek malzeme, bir kaynaktan çıkan radyasyon demeti (x veya gama ışınları) ile ışınlanır. Radyasyon, malzeme içinden geçerken malzemenin özelliklerine bağlı olarak belli oranda yutularak kayba uğrar ve ardından malzemenin arka yüzeyine yerleştirilmiş olan filme ulaşarak filmi etkiler. Malzemedeki süreksizlikler, radyasyonu farklı oranlarda zayıflatacağı için süreksizliklerin olduğu bölgeden geçen radyasyonun şiddeti ve film üzerinde oluşturacağı kararma miktarı da farklı olacaktır. Filmin banyo işleminden sonra film üzerindeki kararmalar, malzemedeki süreksizliklerin belirtisi olarak kabul edilir [42].

Radyografik muayene için çeşitli ışınım kaynakları kullanılabilir. Bu kaynaklar, X ışını tüpleri veya gama ışını üreten izotoplar olabilir. Endüstriyel radyografide kullanılan X ışını enerji aralığı, genellikle 50 kV – 350 kV arasındadır. Işınlama enerjisi, ışınlanacak malzemenin cinsine ve kalınlığına bağlı olarak değişir. En çok bilinen ve kullanılan gama ışını kaynakları ise Ir 192, Co 60'tır. Bunlardan başka Se 75, Yb 169, Tm 170 gibi izotoplar da endüstriyel radyografi alanında kullanılmaktadır. X ışınları (röntgen ışınları), X ışını tüplerinde elektriksel olarak üretilir. Endüstride kullanılan gama ışınları ise Ir-192, Co-60 gibi izotopların bozulması sonucunda elde edilir. X ışınları, malzemelere zarar vermeden iç yapılarını inceleme olanağı sağladığı için tahribatsız muayenede yaygın olarak

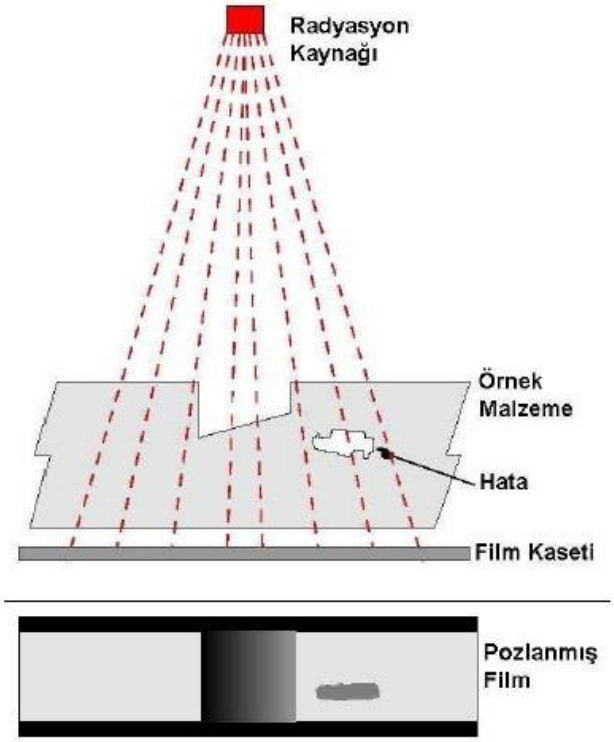
kullanılmaktadırlar. X ya da gama ışınlarıyla malzemelerdeki kalınlık değişimleri, yapısal değişiklikler, içteki hatalar, montaj detayları tespit edilebilmektedir [46].

Elektriksel olarak üretilen X ışınları ve radyoaktif izotoplardan yayılan gama ışınları, içerisinden geçtikleri malzeme tarafından adsorbe edilirler. Kalınlığın artmasıyla beraber adsorbe edilen miktar da artar. Dolayısıyla, daha yoğun malzemede daha fazla radyasyon abzorbe edilir. Işık gibi x ve gama ışınları da elektromanyetik dalga gurubuna aittirler. Aralarındaki tek fark dalga boylarının farklı olmasıdır. X ve gama ışınlarının dalga boyları çok küçük olduğundan gözle görülemezler ve malzemelerden geçebilme yetenekleri vardır. X ve gama ışınları, ışık ile benzer özelliklere sahip olup gümüş kristallerini, film üzerinde metalik gümüşe çevirirler ve filme ulaşan radyasyon yoğunluğu oranına göre bir görüntü oluştururlar.

Endüstriyel radyografide temel kural, malzemenin bir tarafında ışın kaynağının, diğer tarafında ise bir algılayıcının (detektör) bulunmasıdır. Radyasyon kaynağı olarak X ya da gama ışın kaynağı, detektör olarak da film kullanılmaktadır. X ışını radyografisinde X ışınlarının nüfuziyet gücü, X ışın tüpüne uygulanan voltaj ile ayarlanır. Malzemeyi geçerek diğer tarafa ulaşan ışınları algılayan film, genellikle ışık geçirmez bir zarf içerisine konularak test edilen malzemenin arka tarafına yerleştirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken kural; zarfın ön yüzeyinin, ışınları kolaylıkla geçirebilecek malzemeden yapılmış olmasıdır. X ışınlarının film üzerinde oluşturduğu görüntü, normal bir ışık kaynağının oluşturduğu gölgeye benzemektedir. Malzemenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı olarak, film üzerinde oluşan görüntünün yoğunluğu da değişmektedir. Görüntünün netliği ve büyüklüğü, radyasyon kaynağının büyüklüğüne, radyasyon kaynağının filme olan uzaklığına, malzemenin filme olan mesafesine bağlıdır.

Kaset içerisindeki film, test parçasının arkasına yerleştirildikten sonra belli bir süre X veya gama ışınları ile pozlanır. Pozlanmış film, banyo edildikten sonra kararma miktarına bakılır. Filmin kararması kısaca yoğunluk olarak adlandırılmaktadır. Filmde farklı yoğunlukların olması, test edilen parçada farklı yapıların yani süreksizliklerin olduğunu göstermektedir. Filmin fazla radyasyon alan kısımları daha fazla kararır. Örneğin, malzemenin incelenen bölgesinde bir boşluk varsa, ışın bu boşluğu kayıpsız olarak geçecek ve dolayısıyla film üzerinde bu bölge daha siyah olarak görülecektir. Nihai olarak, film üzerindeki kararmaların miktarına, boyutuna

ve konumuna göre malzeme içindeki kusurlar hakkında bilgi edinilir. Şekil 4.5'de, radyografi yönteminin temel çalışma prensibi görülmektedir [42].



Şekil 4.5 : Radyografi yönteminin temel çalışma prensibi [42].

Radyografi yöntemi ile rayların tahribatsız muayenesinde, gama veya X ışınları kaynağı kullanılır. Geçmişte, muayene edilen ray alanının radyografını elde etmek için genellikle Gama ışınları kullanılmaktaydı. Günümüzde, gelişen portatif dijital X ışını detektörleri sayesinde X ışını radyografisi daha yaygınlaşmıştır.

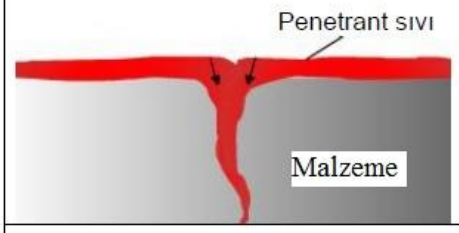
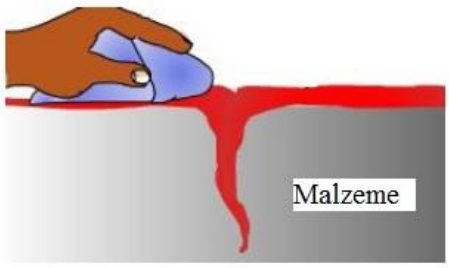
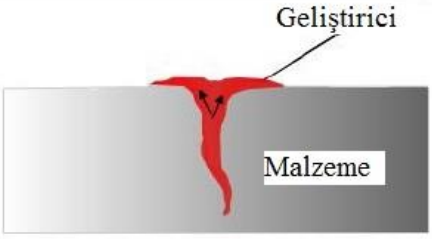
Radyografi, raydaki iç kusurların tespitinde etkili bir tahribatsız deney yöntemi olmasına rağmen, bazı sağlık ve güvenlik sorunlarına yol açar. Bunun yanında, muayene işlemi diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre daha vakit alıcıdır. Bu nedenle, radyografi daha çok, kusurların daha önceden diğer yöntemler tarafından tespit edildiği durumlarda teyit etme amacıyla kullanılmaktadır.

Radyografinin başarılı olduğu kontrol alanları, alüminotermit ray kaynakları, makaslar ve geçiş noktalarıdır. Bu yöntem, iç kusurların yapısı, konumu ve boyutu hakkında bilgi sağlar. Ayrıca, ray bileşimindeki önemli değişimlerin ölçülmesinde kullanılır. X ışınları radyografisi, ray mantarı yüzeyi yakınındaki kalıntı gerilmelerinin ölçülmesinde başarılıdır. Öte yandan, radyografi yöntemi, raydaki enine kusurların tespitinde iyi bir performans göstermemektedir [5].

4.4 Sıvı Penetrant Yöntemi

Sıvı penetrant yöntemi; malzemelerdeki yüzey hatalarının tespiti için kullanılan bir metod olup, tespit edilmek istenen hataların, muayene işlemi yüzeyine açık olması gerekmektedir. Aksi takdirde, yüzey altında kalan veya herhangi bir nedenle yüzeyle bağlantısı kesilmiş hatalar bu metotla tespit edilemez. Sıvı penetrant yöntemi, metalik veya metalik olmayan tüm malzemelerde, aşırı gözenekli olmamaları koşulu ile yüzey hatalarının tespiti için kullanılabilir [42].

Sıvı penetrant yönteminde genel olarak, penetrant adlı madde, temiz malzeme yüzeyine uygulanır ve yüzey süreksizliklerinin içine kapiler etki ile nüfuz eder. Yeterli bir nüfuziyet süresinden sonra penetrantın fazlası yüzeyden temizlenir. Yüzey süreksizliklerine girmiş olan penetrant, "geliştirici" adlı madde yardımıyla yüzeye geri çekilir ve incelenen malzeme yüzeyindeki kusur, görünür hale gelir [43]. Şekil 4.6'da, sıvı penetrant yönteminin uygulama aşamaları görülmektedir [42].

	Her türlü yağ, kir ve pasdan, mekanik veya kimyasal yolla arındırılarak ön temizlemeye tabi tutulan numune yüzeyine, penetrant sıvı film halinde tatbik edilir. Sıvı penetrantın, kapiler etki ile malzemedeki kusurlara yeterince nüfuz edebilmesi için 5-30 dakika arasında beklenir.
	Malzemedeki kusurlara nüfuz etmiş olan penetrantın yüzeyde kalan fazla kısmı; su ve gaz tipi çözücüler ile temizlenir ve incelenen yüzey, bir bez ile kurutulur.
	Penetrant nüfuz ettirilmiş ve kalıntıları temizlenmiş yüzeye, güçlü bir emiciliğe ve penetrant ile yeterli kontrasta sahip "geliştirici", ince bir tabaka halinde uygulanır. Yüzeye yayılan geliştirici, kusurların içerisindeki penetrantı emerek yüzeye çıkmasını ve görülmesini sağlar.

Şekil 4.6 : Sıvı penetrant yöntemi uygulama aşamaları [42].

Muayene öncesi ön temizlik aşamasında, muayene edilecek parçanın üzerinde bulunan ve penetrasyonu kötü yönde etkileyen yağ, kir gibi artık maddeleri gidermek

amacıyla muayene yüzeyinin temizlenmesi ve kurutulması gerekmektedir. Yıkama, koşullara göre su, buhar veya kimyasal temizleyicilerle yapılır. Penetrant, temizlenen yüzeye püskürtme, akıtma veya daldırma yoluyla uygulanır. Penetrantın, geliştirici üzerinde vereceği görüntünün kolay izlenebilmesi için penetranta iyi kontrast veren kırmızı boya veya floresan boya katılır. Penetrantın yüzeye tatbik edilmesinden sonra, penetrantın yüzey hatalarına nüfuz etmesini sağlayacak yeterli sürenin geçmesi beklenir. Bu süreye "penetrasyon süresi" denir ve penetrantın türüne göre 5 ila 30 dakika arasında değişebilir. Ardından, yüzeye uygulanan penetrantın yüzey hatalarına nüfuz eden kısmı dışındaki fazla penetrant, yüzeyden temizlenir. Bu temizleme işlemi, penetrantın cinsine bağlı olarak su veya çözücü (solvent) ile yapılır. Temizleme işleminden sonra, yüzeysel kusurların içine giren penetrantı emerek dışarı çıkaran ve gözenekli bir yapıya sahip olan "geliştirici" adlı madde, muayene yüzeyine uygulanır. Geliştirici uygulandıktan sonra belirli bir süre beklenir. Geliştiricinin, muayene yüzeyine uygulanması 3 şekilde yapılır:

1. Doğrudan toz ile: Muayene edilecek parça yüzeyine toz geliştirici serpilir veya parça, akışkan haldeki toz banyoya daldırılır.
2. Su ile: Geliştirici, su içerisinde süspansiyon halindedir ve yüzeye tatbik edildikten sonra kurutmaya ihtiyaç vardır.
3. Çözücü (solvent) ile: Geliştirici, solvent içinde çözünmüş haldedir.

Son olarak inceleme aşamasında, muayenede floresan olmayan kırmızı boyalı penetrant kullanılmış ise normal ışıkta, floresanlı penetrant kullanılmış ise karanlık ortamda ultraviyole ışık altında malzeme incelenir. Penetranta tabi olan parçanın yüzeyi incelendikten sonra penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için son temizlik yapılır [47].

Tahribatsız muayenede kullanılan penetrantlar, düşük gerilim ve yüksek kılcallığa sahiptir. Bir penetrant sıvı; viskozitesi, yüzey gerilimi ve yoğunluğu ile nitelendirilir. Penetrant sıvılar, görülebilme özelliklerine ve penetrasyon sonrası yıkanma özelliklerine göre 2 ayrı sınıflandırmaya tabidir. Görülebilme özelliklerine göre 2 çeşit penetrant vardır: renkli penetrant sıvılar ve floresan penetrant sıvılar. Renkli penetrant sıvılar, genellikle kırmızı renkli boya içeren ve normal ışık altında görülebilen penetrantlardır. Floresan penetrant sıvılar ise ultraviyole ışınları altında test yapılabilir özelliğe sahiptir. Penetrantların bir başka sınıflandırma şeklinde ise

penetrasyon sonrası yıkanma özellikleri dikkate alınır. Yıkanma özelliklerine göre 3 çeşit penetrant vardır:

1. Su ile yıkanabilen penetrant,
2. Sonradan su ile yıkanabilen penetrant,
3. Çözücü (solvent) ile giderilebilen penetrant.

Penetrantların su ile yıkanabilmesi büyük bir avantaj olmakla birlikte, su ile yıkanabilen penetrantların nüfuziyet etkisi zayıftır ve yalnızca kaba muayenelerde kullanılması uygundur. Sonradan su ile yıkanabilen penetrantlar ve çözücü ile giderilebilen penetranlar ise yağ esaslıdır. Yağlı penetrantı, su ile yıkanabilir hale getiren kimyasallara "emulgatör" denir. Bu tür kimyasallar, su ile yıkanamayan penetrantların özellikle pürüzlü yüzeylerden temizlenebilir hale getirilmesi için kullanılan çözücülerdir. Yağlı ve sulu emulgatörler olmak üzere iki tipe ayrılırlar.

Sıvı penetrant muayenesinin en önemli kısımlarından birini gerçekleştiren geliştiriciler, malzemedeki yüzeysel kusurlara emdirilmiş penetrantı görünebilir hale getirmek için kullanılan yüksek emiciliğe sahip çeşitli tozlardır. Geliştiriciler, kuru ve sıvı taşıyıcılı olarak iki tipe ayrılırlar. Kuru geliştiriciler; çok ince taneli, pudra şeklinde kuru olarak tatbik edilir. Bu yöntemde, ara yıkaması yapılmış parçanın yüzeyi, emici toz ile sürülür. Toz, parçanın çatlak ve gözenekleri içine girmiş olan penerant sıvıyı emer. Bunun sonucunda, malzemedeki yüzeysel çatlak ve gözenekler ortaya çıkar. Sıvı geliştiriciler kullanılması durumunda ise ara yıkaması yapılmış parçanın yüzeyi, emici sıvı sürülür. Kuru geliştiricilerdeki gibi çatlak ve gözenekleri ortaya çıkar [42, 46].

4.5 Manyetik İndüksiyon Yöntemi

Manyetik indüksiyon yöntemi (MİY), "manyetik akı sızıntısı yöntemi" olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, petro-kimya, demiryolu, enerji ve metal sanayideki ferro-manyetik yapısal bileşenlerin tahribatsız muayenesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik akı sızıntısı sensörleri, bünyesinde daimi mıknatıslar veya DC elektromıknatısları bulundurur. Bunlar, malzemeyi, doyma noktasına kadar manyetize etmek için güçlü bir manyetik alan yaratır. Manyetik akı çizgileri, malzemeye metal fırçalar veya hava yoluyla iletilir. Eğer malzemede herhangi bir kusur varsa, manyetik akı çizgileri, kusura yakın bölgede, malzemenin dışına doğru

sızıntı yapar. Algılama sensörleri, bu kaçak manyetik alanı saptar ve kusur hakkında bilgi verir. Manyetik akı çizgilerinin, malzemeye iletilme çeşitlerine göre, MİY sistemleri iki çeşittir:

1. Boyuna kusurların saptanmasında ve boyutlandırılmasında başarılı olan Dairesel MİY,
2. Hacimsel kusurların veya metal-kaybı kusurlarının saptanmasında başarılı olan Eksenel MİY.

Manyetik indüksiyon yöntemi ile ray kontrolünde, tarama bobinleri, raydan belli bir uzaklığa yerleştirilir. Bunlar, ray mantarının yakınındaki DC elektromıknastısı aracılığıyla üretilen manyetik alandaki değişiklikleri saptamak için kullanılır. Ferro-manyetik çelik, raydaki yüzeye yakın veya enine yüzey kusurlarının bulunduğu alanlarda, manyetik alan akısını desteklemez ve akının bir kısmı, malzemenin dışına sızar. Algılama bobinleri, manyetik alandaki bu değişikliği saptar ve kusur bulgularını kaydeder.

MİY sensörleri, yüzeysel ve yüzeye yakın enine çatların ve yuvarlanma temas yorulması kusurlarının tespitinde başarılıdır. Fakat derin içsel çatlakların ve ray tabanı korozyonu gibi kusurların saptanmasında başarılı değildir. Çünkü bu tür kusurlar, manyetik akı çizgilerine paralel çalışır ve bu nedenle yeterli manyetik akı kaçağı sağlamazlar. Ray gövdesi ve tabanındaki kusurlar ise algılama bobinlerinden, saptanamayacak kadar uzakta bulunmaktadır.

Manyetik indüksiyon yönteminin performansı, artan muayene hızından olumsuz etkilenir. Hız arttıkça, ray mantarındaki manyetik akı yoğunluğu azalır. Sonuç olarak, 35 km/sa'ı aşan muayene hızlarında, sinyal, kusurları algılayamayacak kadar zayıf hale gelir. Öte yandan, manyetik indüksiyon sistemlerine ultrasonik probların katılması, yüksek muayene hızlarındaki performansı artırır. Ultrasonik muayene ile yüzey altı içsel kusurlar tespit edilirken, manyetik indüksiyon yöntemiyle de yüzeysel kusurlar tespit edilir ve böylece rayın tüm kesiti taranmış olur. Bu nedenle, manyetik indüksiyon yöntemi, ultrasonik yönteme tamamlayıcı bir sistem olarak kullanılmaktadır. Bu tür kombine ultrasonik/manyetik indüksiyon muayene sistemlerinde, maksimum muayene hızı 35 km/sa'dir [5, 41]. Şekil 4.7'de, birlikte çalışan ultrasonik ve manyetik indüksiyon muayene sistemli test aracı görülmektedir [5].



Şekil 4.7 : Birlikte çalışan manyetik indüksiyon/ultrasonik test aracı [5].

4.6 Raylara Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Ultrasonik yöntem ile manuel olarak düşük hızda ve özel test araçları ile yüksek hızda ray muayenesi yapılabilir. Ultrasonik problar taşıyan test trenleri ile ray muayenesi hızı 70 km/sa'e kadar çıkabilir. Ultrasonik yöntem ile raydaki içsel kusurlar başarıyla tespit edilir. Bunun yanında, ray yüzeyi, gövdesi ve tabanındaki kusurlar da taranır. Fakat manuel ultrasonik yöntem, ray tabanındaki kusurları tespit edemeyebilir. Test trenleri ile yapılan yüksek hızlı muayenede ise 4 mm'den daha küçük olan yüzey kusurları tespit edilemeyebilir. Ultrasonik yöntem, rayların tahribatsız muayenesinde tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan metoddur.

Girdap akımları yöntemi ile manuel olarak düşük hızda ve özel test trenleri ile yüksek hızda ray muayenesi yapılabilir. Girdap akımı sensörleri taşıyan test trenleri ile ray muayenesi hızı 70 km/sa'e kadar çıkabilir. Girdap akımları yöntemi ile ray yüzeyindeki kusurlar ve yüzeye yakın iç kusurlar tespit edilir. Bu yöntem özellikle, ray yüzeyi kırıklarının tespitinde başarılıdır, fakat yüzey altı iç kusurların tespitinde kötü bir performans göstermektedir.

Radyografi yöntemi, manuel olarak uygulanır. Radyografi yöntemi ile ray kaynak kusurları başarıyla tespit edilir. Bu yöntem ayrıca, tahmin edilen bazı kusurların teyit edilmesi amacıyla da uygulanmaktadır. Radyografi yöntemi, diğer tahribatsız muayene yöntemleri tarafından tespit edilemeyen bazı içsel kusurların tespitinde oldukça başarılıdır. Fakat raydaki enine kusurların tespit edilmesinde kötü bir performans göstermektedir.

Sıvı penetrant yöntemi ile sadece raydaki yüzeysel kusurlar tespit edilebilir. Bu nedenle rayların kapsamlı tahribatsız muayenesinde çok fazla kullanılan bir yöntem değildir. Fakat diğer yöntemlere göre daha az maliyetli olması ve uygulanışının kolay olması sebebiyle, özellikle yüzeysel kusurların tespiti için uygulanmaktadır.

Manyetik indüksiyon yönteminde, manyetik akı sensörleri taşıyan özel test trenleri kullanılarak 35 km/sa'e kadar çıkan hızlarda ray muayenesi yapılabilir. Muayene hızı arttıkça, manyetik indüksiyon yönteminin performansı düşmektedir. Manyetik indüksiyon yöntemi ile ray yüzeyindeki kusurlar ve ray mantarındaki yüzeye yakın iç kusurlar tespit edilir. Fakat 4 mm'den daha küçük olan ray mantarı yüzeyine yakın iç kusurlar tespit edilemez. Ayrıca bu yöntemin, ray gövdesi ve tabanındaki kusurları tespit etmesi olanaksızdır [5].

Sonuç olarak, tahribatsız muayene yöntemlerinin bazısının ray yüzeyindeki kusurların tespitinde, bazısının ise ray yüzeyinin altındaki içsel kusurların tespitinde başarılı olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle, tahribatsız muayene yöntemleri, birbirini tamamlayıcı yönde çalışmaktadır. Bu nedenle, rayların etkili ve kapsamlı şekilde muayenesini yapmak için yalnızca tek bir yöntemin değil, birden fazla yöntemin birlikte kullanılması en sağlıklı sonucu verecektir.

5. ÖRNEK HAT ÜZERİNDE ULTRASONİK YÖNTEMİN SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, ray kusurlarının; örnek bir demiryolu hattı üzerinde hangi kesimlerde meydana geldiğini, yoğunlaştığını, bu kusurların UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceğini ve kusurların meydana gelme sebeplerini incelemek için Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı seçilmiştir. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki ray kusurlarını tespit etmek için demiryolu üstyapısında yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayene yöntemi uygulanmıştır. Ultrasonik yöntemde, bünyesinde bulunan problar vasıtasıyla ray içine ultrasonik dalgalar gönderen ve raydaki herhangi bir kusurdan yansıyan bu dalgaları alarak işleyen, bu sayede kusurun yeri ve boyutu hakkında bilgi veren ultrasonik muayene arabası kullanılmıştır. Ultrasonik muayene arabası ile rayda yapılan otomatik ölçümler sonucu kaydedilen hata sinyalleri değerlendirilerek, tespit edilen ray kusurlarının boyutu ve hat üzerindeki yeri belirlenmiştir. Ardından, tespit edilen ray kusurlarının, UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Tespit edilen kusurların türüne dair yapılan değerlendirmeler; kesin bir sonuç içermeyip, yoruma dayanmaktadır. Hatta kullanılan ultrasonik muayene aracının tespit edebildiği kusur türleri ve ultrasonik ölçüm sonucu tespit edilen kusurların özellikleri incelenerek (kusurun rayın hangi bölgesinde meydana geldiği, kusurun hattın hangi kesiminde bulunduğu vb.), bu kusurların UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür kusurlar olabileceği hakkında yorum ve tahminde bulunulmuştur. Son olarak, ray kusurlarının istasyon, yatay kurp ve aliyman gibi farklı hat kesimlerinde ve hatta kullanılan farklı ray kaynağı türlerinde oluşma nedenleri ve görülme sıklığı karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Hat üzerinde ultrasonik ölçüm yapan ve ölçüm sonuçlarını değerlendiren mühendislerin, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından verilen Ultrasonik Muayene 2. Seviye sertifikasına sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle hat üzerindeki ultrasonik ölçümler, İstanbul Ulaşım A.Ş. bünyesinde çalışan, TSE EN

583 Seviye-2 sertifikalı mühendisler ile birlikte yapılmış ve ölçümlerde İstanbul Ulaşım A.Ş.'ye ait olan Geismar Ego-Us marka ultrasonik muayene arabası kullanılmıştır.

5.1 Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı

1989 yılından başlayarak günümüze kadar yolcu taşımaya devam eden Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı, hizmet verdiği güzergâh üzerinde günlük ortalama 220.000 yolcu taşımaktadır. Hat, 1989 yılında kısmen hizmete açılmış, ardından yeni güzergâhlar zaman içinde sisteme dâhil edilerek 2002 yılında bugünkü halini almıştır. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı istasyonlarının hizmete giriş tarihleri Çizelge 5.1'de görülmektedir [48].

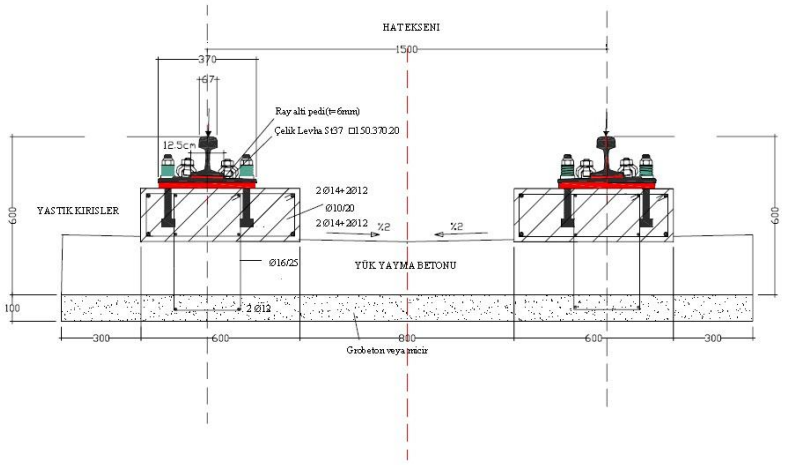
Çizelge 5.1 : Aksaray-Havalimanı Hattı istasyonlarının hizmete giriş tarihleri [48].

İstasyonlar	Hizmete Giriş Tarihi
Aksaray - Kartaltepe	03.09.1989
Esenler	04.12.1989
Otogar - Zeytinburnu	31.01.1994
Zeytinburnu - Bakırköy	07.03.1994
Bakırköy - Ataköy	26.07.1995
Ataköy - Yenibosna	25.08.1995
Bahçelievler	15.01.1999
DTM - Havalimanı	20.12.2002
Yeni Esenler İstasyonu	22.02.2012

Hattın uzunluğu 19,6 km olup; Aksaray, Emniyet, Ulubatlı, Bayrampaşa, Sağmalcılar, Kocatepe, Otogar, Esenler, Terazidere, Davutpaşa, Merter, Zeytinburnu, Bakırköy, Bahçelievler, Ataköy, Yenibosna, DTM ve Havalimanı olmak üzere toplam 18 tane istasyonu vardır. Hattaki toplam tünel uzunluğu 5000 m, viyadük uzunluğu ise 2530 m'dir. Hatta kullanılan minimum yatay kurp yarıçapı 275 m, maksimum dever 140 mm ve maksimum eğim (depo yolunda) % 5,5'dir.

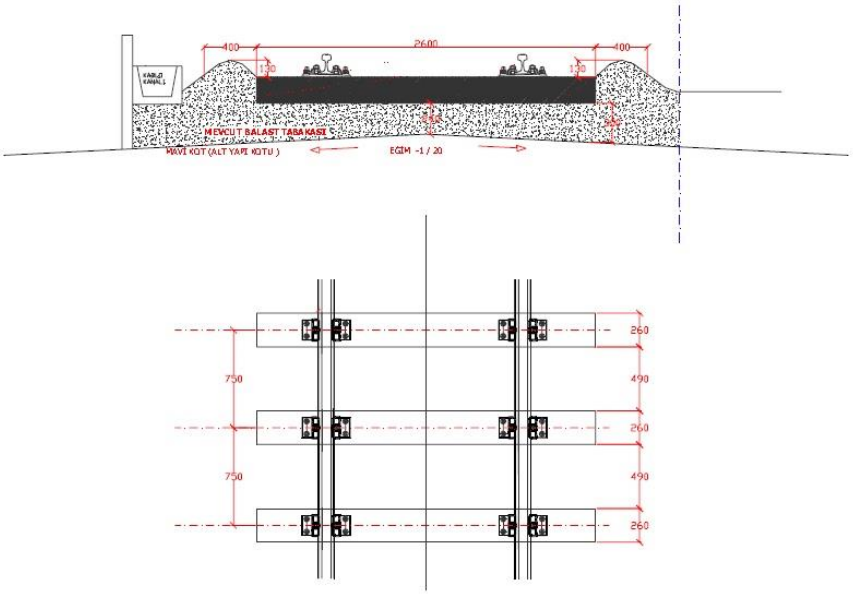
Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda balastlı ve balastsız üstyapı birlikte kullanılmıştır. Hattın Aksaray-Yenibosna arasındaki kesimi balastlı üstyapı, Yenibosna-Havalimanı arasındaki 2 km'lik kesimi ise betona tespitli balastsız üstyapı olarak inşa edilmiştir. Balastlı üstyapıda minimum 40 cm, maksimum 60 cm kalınlığında kalker ve bazalt kullanılmıştır. Betona tespitli balastsız üstyapıda sistem,

yük yayma betonu üzerinde bulunan beton kiriş üzerine sabitlenmiştir. Şekil 5.1'de, Yenibosna-Havalimanı arasındaki hat kesiminde kullanılan betona tespitli üstyapı kesiti görülmektedir [49].

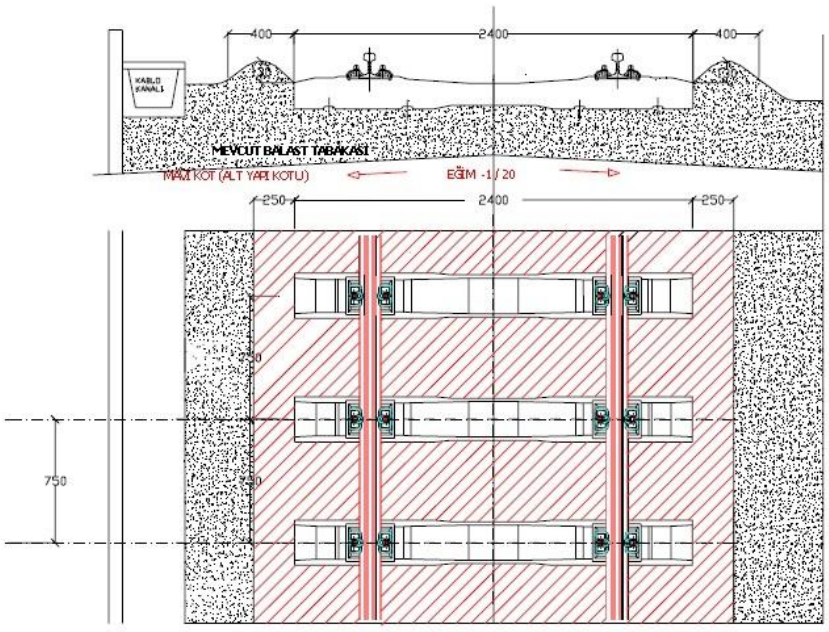


Şekil 5.1 : Betona tespitli üstyapı kesiti kesiti [49].

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol raylar kullanılmıştır. Hemzemin olan hat kesimlerinde S49 rayı, B55 beton travers üzerine Vossloh bağlantı sistemi ile monte edilmiştir. Peronlarda, viyadüklerde ve makas bölgelerinde ise ahşap travers kullanılmıştır. Ahşap traverslerde K tipi bağlantı malzemesi kullanılmıştır. Hatta kullanılan ray kaynağı çeşitleri ise alüminotermit kaynak ve yakma alın kaynağıdır. Şekil 5.2'de, hafif metro hattında kullanılan ahşap traversli üstyapı kesiti, Şekil 5.3'de ise beton traversli üstyapı kesiti görülmektedir [49].



Şekil 5.2 : Ahşap traversli üstyapı kesiti [49].



Şekil 5.3 : Beton traversli üstyapı kesiti [49].

Hatta kullanılan araç tipi ABB marka olup, hattın işletmesini yapan şirket İstanbul Ulaşım A.Ş. bünyesinde toplam 105 adet mevcuttur. 2'li, 3'lü ve 4'lü diziler halinde çalıştırılan araçlar, manuel sürüş sistemine sahiptir ve maksimum 80 km/sa'lik hız yapabilmektedir. Elektrikli ve pnömatik frenleme sistemlerine sahip ABB araçlarında disk ve ray freni mevcuttur. 75 kW motor gücüne sahip araçlarda serbest uyartımlı DC motor bulunmaktadır. Boji motorları seri bağlı olup aracın gücü 300 kW'dır. Hattın tahrik sistemi katener olup 750 VDC besleme voltajı mevcuttur. Hattaki maksimum dingil yükü 8000 kg'dır [49].

5.2 Hatta Kullanılan Ultrasonik Muayene Aracı

Bu çalışmada, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki ray kusurlarını belirlemek ve irdelemek amacıyla İstanbul Ulaşım A.Ş. bünyesindeki hat bakım mühendisleri ile birlikte çalışılarak hattın ultrasonik muayenesi yapılmıştır. Çalışmada, İstanbul Ulaşım A.Ş.'ye ait olan ve her 2 rayda otomatik ultrasonik ölçüm yapabilme kapasitesine sahip Geismar Ego-Us marka ultrasonik muayene arabası kullanılmıştır. Geismar Ego-Us ultrasonik muayene aracı ile her 2 rayın eş zamanlı olarak, ortalama 5 km/sa'lik hız ile otomatik ölçümü yapılmıştır. Şekil 5.4'de, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı üzerinde, İstanbul Ulaşım A.Ş. ile birlikte Geismar Ego-Us ultrasonik ölçüm arabası kullanılarak yapılan ultrasonik muayene çalışması görülmektedir.

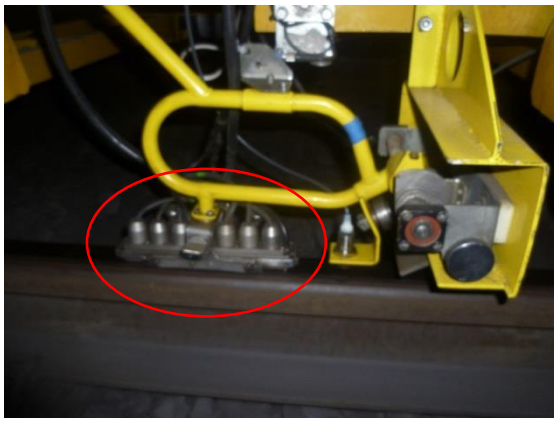


Şekil 5.4 : Örnek hat üzerinde ultrasonik muayene çalışması.

Ultrasonik muayene arabası; demiryolu üstyapısının rutin denetimini kontrollü bir hızda, güvenli ve etkili bir biçimde gerçekleştirmek için özel olarak tasarlanmış ve üzerinde en fazla 2 personelin taşınabildiği bir hat bakım aracıdır. Ultrasonik muayene aracı sisteminin başlıca amacı her 2 rayın otomatik ölçümüdür. Sistem, ultrasonik dalgaların ray tarafından emilme ve ray içindeki çeşitli süreksizliklerden (ray kusurlarından) yansıma özelliğini kullanır. Ultrasonik ray ölçümünde ultrasonik dalgaların üretilmesi, aktarılması ve alınması, muayene aracı sistemi üzerine kurulu olan ultrasonik problar içine monte edilmiş piezoelektrik kristaller tarafından gerçekleştirilir. Ultrasonik problarda bulunan hata dedektörleri aşağıdaki amaçlar için tasarlanmıştır:

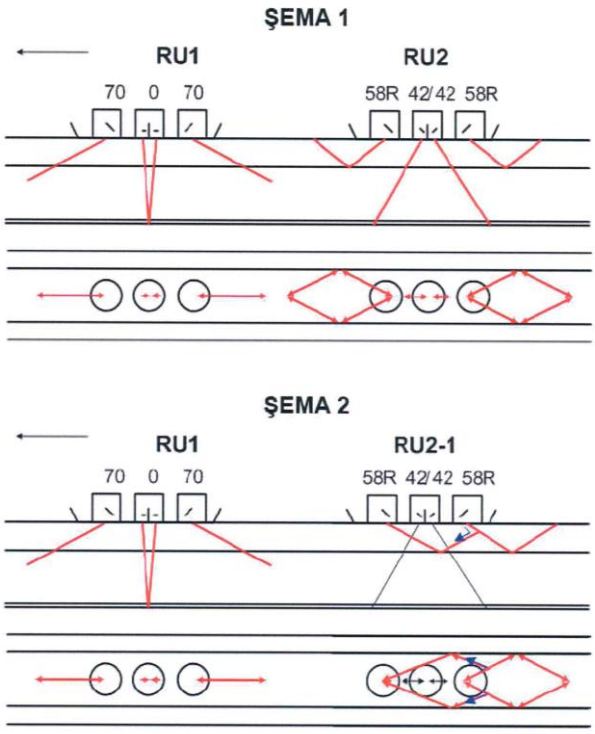
1. Ray içindeki kusurların algılanması ve bu kusurlardan kaynaklanan sinyallerin, otomatik ölçme ve 10 km/sa'e kadar hızlarla ultrasonik piezoelektrik kristaller tarafından kaydedilmesi,
2. Manuel piezoelektrik ultrasonik problar kullanılarak ray kesitlerinin ölçümü,
3. Rayda tespit edilen kusurların yerinin ve sinyal büyüklüklerinin belirlenmesi.

Ultrasonik ölçüm aracında, her bir rayın otomatik ölçümü için 6'şar adet olmak üzere toplam 12 adet ultrasonik prob bulunmaktadır. Probların titreşim frekansı 2,5 MHz'dir. Şekil 5.5'de, ultrasonik muayene aracının, tek bir rayın ölçümünde kullandığı 6 adet probtan oluşan ultrasonik ölçüm düzeneği görülmektedir. Kullanılan ultrasonik probların açıları 0°, 42°, 58° ve 70°'dir.



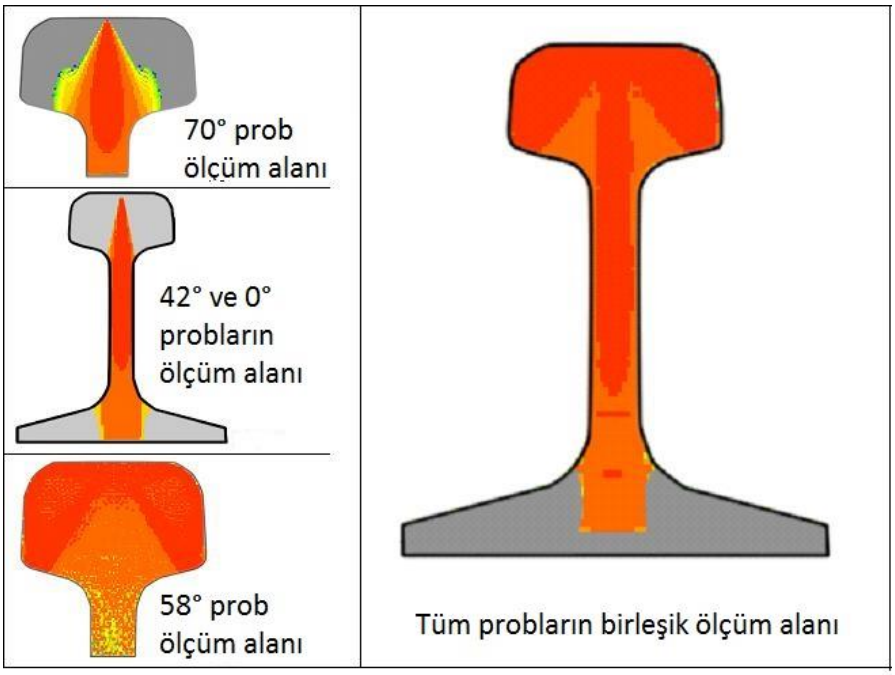
Şekil 5.5 : Ultrasonik ölçüm aracındaki ultrasonik problar.

Her ray; ray mantarını, gövdesini ve tabanını farklı açılarda tarayan 3'er probtan meydana gelen RU1 ve RU2 şeklindeki 2 prob bloğu ile ölçülür. Her bir ray, Şekil 5.6'da gösterilen test şemalarına göre 0°, 42°, 58° ve 70° açılı toplam 6 adet ultrasonik prob tarafından kontrol edilir. Bunun nedeni, rayın farklı bölümlerinde, farklı açılarda ortaya çıkan kusurların, algılanma olasılığını artırmaktır. Kusurlar; rayın farklı bölümlerinde, farklı açılarda bulunabileceği için ultrasonik enerji, birkaç farklı açıdan raya iletilmelidir. Bunu sağlamak için de 0° normal problar ile 42°, 58° ve 70° açılı problar birlikte kullanılır ve böylece ultrasonik dalgalar, birkaç farklı açıdan rayı, kusurlara karşı taramış olur [50].



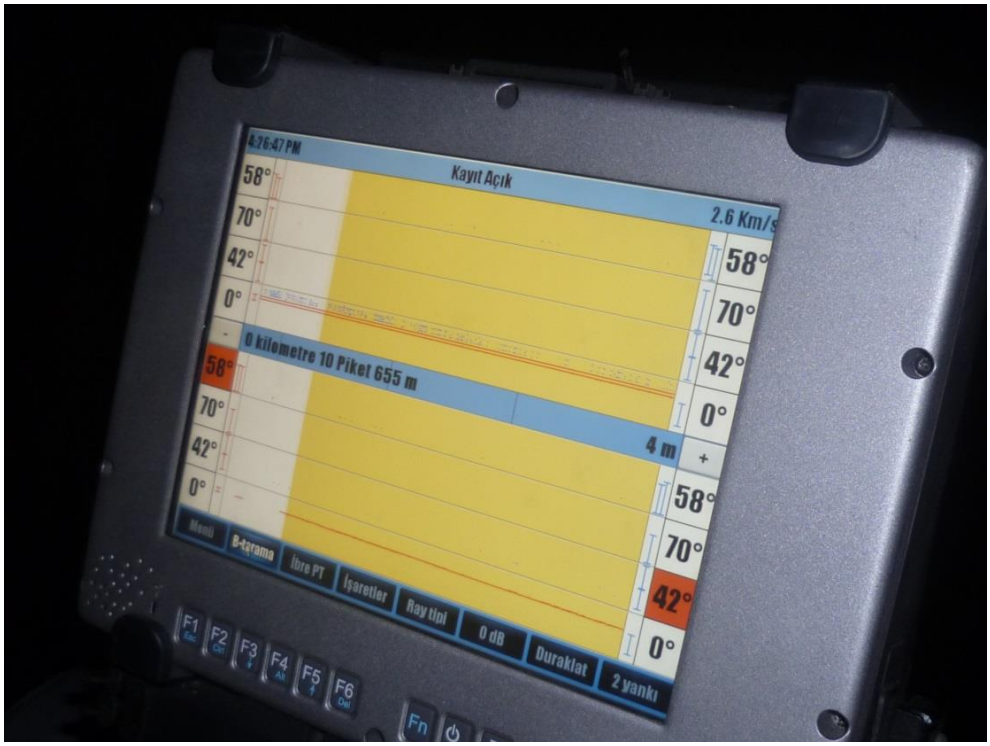
Şekil 5.6 : Sistemin ultrasonik test şemaları [50].

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere 0° açılı problar, tüm ray yüksekliği boyunca ray mantarı, gövdesi ve tabanında ultrasonik ölçüm gerçekleştirir. 0° açılı problar ile tespit edilebilen ray kusurları: ray mantarında yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 112), rayın mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 1321), rayın gövde-taban birleşim yerindeki yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 1322), ray kaynaklarının mantar ve taban kısmındaki enine çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 411 ve 421) ve ray kaynaklarının gövde kısmındaki yatay çatlaklardır (UIC ray kusuru kodu 412 ve 422). 42° açılı problar ile ray mantarı, gövdesi ve tabanının ultrasonik ölçümü gerçekleştirilir. 42° açılı problar ile tespit edilebilen önemli ray kusurları: ray gövdesinde cebire delikleri çevresinde görülen çapraz çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 135) ve ray tabanında korozyon (UIC ray kusuru kodu 254) kusurlarıdır. 58° açılı problar ile ray mantarının ultrasonik ölçümü gerçekleştirilir. Bu problar ile ray mantarındaki yatay çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 112) ve ray mantarındaki enine çatlaklar belirlenir. 70° açılı problar, ray mantarının ultrasonik ölçümünü gerçekleştirir. Bu problar ile tespit edilebilen önemli ray kusurları: ray mantarında oval boşluk kusurları (UIC ray kusuru kodu 211), ray mantarında kılcal çatlaklar (UIC ray kusuru kodu 2223) ve ray kaynaklarının mantar veya taban kısmındaki enine çatlaklardır (UIC ray kusuru kodu 411 ve 421). Şekil 5.7'de, ultrasonik ölçüm aracındaki 0°, 42°, 58° ve 70° açılı probların ray kesiti üzerindeki ölçüm alanları görülmektedir [51].



Şekil 5.7 : Ultrasonik probların raydaki ölçüm alanları [51].

Rayların ultrasonik ölçümü sırasında, problar tarafından herhangi bir ray kusuru tespit edildiği anda, kusura ait sinyaller ultrasonik muayene cihazı ekranında belirir. Dokunmatik ekran üzerinde, ray kusurunun hatta bulunduğu kilometre, rayı kontrol eden problar ve probların açıları görülebilir. Ultrasonik aracın hat üzerindeki gidiş yönüne göre solda kalan ray hattına sinyaller, ekranın üst tarafında; sağda kalan ray hattına ait sinyaller ise ekranın alt tarafında görülür. Şekil 5.8'de, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki ultrasonik muayene sırasında tespit edilen ve tespit edildiği anda ultrasonik muayene cihazı ekranında sinyalleri beliren bir ray kusuruna ait görüntü görülmektedir.

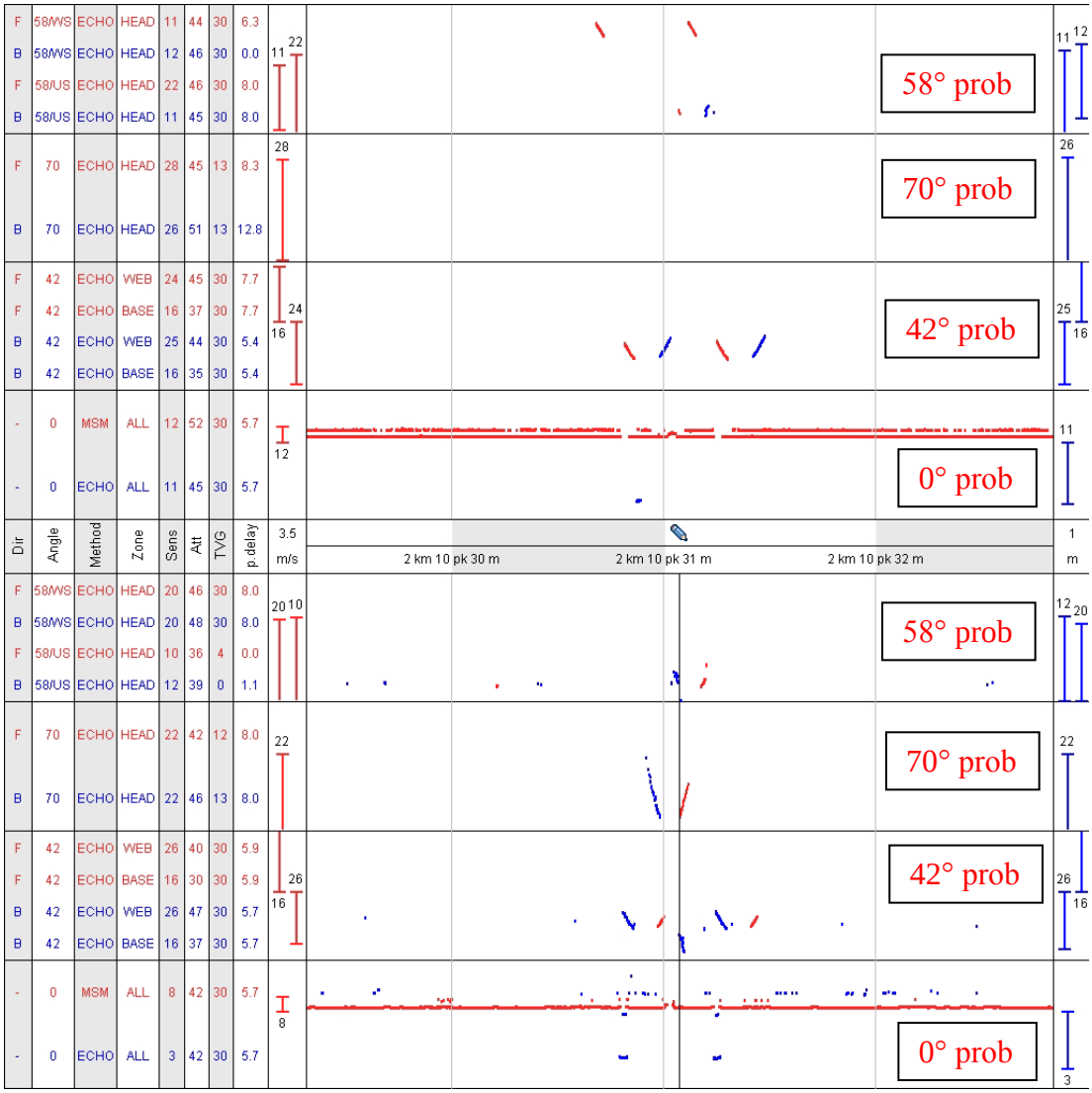


Şekil 5.8 : Ultrasonik cihazın ekranı üzerinde görülen ray kusuru sinyalleri.

Şekil 5.8'deki ultrasonik cihaz ekranındaki kusur kaydı incelendiğinde, ekrandaki mavi bölgede görülen "0 kilometre 10 Piket 655 m" yazısına göre, tespit edilen kusurun hatta bulunduğu kilometre 0+655 olarak belirlenmiştir. Şekilde, ekranın alt kısmında sol tarafta bulunan 58° ve sağ tarafta bulunan 42° yazılarının, kırmızı olduğu görülmektedir. Bu; tespit edilen ray kusurunun 58° ve 42° açılı problar tarafından yakalandığı anlamına gelmektedir. Ekranda otomatik olarak kırmızı ile işaretlenmiş 58° ve 42° prob sinyallerinin, "0 kilometre 10 Piket 655 m" yazısı altındaki alanda bulunması ise, tespit edilen ray kusurunun, aracın gidiş yönüne göre sağ rayda bulunduğunu göstermektedir. Eğer kırmızı ile işaretli problar, ekrandaki "0

kilometre 10 Piket 655 m" yazısı üzerindeki alanda olsaydı, tespit edilen ray kusurunun aracın gidiş yönüne göre sol rayda olduğu anlaşılacaktı.

Rayların ultrasonik muayenesi sırasında, tüm ölçüm otomatik olarak kayıt altına alınır. Son olarak, ultrasonik muayene bittikten sonra muayene sırasında kaydedilen ultrasonik ölçüm kayıtları, USB Flash Bellek kullanılarak başka bir bilgisayara alınır ve ofis ortamında değerlendirmeye alınır. Bu değerlendirme çalışmasında, tespit edilen ray kusurlarının büyüklüğü, hatta bulunduğu kilometre ve rayda bulunduğu bölge belirlenir. Şekil 5.9'da, ultrasonik ölçüm sırasında otomatik olarak kaydedilen bir ray kusuruna ait sinyalin, bilgisayar ortamındaki görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5.9 : Ray kusuru sinyallerinin bilgisayar ortamındaki görüntüsü.

Şekil 5.9'da, 0°, 42°, 58° ve 70° açılı ultrasonik probların, ray kesitindeki ölçüm sinyalleri görülmektedir. Şeklin üst kısmında yer alan 58°, 70°, 42° ve 0° açılı ilk 4

prob sol raydaki ölçüm sinyallerini; şeklin alt kısmındaki 58°, 70°, 42° ve 0° açılı son 4 prob ise sağ raydaki ölçüm sinyallerini göstermektedir. Problar tarafından rayda tespit edilen herhangi bir kusur, şekilde görüldüğü üzere ekranda sinyaller oluşturur. Bu kusur sinyallerinin üzerine tıklandığında ise kusurun büyüklüğü milimetre cinsinden okunmuş olur. Şekilden de anlaşılacağı üzere, 58° ve 70° problar özellikle ray mantarını, 42° problar ray gövdesini ve 0° problar ray tabanını taramaktadır. Bu sayede, tespit edilen kusurun, rayın hangi bölgesinde (mantar-gövde-taban) bulunduğu da belirlenmiş olur. Kusurun bulunduğu kilometre, bilgisayar ortamındaki görüntü üzerinde sol rayın 0° probu ile sağ rayın 58° probu arasında kalan bölgedeki yazıdan okunur.

Ultrasonik ölçüm aracı, maksimum 10 km/sa'lik hız ile ray ölçümü yapabilmektedir. Ultrasonik muayene yapılırken, probun temas edeceği yüzeyin düzgünlüğü ve temizliği son derece önemlidir. Aksi takdirde, muayene yapılacak malzemenin prob temas yüzeyindeki olası pürüzler ve kir, pas, kabarmış boya gibi maddeler, akustik empedans (malzemenin, ses yayılmasına karşı gösterdiği direnç) farkı oluşturacağından cihazın yanlış değerler göstermesine ve yanılsamaya neden olacaktır. Bu nedenle prob, ray yüzeyine temas ettirildiğinde, ultrasonik dalgalarının malzeme içine nüfuz edebilmesi için uygun bir temas sıvısı (su, yağ vb.) kullanılmalıdır. Ultrasonik ölçüm aracında, ultrasonik problar ile ray arasında temas sıvısı olarak su kullanılmaktadır ve sistemin ortalama su tüketimi 25 litre/saat'dir. Ultrasonik ölçüm aracının çalışma sıcaklığı ise -20° ile 50° arasındadır [50].

5.3 Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda Ultrasonik Yöntem Uygulaması

Hat üzerinde 18.06.2013 ile 22.06.2013 tarihleri arasında, İstanbul Ulaşım A.Ş. bünyesinde çalışan TSE Ultrasonik Muayene 2. Seviye sertifikalı hat bakım mühendisleri ile birlikte ultrasonik ölçüm yapılmıştır. Toplam 19,6 kilometre uzunluğundaki demiryolu hattında, ortalama 5 km/sa'lik hız ile ultrasonik ölçüm yapılmıştır. Ultrasonik muayene, hattın demiryolu işletimine kapalı olduğu 01:00 ila 05:00 saatleri arasında yapılmıştır. Çünkü hattın işletime açık olduğu zamanlarda hat üzerindeki trafik, ultrasonik muayene aracının güvenli şekilde ölçüm yapmasına izin vermemektedir. Hat üzerindeki ultrasonik ölçümler, 5 gün içerisinde bitirildikten sonra yaklaşık 1 hafta süren ofiste değerlendirme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, ultrasonik muayene sırasında otomatik olarak kaydedilen tüm ölçüm

kayıtları değerlendirilmiş ve tespit edilen ray kusurlarının büyüklüğü, hatta bulunduğu kilometre ve rayda bulunduğu bölge belirlenmiştir. Ardından, bu kusurların UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

5.3.1 Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Ultrasonik ölçüm ilk olarak Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılmıştır. Aksaray İstasyonu, Havalimanı İstasyonu ile birlikte hattın terminal istasyonlarından biri olup 0-057 ile 0+043 kilometreleri arasında yer almaktadır. Emniyet İstasyonu ise Aksaray İstasyonu'ndan hemen sonraki istasyon olup 0+890 ile 1+032 kilometreleri arasında bulunmaktadır. Buna göre, Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1089 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı tünel içindedir ve balastlı üstyapı kullanılmıştır. Hat kesiminde, 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü alüminotermit ray kaynağıdır. 18 m uzunluğundaki raylar, alüminotermit ray kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1089/18 = 121$$

Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 45 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki 1089 m'lik yolda, toplam 45 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 45/1{,}089 = 41{,}32$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 45 adet kusurun 38 tanesi ray kaynaklarında, 7 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların, ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.2'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.2 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	38	7
Kusur Oranı	% 84,44	% 15,56

Çizelge 5.2'ye göre, alüminotermit kaynaklı Aksaray-Emniyet arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %84,44'lük büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 121 adet alüminotermit ray kaynağından 38 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Aksaray-Emniyet arasındaki alüminotermit ray kaynaklarının %31,40'ı kusur içermektedir. Çizelge 5.3'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kaynağı kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.3 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
0+015	İstasyon	Mantar-gövde	10 mm-5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+015	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+033	İstasyon	Mantar-gövde	10 mm-5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+033	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+051	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+069	Yatay kurba	Mantar-gövde	5 mm - 5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+088	Yatay kurba	Mantar-gövde	5 mm - 5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+106	Aliyman	Mantar-gövde	5 mm - 5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+124	Aliyman	Gövde	15 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+142	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+177	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+177	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+213	Aliyman	Mantar-gövde	10 mm-5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+214	Aliyman	Gövde	5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+220	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+220	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+239	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+275	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.3 (devam) : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
0+294	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+294	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+312	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+330	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+384	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+402	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+402	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+439	Yatay kurba	Mantar-gövde	5 mm - 5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+456	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+456	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+548	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+566	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+596	Aliyman	Mantar-gövde	5 mm - 5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+614	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+614	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+650	Yatay kurba	Mantar-gövde	10 mm-10 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
0+778	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+796	Aliyman	Gövde	5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.3 (devam) : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
0+887	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
0+887	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.3'de görülen, ilgili hat kesiminde tespit edilen 38 adet ray kaynağı kusurunun boyutu, hatta bulunduğu kilometre ve kaynakta bulunduğu bölge ile ilgili bilgiler, ultrasonik ölçüm kayıtları değerlendirilerek elde edilmiştir. Kusurun bulunduğu hat kesimi özelliklerinin belirlenmesi ise kusurun hat üzerinde bulunduğu kilometreden faydalanarak yapılmıştır. Kusurun bulunduğu kilometre, hattın boykesiti üzerinde incelenmiş ve böylece kusurun istasyonda, yatay kurbada veya aliymanda meydana geldiğine karar verilmiştir. Tespit edilen kusurların, hangi tür ray kusuru olabileceği konusundaki değerlendirmeler ise, tezin 3. Bölümü olan "Ray Kusurları" adlı bölümde detaylı olarak işlenen UIC 712 R Standardı'na göre yapılmıştır. Tespit edilen kusurların, UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusuru olabileceği hakkındaki değerlendirmeler; kesin bir sonuç içermeyip, yoruma dayanmaktadır. Hatta kullanılan ultrasonik muayene aracının tespit edebildiği kusur türleri ve ultrasonik ölçüm sonucu tespit edilen kusurların özellikleri incelenerek (kusurun rayın hangi bölgesinde meydana geldiği, kusurun hattın hangi kesiminde bulunduğu vb.), bu kusurların UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusuru olabileceği hakkında yorum ve tahminde bulunulmuştur. UIC 712 R Standardı'na göre alüminotermit ray kaynağı kusurlarının; UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" ve UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" olmak üzere 2 farklı türü vardır. Kullanılan ultrasonik muayene aracındaki rayı kontrol eden özellikle 0° ve 70° açılı problar, bu tür alüminotermit kaynak kusurlarına karşı hassastır ve bu kusurları başarıyla tespit eder. Dolayısıyla, ultrasonik ölçüm sonucunda, ray kaynağının gövde kısmında bulunan kusurların UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak", ray kaynağının mantar kısmında bulunan kusurların ise UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları olabileceği düşünülmektedir. Ray kaynağının hem mantar hem gövde kısmında bulunan kusurların ise UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olabileceği düşünülmektedir çünkü bu kusurlar,

kimi zaman kaynak gövdesinden yukarıya doğru bir eğri şeklinde gelişir ve ray mantarına ulaşır.

Aksaray-Emniyet arasındaki hat kesiminde tespit edilen 38 adet ray kaynağı kusurundan 26 tanesinin mantar bölgesinde meydana gelen UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak", 12 tanesinin ise gövde ve mantar-gövde bölgesinde meydana gelen UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Buna göre, ilgili hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının, türlere göre dağılımı Çizelge 5.4'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.4 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının türlere göre dağılımı.

	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
Kusur sayısı	26	12
Kusur oranı	% 68,42	% 31,58

Aksaray-Emniyet arasındaki hat kesiminde tespit edilen toplam 45 adet kusurdan 7 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çizelge 5.5'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen bu 7 adet ray kusurunun özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
0+058	Yatay kurba	Mantar-gövde	5 mm-5 mm	Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak
0+163	Aliyman	Mantar	15 mm	Mantarda yatay çatlak
0+192	Aliyman	Mantar	5 mm	Mantarda yatay çatlak
0+264	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Gövdede çapraz çatlak
0+898	İstasyon	Mantar	10 mm	Mantarda oval boşluk
0+898	İstasyon	Mantar	20 mm	Mantarda oval boşluk
1+010	İstasyon	Mantar-gövde	5 mm-5 mm	Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak

Çizelge 5.5'de görülen, ilgili hat kesiminde tespit edilen 7 adet ray kusurunun boyutu, hatta bulunduğu kilometre ve rayda bulunduğu bölge ile ilgili bilgiler, ultrasonik ölçüm kayıtları değerlendirilerek elde edilmiştir. Kusurun bulunduğu hat kesimi özelliklerinin belirlenmesinde ise kusurun hat üzerinde bulunduğu kilometreden yararlanılmıştır. Kusurun bulunduğu kilometre, hattın boykesiti üzerinde incelenmiş ve böylece kusurun istasyonda, yatay kurbada veya aliymanda bulunduğuna karar verilmiştir. Tespit edilen ray kusurlarının, hangi tür ray kusurları olabileceği konusundaki değerlendirmeler ise, tezin 3. Bölümü olan "Ray Kusurları" adlı bölümde detaylı olarak işlenen UIC 712 R Standardı'na göre yapılmıştır. Örneğin, hattın 0+058 kilometresinde tespit edilen, rayın hem mantar hem gövde kısmında ortaya çıkmış 5 mm'lik kusurun, ultrasonik muayene aracındaki 0° probların tespit etmekte başarılı olduğu UIC 1321 kodlu "ray mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlak" olduğu düşünülmektedir. Çünkü bu tür kusurlar, rayın mantar-gövde birleşim yerinde ortaya çıkar ve genellikle yukarı doğru hareket ederek ray mantarına ulaşır, böylece rayın hem mantar hem de gövde kısmında kusur tespit edilmiş olur.

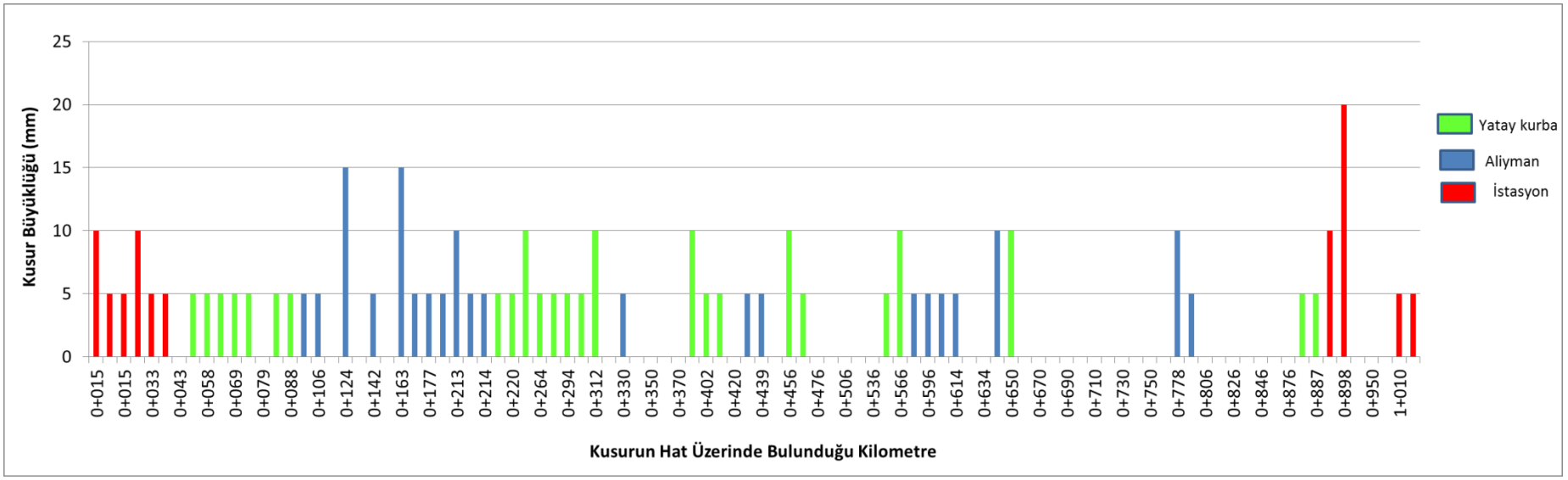
Hattın 0+163 ve 0+192 kilometrelerinde, ray mantarında tespit edilen kusurlar ise hattın yatay kurba veya istasyon içermeyen, aliyman (doğru) kesimlerinde ortaya çıkmıştır. Ray mantarında tespit edilen bu kusurlar, ultrasonik muayene aracındaki 0° ve 58° açılı probların tespit etmekte başarılı olduğu UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak", 70° açılı probun tespit etmekte başarılı olduğu UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" veya UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" kusurları olabilir. Fakat bu kusurlardan, ray mantarında oval boşluk ve ray mantarında kılcal çatlak kusurları, rayın yüksek tekerlek-ray temas gerilmelerine maruz kaldığı yatay kurba veya istasyon kesimlerinde ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, bu 2 kusur, raya etkiyen yüksek tekerlek-ray temas gerilmeleri altında ortaya çıkan "yorulma" kusurlarıdır. Kusurların ortaya çıktığı, hattın 0+163 ve 0+192 kilometreleri ise, yatay kurba veya istasyon içinde olmayıp hattın görece daha düşük gerilmelere maruz kalan aliyman kesimindedir. Bu nedenle, aliymanda tespit edilen bu kusurların ray mantarında oval boşluk veya ray mantarında kılcal çatlak kusuru olma olasılığı oldukça düşüktür. Hattın 0+163 ve 0+192 kilometrelerinde, ray mantarında tespit edilen kusurların UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir.

Hattın 0+264 kilometresinde tespit edilen 5 mm'lik kusur, ray gövdesinde bulunmaktadır. Ray gövdesindeki bu kusurun, ultrasonik muayene aracındaki 42° açılı probların tespit etmekte başarılı olduğu UIC 135 kodlu "ray gövdesinde çapraz çatlak" kusuru olduğu düşünülmektedir.

Hattın 0+898 kilometresinde, her 2 rayda birden ray kusuru tespit edilmiştir. Bu kusurlar ray mantarında olup boyutları 10 mm ve 20 mm'dir. Bu kusurlar, Emniyet İstasyonu içinde meydana gelmiştir. Hattın istasyon kesimlerinde, tekerlekler tarafından raya yüksek hızlanma ve frenleme kuvvetleri uygulanır ve bunun sonucunda ray yüksek boyuna gerilmelere maruz kalır. Hızlanma ve frenleme yükleri hat üzerindeki tekrarlı yükler olduğu için zaman içinde rayda yorulma kusurları meydana gelir. Bu nedenle, hattın 0+898 kilometresinde, istasyon içinde ve ray mantarında tespit edilen bu kusurların "ray mantarında oval boşluk" veya "ray mantarında kılcal çatlak" yorulma kusurlarından biri olduğu düşünülmektedir. Fakat "ray mantarında kılcal çatlak" kusurları, genellikle yüksek tekerlek-ray temas gerilmelere maruz kalan yatay kurbalarında dış rayının iç köşesinde meydana gelen yorulma kusurları olduğu için istasyon içinde meydana gelen bu yorulma kusurlarının UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir. Bu kusurlar, ray üretimindeki hatalardan ötürü meydana gelir ve tekrarlı yüksek tekerlek-ray temas gerilmeleri altında, ray mantarında enine bir çatlak olarak ilerler.

Hattın 1+010 kilometresinde, rayın hem mantar hem gövde kısmında tespit edilen 5 mm'lik kusurun, ultrasonik muayene aracındaki 0° probların tespit etmekte başarılı olduğu UIC 1321 kodlu "ray mantar-gövde birleşim yerindeki yatay çatlak" olduğu düşünülmektedir. Bu tür kusurlar, rayın mantar-gövde birleşim yerinde ortaya çıkar ve genellikle yukarı doğru hareket ederek ray mantarına ulaşır; böylece hem mantar hem gövdede ray kusuruna neden olur.

Şekil 5.10'da, Aksaray-Emniyet arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerindeki kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hat üzerindeki kilometresi.

Şekil 5.10 incelendiğinde, ilgili hat kesiminde tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının yoğunlaştığı bölgelerin, istasyon ve yatay kurba bölgeleri olduğu göze çarpmaktadır. Hattın aliyman bölgelerinin uzunluğu, istasyon ve yatay kurba bölgelerinden daha fazla olduğu halde, istasyon ve yatay kurbalarda tespit edilen kusurların sayısı, aliymandaki kusur sayısından daha fazladır. Bu durum, istasyon ve yatay kurba bölgelerinde, raya daha yüksek gerilmelerin etki etmesiyle ilgilidir. İstasyon giriş ve çıkış bölgelerinde, tekerlek tarafından raya uygulanan yoğun hızlanma ve frenleme kuvvetleri nedeniyle raya etkiyen gerilmeler artmakta, buna bağlı olarak tekrarlı yükler altında zaman içinde ray ve kaynaklarda yorulma kusurları meydana gelmektedir. Yatay kurba bölgelerinde de benzer şekilde, yüksek tekerlek-ray temas gerilimlerine maruz kalan dış rayların iç köşelerinde zamanla yorulma çatlakları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, istasyon ve yatay kurba bölgelerinde ray ve kaynaklarda görülen kusurlar artmaktadır.

5.3.2 Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Emniyet İstasyonu, hattın 0+890 ile 1+032 kilometreleri arasında; Ulubatlı İstasyonu ise 1+935 ile 2+077 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1187 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı tünel içindedir ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde, 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü alüminotermit ray kaynağıdır. 18 m uzunluğundaki raylar, alüminotermit ray kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1187/18 = 131{,}89 \cong 131$$

Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 31 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki 1187 m'lik yolda, toplam 31 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 31/1{,}187 = 26{,}12$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 31 adet kusurun 24 tanesi ray kaynaklarında, 7 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre tespit edilen kusurların, ray ve ray kaynaklarındaki dağılımı Çizelge 5.6'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.6 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	24	7
Kusur Oranı	% 77, 42	% 22,58

Çizelge 5.6'ya göre, alüminotermit kaynaklı Emniyet-Ulubatlı arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %77,42'lik büyük çoğunluğunun, ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 131 adet alüminotermit ray kaynağından 24 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Emniyet-Ulubatlı arasındaki alüminotermit ray kaynaklarının %18,32'si kusur içermektedir. Çizelge 5.7'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kaynağı kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.7 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
1+069	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+087	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+106	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+124	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+196	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+196	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+232	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+232	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+250	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.7 (devam) : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
1+324	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+379	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+413	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+431	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+501	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+595	Yatay kurba	Mantar	20 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+601	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+673	Yatay kurba	Mantar-gövde	10 mm-10 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+766	Yatay kurba	Mantar	20 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+801	Aliyman	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+810	Aliyman	Gövde	10 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+864	Aliyman	Mantar-gövde	5 mm-5 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+872	Aliyman	Gövde	15 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+963	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+963	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.7'de görülen, tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hat üzerindeki kilometresi, kaynakta bulunduğu bölge ve boyutu, ultrasonik ölçüm kayıtlarından elde edilmiştir. Kusurların bulunduğu hat kesiminin özellikleri, ilgili hat kesiminin boykesiti incelenerek belirlenmiştir. Kusurların, UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği konusundaki değerlendirmeler ise tezin 5.3.1. bölümü

olan "Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme" adlı bölümde anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Emniyet-Ulubatlı arasındaki hat kesiminde tespit edilen 24 adet ray kaynağı kusurundan 20 tanesinin mantar bölgesinde meydana gelen UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak", 4 tanesinin ise gövde ve mantar-gövde bölgesinde meydana gelen UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Buna göre, ilgili hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının, türlere göre dağılımı Çizelge 5.8'de görüldüğü gibidir. Çizelge 5.8'de, Emniyet-Ulubatlı arasındaki alüminotermit kaynaklı hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının %83,33'lük büyük çoğunluğunun UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.8 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının türlere göre dağılımı.

	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
Kusur sayısı	20	4
Kusur oranı	% 83,33	% 16,67

Emniyet-Ulubatlı arasındaki hat kesiminde tespit edilen toplam 31 adet kusurdan 7 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmişti. Çizelge 5.9'da, ultrasonik muayene ile tespit edilen bu 7 adet ray kusurunun hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), rayda bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusur boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusuru olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.9 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

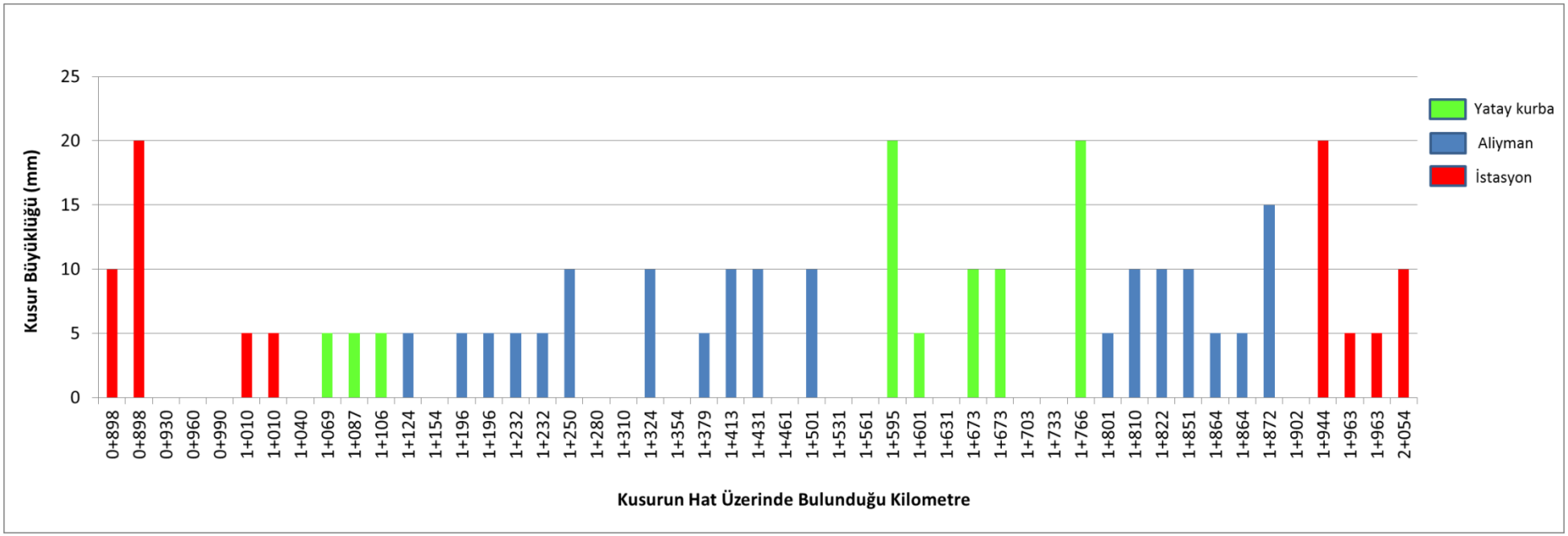
Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
0+898	İstasyon	Mantar	10 mm	Mantarda oval boşluk
0+898	İstasyon	Mantar	20 mm	Mantarda oval boşluk
1+010	İstasyon	Mantar-gövde	5 mm-5 mm	Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak
1+822	Aliyman	Mantar	10 mm	Mantarda yatay çatlak

Çizelge 5.9 (devam) : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
1+851	Aliyman	Mantar	10 mm	Mantarda yatay çatlak
1+944	İstasyon	Gövde	20 mm	Gövdede çapraz çatlak
2+054	İstasyon	Mantar	10 mm	Mantarda oval boşluk

Çizelge 5.9'da görülen, ilgili hat kesiminde tespit edilen 7 adet ray kusurunun boyutu, hatta bulunduğu kilometre ve rayda bulunduğu bölge ile ilgili bilgiler, ultrasonik ölçüm kayıtları değerlendirilerek elde edilmiştir. Kusurun bulunduğu hat kesimi özelliklerinin belirlenmesinde ise hattın boykesitinden yararlanılmıştır. Tespit edilen ray kusurlarının, UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği konusundaki değerlendirmeler ise, tezin 5.3.1. bölümü olan "Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme" adlı bölümde anlatıldığı şekilde yapılmıştır.

Emniyet-Ulubatlı İstasyonları arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik Şekil 5.11'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların istasyon ve aliyman bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Hattın yatay kurba bölgelerinde kusurların yoğun olmamasının sebebi, Emniyet-Ulubatlı arasındaki hat kesiminde az sayıda yatay kurba bulunmasıdır. İlgili hat kesiminde toplam 4 tane yatay kurba vardır ve bu kurbaların 3 tanesinde ray kusuru tespit edilmiştir. Kusurların, hattın aliyman bölgelerinde çok sayıda bulunmasının sebebi de hat kesiminde yatay kurbaların az olması sebebiyle aliyman bölgelerinin büyük yer kaplaması ve dolayısıyla "aliyman" olarak incelenen hat kesiminin uzunluğu arttığı için kusur sayısının da artmasıdır.



Şekil 5.11 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hat üzerindeki kilometresi.

5.3.3 Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Ulubatlı İstasyonu, hattın 1+935 ile 2+077 kilometreleri arasında; Bayrampaşa İstasyonu ise 3+396 ile 3+496 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1561 m'dir. Hattın 1+935 ile 2+360 kilometreleri arasındaki ve 2+660 ile 2+995 kilometreleri arasındaki kesimleri tünel içinde, kalan bölümleri açıklıktadır. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Hattın 1+935 ile 2+360 kilometreleri arasındaki kesiminde alüminotermit ray kaynağı, 2+360 ile 3+496 kilometreleri arasındaki kesiminde ise yakma alın kaynağı kullanılmıştır. Alüminotermit ray kaynağı ile 18 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı ile 16 m uzunluğundaki raylar kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki alüminotermit ve yakma alın kaynağı sayıları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Alüminotermit kaynak sayısı} = 2 * (2360 - 1935)/18 = 47{,}22 \cong 47$$

$$\text{Yakma alın kaynağı sayısı} = 2 * (3496 - 2360)/16 = 142$$

Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 9 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki 1561 m'lik yolda, toplam 9 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 9/1{,}561 = 5{,}76$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 9 adet kusurun 7 tanesi ray kaynaklarında, 2 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre tespit edilen kusurların, ray ve ray kaynaklarındaki dağılımı Çizelge 5.10'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.10 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	7	2
Kusur Oranı	% 77, 78	% 22,22

Çizelge 5.10'a göre, Ulubatlı-Bayrampaşa arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %77,78'lik büyük çoğunluğunun, ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 47 adet

alüminotermit ray kaynağının 5 tanesinde, 142 adet yakma alın kaynağının ise 2 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Ulubatlı-Bayrampaşa arasındaki alüminotermit ray kaynaklarının %10,64'ü, yakma alın kaynaklarının ise %1,41'i kusur içermektedir. Buna göre, alüminotermit ray kaynağı ile yakma alın kaynağı arasında, ray kusuru içerme riski açısından yapılan bu ilk karşılaştırmada alüminotermit kaynakların, yakma alın kaynaklarına göre daha kötü bir performans gösterdiği görülmektedir. Çizelge 5.11'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen bu 7 adet ray kaynağı kusurunun hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kaynağı kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.11 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
1+963	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
1+963	İstasyon	Mantar	5 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
2+126	Aliyman	Mantar	10 mm	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak
2+241	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+241	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+793	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+794	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

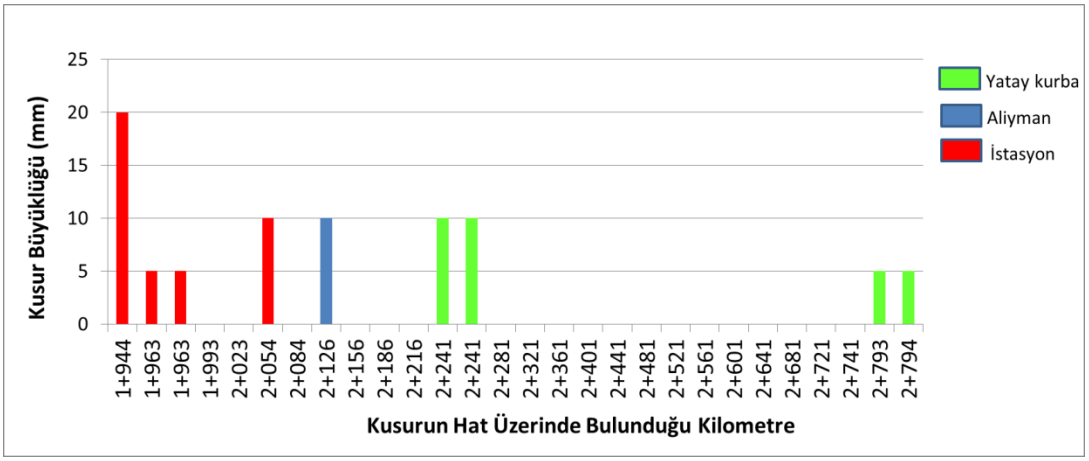
Çizelge 5.11'e göre, yakma alın kaynaklarında tespit edilen 2 kusurun da UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" olabileceği düşünülmektedir. Alüminotermit ray kaynaklarında tespit edilen 5 adet kusurdan 3 tanesinin UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak", 2 tanesinin ise UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" olabileceği düşünülmektedir.

Ulubatlı-Bayrampaşa arasındaki hat kesiminde tespit edilen toplam 9 adet kusurdan 2 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmişti. Çizelge 5.12'de, bu 2 ray kusurunun hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), rayda bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusur boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusuru olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.12 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
1+944	İstasyon	Gövde	20 mm	Gövdede çapraz çatlak
2+054	İstasyon	Mantar	10 mm	Mantarda oval boşluk

Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir.



Şekil 5.12 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

Şekil 5.12 incelendiğinde, tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının, istasyon ve yatay kurba bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, tezin 5.3.1. bölümü olan "Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme" adlı bölümde detaylıca anlatılan istasyon ve yatay kurba bölgelerinde raya daha yüksek gerilmelerin etki etmesiyle ilgilidir.

5.3.4 Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki hat kesimi incelemesi

Bayrampaşa İstasyonu, hattın 3+396 ile 3+496 kilometreleri arasında; Sağmalcılar İstasyonu ise 4+825 ile 4+925 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1529 m'dir. İlgili hat kesiminin, 57 m'lik küçük bir kısmı dışında tamamı açıklıktadır. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1529/16 = 191{,}12 \cong 191$$

Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 17 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki 1529 m'lik yolda, toplam 17 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 17/1{,}529 = 11{,}12$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 17 adet kusurun 12 tanesi ray kaynaklarında, 5 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre tespit edilen kusurların, ray ve ray kaynaklarındaki dağılımı Çizelge 5.13'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.13 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	12	5
Kusur Oranı	% 70,59	% 29,41

Çizelge 5.13'e göre, yakma alın kaynaklı Bayrampaşa-Sağmalcılar arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %70,59'luk büyük çoğunluğunun, ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 191 adet yakma alın kaynağından 17 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Bayrampaşa-Sağmalcılar arasındaki yakma alın kaynaklarının %8,90'ı kusur içermektedir. Çizelge 5.14'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve

kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kaynağı kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.14 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
3+523	Yatay kurba	Gövde	15 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+615	Yatay kurba	Gövde	15 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+616	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+699	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+760	Yatay kurba	Gövde	15 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+414	Yatay kurba	Gövde	15 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+523	Yatay kurba	Gövde	15 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+700	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+738	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+752	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+759	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
4+827	İstasyon	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.14'e göre, Bayrampaşa-Sağmalcılar arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının tümü, kaynakların gövde bölgesinde meydana gelmiştir. Bu kusurların, UIC 712 R Standardı'na göre UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" olduğu düşünülmektedir.

İlgili hat kesiminde tespit edilen toplam 17 adet kusurdan 5 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmişti. Çizelge 5.15'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen bu 5 adet ray kusurunun hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri

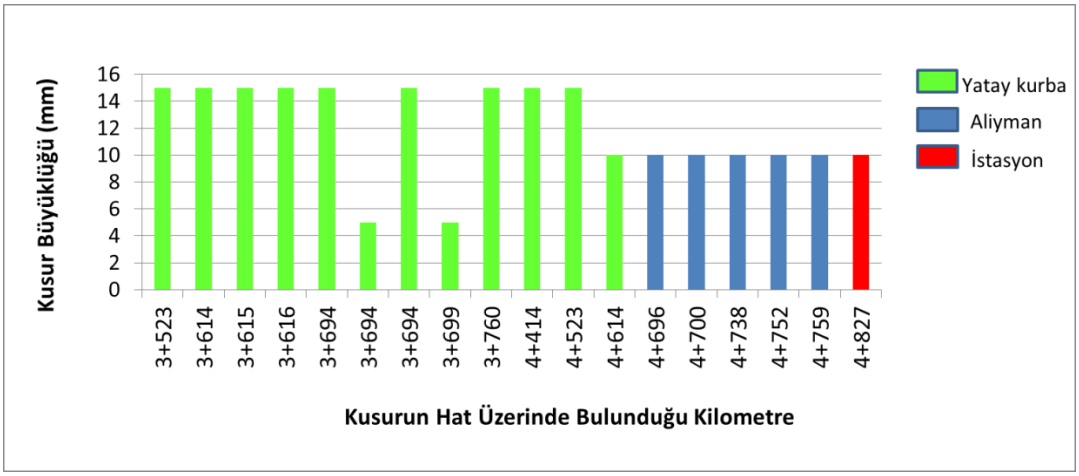
(istasyon-yatay kurp-aliyman), rayda bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusur boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusuru olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.15 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
3+614	Yatay kurba	Mantar	15 mm	Mantarda kılcal çatlak
3+694	Yatay kurba	Mantar-gövde	15 mm-5 mm	Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak
3+694	Yatay kurba	Mantar	15 mm	Mantarda kılcal çatlak
4+614	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Mantarda kılcal çatlak
4+696	Aliyman	Mantar	10 mm	Mantarda yatay çatlak

Çizelge 5.15'de görüldüğü üzere, raylarda meydana gelen kusurların büyük çoğunluğu, mantar bölgesinde ortaya çıkmıştır. Hattın yatay kurba bölgelerinde görülen kusurların, yatay kurbaların dış rayının iç köşesinde yüksek tekerlek-ray temas gerilmelerine bağlı olarak ortaya çıkan UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" yorulma kusurları olabileceği düşünülmektedir. Hattın aliyman bölgelerinde ortaya çıkan kusurların ise görece daha düşük ray gerilmelerinin etkimesi sebebiyle "ray mantarında oval boşluk" veya " ray mantarında kılcal çatlak" gibi yorulma kusuru olma olasılığı düşüktür. Bu nedenle aliymanda ve rayın mantar bölgesinde ortaya çıkan bu kusurların UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" kusurları olabileceği düşünülmektedir. Rayın hem mantar hem de gövde kısmında ortaya çıkan kusurların ise ray gövdesinde başlayıp mantara doğru ilerleyen UIC 1321 kodlu "ray mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak" kusuru olabileceği düşünülmektedir.

Bayrampaşa-Sağmalcılar İstasyonları arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik Şekil 5.13'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

Şekil 5.13'e göre, kusurların büyük çoğunluğunun, hattın yatay kurba bölgelerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Kusurların, yatay kurba bölgelerinde çok sayıda ortaya çıkmasının nedeni, yatay kurbalarda özellikle dış raya etkiyen yüksek tekerlek-ray temas gerilmeleridir. Şekilde, önceki hat kesimlerinden farklı olarak istasyon bölgelerinde oldukça az sayıda kusur meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun, alüminotermit kaynak ile yakma alın kaynağı arasındaki kalite farkından ötürü oluştuğu düşünülmektedir.

5.3.5 Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Sağmalcılar İstasyonu, hattın 4+825 ile 4+925 kilometreleri arasında; Kocatepe İstasyonu ise 6+387 ile 6+487 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1662 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1662/16 = 207{,}75 \cong 207$$

Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 5 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki 1662 m'lik yolda, toplam 5 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 5/1{,}662 = 3{,}01$$

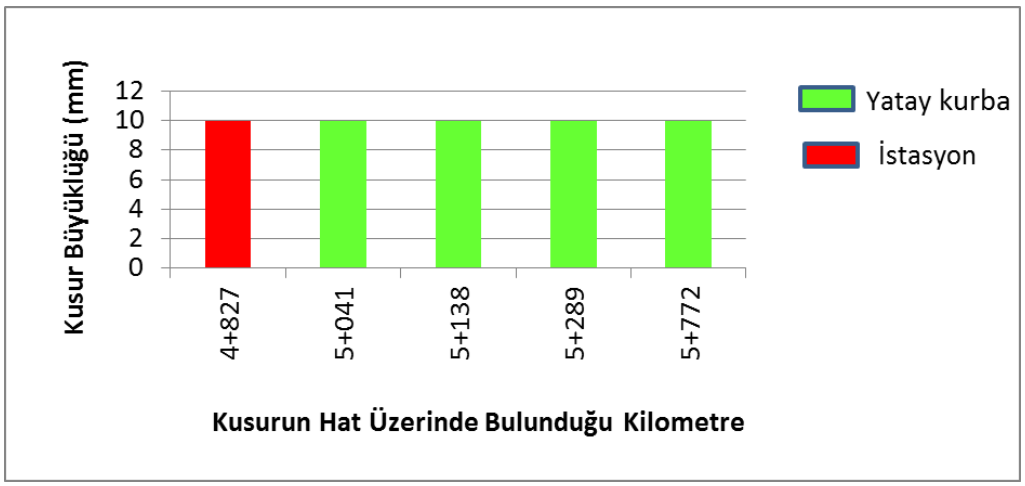
İlgili hat kesiminde tespit edilen 5 adet kusurun tümü ray kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Ultrasonik muayene ile kontrol edilen 207 adet yakma alın kaynağından 5 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Sağmalcılar-Kocatepe arasındaki yakma alın kaynaklarının %2,42'si kusur içermektedir. Çizelge 5.16'da, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kaynağı kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.16 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
4+827	İstasyon	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
5+041	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
5+138	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
5+289	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
5+772	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.16'ya göre, Sağmalcılar-Kocatepe arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının tümü, kaynakların gövde bölgesinde meydana gelmiştir. Bu kusurların, UIC 712 R Standardı'na göre UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" olduğu düşünülmektedir. Sağmalcılar-Kocatepe İstasyonları arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik Şekil 5.14'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların, genel olarak hatta oldukça az sayıda ortaya çıkmakla birlikte en çok yatay

kurba bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir. Hattın aliyman bölgesinde ise hiç kusur tespit edilmediği göze çarpmaktadır.



Şekil 5.14 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

5.3.6 Kocatepe-Otogar İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Kocatepe İstasyonu, hattın 6+387 ile 6+487 kilometreleri arasında; Otogar İstasyonu ise 7+480 ile 7+580 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Kocatepe-Otogar İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1193 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1193/16 = 149{,}12 \cong 149$$

Kocatepe-Otogar İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 7 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Kocatepe-Otogar İstasyonları arasındaki 1193 m'lik yolda, toplam 7 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 7/1{,}193 = 5{,}87$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 7 adet kusurun 5 tanesi ray kaynaklarında, 2 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların, ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.17'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.17 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	5	2
Kusur Oranı	% 71,43	% 28,57

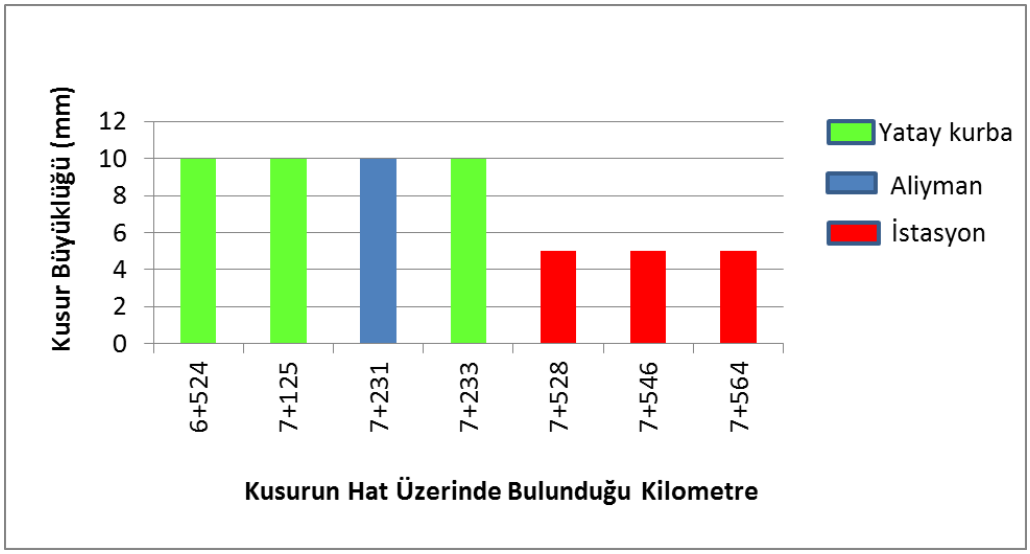
Çizelge 5.17'ye göre, yakma alın kaynaklı Kocatepe-Otogar arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %71,43'lük büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 149 adet yakma alın kaynağından 5 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Kocatepe-Otogar arasındaki yakma alın kaynaklarının %3,36'sı kusur içermektedir.

İlgili hat kesiminde tespit edilen ray ve ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), ray/kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.18'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray/kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır. Hatta tespit edilen kusur sayısı az olduğu için ray ve kaynak kusurları için ayrı ayrı 2 çizelge yapılmamış, sonuçlar aynı çizelge üzerinde verilmiştir.

Çizelge 5.18 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Ray/Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray/Kaynak Kusuru Türü
6+524	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Ray mantarında kılcal çatlak
7+125	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde çatlak
7+231	Aliyman	Mantar	10 mm	Ray mantarında yatay çatlak
7+233	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+528	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+546	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+564	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.18'de görüldüğü üzere, Kocatepe-Otogar arasında tespit edilen kaynak kusurlarının büyük bir kısmının UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak"; rayda tespit edilen 2 adet kusurun ise UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" ve UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Kocatepe-Otogar arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik, Şekil 5.15'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların genel olarak az sayıda ortaya çıkmakla birlikte, daha çok istasyon ve yatay kurba bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.15 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

5.3.7 Otogar-Terazidere İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Otogar İstasyonu, hattın 7+480 ile 7+580 kilometreleri arasında, Terazidere İstasyonu ise 8+630 ile 8+730 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Otogar-Terazidere İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1250 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1250/16 = 156{,}25 \cong 156$$

Otogar-Terazidere İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 15 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Otogar-Terazidere İstasyonları arasındaki 1250 m'lik yolda, toplam 15 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 15/1{,}250 = 12$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 15 adet kusurun 14 tanesi ray kaynaklarında, 1 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların, ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.19'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.19 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	14	1
Kusur Oranı	% 93,33	% 6,67

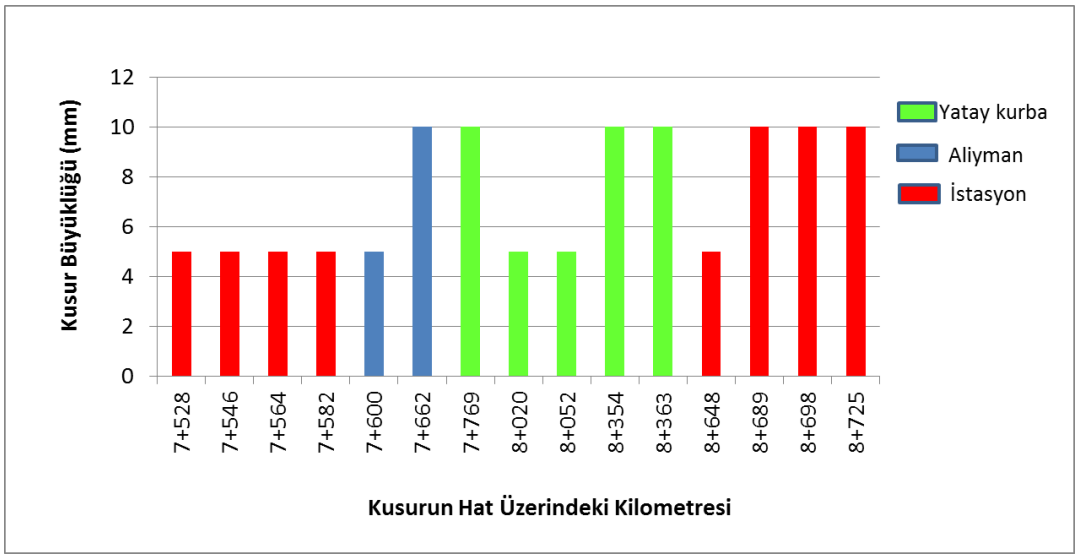
Çizelge 5.19'a göre, yakma alın kaynaklı Otogar-Terazidere arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %93,33'lük büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 156 adet yakma alın kaynağından 14 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Otogar-Terazidere arasındaki yakma alın kaynaklarının %8,97'si kusur içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen ray ve ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), ray/kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.20'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray/kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.20 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Ray/Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray/Kaynak Kusuru Türü
7+528	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+546	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+564	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+582	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+600	Aliyman	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
7+662	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
7+769	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+020	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+052	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+354	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+363	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+648	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+689	İstasyon	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
8+698	İstasyon	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
8+725	İstasyon	Mantar	10 mm	Ray mantarında oval boşluk

Çizelge 5.20'de görüldüğü üzere, Otogar-Terazidere arasında tespit edilen kaynak kusurlarının büyük bir kısmının UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak"; rayda tespit edilen 1 adet kusurun ise UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir. Otogar-Terazidere arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün

hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik, Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların çoğunlukla istasyon ve yatay kurba bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.16 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

5.3.8 Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı, 2 aşama olarak incelenmektedir. 1. aşama Aksaray-Otogar İstasyonları arasında, 2. aşama ise Otogar-Havalimanı İstasyonları arasındadır. Yani, Otogar İstasyonu'nun bitişiyle birlikte, hat, 2. aşamaya geçmekte ve hattın kilometresi tekrar 0+000'dan başlamaktadır. Buna göre, Otogar İstasyonu'ndan bir sonraki istasyon olan Terazidere İstasyonu'nun kilometresi, 2. aşamaya göre 1+050 ile 1+150 kilometreleri arasında, 1. aşamaya göre ise 8+630 ile 8+730 kilometreleri arasında yer almaktadır. Bu bölümde, Terazidere İstasyonu'nun kilometresi, 2. aşama baz alınarak 1+050 ile 1+150 kilometreleri arasında kabul edilmiştir. Davutpaşa İstasyonu ise hattın 2+161 ile 2+252 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1202 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1202/16 = 150{,}25 \cong 150$$

Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 14 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki 1202 m'lik yolda, toplam 14 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 14/1{,}202 = 11{,}65$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 14 adet kusurun 13 tanesi ray kaynaklarında, 1 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların, ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.21'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.21 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	13	1
Kusur Oranı	% 92,86	% 7,14

Çizelge 5.21'e göre, yakma alın kaynaklı Terazidere-Davutpaşa arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %92,86'lık büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. İlgili hat kesiminde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 150 adet yakma alın kaynağından 13 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Terazidere-Davutpaşa arasındaki yakma alın kaynaklarının %8,67'si kusur içermektedir.

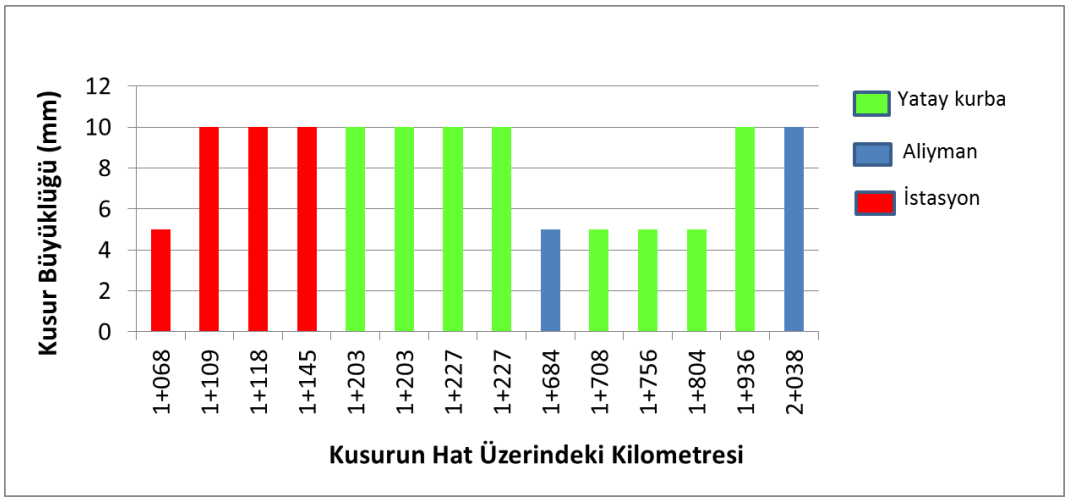
Terazidere-Davutpaşa İstasyonları arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray ve ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), ray/kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.22'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray/kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.22 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Ray/Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray/Kaynak Kusuru Türü
1+068	İstasyon	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
1+109	İstasyon	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
1+118	İstasyon	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+145	İstasyon	Mantar	10 mm	Ray mantarında oval boşluk
1+203	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+203	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+227	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+227	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+684	Aliyman	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
1+708	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
1+756	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+804	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
1+936	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+038	Aliyman	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.22'de görüldüğü üzere, Terazidere-Davutpaşa arasında tespit edilen kaynak kusurlarının büyük bir kısmının UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak"; rayda tespit edilen 1 adet kusurun ise UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir. Terazidere-Davutpaşa arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir ray ve ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik, Şekil 5.17'de verilmiştir. Şekilde, istasyon bölgelerinde görülen kusurlar kırmızı renkte, yatay

kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte ve aliyman bölgelerinde görülen kusurlar mavi renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların çoğunlukla yatay kurba bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.17 : Ray/kaynak kusurlarının boyutları ve hattaki kilometresi.

5.3.9 Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Davutpaşa İstasyonu, hattın 2+161 ile 2+252 kilometreleri arasında, Merter İstasyonu ise 3+682 ile 3+785 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, bu hat kesiminin uzunluğu 1624 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1624/16 = 203$$

Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 11 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki 1624 m'lik yolda, toplam 11 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 11/1{,}624 = 6{,}77$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 11 adet kusurun tümü ray kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Davutpaşa-Merter İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 203 adet yakma alın kaynağından 11 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka

deyişle, Davutpaşa-Merter arasındaki yakma alın kaynaklarının %5,42'si kusur içermektedir.

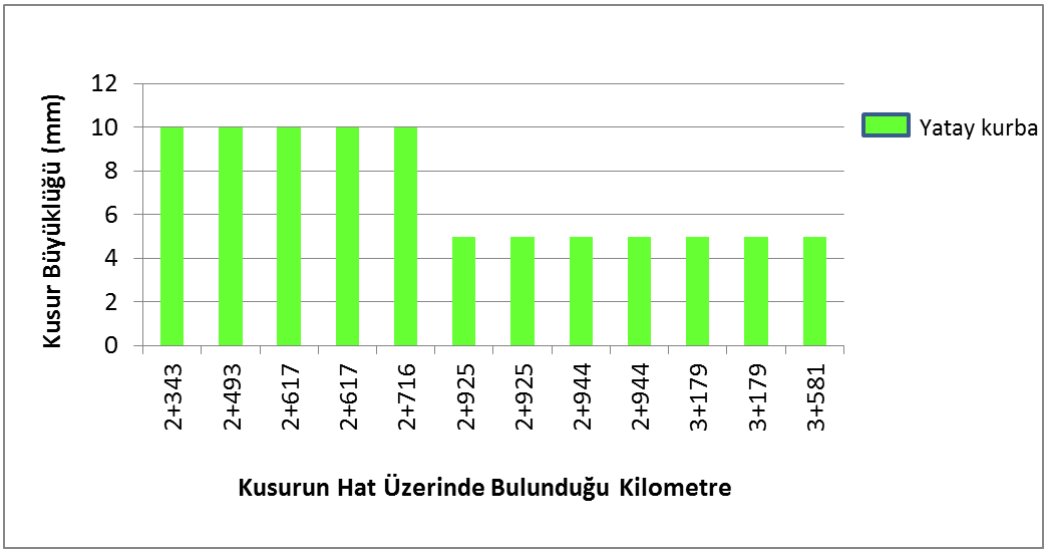
Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.23'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.23 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
2+343	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+493	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
2+617	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
2+617	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
2+716	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+925	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+925	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+944	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
2+944	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+179	Yatay kurba	Gövde-mantar	5 mm-5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
3+581	Yatay kurba	Gövde	5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.23'de görüldüğü üzere, Davutpaşa-Merter İstasyonları arasındaki hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının %72,73'lük büyük çoğunluğunun UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Davutpaşa-Merter arasındaki hat kesiminde, tespit edilen her bir

ray kaynağı kusurunun ve kusur büyüklüğünün, hatta bulunduğu kilometreleri gösteren grafik, Şekil 5.18'de verilmiştir. Şekilde, yatay kurba bölgelerinde görülen kusurlar yeşil renkte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kusurların tümünün yatay kurba bölgelerinde meydana geldiği; istasyon ve aliyman bölgelerinde hiç kusur tespit edilmediği göze çarpmaktadır.



Şekil 5.18 : Ray kusurlarının boyutlarıyla birlikte hattaki kilometresi.

5.3.10 Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Merter İstasyonu, hattın 3+682 ile 3+785 kilometreleri arasında, Zeytinburnu İstasyonu ise 4+610 ile 4+710 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1028 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır ve balastlı üst yapı kullanılmıştır. Hat kesiminde 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1028/16 = 128{,}5 \cong 128$$

Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 1 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasındaki 1028 m'lik yolda, 1 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 1/1{,}028 = 0{,}97$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen kusur, ray kaynağında ortaya çıkmıştır. Merter-Zeytinburnu İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 128 adet yakma alın kaynağından 1 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Merter-Zeytinburnu arasındaki yakma alın kaynaklarının %0,78'i kusur içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen 1 adet ray kaynağı kusuru, hattın 3+976 kilometresinde bulunmakta ve yatay kurba içinde yer almaktadır. Kusur, kaynağın gövde kısmında meydana gelmiştir ve boyutu 15 mm'dir. Kaynağın gövde kısmında ortaya çıkan bu kusurun, UIC 712 R Standardı'na göre UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusuru olduğu düşünülmektedir.

5.3.11 Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Zeytinburnu İstasyonu, hattın 4+610 ile 4+710 kilometreleri arasında, Bakırköy İstasyonu ise 5+965 ile 6+065 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1455 m'dir. İlgili hat kesiminin, Bakırköy İstasyonu'nun bulunduğu 5+965 ile 6+065 kilometreleri arasındaki kesimi dışında tamamı açıklıktadır. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Hattın 4+610 ile 5+965 kilometreleri arasında yakma alın kaynağı, 5+965 ile 6+065 kilometreleri arasında ise alüminotermit ray kaynağı kullanılmıştır. Yakma alın kaynağında, 16 m uzunluğundaki raylar kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki yakma alın kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Yakma alın kaynağı sayısı} = 2 * 1355/16 = 169{,}37 \cong 169$$

Alüminotermit ray kaynağında ise 18 m uzunluğundaki raylar kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki alüminotermit kaynak sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Alüminotermit kaynak sayısı} = 2 * 100/18 = 11{,}11 \cong 11$$

Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 3 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasındaki 1455 m'lik yolda, toplam 3 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 3/1{,}455 = 2{,}06$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 3 adet kusurun tümü rayda ortaya çıkmıştır, ray kaynaklarında hiçbir kusur tespit edilmemiştir. Bir başka deyişle, Zeytinburnu-Bakırköy İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 169 adet yakma alın kaynağı ve 11 adet alüminotermit kaynak hiçbir kusur içermemektedir. Çizelge 5.24'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), rayda bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.24 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
4+780	Aliyman	Mantar	10 mm	Mantarda yatay çatlak
4+940	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Mantarda kılcal çatlak
5+955	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Mantarda kılcal çatlak

Çizelge 5.24'de görüldüğü üzere, tespit edilen ray kusurlarının %66,67'si, hattın yatay kurba bölgelerinde meydana gelmiştir. Bu kusurların, genellikle yatay kurbaların dış rayının iç köşelerinde görülen, UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" yorulma kusurları olduğu düşünülmektedir. Hattın aliyman bölgesinde bölgesinde ve ray mantarında meydana gelen kusurun ise yorulma kusuru olma riski düşük olduğu için UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" kusuru olduğu düşünülmektedir.

5.3.12 Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasındaki hat kesimi incelemesi

Bakırköy İstasyonu, hattın 5+965 ile 6+065 kilometreleri arasında, Bahçelievler İstasyonu ise 7+022 ile 7+122 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1157 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı tünel içindedir. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü

alüminotermit ray kaynağıdır. 18 m uzunluğundaki raylar, alüminotermit kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1157/18 = 128{,}5 \cong 128$$

Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 2 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasındaki 1157 m'lik yolda, toplam 2 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 2/1{,}157 = 1{,}73$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 2 adet kusurun tümü rayda ortaya çıkmıştır, ray kaynaklarında hiçbir kusur tespit edilmemiştir. Bir başka deyişle, Bakırköy-Bahçelievler İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 128 adet alüminotermit kaynak hiçbir kusur içermemektedir. Çizelge 5.25'de, ultrasonik muayene ile tespit edilen ray kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), rayda bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.25 : Tespit edilen ray kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Rayda Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kusuru Türü
6+068	Yatay kurba	Mantar	10 mm	Mantarda kılcal çatlak
7+012	İstasyon	Mantar	5 mm	Mantarda oval boşluk

Çizelge 5.25'de görüldüğü üzere, hattın yatay kurba bölgesinde görülen kusurun, genellikle yatay kurbaların dış rayının iç köşelerinde görülen, UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" yorulma kusurları olduğu düşünülmektedir. Hattın istasyon bölgesinde ve ray mantarında meydana gelen kusurun ise yorulma kusuru olma riski yüksek olduğu için UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir.

5.3.13 Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Bahçelievler İstasyonu, hattın 7+022 ile 7+122 kilometreleri arasında, Ataköy İstasyonu ise 8+587 ile 8+687 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1665 m'dir. İlgili hat kesiminin 7+022 ile 7+600 kilometreleri arasındaki kısmı tünel içinde, diğer kısımları ise açıklıktadır. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Hattın 7+022 ile 7+600 kilometreleri arasında alüminotermit ray kaynağı, 7+600 ile 8+687 kilometreleri arasında ise yakma alın kaynağı kullanılmıştır. Alüminotermit ray kaynağında, 18 m uzunluğundaki raylar kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki alüminotermit kaynak sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Alüminotermit kaynak sayısı} = 2 * 578/18 = 64{,}22 \cong 64$$

Yakma alın kaynağında ise 16 m uzunluğundaki raylar kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki yakma alın kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Yakma alın kaynağı sayısı} = 2 * 1087/16 = 135{,}87 \cong 135$$

Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 2 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki 1665 m'lik yolda, toplam 2 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 2/1{,}665 = 1{,}20$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 2 adet kusurun tümü yakma alın kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 135 adet yakma alın kaynağından 2 tanesinde kusur bulunmuş, 64 adet alüminotermit kaynağın hiçbirinde kusur bulunmamıştır. Bir başka deyişle, Bahçelievler-Ataköy arasındaki yakma alın kaynaklarının %1,48'i kusur içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.26'da verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.26 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
8+160	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
8+220	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.26'da görüldüğü üzere, yakma alın kaynak gövdesinde tespit edilen kusurun UIC 712 R Standardı'na göre UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak", kaynak mantarında tespit edilen kusurun ise UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak" kusuru olduğu düşünülmektedir. Hat kesiminde tespit edilen 2 kusurun da hattın yatay kurba bölgelerinde olduğu göze çarpmaktadır.

5.3.14 Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Ataköy İstasyonu, hattın 8+587 ile 8+687 kilometreleri arasında, Yenibosna İstasyonu ise 9+377 ile 9+477 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 890 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır. Hatta balastlı üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 890/16 = 111{,}25 \cong 111$$

Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 9 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasındaki 890 m'lik yolda, toplam 9 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 9/0{,}890 = 10{,}11$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 9 adet kusurun tümü ray kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Ataköy-Yenibosna İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 111 adet yakma alın kaynağından 9 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Ataköy-Yenibosna arasındaki yakma alın kaynaklarının %8,11'i kusur

içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.27'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.27 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
8+690	İstasyon	Gövde-mantar	5 mm-5 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
9+023	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+126	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
9+130	Yatay kurba	Gövde	10 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
9+302	Aliyman	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+418	İstasyon	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+418	İstasyon	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+468	İstasyon + yatay kurba	Mantar	10 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+474	İstasyon + yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.27'de görüldüğü üzere, tespit edilen ray kaynağı kusurlarının %66,67'sinin UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak", %33,33'ünün ise UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında, tespit edilen kusurların %77,78'inin hattın yatay kurba veya istasyon kesimlerinde, %22,22'sinin ise aliyman kesiminde ortaya çıktığı görülmektedir.

5.3.15 Yenibosna-DTM İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

Yenibosna İstasyonu, hattın 9+377 ile 9+477 kilometreleri arasında, DTM (Dünya Ticaret Merkezi) İstasyonu ise 10+135 ile 10+235 kilometreleri arasında yer

almaktadır. Buna göre, Yenibosna-DTM İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 858 m'dir. İlgili hat kesiminin tamamı açıklıktadır. Hatta balastsız üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 858/16 = 107{,}25 \cong 107$$

Yenibosna-DTM İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 3 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Yenibosna-DTM İstasyonları arasındaki 858 m'lik yolda, toplam 3 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 3/0{,}858 = 3{,}49$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 3 adet kusurun tümü ray kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Yenibosna-DTM İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 107 adet yakma alın kaynağından 3 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, Yenibosna-DTM arasındaki yakma alın kaynaklarının %2,80'i kusur içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.28'de verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.28 : Tespit edilen ray kaynağı kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray Kaynağı Kusuru Türü
9+508	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+508	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak
9+635	Yatay kurba	Mantar	5 mm	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak

Çizelge 5.28'de görüldüğü üzere, tespit edilen kusurların tümü kaynakların mantar bölgesinde meydana gelmiştir ve bu kusurların UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında, tespit edilen 3 kusurun da hattın yatay kurba kesimlerinde meydana gelmiş olması göze çarpmaktadır.

5.3.16 DTM-Havalimanı İstasyonları arasındaki hat kesiminde inceleme

DTM İstasyonu, hattın 10+135 ile 10+235 kilometreleri arasında, Havalimanı İstasyonu ise 11+306 ile 11+416 kilometreleri arasında yer almaktadır. Buna göre, DTM-Havalimanı İstasyonları arasındaki hat kesiminin uzunluğu 1281 m'dir. İlgili hat kesiminin 10+840 ile 11+416 kilometreleri arasındaki kısmı tünel içinde, diğer kısımları açıklıktadır. Hatta balastsız üst yapı ve 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol ray kullanılmıştır. Ray kaynaklarının tümü yakma alın kaynağıdır. 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, ilgili hat kesimindeki ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 1281/16 = 160{,}12 \cong 160$$

DTM-Havalimanı İstasyonları arasındaki hat kesiminde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 3 adet ray kusuru tespit edilmiştir. DTM-Havalimanı İstasyonları arasındaki 1281 m'lik yolda, toplam 3 adet ray kusuru tespit edildiğine göre, ilgili hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 3/1{,}281 = 2{,}34$$

İlgili hat kesiminde tespit edilen 3 adet kusurun 2 tanesi rayda, 1 tanesi ise ray kaynağında ortaya çıkmıştır. DTM-Havalimanı İstasyonları arasında, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 160 adet yakma alın kaynağından 1 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, DTM-Havalimanı arasındaki yakma alın kaynaklarının %0,62'si kusur içermektedir. İlgili hat kesiminde tespit edilen ray ve ray kaynağı kusurlarının hatta bulunduğu kilometre, bulunduğu hat kesiminin özellikleri (istasyon-yatay kurp-aliyman), ray/kaynakta bulunduğu bölge (mantar-gövde-taban) ve kusurların boyutu Çizelge 5.29'da verilmiş; UIC 712 R Standardı'na göre hangi tür ray/kaynak kusurları olabileceği hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.29 : Tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının özellikleri.

Km	Bulunduğu Hat Kesimi	Ray/Kaynakta Bulunduğu Bölge	Boyutu	Ray/Kaynak Kusuru Türü
10+848	Yatay kurba	Gövde	7 mm	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak
11+195	Yatay kurba	Mantar	20 mm	Ray mantarında kılcal çatlak
11+378	İstasyon	Mantar	10 mm	Ray mantarında oval boşluk

Çizelge 5.29'da görülen, hattın 10+848 kilometresinde tespit edilen 7 mm'lik kusur ray kaynağında, 11+195 ve 11+378 kilometrelerinde tespit edilen 20 mm ve 10 mm'lik kusurlar ise rayda ortaya çıkmıştır. Hattın yatay kurba kesiminde ortaya çıkan ray kusurunun UIC 712 R Standardı'na göre UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak", hattın istasyon kesiminde ortaya çıkan kusurun ise UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir. Hattın 10+848 kilometresinde, ray kaynağı gövdesinde tespit edilen kusurun ise UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusuru olduğu düşünülmektedir. Çizelge 5.29'a göre, tespit edilen ray ve kaynak kusurlarının %66,67'sinin hattın yatay kurba kesimlerinde ortaya çıktığı görülmektedir.

5.4 Farklı Ray Kaynağı Türlerinin Ray Kusurlarına Etkisinin İncelenmesi

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, alüminotermit ray kaynağı ve yakma alın kaynağı olmak üzere 2 farklı kaynak türü kullanılmıştır. Tezin 5.3. bölümü olan "Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda Ultrasonik Yöntem Uygulaması" adlı bölümde, ultrasonik ölçüm sonuçları, hatta birbirini izleyen her bir istasyon kesimi bazında değerlendirilmiş; hatta kullanılan alüminotermit ve yakma alın kaynakları bazında önemli bir inceleme yapılmamıştır. Tezin bu bölümünde, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurları, hatta kullanılan alüminotermit kaynak ve yakma alın kaynağı bazında değerlendirilmiş ve farklı ray kaynağı türlerinin ray kusurlarına etkisi incelenmiştir.

5.4.1 Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde inceleme

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın alüminotermit kaynaklı kesimleri, Aksaray-Emniyet-Ulubatlı-Bayrampaşa İstasyonları arasındaki 2417 m'lik kesim ve

Bakırköy-Bahçelievler-Ataköy İstasyonları arasındaki 1635 m'lik kesimdir. Buna göre, hattaki alüminotermit kaynaklı kesimin toplam uzunluğu 4052 m'dir. Hattın alüminotermit kaynaklı kesimlerinin tamamı tünel içindedir ve kullanılan ray tipi 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol raylardır. Hattın bu kesimlerinde, 18 m uzunluğundaki raylar, alüminotermit kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, hattaki toplam alüminotermit ray kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 4052/18 = 450{,}22 \cong 450$$

Alüminotermit kaynaklı hat kesimlerinde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 78 adet kusur tespit edilmiştir. Hattın alüminotermit kaynaklı kesimleri toplam 4052 m olduğuna göre, alüminotermit kaynaklı hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 78/4{,}052 = 19{,}25$$

Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde tespit edilen 78 adet kusurun 65 tanesi ray kaynaklarında, 13 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.30'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.30 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	65	13
Kusur Oranı	% 83,33	% 16,67

Çizelge 5.30'a göre, alüminotermit kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların %83,33'lük büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir. Hattın alüminotermit kaynaklı kesimlerinde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 450 adet alüminotermit kaynaktan 65 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle, hattaki alüminotermit kaynakların %14,44'ü kusur içermektedir. Alüminotermit kaynaklarda tespit edilen 65 adet kusurun 47 tanesi kaynağın mantar kısmında, 18 tanesi ise kaynağın gövde veya gövde-mantar kısmında ortaya çıkmıştır. Kaynakların mantar kısmında tespit edilen kusurların UIC 712 R Standardı'na göre UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak", kaynakların gövde veya gövde-mantar kısmında tespit edilen kusurların ise UIC 422 kodlu "alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu

düşünülmektedir. Çizelge 5.31'de, alüminotermit kaynaklarda tespit edilen kaynak kusurlarının özellikleri görülmektedir.

Çizelge 5.31 : Alüminotermit kaynak kusurlarının özellikleri.

	Kaynak Mantarı	Kaynak Gövdesi
Kusur Sayısı	47	18
Kusur Oranı	% 72,31	% 27,69
Kusur Türü	Alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak	Alüminotermit kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.31'de, alüminotermit kaynaklarda görülen kusurların %72,31'lik büyük çoğunluğunun, kaynakların mantar bölgesinde ortaya çıktığı görülmektedir ve bu kusurların UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir.

Hattın alüminotermit kaynaklı kesimlerinde tespit edilen toplam 78 adet kusurun 13 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmişti. Bu kusurlardan 9 tanesi ray mantarında, 2 tanesi ray gövdesinde ve 2 tanesi rayın hem mantar hem gövde kısmında meydana gelmiştir. Buna göre, rayda tespit edilen kusurların %76,92'lik büyük çoğunluğunun ray mantarında ortaya çıktığı göze çarpmaktadır. Çizelge 5.32'de, alüminotermit kaynaklı kesimde tespit edilen ray kusurlarının özellikleri görülmektedir.

Çizelge 5.32 : Alüminotermit kaynaklı kesimde ray kusurlarının özellikleri.

Ray Kusuru Türü	Kusur Sayısı	Kusur Oranı
Mantarda yatay çatlak	4	%30,77
Mantarda oval boşluk	4	%30,77
Gövdede çapraz çatlak	2	%15,38
Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak	2	%15,38
Mantarda kılcal çatlak	1	%7,70

Çizelge 5.32'ye göre, alüminotermit kaynaklı kesimde %30,77'lik görülme oranıyla en yoğun olarak görülen ray kusurlarının UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" ve UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru olduğu düşünülmektedir. Bu kusurları, %15,38'lik görülme oranıyla UIC 135 kodlu "ray

gövdesinde çapraz çatlak" ve UIC 1321 kodlu "rayın mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak" kusurları gelmektedir. Son olarak, UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" kusurunun, hatta görülme oranı en düşük olan ray kusuru olduğu düşünülmektedir.

5.4.2 Yakma alın kaynaklı hat kesiminde inceleme

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın alüminotermit kaynaklı kesimleri dışındaki tüm kesimleri yakma alın kaynaklıdır. Yani, hattın Bayrampaşa-Otogar İstasyonları arasındaki 5220 m'lik kesimi ve Otogar-Havalimanı İstasyonları arasındaki 9781 m'lik kesimi yakma alın kaynaklıdır. Buna göre, hattaki yakma alın kaynaklı kesimin toplam uzunluğu 15001 m'dir. Hattın yakma alın kaynaklı kesimlerinin 916 m'si tünel içinde, 14085 m'si ise açıklıktadır. Hatta 900 A kalitesindeki S49 tipi Vinyol raylar kullanılmış ve 16 m uzunluğundaki raylar, yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak, hattaki toplam yakma alın kaynağı sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Ray kaynağı sayısı} = 2 * 15001/16 = 1875{,}12 \cong 1875$$

Yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde yapılan ultrasonik muayene sonucunda, ray ve kaynaklarda toplam 84 adet kusur tespit edilmiştir. Hattın yakma alın kaynaklı kesimleri toplam 15001 m olduğuna göre, yakma alın kaynaklı hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Km başına düşen ray kusuru sayısı} = 84/15{,}001 = 5{,}60$$

Yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen 84 adet kusurun 71 tanesi ray kaynaklarında, 13 tanesi ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı Çizelge 5.33'de verilmiştir. Çizelge 5.33'de görüldüğü üzere, yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen kusurların %84,52'lik büyük çoğunluğunun ray kaynaklarında ortaya çıktığı görülmektedir.

Çizelge 5.33 : Tespit edilen kusurların ray ve kaynaklardaki dağılımı.

	Ray Kaynağı	Ray
Kusur Sayısı	71	13
Kusur Oranı	% 84,52	% 15,48

Hattın yakma alın kaynaklı kesimlerinde, ultrasonik muayene ile kontrol edilen 1875 adet yakma alın kaynağından 71 tanesinde kusur bulunmuştur. Bir başka deyişle,

hattaki yakma alın kaynaklarının %3,79'u kusur içermektedir. Yakma alın kaynaklarında tespit edilen 71 adet kusurun 28 tanesi kaynağın mantar kısmında, 43 tanesi ise kaynağın gövde veya gövde-mantar kısmında ortaya çıkmıştır. Kaynakların mantar kısmında tespit edilen kusurların UIC 712 R Standardı'na göre UIC 411 kodlu "yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak", kaynakların gövde veya gövde-mantar kısmında tespit edilen kusurların ise UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Çizelge 5.34'de, yakma alın kaynaklarında tespit edilen kaynak kusurlarının özellikleri görülmektedir.

Çizelge 5.34 : Yakma alın kaynak kusurlarının özellikleri.

	Kaynak Mantarı	Kaynak Gövdesi
Kusur Sayısı	28	43
Kusur Oranı	% 39,44	% 60,56
Kusur Türü	Yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak	Yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak

Çizelge 5.34'de, yakma alın kaynaklarında görülen kusurların %60,56'lık büyük çoğunluğunun, kaynakların gövde bölgesinde ortaya çıktığı görülmektedir ve bu kusurların UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir.

Hattın yakma alın kaynaklı kesimlerinde tespit edilen toplam 84 adet kusurun 13 tanesinin rayda ortaya çıktığı belirlenmişti. Bu kusurlardan 12 tanesi ray mantarında, 1 tanesi ise rayın hem mantar hem gövde kısmında meydana gelmiştir. Buna göre, rayda tespit edilen kusurların %92,31'lik büyük çoğunluğunun ray mantarında ortaya çıktığı göze çarpmaktadır. Çizelge 5.35'de, yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının özellikleri görülmektedir. Çizelge 5.35'e göre, yakma alın kaynaklı hat kesiminde, %53,85'lik görülme oranıyla en yoğun olarak görülen ray kusurunun UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" olduğu düşünülmektedir. Bu kusuru, %23,08'lik görülme oranıyla UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" kusuru izlemektedir. Ardından, %15,38'lik görülme oranıyla UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusuru gelmektedir. Son olarak, UIC 1321 kodlu "rayın mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak" kusurunun, rayda görülme oranı en düşük olan ray kusuru olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.35 : Yakma alın kaynaklı kesimde ray kusurlarının özellikleri.

Ray Kusuru Türü	Kusur Sayısı	Kusur Oranı
Mantarda kılcal çatlak	7	%53,85
Mantarda yatay çatlak	3	%23,08
Mantarda oval boşluk	2	%15,38
Mantar-gövde birleşim yerinde yatay çatlak	1	%7,69

5.4.3 Alüminotermit ve yakma alın kaynaklı hat kesimlerinin karşılaştırması

Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde tespit edilen kusurların %83,33'ü ve yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen kusurların %84,52'si ray kaynaklarında ortaya çıkmıştır. Buna göre, hem alümiotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların, ray kaynaklarında yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun sebebi, kaynak malzemesi ile rayın bütünüyle aynı malzeme özelliklerine sahip olmamasıdır. Kaynak, mineral kompozisyonu ve tanecik yapısıyla raydan farklıdır. Bundan dolayı; çarpma kuvvetlerini, sürtünme ve kayma gerilmelerini ray ile aynı seviyede karşılayamaz.

Hattın 4052 m uzunluğundaki alüminotermit kaynaklı kesiminde toplam 78 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı 19,25'dir. Hattın 15001 m uzunluğundaki yakma alın kaynaklı kesiminde ise toplam 84 adet ray kusuru tespit edilmiştir. Yakma alın kaynaklı hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı 5,60'dır. Buna göre, alüminotermit kaynaklı kesimde km başına düşen ray/kaynak kusuru sayısı, yakma alın kaynaklı kesimde km başına düşen ray/kaynak kusuru sayısının yaklaşık 3,44 katıdır.

Hatta ultrasonik yöntemle kontrol edilen 450 adet alüminotermit kaynaktan 65 tanesinde kusur bulunmuştur. Yani, alüminotermit kaynakların %14,44'ü kusur içermektedir. Hatta ultrasonik muayene ile kontrol edilen 1875 adet yakma alın kaynağından 71 tanesinde kusur bulunmuştur. Yani, yakma alın kaynaklarının %3,79'u kusur içermektedir. Buna göre, alüminotermit kaynaklardaki kusur oranı, yakma alın kaynaklarındaki kusur oranının 3,81 katıdır. Alüminotermit kaynakların, kusur içerme riski açısından yakma alın kaynaklarına göre daha kötü bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumun sebebi, alüminotermit kaynaklarda, iki

ray ucunu birleştirmek için ray çeliğinden farklı özelliklere sahip "termit" adlı bir malzemenin kullanılmasıdır. Ray uçları, 50 mm boyunca kuvvetlice ısıtılır ve bu; kristal yapının değişmesine ve mekanik özelliklerin bozulmasına neden olur. Isıdan etkilenen bölge büyük olduğu için sertliğin azaldığı bölge de büyüktür ve kaynak geçiş bölgelerinde sertlikte düşme olur, kaynak kalitesi düşer. Yakma alın kaynaklarında ise, alüminotermit kaynağın aksine, iki ray ucunu birleştirmek için başka bir kimyasal malzeme veya metal kullanılmaz, ana metal (ray) eritilerek kaynak yapılır. Yakma alın kaynaklarında, iki ray arasında başka özelliklere sahip farklı bir malzeme kullanılmadığı için kaynak kalitesi ve yorulma mukavemeti daha yüksektir. Bunun yanında, ısıdan etkilenen bölge daha küçük olduğu için sertlik derecesi düşmüş olan bölge de daha küçüktür; yani alüminotermit kaynağa göre sertlik dağılımı daha homojendir. Ayrıca, yakma alın kaynakları, mobil yakma alın kaynak makineleriyle yapıldığı için işçilik hataları çok azdır. Alüminotermit kaynak yapımında ise makine kullanılmaz ve işçilik hatalarına çok sık rastlanır.

Alüminotermit kaynaklarda görülen kusurların %72,31'lik büyük kısmı, kaynağın mantar kısmında ortaya çıkmıştır. Bu kusurların UIC 421 kodlu "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Yakma alın kaynaklarında görülen kusurların ise %60,56'lık büyük çoğunluğu, kaynağın gövde kısmında ortaya çıkmıştır. Bu kusurların UIC 412 kodlu "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir. Buna göre, alüminotermit kaynaklarda, çoğunlukla mantar kısmında ortaya çıkan "alüminotermit kaynak kesitinde enine çatlak" kusurları; yakma alın kaynaklarında ise çoğunlukla gövde kısmında ortaya çıkan "yakma alın kaynak gövdesinde yatay çatlak" kusurları görüldüğü sonucuna varılmıştır.

Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının (kaynak kusurları dışındaki ray kusurları) %76,92'si ve yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen ray kusurlarının %92,31'i ray mantarında ortaya çıkmıştır. Buna göre, hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde görülen ray kusurlarının, mantar kısmında yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır. Alüminotermit kaynaklı kesimdeki ray kusurlarının büyük çoğunluğunun UIC 112 kodlu "ray mantarında yatay çatlak" ve UIC 211 kodlu "ray mantarında oval boşluk" kusurları olduğu; yakma alın kaynaklı kesimdeki ray kusurlarının büyük çoğunluğunun ise UIC 2223 kodlu "ray mantarında kılcal çatlak" kusurları olduğu düşünülmektedir.

6. RAY GERİLMELERİ VE RAY KUSURLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

Ray gerilmelerinin; ray kusurlarının ortaya çıkması ve ray kusurlarının boyutu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon gibi farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri hesaplanmıştır. Ray gerilmelerini hesaplamak için öncelikle hat durumuna bağlı olarak değişen dinamik etki katsayısı, raya etkiyen düşey tekerlek yükleri ve yanal tekerlek yükleri belirlenmiştir. Ardından, ray tabanında meydana gelen eğilme gerilmeleri, rayda sıcaklık değişimi nedeniyle oluşan termal gerilmeler, tekerlek ve ray arasındaki temas nedeniyle ortaya çıkan ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Tekerlek ve ray arasındaki temas, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerinde farklı olduğu için bu bölgelerdeki tekerlek-ray temas gerilmeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Benzer şekilde, tekerlek-ray teması nedeniyle meydana gelen ray mantarındaki kayma gerilmeleri de, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerindeki tekerlek-ray teması birbirinden farklı olduğu için bu bölgelerde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Son olarak, demiryolu aracının frenleme ve hızlanma hareketleri nedeniyle özellikle istasyon bölgelerinde ortaya çıkan boyuna kuvvetler hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonucu elde edilen ray tabanındaki en büyük eğilme gerilmesi, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi ile karşılaştırılarak rayın güvenliği tahkik edilmiştir.

Rayda meydana gelen eğilme gerilmeleri, termal gerilmeler, tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleri yukarıda anlatıldığı şekilde hesaplandıktan sonra, hatta ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurlarının; aliyman, yatay kurba ve istasyon gibi farklı hat kesimlerindeki dağılımları incelenmiştir. Hesaplanan ray gerilmelerinin birbirinden farklı olduğu aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerindeki ray kusuru dağılımlarının, ray gerilmeleri ile ilişkisi araştırılmıştır.

Ray gerilmelerinin, ray kusurları üzerindeki etkisini incelemek için yapılan bir başka analiz ise hattın farklı kesimlerinde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurlarının ortalama boyutunun birbiriyle karşılaştırılmasıdır. Bunun için ray gerilmelerinin birbirinden farklı olduğu yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgelerinde, tespit edilen

ray kusurlarının ortalama boyutu hesaplanmış ve bu bölgelerdeki ray gerilmeleri ile ilişkisi irdelenmiştir.

6.1 Dinamik Etki Katsayısı ve Tekerlek Yüklerinin Hesaplanması

Hemen hemen tüm ray gerilmelerinin hesabında kullanılan en temel parametre düşey tekerlek yüküdür. Düşey tekerlek yükü, demiryolu aracının dingil yükünün 2'ye bölünmesiyle elde edilir. Fakat bu değer, yalnızca statik düşey tekerlek yükünü ifade eder. Demiryolu hatlarının tasarımında kullanılan tekerlek yükü ise dinamik düşey tekerlek yüküdür. Dinamik tekerlek yükünde; tren hızı nedeniyle rayda oluşan tekerlek çarpma etkileri, hat üstyapısındaki düzensizlikler, ray yüzeyindeki kusurlar ve tekerlek profillerindeki bozulmalar nedeniyle raya etkiyen tekerlek yükündeki artış dikkate alınır. Dinamik düşey tekerlek yükünü hesaplamak için statik düşey tekerlek yükü, "dinamik etki katsayısı" adlı bir katsayı ile çarpılır.

Demiryolu araştırmacıları ve uluslararası demiryolu kurumları, dinamik etki katsayısını hesaplamak için pek çok formül geliştirmişlerdir. Bu ampirik formüllerde dinamik etki katsayısı, genellikle tren hızına bağlı olarak hesaplanır. Zaman içinde geliştirilen formüllerde kullanılan diğer parametreler ise araç ve demiryolu hattı ile ilgilidir. Bu parametreler: tekerlek yarıçapı, statik tekerlek yükü, aracın ağırlık merkezi, aracın bakım durumu, hat katsayısı, ray contalarındaki hat rijitliği, yatay kurbalarda eksik dever, kurba yarıçapı ve hat bakım durumudur [26].

Bu çalışmada, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki dinamik düşey tekerlek yükünü hesaplamak için kullanılan dinamik etki katsayısı, Eisenmann'ın dinamik etki katsayısı formülünden elde edilmiştir. Eisenmann'ın formülü, dinamik etki katsayısının hesabı için hat kalitesi (hat durumu) ve tren hızına bağlı istatiksel bir yaklaşım sunar. Eisenmann'ın formülüne göre dinamik etki katsayısının hesabı, Bağıntı (6.1)'de verilmiştir [52]:

$$\phi = 1 + \delta * \eta * t \qquad \textbf{(6.1)}$$

Bağıntı (6.1)'deki "ϕ" dinamik etki katsayısını, "δ" hat durumuna bağlı katsayıyı, "η" tren hızına bağlı katsayıyı göstermektedir ve "t", maksimum ray gerilmesinin aşılmaması için seçilen üst güven sınırına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Denklemdeki "δ" hat durumuna bağlı katsayı şu şekilde belirlenir:

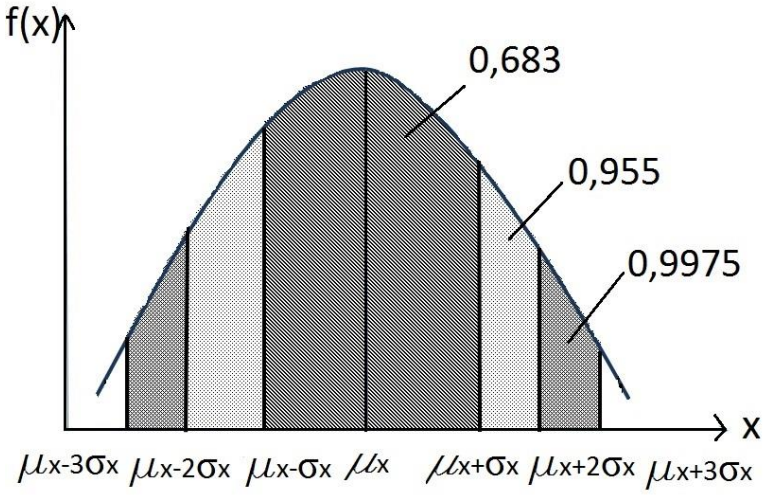
- Çok iyi durumdaki hatlar için δ=0,1;

- İyi durumdaki hatlar için δ=0,2;
- Kötü durumdaki hatlat için δ=0,3.

Bağıntı (6.1)'deki "η" hıza bağlı katsayı, V (km/sa) tren hızını belirtmek üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır [52]:

- V<60 km/sa → η=1,
- 60 km/sa<V<200 km/sa → η=1+(V-60)/140.

Eisenmann'ın bağıntısına göre, ray tabanındaki eğilme gerilmesi, normal dağılıma (Gauss Dağılımına) uyar ve ortalama değerler, rayı elastik temel üzerine oturan sonsuz uzunluktaki bir kiriş olarak kabul eden modelden yararlanılarak hesaplanabilir. Normal dağılım, μ_x ortalaması çevresinde simetrik bir çan eğrisi şeklindedir. Rastgele değişkenin, ortalamanın 2 yanındaki birer, ikişer ve üçer standart sapma genişliğindeki aralıkların içinde kalma olasılıkları sırasıyla 0,683, 0,955 ve 0,9975'dir. Şekil 6.1'de, normal dağılmış değişkenin, ortalamanın 2 yanındaki birer, ikişer ve üçer standart sapma (σ_x) genişliğindeki aralıklarda kalma olasılıkları görülmektedir [65]. Şekilde, μ_x rastgele değişkenin ortalaması, σ_x ise standart sapmayı belirtmektedir.



Şekil 6.1 : Rastgele değişkenin, farklı σ_x aralıklarında kalma olasılığı [65].

Eisenmann'ın dinamik etki katsayısı formülü, hat durumu ve tren hızına bağlı istatiksel bir yaklaşım sunar. Bağıntı (6.1)'deki "t", raydaki en büyük eğilme gerilmesinin aşılmama olasılığını belirten üst güven sınırlarına bağlı olarak belirlenir. Buna göre, seçilen üst güven sınırlarına bağlı olarak "t", aşağıdaki şekilde elde edilir:

- Üst güven sınırı=%50 → t=0,
- Üst güven sınırı=%84,1 → t=1,
- Üst güven sınırı=%97,7 → t=2,
- Üst güven sınırı=%99,9 → t=3.

Bu çalışmada incelenen hat olan Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, hat durumu "iyi" olarak kabul edilmiştir. Buna göre, "δ" hat durumuna bağlı katsayı 0,2 olarak alınmıştır. Hatta kullanılan araçlar, kimi bölgelerde 80 km/sa'lik hıza kadar ulaşmaktadır. Buna bağlı olarak "η" hıza bağlı katsayı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\eta = 1 + \frac{80 - 60}{140} = 1{,}14$$

Hatta maksimum ray gerilmesinin aşılmaması için seçilen üst güven sınırı %99,9'dur ve buna göre"t" üst güven sınırına bağlı katsayı 3 olarak alınmıştır. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı için dinamik etki katsayısının hesabında kullanılacak parametreler ve dinamik etki katsayısının hesabı aşağıda görülmektedir:

δ=0,2;

η=1,14;

t=3;

$$\phi = 1 + 0{,}2 * 1{,}14 * 3 = 1{,}68$$

Eisenmann'ın formülüne göre, hattaki dinamik etki katsayısı "ϕ"nin değeri 1,68 olarak bulunmuştur. Dinamik düşey tekerlek yükü, statik düşey tekerlek yükü ile dinamik etki katsayının çarpımı sonucu elde edilir. Raya etkiyen statik düşey tekerlek yükü P_s (kN) ve dinamik etki katsayısı ϕ olmak üzere, dinamik düşey tekerlek yükü P (kN), Bağıntı (6.2)'ye göre hesaplanır:

$$P = P_s * \phi \qquad \textbf{(6.2)}$$

Hattaki statik düşey tekerlek yükü, dingil yükünün 2'ye bölünmesiyle elde edilmiştir. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı araçlarındaki dingil yükü 80 kN'dur. Buna göre, hattaki statik düşey tekerlek yükü P_s 40 kN'dur. Statik düşey tekerlek yükü ve dinamik etki katsayısı belli olduğuna göre dinamik düşey tekerlek yükü, Bağıntı (6.2)'ye göre hesaplanır:

$$P = P_s * \phi = 40 * 1{,}68 = 67{,}2 \text{ kN}$$

Hattaki dinamik düşey tekerlek yükü 67,2 kN olarak hesaplanmıştır. Dinamik düşey tekerlek yükü, hat tasarımı ve tahkikinde kullanılan temel yük parametresi olduğu için tezin bu bölümünden itibaren "düşey tekerlek yükü" olarak anılacaktır.

Düşey tekerlek yüklerinden başka, raya etkiyen bir diğer önemli tekerlek yükü, yanal tekerlek yükleridir. Yanal tekerlek yükleri, yatay kurba bölgelerinde, tekerlek budeni tarafından dış rayın mantarına uygulanan yanal yüklerdir. Bu tür yanal kuvvetlerin büyüklüğünü etkileyen faktörler, yatay kurba yarıçapı ve araç hızıdır. UIC'ye bağlı Araştırma ve Deney Ofisi tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yatay kurbalarda ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yüklerinin, araç hızından çok kurba yarıçapına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Tren hızı 200 km/sa'den daha düşük olan hatlar için yatay kurba yarıçapı "R" (m) ile gösterilirse, raya etkiyen yanal tekerlek yükü "H" (kN), Bağıntı (6.3)'e göre hesaplanır [53]:

$$\mathrm{H} = 35 + \frac{7400}{\mathrm{R}} \qquad (\mathbf{6.3})$$

Bağıntı (6.3)'e göre, hattın yatay kurba bölgelerinde, ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükü, kurba yarıçapı arttıkça azalmakta, kurba yarıçapı azaldıkça ise artmaktadır. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki yatay kurbaların yarıçapı 250 m ila 4000 m arasında değişmektedir. Örnek olarak, hattın 250 m yarıçaplı bir yatay kurbasında, raya etkiyen yanal tekerlek yükü "H" (kN), Bağıntı (6.3) esas alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\mathrm{H} = 35 + \frac{7400}{\mathrm{R}} = 35 + \frac{7400}{250} = 64{,}60 \text{ kN}$$

Bağıntı (6.3) kullanılarak, hattaki her bir yatay kurbada ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükü hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Çizelge 6.1'de görüldüğü üzere, yatay kurba yarıçapı 250 m'den 4000 m'ye doğru arttıkça, ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükü değeri 64,60 kN'dan 36,85 kN'a doğru azalmıştır. Bir başka deyişle, hattaki yatay kurba yarıçapı ile ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükünün birbiriyle ters orantılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Yatay kurbalarda ray mantarına etkiyen yanal tekerlek yükleri.

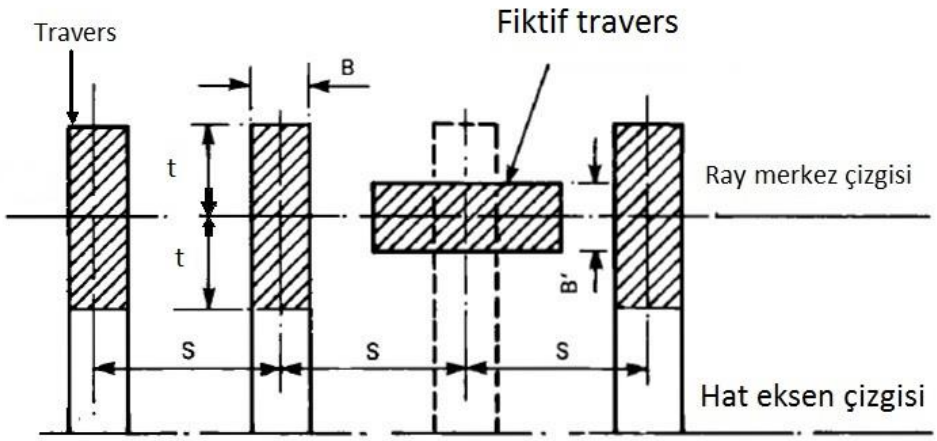
Kurba Yarıçapı (m)	Yanal Tekerlek Yükü (kN)
250	64,60
275	61,91
300	59,67
325	57,77
348	56,26
350	56,14
400	53,50
450	51,44
500	49,80
600	47,33
619	46,95
650	46,38
700	45,57
750	44,87
800	44,25
902	43,20
1000	42,40
1400	40,29
1500	39,93
2000	38,70
4000	36,85

Çizelge 6.1'e göre, hattaki en küçük yarıçaplı yatay kurbada ortaya çıkan en büyük yanal tekerlek yükü değeri 64,60 kN iken hattın tümünde raya etkiyen düşey tekerlek yükü değeri 67,2 kN'dur. Yani, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, en küçük yarıçaplı kurbada meydana gelen en büyük yanal tekerlek yükü değeri, hattın genelindeki düşey tekerlek yükü değerinden daha düşüktür.

6.2 Ray Tabanındaki Eğilme Gerilmelerinin Hesaplanması

Rayda meydana gelen en büyük eğilme gerilmesi, ray tabanı merkezinde ortaya çıkmaktadır [54]. Ray tabanı merkezinde meydana gelen eğilme gerilmesi, doğrudan

raya etkiyen düşey tekerlek yükleri ile ilgilidir. Tekerlek, ray yuvarlanma yüzeyinde bir noktanın üzerinden geçtiğinde, uyguladığı kuvvetler nedeniyle rayda eğilme gerilmeleri oluşur. Düşey tekerlek yükleri, rayın, mesnet görevi yapan traversler arasında düşey yönde eğilmesine yol açar. Bu durumda, ray tabanında boyuna yönde çekme gerilmeleri meydana gelir. Yatay kurbalarda raya etkiyen yanal tekerlek yüklerinin, ray tabanı merkezindeki eğilme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ray tabanı merkezindeki eğilme gerilmelerinin hesaplanmasında, ilk olarak Winkler tarafından ortaya atılan, ardından Zimmerman tarafından geliştirilen "elastik temel üzerine oturan sürekli kiriş yöntemi" kullanılmaktadır. Bu yöntemde ray, elastik bir sürekli bir temel üzerine oturan sonsuz uzunlukta bir kiriş olarak kabul edilir [55]. Şekil 6.2'de Zimmerman hesap yönteminde kullanılan demiryolu çevresi görülmektedir [56].



Şekil 6.2 : Zimmerman yönteminde kullanılan demiryolu çerçevesi [56].

Zimmerman hesap yönteminde, traverslerin orta bölgesinde kalan belli bir uzunluktaki kesimin yük iletmediği kabul edilmektedir. Şekil 6.2'de, traverslerin taralı kısımları yük iletmekte, beyaz kısımleri ise yük iletmemektedir. Traverslerin yük ileten kısmı, şekilde görüldüğü üzere 2t uzunluğundadır. Zimmerman hesap yönteminde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki değerleri aşağıda verilmiştir:

- S=travers aralığı=750 mm,
- B=travers genişliği=275 mm,
- ⌊=travers uzunluğu=2400 mm,

- e=ray eksenleri arasındaki mesafe=1500 mm,
- t=ray merkez çizgisi ile traversin uç kenarı arasındaki mesafe (traversin yük ileten kısmının yarısı),
- A=etkili travers alanı,
- B'=fiktif travers genişliği.

İlk olarak, traversin yük ileten uzunluğunun (2t) bulunması gerekmektedir. Traversin yük ileten uzunluğunun yarısı (t), ray merkez çizgisi ile traversin uç kenarı arasındaki mesafeye eşittir. Bağıntı (6.4)'de, t uzunluğunun hesabı verilmektedir [55]:

$$t = \frac{l - e}{2} = \frac{2400 - 1500}{2} = 450 \text{ mm} \qquad (\mathbf{6.4})$$

Traversin yük ileten uzunluğunun yarısı 450 mm ise traversin yük ileten toplam uzunluğu 2t=900 mm'dir. Etkili travers alanı "A", traversin yük ileten uzunluğu ile travers genişliğinin çarpımına eşittir. Aynı zamanda, Zimmerman yöntemine göre etkili travers alanı, travers aralığı ile hayali travers genişliğinin çarpımına da eşit olmaktadır. Buna göre, etkili travers alanı "A", Bağıntı (6.5)'e göre hesaplanır [55]:

$$A = 2t * B = S * B' \qquad \mathbf{(6.5)}$$

Bağıntı (6.5)'deki 2t, B ve S uzunlukları bilindiğine göre, buradan B' (fiktif travers genişliği) çekilebilir. Fiktif travers genişliği:

$$B' = \frac{2t * B}{S} = \frac{900 * 275}{750} = 330 \text{ mm}$$

Zimmerman hesap yöntemine göre, tekerlek raydan geçtiğinde, ray tabanında meydana gelen eğilme momenti, Bağıntı (6.6)'ya göre hesaplanır [55]:

$$M(x) = \frac{P * L}{4} * \Sigma\mu(x) \qquad (\mathbf{6.6})$$

Bağıntı (6.6)'daki parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

- M(x)= tekerleğin raya etkidiği noktadan x kadar uzaklıktaki eğilme momenti (kNmm),
- P= düşey tekerlek yükü (kN),
- L= elastik uzunluk (mm),

- μ(x)= komşu tekerlek yüklerinin, eğilme momentine etkisini hesaplamak için kullanılan formül.

Burada yalnızca P değeri bilinmekte, L ve μ(x) değerleri bilinmemektedir. Elastik uzunluk "L", Bağıntı (6.7)'ye göre hesaplanır [55]:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * E * I}{B' * c}} \qquad (\mathbf{6.7})$$

Bağıntı (6.7)'de kullanılan parametrelerin açıklamaları ve Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki değerleri aşağıda verilmiştir:

- L= elastik uzunluk (mm),
- E= rayın elastisite modülü= $2{,}1*10^5$ N/mm^2,
- I= rayın atalet momenti= $1819*10^4$ mm^4,
- B'= fiktif travers genişliği= 330 mm
- c= balast yatak katsayısı= 0,05 N/mm^3(zayıf zeminler için).

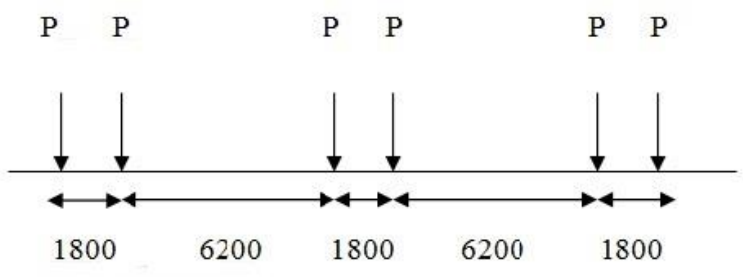
Bu verilerden yararlanarak, elastik uzunluk "L", Bağıntı (6.7)'ye göre hesaplanır:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * E * I}{B' * c}} = \sqrt[4]{\frac{4 * 2{,}1 * 10^5 * 1819 * 10^4}{330 * 0{,}05}} = 980{,}97 \text{ mm}$$

Tekerlek raydan geçtiğinde, ray tabanında meydana gelen eğilme momentini hesaplamak için kullanılan Bağıntı (6.6)'daki μ(x) değeri, komşu tekerlek yüklerinin, eğilme momentine etkisini hesaplamaya yarar. Elastik uzunluk "L" ve komşu tekerlek yüklerinin, asıl tekerlek yüküne olan mesafesi "x" ile gösterilmek üzere; μ(x) değerinin hesabı Bağıntı (6.8)'e göre yapılır [55]:

$$\mu(x) = e^{-x/L} * [\cos(x/L) - \sin(x/L)] \qquad (\mathbf{6.8})$$

Komşu tekerlek yüklerinin etkisi, aynı lokomotif veya vagonun dingilleri arasında görülür. Eğilme momentine etkisi hesaba katılan her bir tekerlek için μ değeri hesaplanır. Komşu tekerlek yüklerinin eğilme momentine etkisini hesaplamak için öncelikle Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda kullanılan araçlardaki dingil düzeni incelenmelidir. Şekil 6.3'de, hatta kullanılan araçlardaki dingil düzeni görülmektedir. Şekilde görülen P, hattaki düşey tekerlek yükünü göstermektedir ve tekerlek merkezleri arasındaki mesafeler mm cinsinden verilmiştir.



Şekil 6.3 : Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı dingil düzeni.

Öncelikle tekerleğin raya etkidiği noktada, yani x=0 noktasında μ değeri hesaplanmıştır:

x=0 → x/L=0, $e^{-x/L}=e^{0}=1$, cos(x/L)=cos(0°)=1 ve sin(x/L)=sin(0°)=0 olmaktadır. Bağıntı (6.8)'e göre, x=0 noktasındaki μ'nün hesabı:

$$\mu = e^{0} * [\cos(0°) - \sin(0°)] = 1 * (1 - 0) = 1$$

Tekerleğin raya etkidiği x=0 noktasındaki μ değeri bu şekilde hesaplandıktan sonra, aynı işlemler komşu tekerlek yükleri için de yapılmıştır. Tekerleğin raya etkidiği noktadan, sırasıyla 1800 mm, 8000 mm, 9800 mm, 16000 mm ve 17800 mm uzaklıktaki komşu tekerlek yükleri için μ değerleri hesaplanmıştır. μ değerlerinin hesabında, sırasıyla x/L, $e^{-x/L}$, cos(x/L)-sin(x/L) değerleri bulunmuş ve $e^{-x/L}$ ile cos(x/L)-sin(x/L) değerleri çarpılarak μ değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, Çizelge 6.2'de görülmektedir.

Çizelge 6.2 : Komşu tekerlek yükleri için μ değeleri tablosu.

x (mm)	L (mm)	x/L	$e^{-x/L}$	cos(x/L)-sin(x/L)	μ
0	980,97	0	1	1	1
1800	980,97	1,83	0,16	-1,225	-0,196
8000	980,97	8,16	0,00028	-1,25	-0,00035
9800	980,97	9,99	0	-0,31	0
16000	980,97	16,31	0	-0,26	0
17800	980,97	18,15	0	1,41	0

Çizelge 6.2'de, komşu tekerleklerin, asıl tekerleğe olan mesafesi arttıkça, μ değerlerinin düştüğü, dolayısıyla ray tabanındaki eğilme momentine etkisinin azaldığı görülmektedir. Çizelge 6.2'de hesaplanan μ değerleri, Bağıntı (6.6)'da kullanılmak üzere toplanır. Buna göre toplam μ değeri:

$$\Sigma\mu = 1 - 0{,}196 - 0{,}00035 = 0{,}804$$

Formülde kullanılacak olan P (düşey tekerlek yükü), L (elastik uzunluk) ve Σμ değerleri belli olduğuna göre, ray tabanındaki eğilme momenti M, Bağıntı (6.6) kullanılarak hesaplanır [55]:

$$M = \frac{P * L}{4} * \Sigma\mu = \frac{67{,}2 * 980{,}97}{4} * 0{,}804 = 13250{,}16 \text{ kNmm}$$

Düşey tekerlek yükleri nedeniyle meydana gelen ray tabanındaki eğilme momenti 13250,16 kNmm'dir. Buna bağlı olarak ray tabanı merkezinde oluşan en büyük eğilme gerilmesi; ray tabanındaki eğilme momentinin, ray tabanına göre mukavemet momentine bölünmesiyle elde edilir (Bağıntı 6.9) [55].

- M=ray tabanındaki eğilme momenti=13250,16 kNmm,
- W=ray tabanına göre mukavemet momenti=247,5 cm^3,
- σ_b=ray tabanı merkezindeki en büyük eğilme gerilmesi olmak üzere:

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{13250{,}16}{247{,}5 * 10^3} = 0{,}0535 \text{ kN/mm}^2 = 53{,}54 \text{ N/mm}^2 \qquad (\mathbf{6.9})$$

Bağıntı (6.9)'da görüldüğü üzere, ray tabanı merkezindeki en büyük eğilme gerilmesi 53,54 N/mm^2 olarak hesaplanmıştır. Ray tabanı merkezindeki eğilme gerilmesi, doğrudan raya etkiyen düşey tekerlek yükleri ile ilgilidir. Yatay kurbalarda ortaya çıkan yanal tekerlek yüklerinin, ray tabanı merkezindeki eğilme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Bu nedenle, ray tabanı merkezindeki en büyük eğilme gerilmesi; hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerinde önemli bir farklılık göstermemektedir [24, 26].

6.3 Raydaki Termal Gerilmelerin Hesaplanması

Termal gerilmeler, rayın gerçek sıcaklığı ile ray nötr sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ısıl genleşme ve büzülme olayları ile ilgilidir. Ray nötr sıcaklığı, rayların birbirine kaynaklandığı sıcaklık değeridir. Eğer ray sıcaklığı, ray nötr sıcaklığından fazla ise ısıl genleşme nedeniyle ray uzunluğunda artış meydana gelmesi beklenir, fakat uzun kaynaklı raylarda ray uzunluğu değişemeyeceği için rayda boyuna yönde basınç gerilmeleri meydana gelir. Ray sıcaklığının, ray nötr sıcaklığından düşük olduğu durumlarda ise boyuna yönde çekme gerilmeleri oluşur.

Uzun kaynaklı raylarda meydana gelen termal gerilmeleri hesaplamak için Schramm'ın geliştirdiği formüle göre; rayın gerçek sıcaklığı ile ray nötr sıcaklığı arasındaki fark, rayın ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü çarpılır. Buna göre, rayda meydana gelen en büyük termal gerilmeyi hesaplamak için rayın üst sıcaklık limiti ile ray nötr sıcaklığı arasındaki fark alınır ve rayın ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü ile çarpılır (Bağıntı 6.10) [57].

- t_1=rayın üst sıcaklık limiti (°C),
- t_0=ray nötr sıcaklığı (°C),
- α=rayın ısıl genleşme katsayısı ($°C^{-1}$),
- E=rayın elastisite modülü (N/mm^2),
- σ_t=sıcaklık değişiminden dolayı rayda oluşan termal gerilme (N/mm^2=MPa) olmak üzere;

$$\sigma_t = (t_1 - t_0) * \alpha * E \quad \textbf{(6.10)}$$

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, raydaki sıcaklık değişimlerinden dolayı meydana gelen en büyük termal gerilmeyi hesaplamak için öncelikle rayın üst sıcaklık limiti "t_1" değerinin bulunması gerekmektedir. Bu değer, rayın en yüksek sıcaklık değeri olup, atmosfer sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ray sıcaklığının, atmosfer sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmasında, Bağıntı (6.11) kullanılmaktadır [58]:

$$t_{ray} = 1{,}5 * t_{atmosfer} \quad \textbf{(6.11)}$$

Raydaki en büyük termal gerilmeyi hesaplamak için ray sıcaklığının en yüksek olduğu değer alınmalıdır. Bu değer, atmosfer sıcaklığının en yüksek olduğu zamanda elde edilen ray sıcaklğıdır. Bu nedenle, atmosfer sıcaklığı 40°C kabul edilerek raydaki en yüksek sıcaklık değeri hesaplanmışır:

$$t_{ray} = 1{,}5 * 40°C = 60°C$$

Raydaki en yüksek sıcaklık değeri olan 60°C, Bağıntı (6.10)'da kullanılacak olan t_1 değeridir. Bu bağıntıdaki bir diğer parametre olan ray nötr sıcaklığı "t_0" değeri ise, rayların birbirine kaynaklandığı sıcaklık değerini göstermektedir. Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, rayların kaynaklandığı nötr sıcaklık değeri

25°C'dir. Buna göre, aşağıdaki veriler kullanılarak, raydaki sıcaklık değişimleri nedeniyle meydana gelen termal gerilmeler (σ_t), Bağıntı (6.10)'a göre hesaplanmıştır:

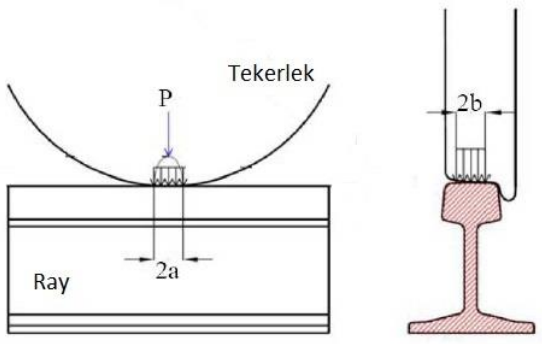
- t_1=60°C,
- t_0=25°C,
- α=1,15*10^{-5} °C^{-1},
- E=2,1*10^5 N/mm^2,

$$\sigma_t = (t_1 - t_0) * \alpha * E = (60 - 25) * 1{,}15 * 10^{-5} * 2{,}1 * 10^5 = 84{,}52 \text{ MPa}$$

Raydaki sıcaklık değişimleri nedeniyle ortaya çıkan en büyük termal gerilme değeri 84,52 MPa (84,52 N/mm^2) olarak hesaplanmıştır. Raydaki termal gerilmelerin hesabında, düşey veya yanal tekerlek yükleriyle ilgili herhangi bir parametre kullanılmamıştır. Bir başka deyişle, hattın yatay kurba bölgelerinde ortaya çıkan yanal tekerlek yüklerinin, raydaki termal gerilmeler üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Bu nedenle termal gerilmeler; hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerinde önemli bir farklılık göstermemektedir.

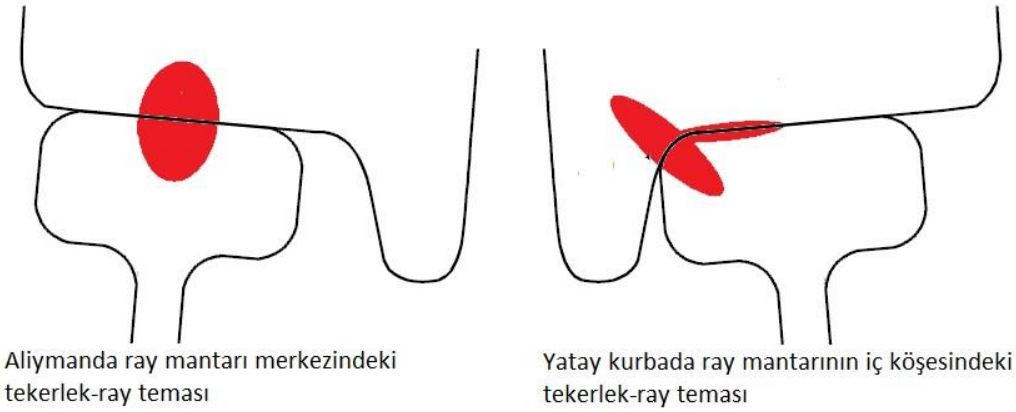
6.4 Ray Mantarındaki Tekerlek-Ray Temas Gerilmelerinin Hesaplanması

Tekerleğin raydan geçişi sırasında, tekerlek ve ray arasındaki temas alanında meydana gelen kuvvetler, ray mantarında temas gerilmelerine neden olmaktadır. Tekerlek-ray temas gerilmeleri, Hertz Teorisi'ne göre hesaplanır. Hertz Teorisi'ne göre, tekerlek rayın üzerinden geçtiğinde oluşan, iki elastik eğrisel yüzey arasındaki temas alanı eliptik şekildedir. Temas gerilmesi dağılımı ise yarı elipsoidaldir. Şekil 6.4'de, tekerlek ve ray arasındaki temas alanı görülmektedir [59]. Şekilde, temas alanının uzunluğu "2a" ve genişliği "2b" ile gösterilmiştir.



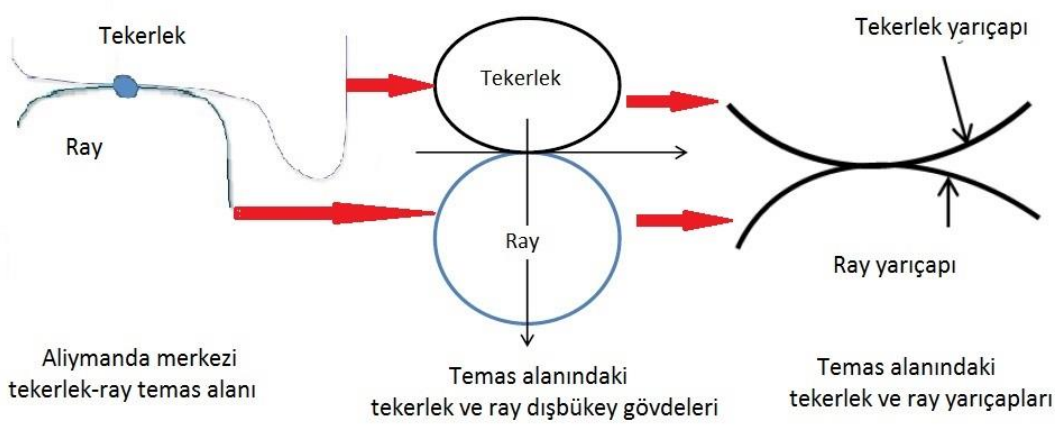
Şekil 6.4 : Tekerlek-ray temas alanı [59].

Tekerlek-ray temas gerilmelerinin büyüklüğü, büyük oranda temas alanının geometrik şekline bağlıdır. Temas alanının geometrik şekli ise 2a ve 2b uzunluklarına bağlı olarak değişmektedir. Bu uzunlukların hesabında, tekerlek yarıçapı, ray yarıçapı, temas alanındaki tekerlek yarıçapı ve temas alanındaki ray yarıçapı değerleri kullanılmaktadır. Tekerlek ve ray arasındaki temas, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerinde farklılaşmakta; buna bağlı olarak da temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçap değerleri değişmektedir. Aliymandaki tekerlek-ray teması merkezidir; yani düşey tekerlek yükleri, ray mantarı yüzeyinin orta kısmına doğru etki eder. Yatay kurbadaki tekerlek-ray teması ise genellikle dış rayın iç köşesine doğrudur. Yatay kurbada, düşey tekerlek yüklerinin yanı sıra ortaya çıkan yanal tekerlek yükleri, tekerlek budeninin, dış rayın iç köşesine temas etmesine neden olur ve temas alanı bu bölgede gerçekleşir. Şekil 6.5'de, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerindeki tekerlek-ray teması görülmektedir [60].



Şekil 6.5 : Aliyman ve yatay kurbadaki farklı tekerlek-ray temasları [60].

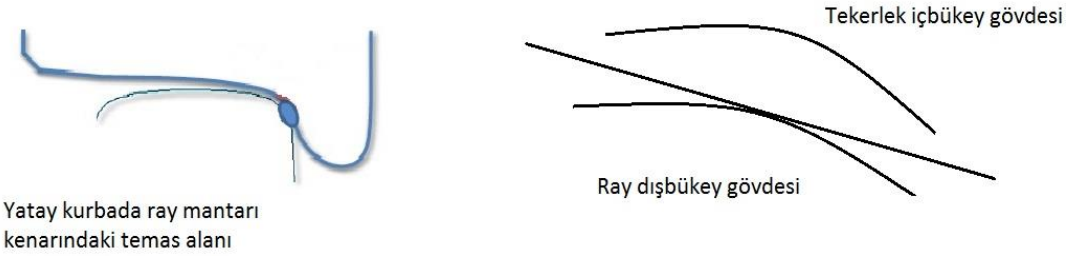
Aliyman bölgelerinde tekerlek-ray temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçapları, yatay kurba bölgelerinde temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçaplarından farklıdır. Aliymanda, tekerlek sırtı ile ray mantarı yüzeyinin orta kısmı temas ettiği için birbiriyle temas eden 2 dışbükey gövde vardır [27]. Şekil 6.6'da, aliymanda ray mantarı merkezindeki tekerlek-ray temasına bağlı olarak, temas alanındaki tekerlek ve ray dışbükey gövdeleri ile tekerlek ve ray yarıçapları görülmektedir [28].



Şekil 6.6 : Aliymanda tekerlek-ray temas alanı [28].

Aliymandaki tekerlek-ray temas gerilmelerinin hesabında, tekerlek-ray temas alanındaki tekerlek yarıçapı değeri sonsuz olarak alınır [27]. Temas alanındaki ray yarıçapı değeri ise hatta kullanılan S49 tipi rayların mantar bölgesindeki yarıçap olarak alınır. Temas, ray mantarı yüzeyinin orta kısmında meydana geldiği için bu yüzeydeki yarıçap alınmalıdır. S49 tipi rayların geometrik standardını belirleyen TS EN 13674-1'e göre, ray mantarının orta merkez kısmındaki yarıçap 300 mm'dir [61].

Yatay kurbada, tekerlek budeni ile ray mantarının iç köşesi temas ettiği için birbiriyle temas eden 1 dışbükey ve 1 içbükey gövde vardır [27]. Temas alanındaki ray gövdesi dışbükey, tekerlek budeni gövdesi ise içbükeydir. Şekil 6.7'de, yatay kurbada, temas alanındaki ray dışbükey gövdesi ve tekerlek budeni içbükey gövdesi görülmektedir.



Şekil 6.7 : Yatay kurbada tekerlek-ray temas alanı.

Yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmelerinin hesabında, temas alanındaki tekerlek yarıçapı değeri, aliymandaki gibi sonsuz olarak alınmaz. Burada, raya temas eden kısım tekerlek budeni olduğu için budendeki yarıçap dikkate alınır. Bunun yanında, temas alanındaki tekerlek budeni içbükey bir gövde olduğu için değeri (-) olarak alınmalıdır [27]. Buna göre, yatay kurbada, hatta kullanılan araç tipindeki tekerlekler esas alınarak temas alanındaki tekerlek yarıçapı değeri -30 mm alınmıştır.

Temas alanındaki ray yarıçapı değeri ise hatta kullanılan S49 tipi rayların mantar bölgesinin iç köşesindeki yarıçap olarak alınır. Temas, ray mantarının iç köşesinde meydana geldiği için bu yüzeydeki yarıçap alınmalıdır. S49 tipi rayların geometrik standardını belirleyen TS EN 13674-1'e göre, ray mantarının iç köşesindeki yarıçap 13 mm'dir [61].

Hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerindeki tekerlek-ray temas gerilmeleri arasındaki farklılık, yukarıdaki gibi açıklandıktan sonra, ilk olarak aliymandaki tekerlek-ray temas gerilmeleri hesaplanmıştır. Hertz Teorisi'ne göre temas gerilmelerinin hesabında, öncelikle temas alanının uzunluğu ve genişliği bulunmalıdır. Bu büyüklüklerin hesaplanmasında ise tekerlek ve ray yarıçapları kullanılır. Temas alanının uzunluğu "2a" olmak üzere, temas alanı uzunluğunun yarısı "a" (mm), Bağıntı (6.12)'ye göre hesaplanır [62]:

$$a = m * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{N * (1 - \nu^2)}{E * (A + B)}} \qquad (\mathbf{6.12})$$

Temas alanının genişliği "2b" olmak üzere, temas alanı genişliğinin yarısı "b" (mm), Bağıntı (6.13) esas alınarak hesaplanır [62]:

$$b = n * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{N * (1 - \nu^2)}{E * (A + B)}} \qquad (\mathbf{6.13})$$

Bağıntı (6.12) ve Bağıntı (6.13)'deki parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

- N= temas alanına dik olarak düşey tekerlek yükü,
- ν= rayın Poisson oranı= rayın enine birim deformasyonunun, boyuna birim deformasyonuna oranı= 0,3,
- E= rayın elastisite modülü,
- m= Hertz katsayısı,
- n= Hertz katsayısı,
- A= tekerlek ve ray yarıçapına bağlı olarak hesaplanan değer,
- B= temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçapına bağlı olarak hesaplanan değer.

Burada, A ve B değerleri, Bağıntı (6.14) ve Bağıntı (6.15)'e göre bulunur [62]:

$$A = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{x1}} + \frac{1}{r_{x2}}\right) \qquad (\mathbf{6.14})$$

$$B = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}}\right) \qquad (\mathbf{6.15})$$

Bağıntı (6.14) ve Bağıntı (6.15)'deki parametrelerin açıklamaları ve Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki aliyman bölgeleri için değerleri aşağıdaki gibidir:

- r_{x1}= tekerleğin normal yarıçapı= 335 mm,
- r_{x2}= ray yarıçapı= ∞,
- r_{y1}= temas alanındaki tekerlek yarıçapı= ∞ [27],
- r_{y2}= temas alanındaki ray yarıçapı= 300 mm [27, 61].

Burada, temas alanındaki tekerlek yarıçapı değeri r_{y1} sonsuz olarak alınır [27]. Ayrıca, tekerlek-ray teması, ray mantarı yüzeyinin orta kısmında meydana geldiği için temas alanındaki ray yarıçapı değeri r_{y2}, hatta kullanılan S49 tipi rayların mantar bölgesindeki yarıçap olan 300 mm olarak alınır [27, 61]. Bu verilere bağlı olarak, aliymandaki A ve B değerlerinin hesabı:

$$A = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{x1}} + \frac{1}{r_{x2}}\right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{335} + \frac{1}{\infty}\right) = 0{,}00149$$

$$B = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}}\right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{300}\right) = 0{,}00167$$

Aliymandaki "A" ve "B" değerleri bu şekilde hesaplandıktan sonra, Hertz katsayıları olan "m" ve "n" değerlerini hesaplamak için kullanılan "θ" açısı bulunmalıdır. "θ" açısı, Bağıntı (6.16)'ya göre hesaplanır [62]:

$$\theta = \arccos\left(\frac{|A - B|}{A + B}\right) = \arccos\left(\frac{|0{,}00149 - 0{,}00167|}{0{,}00149 + 0{,}00167}\right) = 86{,}73° \qquad (\mathbf{6.16})$$

"θ" açısı hesaplandıktan sonra, θ'ya bağlı olarak değişen "m" ve "n" katsayılarını bulmak için Çizelge 6.3'deki Hertz katsayıları tablosu kullanılır [62]. Çizelge 6.3'de, θ=86,73° için "m" ve "n" değerleri enterpolasyon yoluyla hesaplanmıştır. Buna göre "m" değeri 1,042 ve "n" değeri 0,965 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.3 : Hertz katsayıları tablosu [62].

θ (°)	m	n
90	1	1
80	1,128	0,8927
70	1,285	0,800
60	1,486	0,7171
50	1,754	0,6407
40	2,136	0,5673
30	2,731	0,4931
20	3,816	0,4122

"A", "B", "m" ve "n" değerlerinin elde edilmesiyle, temas alanı uzunluğunun yarısı olan "a"nın uzunluğu, aşağıdaki veriler kullanılarak Bağıntı (6.12)'ye göre hesaplanabilir:

- N= temas alanına dik olarak düşey tekerlek yükü=67200 N,
- ν= rayın Poisson oranı= 0,3,
- E= rayın elastisite modülü= $2{,}1*10^5$ N/mm^2,
- m= Hertz katsayısı= 1,042,
- n= Hertz katsayısı= 0,965,
- A= tekerlek ve ray yarıçapına bağlı değer= 0,00149,
- B= temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçapına bağlı değer= 0,00167 ise:

$$a = 1{,}042 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{67200 * (1 - 0{,}3^2)}{2{,}1 * 10^5 * (0{,}00149 + 0{,}00167)}} = 5{,}388 \text{ mm}$$

Temas alanı genişliğinin yarısı olan "b" ise yine yukarıdaki veriler kullanılarak, Bağıntı (6.13)'e göre hesaplanabilir:

$$b = 0{,}965 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{67200 * (1 - 0{,}3^2)}{2{,}1 * 10^5 * (0{,}00149 + 0{,}00167)}} = 4{,}989 \text{ mm}$$

Buna göre, hattın aliyman bölgelerindeki tekerlek-ray temas alanı uzunluğu (2a)=10,776 mm ve temas alanı genişliği (2b)=9,978 mm olarak bulunmuştur. Tekerlek-ray temas gerilmesi, temas alanı üzerinde üniform olarak dağılır ve temas basıncı yarı elipsoidaldir. Buna bağlı olarak, aliymanda, ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi $\sigma_{c,a}$ (N/mm^2), Bağıntı (6.17) ile hesaplanır [62]:

$$\sigma_{c,a} = \frac{3 * N}{2 * \pi * a * b} \qquad (\mathbf{6.17})$$

Burada;

- N= temas alanına dik olarak etkiyen düşey tekerlek yükü= 67200 N,
- a= temas alanı uzunluğunun yarısı= 5,388 mm,
- b= temas alanı genişliğinin yarısı= 4,989 mm olmak üzere;

$$\sigma_{c,a} = \frac{3 * 67200}{2 * \pi * 5{,}388 * 4{,}989} = 1193{,}63 \text{ N/mm}^2$$

Buna göre, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın aliyman bölgelerinde, raya etkiyen tekerlek-ray temas gerilmelerinin değeri 1193,63 N/mm^2 yani 1193,63 MPa'dır. Raya etkiyen en büyük termal gerilme değerinin 84,52 MPa, ray tabanındaki en büyük eğilme gerilmesi değerinin ise 53,54 MPa olduğu düşünülürse, tekerlek-ray temas gerilmelerinin, diğer ray gerilmelerinden ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmeleri hesaplanırken, temas alanındaki değişen tekerlek ve ray yarıçapları dikkate alınmalıdır. Yatay kurbada, tekerlek-ray teması; tekerlek budeni ile ray mantarının iç köşesi arasında gerçekleştiği için temas alanındaki tekerlek yarıçapı, budendeki yarıçap olarak alınır. Bu değer, -30 mm'dir (temas alanındaki tekerlek gövdesi, içbükey bir gövde olduğu için "-" değer almaktadır). Temas alanındaki ray yarıçapı ise ray mantarının iç köşesindeki yarıçap olarak alınır. S49 tipi raylarda, ray mantarının iç köşesindeki yarıçap değeri 13 mm'dir. Buna göre, yatay kurbadaki temas alanının hesaplanmasında kullanılacak "A" ve "B" büyüklükleri Bağıntı (6.14) ve Bağıntı (6.15) kullanılarak hesaplanır [62]:

- r_{x1}= tekerleğin normal yarıçapı= 335 mm,
- r_{x2}= ray yarıçapı= ∞,
- r_{y1}= temas alanındaki tekerlek yarıçapı= -30 mm,
- r_{y2}= temas alanındaki ray yarıçapı= 13 mm olmak üzere;

$$A = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{x1}} + \frac{1}{r_{x2}}\right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{335} + \frac{1}{\infty}\right) = 0{,}00149$$

$$B = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}}\right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{-30} + \frac{1}{13}\right) = 0{,}02179$$

Yatay kurbadaki "A" ve "B" değerleri bu şekilde hesaplandıktan sonra, Hertz katsayıları olan "m" ve "n" değerlerini hesaplamak için kullanılan "θ" açısı bulunmalıdır. Bağıntı (6.16)'ya göre "θ" açısı [62]:

$$\theta = \arccos\left(\frac{|A - B|}{A + B}\right) = \arccos\left(\frac{|0{,}00149 - 0{,}02179|}{0{,}00149 + 0{,}02179}\right) = 29{,}31°$$

"θ" açısı bulunduktan sonra, θ'ya bağlı olarak değişen "m" ve "n" katsayılarını bulmak için Çizelge 6.3'deki Hertz katsayıları tablosu kullanılır. Çizelge 6.3'de, θ=29,31° için "m" ve "n" değerleri enterpolasyon yoluyla hesaplanmıştır. Buna göre "m" değeri 2,806 ve "n" değeri 0,4875 olarak bulunmuştur. "A", "B", "m" ve "n" değerlerinin elde edilmesiyle, temas alanı uzunluğunun yarısı olan "a"nın uzunluğu, aşağıdaki veriler kullanılarak Bağıntı (6.12)'ye göre hesaplanabilir [62]:

- N= temas alanına dik olarak düşey tekerlek yükü=67200 N,
- ν= rayın Poisson oranı= 0,3,
- E= rayın elastisite modülü= $2{,}1*10^5$ N/mm^2,
- m= Hertz katsayısı= 2,806,
- n= Hertz katsayısı= 0,4875,
- A= tekerlek ve ray yarıçapına bağlı değer= 0,00149,
- B= temas alanındaki tekerlek ve ray yarıçapına bağlı değer= 0,02179 ise:

$$a = 2{,}806 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{67200 * (1 - 0{,}3^2)}{2{,}1 * 10^5 * (0{,}00149 + 0{,}02179)}} = 7{,}456 \text{ mm}$$

Temas alanı genişliğinin yarısı olan "b" ise yine yukarıdaki veriler kullanılarak, Bağıntı (6.13)'e göre hesaplanabilir [62]:

$$b = 0{,}4875 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{67200 * (1 - 0{,}3^2)}{2{,}1 * 10^5 * (0{,}00149 + 0{,}02179)}} = 1{,}295 \text{ mm}$$

Buna göre, hattın yatay kurba bölgelerindeki tekerlek-ray temas alanı uzunluğu (2a)=14,912 mm ve temas alanı genişliği (2b)=2,59 mm olarak bulunmuştur. Tekerlek-ray temas gerilmesi, temas alanı üzerinde üniform olarak dağılır. Buna

bağlı olarak, yatay kurbada, ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi $\sigma_{c,k}$ (N/mm^2), Bağıntı (6.17) kullanılarak hesaplanır [62]:

- N= temas alanına dik olarak etkiyen düşey tekerlek yükü= 67200 N,
- a= temas alanı uzunluğunun yarısı= 7,456 mm,
- b= temas alanı genişliğinin yarısı= 1,295 mm olmak üzere;

$$\sigma_{c,k} = \frac{3 * N}{2 * \pi * a * b} = \frac{3 * 67200}{2 * \pi * 7{,}456 * 1{,}295} = 3323{,}04\ N/mm^2$$

Buna göre, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın yatay kurba bölgelerinde, raya etkiyen tekerlek-ray temas gerilmelerinin değeri 3323,04 N/mm^2 yani 3323,04 MPa'dır. Hattın aliyman bölgelerinde, raya etkiyen tekerlek-ray temas gerilmelerinin değeri ise 1193,63 MPa olarak bulunmuştur. Yani, yatay kurba kısımlarındaki temas gerilmeleri, aliyman kısmındaki temas gerilmelerinin yaklaşık 2,78 katıdır. Raya etkiyen en büyük termal gerilme değerinin 84,52 MPa, ray tabanındaki en büyük eğilme gerilmesi değerinin ise 53,54 MPa olduğu düşünülürse; aliymandaki 1193,63 MPa'lık ve yatay kurbadaki 3323,04 MPa'lık temas gerilmelerinin, diğer ray gerilmelerinden ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

6.5 Ray Mantarındaki Kayma Gerilmelerinin Hesaplanması

Ray mantarındaki kayma gerilmeleri; tekerleğin raydan geçişi sırasında, tekerlek yükleri nedeniyle temas yüzeyinin birkaç mm altında oluşan gerilmelerdir. Bu gerilmeler, tekerlek-ray temas gerilmelerine bağlı olarak hesaplanır. Bu gerilmelerin yeri de tekerlek-ray temas alanı uzunlukları kullanılarak elde edilir. Ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi τ_{maks} (N/mm^2), ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmelerinin, 0,31 katsayısı ile çarpılmasıyla elde edilir (Bağıntı 6.18) [27]:

$$\tau_{maks} = 0{,}31 * \sigma_c \qquad \textbf{(6.18)}$$

Bağıntı (6.18)'deki σ_c, ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi değerini (N/mm^2) belirtmektedir. Bu değer, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerinde farklı olduğu için ray mantarındaki kayma gerilmesi değeri, her 2 hat kesimi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buna göre, hattın aliyman bölgelerinde, ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi değerinin hesabında, tezin 5.5.4. bölümü olan "Ray mantarındaki

tekerlek-ray temas gerilmelerinin hesaplanması" adlı bölümde hesaplanan aliymandaki tekerlek-ray temas gerilmesi değeri kullanılmıştır. Aliymandaki tekerlek-ray temas gerilmesi değeri 1193,63 N/mm^2 olduğuna göre, aliymanda ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi:

$$\tau_{maks,a} = 0{,}31 * \sigma_{c,a} = 0{,}31 * 1193{,}63 = 370{,}02 \text{ N/mm}^2$$

Hattın yatay kurba bölgelerinde, ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesinin hesabında da benzer şekilde, yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmesi değeri kullanılmıştır. Yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmesi değeri 3323,04 N/mm^2 olduğuna göre yatay kurbada ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi:

$$\tau_{maks,k} = 0{,}31 * \sigma_{c,k} = 0{,}31 * 3323{,}04 = 1030{,}14 \text{ N/mm}^2$$

Ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi değerleri bu şekilde hesaplandıktan sonra, bu kayma gerilmelerinin meydana geldiği yer hesaplanmalıdır. Ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi, tekerlek-ray temas yüzeyinden "z" mesafe kadar aşağıda meydana gelir. Bu "z" mesafesi, tekerlek-ray temas alanı uzunluğu ve genişliğine bağlı olarak, Bağıntı (6.19)'a göre hesaplanır [27]:

$$z = 0{,}25 * (a + b) \quad \textbf{(6.19)}$$

Bağıntı (6.19)'daki parametreler:

- z=ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesinin yeri (mm),
- a=tekerlek-ray temas alanı uzunluğu (mm),
- b=tekerlek-ray temas alanı genişliğidir (mm).

Tekerlek-ray temas alanı uzunluğu ve genişliği, tezin 5.5.4. bölümünde detaylıca anlatıldığı üzere, hattın aliyman ve yatay kurba bölgelerinde farklı değerler almaktadır. Bu nedenle, aliyman ve yatay kurbada, en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği yer, her 2 hat kesimi için de ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aliymanda, temas alanı uzunluğu 5,388 mm ve temas alanı genişliği 4,989 mm olarak hesaplandığına göre aliymanda ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği yer:

$$z_a = 0{,}25 * (a + b) = 0{,}25 * (5{,}388 + 4{,}989) = 2{,}59$$

Buna göre, aliymanda, ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi, tekerlek-ray temas yüzeyinden 2,59 mm aşağıda meydana gelmektedir. Yatay kurbadaki temas

alanı uzunluğu 7,456 mm ve temas alanı genişliği 1,295 mm'dir. Buna göre, yatay kurbada, en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği yer:

$$z_k = 0{,}25 * (\mathrm{a} + \mathrm{b}) = 0{,}25 * (7{,}456 + 1{,}295) = 2{,}19 \text{ mm}$$

Yatay kurbada, ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesi, tekerlek-ray temas yüzeyinden 2,19 mm aşağıda meydana gelmektedir. Buna göre, ray mantarındaki en büyük kayma gerilmesinin, hattın yatay kurba bölgelerinde ray mantarı yüzeyine daha yakın yerde meydana geldiği görülmektedir. Aliymandaki en büyük kayma gerilmesi ise, ray mantarı yüzeyinden daha uzakta meydana gelmektedir.

6.6 Hızlanma ve Frenleme Nedeniyle Oluşan Boyuna Kuvvetin Hesaplanması

Demiryolu aracının frenleme ve hızlanma evrelerinde meydana gelen mekanik kaynaklı boyuna kuvvetler, hattın özellikle istasyon bölgelerinde ortaya çıkar. Tezin 2.1.1. bölümü olan "Statik yükler" adlı bölümde detaylıca anlatıldığı üzere; hızlanma evresinde harekete başlayan dingiller, tekerlek ve ray arasındaki statik sürtünme nedeniyle hatta boyuna kuvvetler oluşturur. Hareket başlayan dingilin önündeki yolda boyuna çekme kuvvetleri, ardında bıraktığı yolda ise boyuna basınç kuvvetleri oluşur. Trenin frenleme evresinde, frenleyen ilk dingilin önündeki yolda, hızlanma durumunun aksine basınç gerilmeleri oluşur. Frenleyen dingilin ardında bıraktığı yolda ise çekme gerilmeleri oluşur. Genellikle tüm dingiller, frenleme prosedüründe yer aldığı için frenlemeden etkilenen hat kesiminin uzunluğu 30 metreye kadar çıkabilir.

Demiryolu araçlarının hızlanma ve frenleme evrelerinde ortaya çıkan boyuna kuvvetlere bağlı gerilmeleri hesaplamak için henüz belli bir formül geliştirilememiştir. Fakat hızlanma ve frenleme süresince oluşan boyuna kuvvetlerin, 55 kN değerine kadar ulaştığı bilinmektedir. Elektrikli araçlar için frenleme kuvvetleri, dingil yükünün %12'si ila %15'i arasında değişmektedir. Lichtberger'in formülüne göre, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nın özellikle istasyon bölgelerinde ortaya çıkan frenleme kaynaklı boyuna kuvvetler, Bağıntı (6.20) kullanılarak hesaplanmıştır [24]:

Q= dingil yükü= 134,4 kN,

F_b= frenleme kaynaklı boyuna kuvvet (kN) olmak üzere;

$$F_b = 0{,}15 * Q = 0{,}15 * 134{,}4 = 20{,}16 \text{ kN} \qquad (\mathbf{6.20})$$

Bağıntı (6.20)'ye göre, hattın istasyon bölgelerinde meydana gelen frenleme kaynaklı boyuna kuvvetlerin değeri 20,16 kN olarak hesaplanmıştır.

6.7 Ray Gerilmelerinin Sınır Değerler İçinde Kaldığının Kontrolü

Ray tabanı merkezindeki en büyük eğilme gerilmesi, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi ile karşılaştırılmalı ve gerilme değerinin, sınır değerler içinde kalıp kalmadığı kontrol edilmelidir. Rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi değeri; ray çeliğinin akma dayanımı, raydaki termal gerilme ve çeşitli parametrelere bağlı olarak değişen güvenlik katsayıları kullanılarak hesaplanır. Rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi "σ_{maks}" (MPa), Bağıntı (6.21) ile hesaplanır [63]:

$$\sigma_{maks} = \frac{\sigma_y - \sigma_t}{(1 + A) * (1 + B) * (1 + C) + (1 + D)} \qquad (\mathbf{6.21})$$

Bağıntı (6.21)'deki parametreler:

- σ_y= ray çeliğinin akma dayanımı,
- σ_t= raydaki en büyük termal gerilme,
- A= rayın yanal eğilmesi ile ilgili güvenlik katsayısı,
- B= hat durumu ile ilgili güvenlik katsayısı,
- C= ray aşınması ve korozyonu ile ilgili güvenlik katsayısı,
- D= hattaki dengelenmemiş dever ile ilgili güvenlik katsayısıdır.

Bağıntı (6.21)'de, ray çeliğinin akma dayanımı olan σ_y, hatta kullanılan 900 A kalitesindeki S49 tipi raylar için 580 MPa olarak alınmıştır [22]. Raydaki en büyük termal gerilme olan σ_t ise tezin 5.5.3. bölümü olan "Raydaki termal gerilmelerin hesaplanması" adlı bölümde hesaplanmış ve 84,52 MPa olarak bulunmuştur. Bağıntı (6.21)'deki A, B, C ve D güvenlik katsayıları ise Çizelge 6.4'e göre belirlenmiştir. Çizelge 6.4'de, A, B, C ve D güvenlik katsayıları için çeşitli araştırmacıların (Hay, Clarke ve Magee) önerdiği değerler görülmektedir [64].

Çizelge 6.4 : Raydaki en büyük eğilme gerilmesi için güvenlik katsayıları [64].

Güvenlik Katsayısı	Hay	Clarke	Magee
A	% 15	% 15	% 20
B	% 25	% 25	% 25
C	% 10	% 10	% 15
D	% 15-20	% 25	% 15

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, Çizelge 6.4'deki Magee'nin önerdiği güvenlik katsayıları kullanılmıştır. Bunun nedeni, Hay ve Clarke'ın önerdiği güvenlik katsayılarının, yalnızca cebireli raylar için geçerli olması; Magee'nin önerdiği güvenlik katsayılarının ise uzun kaynaklı raylar için de kullanılmasıdır [26, 64]. Buna göre, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi σ_{maks}, aşağıdaki veriler kullanılarak hesaplanmıştır:

- σ_y= 580 MPa,
- σ_t= 84,52 MPa,
- A= %20= 0,2,
- B= %25= 0,25,
- C= %15= 0,15,
- D= %15= 0,15 olmak üzere;

$$\sigma_{\text{maks}} = \frac{580 - 84{,}52}{(1 + 0{,}2) * (1 + 0{,}25) * (1 + 0{,}15) * (1 + 0{,}15)} = 249{,}77 \text{ MPa}$$

Buna göre, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi 249,77 MPa olarak bulunmuştur. Rayda meydana gelen en büyük eğilme gerilmesi ise tezin 5.5.2. bölümü olan "Ray tabanı merkezindeki eğilme gerilmelerinin hesaplanması" adlı bölümde hesaplanmış ve değeri 53,54 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre, ray tabanı merkezinde meydana gelen en büyük eğilme gerilmesi 53,54 MPa olup, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesinden küçüktür. Yani, rayda meydana gelen eğilme gerilmeleri, izin verilen sınırlar içinde kalmaktadır.

Ray mantarında meydana gelen en büyük tekerlek-ray temas gerilmesi değeri, genellikle 1000 MPa'ı aşar. Tezin 5.5.4. bölümü olan "Ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmelerinin hesaplanması" adlı bölümde, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki en büyük tekerlek-ray temas gerilmesi değeri, aliymanda 1193,63

MPa ve yatay kurbada 3323,04 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, çoğu ray çeliğinin elastik limitinin (çekme durumu için) üzerindedir. Ancak tekerlek-ray temas gerilmeleri, basınç gerilmeleridir ve bu gerilmelerin, ray çeliğinin çekme dayanımı ile karşılaştırılması doğru olmaz. Ray için basınç durumu, çekme durumundan daha karmaşıktır ve 1000 MPa'ı aşan tekerlek-ray temas basınç gerilmelerinde bile ray çeliğinin elastik limiti aşılmamış olur [62].

6.8 Ray Gerilmelerinin Ray Kusurlarına Etkisinin İncelenmesi

Ray gerilmelerinin, ray kusurlarına etkisini incelemek için raydaki gerilmelerin birbirinden farklı olduğu aliyman, yatay kurba ve istasyon gibi farklı hat kesimlerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Hattın farklı kesimlerinde hesaplanan toplam ray gerilmeleri ile o kesimdeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" arasındaki ilişki araştırılmıştır. Hattın alüminotermit ve yakma alın kaynaklı kesimleri için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır.

İlk olarak hattın alüminotermit kaynaklı kesimindeki aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerinde meydana gelen "km başına düşen ray kusuru sayısı" hesaplanmıştır. Aliyman bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı", hattın ilgili kesiminde tespit edilen ray kusuru sayısının, hat kesiminin uzunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir. Hattın alüminotermit kaynaklı aliyman kesiminin uzunluğu 1703 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 33'dür. Buna göre, alüminotermit kaynaklı aliyman kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı" aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$33/1{,}703 = 19{,}38 \text{ kusur/km}$$

Hattın alüminotermit kaynaklı yatay kurba kesiminin uzunluğu 1689 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 37'dir. Buna göre, alüminotermit kaynaklı yatay kurba kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı":

$$37/1{,}689 = 21{,}91 \text{ kusur/km}$$

Hattın alüminotermit kaynaklı istasyon kesiminin uzunluğu ise 584 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 12'dir. Buna göre, alüminotermit kaynaklı istasyon kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı":

$$12/0{,}584 = 20{,}55 \text{ kusur/km}$$

Buna göre, km başına düşen ray kusuru sayısı, 21,91 kusur/km'lik oranla en çok yatay kurba kesiminde görülmektedir. Ardından, 20,55 kusur/km'lik oranla istasyon kesimi gelmektedir. Ray kusurlarının en az görüldüğü bölge ise 19,38 kusur/km'lik oranla hattın aliyman kesimidir. Hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" yukarıdaki şekilde hesaplandıktan sonra, bu bölgelerdeki ray gerilmeleri ile ilişkisi araştırılmıştır. Bunun için ilk olarak hattın alüminotermit kaynaklı aliyman kesimindeki ray gerilmeleri hesaplanmıştır. Hattın aliyman kesimlerinde raya etkiyen gerilmeler: ray tabanındaki eğilme gerilmeleri, termal gerilmeler, ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleridir. Bu gerilmeler, tezin 5.5.2, 5.5.3, 5.5.4 ve 5.5.5. bölümlerinde hesaplanmıştır. Buna göre, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda, aliyman bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri (σ_a), Bağıntı (6.22) ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_a = \sigma_b + \sigma_t + \sigma_{c,a} + \tau_{maks,a} \qquad (\mathbf{6.22})$$

Bağıntı (6.22)'deki parametreler:

- σ_b= ray tabanındaki eğilme gerilmesi= 53,54 MPa,
- σ_t= raydaki termal gerilme= 84,52 MPa,
- $\sigma_{c,a}$= ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi= 1193,63 MPa,
- $\tau_{maks,a}$= ray mantarındaki kayma gerilmesi= 370,02 MPa olmak üzere;

$$\sigma_a = 53{,}54 + 84{,}52 + 1193{,}63 + 370{,}02 = 1701{,}71 \text{ MPa}$$

Hattın alüminotermit kaynaklı aliyman bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri 1701,71 MPa olarak hesaplandıktan sonra, hattın yatay kurba kesimindeki ray gerilmeleri hesaplanmıştır. Yatay kurbada raya etkiyen toplam gerilmeler (σ_k), aliymandakine benzer şekilde hesaplanmıştır:

- σ_b= ray tabanındaki eğilme gerilmesi= 53,54 MPa,
- σ_t= raydaki termal gerilme= 84,52 MPa,
- $\sigma_{c,k}$= ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi= 3323,04 MPa,
- $\tau_{maks,k}$= ray mantarındaki kayma gerilmesi= 1030,14 MPa olmak üzere;

$$\sigma_k = 53{,}54 + 84{,}52 + 3323{,}04 + 1030{,}14 = 4491{,}24 \text{ MPa}$$

Buna göre, hattın alüminotermit kaynaklı yatay kurba bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri 4491,24 MPa olarak hesaplanmıştır. Yani, yatay kurba bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri, aliymanda raya etkiyen toplam gerilme değerinin yaklaşık 2,64 katıdır. Ray kusurlarının, aliyman ve yatay kurbadaki dağılımı incelendiğinde de, yatay kurbadaki km başına düşen ray kusuru sayısı 21,91 iken, aliymandaki km başına düşen ray kusuru sayısı 19,38'dir. Yani, raya etkiyen gerilmelerin daha fazla olduğu yatay kurba kesimlerinde, km başına düşen ray kusuru sayısı da daha fazladır. Hattın alüminotermit kaynaklı aliyman ve yatay kurba kesimlerindeki ray gerilmeleri ve km başına düşen ray kusuru sayıları, Çizelge 6.5'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 : Hattın farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri ve kusur sayıları.

	Aliyman	Yatay Kurba
Ray Gerilmeleri (MPa)	1701,71	4491,24
Km Başına Düşen Ray Kusuru Sayısı	19,38	21,91

Ray gerilmeleri ve km başına düşen ray kusuru sayısı arasındaki ilişkinin incelenmesi gereken bir başka hat kesimi ise istasyon bölgeleridir. Hattın alüminotermit kaynaklı istasyon bölgelerinde km başına düşen ray kusuru sayısı, 20,55 olarak hesaplanmıştır. Yani ray kusurlarının, yatay kurba bölgelerinden sonra en yoğun olarak görüldüğü bölgeler istasyon bölgeleridir. Bu durumun sebebi, hattın istasyon kesimlerinde, demiryolu aracının hızlanma ve frenleme hareketleri nedeniyle rayda oluşan mekanik kaynaklı boyuna kuvvetlerdir. Bu boyuna kuvvetlere bağlı olarak oluşan ray gerilmelerini hesaplamak için kullanılan belli bir formül yoktur; ancak frenleme kaynaklı boyuna kuvvetler, dingil yüküne bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Rayda meydana gelen frenleme kaynaklı boyuna kuvvetler, tezin 5.5.6. bölümü olan "Frenleme ve hızlanma nedeniyle oluşan boyuna kuvvetlerin hesaplanması" adlı bölümde hesaplanmış ve değeri 20,16 kN olarak bulunmuştur. 20,16 kN'luk boyuna kuvvet dışında, istasyon bölgelerinde meydana gelen diğer ray gerilmeleri:

- σ_b= ray tabanındaki eğilme gerilmesi= 53,54 MPa,
- σ_t= raydaki termal gerilme= 84,52 MPa,
- $\sigma_{c,a}$= ray mantarındaki tekerlek-ray temas gerilmesi= 1193,63 MPa,

- $\tau_{maks,a}$= ray mantarındaki kayma gerilmesi= 370,02 MPa'dır.

Yukarıdaki veriler kullanılarak, istasyon bölgelerinde meydana gelen ray gerilmelerinin toplamı (σ_i):

$$\sigma_i = 53{,}54 + 84{,}52 + 1193{,}63 + 370{,}02 += 1701{,}71 \text{ MPa}$$

1701,71 MPa'lık bu değer, istasyon bölgelerindeki hesaplanabilir ray gerilmelerinin toplamıdır. Fakat frenleme kaynaklı boyuna kuvvetlere bağlı gerilmeler hesaplanamadığı için 20,16 kN'luk bu boyuna kuvvetlerin etkisi hesaba katılmamıştır. Dolayısıyla, istasyon bölgesinde meydana gelen toplam ray gerilmeleri, gerçekte 1071,71 MPa'dan daha fazladır. Hattın istasyon kesimindeki gerilmelerin 1071,71 MPa'dan daha büyük olması, aliyman kesimindeki gerilmelerden de daha büyük olması anlamına gelmektedir (aliymandaki gerilme değeri 1071,71 MPa'dır). Dolayısıyla, istasyon bölgesindeki km başına düşen kusur sayısının, aliyman bölgesindeki km başına düşen kusur sayısından fazla olması bu şekilde açıklanmaktadır.

Hattın alüminotermit kaynaklı kesimindeki inceleme bittikten sonra, yakma alın kaynaklı kesiminde inceleme yapılmıştır. Bunun için ilk olarak, hattın yakma alın kaynaklı kesimindeki aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerinde meydana gelen "km başına düşen ray kusuru sayısı" hesaplanmıştır. Hattın yakma alın kaynaklı aliyman kesiminin uzunluğu 3680 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 12'dir. Buna göre, yakma alın kaynaklı aliyman kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı" aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$12/3{,}680 = 3{,}26 \text{ kusur/km}$$

Hattın yakma alın kaynaklı yatay kurba kesiminin uzunluğu 10117 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 60'dır. Buna göre, yakma alın kaynaklı yatay kurba kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı":

$$60/10{,}117 = 5{,}93 \text{ kusur/km}$$

Hattın yakma alın kaynaklı istasyon kesiminin uzunluğu ise 1204 m'dir ve bu kesimde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusuru sayısı 15'dir. Buna göre, yakma alın kaynaklı istasyon kesiminde, "km başına düşen ray kusuru sayısı":

$$15/1{,}204 = 12{,}46 \text{ kusur/km}$$

Buna göre, yakma alın kaynaklı hat kesiminde km başına düşen ray kusuru sayısı, 12,46 kusur/km'lik oranla en çok istasyon kesiminde görülmektedir. Ardından, 5,93 kusur/km'lik oranla yatay kurba kesimi gelmektedir. Ray kusurlarının en az görüldüğü bölge ise 3,26 kusur/km'lik oranla hattın aliyman kesimidir. Hattın aliyman, yatay kurba ve istasyon bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" yukarıdaki şekilde hesaplandıktan sonra, bu bölgelerdeki ray gerilmeleri ile ilişkisi araştırılmıştır.

Hattın yakma alın kaynaklı kesimindeki ray gerilmelerinin hesabı, alüminotermit kaynaklı kesiminde olduğu gibidir. Yani, yakma alın kaynaklı kesimdeki ray gerilmeleri ile alüminotermit kaynaklı kesimdeki ray gerilmeleri arasında herhangi bir fark yoktur. Buna göre, hattın yakma alın kaynaklı kesimindeki aliyman bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri, Bağıntı (6.22)'de verilen formülle hesaplandığı üzere 1701,71 MPa'dır. Hattın yatay kurba bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değeri ise 4491,24 MPa'dır. Ray kusurlarının, aliyman ve yatay kurbadaki dağılımı incelendiğinde de, yatay kurbadaki km başına düşen ray kusuru sayısı 5,93 iken, aliymandaki km başına düşen ray kusuru sayısı 3,26'dır. Yani, raya etkiyen gerilmelerin daha fazla olduğu yatay kurba kesimlerinde, km başına düşen ray kusuru sayısı da daha fazladır. Hattın yakma alın kaynaklı aliyman ve yatay kurba kesimlerindeki ray gerilmeleri ve km başına düşen ray kusuru sayıları, Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6 : Hattın farklı kesimlerindeki ray gerilmeleri ve kusur sayıları.

	Aliyman	Yatay Kurba
Ray Gerilmeleri (MPa)	1701,71	4491,24
Km Başına Düşen Ray Kusuru Sayısı	3,26	5,93

Ray gerilmeleri ve km başına düşen ray kusuru sayısı arasındaki ilişkinin incelenmesi gereken bir başka hat kesimi ise istasyon bölgeleridir. Hattın yakma alın kaynaklı istasyon bölgelerinde km başına düşen ray kusuru sayısı, 12,46 olarak hesaplanmıştır. Yani ray kusurlarının, yakma alın kaynaklı hat kesiminde en yoğun olarak görüldüğü bölgeler istasyon bölgeleridir. Bu durumun sebebinin, hattın istasyon kesimlerinde, demiryolu aracının hızlanma ve frenleme hareketleri nedeniyle rayda oluşan mekanik kaynaklı boyuna kuvvetler olduğu düşünülmektedir.

Hattın alüminotermit ve yakma alın kaynaklı kesimlerindeki yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgelerinde km başına düşen ray kusuru sayıları Çizelge 6.7'de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 6.7'ye göre, alüminotermit kaynaklı kesimde, ray kusurlarının en yoğun olarak görüldüğü yerler sırasıyla yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgeleridir. Yakma alın kaynaklı kesimde ise ray kusurlarının en yoğun olarak görüldüğü bölgeler sırasıyla istasyon, yatay kurba ve aliyman kesimleridir.

Çizelge 6.7 : Hattın farklı kesimlerindeki km başına ray kusuru sayıları.

	Alüminotermit	Yakma Alın
Yatay Kurba	21,91	5,93
İstasyon	20,55	12,46
Aliyman	19,38	3,26

Çizelge 6.7'ye göre, hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde, ray kusurları en çok yatay kurba ve istasyon bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Kusurların en az görüldüğü bölgeler ise aliyman kesimleridir. Bu durumun sebebi, hattın aliyman kesimlerinde raya etkiyen gerilmelerin, yatay kurba ve istasyon kesimlerinde raya etkiyen gerilmelerden daha düşük olmasıdır. Aliyman ve yatay kurbadaki ray gerilmelerinin farklı olması; bu bölgelerdeki tekerlek-ray temasının birbirinden farklı olmasıyla açıklanmaktadır. Hattın yatay kurba kesimlerindeki tekerlek ve ray arasındaki temas, aliymandakinin aksine tekerlek budeni ile ray mantarının iç köşesi arasında gerçekleşir. Aliymanda tekerlek-ray teması, tekerlek sırtı ile ray mantarının orta merkez kısmında gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak tekerlek-ray temas alanı daha büyük olmaktadır. Temas alanı daha büyük olduğu için de aliymandaki tekerlek-ray temas gerilmeleri daha küçük değerler almaktadır. Bunun yanında, ray mantarındaki kayma gerilmeleri de tekerlek-ray temas gerilmelerine bağlı olarak hesaplandığı için bu gerilmeler de aliymanda daha düşük olmaktadır. Yatay kurbada ise tekerlek-ray teması, tekerlek budeni ile ray mantarının iç köşesinde meydana geldiği için temas alanı daha küçüktür. Temas alanı daha küçük olduğu için de yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleri daha büyük değerler almaktadır. Buna bağlı olarak, yatay kurbadaki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın, aliymandakinden daha büyük olmasının sebebinin, yatay kurbadaki toplam gerilme değerinin, aliymandaki toplam gerilme değerinden daha büyük olması olduğu düşünülmektedir.

Hattın hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı kesimlerinde, istasyondaki "km başına düşen ray kusuru sayısı", aliymandakinden fazladır. Bu durumun sebebinin, özellikle istasyon bölgelerinde demiryolu aracının hızlanma ve frenleme hareketleri yapması nedeniyle ortaya çıkan boyuna kuvvetler olduğu düşünülmektedir. Normal şartlar altında, istasyondaki gerilme değeri ile aliymandaki gerilme değeri aynı olduğu halde, istasyonda raya etkiyen bu boyuna kuvvetler, aliymandaki gerilmelere ek bir kuvvet getirir. Buna bağlı olarak da istasyondaki toplam gerilme değeri, aliymandakinden daha büyük bir değer alır.

Ray gerilmelerinin ray kusurlarına etkisini incelemek için yapılan bir başka analiz ise hattın farklı kesimlerinde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurlarının ortalama boyutunun birbiriyle karşılaştırılmasıdır. Bunun için hattın yatay kurba, istasyon ve aliyman bölgelerinde tespit edilen ray kusurlarının ortalama boyutu hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda, hattın yatay kurba bölgelerinde tespit edilen kusurların ortalama boyutu 8,48 mm, istasyon bölgelerinde tespit edilen kusurların ortalama boyutu 7,90 mm ve aliyman bölgelerinde tespit edilen kusurların ortalama boyutu 7,65 mm olarak bulunmuştur. Buna göre, ray kusurlarının boyutunun en yüksek olduğu bölge, hattın yatay kurba kesimleridir. Ardından, hattın istasyon kesimleri gelmektedir. Kusur boyutlarının en düşük olduğu bölge ise hattın aliyman bölgeleridir. Elde edilen bu sonuçların, hattın yatay kurba, istasyon ve aliyman kesimlerinde hesaplanan ray gerilmeleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Raya en yüksek gerilmelerin etkidiği yatay kurba bölgelerinde tespit edilen kusurların ortalama boyutu en fazladır. Raya en düşük gerilmelerin etkidiği aliyman bölgelerinde tespit edilen kusurların ortalama boyutu ise en düşüktür.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki ray kusurları tespit edilmiş, kusurların özellikleri belirlenmiş ve hatta meydana gelmesi beklenen ray gerilmeleri hesaplanarak, ray gerilme seviyesi ile ray kusurları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Ultrasonik ölçümün sonuçları, hatta birbirini takip eden her bir istasyon kesimi bazında ve hatta kullanılan farklı ray kaynağı türleri bazında değerlendirilmiştir. İstasyon, aliyman ve yatay kurba gibi farklı hat kesimlerinde meydana gelebilecek ray gerilmeleri hesaplanarak, bu kesimlerde ultrasonik yöntemle tespit edilen ray kusurları ile hesaplanan ray gerilmeleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

- Üretim ve işletim aşamalarında, raya etkiyen düşey, yatay ve boyuna yükler nedeniyle rayda çeşitli gerilmeler ortaya çıkar. Başlıca ray gerilmeleri; ray üretimindeki doğrultma işlemi nedeniyle oluşan kalıntı gerilmeleri, düşey dingil yükleri sonucu meydana gelen eğilme gerilmeleri, sıcaklık değişimine bağlı olarak oluşan termal gerilmeler, tekerlek ve ray arasındaki temas alanında ortaya çıkan tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleridir. Bu gerilmelerin en önemlisi ise tekerlek-ray temas gerilmeleridir. Çünkü normal işletim koşulları altında 1500 MPa değerine ulaşan tekerlek-ray temas gerilmeleri, kimi durumlarda 4000 MPa değerine kadar çıkmaktadır ve rayda yorulma kusurlarının ortaya çıkmasındaki en büyük etken olarak kabul edilmektedir.
- Ray kusurları, 3 ana başlık altında incelenmektedir: ray imalatı aşamasında oluşan kusurlar, uygun olmayan nakliye, montaj ve kullanım koşullarının neden olduğu kusurlar ve ray yorulması kusurları. Bu kusurlar içindeki en tehlikeli tür, ray yorulması kusurlarıdır. Tekerlek-ray temas alanındaki yüksek gerilmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkan yorulma kusurları, zaman içinde ray çeliğinin dayanımının düşmesine neden olur. Genellikle ray yüzeyinde başlayan yorulma kusurları; trafik yükleri altında, ray kesitinde derinlere doğru ilerler ve ray kırılmalarına yol açar. Bu kusurlar, ortaya çıktığı bölgede hemen hemen sürekli

bir form aldığı ve rayın daha fazla kırılmasına-ayrışmasına yol açtığı için oldukça tehlikelidir.

- Raydaki yüzeysel ve içsel kusurları tespit etmek için tüm dünyada yaygın olarak tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Rayların tahribatsız muayenesinde uygulanan başlıca yöntemler: ultrasonik yöntem, girdap akımları yöntemi, radyografi yöntemi, sıvı penetrant yöntemi ve manyetik indüksiyon yöntemidir. Bu yöntemlerden girdap akımları, sıvı penetrant ve manyetik indüksiyon yöntemleri, yalnızca raydaki yüzeysel kusurları tespit edebilmektedir. Radyografi yöntemi, diğer yöntemlere göre daha zaman alıcıdır ve bazı sağlık ve güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. Ultrasonik yöntem ise hem yüzeysel hem de içsel kusurları başarıyla tespit etmektedir. Bunun yanında, hatta manuel olarak uygulanabileceği gibi özel test trenleri kullanılarak da uygulanabilir ve bu sayede yüksek hızda ray kontrolüne imkân sağlar. Ultrasonik yöntem; etkili, hızlı, güvenilir ve uygulanabilirliği yüksek oluşu nedeniyle tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan metottur.
- Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda yapılan ultrasonik ölçümün sonuçlarına göre, hattaki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın en yüksek olduğu bölge, 41,32 kusur/km ile Aksaray-Emniyet İstasyonları arasındaki hat kesimidir. Bunu, 26,12 kusur/km ile Emniyet-Ulubatlı arasındaki kesim izlemektedir. Hattaki diğer 14 istasyon arasındaki hat kesiminin her birindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı", 13 kusur/km'nin altındadır ve büyük çoğunluğu oldukça küçük değerlerdir. Aksaray-Emniyet arasındaki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın, diğer 14 hat kesimindeki değerlerin en az 3 katı olması ve Emniyet-Ulubatlı arasındaki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın, diğer 14 kesimdeki değerlerin en az 2 katı olmasının sebebi, Aksaray-Emniyet-Ulubatlı arasındaki hat kesiminde alüminotermit kaynak kullanılmasıdır.
- Hat genelinde tespit edilen kusurların %83,95'i ray kaynaklarında, %16,05'i ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, kusurların büyük çoğunluğunun, ray kaynaklarında meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun sebebi, kaynak malzemesi ile rayın, bütünüyle aynı malzeme özelliklerine sahip olmamasıdır. Kaynak, mineral kompozisyonu ve tanecik yapısıyla raydan farklıdır. Bundan dolayı; çarpma kuvvetlerini, sürtünme ve kayma gerilmelerini ray ile aynı seviyede karşılayamaz.

- Hattın alüminotermit kaynaklı kesimlerindeki “km başına düşen ray kusuru sayısı”, 19,25 kusur/km’dir. Hattın yakma alın kaynaklı kesimlerindeki “km başına düşen ray kusuru sayısı” ise 5,60’dır. Buna göre, alüminotermit kaynaklı hat kesimi, yakma alın kaynaklı hat kesiminin yaklaşık 3,44 katı kadar kusur içermektedir.
- Hattın alüminotermit kaynaklı kesimlerindeki toplam kusurlu kaynak oranı %14,44’dür. Hattın yakma alın kaynaklı kesimlerindeki toplam kusurlu kaynak oranı ise %3,79’dur. Buna göre, kusurlu alüminotermit kaynak oranı, kusurlu yakma alın kaynağı oranının 3,81 katıdır.
- Hem alüminotermit kaynaklı kesimdeki “km başına düşen ray kusuru sayısı”nın, yakma alın kaynaklı kesimdekinden yüksek olması, hem de alüminotermit kaynaklardaki kusur oranının, yakma alın kaynaklarındaki kusur oranından yüksek olması; alüminotermit kaynakların, yakma alın kaynaklarına göre daha kötü bir performans gösterdiği sonucunu doğurmuştur. Bu durumun sebebi, alüminotermit kaynaklarda, iki ray ucunu birleştirmek için ray çeliğinden farklı özelliklere sahip “termit” adlı bir malzemenin kullanılmasıdır. İki ray arasında farklı bir malzeme kullanıldığı için kaynak geçiş bölgelerinde sertlikte düşme olur ve kaynak kalitesi düşer. Yakma alın kaynaklarında ise, alüminotermit kaynağın aksine, iki ray ucunu birleştirmek için başka bir kimyasal malzeme veya metal kullanılmaz, ana metal (ray) eritilerek kaynak yapılır. İki ray arasında başka özelliklere sahip farklı bir malzeme kullanılmadığı için kaynak kalitesi daha yüksek olur. Bunun yanında, yakma alın kaynakları, mobil yakma alın kaynak makineleriyle yapıldığı için işçilik hataları yok denecek kadar azdır. Alüminotermit kaynak yapımında ise makine kullanılmaz ve işçilik hatalarına çok sık rastlanır.
- Alüminotermit kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların %83,33’ü ray kaynaklarında, %16,67’si ise rayda ortaya çıkmıştır. Yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların %84,52’si ray kaynaklarında, %15,48’i ise rayda ortaya çıkmıştır. Buna göre, hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen kusurların, ray kaynaklarında yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır.

- Alüminotermit kaynaklarda tespit edilen kusurların %72,31'i kaynağın mantar bölgesinde, %27,69'u ise gövde bölgesinde bulunmaktadır. Yakma alın kaynaklarında tespit edilen kusurların %60,56'sı gövde bölgesinde, %39,44'ü ise mantar bölgesinde bulunmaktadır. Buna göre, alüminotermit kaynaklarda görülen kusurların büyük çoğunluğunun mantar bölgesinde, yakma alın kaynaklarında görülen kusurların büyük çoğunluğunun ise gövde bölgesinde bulunduğu sonucuna varılmıştır.
- Alüminotermit kaynaklı hat kesiminde tespit edilen (kaynak bölgeleri dışındaki) ray kusurlarının %76,92'si ray mantarında, %23,08'i ise ray gövdesinde ortaya çıkmıştır. Yakma alın kaynaklı hat kesiminde tespit edilen (kaynak bölgeleri dışındaki) ray kusurlarının %92,31'i ray mantarında, %7,69'u ise ray gövdesinde ortaya çıkmıştır. Buna göre, hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimlerinde tespit edilen (kaynak bölgeleri dışındaki) ray kusurlarının, ray mantarında yoğunlaştığı belirlenmiştir.
- Ray kusurları ile ray gerilmeleri arasındaki ilişkiyi incelemek için çeşitli hesap yöntemleri kullanılarak rayda meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Raya etkiyen dinamik düşey tekerlek yükünü hesaplamak için Eisenmann'ın "dinamik etki katsayısı" formülü kullanılmış ve hattaki dinamik etki katsayısı 1,68 olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak, raya etkiyen dinamik düşey tekerlek yükü 67,2 kN olarak hesaplanmıştır.
- Ray tabanı merkezinde meydana gelen en büyük eğilme gerilmesini hesaplamak için Winkler tarafından ortaya atılan ve Zimmerman tarafından geliştirilen "sürekli elastik temel üzerine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş" hesap yöntemi kullanılmıştır. Buna göre, düşey tekerlek yükleri nedeniyle meydana gelen ray tabanı merkezindeki en büyük eğilme gerilmesi 53,54 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer, rayda izin verilen en büyük eğilme gerilmesi değeri olan 249,77 MPa ile karşılaştırılmış ve rayın emniyetli olduğu belirlenmiştir.
- Raydaki sıcaklık değişimleri nedeniyle meydana gelen termal gerilmeleri hesaplamak için Schramm tarafından geliştirilen formül kullanılmış ve rayda ortaya çıkan en büyük termal gerilme 84,52 MPa olarak bulunmuştur.
- Tekerlek-ray temas alanında meydana gelen tekerlek-ray temas gerilmeleri, Hertz Teorisi'ne göre hesaplanmıştır. Tekerlek ve ray arasındaki temas, hattın yatay

kurba ve aliyman bölgelerinde birbirinden farklı olduğu için bu bölgelerdeki tekerlek-ray temas gerilmeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hertz Teorisi'ne göre, aliyman bölgelerindeki tekerlek-ray temas gerilmesi 1193,63 MPa olarak bulunmuştur. Yatay kurba bölgelerindeki tekerlek-ray temas gerilmesi ise 3323,04 MPa olarak hesaplanmıştır.

- Tekerlek ve ray arasındaki temas dolayısıyla, temas alanının birkaç mm altında meydana gelen kayma gerilmeleri, tekerlek-ray temas gerilmelerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Aliyman ve yatay kurbadaki tekerlek-ray temas gerilmeleri birbirinden farklı olduğu için bu bölgelerdeki kayma gerilmeleri de birbirinden farklıdır. Hertz Teorisi esas alınarak, Eisenmann'ın formülüne göre hesaplanan aliyman bölgesindeki en büyük kayma gerilmesi 370,02 MPa olarak bulunmuştur. Yatay kurba bölgesindeki en büyük kayma gerilmesi ise 1030,14 MPa olarak hesaplanmıştır.
- Aliyman ve yatay kurba bölgelerinde raya etkiyen toplam gerilme değerleri, bu bölgeler için hesaplanan eğilme gerilmeleri, termal gerilmeler, tekerlek-ray temas gerilmeleri ve kayma gerilmeleri toplanarak bulunmuştur. Buna göre, aliymanda raya etkiyen toplam gerilme değeri 1701,71 MPa, yatay kurbada raya etkiyen toplam gerilme değeri ise 4491,24 MPa olarak hesaplanmıştır. Yani, yatay kurbada raya etkiyen toplam gerilme değeri, aliymanda raya etkiyen toplam gerilme değerinin yaklaşık 2,64 katıdır.
- Aliyman ve yatay kurba bölgelerinde tespit edilen ray kusurlarının, ray gerilmeleriyle ilişkisini incelemek için bu bölgelerdeki "km başına düşen ray kusuru sayısı", hattın alüminotermit ve yakma alın kaynaklı kesimleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Alüminotermit kaynaklı hat kesiminin aliyman bölgesindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" 19,38 kusur/km olarak; yatay kurba bölgesindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" ise 21,91 kusur/km olarak bulunmuştur. Buna göre, raya etkiyen toplam gerilme değerinin daha yüksek olduğu yatay kurba bölgesinde, "km başına düşen ray kusuru sayısı" da daha fazladır. Raya etkiyen toplam gerilme değerinin daha düşük olduğu aliyman bölgesinde ise "km başına düşen ray kusuru sayısı" da daha azdır.
- Yakma kaynaklı hat kesiminin aliyman bölgesindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" 3,26 kusur/km olarak; yatay kurba bölgesindeki "km başına düşen

ray kusuru sayısı" ise 5,93 kusur/km olarak bulunmuştur. Buna göre, raya etkiyen toplam gerilme değerinin daha yüksek olduğu yatay kurba bölgesinde, "km başına düşen ray kusuru" sayısı da daha fazladır. Raya etkiyen toplam gerilme değerinin daha düşük olduğu aliyman bölgesinde ise "km başına düşen ray kusuru sayısı" daha azdır.

- Hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı hat kesimleri için, raya etkiyen toplam gerilme değerinin daha yüksek olduğu yatay kurba kesimlerinde hesaplanan "km başına düşen ray kusuru sayısı", aliymandaki değerden fazladır.
- Hattın alüminotermit kaynaklı kesiminin istasyon bölgelerinde, "km başına düşen ray kusuru sayısı" 20,55 kusur/km olarak bulunmuştur. Bu değer; 19,38 kusur/km olan aliymandaki değerden büyüktür. Hattın yakma alın kaynaklı kesiminin istasyon bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" 12,46 kusur/km olarak bulunmuştur. Bu değer; 3,26 kusur/km olan aliymandaki değerden büyüktür. Hattın hem alüminotermit hem de yakma alın kaynaklı kesimleri için, istasyondaki "km başına düşen ray kusuru sayısı"nın, aliymandaki değerden yüksek olmasının nedeni; istasyon bölgelerinde, demiryolu aracının frenleme hareketleri nedeniyle raya ek boyuna kuvvetler etki etmesidir. Frenleme kaynaklı ek gerilmeleri hesaplamak için henüz bir formül olmamakla birlikte, frenleme kaynaklı boyuna kuvvetler hesaplanabilir. Lichtberger tarafından verilen formüle göre hattaki frenleme kaynaklı boyuna kuvvetler hesaplanmış ve değeri 20,16 kN olarak bulunmuştur. Normal şartlar altında, aliyman ve istasyon bölgelerinde, raya etkiyen toplam gerilme değeri aynı olduğu halde (1701,71 MPa), istasyon bölgelerindeki frenleme kaynaklı ek boyuna kuvvetler nedeniyle bu bölgedeki gerilme değeri artmaktadır. Buna bağlı olarak, istasyon bölgelerindeki "km başına düşen ray kusuru sayısı" da aliymandaki değerden daha yüksek olmaktadır.
- Hattın yatay kurba bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu 8,48 mm, istasyon bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu 7,90 mm ve aliyman bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu 7,65 mm olarak bulunmuştur. Buna göre, raya en yüksek gerilmelerin etkidiği yatay kurba bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu en fazladır. Raya en düşük gerilmelerin etkidiği aliyman bölgelerindeki kusurların ortalama boyutu ise en düşüktür. Yani, raya etkiyen gerilmeler arttıkça, raydaki kusurların ortalama boyutunda da artış meydana gelmiştir.

- Bu çalışma ile gelecekte yapılmasında fayda görülen, aynı hattın farklı trafik yüküne sahip kesimlerindeki raya etkiyen farklı dingil yükleri nedeniyle meydana gelmesi beklenen ray gerilmelerindeki değişimin, ray kusurlarına etkisinin incelenmesi konusuna ışık tutulması amaçlanmıştır. Bunun yanında, hattın farklı zamanlarda hizmete açılan kesimleri için, bu hat kesimlerindeki rayların kullanım ömrü, bakım koşulları, raylarda herhangi bir değişim veya bakım olup olmadığı gibi parametreler dikkate alınarak, hattaki ray kusurlarının incelenmesi ve değerlendirilmesi konusuna zemin oluşturulması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **Ferreira, L. ve Murray, M.** (1997). Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs, *Transportation Review, **17(3)***, 207–221.

[2] **Johansson, A. ve Nielsen, J.** (2003). Out-of-roundrailway wheels: wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit, **217***, 135–146.

[3] **Integrated Study of Rolling Contact Fatigue (ICON).** (1999). European Commission DGX111 Brite/Euram III Project, Contract **BRPR-CT96-0245** Project Programme, Brüksel.

[4] **Cannon, D. F.** (2003). *An international cross reference of rail defects*, 2nd edition, UIC Rail Defect Management Report.

[5] **Papaelias, M. Ph., Roberts, C. ve Davis, C. L.** (2008). A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit, **222***, 367-384.

[6] **Office of Rail Regulation** (2006). The derailment at Hatfield: *A Final Report by the Independent Investigation Board*, İngiltere.

[7] **Sawley, K. ve Reiff, R.** (2000). Rail failure assessment for the office of the rail regulator, an assessment of railtrack's methods for managing broken and defective rails, *Report of the Transportation Technology Centre* Pueblo, Colorado, A.B.D.

[8] **Cannon, D. F., Edel, K. O., Grassie, S. L., Sawley, K.** (2003). Rail defects: an overview, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **26,*** 865-886.

[9] **Federal Railroad Administration** (2011). Track inspector rail defect reference manual, Amerika Birleşik Devletleri.

[10] **Bray, D.E.** (2000). Historical review of technology development in NDE, *15thWorldConference on NDT*, Roma, İtalya, 15-21 Ekim.

[11] **Aglan, H. A. ve Fateh, M.** (2006). Fatigue damage tolerance of bainitic and pearlitic rail steels, *Int. J. Damage Mech., **15***, 393–410.

[12] **Jeong, D. Y.** (2001). Progress in rail integrity research, *AREMA 2001 Conference*, Chicago, A.B.D., 9-12 Eylül.

[13] **Australian Rail Track Corporation** (2009). Manual for non-destructive testing of rail, ARTC, Avustralya.

[14] **Hesse, D. ve Cawley, P.** (2007). Defect detection in rails using ultrasonic surface waves, *Insight, **49,*** 318–326.

[15] **Fan, Y., Dixon, S., Edwards, R.S., Jian, X.** (2007). Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head, *NDT&E International, **40,*** 471–477.

[16] **Song, Z., Yamada, T., Shitara, H., Takemura, Y.** (2011). Detection of damage and crack in railhead by using eddy current testing, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, **3,*** 546-550.

[17] **Thomas, H. M., Dey, A., Heyder, R.** (2010). Eddy current test method for early detection of rolling contact fatigue (RCF) in rails, *Insight, **52,*** 361-365.

[18] **Takahashi, S., Sasaki, T., Kondoh, Y., Hirose, Y.** (2009). Residual stress evaluation of railway rails, *International Centre for Diffraction Data*, 240-247.

[19] **Transit Cooperative Research Program** (2007). Rail base corrosion detection and prevention, *Contractor's Final Report for TCRP Project D-7, Task 14,* A.B.D.

[20] **Thomas, H. M., Heckel, T., Hanspach, G.** (2007). Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains, *Insight, **49,*** 341-344.

[21] **Haidemenopoulos, G.N., Zervaki A.D., Terezakis P., Tzanis, J., Giannakopoulos, A.E., Kotouzas, M.K.** (2006). Investigation of rolling contact fatigue cracks in a grade 900A rail steel of a metro track, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **29,*** 887–900.

[22] **Esveld, C.** (2001). *Modern Railway Track.* MRT Productions, Hollanda.

[23] **Kerr, M.** (2012). *Rail Defects Handbook.* Australian Rail Track Corporation, Avustralya.

[24] **Lichtberger, B.** (2005). *Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics.* Eurail Press, Hamburg, Almanya.

[25] **Zarembski, A. M.** (2005). *The Art and Science of Rail Grinding.* Simmons-Boardman Books Inc., Nebraska, Amerika Birleşik Devletleri.

[26] **Doyle, N. F.** (1980). Railway track design: a review of current practice, *Bureau of Transport Economics Technical Report,* Canberra, Avustralya.

[27] **Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O., Smith, R. A.** (2009). Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review, *Engineering Fracture Mechanics, **76,*** 2563-2601.

[28] **Kassa, E.** (2012). *Wheel-rail contact,* Vehicle System Dynamics & Control course lectures.

[29] **UIC-712 R** (2002). Rail defects, *International Union of Railways (UIC),* Paris, Fransa.

[30] **Kumar, S**. (2006). *A study of the rail degredation process to predict rail breaks,* (yüksek lisans tezi), Lulea University of Technology, Lulea, İsviçre.

[31] **Singh, L.** (t.y.). Rolling contact fatigue in rails – an overview.

[32] **UIC-725 R** (2007). Treatment of rail defects, *International Union of Railways (UIC),* Paris, Fransa.

[33] **Öztürk, Z.** (2010). Demiryolunda ray bozulmalarına bağlı titreşim ve azaltma yöntemleri, *Transist 2010 Toplu Ulaşım Sempozyumu,* İstanbul, 2-3 Aralık.

[34] **Onay, M.** (2011). *Demiryollarında alüminotermit kaynak ile yakma alın kaynak yöntemlerinin teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması,* (yüksek lisans tezi), Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[35] **Milli Eğitim Bakanlığı** (2008). *Raylı sistemler teknolojisi: alüminotermit kaynak,* Ankara, Türkiye.

[36] **Arlı, V.** (2009). *Kentiçi Raylı Sistemler,* İstanbul Ulaşım A.Ş., İstanbul, Türkiye.

[37] **Kökçe, Y.** (2002). *Demiryolu taşıt ve raylarının üretim ve tamir-bakımında uygulanan kaynak yöntemlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi,* (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[38] **Öztürk, Z. ve Yılmaz, H.** (2013). Ray kusurlarının örnek hat üzerinde ultrasonik yöntemle belirlenmesi ve irdelenmesi, *6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu,* Ankara, 25-26 Nisan.

[39] **Apaydın, Y.** (2007). Raylı sistem araçlarında tahribatsız muayene uygulamaları. *Kentiçi Raylı Sistemler Bülteni,* 16-20.

[40] **KTU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.** (t.y). *Ultrasonik muayene laboratuvar föyleri,* Trabzon, Türkiye.

[41] **Innovative Track Systems.** (2008). Rail inspection technologies, *Sustainable Development, Global Change and Ecosystems Project Report,* **TIP5-CT-2006-031415,** Birmingham, İngiltere.

[42] **KTU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.** (t.y). *Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri,* Trabzon, Türkiye.

[43] **Yakıbul, İ.** (t.y.) Tahribatsız muayene yöntemleri.

[44] **Kaya, B.** (1992). *Muayenede teknolojik gelişmeler,* (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[45] **Hocking NDT.** (t.y.) Rail inspection: the eddy current solution.

[46] **Milli Eğitim Bakanlığı** (2006). *Metal teknolojisi: tahribatsız muayene,* Ankara, Türkiye.

[47] **Arslan, F.** (2010). *Tahribatsız malzeme muayenesi deneyi: penetran ve ultrasonik muayene,* KTU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, Trabzon, Türkiye.

[48] **İstanbul Ulaşım A.Ş.** (2012). *M1 Aksaray-Atatürk Havalimanı Hattı.* Alındığı tarih: 15.08.2013, adres: http://www.istanbul-ulasim.com.tr/rayl%C4%B1-sistemler/m1-aksaray-%E2%80%93-atat%C3%BCrk-havaliman%C4%B1.aspx

[49] **Sevim, R.** (2007). *İstanbul'da kent içi raylı sistemler ve üstyapı hesapları,* (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[50] **Geismar (UK) Ltd.** (2010). *Geismar EGO-US Temel Araç Kullanıcı El Kitabı*, Northampton, İngiltere.

[51] **Walters, K.** (t.y). *Measurements with traceability EGO-US,* (CD), Geismar (UK) Ltd., İngiltere.

[52] **Eisenmann, J.** (1972). *Germans gain a better understanding of track structure*, Railway Gazette International, Vol 128, No 8/305.

[53] **Office of Research and Experiments** (1965). *Stresses in rails, question 017, stresses in the rails, the ballast and the formation resulting from traffic loads,* Report **D71/RPI/E**, Utrecht.

[54**] Eisenmann, J.** (1969). *Stress on the permanent vay due to fligh axle loads*, Stahle Eisen, Vol. 89, No. 7, 373.

[55] **Zimmerman, H.** (1888). *Die Verechnung des eisenbahnoberbaues (the analysis of the railroad track) in German*, Verlag W. Ernst and Sohn, Berlin.

[56] **Eisenmann, J.** (1969). *Stresses in the rail acting as a beam*, Special excerpt from ETR Eisenbahntechnische Rundshau, Vol. 8, Hestra, Darmstadt.

[57] **Schramm, G.** (1961). *Permanent way technique and permanent way economy*, (English translation by Hans Lange), Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt.

[58] **Hunt, G. A.** (1994). *An analysis of track buckling risk,* British Railways Internal Report RRTM013.

[59] **Kerr, A. D.** (2003). *Fundamentals of Railway Track Engineering*. Simmons-Boardman Books Inc.

[60] **Olofsson, U. ve Lewis, R.** (2006). Tribology of the Wheel-rail contact. In *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* (Sf. 121-141). Taylor & Francis Group, LLC.

[61] **TS EN 13674-1** (2013). Demiryolu uygulamalari - demiryolu hattı - ray- bölüm 1: 46 kg/m ve üzeri vignole demiryolu rayları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[62] **Ayasse, J. B. ve Chollet, H.** (2006). Wheel-rail contact. In *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* (Sf. 85-120). Taylor & Francis Group, LLC.

[63] **Hay, W.W.** (1953). *Railroad Engineering*. John Wiley & Sons, New York.

[64] **Robnett, Q.L., Thompson, M.R., Hay, W.W., Flayabji, S.D., Peterson, H.C., Knutson, R.M., Baugher, R.W.** (1975). *Technical Data Bases Report,* Ballast and Foundation Materials Research Program, **FRA-OR&D-76-138**, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, Amerika Birleşik Devletleri.

[65] **Bayazıt, M. ve Oğuz, E. B.** (2005). *Mühendisler için İstatistik*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hazal Yılmaz

Doğum Yeri ve Tarihi: Bakırköy / 14.05.1988

E-Posta: hazaly@yildiz.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği Bölümü (2011)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Araştırma Görevlisi – Yıldız Teknik Üniversitesi (2011 – halen)
- Onur Öğrencisi – Nişantaşı Anadolu Lisesi (2006)

Yayın Listesi:

▪ Öztürk Z., **Yılmaz H.,** 2012: Demiryolu Ulaşımının Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde 100. Yıl Teknik Kongresi*, 22-24 Kasım 2012, İstanbul, Türkiye.

▪ Öztürk Z., **Yılmaz H.,** 2012: Yüksek Hızlı Demiryolu Köprülerinde Dinamik Etkiler. *Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde 100. Yıl Teknik Kongresi*, 22-24 Kasım 2012, İstanbul, Türkiye.

▪ Yardım M. S., Değer B., Kopuz M., Bacaran S., **Yılmaz H.,** 2012: YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Mesleki Stajları Üzerine Bir Araştırma. *Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde 100. Yıl Teknik Kongresi*, 22-24 Kasım 2012, İstanbul, Türkiye.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ Öztürk Z., **Yılmaz H.,** 2013: Ray Kusurlarının Örnek Hat Üzerinde Ultrasonik Yöntemle Belirlenmesi Ve İrdelenmesi. *6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, 25-26 Nisan 2013, Ankara, Türkiye.

▪ Öztürk Z., **Yılmaz H.,** 2013: Ray Kusurlarının Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi: Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı Örneği. *TRANSIST 2013 6. Uluslararası Ulaşım Sempozyumu ve Fuarı,* 25-26 Aralık 2013, İstanbul, Türkiye.