

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TREN HATLARINDA KULLANILAN RAY  
SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KAYNAKLI  
BÖLGENİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem Volkan YAVAŞCAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ  
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Yıldız YARALI ÖZBEK

Haziran 2015

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TREN HATLARINDA KULLANILAN RAY  
SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KAYNAKLI  
BÖLGENİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem Volkan YAVAŞCAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 25/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Yıldız YAZICI  
ÖZBİK

Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Sunal  
PARASIZ

Üye

Yrd. Doç. Dr. Mirza ALAF

Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Cem Volkan YAVAŞCAN

25.06.2015

## ÖNSÖZ

Demiryollarında yüksek hızlı trenlerin yaygınlaşmaya başlaması ile birlikte uzun kaynaklı raylara gereksinim artmıştır. Modern demiryolları; artan hız, seyahat konforu, gürültü, artan maliyet bilinci, verimlilik, yüksek aks yükleri, dinamik yükler ve raylarda oluşan gerilmeleri uzun kaynaklı ray kaynak yöntemlerini kullanarak çözmüşlerdir.

Bu çalışmada özellikle yüksek hızlı demiryollarında kullanılan ray birleştirme yöntemleri incelenerek çalışma prensipleri ve yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş olup yakma alın kaynağı ile alüminotermite kaynağı teknik olarak karşılaştırarak en avantajlı yöntem tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmam sırasında en büyük sıkıntıyı, yoğun bir temposu olan işim ile tezimi bir arada yürütmekte yaşadım. Bu sıkıntıyı aşmamda bilgisi, kaynakları ve deneyimleri ile bana her türlü konuda katkı sağlayan tez danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Yıldız YARALI ÖZBEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bununla birlikte, çok sevgili eşim Nesibe'ye ve hayatımıza dahil olarak anlamlaştıran biricik kızım Zeynep'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
YÜKSEK HIZLI TREN .....	4
2.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Sistemleri .....	5
2.1.1. Yüksek hızlı trenler .....	5
2.1.2. Maglev’li (Manyetik levitasyonlu) sistemler .....	5
2.2. Dünya’da Yüksek Hızlı Demiryolu .....	6
2.3. Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu .....	7
BÖLÜM 3	
DEMİRYOLU ÜSTYAPISI VE RAYLAR .....	8
3.1. Demiryolu Üstyapısı .....	8
3.2. Demiryolunda Kullanılan Raylar .....	9
3.2.1. Oluklu ray profili .....	10
3.2.2. Tek mantarlı ray profili .....	10
3.2.3. Ray kısımları .....	11
3.2.4. Rayların kimyasal bileşimi .....	12

3.2.5. Rayların çelik kalitesi.....	14
3.2.6. Raya etkiyen yükler .....	15
3.2.6.1. Statik yükler.....	16
3.2.6.2. Dinamik yükler .....	18
3.2.7. Ray Gerilmeleri.....	18
3.2.8. Ray Kusurları .....	19

## BÖLÜM 4

RAY BİRLEŞTİRİLME TEKNİKLERİ .....	21
4.1. Cebireli Ray Bağlantısı.....	21
4.2. Alüminotermite Kaynak Yöntemi .....	22
4.2.1. Kaynak bölgesinin hazırlanması .....	24
4.2.2. Kaynak aralığının ayarlanması ve mastarlama .....	24
4.2.3. Kalıp bağlanması ve macunlama .....	25
4.2.4. Ön ısıtma ve döküm .....	26
4.2.5. Kaynak fazlalıklarının sıyırılması ve taşlama .....	28
4.2.6. Alüminotermite kaynağını etkileyen parametreler .....	29
4.3. Yakma Alın Kaynağı Yöntemi .....	29
4.3.1. Yakma alın kaynağında dikkat edilecek hususlar .....	36
4.3.2. Yakma alın kaynağının avantajları .....	31
4.3.3. Yakma alın kaynağının uygulama aşamaları.....	32
4.3.3.1. Hizalama .....	32
4.3.3.2. Yakma .....	33
4.3.3.3. Ön tavlama .....	34
4.3.3.4. Yanma .....	34
4.3.3.5. Şişirme.....	35
4.3.3.6. Soğutma.....	36
4.4. Uzun Kaynaklı Raylar (UKR) .....	36
4.4.1. Uzun kaynaklı ray yapım koşulları .....	37
4.4.2. Sıcaklığın tespiti.....	38
4.4.3. Ray geriliminin alınması .....	38
4.4.3.1. Ortalama sıcaklıkta gerilimin alınması .....	39
4.4.3.2. Gerdirme suretiyle gerilimin dengelenmesi .....	39

4.4.3.3. Isıtma suretiyle gerilimin dengelenmesi .....	40
--	----

## BÖLÜM 5.

RAY KAYNAKLARINA UYGULANAN TESLER .....	42
5.1. Statik Eğme Testi .....	42
5.2. Yorulma Testi .....	43
5.3. Kimyasal Analiz.....	45
5.4. Mikroyapı İncelemesi .....	45
5.5. Sertlik Testi .....	46
5.6. Ultrasonik Muayene.....	47
5.7. Girdap Akımları Yöntemi .....	48
5.8. Radyografi Yöntemi.....	49
5.9. Sıvı Penetrant Yöntemi .....	49
5.10. Manyetik İndüksiyon Yöntemi .....	50

## BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMA .....	51
6.1. Numune Hazırlama .....	52
6.2. Kaba Taşlama.....	54
6.3. Geometrik Kontrol .....	55
6.4. Sıvı Penetrant Testi .....	57
6.5. Ultrasonik Muayene.....	57
6.6. Eğme Testi .....	58
6.7. Yorulma Testi .....	60
6.8. Makroyapı İnceleme .....	62
6.9. Mikroyapı İnceleme .....	64
6.10. Sertlik Testi .....	65
6.11. Kimyasal Analiz.....	67

## BÖLÜM 7.

DENEY SONUÇLARI.....	68
7.1. Görsel ve Geometrik Kontrol .....	68
7.2. Sıvı Penetrant Testi .....	69

7.3. Ultrasonik Muayene.....	69
7.4. Kimyasal Analiz.....	70
7.5. Eğme Testi Sonuçları .....	70
7.6. Yorulma Testi Sonuçları.....	72
7.7. Sertlik Değerlerinin İncelenmesi .....	73
7.8. Makroyapının İncelenmesi .....	77
7.9. Mikroyapının İncelenmesi .....	80
7.10. Kaynak İmalat Süresi.....	84
7.11. Kaynak İmalat Maliyeti .....	85
BÖLÜM 8	
TARTIŞMALAR.....	86
BÖLÜM 9	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	95
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ .....	103

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyumoksit
AT	: Aluminotermite kaynak yöntemi
FBW	: Yakma alın kaynak yöntemi
HAZ	: Isıdan etkilenmiş bölge
HB	: Brinell sertlik birimi
HV	: Vickers sertlik birimi
Kcal	: Kilokalori
Kg	: Kilogram
kJ	: Kilojul
kN	: Kilo newton
m	: Metre
mg	: Miligram
MHz	: Ses frekans birimi
mm	: Milimetre
mm <sup>2</sup>	: Milimetrekare
Mn	: Mangan
N	: Newton
SKR	: Sürekli kaynaklı ray
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti devlet demiryolları
UIC	: Uluslararası demiryolu birliği
UKR	: Uzun kaynaklı ray

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Maglev treni .....	6
Şekil 3.1. Ri 60 oluklu ray kesiti teknik çizimi .....	11
Şekil 3.2. 60 E1 tek mantarlı ray kesitinin teknik çizimi .....	12
Şekil 3.3. Rayın kısımları .....	13
Şekil 3.4. Örnek ray kesiti üzerinde ray gerilmeleri .....	20
Şekil 4.1. Rayların cebireli birleşimine bir örnektir .....	21
Şekil 4.2. Kaynak bölgesinin hazırlanması .....	26
Şekil 4.3. Masterlama işlemi .....	28
Şekil 4.4. Kalıp bağlanması ve macunlama işlemi .....	28
Şekil 4.5. Kaynak potasına şaloma yardımıyla ön ısıtma işleminin uygulanması .....	30
Şekil 4.6. Ön ısıtma ve döküm işlemleri .....	31
Şekil 4.7. Kaynak sıyırma makinesi ile kaynak sıyırma işlemi .....	32
Şekil 4.8. Taşlama işlemi tamamlanmadan önceki ray görüntüsü .....	32
Şekil 4.9. Ray gerdirilerek geriliminin alınması .....	40
Şekil 4.10. Ray ısıtma ekipmanları .....	41
Şekil 5.1. Eğme test düzeneği .....	42
Şekil 5.2. Rayın yorulma deney düzeneği .....	44
Şekil 6.1. Hazırlanan kaynak numunesi .....	53
Şekil 6.2. Yakma alın kaynağı yapımı .....	53
Şekil 6.3. Kalıp bağlanması ve macunlama işlemi .....	54
Şekil 6.5. Kaynak fazlalıklarının sıyırılması ve taşlama işlemi .....	55
Şekil 6.6. Masterla yapılacak ölçüm noktaları .....	56
Şekil 6.7. Eğme testi için numune hazırlama .....	59
Şekil 6.8. Eğme testi düzeneği .....	59
Şekil 6.9. Yorulma testi .....	60
Şekil 6.10. Numune hazırlama .....	61
Şekil 6.11. Ergimiş bölge şekil ve boyutları incelenmesi .....	61

Şekil 6.12. Mikroskobik kontrol numunesi.....	62
Şekil 6.13. Optik mikroskop .....	62
Şekil 6.14. Sertlik ölçme cihazı.....	64
Şekil 6.15. Yumuşamış bölge sertlik dağılımı ölçümü .....	64
Şekil 6.16. Sertlik tarama şekli .....	65
Şekil 6.17. Tipik sertlik profili .....	66
Şekil 6.18. Yuvarlanma yüzeyi sertlik noktaları.....	66
Şekil 7.1. Sıvı penetrasyon testi yapılan numune .....	71
Şekil 7.2. Alın kaynaklı numunenin yük-sehim grafiği .....	72
Şekil 7.3. Alüminotermite kaynaklı numunenin yük-sehim grafiği .....	73
Şekil 7.4. Alüminotermite kaynağı sertlik profili .....	77
Şekil 7.5. Yakma alın kaynağı ısıdan etkilenmiş bölgenin makro görünümü ve boyutları. (a) Ray merkezi, (b) taban ucu.....	78
Şekil 7.6. Alüminotermite kaynağı ergimiş bölgenin makro görünümü ve boyutları. (a) Ray merkezi, (b) taban ucu.....	79
Şekil 7.7. Alın kaynağı mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban.....	81
Şekil 7.8. Alüminotermite kaynağı ergimiş bölge mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban.....	82
Şekil 7.9. Alüminotermite kaynağı ısıdan etkilenmiş bölge mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban.....	83

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Ray çeliği sınıflarının kimyasal bileşenleri.....	14
Tablo 3.2. EN 13674-1'e göre çelik kaliteleri.....	16
Tablo 3.3. Ray çeliklerinin çekme mukavemeti ile sertlikleri arasındaki ilişki.....	16
Tablo 4.1. Farklı termit malzemelerine ait ön ısıtma parametreleri.....	29
Tablo 4.2. Alüminotermit kaynağı geometrik toleransları.....	32
Tablo 5.1. Alın kaynağı eğme testi gerekleri.....	42
Tablo 5.2. Alüminotermit kaynağı eğme testi gerekleri.....	42
Tablo 5.3. Yorulma testi terekleri.....	43
Tablo 6.1. Sıyırma sonucunda izin verilen fazla metal kalınlığı.....	55
Tablo 6.2. Geometrik kabul kriterleri.....	57
Tablo 6.3. Tarama pozisyonları-prob seçimi.....	57
Tablo 6.4. Asgari eğme testi gerekleri.....	60
Tablo 6.5. Yorulma testi gerekleri.....	61
Tablo 6.6. Yumuşamış bölge sertlik dağılımı değerlendirme kriteri.....	65
Tablo 6.7. Sertlik testi sonuçları değerlendirme kriterleri.....	67
Tablo 6.8. İzin verilen kimyasal kompozisyon.....	67
Tablo 7.1. Geometrik kontrol sonuçları.....	68
Tablo 7.2. Alüminotermit kaynağın kimyasal analizi.....	73
Tablo 7.3. Eğme testi sonuçları.....	75
Tablo 7.4. Yakma alın kaynağı sertlik değerleri.....	76
Tablo 7.5. Yuvarlanma yüzeyi sertlik testi.....	77
Tablo 7.6. Alüminotermit kaynaklı numunenin sertlik değerleri.....	78
Tablo 7.7. Alüminotermit kaynaklı numunenin sertlik değerleri (Devamı).....	79
Tablo 7.8. Yakma alın kaynak imalat süresi.....	84
Tablo 7.9. Alüminotermit kaynak imalat süresi.....	85
Tablo 7.10. Kaynak maliyetlerinin karşılaştırılması.....	85



## ÖZET

Anahtar kelimeler: Demiryolu Rayları, Ray Kaynağı, Alüminotermite Kaynağı, Yakma Alın Kaynağı, Ray Kaynağı Mekanik Özellikleri

Gelişmiş ülkelerde demiryolu taşımacılığı çok yaygın olarak kullanılmakta olup hızlı tren projeleri de hızlı bir şekilde uygulamaya girmektedir. Bu gelişmeye paralel olarak ülkemizde de son yıllarda yüksek hızlı tren hatları inşa edilmektedir.

Demiryolu araç tekerleklerinin raylarla sürekli temas halinde olması hız, konfor ve emniyeti etkileyen en önemli husustur. Bu hususların istenen seviyede olması için demiryolu ray kaynak bölgelerinin mümkün olan en yüksek standartlarda olması gerekmektedir.

Teknik bilgi ve beceri gerektiren demiryolu inşaatında en önemli aşamalardan biri rayların uygun yöntemlerle, doğru şekilde birleştirilerek sürekli ray dizileri oluşturulmasıdır. Günümüzde dünya literatüründe sürekli ray dizileri meydana getirmek için standart yöntem olarak kabul edilen alüminotermite kaynağı ile yakma alın kaynağı ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; öncelikle ray birleştirme yöntemlerinin incelenerek çalışma prensiplerinin ve yöntemlerinin tespitidir. Ayrıca alüminotermite ve yakma alın kaynak yöntemlerinin incelenmesi ve bu iki yöntemi teknik açıdan karşılaştırarak en avantajlı yöntemi tespit etmektir.

Çalışmada öncelikle yakma alın kaynak yöntemi incelenmiş; kaynak uygulamasında kullanılan ekipmanlar, kaynak uygulama aşamaları ve dikkat edilecek hususlar ayrıntısıyla incelenmiştir. Benzer şekilde alüminotermite kaynağı incelenmiş; avantajları, uygulama aşamaları ve kaynak uygulamasında dikkat edilecek hususlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Daha sonra ray kaynaklarına uygulanan tahribatlı ve tahribatsız test yöntemlerinden bazıları hakkında genel bilgiler verilmiş ve bu yöntemler genel hatlarıyla incelenmiştir.

Çalışmanın sonunda, çalışmanın hedefi olan alüminotermite ve yakma alın kaynak yöntemleri, maliyet ve teknik yönleriyle incelenerek karşılaştırılmıştır.

Sonuçların tamamı incelendiğinde; yakma alın kaynağının, alüminotermite kaynağına göre tüm yönleriyle avantajlı olduğu ve günümüzde uygulanabilecek en güvenilir ray birleştirme yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

# **INVESTIGATION OF WELDED SECTION USED IN RAIL SYSTEM IN HIGH SPEED TRAIN LINES**

## **SUMMARY**

Keywords: Railway, Rail, Rail Welding, Aluminothermic Welding, Flash Butt Welding, Mechanical Properties Of The Rail

Railway transportation is widely used in developed countries and high-speed railway projects fall into the applications. In parallel with this development high-speed train lines have been constructed in recent years in our country.

With the help of developing technology and the opportunities, the required level of speed and comfort has increased. The most important issue which affects the speed and comfort is the contact of railway vehicles and the rails continuously. For the required level of speed and comfort, the railways rail resource areas are needed to be the high standards.

Railway construction requires high technical knowledge and skill, therefore one of the most important stages in construction is establishing continuous rail lines with appropriate methods, joining them in an appropriate way.

Aluminothermic welding and flash-butt welding are accepted as the standard method in establishing the continuous welded tracks in the World and they are widely used in our country as well.

The purpose of this work is not only the evaluation of the principles and the methods which investigate the methods of joining the rails, but also examining the widely used joining method, aluminothermic welding, and flash-butt welding methods and comparing the methods financially and technically to find the advantageous method.

In this study, firstly aluminothermic welding method, the equipment used in welding applications, the stages of welding applications and the import issues of welding applications are examined in detail. Secondly, destructive and non-destructive testing methods, which are applied in rail investments, are generally in formed and investigated.

Considering all of the results, it is determined that flash-butt welding is advantageous over aluminothermic all comparison and it is concluded that the flash-butt welding can be applied as the most reliable rail joining method in these days.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlığın gelişiminin başlangıcından günümüze kadar insanların ve malların; güvenli ve hızlı ulaşımı her düzenli toplumun ciddi bir hedefi olmuştur. Bir yerden bir yere madeni bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen madeni tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin tümüne birden “demiryolu” denir.

Sanayi devrimi ile birlikte özellikle 1900 yılların başından itibaren Amerika ve Avrupa’ da demiryolu inşaatları hız kazanmıştır. Yeni teknolojik gelişmelerle birlikte ilk olarak Japonya’da kırk yıl önce kullanılmaya başlanan ileri teknoloji ürünü yüksek hız trenleri 1980’ler den itibaren tüm Avrupa’da yaygınlaşmaya başlamıştır [1].

Globalleşen dünyamızda teknolojinin baş döndürücü bir hızla ilerlemesi ve zamanın çok değerli bir değer olması nedeniyle ulaşım sistemlerinde yüksek hızların önemi bir hayli artmıştır. Avrupa’da ülkeler arasında yüksek hızlı demiryolu ağları kurularak ortalama 300 km/sa hızla giden trenler kullanılmaktadır. 2007 yılında Fransa’da demiryolu ulaşımında 575 km/saat ile bir rekora da ulaşılmıştır. Ülkemizde ise Ankara-İstanbul ve Ankara-Konya arasında yüksek hızlı tren 275 km/sa hıza ulaşmıştır [2].

Bir demiryolunda altyapı platformu üzerinde oturan yapı kısmındaki tüm malzeme ve ekipmanlara “üstyapı” denir. Demiryolu arabalarından gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya gelirler ve buradan da altyapıya geçerler. Ayrıca üstyapı iklim şartları gibi dış etkilere de doğrudan etkilenir. Bu durumda üstyapı bütün bu etkenlere yeterince dayanabilecek bir yapıda olmalıdır.

Demiryolu araçlarının tekerlekleri ray dediğimiz sürekli iki sırada metalik çubuk üzerine yuvarlanma hareketi yaparlar. Raylar da travers adı verilen ve rayların altında raylara dik yönde belirli aralıklarla tespit edilmiş mesnetlerdir. Böylece raylarla

traversler çerçeveleri oluştururlar. Traversler ise balast denilen bir kırma taş tabakası içine üst yüzeylerine kadar gömülmüşlerdir. Balast tabakası altyapı platformu üzerine serpiştirilmiştir. Ayrıca gerek rayların birbirine bağlantısı gerekse rayların traverslere tespiti için ray bağlantı malzemeleri adı verilen bir takım bağlantı ve tespit malzemesi kullanılır [2].

Tüm dünyada en çok kullanılan ray profili S49 ve 60E1 tipi raylardır. Bu iki rayın boyutları farklı olmasına karşın kimyasal yapıları aynıdır. Her iki ray tipide aynı üretim proseslerinden geçmektedirler yalnızca aldıkları şekiller farklıdır. Raylar üretim şartları gereği oldukça uzun üretilebilirler. Bu uzunluk 300 m'ye kadar çıkabilmektedir. Ancak fabrikada bu kadar uzun üretilen bir ürünün taşınması çok ciddi bir problem olduğundan, raylar genellikle nakliyata daha uygun olarak çok daha kısa üretilmektedirler. Rayların kullanım şartları ise uzun olmalarını gerektirmektedir. Bu gereklilik ise rayların birbirlerine bağlanması ile aşılabilmektedir.

Kaynaklı bağlantıların kullanılmasından önce demiryolu taşımacılığında kullanılan raylar birbirlerine cebirelerle bağlanarak kilometrelerce uzunluğunda hatlar elde ediliyordu. Halen de var olan bu teknik kullanıldığında, hava sıcaklığına bağlı olarak, rayların genleşerek uzaması veya kışalmasını dengelemek için ray bağlantı uçlarında boşluklar bırakılır. Bu boşluklar her bir tekerleğinin geçişinde gürültü ve sarsıntıya yol açarak konforlu bir yolculuğu önlediği gibi, güvenlik açısından da belli bir hız limitinin üzerine çıkılmasını engellemektedir. Ayrıca cebireli bağlantılar; bakım giderleri, ray kırılmaları, araçlarda yolda yıpranma ile yüksek maliyetli bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır.

Söz konusu sorunları aşmak amacıyla raylar, birbirlerine cebireler yerine yakma alın kaynağı veya alüminotermite kaynak kullanarak birleştirilmeye başlanmıştır.

Alüminotermite kaynağı ülkemizde hafif raylı sistemler tramvay ve metro hatlarında yaygın olarak kullanıldığı gibi konvansiyonel demiryolu hatları ile yüksek hızlı demiryolu hatlarının bakımında da kullanılmaktadır [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 ulaşabilmektedir. Demiryolu rayları, zaman içinde yapısal bütünlüklerinin bozulmasına yol açan önemli derecede büyük eğilme, kayma ve tekerlek-ray temas gerilmelerine, plastik deformasyona ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Uygun olmayan tekerlek-ray teması sonucu raya etkiyen temas gerilmeleri 4000 MPa değerine kadar çıkmaktadır. Raya etkiyen bu tür yüksek gerilmeler, özellikle kaynak bölgelerinde bulunan herhangi bir kusurun, zaman içinde trafik yükleri altında yatay, düşey ve enine doğrultularla ilerlemesine ve sonuç olarak rayın kırılmasına sebep olmaktadır [2].

Ray kaynağındaki kusurlarının tespiti ve ilerlemesini önlemek, ray kırılmalarını azaltmak, demiryolu hatlarının güvenliğini en yüksek seviyeye çıkarmak için demiryolu hattındaki bu kaynakların düzenli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

Hattaki kaynak kusurlarının tespit etmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biri, tahribatsız muayene yöntemleridir. 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. İşletme altındaki rayların tahribatsız muayenesinde, ultrasonik ve girdap akımları yöntemleriyle beraber radyografi yöntemi, manyetik indüksiyon yöntemi, sıvı penetrasyon yöntemi ve görsel muayene yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ray birleştirme yöntemlerini inceleyerek maliyet ve teknik açıdan karşılaştırarak en avantajlı, güvenli ve kullanılabilir ray birleştirme yöntemini tespit etmektir. Çalışma kapsamında cebireli ray birleştirme yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiş olup alüminotermit ve yakma alın kaynağı teknik açılarından karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma ile demiryolu üstyapısı ile ilgilenen kişi ve kurumlara faydalı olmaya çalışılmaktadır.

## **BÖLÜM 2. YÜKSEK HIZLI TREN**

Hızlı treni diğer konvansiyonel trenlerden ayıran temel nokta “hız” kavramıdır. Hız aracın tek başına yapabildiği bir unsur olsa da salt olarak hız ve aracı birlikte değerlendirmek yanlış olur. Hızı destekleyen, motive eden unsurları da hız faktörüne eklemek gerekir. Genel olarak hızlı trenle ilgili yapılan tanımlamalarda yüksek hıza elverişli ray sistemi ile donatılmış, elektrifikasyon sistemi ile güçlendirilmiş, köprü, viyadük gibi geçiş noktalarının farklı bir formatta dizayn edildiği bir yapı anlaşılır. Buna mukabil eski konvansiyonel tren hatlarının tekrar elden geçirilip yüksek hız için uygun hale getirilip işletilmesi de hızlı tren kapsamına alınır [3].

Hızlı trenlerin söz konusu yüksek hızlara ulaşması için bu hızı destekleyen özel yapım demiryolu hatları gerekmektedir. Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) ve Avrupa Birliği “Yüksek Hız” tanımını aynı esaslara dayandırmaktadır. UIC (International Union of Railways, Uluslararası Demir Yolları Derneği) “hızlı tren” i yeni hatlarda saatte en az 250 km hız yapabilen, var olan hatlarda da saatte en az 200 km hız yapabilen trenler olarak belirlemiştir [2].

Hızlı tren hatları titreşimi azaltmak ve ray segmentleri arasındaki açılmaları engellemek için hat boyunca kaynak yapılmış raylardan oluşur. Bu sayede üzerinden trenler saatte 200 km hız ile sorunsuz geçebilmektedir. Trenlerin hızında en önemli engel eğim yarıçaplarıdır. Hatların tasarımlarına göre değişebilmekle birlikte, hızlı tren yollarında eğimler çoğunlukla 5 kilometrelik bir yarıçapta gerçekleşir. Bazı istisnalar bulunsa da hızlı tren yollarında herhangi bir geçişin bulunmaması tüm dünyada kabul gören bir standarttır.

Halen dünyada hızlı tren İşletmeciliği yapan ülkelerdeki hızlı trenlerin önemli bir kısmı 350 km/ saat hızları geçmiyor. Almanya, Fransa ve Japonya’ da test ve araştırma amaçlı olarak 350 km/saat’i aşan hızlar uygulanıyor. Örneğin 2008 yılında Fransa

TGV treni ile Paris-Strazburg kentleri arasında yaptığı test sürüşlerinde 575 km/saat hızı ile yeni bir dünya rekoru kırdı. Farklı bir teknolojiye sahip olan Japonya'nın Maglev treni ise 2003 yılında 581 km/saat hız ile yeni bir rekor kırmıştır [2].

## **2.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Sistemleri**

Dünyada teknolojileri açısından mevcut ve geliştirilmekte olan 2 yüksek hızlı demiryolu sistemi vardır.

- Çelik tekerlek - çelik raylı sistemler;
- Maglev'li (Manyetik Levitasyonlu) sistemler.

### **2.1.1. Yüksek hızlı trenler**

Bu kategoriye giren yüksek hız trenleri, 360 km/sa'te kadar hızlarda işletilebilmektedirler. Özel olarak geliştirilmiş çelik tekerlek-çelik ray teknolojisi kullanılan bu trenler oldukça pahalı sistemler olup, bu sistemlerinin işletilmesinde güç kaynağı olarak elektrikten yararlanılmaktadır.

Bu sistemlerde ilke olarak sadece yüksek hıza çıkabilecek taşıtların değil; bu hıza izin verecek yeni yolların yapılması veya eski yolların yenilenerek çok daha yüksek düzeye çıkarılması da gerekmektedir [3].

### **2.1.2. Maglev'li (Manyetik levitasyonlu) sistemler**

Maglev, manyetik güç aracılığı ile bir taşıtın kaldırılıp yönlendirildiği ve hareket ettirildiği teknolojiler için kullanılan genel bir terimdir. Maglev sisteminde yol boyu sıralanmış bulunan bobinlere, aracın mıknatıslarının kilitletiği bir manyetik dalga yaratmak üzere alternatif akım verilmekte, böylece aracın mıknatısları ile yol boyu sıralanmış bobinler, aracın doğrusal hareketini sağlayan, tek bir senkron motor oluşturmaktadırlar. Araç hızı, bobinlere verilen akım frekansının değiştirilmesiyle denetlenmektedir.



Şekil 2.1. Maglev treni

Maglev sisteminde trenler 500 km/sa ve üzerinde hızlara erişebilmektedirler. Maglev sisteminde taşıt, kılavuz yol üstünde sürtünmesiz olarak hareket etmektedir. Taşıtın yol üzerinde askıda kalması, kılavuzlanması ve hızlanma ve yavaşlaması manyetik kuvvetler aracılığı ile gerçekleşmektedir. Bu işlemler için gerekli manyetik kuvvetler, taşıt ve yola yerleştirilmiş manyetik elemanlar tarafından üretilmektedir.

Maglev sisteminde tren havada hareket ettiği için yol ile bir teması bulunmamakta; dolayısıyla hareketli ve aşınan herhangi bir parça da bulunmamaktadır. Teorik olarak bunun anlamı, taşıt ve yol bakımına gerek olmadığıdır. Maglev sisteminde sürtünmenin ortadan kaldırılmış ya da azaltılmış olması, konforlu, sarsıntısız ve gürültüsüz bir seyahat olanağı sunmanın yanında, bakım giderlerini de azaltmaktadır. Hepsinden önemlisi, sürtünmenin olmaması, maglev taşıtlarının 500 km/sa'in üstündeki hızlarda hareket etmesini olanaklı kılmaktadır [7].

## 2.2. Dünya'da Yüksek Hızlı Demiryolu

Bugün yüksek hızlı trenler çok sayıda ülkenin, özellikle de kıta Avrupası, Japonya, Güney Kore ve Çin'in tercihi durumundadır. Bu ülkelerin çoğunda devlet desteği ile sürdürülen çalışmalar amaçlarına ulaşmaktadır. Uçaklarla boy ölçüşebilir bir hıza ve



rahatlığa kavuşan yüksek hızlı trenler özellikle Batı Avrupa kara trafiğini hafifletmiş ve kara taşımacılığı yüzünden her yıl bu ülkelerin gayri safi milli hasıllarında meydana gelen kaybı azaltmıştır.

Dünyadaki yüksek hızlı demiryolu hatlarının uzunlukları sürekli artmaktadır. 2014 yılı ortası itibariyle dünya genelinde 250 km/sa ve üzeri hızla işletimde olan YDH hatlarının toplam uzunluğu 10.739 km, inşası devam etmekte olan YHD hatlarının toplam uzunluğu ise 13.469 km'dir. Yapılması planlanan yeni hatlarla birlikte dünya genelinde 2025 yılı itibariyle 250 km/sa ve üzeri hızla işletimde olması beklenen YHD hatlarının toplam uzunluğu 41.787 km olması beklenmektedir.

Dünyada hızlı trenlerin kullanımı son 50 yılda gerçekleşmiş daha sonrada gittikçe yaygınlaşmıştır. Teknolojik gelişmeler, refah düzeyinin artışı, ülkeler ve bölgeler arası ekonomik entegrasyonların oluşması, nüfus artışı gibi sebeplerin yanında tüketicilerin tercihlerinin değişmesi, üretim faktörü olarak emeğin yer değiştirme gerekliliği gibi etkenler ulaştırma sektörünü etkilemiş ve geliştirmiştir. Bu sektör içerisinde demiryolu ulaşımına yeni bir soluk kazandıran hızlı trenler yukarıdaki sayılan nedenlerinde etkisiyle ülkelerin hedef yatırımlarından birisi olmuştur [9].

### **2.3. Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu**

Ülkemiz demiryollarının yüksek hıza yönelik ilk projesi Arifiye-Sincan Demiryolu Projesi'dir. Bu projenin yapımına 1976 yılında başlanmış ancak daha sonra gerekli kaynaklar ayrılmadığından dolayı “uyumaya” terk edilmiştir. Diğer yandan mevcut demiryolunun ıslahı için başlanan bir proje biçim değiştirerek mevcut demiryolu koridorunda çift hatlı yüksek hızlı yeni bir demiryolu hattı inşasına dönüşmüş ve günümüzdeki Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi ortaya çıkmıştır.

Yapımı tamamlana Ankara-İstanbul ve Ankara-Konya Hızlı Tren Projelerinin yanı sıra 2023'e kadar; Ankara-Sivas (450 km), Ankara-İzmir (606 km), Bursa-Osmaneli (106 km), Yerköy-Kayseri (150 km), Halkalı-Kapıkule (230 km) olmak üzere yeni hızlı tren hatları yapılması planlanmaktadır [8].

## **BÖLÜM 3. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI VE RAYLAR**

Bir yerden bir yere, çelik bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen çelik tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin hepsine birden demiryolu denir.

Bu tanımdan anlaşıldığı üzere, demiryolu yalnız üstyapı (ray, travers, bağlantı elemanları) ve altyapıdan (balast, alt balast, taban zemini) oluşmayıp, bunlarla birlikte istasyon tesisleri, araçlar, emniyet ve sinyalizasyon tesisleri gibi, taşıma işine yardımcı tüm tesislerin oluşturduğu bir bütündür. Demiryolunun taşıma işlemini istenilen standartlarda yerine getirebilmesi için, taşımaya ilişkin tüm tesislerin yeterli ve uyumlu olması gerekmektedir [6].

### **3.1. Demiryolu Üstyapısı**

Demiryolu üstyapısının en önemli bileşenlerinden biri olan raylar incelenmeden önce demiryolu üstyapısına ve görevlerine değinmek gerekir. Demiryolu taşıtlarının güvenli, konforlu ve ekonomik olarak seyrini sağlayan ve altyapı üzerine döşenmiş bulunan malzeme ve elemanların tümüne üstyapı denir.

Raylar, tren tekerleklerine kılavuz görevi görür ve tekerlere temas yüzeyi sağlar. Ray bağlantı elemanları, ray ile travers veya ray altı betonu arasındaki bağlantıyı sağlayan elemanlardır. Ray bağlantı elemanları ve traversler, ray açıklığını korur ve raylardan gelen yükleri yayar. Balast, traversler tarafından iletilen tüm etkileri kalıcı çökmelere uğramadan ve daneleri arasındaki sürtünme ile yayarak altyapıya ileten ve yol çerçevesine elastik bir yatak oluşturan; 30-60 mm ebadında kırılmış, keskin köşeli ve keskin kenarlı sert ve sağlam taşlara denir.

Bir demiryolu üstyapısının genel olarak görevleri şunlardır [11]:

- Yol boyunca demiryolu araçlarına düzgün ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Demiryolu taşıtlarından gelen statik ve dinamik yükleri güvenle ve kalıcı şekil değişikliğine uğramadan karşılamak ve kısmen azaltarak altyapıya iletmek,
- Yeterli elastikliğe sahip olmak,
- Şekil bozukluğuna uğradığında kolayca eski durumuna getirilebilir olmak,
- Yüzey sularını bünyesinden kolayca uzaklaştırabilir özellikte olmak
- Uzun ömürlü ve ekonomik olmaktır.

### 3.2. Demiryolunda Kullanılan Raylar

Demiryolu araçlarından gelen yükleri traversler üzerine dağıtan, boylamasına yönde tekerleklerle kılavuzluk edip demiryolu araçları için düzgün bir hareket yüzeyi sağlayan, aşınmaya dayanıklı ve yüksek mukavemetli çelikten özel profilde imal edilmiş üstyapı elemanına ray denilmektedir [10].

Rayların başlıca görevleri;

- Demiryolu araçlarına, sürtünmenin en aza indirildiği bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Demiryolu araçlarının tekerleklerini kılavuzlamak,
- Demiryolu araçlarından gelen kuvvetleri traverse aktarmaktır.

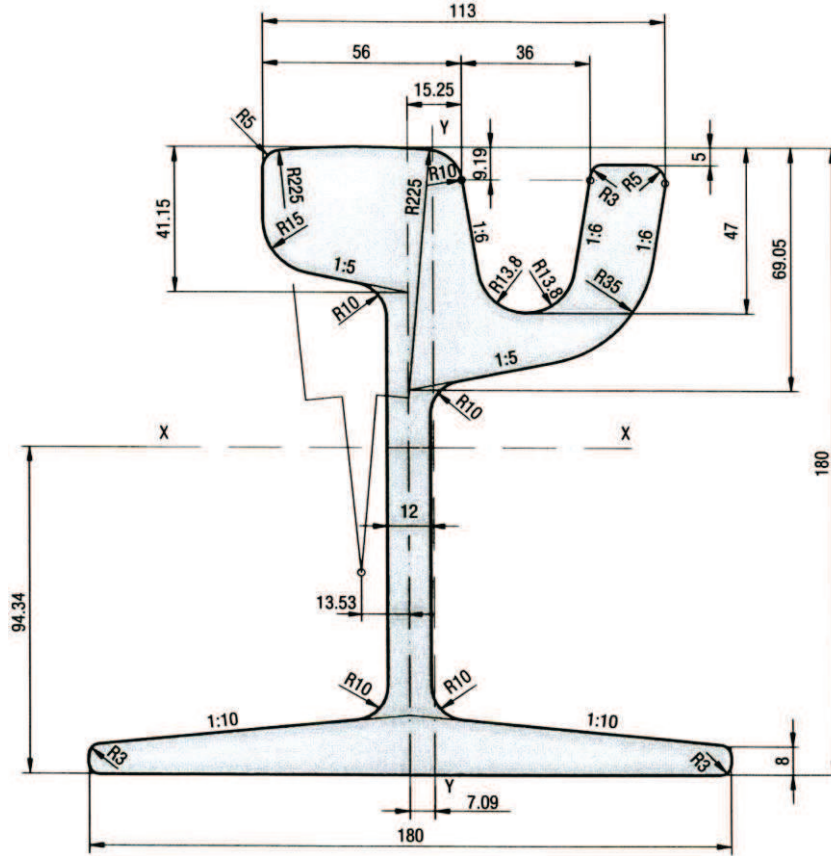
Rayların başlıca özellikleri;

- Aşınmaya karşı yüksek dayanım özelliği olmalıdır.
- Basınca ve yorulmaya karşı yüksek dayanım özelliği olmalıdır.
- Yüksek akma dayanımı ve gerilme mukavemeti olmalıdır.
- Gevrek kırılmaya karşı yüksek dayanım özelliği olmalıdır.
- Kaynaklanma kolaylığı olmalıdır.
- Yüksek derecede saflık özelliği olmalıdır.
- İyi yüzey kalitesi olmalıdır.

Şekil yapısına göre günümüzde en çok kullanılan 2 farklı ray profili mevcuttur. Bunlar oluklu raylar ve tek mantarlı raylardır.

### 3.2.1. Oluklu ray profili

Oluklu raylar yaygın olarak tramvay hatlarında kullanılır. Ayrıca demir yolu ve kara yolunun aynı seviyede kesiştiği yerlerde (hemzemin geçit) kara yolu, yaya yolu, demir yolunun aynı güzergâh içinde bulunması durumunda ve özellikle rıhtım hatlarında kullanılır. Sakıncalı yönü ise buden (demiryolu araç tekerleği) yataklarının çeşitli malzemelerle dolması nedeniyle yolun sürekli bakım ve temizliğe ihtiyacı duymasındır. Zira buden yataklarının dolması deray sebebi olabilir [11].

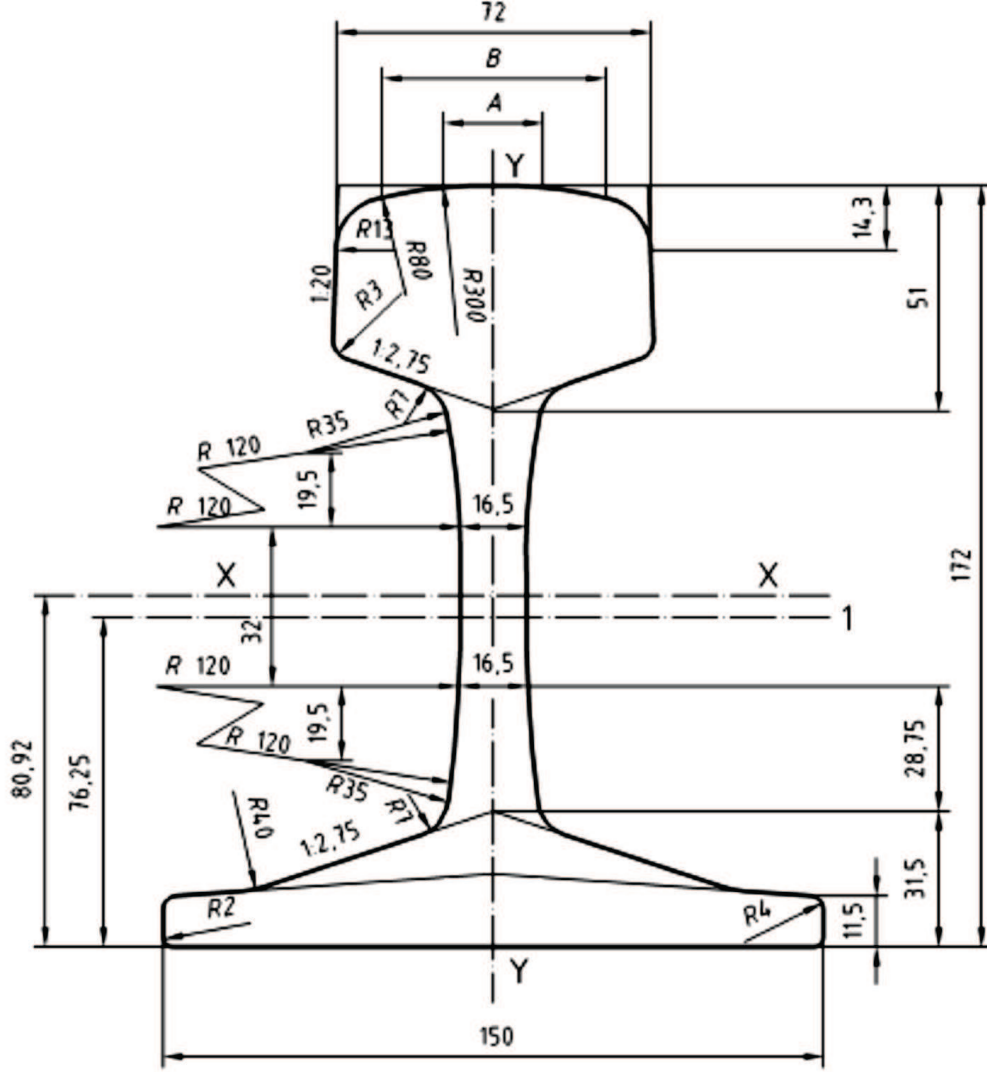


Şekil 3.1. Ri60 oluklu ray kesiti teknik çizimi

### 3.2.2. Tek mantarlı ray profili

Ray travers bağlantısını sağlayan ve taban olarak adlandırılan genişlemiş bir dayanma tablası ile tek yuvarlanma yüzeyinden oluşur. Bu raylar ilk defa 1832 yılında

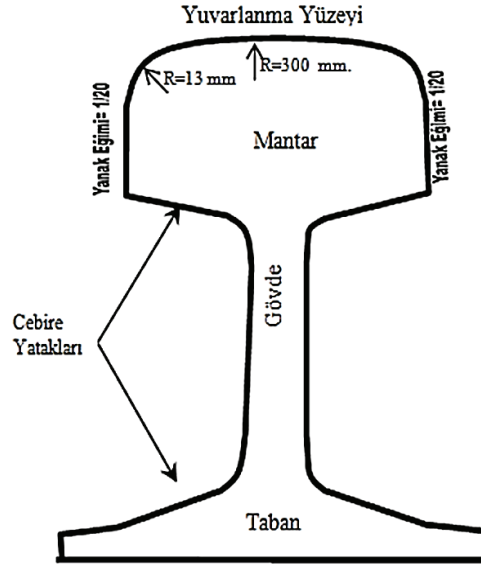
Amerikalı Stevens tarafından yapılmış, ancak yapanın değil geniş manada kullanılmasını sağlayan İngiliz mühendis Vinyol'un adı verilmiştir. Tek mantarlı raylar kolaylıkla traversler üzerine monte edilebilir. Dünyada ve ülkemizde en yaygın olarak kullanılan ray tipidir [11].



Şekil 3.2. 60 E1 tek mantarlı ray kesitinin teknik çizimi

### 3.2.3. Ray kısımları

Raylar; mantar, gövde ve taban olmak üzere üç kısımdan oluşurlar.



Şekil 3.3. Rayın kısımları

- Mantar: Tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan kısımdır. Uygun bir ray tekerlek temasını sağlamak için mantarın üst kısmında R:200–500 mm yarıçaplı bombelik mevcuttur. Mantar üst köşeleri boden içi eğrilğine iyi intibak etmesi için R: 13–14 mm yarıçaplı kurbularla çevrilmiştir.
- Gövde: Mantar ile taban arasında, rayların birbirine cebre ile bağlanmasına imkan veren kısımdır. Kesme kuvvetlerine maruz bulunan gövdede özellikle cebire bulonu delikleri civarında yüksek gerilimler meydana gelir.
- Taban: Rayların traverse basmasını ve tespitini sağlayan kısımdır. Ray tabanının geniş olması rayın selete sağlamca oturmasını ve devrilmemesini sağlar. Geniş tabanda traverse gelen gerilmeler azalacağından travers daha az yorulur.

### 3.2.4. Rayların kimyasal bileşimi

Raylar bandajla devamlı temas halinde bulduklarından dolayı birbirlerini aşındırırlar. Rayın yüksek mukavemetli olması bandajın raydan fazla aşınmasına, bandajın yüksek mukavemetli olması rayın fazla aşınmasına sebep olur. Asıl amaç, ray ve bandajın beraberce aşınmasının en düşük düzeyde olmasını sağlamaktır. Rayın mukavemetinin yükselmesi çeliğin kimyasal tertibini değiştirmekle, karbon miktarını çoğaltıp, ayrıca manganez karıştırmakla temin edilir, bu ise rayda uzamanın

azalmasına yani kırılabilirliğin artmasına neden olur. Rayda aşınma mukavemetinin yüksek olması istendiği gibi kopma uzamasının da %10'dan az olması istenmez [12].

Tablo 3.1. Ray çeliği sınıflarının kimyasal bileşenleri

Çelik Kalitesi		Kütle Oranı							Max. ppm		min Rm(Mpa)	Asgari % Uzama	
		C	Si	Mn	max P	Cr	max Al	max V	max N	O			H
R200	Sıvı	0,4-0,6	0,15-0,58	0,7-1,2	0,035	max 0,15	0,004	0,03	0,009	20	3	680	14
	Katı	0,38-0,62	0,13-0,6	0,65-1,25	0,04	max 0,15	0,004	0,03	0,01	20	3		
R220	Sıvı	0,5-0,6	0,2-0,6	1-1,25	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,008	20	3	770	12
	Katı	0,5-0,6	0,2-0,6	1-1,25	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,008	20	3		
R260	Sıvı	0,62-0,8	0,15-0,58	0,7-1,2	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,009	20	2,5	880	10
	Katı	0,6-0,82	0,13-0,6	0,65-1,2	0,03	max 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5		
R260Mn	Sıvı	0,55-0,75	0,15-0,6	1,3-1,7	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,009	20	2,5	880	10
	Katı	0,53-0,77	0,13-0,62	1,25-1,7	0,03	max 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5		
R320Cr	Sıvı	0,6-0,8	0,5-1,1	0,8-1,2	0,02	0,8-1,2	0,004	0,18	0,009	20	2,5	1080	9
	Katı	0,58-0,82	0,48-1,12	0,75-1,25	0,025	0,75-1,25	0,004	0,2	0,01	20	2,5		
R350HT	Sıvı	0,72-0,8	0,15-0,58	0,7-1,2	0,02	max 0,15	0,004	0,03	0,009	20	2,5	1175	9
	Katı	0,7-0,82	0,13-0,6	0,65-1,25	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5		
R350LHT	Sıvı	0,72-0,8	0,15-0,58	0,7-1,2	0,02	max 0,15	0,004	0,03	0,009	20	2,5	1175	9
	Katı	0,7-0,82	0,13-0,6	0,65-1,25	0,025	max 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5		

Ray çeliğinin bileşiminde demirden başka karbon, silis, manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Bunlardan karbon, silis ve manganezin belli miktarlarda bulunması, rayı daha mukavemetli hale getirmesi açısından faydalıdır. Fosfor ve kükürt ise çelik bünyesinden tamamen çıkarılamayan zararlı elementlerdir.

- Karbon: Karbon; çeliğin içinde bulunmakla mukavemetini artırır, ancak malzemenin daha gevrek olmasına neden olur. Ray çeliği imal olduğu sisteme göre içinde bulunması gereken karbon oranı on binde 40-60 arasındadır.
- Silis: Silis; çeliğin oksidasyonunu zorlaştıran bir element olup ayrıca malzemenin daha akıcı, yoğun ve ince zerreli, homojen olmasına neden olur. Ray çeliği içindeki silis oranı on binde 30-50 arasında olmalıdır.

- Manganez: Manganez; çeliği sert ve mukavemetli yapar. Ray çeliği içindeki manganez karbonun 2-3 katı miktarındadır. Ray çeliği içindeki manganez oranıda on binde 80-210 arasında olmalıdır.
- Fosfor: Fosfor; çeliğin daha sert olmasını sağlamasına rağmen, elastikiyetin azalmasında karbondan daha çok etkilidir. Bu nedenle ray çeliği içindeki fosfor miktarı on binde 3-8'den fazla olmamalıdır.
- Kükürt: Kükürtün ray çeliğinin içinde bulunması istenmez. Ancak tamamen çıkarılmasındaki zorluklar nedeniyle, en fazla on binde 3-6 oranında bulunması kabul edilir.

Demiryollarında kullanılan ray profillerinin seçiminde göz önüne alınan en temel faktörler yoldaki trafik yoğunluğu ve dingil yükleridir. Bu faktörlerin büyüklükleri arttıkça yolda ray aşınması ve raylar üzerine gelen yük miktarı da artmaktadır. Bu nedenle hem ray yüksekliğini artırarak aşınma ömrünü artırmak, hem de rayların atalet momentini artırarak yolun rijitliğini ve stabilitesini korumak amacıyla dingil yükü ve trafik yoğunluğu arttıkça kullanılan rayların metre ağırlıkları da artmaktadır [15].

### 3.2.5. Rayların çelik kalitesi

1950'lere kadar alaşımsız çelikten üretilmiş raylar ortalama % 0,50 C ve % 1,0 Mn içeren R260 (eski gösterimi St70) tipi çeliktedir. 1970'lerden sonra ray malzemesine % 1,00-1,30 kadar Cr ilave edilerek sertliği ve mukavemeti artırılmıştır. (Bu çeliklerin bileşimlerindeki Si oranı da % 0,60-0,75 seviyesine çıkmaktadır). Son yıllarda (Cr-Mo)'li rayların üretimine gidilmektedir. Ray üretiminde çelikteki H<sub>2</sub>'nin düşürülmesi için vakumla gaz giderme tekniği uygulanmakta ve H<sub>2</sub> oranınının 2 ppm'nin altına düşürülmesi istenmektedir. Vakum tekniği sağlanamadığı takdirde, rayların haddelenme sonunda yavaş soğutulması (örneğin, 50 kg/m'nin üzerindeki rayların 7 saatten önce 150 °C altına soğutulmaması) tavsiye edilmektedir.

Günümüzde ise büyük kullanım alanı bulan ray çeliklerinin kaliteleri "EN 13674-1 46 kg/m ve üzeri vignol raylar" da standartlaştırılmıştır. Bu standartta raylar sertliklerine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflar tablo 3.2.'de gösterilmiştir [17].

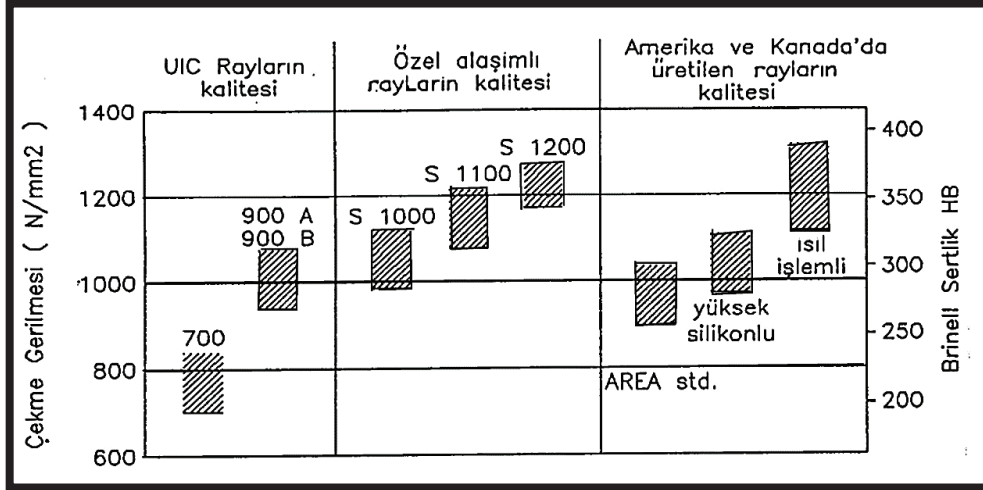


Tablo 3.2. EN 13674-1'e göre çelik kaliteleri

Kalite	Eski Gösterim	Sertlik (HBW)	Tanım
R200	700 A	200-240	Karbon-Mangan Alaşımli
R220	800 A	220-260	Karbon-Mangan Alaşımli
R260	900 A	260-300	Karbon Mangan Alaşımli
R260Mn	900 B	260-300	Karbon-Mangan Alaşımli
R320Cr	1100 A	320-360	% 1 Cr Katkılı
R350HT		350-390	C-Mn Alaşımli, Isıl İşlenmiş
R350LHT		350-390	Düşük Alaşımli, Isıl İşlenmiş

Ray çeliklerinin sınıflandırılmasında mukavemetleri de göz önüne alınmaktadır. Ray çeliklerinin sertlikleri ile çekme mukavemetleri arasındaki ilişki tablo 3.3.'de gösterilmektedir [18].

Tablo 3.3. Ray çeliklerinin çekme mukavemeti ile sertlikleri arasındaki ilişki



### 3.2.6. Raya etkiyen yükler

Ray, demiryolu araçlarının tekerleklerine doğrudan temas ederek tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan en önemli üstyapı elemanlarından biridir. Üzerine etkiyen her bir tekerlek yükünü travaslara 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 [13].

- Ray üretimindeki doğrultma işleminden kaynaklanan iç gerilmeler,

- Düşey dingil yükleri,
- Tren hareketi doğrultusundaki kuvvetler,
- Hat yüzeyi ve hat geometrisi bozulmalarından kaynaklanan dinamik kuvvetler,
- Sıcaklık değişiminden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
- Hızlanma ve frenleme kuvvetlerinden kaynaklanan boyuna kuvvetler,
- Atmosferik etkilerdir.

Bu yükler; ray üretiminde doğrultma işlemi nedeniyle meydana gelen kalıntı gerilmelerine, düşey dingil yükleri 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. Raya etkiyen yükler ve ortaya çıkan ray gerilmeleri; ray kesiti üzerinde boyuna, düşey ve enine doğrultularda ilerler.

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.

Demiryolu üstyapısında ray üzerine etkiyen yükler, statik ve dinamik yükler olmak üzere 2 ana bölümde incelenmektedir. Statik yükler; toplam araç ağırlığı ile hattın yatay kurp ve makas bölgelerinde ortaya çıkan merkezkaç ve merkezci kuvvetlerden meydana gelir. Dinamik yükler ise hat geometrisi ve üstyapı bozuklukları, ray ve tekerlek yüzeyi kusurları gibi nedenlerle, özellikle yüksek hızlarda ortaya çıkan yüklerdir [14].

### **3.2.6.1. 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 [19].

Statik yüklerin bir diğeri önemli bileşeni yanal yüklerdir. Yanal yükler, özellikle yatay kurplarda ortaya çıkarak ray mantarına etkiyen temel yük durumlarından biridir. Kurp yarıçapı azaldıkça, tren kurp 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, kurp 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.

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

- Uzun kaynaklı raylarda sıcaklık etkisine bağlı olarak oluşan boyuna termal kuvvetler,
- Demiryolu araçlarının hızlanması ve frenlemesi nedeniyle oluşan boyuna mekanik kuvvetler,
- 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.

### 3.2.6.2. 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 [22]:

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

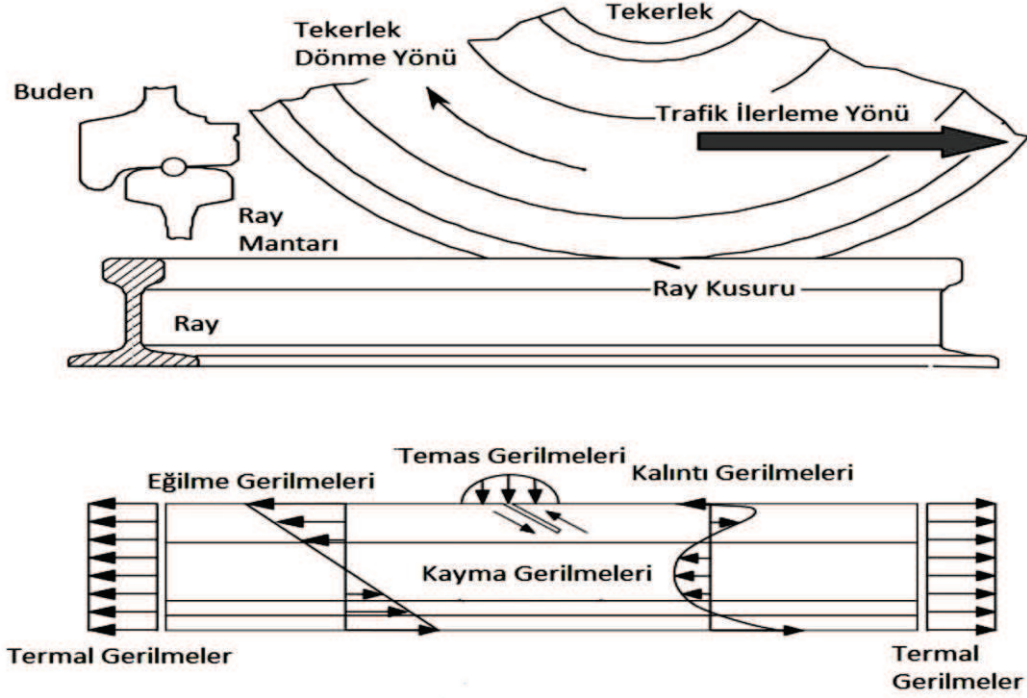
### 3.2.7. Ray Gerilmeleri

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 [22]:

- Eğilme gerilmeleri,
- Kayma gerilmeleri,
- Termal gerilmeler,
- Kalıntı gerilmeleri,
- 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 3.4.'de, ray kusurlarının oluşumuna etki eden önemli ray gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Örnek ray kesiti üzerinde ray gerilmeleri

### 3.2.8. Ray Kusurları

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. 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 [22].

Ray kaynaklarıyla ilgili kusurlar, rayları birbirine birleştirerek uzun kaynaklı ray elde etme teknolojisinde yaygın olarak kullanılan alüminotermite ray kaynağı ve yakma alın 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.

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 çeliğı 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 değıldir. 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. Herhangi bir yorulma çatlağında meydana gelen kırılma, hemen yakınındaki raydaki gerilmeleri artırır ve rayın daha fazla kırılmasına ve ayrışmasına yol açar [22].

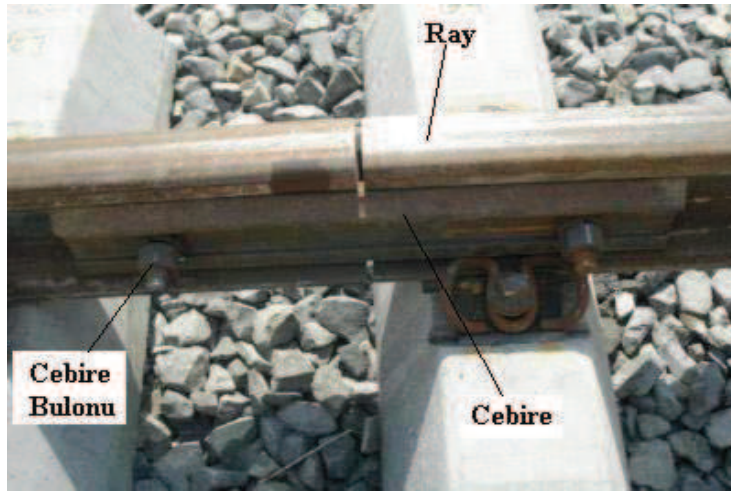
Ray dizileri, belirli uzunluktaki rayların uç uca getirilmesi ile oluşturulurlar. Rayların birbirine bağlandıkları ek yerlerine conta adı verilir. Rayların birbiri ile bağlanması en yaygın olarak iki farklı şekildedir. Bunlar cebireli ray bağlantısı ve uzun kaynaklı raylardır.

## BÖLÜM 4. RAY BİRLEŞTİRİLME TEKNİKLERİ

Ray dizileri, belirli uzunluktaki rayların uç uca getirilmesi ile oluşturulurlar. Rayların birbirine bağlandıkları ek yerlerine conta adı verilir. Rayların birbiri ile bağlanması iki farklı şekildedir. Bunlar cebireli ray bağlantısı ve uzun kaynaklı raylardır.

### 4.1. Cebireli ray bağlantısı

Çeşitli uzunluktaki rayları birbirine bağlayan malzemeye cebire adı verilmektedir. Cebireler, ray tiplerine ve kullanım durumlarına göre yumuşak çelikten özel profillerde imal edilirler. Ray uçlarındaki delik sayısına göre 4 veya 6 delikli olurlar. Bağlantı sırasında rayın gövdesine oturmazlar, 5-6 mm boşluk kalacak şekilde bağlanırlar. Cebire bulonlarına rağmen ray uçlarının genişlemesi için bulon delikleri ile ray delikleri farklı çapta delinir. Cebireler 2-3 yılda bir sökülerek yanakları tel fırça ile fırçalanarak temizlenmeli, iyi cins bir yağla yağlanarak yerlerine takılmalıdır. Cebirelerde iki ray arasında, sıcaklık değişiminden kaynaklanan uzunluk değişimlerini mümkün kılmak için dilatasyon payı bırakılır [8].



Şekil 4.1. Rayların cebireli birleşimine bir örnektir.

Cebire bulonları baş, gövde ve somundan oluşmaktadır. Yola takılırken bulunun somun kısmı yol içerisine gelecek şekilde bağlanır. Bu durum yol kontrolünde kolaylıkla görülebilmelerini sağlar.

Cebire ile bağlanan kesimler; düşey ve yatay ekseninde yolun en çok bozulan, malzemeleri sık sık kırılan, yolun bakım masrafı yüksek kesimleridir. Cebireler, kaynaklı birleşimlere göre ilk yapım maliyeti olarak çok daha ekonomiktir. Ancak; cebirelerin bakımı, ray ve tekerlekte meydana getirdiği aşınmalardan dolayı oluşan bakım gereksinimi ve oluşan gürültü ve titreşimler için alınacak önlemler, uzun vadede kaynaklı birleşimleri daha ekonomik kılmaktadır. Artan tren frekansı, yüksek dingil yükleri ve tren hızları gibi faktörler hat yüklerinin ve bununla bağlantılı olarak, gerilmelerin artmasına neden olmuştur. Tekerler, cebireli ray bağlantılarının boşluklarından geçtiği zamanlar önemli kuvvet etkileri bırakırlar. Uzun kaynaklı raylar bu gibi zayıf noktaları önler. Bu durum da daha yüksek güvenlik sağlar [8].

Dünyada, demiryolu hatlarının imalatında 2 tip ray birleştirme kaynağı uygulanmaktadır. Bunlar Alüminotermite ve Yakma alın kaynağı yöntemleridir.

#### **4.2. Alüminotermite Kaynak Yöntemi**

Alüminotermite kaynağı birbirine kaynak yapılacak iki ray parçasının, alüminotermite adı verilen karışım yardımıyla bir pota içerisinde ergiyik hale getirilmesi, ergiyen metalin birleştirilecek parçalar arasındaki boşluğa dökülmesi ve katılaştırılması yoluyla birleştirilmesi prensibine dayanır.

Alüminotermite reaksiyonlar yüksek sıcaklıkta metal oksitler ile alüminyum metali veya alaşımları (AlCa veya AlSi) arasında oluşan ekzotermik reaksiyonlardır. Dışarıdan enerji verilmeksizin yüksek ergime sıcaklığına sahip metal veya alaşımların üretiminde (W veya FeW, Mo veya FeMo, Ti veya FeTi v.b.) yaygın olarak kullanılan alüminotermite yöntemde redükleyici etkiye sahip metal veya metal alaşımları metal oksitler ile (TiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) reaksiyona sokularak yüksek sıcaklığa ulaşılır. Bu esnada aktif elementin tam oksidasyonu ile redüklenen metalin ayrışması ile birlikte akışkan bir cüruf oluşur [24].



Birçok aluminotermite kaynağı bağlantı süreci mevcut olmasına rağmen tercih edilen süreç kısa bir ön ısıtma tatbik edilen uygulamadır. Kaynak minimum çalışma zamanı gerektirir ve güvenilir sonuçlara sebep olacak ön ısıtmada operatör bağımlılığı yoktur. Aluminotermite kaynağı aslında bir döküm işlemidir. Demir oksit ve ince taneli alüminyumdan oluşan karışım, noktasal olarak ateşlendiğinde 1200 °C sıcaklığa ulaşır. Bu sıcaklıkta karışım içerisinde ekzotermik (ısıveren) bir tepkime başlar ve sıcaklık 3000 °C ye kadar yükselir. Tepkime sonucunda ergimiş demir elde edilir. Kullanılan teçhizat ve malzeme tamamıyla taşınabilir ve iş herhangi bir harici güç kaynağı kullanılmaksızın yapılabilir.

Kaynakta oluşan ısı, kaynak yerini ısıtmağa yarar, yani aluminotermite demiri ve cüruf kaynak yerinden akıtılarak burası kaynak sıcaklığına kadar ısıtılır ve aşağıdaki aluminotermite reaksiyon ile ergime sağlanır. Süreç aşağıdaki (Denklem 4.1) kimyasal reaksiyon ile kendini göstermektedir [24].



Rayların Brinell sertliği ısıdan etkilenmemiş bölgede 275 HB iken, kaynak metalinde 285 HB'ye yükselmekte ve ince taneli bölgede dar olarak oluşmuş sertlik aralığında ise düşmektedir. 650°C-750 °C' de yumuşak tavlama sıcaklığı kaynaktan takribi 55 mm uzaklıkta çelik tane yapısını inceltir. En dar noktasında kaynak aralığı 22 mm ve kaynak metali takribi 30 mm genişliktedir.

Alüminotermite kaynağı uygulamalarında ticari olarak hazırlanmış kaynak kitleri kullanılmaktadır. Kit içeriği şöyledir;

- Alüminotermite kaynağı şarjı
- Prefabrik kalıp
- Otomatik bage
- Tutuşturucu maytap
- Sızdırmaz macun

#### 4.2.1. Kaynak bölgesinin hazırlanması

Alüminotermite kaynağı yapılmasının ilk aşaması kaynak bölgesinin hazırlanmasıdır. Bu işlem sırasında ray başları uygun şekilde kesilir ve temizlenir. Ray sıcaklığı ölçülür. Traversler arasında kalıp bağlanmasına engel olabilecek fazla balast temizlenir ve bölge kalıp bağlanmasına hazır hale getirilir (Şekil 4.2.).



Şekil 04.2. Kaynak bölgesinin hazırlanması

#### 4.2.2. Kaynak aralığının ayarlanması ve mastarlama

Kaynak aralığı her ticari ürün için termit miktarına ve reaksiyon sırasında açığa çıkan ısı miktarına göre 24-30 mm arasında değişmektedir. Aralığın doğru ayarlanması doğru bir kaynak yapımı için çok önemlidir. Aralık genişliğiyle ters orantılı olarak kalıp içinde kalan ray uzunluğu da değişmekte, bu durum ergiyen ray uzunluğuna etki etmektedir.

Kaynak aralığının gereğinden az olması durumunda reaksiyon sonucu açığa çıkan ısı kalıp içinde kalan ray uzunluğunu eritmeye yetmemekte ve bu nedenle istenen özellikleri sağlayabilecek, yeterli genişlikte bir kaynak dikişi oluşturulamamaktadır. Aralığın fazla olması durumunda ise reaksiyon sonucu pota içinde oluşan sıvı çelik miktarı meydana gelen aralığın doldurulmasına yetmemektedir. Ayrıca kalıp içinde kalan ray miktarının çok kısa olması durumunda kalıp dışında kalan rayın da ergiyerek

ergimiş metalin ray-kalıp birleşme yerlerinden kalıp dışına taşması da gözlenebilen bir durumdur [24].

Raylar arasında kaynak sonrasında pürüzsüz bir geçiş elde edilmesi için ray profilleri karşılıklı olarak aynı hizaya getirilerek masterlanır. Alüminotermite kaynaklarının geometrik toleransları EN 14730-1’de standartlaştırılmıştır. Yapılan kaynakların bu toleranslar içinde kalması için masterlama işleminin önemi büyüktür. Masterlama işlemi sırasında göz önüne alınması gereken en önemli nokta kaynak metalinin ve rayların kaynaktan sonra soğuyarak hacimce azalacağıdır. Masterlama sırasında bu etkiyi yok etmek için ray başları 1,5-2 mm yukarı kaldırılarak işlem gerçekleştirilir. Masterlama işlemi Şekil 4.3.’de gösterilmektedir [8].



Şekil 4.3. Masterlama işlemi

#### 4.2.3. Kalıp Bağlanması ve Macunlama

Alüminotermite ray kaynağında kullanılan kalıplar özel olarak dizayn edilmiş prefabrik kalıplardır. İki veya üç parçadan oluşan, alttan veya üstten dolum yapan çeşitleri mevcuttur. Kalıplar kaynak aralığına her iki tarafta eşit ray uzunluğu kalacak şekilde bağlanır.

Kalıplar bağlandıktan sonra ek yerlerinden sıvı metal sızmasını engellemek için bu bölgeler macunla kapatılır. Bu işlem Şekil 4.4.’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kalıp bağlanması ve macunlama işlemi

#### 4.2.4. Ön Isıtma ve Döküm

Kaynaklanacak rayların uçları kalıpların bağlanmasından sonra ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Ön ısıtma işleminde kullanılan yakıt genellikle propan olmasına rağmen asetilen, LPG ve benzin de kullanılabilir. Ön ısıtma sıcaklığı yaklaşık 850-900 °C olup, ray başları tamamen östenitlenene kadar devam eder. İşlemin amacı soğuma hızını düşürerek yapıda martenzit oluşumunu engellemektir.

Ön ısıtma işleminde özel olarak dizayn edilmiş ön ısıtma şalamaları kullanılır. Bu şalamaların delik sayısı 20-26 arasında değişmektedir. Kullanılan yanıcı gaz ve oksijen basınçları sabitlenmiş olup, ön ısıtma işlemi için süre ölçüsü kullanılmaktadır. Ray kalitesine, profiline, kaynak aralığına ve kullanılan termitin açığa çıkardığı ısı miktarına bağlı olarak ön ısıtma süresi her üretici ürün için değişkendir.

Döküm yapılmadan önce pota şalamayla içi 200-300 °C'ye gelene kadar ısıtılarak kurutulur. Bu sayede reaksiyonun başlamasıyla kalıp içinde kalmış olan nemin aniden buharlaşarak patlamaya yol açması engellenmiş olur.

Uygun ön ısıtma işleminden sonra pota içine koyularak hazırlanmış alüminotermit kaynak malzemesi maytapla yakılarak reaksiyon başlatılır. Potanın alt deliğinde

bulunan otomatik bage pota içindeki sıcaklık yeterli seviyeye geldiğinde otomatik olarak açılır.



Şekil 4.5. Kaynak potasına şaloma yardımıyla ön ısıtma işleminin uygulanması

Sıcaklığın yeterli seviyeye gelip baganın açılması yaklaşık 25 sn sürer. Bu sürenin 10 saniyeden az olması durumunda pota içindeki reaksiyon tamamlanamaz ve kaynak içinde demir oksitler ve metalik alüminyum kalıntıları kalır. Sürenin 35 saniyenin üzerinde olması durumunda ise dökülen sıvı çelik yeterli sıcaklıkta değildir. Bu durumda çelik-cüruf ayrımı tam olarak gerçekleşemez ve erken katılaşma meydana gelir [22].



Şekil 4.6. Döküm işlemleri



#### 4.2.5. Kaynak fazlalıklarının sıyırılması ve taşlama

Döküm işleminden sonra katılaştırmanın tamamlanması için yaklaşık 5 dakika beklenir. Bu bekleme süresinden sonra kalıp kırılır ve kaynak sıyırma makinesiyle kaynak fazlalıkları kesilir. Besleyicilerin kırılması kırılma yüzeylerinde çentik etkisi görülebileceği için tavsiye edilmez.



Şekil 4.7. Kaynak sıyırma makinesi ile kaynak sıyırma işlemi

Sıyırma işleminden sonra mantarın üst ve yan yüzeyleri kaynak taşlama makinesi ile taşlanarak temizlenir. Bu sırada kaynak hala sıcak olduğundan ve soğuyarak hacimce küçülmeye devam ettiğinden üst ve yan yüzeylerde 0,5-1 mm çekme payı bırakılır. Bu paylardan geriye kalanlar kaynak tamamen soğuduktan sonra yine kaynak taşlama makinesiyle taşlanarak giderilir uygun toleranslara getirilir. EN 14730-2 standardında alüminotermite kaynakları için mantar üstü ve yan yüzey toleransları sınıflandırılmıştır. Ülkemiz hızlı tren hatlarında kullanılan toleranslar tablo 4.2’de gösterilmiştir [22].

Tablo 4.2. Alüminotermite kaynağı geometrik toleransları

Geometrik Toleranslar		
Dikey yuvarlanma yüzeyinde	▲ + 0,3	▼ - 0,2
Taşlama uzunluğu (L/2)	max. 500 mm her iki tarafta	
Mantarın yanal yüzeyi	↔ + 0,3	→← - 0,2

#### 4.2.6. Alüminotermite kaynağını etkileyen parametreler

İyi bir kaynak kalitesi elde etmek için kaynaktan önce conta bölgesi kontrol edilmeli geometrik ve fiziksel bozukluklar giderilmelidir. Kaynak yapılmadan önce aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

- Raylarda aşınma (baş ve yan) izin verilen limitler içinde olmalıdır.
- Raylar ultrasonik test yöntemi ile incelenmelidir
- Raylar bükülmüş ya da çarpık olmamalıdır
- Raylarda kaynak bölgesinde kir, pas ve yağ olmamalıdır.
- Raylar alevle kesilmemelidir.
- Ray başlarının 10 cm yakınında cebire deliği bulunmamalıdır.

#### 4.3. Yakma Alın Kaynağı Yöntemi

Yakma alın kaynağı, bir direnç basınç kaynak yöntemidir. Kaynak yapılacak rayların ağız kısımları, düzgünce tıraşlanarak erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Daha sonra da belirli bir basınçla birbirine alın altına 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 aksel basınç ile erimiş metal ve oksitler dışarı sürülerek ana metal bir miktar yığılmaya uğratılır. Yakma alın kaynağı atölyelerde ve sahada ray bağlantılarında ve uzun kaynaklı rayların üretimi için en yaygın kullanılan kaynak prosesidir. Bir yakma alın (FBW) kaynağı bir dövme bağlantıdır ve kaynak makinesinin kapasitesine, birbirine bağlanacak kesit boyutlarına bağlıdır [28].

Ülkemizde TCDD atölyelerinde sabit alın kaynağı makineleri ile raylar belirli uzunluğa kadar (168 veya 180 m gibi) kaynaklanır. Hat geometrisinin ray taşımaya uygun olduğu durumlarda maksimum 500 m kadar raylar kaynatılmaktadır. Kaynaklanan bu raylar özel taşıma vagonları ile kullanım yerlerine sevk edilir.

Fabrikalarda yapılan kaynaklar zaman, hava şartları, arazi şartları gibi olumsuzluklar olmadığı için daha ekonomik ve kalitelidir. Tek olumsuz yönü uzun rayların taşınmasındaki zorluktur. Atölyelerde kaynatılan UKR raylar, özel ray taşıma vagonları ile taşınmaktadır.

Kaliteli bir alın kaynağı elde edebilmek için de kaynak, sıcaklığı ve zaman parametreleri titizlikle ayarlanmalıdır. Yüksek aşınma dayanımından dolayı yüksek ray aşınma oranının olduğu yollardaki östenitik manganez çeliği raylarına uygulanması çoğu kez yakma alın kaynağı tercih edilmektedir. 110 kg/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip, kromlu raylarda doğal soğutma ısı etkili bölgede martenzittin yüksek seviyede oluşumuna sebep olabilir. Bu bölgedeki sertliğin artışı ve aynı zamanda rijitliğin azalmasına sebep olur. Mikro yapı içinde oluşan gerilmeler tavlama yapılarak giderilebilir.

Tekniğine uygun bir kaynak yapıldığından emin olmak gereklidir. Bağlanmış ana raylar kadar iyi bir profil sağlanmalıdır. Sabit yakma alın kaynak makinesi 4 noktadan hiza alarak geometrisini otomatik olarak ayarlar. Otomatik ayarlama yaparak operatör hatalarını minimize ettiği gibi geometrik hataları da minimize eder. Kaynak işleminin sonunda taşlama veya değişik formlarda frezeleme ile gerçekleştirilir ve bu durumlarda ray kaynağının ortam sıcaklığında veya yakın derecedeki sıcaklıkta olması, yüzey işlemine müteakip herhangi bir ısıl distorsiyon olmaması bakımından arzu edilir.

Yakma alın kaynağının diğer bir uygulama şekli mobil yakma alın kaynak makinesi ile yolda yapılan kaynak işlemidir. Uzun kaynaklı rayların üretimine bağlı olan bu prosesin uygulama ve gereksinimleri atölyelerdeki gibidir ve bütün bu faktörler yoldaki benzer işlerde aynen uygulanabilir. Metalürjik ve mekanik bağlantı açısından bir mobil kaynak makinesi ile yapılan kaynak, sabit bir tesisteki proses ile aynı kalitededir.



#### 4.3.1. Yakma alın kaynağında dikkat edilecek hususlar

Yakma alın kaynağı, her iki iş parçasının uçlarına kavrama çeneleri üzerinden bir transformatörden beslenen bir elektrik akımının geçirilmesi suretiyle birbirine bağlanacak parçaların ısıtıldığı bir direnç kaynak işlemidir. İkinci devre iki iş parçasının bitişmesi sırasında kapanır. Kaynak, elektrik ark sistemi ile ray başları eritilip iki ray birleştirilerek yapıldığından hiçbir ilave madde (elektrot, eritici madde, koruyucu gaz vb.) kullanılmamaktadır.

Yüksek kalitede kaynak elde etmek için yakma operasyonu krater oluşumu olmaksızın temas yüzeylerini yumuşatmalıdır. Yüzey ve komşu ray bölgesi; kaynak dikişinde gözenekler, mikro boşluklar ve metalik olmayan bileşikler için şişirme esnasında kafi hareketi sağlamak üzere ergime sıcaklığında olmalıdır.

Ray alınlarıyla ısıtıcı yüzeyi arasında tam temasın sağlanması için basınç altında raylar ön ısıtma süresi kadar tutulur. Şişirme için ray uçlarının tüm kesit alanı boyunca uniform olarak ön ısıtılması önemlidir. Ön ısıtma süresinin sonunda ray başları uygulama basıncı altında yakma ve şişirme işlemine tabi tutulur. Bu süreyi gerekenden kısa tutmak, erimiş plastik kısmın derinliğinin kaynak için gerekli olandan kısa kalmasına sebep olabileceği için bundan sakınılmalıdır. Gerekli şişirme kuvveti birleşim yüzeylerinin kesit sahasına ve kaynak edilecek rayın sıcak akma noktasına bağlıdır.

Daha sonra basınç düşürülerek sifıra yakın bir değerde sabitlenir. Bu süre başlangıçtan yaklaşık 100 saniye sonrasına denk gelir. Bu sürenin olabildiğince kısa tutulması son derece önemlidir, çünkü ray ağızları bu süre içinde soğumaya yüz tutacağı gibi havayla direkt temas altında kalan erimiş malzemenin termal oksidasyon yapma ihtimali vardır. Böyle bir durumda kaynak kalitesi çok düşeceğinden ısıtıcının çekilmesi ve rayların yapıştırılması çok çabuk gerçekleştirilmelidir [30].

### 4.3.2. Yakma Alın Kaynağının Avantajları

- Ray malzemesine yabancı olan bir malzeme kullanılmaz, böylece kalitesi yüksek ray kaynakları elde edilebilir.
- Kısa ısıtma bölgesi (erime kaybı 30-40 mm) dolayısıyla eşit kalan bir sertlik derecesi mevcuttur.
- Tam mekanize bir kaynak çeşitidir. İnsan faktörüne bağlı hatalar minimum düzeydedir.
- Kaynak için ön tavlama ve hazırlık işlemi yoktur.
- Kaynak verimliliği en yüksek yöntemdir.
- Bir kaynak süresinin ortalama 3 dakika olması, birim zamanda daha çok kaynak yapılmasına imkan verir.
- Malzeme sarfıyatı en düşük ve çevreye en az zarar veren kaynak yöntemidir.

Yakma alın kaynak yöntemi; R260 900A kalitesindeki raylarda, eğilme dayanımı ortalama 125 ton ile en yüksek eğilme dayanımlı, gerilme dayanımı ortalama 80 kg/mm<sup>2</sup> ile en yüksek gerilme dayanımlı kaynak yöntemidir [33].

### 4.3.3. Yakma Alın Kaynağının Uygulama Aşamaları

#### 4.3.3.1. Hizalama

Kaynaklanacak ray başları 4 farklı noktadan hiza alınarak ayarlanır. Ray yükseklik farkının sıfır olması arzu edilse de, maksimum 1,5 mm'ye kadar yükseklik farkı kabul edilebilmektedir. Ray başlarının hizası otomatik olarak makine tarafından yapılır.

Ray uçları, iki çene çiftini ortalayacak biçimde, bir açıklık bırakılmadan kaynak makinesine yerleştirilir. Aynı kesitteki raylar; ray mantarı bölgesinde birbirine bakan ray tekerlek temas köşelerinde, ray-tekerlek sürtünme yüzeyinde ve taban kenarlarında aynı seviyede olacak şekilde ayarlanır. Dört köşeli kaynak yoksa kaynağa başlamadan önce kaynaklanacak ray yüzeylerinin rayın boy eksenine dik olarak ayarlandığına dikkat edilmelidir.

Kaynak makinesinde akım taşıyan çenelerin temas noktaları, bir metalik fırça ile fırçalanmalı, böylece çeneler temiz tutularak temas direncinin üniform olarak düşük tutulmasının sağlanması gerekmektedir [33].

#### 4.3.3.2. Yakma

Dik köşeli yakma için besleme miktarı çok azdır ve yüksüz durumdaki transformatörden temin edilen gücü kullanarak soğuk bir durumda olan ilettilmiş malzemeyi ortadan kaldırmak için yeterlidir. İki ray ucu farklı noktalarda temas edene kadar birbirine yaklaştırılır. Bu temas noktasında akım akmaya başlar. Yüksek akım yoğunluğunda, çıkıntılı malzeme bölgesel olarak buharlaşıp eriyebileceği sıcaklığa kadar kısa sürede ısıtılır. Buharlaşma basıncının etkisi altında erimiş metal, aralıktan dışarı atılır. Dik köşeli yakmaya devam edildiğinden, uç yüzeyleri tüm kesit sahası üzerinde temas edene kadar, ray uçlarının diğer kesimleri arasında temas sağlanır.

Yakma alın kaynak makinesinin sol tarafında makine gövdesine sabitlenmiş bir kelepçeleme cihazı, sağ tarafında ise yine rayın boyu doğrultusunda hareket edebilen bir kelepçeleme cihazında ray pozisyonlandırılarak emniyete alınır.

Makinenin her iki ucundaki iki kavrama çenesi çiftlerinin ikisi ile bağımsız olarak ya da makinenin her iki ucundaki kavrama çenesi çiftlerinden biri ile bir arada gerçekleştirilir. Akım taşıyıcı kavrama çeneleri iyi bir iletken (örneğin özel bir bronz gibi) yapılır ve su soğutmalıdır. Akım taşımayan çeneler genellikle çelikten yapılır. Kavrama cihazları ray uçlarını mümkün mertebe doğru ve hassas olarak aynı ekseninde tutmalıdır. Kavrama kuvveti şişirme sırasında kaymayı önlemek üzere şişirme kuvvetinden 1,5 ila 2 defa büyük olmalıdır [33].

Güç iletme tipi üniform ısıtma için önemlidir. Bu farklı kalınlıktaki ray kesitlerine titizlikle uygulanır. Bu nedenle güç, her bir çiftin birer çenesi üzerinden tatbik edilmelidir. Gerekirse bu, iki kaynak trafosunda, çene temas yüzeylerinin konumu bölgesel akım şiddetini etkiler bu nedenle de kaynak edilecek rayların ısıtılmasını etkiler.

Pek çok yakma alın kaynağı, sabit makine ile kaynak fabrikalarında yapılmalarına rağmen mobil yakma alın kaynağı makineleri da aynı zamanda kullanılmaktadır. Kaynak sonrası kaynak bölgesinde ısı 100 °C civarındadır. Kaynak sıcakken bir sıyırma makinesi ile sıyırılır. Bu makine kaynak makinesinin hemen arkasında aynı eksene yerleştirilmiştir. Sıyırmadan sonra kaynak havada soğumaya bırakılmalıdır [9].

#### 4.3.3.3. Ön tavlama

Ön ısıtma için her iki ray ucu birbirine temas ettirilir. Transformatör tarafından temin edilen gücün, tüm kesit alanı boyunca çeşitli temas noktalarında metalin atılmasına lüzumundan fazla meydan vermemesi için besleme miktarı çok yüksek tutulur. Kaynak işleminde düşük voltaj yüksek akım uygulanmalıdır. Düşük voltaj ray başlarındaki krater hasarlarını en aza indirmek için seçilmelidir. Kaynak parametreleri seçildikten sonra ön ısıtma çevrimi tam kontrollü otomatik modda çalıştırılır. Yüksek akım şiddeti sonucu olarak temas noktaları ve bunlara yakın bölgeler ısıtılır. Mevzi sahalarda bile herhangi bir oluşum olmamasını sağlamak için, bir geri çevirme işlemi ön ısıtma için kullanılır. Bunun için; bir temas süresinden sonra ray uçları geri çekilir ve sonra ikinci bir süre tekrar temas ettirilir. Bu 10 ila 20 defa tekrar ettirilir. Besleme kuvveti ön ısıtma son bulduğunda bunu gösterir [33].

#### 4.3.3.4. Yanma

Kıvılcımlanmaya başlamak için besleme miktarı ön ısıtma ile mukayese edildiğinde önce azaltılır. Böylece transformatörden temin edilen enerji temas noktalarında metalin erimesi ve buharlaşmasına yeterli olur. Ray uçlarının ön ısıtma sıcaklığının faydası birleşen yüzeylerde oksidasyon oluşumunu engelleyen bir koruyucu atmosferin oluşumu için tüm kesit sahası boyunca uniform olarak ortaya çıkan metal buharlaşmasını sağlamak üzere kıvılcımlanmanın yeterli miktarda kısa sürede oluşabilmesidir. Sayısız temas noktalarından metalin dışarı atıldığı küçük kraterler oluşur.

Kıvılcımlanma sırasında, giriş akımının yoğunlaştırıldığı sadece birkaç temas noktasında çok yavaş bir kıvılcımlanma miktarı oluşur. Bu geniş kraterlerin küçük bir

miktarını arkasında bırakacak bir kaç geniş metal artığının düzensiz aralıklarla dışarı atılması nedeniyledir. Yakma işlemi üniform olmaya başlar ve metal buharlaşması ile meydana çıkan koruma artık yetersiz olur. Bu nedenle, besleme miktarını ve böylece akımı yakma işleminin sonuna doğru artırmak yani yavaş yavaş artan miktarlarla yakmayı ilerletmek, avantajlarını ispat etmiştir. Bu, birbirlerine basan ray yüzeylerinin metal buharlaşma ile ilave oksidasyona karşı korunması ve erimiş metalin dışarı atılması suretiyle bu yüzeyler temizlendiğinden şişirme işleminden önce derhal birleşim için bu yüzeylerin en iyi yolla hazırlanmasını ve sayısız küçük kraterler nedeniyle kâfi miktarda yassı damar oluşmasını sağlar [33].

#### 4.3.3.5. Şişirme

Yakma ile hazırlanmış birleşme yüzeyleri şişirme sırasında yaklaşık 100 mm/sn kadar yüksek bir besleme hızında birbirine bağlanır. Kaynak akımının şişirme başlayana kadar devrede kalması böylelikle son ana kadar birleşme yüzeylerinin korunmayı muhafaza etmesi önemlidir. Birleşme yüzeylerinin birbirine karşı preslenmesi ile yumuşak metal, aralığın dışına sıkıştırılır ve ray uçları kendiliğinden tipik bir artık kordonu oluşturarak plastik deformasyona uğrar. Plastik deformasyonun bir sonucu olarak şişirme kuvveti sürekli eşit miktarlarda artar.

Birleşme yüzeylerindeki yumuşak metalin sıkıştırılması için belirgin bir minimum şişirme hareketi gereklidir. Bu makineden makineye ve şişirmeden önceki yakma hareketine bağlı olarak değişir. Yakma sırasında iyi korunmuş birleşme yüzeyleri, düzensiz yakma hareketi altında çalışanlardan daha az şişirme hareketi gerektirir. Gerekli minimum şişirme hareketi birleşim yüzeylerindeki yumuşak kütlenin dışarı bastırılmasında veya birleşim yüzeylerinin arkasındaki plastik deformasyon bölgesinde harcanır. Gerekli şişirme kuvveti birleşim yüzeylerinin kesit sahasına ve kaynak edilecek rayın sıcak akma noktasına bağlıdır. Daha düşük çekme değerli ray çelikleri için basınç daha az olabilir. Örneğin; en azından 880 N/mm<sup>2</sup> lik bir çekme dayanımına bağlı rayların kaynağı için gerekli şişirme basıncı 40 N/mm<sup>2</sup> dir. Kesit alanı, eşit olarak şişirilebilmesi için her iki ray başının eşit olarak ısıtılması gereklidir. Eğer kesit alanının bir parçası, örneğin ray mantarı daha küçük sıcaklıkta ise, bu kısım

tüm baskı kuvvetini diğer kısmı bırakarak emecek bu takdirde ray tabanı yetersiz şişirilecektir [33].

#### 4.3.3.6. Soğutma

Kaynak, malzemenin özelliklerine uygun olarak kaynak edilen ray soğumaya bırakılmalıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan haddelenmiş ray çelikleri için şişirmeden hemen sonra durgun havada soğutma, kaynak dikişi içinde ve ısıdan etkilenmemiş bölgede haddeleme şartındaki rayın yapısına uygun bir yapı elde etmek için yeterlidir. Kaynak ve sıyırmadan sonra direk olarak 1,2 m temelde 2 mm'lik bir gerilim giderme yükseltmesi verilir.

Sıyırmadan sonra, kaynak kordonu yüksek hızla manuel makinelere veya son zamanlarda geliştirilmiş otomatik kopça taşıyıcılarıyla mantar bölgesini eşit seviyeye getirmek için taşlanır. Tabanın üst tarafı ve harici durumlarda gövde de elle taşlanır. Doğrultma işlemi 150 °C'nin altında soğuk olarak yapılabilir. Sıcak doğrultma mantar ve tabanın farklı soğuma sürecinden ortaya çıkan kaynak eğilmesini neden olabilir. Ray, her biri iki destek ve bir ayarlanabilir hidrolik silindirle teçhiz edilmiş preslerde bükülmek suretiyle kaynak bağlantısında yatay ve dikey olarak doğrultulur. Doğrultmadan önce, doğrultma sırasında ve sonrasında ray bir metrelik çelik cetvelle bağlantı noktasında kontrol edilir. Doğrultma işlemi sonrasında bir metrelik mastar ile yapılan kontrollerde toleranslar yuvarlanma yüzeylerinin yüksekliği boyunca -0,2 ile +0,3 mm, buden temas köşesinin yatay sapması yönünde ise -0,3 ile +0 mm'dir [33].

#### 4.4. Uzun Kaynaklı Raylar (UKR)

Tren ağırlık ve hızlarının sürekli artması ile ray ve makasların imalatının gelişimi, bu nedenden dolayı yeni ve gelişmiş malzemeler, imalat ve bakım talimatlarını değiştirmek zorunluluğunu getirmiş, bu da demiryolu yapımında ve bakımında kaynak süreçlerinin daha da yaygınlaşmasına öncülük etmiştir.

Bütün ray kaynak metotlarındaki genel uygulama, ray uçlarının karşılıklı getirilerek ve düşey ve yatay olarak ray başlarının birbirine dengelenerek kaynakla birleştirilmesidir.

Sıcaklık değişimlerinden dolayı raylarda ilave gerilmeler meydana gelir. Kısa boydaki raylarda (12-24-36 metre) bu gerilmeler ray uçlarında bırakılan boşluklarla karşılanmaktadır. Çeşitli boylardaki rayların birleştirilerek uzun boyda ray elde edilmesine uzun kaynaklı ray (UKR) denmektedir. Rayların uzaması suretiyle meydana gelen bu kuvvetlerin uzun kaynaklı raylarda mutlaka yol üst yapısı içerisinde giderilmesi gerekir. Bu sebeple de üst yapıda, ray ile traversler arasında kuvvetli bir gerilme direnci, boyuna ve çaprazına sürtünme direnci ile iyi bir balast yatağı sağlayan sağlam çerçeve teşkili gereklidir [38].

#### 4.4.1. Uzun kaynaklı ray yapım koşulları

Geometrik koşullar şu şekilde olmalıdır:

- Altyapıda tasman ve çökmeler olmamalıdır.
- Dar imlalarda platform genişletildikten sonra UKR yapılmalıdır.
- Balastın azaldığı ve kirlendiği bölgelerde gerekli önlemler alındıktan sonra UKR uygulanmalıdır.
- Yol üstyapı malzemesi yenilenmiş ve yol stabilizesini kazanmış olmalıdır.
- UKR uygulanacak yollarda travers altında, elenmiş temiz ve 30 cm kalınlığında balast bulunmalıdır. Bu miktar kısa aralıklarla 20 cm'ye kadar düşebilir. Ancak asla 20 cm'den az olamaz.
- Raylarda aşınma ve korozyon, ray uçlarında ezilme ve eğilme olmamalıdır.
- Balastın azalması ihtimali ve  $R \leq 400$  m yarıçaplı kurplarda direnç artırıcı antidresaj takozları kullanılmalıdır.
- Kullanılan balast sert taştan üretilmiş; temiz, kübik ve 30-60 mm iriliğinde olmalıdır.

UKR uygulanacak yolda alınacak önlemler aşağıda belirtilmiştir [38]:

- Ray ek kaynakları çok soğuk ve çok sıcak mevsimlerde yapılmamalıdır. UKR için kaynak, ortalama sıcaklıktan en fazla 3 °C farklı sıcaklıkta yapılmalıdır.
- Mümkün olduğu kadar deliksiz ray kullanılmalı, delikli ray kullanıldığında delik ray ucunda en az 90 mm mesafede olmalıdır. Raylar asla oksijenle kesilmemelidir. Oksijenle kesmek mecburiyetinde kalındığında ray ucunda kesme sonucu kalan çapaklar taşlama suretiyle giderilmelidir.
- Eski (kullanılmış) raylarda UKR yapılmadan önce raylar ultrasonik ray çatlak muayene cihazı ile kontrol edilmelidir.
- Kavak ve plastik seletler tamamlanmalı, kırık rondelalar yenilenmeli ve küçük bağlantı malzemeleri yağlandıktan sonra yeterince sıkılmalıdır.

#### 4.4.2. Sıcaklığın tespiti

Çok sıcak ve çok soğuk mevsimler haricinde her sıcaklıkta kaynak çalışması mümkündür. Ancak emniyetli uzun kaynaklı yol yapımı için ortalama ray sıcaklığının tespiti çok önemlidir. Ortalama ray sıcaklığı, normal iklim koşullarında bölgedeki en az 1 yıllık en yüksek (Tmax) ve en düşük (Tmin) ray sıcaklığının belirlenmesiyle tespit edilir. Tespit edilen en yüksek sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık değeri matematiksel olarak toplanıp ikiye bölünerek ortalama sıcaklık (Tort) bulunur. Bu sıcaklığın en fazla 3 °C altında ve üstündeki sıcaklıklarda değerlerde çalışılmalıdır.

Döşenen raylarda genleşme sıcaklığı, geçici döşeme sıcaklığıdır. Raylar -3 °C ile +30 °C arasındaki sıcaklıklarda kaynaklanarak birleştirilebilirler. Ancak UKR haline getirilecek rayların, mutlaka ortalama sıcaklıkta gerilimlerinin alınması gerekir. Ray boyu 60 m'yi aşıyorsa gerilimin alınması esastır [38].

#### 4.4.3. Ray geriliminin alınması

Ray üretimi sırasında, yuvarlama düzeltme süreci, boylamasına yönde yüksek iç gerilmeye neden olmaktadır. Rayın düzeltilmesi sırasında değişen yönlerde elasto-plastik eğilme gerçekleşir. Hareketli yüzeyde ve rayın tabanındaki orta alanda çekme gerilmesi, eğilme şiddetinin yarısına ulaşır. Gerilme rayın iç kısmına doğru azalır. Geçiş alanında sıfır noktasını geçer. Ray ağı merkezine doğru basınç gerilmesi 200



N/mm<sup>2</sup> ye yükselebilir. Yüksek iç gerilme, ray ağında boylamasına çatlakların oluşumuna sebep olabilmektedir. Bu yüzden iç gerilmenin düşürülmesi arzu edilmektedir [38].

#### 4.4.3.1. Ortalama sıcaklıkta gerilimin alınması

Değişik sıcaklıklarda çeşitli boylardaki raylar, birbirine eklenmeden önce ortalama sıcaklıkta gerilimleri dengelenmelidir. Ray bağlantı elemanları söküldükten sonra, kaynaklanacak raylar rulolar üzerine konur. Ray bağlantı elemanları gevşetilmeden önce 50 m’de bir ray kenarına işaret konularak rayın boyuna hareketi gözlenir.

Rayın sıcaklığı, ortalama sıcaklığa geldiğinde ray gerilimi dengelenmiş olacağından kaynak bölgesinde yeterli mesafe bırakılarak raydaki uzama kesilir. Ray yerine monte edilir ve bağlantıları sıkılarak kaynak yapılır. Kaynağın ortalama sıcaklık değişmeden bitirilmesi burada dikkat edilecek en önemli husustur [38].

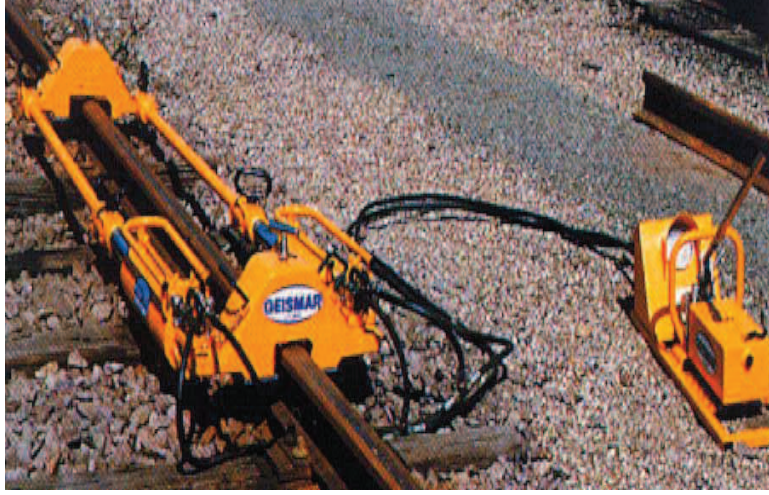
#### 4.4.3.2. Gerdirme suretiyle gerilimin dengelenmesi

Daha önce değişik sıcaklıklarda çeşitli boylarda kaynaklanmış raylar, ortalama ray sıcaklığı altındaki bir ray sıcaklığında gerdirilerek stresinin alınması işlemidir. Şekil 4.15’de rayın gerdirilerek geriliminin alınması gösterilmiştir.

Kaynaklanacak conta ve stresi alınacak rayların yarısının ray bağlantı elemanları sökülür ve raylar serbest bırakılarak ray gerdirilir. Germe işleminin en önemli işlemlerinden birisi ray sıcaklıklarının ölçülmesidir. Ray sıcaklıkları, ray gövdesine yapışan miknatıslı termometrelerle veya rayın mantarında açılan deliğe konan cıvalı termometrelerle ölçülür. Termometreler, her rayın gölgeli tarafında tabanına veya gövdesine yerleştirilmeli ve korunmalıdır. Her ray için en az üç termometre kullanılmalıdır. Bunlar germe noktası yakınlarına, serbest rayın orta noktasına ve ankraj uzunluğu yakınlarına yerleştirilmelidir.

Termometreler arası maksimum mesafe 200 m olmalıdır. Termometreyi yerleştirdikten sonra ilk okumayı almadan önce en az 10 dakika beklenmelidir.

Uzamaların hesabında kullanılacak sıcaklık değeri, referans noktası belirlenmeden önceki son anda okunmalıdır. Gerdirme için gereken uzama miktarı her ray için hesaplanmalıdır.



Şekil 4.12. Ray gerdirilerek geriliminin alınması

Tüm uzama tam olarak serbest uç (germe noktası) üzerinde işaretlenmeli ve orantılı uzamalar referans noktalarının ortasına işaretlenmiştir. Böylece germe süresince rayın hareketi daha kolay kontrol edilebilir. Gerdirme sırasındaki ray sıcaklığı ile ortalama ray sıcaklığı arasındaki mesafe kazanıncaya kadar gerdirilmeye devam edilir [38].

#### 4.4.3.3. Isıtma suretiyle gerilimin dengelenmesi

Serbest hale getirilen rayların optimum sıcaklık bulununcaya kadar özel ısıtma cihazlarıyla ısıtılmak suretiyle gerilimleri alınır. Contalı raylarda yapılması gereken ray sıcaklığı toleransları içinde önceden belirli uzunluğa kadar kaynatılan raylar, ray üzerinde yürüyen aparatlara yüklenmiş oksijen tüpleri ve şalomalarla ileri-geri gezerek optimum sıcaklık sağlanıncaya kadar ısıtılır.

Yapılışı aşağıdaki gibidir [38]:

- Raylar, optimum sıcaklığın (-20) ve (+15) derece toleransları arasında 144 m'ye kaynaklanır. Isıtmak suretiyle gerilim almada ray sıcaklığı, optimum sıcaklığın (-4) ve (-20) derece altındaki aralıkta olmalıdır.

- UKR yapılacak raylar gerilim almadan önce tamamen gevşetilmelidir.
- İlk 144 metre rayın kaynaklanacak başı gönyesine göre delik mesafesi (en az 100 mm) dikkate alınarak kesilir.
- Rayların optimum sıcaklığın üst sınırı olan +3 derece toleransında hesaplanan uzayacağı miktar işaretlenir ve bu uzama sağlanana kadar aparat ile ısıtılır. Aynı anda ısıtılmakta olan raylar, uzamanın kolaylaştırılması için plastik balyozlarla tokmaklanır.
- Ray ısıtılmaları esnasında kaynak makinesi ısıtılmayan ray üzerine gider, ısıtma tamamlanıp yeterli uzama sağlanınca geri gelir.
- Uzama sağlandığında diğer 144 metre ray, bir çekiciye (kepçe, loder gibi) bağlı çekirme vasıtası ile baş başa getirilir ve makine kaynağı yapılır.
- Isıtılan raydaki uzama sağlanınca geri kaçmaması için derhal belirli sıklıkta çalıştırılan tirfonözler vasıtası ile 144 metre ray sıkılır.
- Eğer aluminotermite ray kaynağı yapılacaksa ray çekirmesinde yeterli kaynak aralığı bırakılır.
- İkinci contaya geçildiğinde bu sefer diğer 144 metre rayda aynı işlemler tekrar edilir.
- Isıtma suretiyle ray geriliminin alınması yöntemi oldukça pahalı bir sistem olduğundan çok az tercih edilmektedir. Şekil 4.13’de ray ısıtma ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Ray ısıtma ekipmanları

## BÖLÜM 5. RAY KAYNAKLARINA UYGULANAN TESLER

Ray kaynağında kaynağın kalite kontrolü çok büyük önem taşır. Kaynağın, kalitesinin ölçmede; mikro ve makroyapının kontrolü, yorulma, eğme, kimyasal analiz ve sertlik deneylerinin yanında ultrasonik muayene, girdap akımları yöntemi, sıvı penetrasyon ve manyetik parçacık testi gibi tahribatsız testler yapılmaktadır.

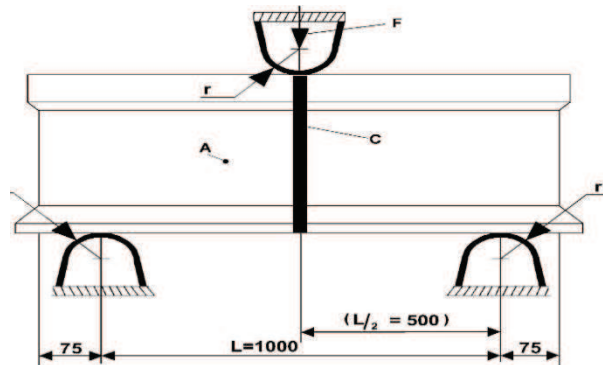
### 5.1. Statik Eğme Testi

Eğme deneylerinin Türk Standartlarındaki tanımlamalarına bakılacak olunursa (TS 205), eğme iki desteğe serbest olarak oturtulan genellikle daire ve dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir.

Ray kaynağında ise çok önemli mekanik ölçüt olan bu test şu şekilde yapılmaktadır. Öncelikle kaynaklanmış rayın ortasına tekil bir kuvvet uygulamak suretiyle numune eğilme gerilmelerine maruz bırakılır. Rayın çatlamadan yapabildiği maksimum sehim ölçülür. Uygulanan kuvvet ray kırılana kadar arttırılır ve kırılma yükü tespit edilir.

Eğme testi Şekil 5.1.'de verilen eğme testi düzeneği ile yapılır. Değerler milimetre olarak verilmiştir.

$25 \text{ mm} \leq r \leq 70 \text{ mm}$   
Minimum numune boyu = 1150 mm  
Yükleme hızı = (40 – 120) kN/sec  
F=Kuvvet  
A=Ray  
C=Kaynak



Şekil 5.1. Eğme test düzeneği

Rayın çatlamadan vereceği sehim miktarı ile kırılma yükü minimum değeri alın kaynağı için tablo 5.1.'de, alüminotermite kaynağı için ise tablo 5.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Alın kaynağı eğme testi gerekleri

Ray Profili	Asgari eğme testi sehimi (mm)	Onay ve üretim için asgari eğme testi kuvveti (kN)
	900 A (R260) R350HT	900 A (R260) R350HT
S49 (EN 49E1)	30	1050
UIC 60 (EN 60 E1)	20	1600

Tablo 5.2. Alüminotermite kaynağı eğme testi gerekleri

Ray Profili	Onay ve üretim için asgari eğme testi kuvveti (kN)
	900 A (R260) R350HT
S49 (EN 49E1)	800
UIC 60 (EN 60 E1)	1250

## 5.2. Yorulma Testi

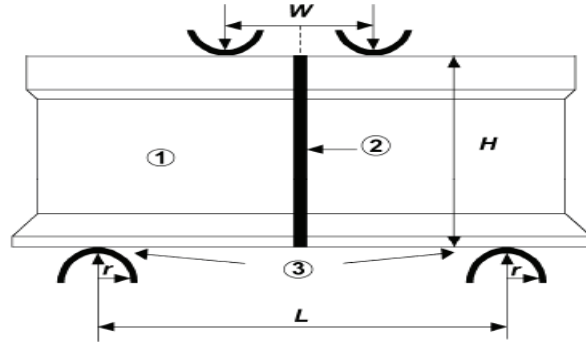
Uygulamada kullanılan birçok makina parçası ve yapı elemanı tekrarlı yüklere ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu koşullar altında çalışan metalik malzemeden yapılmış parçalarda, gerilmeler malzemenin statik dayanımından küçük olsa dahi belirli bir çevrim sayısından sonra yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayı meydana gelir. Meydana gelen bu olay "Yorulma" olarak adlandırılır.

Malzemenin kullanım yerinde yorulmaya etki eden faktörlerin fazla olması ve uygulamada statik yüklemeye nadir rastlanması sebebi ile günümüzde meydana gelen hasarların önemli bir kısmı yorulmadan ileri gelmektedir. Özellikle raylar kaynak bölgelerinde trenlerin çevrimsel dingil yüklerine maruz kaldıklarından kaynakların yorulma dayanımı kullanım ömrü ve maliyetler açısından çok büyük önem arz etmektedir.

Test ray tabanı gerili durumdayken dört noktada eğilme ile gerçekleştirilir.

İç açıklık (W) en az 150 mm olmalıdır. Dış açıklık ray yüksekliğinin en az iki misli olacak şekilde iç açıklıktan fazla olacak ve iç açıklık etrafında simetrik olarak ayarlanır.

$W \geq 2H + \text{kaynak boyun genişliği}$   
 $L \geq W + 2H''$   
 1 Ray  
 2 Kaynak  
 3 Mesnet  
 Not 1:  $r = 25-70 \text{ mm}$   
 Not 2: Yükleme oranı= 40-120 kN/s



Şekil 5.2. Rayın yorulma deney düzeneği

Harekete geçiricinin merkez çizgisinden yükleme noktalarına olan mesafeler ölçülerek kaydedilir. Harekete geçiricinin merkez çizgisinin her iki tarafında buna karşılık gelen boyutlarda 3 mm'den daha fazla bir farklılık olmamalıdır. Yükleme noktalarının kavisinin yarıçapı 40 mm'den daha az olmamalıdır. Yükleme noktaları temas yüzeyleri yükleme noktaları ile örnekler arasındaki sürtünmenin asgari düzeye indirilmesini sağlayacak şekilde aktarmaya veya dönmeye müsait olmalıdır. Test parçaları kaynak merkezi test düzeneğinin merkezinde  $\pm 10 \text{ mm}$  olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Test parçasının uzunluğu L mesnet uzunluğundan 100 mm' den daha fazla olmamalıdır. Kaynağın merkez çizgisinin harekete geçiricinin merkez çizgisine 3 mm mesafede hizalanmış olacağı şekilde bir test parçasını test donanımı içinde konumlandırılmalıdır.

Uygulanan azami gerilim Tablo 5.3.'de gösterilmiştir. Uygulanan asgari gerilim azami gerilimin % 10'u düzeyinde olmalıdır. 5 milyon çevrim değerinden daha düşük dayanımda hiçbir hata kabul edilemezdir.

Tablo 5.3. Yorulma testi gerekleri

Ray kalitesi	Azami gerilim (uygulanan (MPa))
900 A (R260)	190

Azami ve asgari gerilim değerlerine ulaşılacak şekilde bir sinüs eğrisi dalga biçimi kullanarak kaynağa döngüsel olarak yük bindirilir. Belirtilen her iki değer de gerekli olan nominal değere % 2'lik farka kadar sürdürülür.

Yorulma kırığı yüzeyi; pürüzsüz olan yorulma çatlaklarının ilerlediği bölge ile pürüzlü ve yarıklı son kırılma bölümlerinden oluşur. Pürüzsüz olan yorulma çatlaklarının olduğu bölgede kumsal çizgileri şeklindeki duraklama çizgileri mevcut olabilir. Duraklama çizgileri yükün değişimi, makinanın hızının değişimi gibi durumlarda çatlak ilerleme hızlarının değişmesi, dolayısıyla çatlak uçlarındaki oksidasyonunun farklı şiddette olmasından ileri gelir. Bu duraklama çizgileri, yorulma çatlaklarının ilerlemesi sırasındaki çeşitli safhalarda, çatlak cephesinin aldığı şekiller hakkında bilgi verir. Çatlak cephesinin şekli, yüklemenin şeklini belirttiğinden, hasar analizinde önemli bir yeri vardır. Bu yüzden duraklama çizgileri çevrim çizgileri ile karıştırılmamalıdır.

### 5.3. Kimyasal Analiz

UIC 60 E1 profil ve R260 kalitedeki ray ile yapılan alüminotermite kaynak işlemlerinin sonunda elde edilen numunelerin hem kaynak metalleri hem de esas metalleri kimyasal analize tabi tutulur. Tablo 5.4. ile uyumlu olması istenir.

Belirli bir referansa göre ölçüm yapan cihazlardan olan spektrometrelerle analiz yapılır. Analiz anında numune parça yüzeyinden sadece birkaç miligram buharlaşma olabilmektedir. Kısa zamanda ve oldukça hassas yapılan ölçümler spektrometrelerin ekranlarında görüntülenir ve sisteme bağlı olan yazıcı ile analiz raporu yazdırılır.

Tablo 5.4. Alüminotermite kaynak kimyasal yapısı

(C) : 0.421	(Ni) : 0.054	(W) : 0.011
(Si) : 0.444	(Al) : 0.537	(PB) : 0.0041
(Mn) : 0.979	(Co) : 0.016	(Sn) : 0.018
(P) : 0.030	(Cu) : 0.102	(Sb) : <0.0020
(S) : 0.011	(Nb) : <0.0020	(Mg) : -
(Cr) : 0.122	(Ti) : 0.031	(Fe) : KALAN
(Mo) : 0.027	(V) : 0.013	

### 5.4. Mikroyapının İncelenmesi

Kaynak çeliği ile ray çeliği yapısı aynı görünüşte eşit büyüklükteki tanelerden oluşmalı, yapı ray çeliği gibi perlitik olmalıdır. Ray ve kaynak metalinde mevcut mikro



yapının incelenmesi amacıyla, yapılan kaynaklardan alınan numunelerin yüzeyleri yüzde 4'lük Nital ile dağlanarak hazırlanmalıdır. Daha sonra 100 kat büyültme yapılarak metalografik olarak incelenir.

### 5.5. Sertlik Testi

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Sertlik deneyleri malzeme ve imal edilmiş parçaların çabuk ve tahribatsız olarak kontrolünü sağlayan çok önemli mekanik deneylerden biridir. Teknolojide yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri, numune üzerinde elde edilen kalıcı iz büyüklüğünün ölçülmesi esasına dayanan yöntemlerdir.

Kaynağın sertliğini belirlemek için; kaynağın yuvarlanma yüzeyinin üzerinde birbirinden 5 mm uzakta 12 değişik noktada standart Brinel Sertlik Testi yapılır. Bu testlerde elde edilen Brinel Sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması söz konusu kaynağın Brinel Sertliği olarak kabul edilir ve sertlik ölçüm ekranında gösterilir.

Kaynağın Brinel sertlik değeri 278-327 Brinel arasında olmalıdır. Kaynak bölgesinin sertliği rayın sertliğinden 17-23 Brinell fazla olabilmektedir.

Kaynak bölgesi ray metalinden daha serttir. Zira kaynak bölgesindeki sertlik profilinin yapısı, uzun servis ömrü boyunca ray yuvarlanma yüzeyinin düzgün kalmasını sağlayacak şekilde olmalıdır.

Etkilenmemiş ray çeliğine göre ısıdan etkilenmiş bölgenin sınırındaki sertlikte azalma görülür, bu azalmanın ray bağlantı bölgelerinde dar olması arzu edilir.

Isıdan etkilenmiş bölge, kontrollü soğutulduğundan tane yapısı farklılık arz eder. İri tane yapısı, erime sıcaklığına çok yakın sıcaklıklarda malzemenin ısıtılmasının bir sonucu olarak birleşme yüzeylerinin yanında oluşur. Bitişik olan normalize olmuş bölgeler ince tanelidir. Ancak, ray çeliğinin ısıtılması sırasında oluşan tavllanmış dar bölge ısıdan etkilenmiş bölgenin dış sınırını oluşturur. Bu sertlikte düşmenin ortaya çıktığı yerdir.



Makro ve mikro inceleme için dört kaynak bölgesinden kesit alınarak, ikisi DIN EN 14587-2 Annex E bölümü uyarınca yapılan sertlik testine tabi tutulur. Elde edilen asgari ve azami sertlik dereceleri aşağıda belirtilen gerekleri yerine getirmelidir:

- En az sertlik P - 30 HV30 değerinden daha düşük olmamalı,
- En fazla sertlik P + 60 HV30 değerinden fazla olmamalı,

Burada; P, ana rayın ortalama sertliğidir.

### 5.6. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik dalgalarının bir malzeme içerisinde bir prob aracılığı ile bir demet halinde gönderilmesi ve malzemenin içerisinde geçen dalga demetinin değişime uğraması, dalgaların malzemedan çıktığı anda aynı veya başka bir prob aracılığı ile alınması, proba gelen dalgaların probun piezo elektrik kristali tarafından tekrar elektrik titreşimlerine dönüştürülmesi ile yapılmaktadır. Her iki prob elektronik bir devre ile bir ultrason cihazını oluşturur.

Cihazın ekranında elde edilen görüntüler giriş çıkış yüzeyleriyle parçada bulunan hata v.b. yansıtıcıları belirler. Test işlemi, rezonans frekansını, zamanı (time of flight) ve genişliği ölçerek yapılabilir. Raylarda ultrasonik yöntem uygulayacak kişinin en az seviye II düzeyinde sertifikalandırılmış ve EN -473'ün gerekleriyle vasıflandırılmış olmalıdır. Ray kaynaklarında tarama bölgesi kaynak bölgesi, HAZ bölgesi (en az 10mm) ve ana ray metali (en fazla 20 mm) olmalıdır. Ray kaynaklarının hata tespitinde Tandem yöntemi seçilmiş ise 70° açılı problar kullanılması en iyi sonucu verecektir.

Tandem tekniğinin esası iki açılı prob kullanımına dayanmaktadır. İki probun ses alanlarının kesişim bölgesi, duyarlılık bölgesini belirler. Problar arasındaki mesafe değiştirilerek duyarlılık bölgesinin derinliği değiştirilebilir. Tarama duyarlılığı; değerlendirilecek belirtiler ekran yüksekliğinin en az yüzde 20'sini geçecek ve malzeme tane yapısından ve muayene sisteminden kaynaklanan gürültü yankılarından en az 6 db daha büyük olmalıdır.

Ray ve ray kaynaklarının yüzeyi pürüzsüz olmalıdır. Yüzeyde bulunan pas, yağ, kir, pürüzler v.s testten önce mutlaka temizlenmelidir. Yüzeyin pürüzlü olması akustik empedans farkından dolayı testten hatalı sonuç alınmasına neden olur. Ayrıca test parçasının yüzey sıcaklığı, malzemenin korozyon tehlikesi ve yüzey pürüzlülüğü bir temas sıvısı kullanımını gerektirmektedir.

Test parçasında oluşabilecek hataları bulabilmek için hataların uygun prob seçilmelidir. En çok kullanılan prob açıları  $45^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $70^\circ$  ve  $80^\circ$  dir. Şekil 6.7’de ultrasonik muayene düzeneği görülmektedir.

### 5.7. 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.

Girdap akımları yönteminin ray ve ray kaynaklarının 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.

Konvansiyonel ultrasonik proplar, 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.

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. 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 problemlerin performansı olumsuz etkilenir. Raydaki muhtemel iç kusurların algılanması zorlaşır.

### **5.8. 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.

Radyografi yöntemi ile ray kaynaklarının 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, ray kaynağındaki 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.

### **5.9. 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.

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.

### **5.10. Manyetik İndüksiyon Yöntemi**

Manyetik indüksiyon yöntemi (MİY), “manyetik akı sızıntısı yöntemi” olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, petro-kimya, demiryolu, enerji ve metal sanayideki ferromanyetik 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.

MİY sensörleri, yüzeysel ve yüzeye yakın enine çatlakların 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.

## **BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Demiryolu raylarının kalite ve hizmet hayatını uzatmak için daha iyi kaynak sonucu elde etme çabaları sürekli olarak devam etmektedir. Daha iyi sonuçlar elde etmek için tamamen maliyeti göz önüne almak yeterli değildir. Aluminotermite kaynakların gerekli malzeme, zaman, servis ömrü, performansının iyileştirilmesi ve kullanılan süreçlerini geliştirmek için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Aluminotermite kaynak cadde tramvay raylarının uygulamaları için mükemmel bir yöntemdir. Aluminotermite kaynak, kolay taşınabilirlik, düşük sermaye yatırımı ve saha koşullarına uygunluğu gibi özellikleri ile ray kaynakları için birçok avantajı sunmaktadır. İyi bir kaynak elde etmek için kaynakçıların becerilerine daha az bağımlı olunmalıdır. Kaynak süreci içinde mümkün olduğunca insan hataları minimize edilmelidir. Ancak, aluminotermite kaynak metalinin dayanım, süneklik ve yorulma özellikleri demiryolu ray çeliği kadar yüksek olmamıştır. Aluminotermite kaynak, dendritik döküm yapısı, gözenekli içyapısı ve bir operatöre bağlı bir süreçtir. Dolayısıyla, aluminotermite kaynakların kaliteleri ray çeliğinden sürekli aşağıda kalmıştır.

Yakma alın kaynak yöntemini çok kısa sürede kaynak yapılabilme ve kaynak kalitesinin çok üstün olması tercih nedeni olarak öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte kaynak makinesinin ilk maliyeti yöntemin yaygınlaşması önünde en büyük engeldir. Ortalama kaynak maliyeti ve ilk ekipman maliyetleri makul bir seviyede olmalıdır. Yakma alın kaynak yöntemi hata oranı en düşük olan kaynak yöntemidir. Ancak kaynak sırasında rayın 2-3 cm arasında kısılması bu yöntemin tamir amaçlı kullanılmasına izin vermemektedir. Yakma alın kaynağı, sınırlı kaynak kusurları, ana metal ile benzer metalürjik karakter göstermesi, geometrik yüzey düzgünlüğü, ray ile benzer sertlik seviyeleri, minimum işçilik hatası sağlaması nedeni ile tercih edilmektedir. Bugün dünyada yapılan kaynakların yüzde 80 yakma alın kaynak yöntemi ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada aluminotermite ve yakma alın kaynaklarına uygulanan testler ve testlerin sonuçları grafiksel olarak incelenmiştir. Kaynakların kalite ve dayanımlarını belirleyen sertlik testi, eğme testi, mikro ve makro yapı testi, yorulma testi, sıvı penetrasyon testi ve ultrasonik test sonuçları ve kaynak yapım maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Raylara yapılan bu testler, tren tekerleklerinin raya uyguladığı karmaşık yükler, yorulma etkisi, araç tekerlerinin darbe etkisi, teker-ray sürtünme etkisi, ray yüzeyinde meydana gelen ondülasyon etkisi ve ısı farkından dolayı meydana gelen iç gerilmeler karşısında ray ve kaynağın davranışı hakkında bilgi edinmek içindir.

Bu çalışmada, inceleme ve testlere tabi tutulacak kaynaklar için UIC 60 (EN 60 E1) ray profillerinde ve R260 (900A) kalitesinde raylar kullanılmıştır. Numune hazırlamadan test sonucunu değerlendirmeye kadar tüm aşamalar aşağıda belirtilen standartlara uygun bir şekilde yapılmıştır.

EN 13674 –1: 2003,	Demiryolu Uygulamaları – Hat – Ray – Bölüm 1: 46 kg/m ve Üzeri Demiryolu Rayları
UIC 860 R: 2008,	Ray Teknik Şartnamesi
EN 14587– 2: 2009,	Mobil Kaynak Makinesi ile Hattın Kaynak Yapımı
TS EN 14730 –1,	Demiryolu Uygulamaları – Yol –Ray Kaynağı – İşlem onayı
EN 14730-2: 2006,	Alüminotermite Ray Kaynağı yapan personelin yeterliği ve Kaynakların Kabulü
EN 571– 1,	Tahribatsız Muayene – Penetrant Muayenesi – Bölüm 1: Genel Prensipler

### 6.1. Numune Hazırlama

Öncelikle yakma alın kaynağı numunesi hazırlanmıştır. Alın kaynağı makinesinin kaynak yapacak kafa kısmı geniş olduğu için 12 metrelik kupon raydan ray kesme makinesi ile 1.25 metre boyutunda 8 adet ray kesilmiştir. Kesilen rayların kaynakla birleştirilecek gövde kısımları yaklaşık 50 cm boyunca taşlanarak rayın üzerinde

oluşan paslı tabaka temizlenmiştir. Hazırlanan numuneler takozların üzerine yerleştirilip master ile geometrik hizaya getirilerek kaynak yapmaya hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.1. Hazırlanan kaynak numunesi

Kaynak yapmaya hazır hale gelen raylar Holland marka kaynak makinesi ile kaynak yapılarak 2.50 metre boyutuna gelmiştir.



Şekil 6.2. Yakma alın kaynağı yapımı

Daha sonra alüminotermite kaynağı yapmak için yine 10 metrelik kupon raydan ray kesme makinesi ile 60 cm boyutunda 8 adet ray kesilmiştir. Kesilen rayların kaynakla birleştirilecek gövde kısımları yaklaşık 20 cm boyunca taşlanarak rayın üzerinde oluşan paslı tabaka temizlenmiştir. Hazırlanan numuneler master ile geometrik hizaya getirilerek kalıp bağlanmıştır.





Şekil 6.3. Kalıp bağlanması ve macunlama işlemi

Bağlanan kalıbın ek yerlerinden sıvı metal sızıntısı olmaması için macunlama işlemi yapıldıktan sonra ön ısıtma işleminden sonra pota içine koyularak hazırlanmış alüminotermite kaynak malzemesi maytapla yakılarak reaksiyon başlatılmıştır.



Şekil 6.4. Döküm işlemleri

Döküm işleminden sonra katılaşmanın tamamlanması için 5 dakika beklendikten sonra kalıp kırılmış ve kaynak sıyrma makinesiyle kaynak fazlalıkları kesilmiştir.

## 6.2. Kaba taşlama

Ray mantarında kalan kaynakların ray kafalarındaki şişirme fazlalığı rayın yüzeyinin üzerinde en fazla 0,50 mm bırakacak şekilde ray taşlama makinesi ile kaba olarak taşlanmıştır.





Şekil 6.5. Kaynak fazlalıklarının sıyırılması ve taşlama işlemi

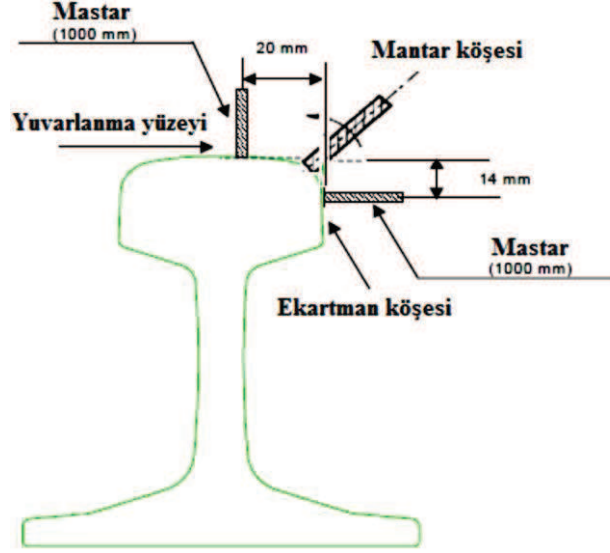
### 6.3. Geometrik Kontrol

Hazırlanan kaynak numuneleri görsel muayene yapıldıktan sonra, kaynaklanmış ve sıyırılmış örnekler üzerinde sıyırma sonrasında kaynak bölgesinde kalan kaynak fazlalığı incelenmiştir. Bu inceleme tablo 6.1.'de belirtilen değerler doğrultusunda yapılmıştır.

Tablo 6.1. Sıyırma sonucunda izin verilen fazla metal kalınlığı [16]

Bölge	Sıyırma bölgesinin konumu	İzin verilen maksimum fazlalık
1	Mantar alt kavisinin başlangıcından diğer yandaki alt kavise kadar olan tüm mantar bölgesi.	2,5 mm
1+	Mantar alt kavisini ile gövde bölgesinin başlangıcı arasındaki bölge	3 mm
2	Gövdenin başlangıç bölgesinden ray tabanının başlangıç kavisine kadar olan bölge.	2,5 mm
3	Ray tabanı başlangıç kavisinden başlayarak ray tabanı köşesine kadar olan tüm bölge.	2 mm

Daha sonra şekil 6.6.'da görüleceği üzere, ray mantarı üzerinde kaynağın yatay düzlüğü yüzeyin yaklaşık olarak 14 mm altındaki ekartman yüzünde ve R13 yarıçaplı köşesinde ölçülerek ve kaynak merkez çizgisinin her iki tarafında 500 mm mesafedeki noktalar arasında 1000 mm uzunluğunda mastar ile kontrol yapılarak tablo 6.2.'de belirtilen değerlerin sağlayıp sağlamadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Mastarla yapılacak ölçüm noktaları [16]

Tablo 6.3. Geometrik kabul kriterleri [16]

Kaynak Düzensizliği	İşletme Hızı $V \geq 230$ km/h	İşletme Hızı $230 > V \geq 160$ km/h	İşletme Hızı $V < 160$ km/h
Ray mantarı üzeri (yuvarlanma yüzeyi) (mm)			
(+) Kaynağın yüksekliği	+0,20	+0,30	+0,30
(-) Kaynağın düşüklüğü	- 0,10	- 0,20	- 0,20
Ray mantarı iç yüzeyi (Ekartman Köşesi) (mm)			
(+) Ekartman açılması yönü	+0,30	+0,30	+0,40
(-) Ekartman daralması yönü	- 0,10	- 0,20	- 0,30
Mantar köşesi (mm) (mastardan sapma miktarı)	0,15	0,20	0,20
Taşlama boyu (maksimum) (mm) (Kaynaktan her iki tarafa)	400	400	500

#### 6.4. Sıvı Penetrant Testi

Kaynak yapılmış, sıyrılmış ve taşlanarak profiline getirilmiş olarak hazırlanan kaynak numuneleri EN 571-1'e göre penetrant testine tabi tutulmuştur. Kaynak yapılan numunelerin kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge önce tel fırça ile temizlenmiştir. Temizlenen mantar ve gövde yüzeyi penetrasyon spreyi sıkılmış olup yaklaşık 1

dakika beklendikten sonra bir bez yardımıyla yüzey temizlenmiştir. Daha sonra devoloper tatbik edilmiş ve yine yaklaşık 1 dakika daha beklenmiştir.

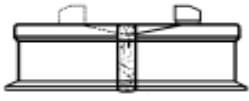

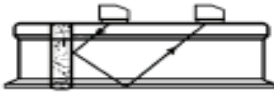
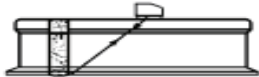

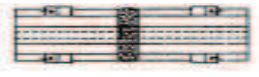
Bu muayene ile kaynak bölgesinin üzerinde oluşabilecek süreksizlikler tespit edilmeye çalışılmıştır.

## 6.5. Ultrasonik Muayene

Hazırlanan numuneler ultrasonik muayene yapılmadan önce ultrasonik cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon için UIC 60 (EN 60 E1) referans rayının referans yansıtıcı çapı 5 mm olarak hazırlanmış ve cihaz buna göre kalibre edilmiştir.

Daha sonra tablo 6.4.'e göre ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Bu muayene ile kaynağın içinde oluşabilecek süreksizliklerin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 6.4. Tarama pozisyonları-prob seçimi [16]

Testin özeti			
1	Düzlemsel olmayan hatalar için ray mantarının kontrolü		Her iki tarafta birer adet 70° çift kristalli prop
2	Düzlemsel hatalar için ray mantarının kontrolü		İki adet 70° tek kristalli prop (TX & RX)
3	Düzlemsel hatalar için ray gövdesinin kontrolü		İki adet 45° tek kristalli prop tandem metodu için sabitleyici bilezikli
4	Tabanın orta bölgesinin kontrolü		Bir adet 45° tek kristalli prop her iki tarafta
5	Boyun bölgesinin kontrolü		Bir adet 70° tek kristalli prop
6	Taban uçların kontrolü		Bir adet 70° tek kristalli prop
	Gereken toplam prop sayısı	6 veya 7	

## 6.6. Eğme Testi

Kaynaklanan ray numunesine görsel muayene, sıvı penetrasyon ve ultrasonik muayene testlerinden geçtikten sonra eğme testi yapılmıştır. 1,25 metre boyutunda hazırlanıp 2,50 metreye kaynatılan rayların uç kısımları eğme test düzeneğine uygun olacak şekilde ray kesme makinesi ile kesilerek 1,15 metreye getirilmiştir.



Şekil 6.7. Eğme testi için numune hazırlama

Şekil 6.8.'de gösterilmiş olan eğme makinesi ile kaynaklı ray numunesi tam ortasından tekil bir kuvvet uygulanmak suretiyle eğilme gerilmelerine maruz bırakılmış olup kırılma meydana gelinceye kadar kuvvet uygulanmıştır. Hazırlanan numune TS EN 1430-1'e göre test edilmiş olup yakma alın kaynağı için yükleme hızı 65kN/s, alüminotermite kaynaklı numune için ise 40 kN/s'dir.



Şekil 6.8. Eğme testi düzeneği

Testin sonunda kopmanın olduğu kuvvet ve ray kırılmadan hemen önceki sehimler ölçülmüştür. Buna ilaveten test düzeneğinde bulunan numune için yük sehim grafikleri oluşturulmuştur.

### 6.7. Yorulma Testi

Kaynaklanmış, sıyrılmış ve taşlanarak profiline getirilmiş kaynak numunesi görsel muayene, sıvı penetrasyon ve ultrasonik muayene testlerinden geçtikten sonra yorulma testi yapılmıştır.

Hazırlanan numune yük-çevrim sayısı verilerini karşılayıp karşılamadığının belirlenmesi, tekrarlı yüklemelere maruz bırakılarak yorulma davranışının incelenmesi ve hasar oluşumunun deneysel olarak gözlenebilmesi amacıyla yorulma testi yapılmıştır.



Şekil 6.9. Yorulma testi

Test yapılan sistemin genel görüntüsü Şekil 6.9.'da verilmiştir. Test düzeneğinin alt kısmına kaynaklı ray numunesi sabitlenmiştir. Hareketli üst kolona ise, test malzemesine orta noktasından temas edecek eğme ucu yerleştirilmiştir. Malzeme ile eğme ucu arasında hafif temas ayarlandıktan sonra, cihaz çalıştırılmıştır. Numuneye uygulanacak yükleme sınırları içerisinde yükleme işlemi uygulanmıştır. TS EN 14730



-1 belirtildiği şekilde numunelere 5 milyon çevrim tatbik edilene kadar döngüsel kuvvet uygulanmıştır. Deney süresince belirli aralıklarla numunede çatlak oluşup oluşmadığı gözle kontrol edilmiştir.

### 6.8. Makroyapının İncelenmesi

Hazırlanan kaynaklanmış, sıyrılmış ve taşlanarak profiline getirilmiş kaynak örneği makro inceleme için kesit alınarak gerekli inceleme yapılmıştır.

Bu incelemenin amacı kaynak sırasında ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin belirlenmesidir. Isıdan etkilenmiş bölge en büyük sertlik değerinin görüldüğü bölge olduğundan bu bölgenin genişliğinin sınırlandırılması rayın mekanik özellikleri değişen kısmının genişliğinin de sınırlandırılması demek olacaktır.

Bir uzunlamasına dikey bölüm tam rayın dikey ekseninden aşağı doğru merkezi olarak alınmış ve füzyon çizgisinin her iki tarafına doğru 60 mm uzatılmıştır. Tabanın her iki tarafından, taban uçlarının 10 mm iç tarafından benzer kesimler alınmış olup 220 ızgaralı bir zımpara kullanılmak sureti ile bölümler uygun bir sonlandırmaya ulaşıncaya kadar parlatılmıştır. Bir adet tüm ray derinliği örneği ve her iki kaynaktan ilgili ray ayağı örnekleri kaynak sınır çizgilerinin gösterilmesi amacı ile dağlanmıştır. Dağlama işlemi oda sıcaklığında inceleme yapıldığında sınır çizgilerinin belirgin olarak görülebinceye kadar yapılmıştır.

Dağlama ajanı 10 litre esas alınarak aşağıda belirtilen kimyasal özelliklere sahiptir:

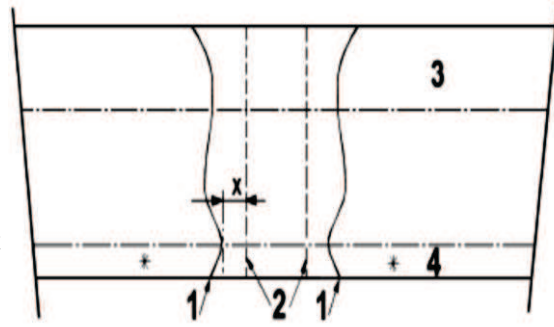
- 1,875 kg bakır klorid ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );
- 5 litre hidroklorik asit ( $\text{HCl}$  1,18 ml - 35%);
- 4,2 litre saf su.



Şekil 6.10. Numune hazırlama

Ayrıca alüminotermite kaynak numunesi için ergimiş bölge şekil ve boyutları incelenmiştir. İnceleme şekil 6.11.'e göre yapılmıştır.

- 1 erimiş bölge çizgisi
- 2 kaynaktan önceki ray ucu
- 3 ray mantarı
- 4 ray tabanı
- \* taban ucuna önceden konulmuş işaret



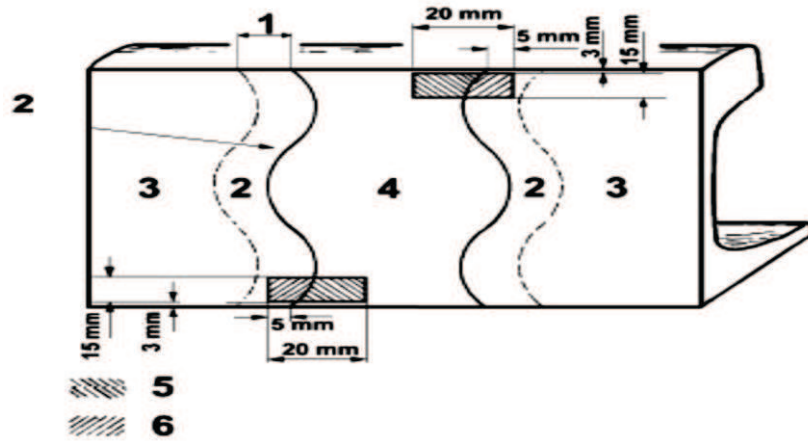
Şekil 6.11. Ergimiş bölge şekil ve boyutları incelenmesi

Ergimiş bölgenin kaynağın boyuna eksenine göre simetrik olması ve ergime mesafesinin 3 mm veya daha büyük olması istenmektedir. Ergime mesafesinin ölçümü kaynaktan önce raya koyulmuş bir işaret baz alınarak yapılmaktadır. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra ergime mesafesi ölçülmüştür.

## 6.9. Mikroyapının İncelenmesi

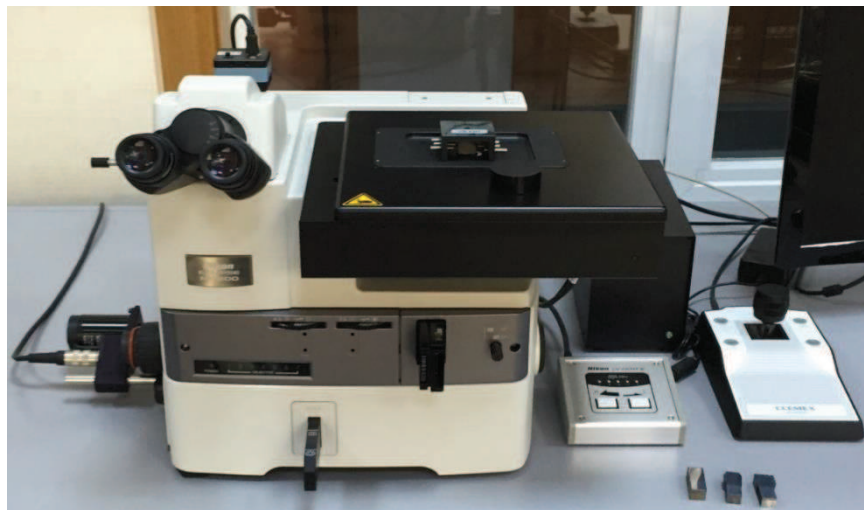
Makro incelemenin tamamlanmasını takiben, makro inceleme yapılan tüm örnekler mikro inceleme yapılmıştır. Bu incelemenin amacı kaynağın ve ısıdan etkilenmiş

bölgenin mikroyapısının belirlenmesidir. Kaynak bölgesinin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin normal yapısı perlitikferritiktir. Bu bölgelerde aşırı sert ve kaynakta kırılmalığa neden olan beynit ve martenzit yapıları istenmez. Bu nedenle bu bölgeler şekil 6.12.'de gösterildiği yerlerden kesilmiştir.



Şekil 6.12. Mikroskobik kontrol numunesi

- 1 ray seyir yüzeyinin boyuna merkez çizgisinden ölçülen görünen ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliği
- 2 ısıdan etkilenmiş bölge
- 3 etkilenmemiş ray bölgesi
- 4 kaynak erimiş bölge
- 5 mikroskobik olarak test edilecek erimiş bölge
- 6 mikroskobik olarak test edilecek ısıdan etkilenmiş bölge



Şekil 6.13. Optik mikroskop



Mikroskobik inceleme için kaynağın mantar ve taban bölgesinden kesilmiş numuneler zımpara makinesi yardımıyla yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra yeterli ve gerekli yüzey görüntüsünü sağlamak amacıyla elmas suyu ile parlatılmıştır. % 4' lük nital içinde dağlanan numuneler şekil 6.13'de gözüken optik mikroskop cihazı ile birlikte bilgisayarda görüntü alma sisteminin yardımıyla incelenmiş ve resimleri alınmıştır.

### 6.10. Sertlik Testi

Makro ve mikro inceleme için hazırlanan numuneler kaynak bölgesinden kesit alınarak sertlik testine tabi tutulmuştur. Ancak yakma alın kaynağı ve alüminotermite kaynağı ile hazırlanan numunelerin sertlik testi yöntemleri ile asgari ve azami sertlik dereceleri farklılık arz etmektedir.

Yakma alın kaynak numunesi sertlik testi için; ray numunesinin üst yüzeyi zımparalandıktan sonra parlatılmış ve esnemeye imkan tanımayacak şekilde test cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 6.14.).

Sertlik ölçümleri mantar bölgesinde yüzeyin 3-5 mm altından, ana malzeme, görünür ısıdan etkilenmiş bölge ve kaynak bölgesini kapsayan bir çizgi üzerinde yapılmıştır. Ölçümler, birleşme çizgisinden (0) başlayarak iki tarafa doğru ana malzemenin 40 mm içine girecek şekilde, eşit aralıklarla (2 mm) alınmıştır.

Kaynağın sıcaklıktan etkilenmiş olan bölgesindeki sertlikler arasındaki farklılık EN ISO 6507-2 uyarınca Vickers sertlik yöntemiyle (HV30) ölçülmüştür.

Elde edilen asgari ve azami sertlik dereceleri aşağıda belirtilen değerlere uygun olması gerekmektedir:

R 260 (900 A) kalite raylar için;

- En az sertlik P - 30 HV30 değerinden daha düşük olmayacaktır;
- En fazla sertlik P + 60 HV30 değerinden fazla olmayacaktır;

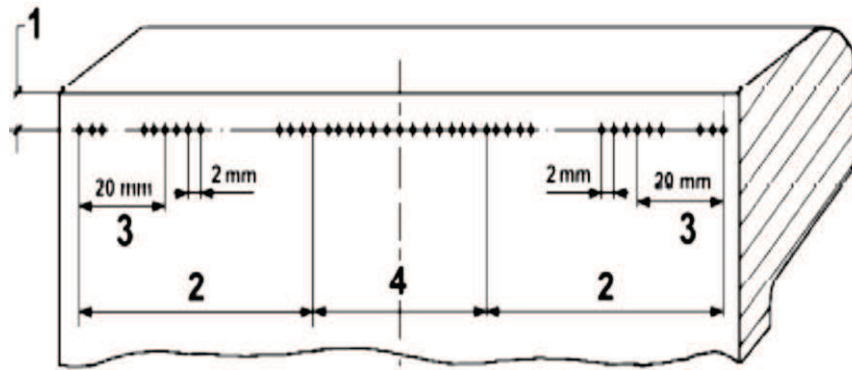
Burada P = ısıdan etkilenmemiş ana rayın ortalama sertliğidir.



Şekil 6.14. Sertlik ölçme cihazı

Yakma alın kaynağı sertlik değerleri ölçüldükten sonra alüminotermite kaynaklı numunenin sertlik değerlerini ölçmeye başlanmıştır. Alüminotermite kaynağı yapılmış rayda yumuşamış bölgede (ısıdan etkilenen bölge) çok yüksek sertlik kaynağa kırılabilirliğe, düşük sertlik ise kaynak bölgesinin çabuk aşınarak işlevini kaybetmesine neden olmaktadır. Kaynak boyunca bu sertlik değişimini incelemek ve kaynak ile ana ray metalinin uygun bir sertlik geçişi görebilmek için yumuşamış bölge sertlik dağılım testi yapılmıştır.

Testin uygulanmasında EN ISO 6507-1'e göre vickers sertlik testi 30 kg yük uygulanarak kullanılmıştır. Ölçümler şekil 6.15'de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 6.15. Yumuşamış bölge sertlik dağılımı ölçümü

- 1 3 mm ile 5 mm arasında derinlik
- 2 yan ray
- 3 etkilenmemiş yan ray
- 4 erimiş bölge

Testin uygulanmasında ilk adım ana rayın sertliğinin bulunmasıdır. Bu işlem ısıdan etkilenmemiş ana rayda 2'şer mm aralıklı en az 10 adet ölçüm yapılarak aritmetik ortalamasının bulunması şeklinde yapılmıştır. Bulunan ortalama ray sertliği şekil 6.17' da gösterilen grafik üzerine 1 çizgisi ile işlenmiştir.

Daha sonra kaynak bölgesinin sağından ve solundan ilk ısıdan etkilenmiş bölgeden başlanarak son ısıdan etkilenmiş bölgenin bitişine kadar 2 mm aralıklarla ölçümler tarama şeklinde alınmıştır.

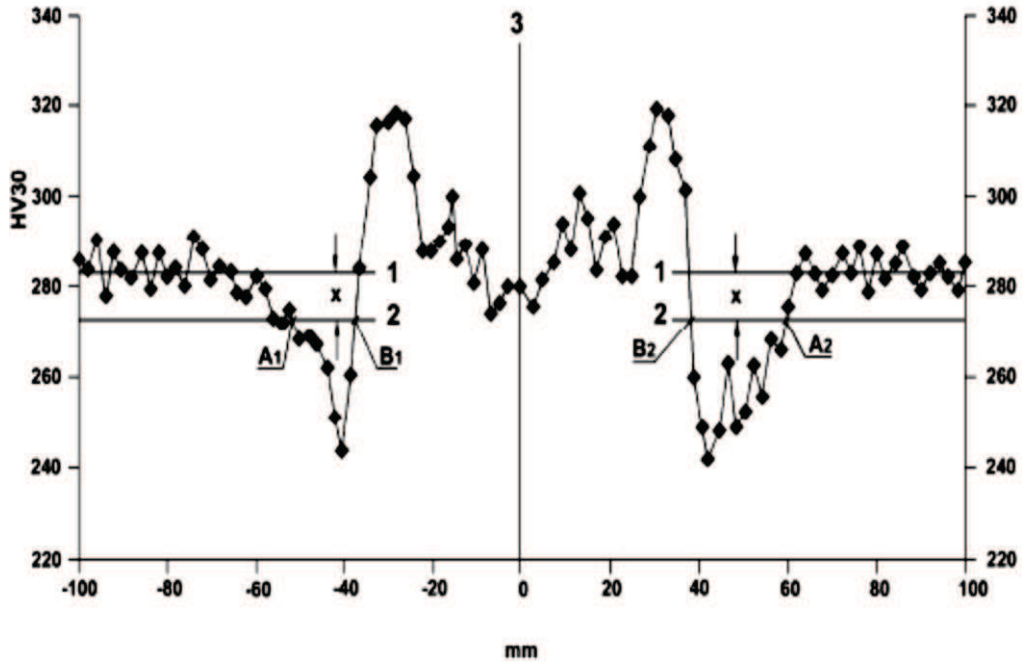


Şekil 6.16. Sertlik tarama şekli

Bulunan değerler yine şekil 6.17' da gösterilen grafik üzerine 2 çizgisi ile işlenmiştir. Testin değerlendirilmesi 1 ve 2 çizgisi arasındaki farkın "X" ölçülmesi ile yapılmıştır. Değerlendirme sonucu tablo 6.6.' da verilen değerler ile kıyaslanmıştır.

Tablo 6.6. Yumuşamış bölge sertlik dağılımı değerlendirme kriteri

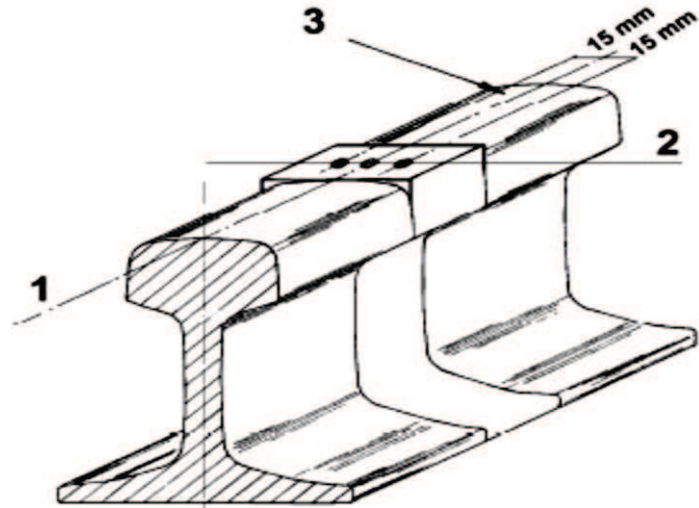
X= 10 R 200, R 220, R 260, R 260 Mn, R 320 Cr kaliteleri için
X= 25 R 350 HT, R 350 LHT kaliteleri için



Şekil 6.17. Tipik sertlik profili

Alüminotermite kaynaklı numunenin ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik dağılımını ölçtüktan sonra rayın yuvarlanma yüzeyinin sertlik değeri ölçülmüştür. Testin uygulaması şekil 6.18.'de gösterilen noktalardan ölçülmüştür.

- 1 Ray tepesi merkez çizgisi
- 2 Kaynak merkezi enine çizgi
- 3 Ray seyir yüzeyi



Şekil 6.18. Yuvarlanma yüzeyi sertlik noktaları

Sertlik testi EN ISO 6501-1'e göre üst yüzeyi taşlandıktan sonra, 10 mm çapında tungsten karbit bilye ile 3000 kg yük 15 saniye boyunca uygulanarak üç adet ölçüm

alınmıştır. Ölçülen Brinell sertlik testi sonuçlarının aritmetik ortalamasının tablo 6.7.’de gösterilen değerlere uygun olma şartı aranır.

Tablo 6.7. Sertlik testi sonuçları değerlendirme kriterleri [16]

Ray kalitesi	Isıdan etkilenmeyen Rayın sertliği (HBW)	Kaynak merkezinin sertliği (HBW)
R260 (900 A)	260 - 300	300 $\pm$ 20
Not: Sertlik ölçümü yapılmadan önce kaynak yüzeyi 0,5 mm taşlanacaktır.		

### 6.11. Kimyasal Analiz

Bu analizle alüminotermin kaynağın kimyasal bileşimi incelenmiştir. Ölçüm kaynağın ray yüzeyinde erimiş bölgede enine ekseninden en az 5 mm mesafede ve erimiş bölge sınırından da en az 5 mm mesafede yapılmaktadır. Ölçüm sonuçlarının tablo 6.8’de belirtilen değerlere uygun olması istenmektedir.

Tablo 6.8. İzin verilen kimyasal kompozisyon

R 260 (900 A)		
Element	İzin verilen %	Çalışma aralığı
C	0.40 - 0.75	$\pm$ 0.12
Si	0.00 -1.20	$\pm$ 0.25
Mn	0.50 – 1.40	$\pm$ 0.20
P	0.00 – 0.035	-
S	0.00 – 0.035	-
Cr	0.00 – 0.20	-
Mo	0.00 – 0.10	-
Ni	0.00 – 0.10	-
Al	0.02 – 0.60	$\pm$ 0.20
Cu	0.00 – 0.20	-
Sn	0.00 – 0.02	-
Sb	0.00 – 0.02	-
Nb	0.00 – 0.01	-
V	0.00 – 0.25	-
Ti	0.00 – 0.05	-

## BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI

### 7.1. Görsel ve Geometrik Kontrol

Geometrik kontrol yapılmadan önce görsel muayene yapılmıştır. Yakma alın kaynağı işlemi sırasında kavrama, kıvılcımlanma, ve şişirme sırasında oluşabilecek yırtılma, çekme, ve özellikle elektrot temas bölgelerindeki termal hasarlar oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Alüminotermite kaynaklı numunede de görsel muayene neticesinde kaynak dikişi, kalıbın biçimine uygun olarak tamamen dökülmüş ve deformasyona uğramamış olduğu ve rayın üzerinden dışarı akan veya dışarı sıçrayan sıvı çeliğin yol açtığı lekeler veya hasarlar olmadığı gözlemlenmiştir.

Görsel muayene neticesinde herhangi bir kusura rastlanmadığından master ile geometrik kontrole geçilmiştir. Yapılan master kontrolü neticesinde tablo 7.1.'de belirtilen değerler ölçülmüştür.

Tablo 7.1. Geometrik kontrol sonuçları

Kaynak Düzgünlüğü	Yakma Alın Kaynağı	Alüminotermite Kaynağı	Max. Değer EN 13674-1
Ray mantarı üzeri (mm) (+) Kaynağın yüksekliği	+0,10	+0,20	+0,20
Ray mantarı iç yüzeyi (mm) (+) Ekartman açılması yönü (-) Ekartman daralması yönü	+0,5 0	+0,10 0	+0,20 -0,10
Mantar köşesi (mm)	0,10	0,10	+0,20
Taşlama boyu (mm) (Kaynaktan her iki tarafa)	250	400	400

Ölçülen değerler EN 13674-1: 2003 standartlarında belirtilen maksimum değerlerin içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Eğer ölçülen değerler standartta belirtilen aralıkta olmasaydı ve bu ölçümleri hatta bulunan kaynaktan elde etmiş olsaydık, kusurlu

kaynağın her iki tarafında en az 150 mm'lik bir mesafeden kesilerek araya en az 9 metrelik kupon ray ilave edilip tekrar kaynak yapılması gerekmektedir.

### 7.2. Sıvı Penetrant Testi

EN 571-1 göre penetrant testine tabi tutulmuş olan numuneler de yapılan inceleme neticesinde kaynak alanında ve elektrod temas alanlarında her hangi bir çatlak gözlenmemiştir.



Şekil 7.1. Sıvı penetrasyon testi yapılan numune

### 7.3. Ultrasonik Muayene

Yapılan ölçüm neticesinde hem yakma alın kaynaklı numunenin hem de alüminotermite kaynaklı numunenin kaynak bölgesinde ve ısıdan etkilenen bölgede herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir.

Ancak demiryolu hattı üzerinde kaynaklı bölgenin ultrasonik muayenelerinde alüminotermite kaynaklarında tespit edilen kusurlu kaynak adetinin yakma alın kaynağında tespit edilenden 3-4 kat daha fazla olduğu görülmüştür [23].



#### 7.4. Kimyasal Analiz

Alüminotermite kaynağın ray yüzeyinde erimiş bölgede yapılan kimyasal analiz sonucu tablo 7.2.'de gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda alüminotermite kaynaklı numunenin EN 14730-2 standardında belirtilen değerleri sağladığı görülmüştür.

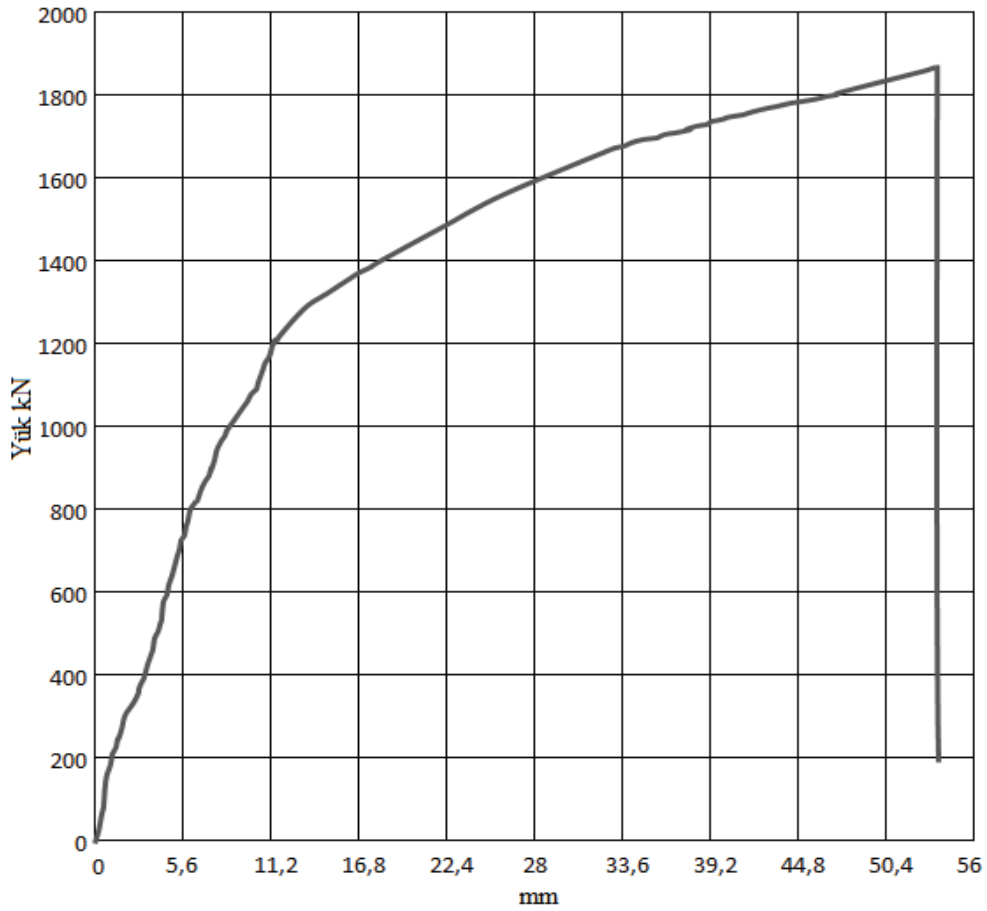
Tablo 7.2. Alüminotermite kaynağın kimyasal analizi

R 260 (900 A)		
Element	İzin verilen %	Ölçülen%
C	0.40 - 0.75	0.58
Si	0.00 -1.20	0.56
Mn	0.50 – 1.40	1.06
P	0.00 – 0.035	0.02
S	0.00 – 0.035	0.004
Cr	0.00 – 0.20	0.14
Mo	0.00 – 0.10	0.03
Ni	0.00 – 0.10	0.06
Al	0.02 – 0.60	0.13
Cu	0.00 – 0.20	0.04
Sn	0.00 – 0.02	0.01
Sb	0.00 – 0.02	0.0004
Nb	0.00 – 0.01	0.01
V	0.00 – 0.25	0.01
Ti	0.00 – 0.05	0.007

#### 7.5. Eğme Testi Sonuçları

Yakma alın kaynaklı numuneye yükleme hızı 65kN/s ile yükleme yapılmış olup 1861,10 kN yüke geldiğinde kopmanın gerçekleşerek numunenin kırıldığı gözlemlendiği için deney sonlandırılmıştır. Deney sonrası ölçülen maksimum sehime ise 53,60 mm'dir (Şekil 7.2.).

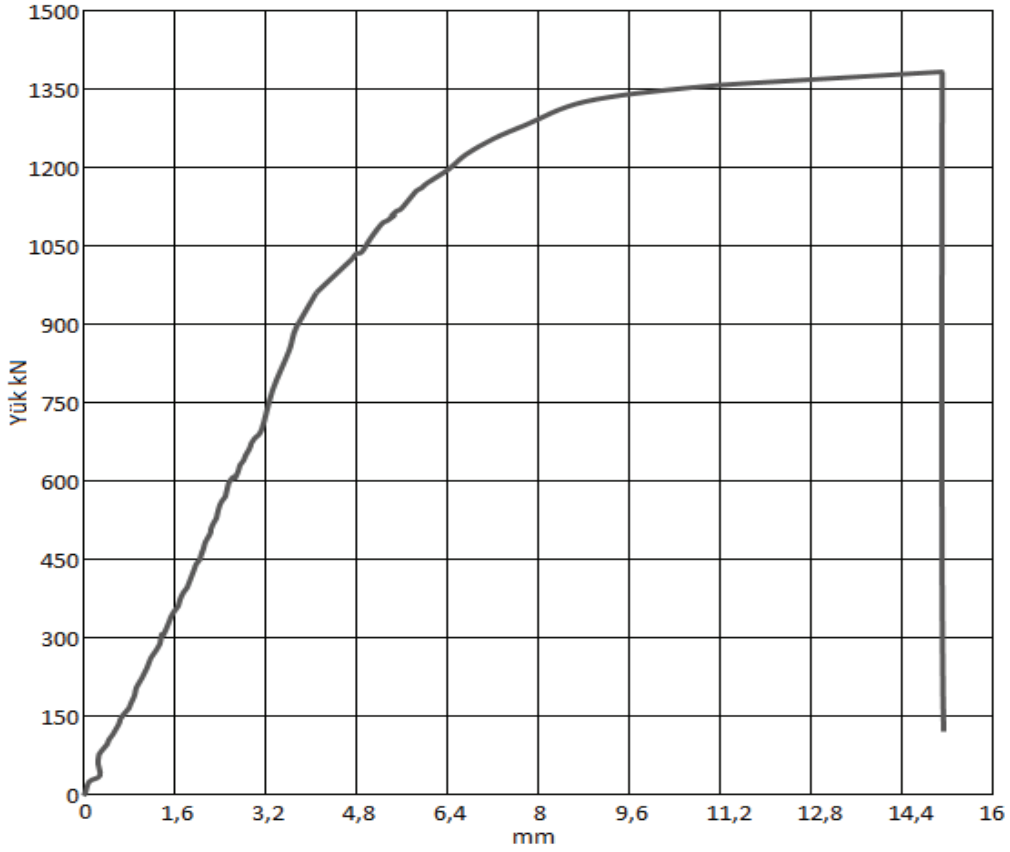




Şekil 7.1. Alın kaynaklı numunenin yük-sehim grafiği

Alüminotermite kaynaklı numuneye yükleme hızı 40 kN/s ile yükleme yapılmış olup 1415,20 kN yüke geldiğinde kopmanın gerçekleşerek numunenin kırıldığı gözlemlendiği için deney sonlandırılmıştır. Deney sonrası ölçülen maksimum sehim ise 15,10 mm'dir (Şekil 7.2.).

Yakma alın kaynaklı numune ile alüminotermite kaynaklı numunenin yapılmış olan eğme testi sonuçları irdelendiğinde EN 14730-1'e göre statik eğme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.2. Alüminotermite kaynaklı numunenin yük-sehim grafiği

Tablo 7.4’de görüldüğü üzere her iki numunede asgari eğilme kuvvetini aşmış olsalar da yakma alın kaynaklı ray numunesinin eğme testi sonuçlarının çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 7.4 Eğme testi sonuçları

	Asgari eğilme kuvveti (kN)	Numune	Asgari eğilme sehim (mm)	Numune
Yakma Alın Kaynağı	1600 kN	1861,1 kN	20 mm	53,60 mm
Alüminotermite Kaynağı	1250 kN	1415,2 kN	-	15,10 mm

## 7.6. Yorulma Testi Sonuçları

TS EN 14730-1 belirtildiği şekilde yorulma testi yapılan numunelerde kaynağın asgari gerilim/azami gerilim oranı 0,1 olacak şekilde dört noktalı uygulanan  $5 \times 10^6$  çevrimden sonra herhangi bir çatlama veya kırılma belirtisi gözlemlenmemiştir. Hem yakma alın

kaynaklı numune hem de alüminotermite kaynaklı numunenin de standartta belirtilen 5.000.000 çevrime dayandığı için deney sonlandırılmıştır.

### 7.7. Sertlik Değerlerinin İncelenmesi

Yakma alın kaynağın sıcaklıktan etkilenmiş olan bölgesindeki sertlikler arasındaki farklılık EN ISO 6507-2 uyarınca Vickers sertlik yöntemiyle (HV30) ölçülmüş olup sertlik testi sonuçları tablo 7.5.'de verilmiştir.

Tablo 7.5. Yakma alın kaynağı sertlik değerleri

Birleşme Bölgesinden Uzaklık	HV30	Birleşme Bölgesinden Uzaklık	HV30
L 40	270	R 40	270
L 38	275	R 38	279
L 36	274	R 36	277
L 34	278	R 34	275
L 32	270	R 32	280
L 30	270	R 30	292
L 28	265	R 28	290
L 26	275	R 26	285
L 24	280	R 24	284
L 22	290	R 22	291
L 20	281	R 20	287
L 18	252	R 18	268
L 16	272	R 16	268
L 14	280	R 14	257
L 12	297	R 12	287
L 10	300	R 10	285
L 8	293	R 8	290
L 6	295	R 6	287
L 4	292	R 4	297
L 2	301	R 2	300
Birleşme Çizgisi 0		278 HV30	
Ana Ray Ortalama Sertliği		279 HV30	

Yakma alın kaynaklı numunenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 278 HV olarak ölçülmüş ve ana rayın ortalama sertlik değeri de 279 HV olarak hesaplanmıştır. Isıdan etkilenmiş bölgenin en düşük sertlik değeri 252 HV, en yüksek ise 301 HV olarak ölçülmüştür. EN 14587-2 standardında ısıdan etkilenmiş bölgenin sertlik değeri, ana rayın ortalama sertlik değerinden minimum 30 HV düşük veya maksimum 60 HV yüksek olması istendiğinden test edilen numunenin standartları sağladığı görülmektedir.

Alüminotermit kaynaklı numuneye ise iki farklı sertlik testi yapılmıştır. Öncelikle Brinell sertlik yöntemiyle yuvarlanma yüzeyine (mantar) sertlik testi yapılmıştır. Yuvarlanma yüzeyinin kaynak bölgesinden alınan üç ölçüm sonucunun aritmetik ortalaması ve ana rayın ortalama sertlik değeri tablo 7.6.'de gösterilmiştir.

Tablo 7.6. Yuvarlanma yüzeyi sertlik testi

Isıdan Etkilenmeyen Rayın Ortalama Sertliği	1.Noktada Kaynak Merkezinin Sertliği	2.Noktada Kaynak Merkezinin Sertliği	3.Noktada Kaynak Merkezinin Sertliği	Kaynak Merkezinin Ortalama Sertliği
273 HBW	287 HBW	289 HBW	280 HBW	285 HBW

Alüminotermit kaynaklı numunenin yuvarlanma yüzeyindeki kaynak bölgesinin ortalama sertlik değeri 285 HB olarak ölçülmüş ve ana rayın ortalama sertlik değeri de 273 HB olarak hesaplanmıştır. EN 14730-2 standardında ısıdan etkilenmiş bölgenin sertlik değeri 260-300 HB arasında, Kaynak bölgesinin sertlik değeri de 280-320 HB arasında olması istendiğinden test edilen numunenin standartları sağladığı görülmektedir.

Alüminotermit kaynaklı numuneye yapılan diğer bir sertlik testinde ise vickers sertlik yöntemiyle ray kesitinden hazırlanan numunenin kaynak bölgesinden, ısıdan etkilenmiş bölgeden ve ana raydan ölçümler yapılmıştır. Bulunan değerler tablo 7.6.'de gösterilmiştir.

Tablo 7.2. Alüminotermite kaynağı numunenin sertlik değerleri

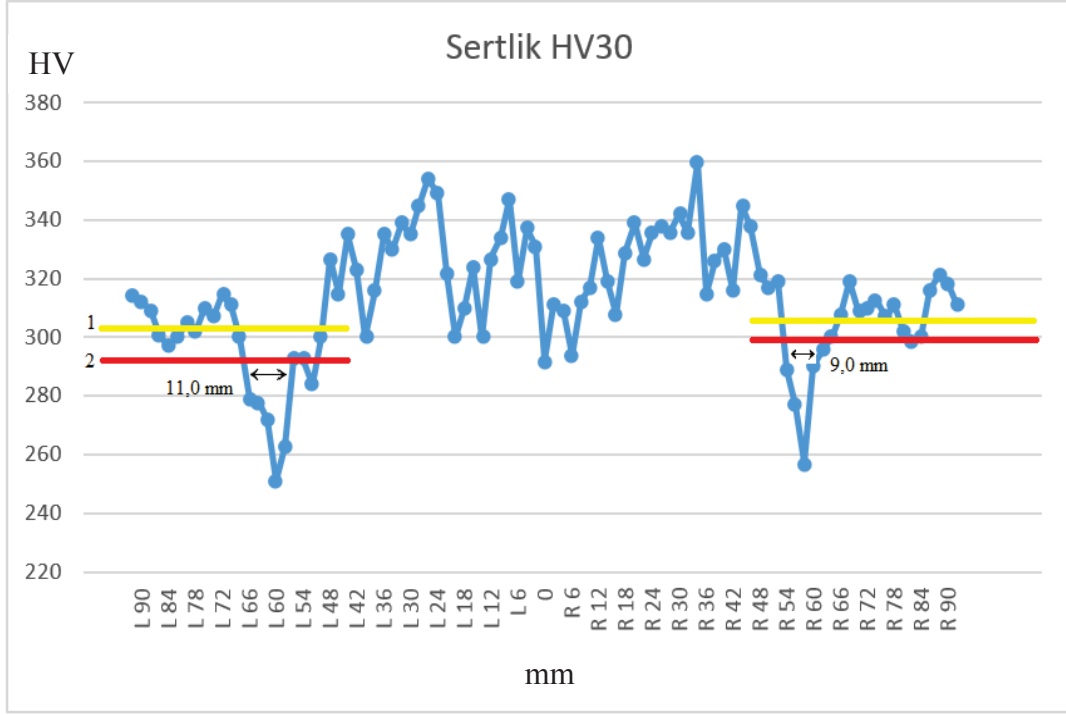
Erimiş Bölgeden Uzaklık (mm)	HV30	Erimiş Bölgeden Uzaklık (mm)	HV30
L 92	314	R 92	311
L 90	312	R 90	318
L 88	309	R 88	321
L 86	301	R 86	316
L 84	297	R 84	300
L 82	300	R 82	299
L 80	305	R 80	302
L 78	302	R 78	311
L 76	310	R 76	307
L 74	307	R 74	313
L 72	315	R 72	310
L 70	311	R 70	309
L 68	300	R 68	319
L 66	279	R 66	308
L 64	278	R 64	300
L 62	272	R 62	296
L 60	251	R 60	290
L 58	263	R 58	257
L 56	293	R 56	277
L 54	293	R 54	289
L 52	284	R 52	319
L 50	300	R 50	317
L 48	327	R 48	321
L 46	315	R 46	338
L 44	335	R 44	345
L 42	323	R 42	316
L 40	300	R 40	330
L 38	316	R 38	326
L 36	335	R 36	315
L 34	330	R 34	360
L 32	339	R 32	336

Tablo 7.3. Alüminotermite kaynaklı numunenin sertlik değerleri (Devamı)

L 30	335	R 30	342
L 28	345	R 28	336
L 26	354	R 26	338
L 24	349	R 24	336
L 22	322	R 22	327
L 20	300	R 20	339
L 18	310	R 18	329
L 16	324	R 16	308
L 14	300	R 14	319
L 12	327	R 12	334
L 10	334	R 10	317
L 8	347	R 8	312
L 6	319	R 6	294
L 4	337	R 4	309
L 2	331	R 2	311
Erimiş Bölge Çizgisi 0		292 HV30	
Ana Ray Ortalama Sertliği		L 303 HV30	R 309 HV30

Tablo 7.6’da gösterilen değerler incelendiğinde, L2-L32 ile R2-R32 arasında kaynak bölgesinin sertlik değerlerini göstermektedir. Ergimiş bölgenin en yüksek sertlik değeri 354 HV, en düşük ise 294 HV olarak ölçülmüştür. L34-L60 ile R34-R58 arasında gözle görülen ısıdan etkilenmiş bölgedeki sertlik değerlerini göstermektedir. Isıdan etkilenen bölgedeki en yüksek sertlik değeri 360 HV, en düşük ise 251 HV olarak ölçülmüştür. L62-L92 ile R60-R92 arası sertlik değeri ise ana rayın sertlik ölçümlerini göstermektedir. Ana rayda en yüksek sertlik değeri 321 HV, en düşük ise 257 HV olarak ölçülmüştür.

Alüminotermite kaynak numunesinden ölçülen bütün sertlik değerleri ile şekil 7.4’de gösterilen sertlik profili oluşturulmuştur. Şekildeki sarı çizgi ana rayın ortalama sertlik değeri ile çizilmiştir. Kırmızı renkli çizgi ise EN 14730-2 standardında belirttiği gibi ana rayın ortalama sertlik değerinden 10 HV çıkarılarak çizilmiştir.



Şekil 7.3. Alüminotermite kaynağı sertlik profili

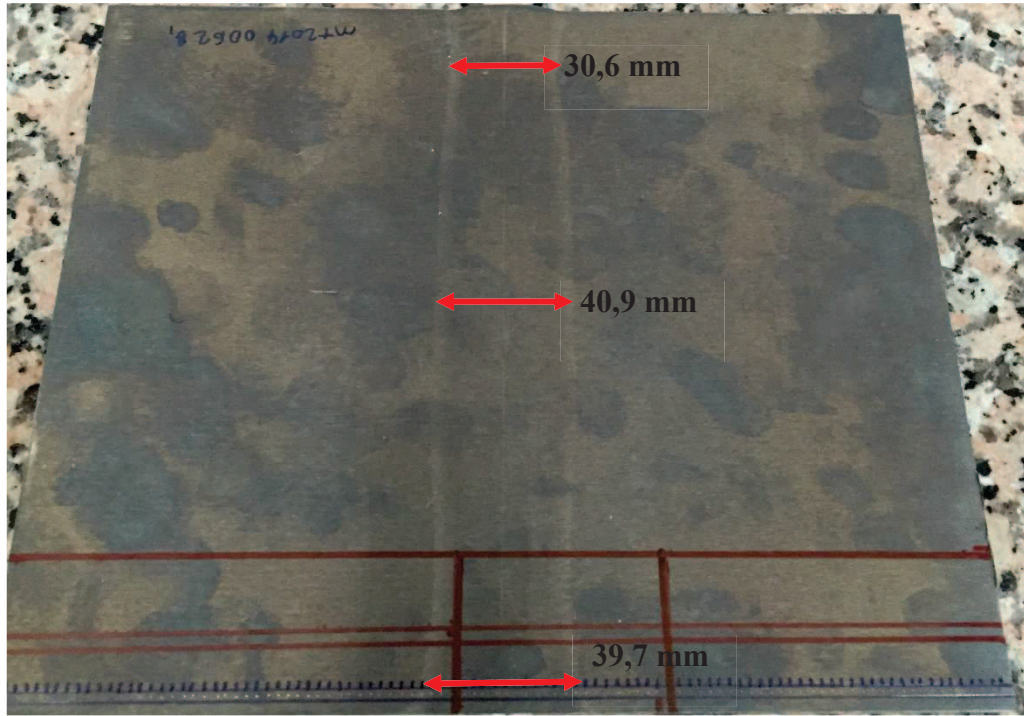
Alüminotermite kaynağı sertlik profilinde 1 ve 2 çizgisi arasındaki farkın L için 11,0 mm, R için ise 9,0 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerler standartta bahsi geçen 20 mm değerinden küçük olduğu için numune sertlik testinden geçmiştir.

Yakma alın kaynağının sertlik değişiminin daha az olması, kaynak bölgesi ile ısıdan etkilenen bölgenin alüminotermite kaynağı kaynak bölgesi ile ısıdan etkilenen bölgeden daha dar olmasından kaynaklanmaktadır. Sertlik değişiminin az olması ve kaynak bölgesindeki sertlik değerinin ana ray ortalama sertlik değerine yakın olması yakma alın kaynağını alüminotermite kaynağından üstün kılmaktadır.

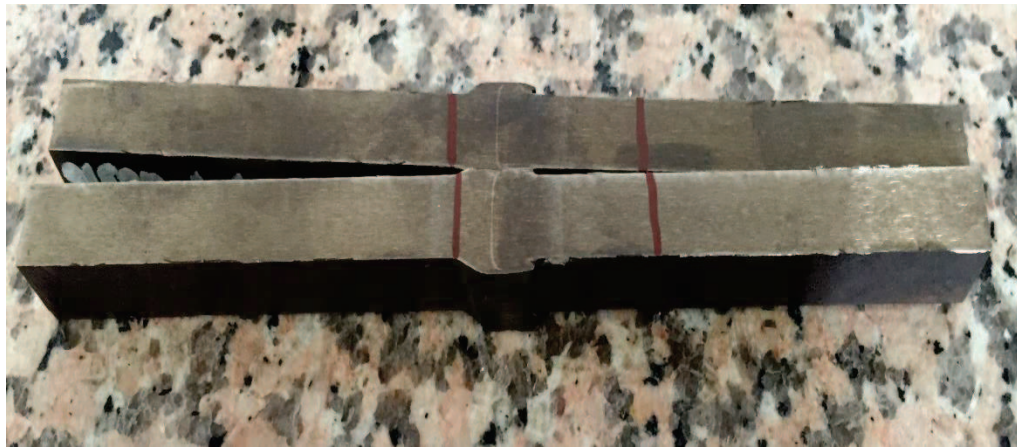
## 7.8. Makroyapının İncelenmesi

Hazırlanan numunelerden öncelikle yakma alın kaynağı incelenmiştir. Görsel olarak sıcaklıktan etkilenmiş olan bölgenin biçimi nominal olarak kaynak eksenine etrafında simetrik olması ve maksimum 45 mm ile minimum 20 mm genişlik arasında olması gerekmektedir.

Şekil 7.5.'de detaylı olarak görüldüğü gibi, ısıdan etkilenen bölgenin bitimi kaynak eksenine etrafında simetriktir. Isıdan etkilenen bölgenin genişliği minimum 30,6 mm, maksimum 40,9 mm'dir. Minimum ve maksimum genişlik arasındaki sapma 20 mm'den azdır. İncelenen yüzeyde herhangi bir çatlama, çekme, yapışma eksikliği vs gözlemlenmemiştir.



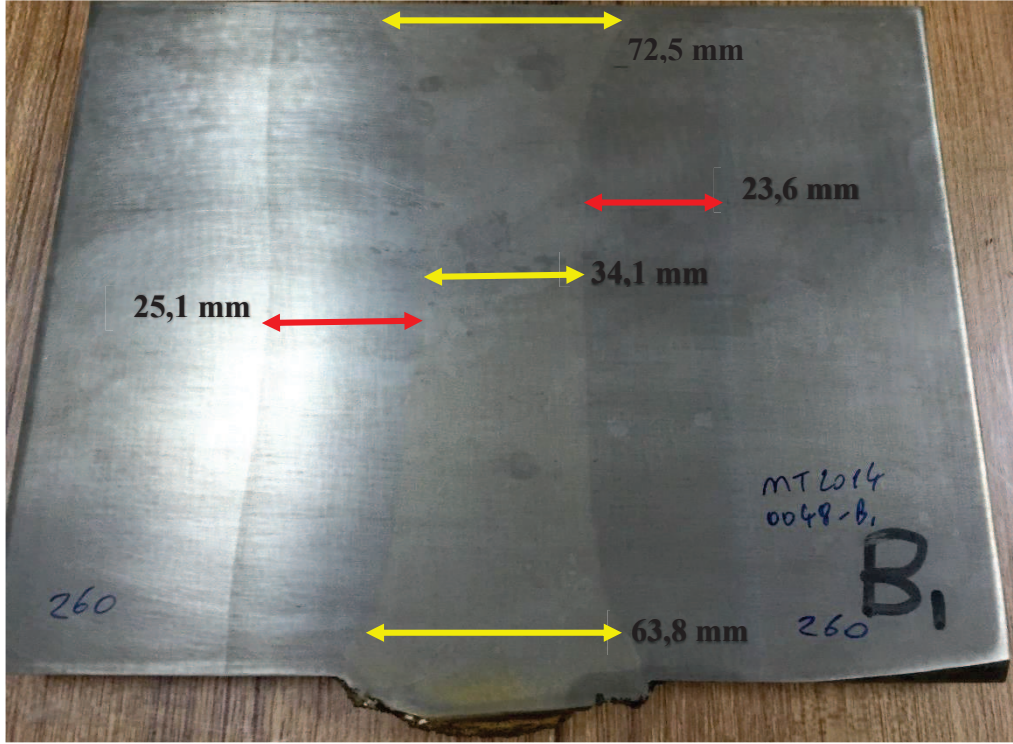
(a)



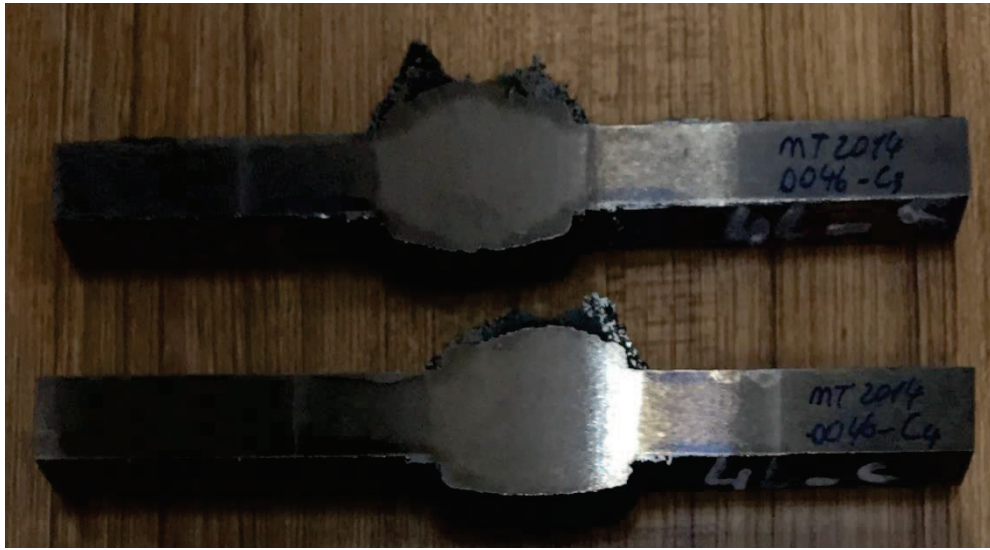
(b)

Şekil 7.4. Yakma alın kaynağı ısıdan etkilenmiş bölgenin makro görünümü ve boyutları. (a) ray merkezi, (b) taban





(a)



(b)

Şekil 7.5 Alüminotermit kaynağı ergimiş bölgenin makro görünümü ve boyutları. (a) ray merkezi, (b) taban ucu

Daha sonra alüminotermit kaynağı numunesinin makro yapısı incelenmiştir. Kaynak bölgesinin genel görünümü Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde ısıdan etkilenen bölgenin ergimiş bölge boyunca eksenine göre simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Ergimiş bölgenin genişliği en dar bölgede 34,1 mm, en geniş bölgede ise 72,5 mm olarak ölçülmüştür. Gözle görülen ısıdan etkilenmiş bölgenin

genişliği ise sağ en geniş bölgede 23,6 mm, sol en geniş bölgede ise 25,1 mm olarak llmştr. Görsel muayene neticesinde yüzeyde herhangi bir çatlama, çekme, yapışma eksikliği vs. gözlemlenmemiştir.

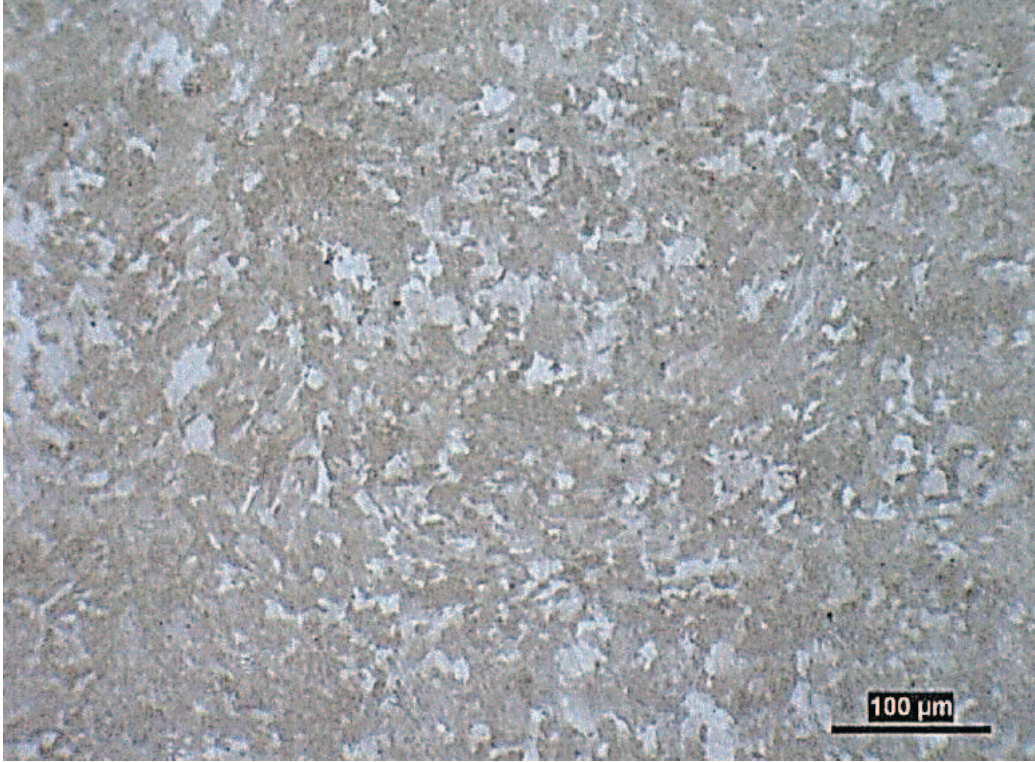
Ergimiş bölge kaynağın boyuna eksenine göre simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında ergime mesafesinin 3 mm veya daha büyük olması istenmektedir. Hazırlanan numunenin şekil ve boyutları incelemesinin sonucu ergime mesafesi 5,2 mm olarak llmştr.

Her iki yöntemle hazırlanan kaynak numunesinin kaynak bölgelerinin makro incelemeleri sonucunda kaynakta tam birleşme olduğu, ısdan etkilenmiş bölgenin ergimiş bölge etrafında simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında alüminotermite kaynağın ısdan etkilenmiş bölgesi ve ergimiş bölgesi yakma alın kaynağında ki bölgelerden oldukça geniş olduğu da gözlemlenmiştir.

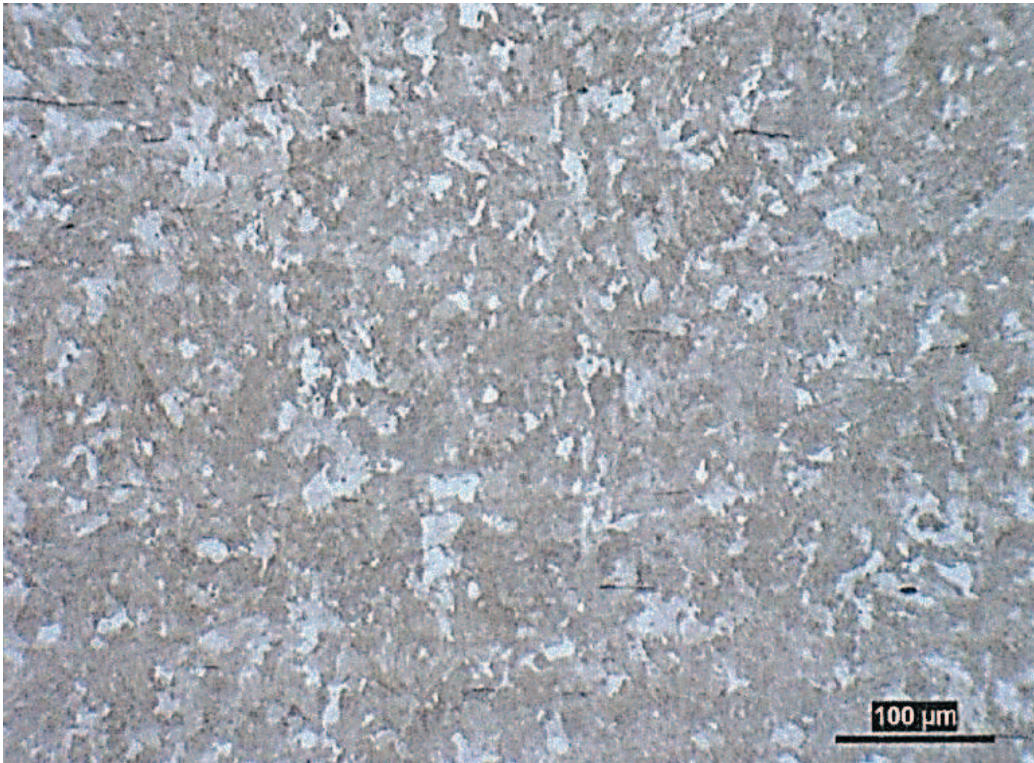
### **7.9. Mikroyapının İncelenmesi**

Yakma alın kaynağı mikro yapı incelemeleri için metalografik yöntemlerle hazırlanmış ve içyapıları mikroskop ile incelenmiştir. İncelenen tüm bölgelerde yapı perlitiktir. Ray ana malzemesinde hadde yönünde dizilmış MnS kalıntıları mevcuttur. Gerçekleştirilen detaylı incelemelerde, ısdan etkilenen bölgede martensit veya beynit fazına rastlanmamıştır (şekil 7.7.).





(a)



(b)

Şekil 7.6. Alın kaynağı mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban



Alüminotermite kaynağı ile kaynatılmış numunenin ergimiş bölgesinin mantar ve taban bölgesinden X100 büyütmede çekilmiş fotoğrafı şekil 8.10'da gösterilmiştir. Hazırlanan numune incelendiğinde yapının perlitik-ferritik olduğu gözlemlenmiştir. Her iki bölgede de beynitik veya martenzitik yapıya rastlanmamıştır.



(a)

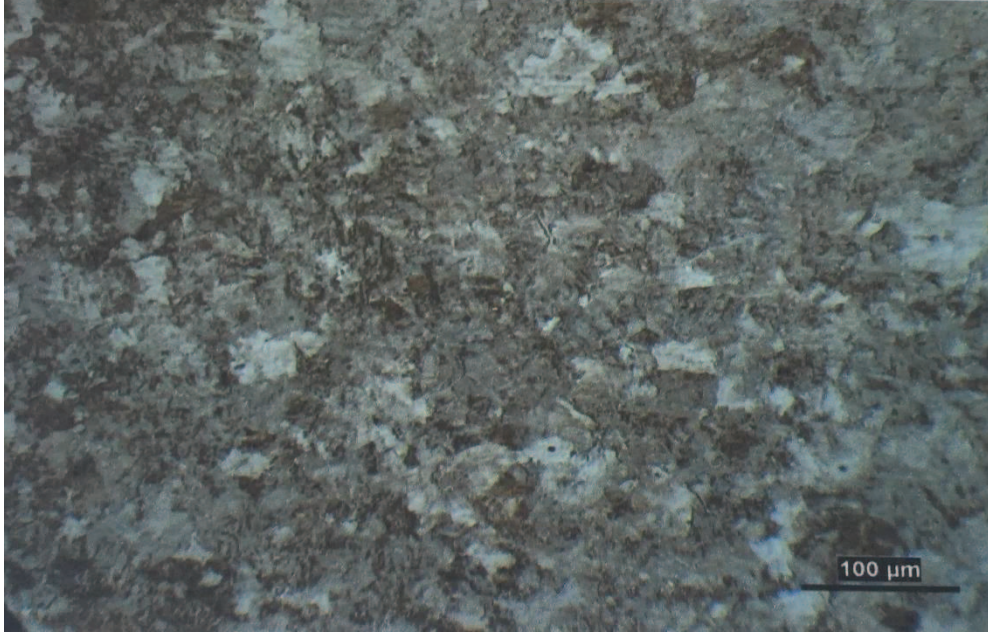


(b)

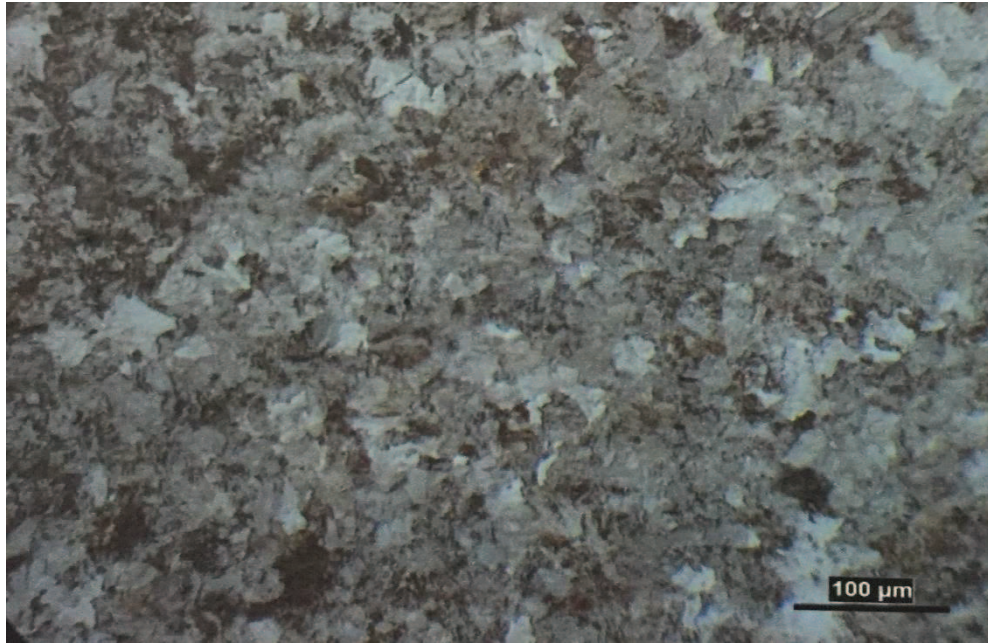
Şekil 7.7. Alüminotermite kaynağı ergimiş bölge mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban



Aynı şekilde görünür ısıdan etkilenen bölgenin de mikroyapısı incelenmiştir. Söz konusu bölgenin mantar ve taban bölgesinden X100 büyütmede çekilmiş fotoğrafı şekil 7.9.'da gösterilmiştir. Bu fotoğraflardan anlaşılacağı üzere kaynak metalinin yapısı perlitik-ferritiktir. Kaynakta kırılma nedeni olan, dolayısıyla bünyede bulunmasına izin verilmeyen beyaz veya martenzit yapılarına rastlanmamıştır.



(a)



(b)

Şekil 7.8. Alüminotermit kaynağı ısıdan etkilenmiş bölge mikro yapı görünümü. (a) mantar, (b) taban

Fotoğraflar incelendiğinde koyu renkli bölgeler perlit yapıyı, açık renkli bölgeler ferrit yapıyı göstermektedir. Kaynak bölgesinde perlit + ferrit ve soğuma hızından dolayı, klasik ferrit yapısı oluşturacak zaman olmadığından kristal doğruları boyunca uzayarak widmanstatten yapı olarak bilinen ferritleri oluşturduğu görülmektedir. Numunelerde yapılan testlerde çatak ve poroziteye rastlanılmamıştır.

Alüminotermit kaynağı mikro yapısı incelendiğinde yapının büyük çoğunluğunu perlit oluşturduğu halde yapı içinde ferrit ve  $\alpha$  fazının olduğu görülmektedir. Bu yapı dayanımı attırdığı gibi kırılma ihtimalini de arttıracığı düşünülmektedir. Böylece, aslında sertlik veya malzemenin çekme dayanımı arttırarak yorgunluk performansını azaltacaktır. Genellikle düşük dayanımlı çelik yüksek dayanım ve sert bir malzeme ile karşılaştırıldığında bir gerilim başlangıcı oluşacağı ve kaynağın yorgunluğa daha az duyarlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanan termit kaynağı sırasında ısının kaynak merkezinden raya doğru hızlı akması, eş eksenli olması gereken kaynak metalindeki tanelerinde merkeze doğru yönelmiş, iri ve uzun taneler şeklinde katılaşmasına yol açmıştır.

### 7.10. Kaynak İmalat Süresi

Yakma alın kaynak imalat süresi tablo 7.9.'da verilmiştir. İmalat süresi hesaplanırken, ray gövdesinin taşlanması, yakma alın kaynak makinesi kafasının yerleştirilmesi, ray başlarının ayarlanması, kaynak işlemi, kaba taşlama işi ve makinenin toparlanıp diğer kaynak bölgesine 36 m gitmesi hesaba dahil edilmiştir. Yakma alın kaynak imalat süresi bir kaynak için yaklaşık 7 dakika olarak bulunmuştur. Günlük 8 saat çalışarak ortalama 68 adet yakma alın kaynağı yapılabilir.

Tablo 7.9. Yakma alın kaynak imalat süresi

İmalat Aşamaları	Süre(Dakika)
Rayların hazırlanması	2
Kaynak yapımı	3
Taşlama ve diğer raya geçiş	2
Toplam	7

Alüminotermite kaynak imalat süresi tablo 7.10.'da verilmiştir. Bir adet kaynak için harcanan toplam süre 53 dakika olarak bulunmuştur. Bir ekip bir günde dinlenmeler hariç 8 saat çalışarak 9 adet alüminotermite kaynak yapabilmektedir.

Tablo 7.10. Alüminotermite kaynak imalat süresi

İmalat Aşamaları	Süre(Dakika)
Rayların hazırlanması	10
Kalıp bağlama	12
Ön ısıtma	6
Döküm	3
Soğuma ve sıyırma	10
Taşlama ve kurulum	12
Toplam	53

Kaynak ekibi 5 kişiden oluşmaktadır. Ön hazırlık ve kaynak işlemi 2 usta kaynakçı tarafından yapılmaktadır. 1 usta, kaba ve ince taşlama işini yapmaktadır. 1 işçi ara eleman olarak çalışmaktadır. 1 sürveyan veya çavuş ekip şefi olarak çalışmaktadır.

Her iki kaynak yönteminin imalat süreleri incelendiğinde özellikle işletme altında yapılan kaynaklarda yakma alın kaynağı kullanılması avantajlıdır. Çünkü bir gün içinde 9 adet alüminotermite kaynak yapılabildiği halde yaklaşık 68 adet yakma alın kaynağı yapılabilmektedir. Bu sayede hattın trafiğe kapalı kalma süresi kısalmış olacaktır.

### 7.11. Kaynak İmalat Maliyeti

Yakma Alın kaynak makinesinin servis ömrü 15 yıl olarak kabul edilmektedir. Bir yılda hava şartlarından ve arızalardan dolayı ortalama 240 gün çalışabilmektedir. Makinelerin ortalama servis ömrü  $15 \times 240 = 3600$  gündür. Alüminotermite kaynak yapım makinelerinin servis ömrü ise 5 yıl olarak kabul edilmektedir. Kaynak makineleri bir yılda hava şartlarından ve arızalardan dolayı ortalama 180 iş günü çalışabilir. Yani makinelerin ortalama servis ömrü  $5 \times 180 = 900$  gündür. Bu nedenle günlük amortisman maliyetleri günlük kaynak sayısına bölünerek bir kaynağa ait birim amortisman maliyeti bulunur. Bir günlük makinelerin amortisman maliyeti günlük kaynak sayısına bölünerek bir adet kaynağın birim amortisman maliyeti çıkarılmıştır.

Alüminotermite kaynak yönteminin malzeme maliyetinin fazla çıkması kaynak için araya dolgu malzemesi kullanılmama zorunluluğundandır. İşçilik maliyetinin yüksek olması günlük kaynak sayısının yakma alın kaynağına göre çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yakma alın kaynağı ile bir günde 68 adet kaynak yapılabildiği halde alüminotermite kaynak yöntemi ile sadece 9 adet kaynak yapılmaktadır.

Tablo 7.4 Kaynak maliyetlerinin karşılaştırılması

	Amortisman Maliyeti (€)	Malzeme Maliyeti (€)	İşçilik Maliyeti (€)	Diğer Maliyet (€)	Toplam Maliyet (€)
Yakma Alın Kaynağı	8,43	12,63	7,88	42,11	71,05
Alüminotermite Kaynak	5,21	71,45	59	13,56	149,22

Yakma alın kaynağında malzeme maliyetini yakıt (mazot), yağ, üstüğü ve benzin maliyetleri oluşturur. Alüminotermite kaynak malzeme maliyetine ise alüminotermite kaynak porsiyonu, tuğla kalıp, pota, sıvama kumu, maytap, ray taşılama taşı ve ön tavlama malzemeleri ile oksijen ve propan gazı etki eder.

Yakma alın kaynağı operatör dahil 6 kişiden oluşmaktadır. Alüminotermite kaynak ekibi 5 kişiden oluşmuş olsa da günlük yapılan kaynak adeti sayısı düşük olduğu için işçilik maliyeti yüksektir.

Her iki yöntem de diğer giderleri makinelerin tamir ve bakımı ile ilgili yedek parça, işçilik, nakliye ve sigorta gibi giderler oluşturmaktadır.

Tablo 7.11. incelendiğinde alüminotermite kaynak birim maliyeti 149,22 €/adet olurken, yakma alın kaynak birim maliyeti 71,05€/adet olmaktadır. Her iki kaynak yönteminin birim maliyet farkı 78,17 €/adet olur. Maliyetlerin bu şekilde çıkması yakma alın kaynağının daha ekonomik olduğu tezini kanıtlamaktadır. Yakma alın kaynak makinesinin satın alma maliyetinin fazla olmasına karşın kapasite ve servis ömrünün uzun olması birim maliyetini düşürmektedir.



## **BÖLÜM 8. TARTIŞMALAR**

Görsel muayene neticesinde herhangi bir kusura rastlanmayıp standartta belirtilen maksimum değerlerin içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Demiryolu hattında sürekli ray dizisi arzu edildiği için kupon ray ilave edilip kaynak sayısını arttırmak istenmemektedir. Alüminotermite kaynağın yüzey düzgünlüğünün maksimum değerlere yakın olması hatta yapılacak birçok kaynağın istenen değeri aşacağı düşünülmektedir. Bu da hatalı kaynağın kesilip kupon ray ilavesi sonucunu doğuracaktır. Bu sebeple daha düzgün kaynak yüzeyine sahip yakma alın kaynağı kullanımı ray dizisinde sürekliliği arttıracığı düşünülmektedir.

Yakma alın kaynağı ve alüminotermite kaynak yöntemi ile hazırlanan numunelere tahribatsız muayene yöntemlerinden olan sıvı penetrant testi ile ultrasonik test uygulanmıştır. Tahribatsız testlere tabi tutulan numuneler de yapılan inceleme neticesinde kaynak alanında ve ısıdan etkilenmiş bölgenin yüzey ve yüzey altında herhangi bir çatlak veya süreksizliğe rastlanmamıştır.

Ancak demiryolu hattı üzerinde ultrasonik muayene yapılan ray kaynaklarından alüminotermite kaynaklarında tespit edilen kusurlu kaynak adetinin yakma alın kaynağında tespit edilenden 3-4 kat daha fazla olduğu görülmüştür [24].

Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattında yapılan kaynakların ultrasonik inceleme neticesinde hattın alüminotermite kaynaklı kesimlerindeki toplam kusurlu kaynak oranı %14,44, hattın yakma alın kaynaklı kesimlerindeki toplam kusurlu kaynak oranı ise %3,79 olduğu tespit edilmiştir. Buradan da kusurlu alüminotermite kaynak oranı, kusurlu yakma alın kaynağı oranının 3,81 katı olduğu görülmektedir [23].

Alüminotermite kaynaklarda iki ray ucunu birleştirmek için ray çeliğinden farklı özelliklere sahip termit malzemesinin kullanılması Alüminotermite kaynaklardaki

kusur oranının, yakma alın kaynaklardaki kusur oranından yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Çünkü kaynak bölgeleri raya göre daha düşük bir sertliğe sahiptir.

Yakma alın kaynağında ise farklı bir malzeme kullanılmaz, ray metali eritilerek birleştirme gerçekleşir. Farklı bir malzeme kullanılmadığı için kaynak bölgelerinin sertliği, alüminotermite kaynak bölgelerinin sertliğine göre daha yüksektir. Ayrıca yakma alın kaynağında işçilik hataları, alüminotermite kaynak yöntemindeki işçilik hatalarına göre çok daha düşüktür.

Demiryolu hatlarındaki ray kaynakları, zaman içinde yapısal bütünlüklerinin bozulmasına yol açan önemli derecede büyük eğilme, kayma ve tekerlek-ray temas gerilmelerine, plastik deformasyona ve aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Kaynak kusurlarının ilerlemesini önlemek, kaynak kırılmalarını azaltmak ve demiryolu hatlarının güvenliğini en yüksek seviyeye çıkarmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biri, tahribatsız muayene yöntemleridir. 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 kaynak kontrolünün yapılmasına izin vermesidir.

Yakma alın kaynaklı numune ile alüminotermite kaynaklı numunenin yapılmış olan eğme testi sonuçları irdelendiğinde EN 14730-1'e göre statik eğme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Yakma alın kaynaklı numuneye yükleme hızı 65kN/s ile yükleme yapılmış olup 1861,10 kN yüke geldiğinde numunenin kırıldığı gözlemlenmiş olup ölçülen maksimum sehim ise 53,60 mm'dir. Alüminotermite kaynaklı numuneye ise yükleme hızı 40 kN/s ile yükleme yapılmış olup 1415,20 kN yüke geldiğinde kırıldığı ve maksimum sehimin 15,10 mm olduğu görülmüştür.

TS EN 14730-1 belirtildiği şekilde yorulma testi yapılan numunelerde kaynağın asgari gerilim/azami gerilim oranı 0,1 olacak şekilde dört noktalı uygulanan  $5 \times 10^6$  çevrimden sonra herhangi bir çatlama veya kırılma belirtisi gözlemlenmemiştir.

Yakma alın kaynağı yorulma dayanımı ile eğilme dayanımı açısından değerlendirildiğinde alüminotermite kaynağa göre performansının kesin bir şekilde önde olduğu görülmektedir.

Özden yapmış olduğu çalışmada, yakma alın kaynaklı ve alüminotermite kaynaklı ray numunesine eğme testi ve yorulma testi yapmıştır. Yapmış olduğu eğme testi sonuçları tablo 9.1’de verilmiştir. Yorulma testi sonucunda numunelerin yük altında 5.000.000 çevrime dayandığını gözlemiştir [19].

Tablo 0.1 Eğme testi sonuçları

	Yakma Alın Kaynağı	Alüminotermite Kaynağı
Uygulanan Yük (kN)	1710	1304
Sehim (mm)	28.17	15.45
Deney sonunda numunenin Durumu	Gevrek kırılma olmuştur.	Gevrek kırılma olmuştur.

Lichtberger’in çalışması göre Alman Demiryollarında her 100 km’de 1 ray kırığı meydana gelmiştir. Bir yıl içinde toplam 650 ray kırığı oluşmuş ve bu kırıkların 220 adedi alüminotermite kaynağı bölgelerinde olduğunu gözlemiştir [15].

Yine aynı çalışmada, 2004 yılında SNCF (Fransız Ulusal Demiryolu Şirketi) dahilinde kaydedilmiş ray kırıklarından %34’ü alüminotermite kaynak % 3’ü yakma alın kaynağı bölgelerinde olduğunu görmüşlerdir [15].

David Tawfik ve arkadaşları, Avusturalya’da ağır dingil yükleri altında alüminotermite kaynak ile yakma alın kaynağı 33 ton dingil yükü olan araçlar ile ray üzerinde 65 milyon groston yük geçtikten sonra kırılma yüzdeleri karşılaştırılmıştır. İnceleme sonucunda kırıkların % 29’u alüminotermite kaynak, %3’ü yakma alın kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir [30].

Yapılan eğme testi ve yorulma testi sonuçlarının hem literatür ile hem de TS EN 14730-1 değerler ile örtüştüğü görülmektedir. Yapılan her iki test değerinin de yüksek olması yakma alın kaynağının alüminotermite kaynağından daha uzun ömürlü ve kaliteli olduğunu göstermektedir. Yakma alın kaynağının servis ömrünün uzun olması bakım maliyetini de düşürecektir.

Yakma alın kaynağın sıcaklıktan etkilenmiş olan bölgesindeki sertlikler arasındaki farklılık EN ISO 6507-2 uyarınca Vickers sertlik yöntemiyle (HV30) ölçülmüştür. Yakma alın kaynaklı numunenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 278 HV olarak ölçülmüş ve ana rayın ortalama sertlik değeri de 279 HV olarak hesaplanmıştır. Isıdan etkilenmiş bölgenin en düşük sertlik değeri 252 HV, en yüksek ise 301 HV olarak ölçülmüştür. EN 14587-2 standardında ısıdan etkilenmiş bölgenin sertlik değeri, ana rayın ortalama sertlik değerinden minimum 30 HV düşük veya maksimum 60 HV yüksek olması istendiğinden test edilen numunenin standartları sağladığı görülmektedir. Ayrıca ana ray ortalama sertlik değeri kaynak bölgesinin sertlik değerine yakın olması arzu edilmektedir. Çünkü kaynak bölgesinin sertlik değerinin yüksek olması bu bölgenin gevrekleşerek kırılmasına sebep olabileceği gibi düşük olması da kaynak bölgesinin hızlı bir şekilde aşınmasına sebep olacaktır.

Alüminotermite kaynaklı numuneye ise iki farklı sertlik testi yapılmıştır. Öncelikle Brinell sertlik yöntemiyle yuvarlanma yüzeyine (mantar) sertlik testi yapılmıştır. Alüminotermite kaynaklı numunenin yuvarlanma yüzeyindeki kaynak bölgesinin ortalama sertlik değeri 285 HB olarak ölçülmüş ve ana rayın ortalama sertlik değeri de 273 HB olarak hesaplanmıştır. EN 14730-2 standardında ısıdan etkilenmiş bölgenin sertlik değeri 260-300 HB arasında, kaynak bölgesinin sertlik değeri de 280-320 HB arasında olması istendiğinden test edilen numunenin standartları sağladığı görülmektedir.

Alüminotermite kaynaklı numuneye yapılan diğer bir sertlik testinde ise vickers sertlik yöntemiyle ray kesitinden hazırlanan numunenin kaynak bölgesinden, ısıdan etkilenmiş bölgeden ve ana raydan ölçümler yapılmıştır.

L2-L32 ile R2-R32 arasında kaynak bölgesinin sertlik değerlerini göstermektedir. Ergimiş bölgenin en yüksek sertlik değeri 354 HV, en düşük ise 294 HV olarak ölçülmüştür. L34-L60 ile R34-R58 arasında gözle görülen ısıdan etkilenmiş bölgedeki sertlik değerlerini göstermektedir. Isıdan etkilenen bölgedeki en yüksek sertlik değeri 360 HV, en düşük ise 251 HV olarak ölçülmüştür. L62-L92 ile R60-R92 arası sertlik değeri ise ana rayın sertlik ölçümlerini göstermektedir. Ana rayda en yüksek sertlik değeri 321 HV, en düşük ise 257 HV olarak ölçülmüştür.

Alüminotermite kaynağı yapılmış ray incelendiğinde tipik üç farklı bölge meydana çıkmaktadır. Bunlardan ilki sıvı kaynak metalinin katılaşmasıyla meydana gelen kaynak bölgesi, ikincisi kaynak sırasında ergimeyen ancak katılaşma sırasında sıvı metalden ısı alarak dönüşüm sıcaklığına ulaşarak dönüşüme uğrayan ısıdan etkilenen bölge, son olarak kaynak sırasında ısınan ancak dönüşüm sıcaklığını geçmeyen ana ray metalidir. Bunlardan kaynak bölgesi döküm olduğu için tipik iri tane döküm yapısı göstermektedir. Bununla beraber kimyasal kompozisyonu ve dolayısıyla sertliği de ana ray metalinden farklıdır. Isıdan etkilenen bölge ise ergimeydiğinden kaynak metaline göre daha küçük tane boyutuna sahip olmakla beraber uzun süre yüksek ısıya maruz kaldığı için ana ray metalinden daha büyük tane boyutuna sahiptir. Bununla beraber bu bölgede metalürjik dönüşümler meydana gelmektedir. Ergime bölgesine yakın olan kısım ana malzemeye yakın olan kısım arasında soğuma hızı farklı olduğundan ısıdan etkilenmiş bölge boyunca sertlik değişmektedir.

Tüm kaynak bölgesinde en yüksek sertlik ısıdan etkilenmiş bölgenin ergime çizgisine en yakın olduğu yerde görülür. Ana ray bölgesi ise hadde ürünü olan rayın tipik ince taneli yapısını göstermektedir. Bu bölge kaynak sırasında ısınmakta ancak dönüşüm sıcaklığına ulaşmadığı için orijinal tane boyutu fazla değişmemektedir.

Alüminotermite kaynağı sertlik sonuçlarına göre test edilen numunede kaynak ve ısıdan etkilenen bölgesinin toplam uzunluğu 110-150 mm'dir. Kaynaktaki sertlik değişimi kaynak performansını belirlemektedir. Bu yüzden ısıdan etkilenen bölgesinin dar olması arzu edilir. Rayın ısıdan etkilenen bölgesinde sertlik değeri daha yüksektir. Bu sonuçlar mikro yapı özellikleri ile uyum içerisindedir. Çünkü kaynak sonrası kaynak

metalinde soğuma hızının kontrol edilememesi sonucunda, karışık bir yapı elde edilmiş ve bunun sonucunda sertlik değerleri daha yüksek seviyeleri bulmuştur.

Yakma Alın kaynağı sertlik sonuçlarına göre test edilen numunede kaynak ve ısıdan etkilenen bölgesinin toplam uzunluğu 30-40 mm' dir. Isıdan etkilenmemiş ray çeliğine göre, ısıdan etkilenmiş bölgenin sınırındaki sertlikte azalma olduğu ısıdan etkilenmiş bölgenin, kontrollü soğutularak tane yapısına göre farklılık arz ettiği görülmektedir. Isıdan etkilenmiş bölgenin iri tane yapısının, erime sıcaklığına çok yakın sıcaklıklarda malzemenin ısıtılmasının bir sonucu olarak birleşme yüzeylerinin yanında olduğu, bitişiğindeki normalize olmuş bölgelerin ise ince taneli olduğu tespit edilmiştir. Kaynak dikişinde görülen sertlik düşüşünün, karbon düşüşüne dayanan ferrit oluşumu nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

Yakma alın kaynağının sertlik değişiminin daha az olması, kaynak bölgesi ile ısıdan etkilenen bölgenin alüminotermite kaynağı kaynak bölgesi ile ısıdan etkilenen bölgeden daha dar olmasından kaynaklanmaktadır. Sertlik değişiminin az olması ve kaynak bölgesindeki sertlik değerinin ana ray ortalama sertlik değerine yakın olması yakma alın kaynağını alüminotermite kaynağından üstün kılmaktadır. Çünkü uzun servis ömrü boyunca ray çalışma (yuvarlanma) yüzeyinin aşınmadan düzgün kalması istenmektedir [6].

Her iki yöntemle hazırlanan kaynak numunesinin kaynak bölgelerinin makro incelemeleri sonucunda kaynakta tam birleşme olduğu, ısıdan etkilenmiş bölgenin ergimiş bölge etrafında simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında alüminotermite kaynağın ısıdan etkilenmiş bölgesi ve ergimiş bölgesi yakma alın kaynağında ki bölgelerden oldukça geniş olduğu da gözlemlenmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarında kaynakların bozulma etkenleri arasında ısıdan etkilenmiş bölgenin geniş olması ve bunun neticesinde kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölge arasındaki sertlik farklılığı olarak gösterilmektedir. Yumuşaklık gösteren kaynaklar kritik ısıdan etkilenmiş bölgelerde kaynağın servis ömrünü, ray mantarının üzerinde ray teker temas yüzeyinde aşınma ya da kaynakta çukurlaşma gelişimine yol açtığını ve dolayısıyla yüksek darbe yükleri oluşmasına sebep olduğu

görüşüne ulaşmışlardır. Kaynak yüzeyinde artan çukurlaşma ve tren hızının arttırılması ile üretilen yüksek darbe yüklerinin kaynak bölgesinde farklı aşınmaya yol açmıştır.

Ayrıca kaynak bölgelerindeki aşınmanın, ondülasyon ve gürültü seviyelerini arttırabileceği düşünülmektedir.

Isıdan etkilenen bölgenin daraltılması yakma alın kaynağının kullanılması ile mümkün olacağı görülmektedir. Bu sayede ray teker yuvarlanma yüzeyinde sertlik ve aşınma farklarının minimize edileceği düşünülmektedir. Ayrıca ısıdan etkilenen bölgenin dar olması sertlik dağılım farkları azaltacağı ve kaynakta tokluğu arttıracığı düşünülmektedir. Kaynakta tokluğun artması ray kırılmalarını da azaltacaktır.

Kaynak, tanecik yapısıyla raydan farklıdır. Bundan dolayı; çarpma kuvvetlerini, sürtünme ve kayma gerilmelerini ray ile aynı seviyede karşılayamaz. Lichtberger çalışmasında alüminotermite kaynaklarda tespit edilen kusurların %72,31'i kaynağın mantar bölgesinde, %27,69'u ise gövde bölgesinde bulunduğunu, yakma alın kaynaklarında tespit edilen kusurların ise %60,56'sının gövde bölgesinde, %39,44'ü mantar bölgesinde bulunduğunu tespit etmiştir. Alüminotermite kaynaklarda görülen kusurların büyük çoğunluğunun mantar bölgesinde olması deray olasılığını arttıracığı düşünülmektedir [15].

Alüminotermite kaynağı mikro yapısı incelendiğinde yapının büyük çoğunluğunu perlit oluşturduğu halde yapı içinde ferrit ve  $\alpha$  fazının oluştuğu görülmektedir. Bu yapı dayanımı attırdığı gibi kırılma ihtimalini de arttıracığı düşünülmektedir. Böylece, aslında sertlik veya malzemenin çekme dayanımı arttırarak yorgunluk performansını azaltacaktır. Genellikle düşük dayanımlı çelik yüksek dayanım ve sert bir malzeme ile karşılaştırıldığında bir gerilim başlangıcı oluşacağı ve kaynağın yorgunluğa daha az duyarlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanan termite kaynağı sırasında ısının kaynak merkezinden raya doğru hızlı akması, eş eksenli olması gereken kaynak metalindeki tanelerinde merkeze doğru yönlendiği, iri ve uzun taneler şeklinde katılaşmasına yol açmıştır.

Aşınmaya karşı genel kural olarak sert yapılı metallerin avantajlı olduğu düşünülebilir. Ancak faz yapısının homojen olarak aynı sertlikte olması da arzu edilmiştir. Bu durumda en iyi performansın temperlenmiş martenzitik ve beynitik yapıya sahip çeliklerin olması beklenir. Ancak raylarda bu içyapıları kaynak sonrasında kontrollü olarak oluşturmak neredeyse imkânsız olduğu için genellikle bu uygulamalarda en iyi performansın sağlandığı ince perlitik yapıların oluşturulması hedeflenmektedir. Bu durum, aynı zamanda birleştirme yapılan bölgenin olabilecek elektrokimyasal etkilere karşı dayanımını da desteklemektedir. Diğer bir deyişle farklı mikro yapılara sahip birbirine komşu bölgelerde korozyon davranışı açısından da bir olumsuzluk yaşanması mümkündür. Bu nedenle kaynak sonrası tüm bölgelerde ince perlitik, homojen ince taneli tam bir perlitik yapılar oluşturulmalıdır [20].

Yakma alın kaynak imalat süresi bir kaynak için yaklaşık 7 dakika olurken alüminotermite kaynak imalat süresi ise 53 dakika olarak bulunmuştur. Her iki kaynak yönteminin imalat süreleri incelendiğinde özellikle işletme altında yapılan kaynaklarda yakma alın kaynağı kullanılması avantajlıdır. Çünkü bir gün içinde 9 adet alüminotermite kaynak yapılabildiği halde yaklaşık 68 adet yakma alın kaynağı yapılabilmektedir. Bu sayede hattın trafiğe kapalı kalma süresi kısalmış olacaktır.

Yapılan hesaplama neticesinde alüminotermite kaynak birim maliyeti 149,22 €/adet olurken, yakma alın kaynak birim maliyeti 71,05 €/adet olmaktadır. Alüminotermite kaynak birim maliyeti, yakma alın kaynak birim maliyetine göre 2-3 kat daha pahalıdır. Alüminotermite kaynak yönteminin malzeme maliyetinin fazla çıkması kaynak için araya dolgu malzemesi kullanılması zorunluluğundandır. İşçilik maliyetinin yüksek olması günlük kaynak sayısının yakma alın kaynağına göre çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yakma alın kaynağı ile bir günde 68 adet kaynak yapılabildiği halde alüminotermite kaynak yöntemi ile sadece 9 adet kaynak yapılmaktadır.

Maliyetlerin bu şekilde çıkması yakma alın kaynağının daha ekonomik olduğu tezini kanıtlamaktadır. Yakma alın kaynak makinesinin satın alma maliyetinin fazla olmasına karşın kapasite ve servis ömrünün uzun olması birim maliyetini düşürmektedir.



## BÖLÜM 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Yüksek hızlı demiryolu sistemlerinde istenilen yüksek hıza ulaşılabilme ve sistemi güvenli bir biçimde işletebilmek için; yol geometrisi, altyapı ve özellikle üstyapıya ait elemanlar gerekli olan teknolojik standartları sağlamalıdır.
- Demiryolu üstyapısı içinde en önemli eleman raydır. Raylar üstyapıda 50 yıl gibi uzun bir süre çalışmaktadır. Ray teknolojisi ile birlikte gelişen kaynak teknolojisi ile bugün atölyede veya sahada işletme altında kaynak yapılabilmektedir.
- Demiryolu rayları bugün genellikle sürekli kaynaklıdır. Kaynaklı birleştirmeler cebireli birleştirmelerden daha az bakım gerektirir. Ayrıca araç tekerlerine en az zarar verip artan araç hızlarına uygun ray birleştirmesini sağlar. Ancak, zamana bağlı yorgunluk, daha yüksek tren hızları eğilimi, yüksek aks yükü ve ağır trafik yoğunluğu nedeni ile kaynakların hasar görmesi bugün olduğu gibi gelecekte bile muhtemeldir. Mevcut kaynak üretim süreçleri, rayların yakma alın kaynak yöntemi ile kaynağını öne çıkarmaktadır.
- Aluminotermite kaynağı mikro yapısı incelendiğinde içyapısında belirlenen sınırın üzerinde serbest ferrit tanelerinin oluştuğu görülmektedir. Bu yapı mukavemeti attırdığı gibi kırılma ihtimalini de arttıracak düşünülmektedir. Bu fazın hedeflenen sınırın üzerinde olması durumunun da, lokal olarak yumuşak davranış gösteren bölgelerin var olması ve bu bölgelerin makro ölçekte yüksek sertlik göstermelerine karşın mikro ölçekte tekerlerden gelen yüksek kayma ve basma gerilmeleri altında kaynak metalinde yığılmaya yol açacağı düşünülmektedir.
- Alın kaynağı ile birleştirilen rayın mantar ve tabanındaki ısıdan etkilenmiş bölgede yapılan incelemede yapının perlitiktik olduğu gözlemlenmiştir. 100X büyütmeyle

gerçekleştirilen detaylı incelemelerde, ısıdan etkilenen bölgede martensit veya beynit fazına rastlanmadığı görülmüştür.

- Kaynaklı rayların kaynak metalinin yapısının ana ray metali ile olabildiğince benzer hatta aynı mikro yapıya sahip olması ve tercihen tam perlitik olması, elde edilecek performansın en üst düzeye ulaşması açısından gereklidir [22].
- Aluminotermite kaynağı makro yapısı incelendiğinde geniş bir ısıdan etkilenmiş bölge oluşumu görülmektedir. Bu geniş bölge birbirine komşu yüzeylerde ani sertlik farklarının oluşmasına yol açmaktadır. Yakma alın kaynağının kullanılması ile geniş olan bu bölgenin daraltılması mümkün olmuştur. Bu sayede ray teker yuvarlanma yüzeylerinde sertlik ve aşınma farkları minimize edilmiş ve kaynakta tokluk artmıştır. Kaynakta tokluğun artması ile ray kırılmalarında azalma beklenmelidir. Kaynağın tüm kesitlerinde ince taneli tam perlitik yapılar oluşturulması istenir. Bu yapıya en yakın görüntü yakma alın kaynağında elde edilmektedir.
- Kaynaklı ray numunesi için yapılan yorulma testi sonucunda numunede kritik hasara rastlanmamıştır. Yorulma testinin sonucu olarak kaynaklı numunenin yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu belirtilebilir.
- Kaynak hataları erken tespit edildiğinde işletmelere sadece maliyet açısından yük getirmektedir. Yüksek hızlı trenlerde ray kaynaklarının kontrolüne çok daha fazla önem verilmektedir. Eğer kaynaktaki bir hata tespit edilemez ve kırıkla sonuçlanırsa trenlerin deray etmesine, dolayısıyla maliyetin yanında can kaybına sebep olabilecektir. Bu nedenle işletmeler kaynak hatalarını minimize etmek için değişik periyotlarla hatta yapılmış olan kaynakların tahribatsız yöntemlerle muayene edilmesi gerekmektedir.
- Aluminotermite kaynağı ile yakma alın kaynağı maliyet yönünden karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda yakma alın kaynağının 71.05 €/adet ile aluminotermite kaynağına göre 2,1 kat daha düşük maliyetli olduğu görülmüştür. Yakma alın kaynak makinesinin satınalma maliyetinin fazla olmasına karşın

kapasite ve servis ömrünün uzun olması birim maliyetini düşürmektedir. Maliyetlerin bu şekilde çıkması yakma alın kaynağının daha ekonomik olduğu tezini kanıtlamaktadır.

- Alüminotermite ve yakma alın kaynak yöntemleri, kaynak yapım süreleri açısından da karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucu alüminotermite kaynak yöntemiyle bir günde 9 adet kaynak yapılabilirken, yakma alın kaynak yöntemiyle 68 adet kaynak yapılabilir. Bu durum da yakma alın kaynağının en önemli tercih sebeplerindedir.
- Alüminotermite kaynak erime sırasında çevreye verdiği gazlar, kaynak sonrası tuğla kalıp, kum ve cüruf atıkları nedeni ile çevreyi kirletmektedir. Ayrıca çalışanlar, pota patlaması ve erimiş metalin sıçrama tehlikesi nedeni ile sürekli tehlike altındadır. Yakma alın kaynağı elektrikle çalışması ve kaynak bölgesinin izolesi nedeni ile çevreye daha az zararlı gaz ve atık vermektedir [21].
- Yapılan teknik karşılaştırma sonucunda alüminotermite kaynağının düşük sermaye ihtiyacı, taşınabilir ve farklı kesitlerin kaynağında önde olduğu, bunun yanında yakma alın kaynağının alüminotermite kaynak yöntemine göre;
  - a) Daha yüksek eğme dayanımı gösterdiği (Uzun ömür),
  - b) Dar gözle görülür ısıdan etkilenmiş bölge oluşturduğu (Homojen ve perlitik bir içyapı)
  - c) Mikro yapısında çatlak, gözenek, boşluk ve cüruf kalıntısı bırakmadığı,
  - d) En kısa süreli kaynak yapım yöntemi olduğu,
  - e) Çevre dostu ve insan sağlığına en az zararlı kaynak yöntemi olduğu,
  - f) Yüksek eğilme mukavemeti, homojen sertlik dağılımı ve homojen kimyasal içyapı ve en yüksek kalitede kaynak üretebilmesi nedeniyle rayları kaynatmanın en etkili yöntemi olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak; yakma alın kaynağının teknik açıdan daha avantajlı olduğu görülmektedir. Yeni hatların imalatında veya mevcut hatların yenilenmesi çalışmalarında yakma alın kaynağı daha avantajlı olmakla birlikte, hatların bakım

çalışmalarında alüminotermite kaynak yönteminin kullanılması hem mali açıdan hemde kaynağın taşınabilir olması açısından daha avantajlı olduğu sonucuna varılabilir.

Bu çalışmanın yanında gelecekte kaynak bölgelerinde ray mantarının lazer yüzey kaplama yapılması ve servis ömrünün hesaplanması, gaz basınç kaynak yönteminin uygulanabilirliğinin bulunması ve diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması, kaynakta oluşan gerilmelerin kaynak ömrüne etkilerinin hesaplanması konularında tez veya doktora çalışmaları yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] K k e, Y., Demiryolu Taşıt ve Raylarının  retim ve Tamir-Bakımında Uygulanan Kaynak Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [2] EN 13674-1, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above, CEN, I.Baskı, Brüksel, 2003.
- [3] Kardemir A.ř., UIC 60 Raylara Uygulanan Uygunluk Test Raporu, Karab k, 2011.
- [4] Chen, Y., Lawrence, F., Barkan, C. ve Dantzig, J., “Weld Defect Formations in Rail Thermite Welds”, IMechE, 2005.
- [5] EN 14730-2, Railway Applications – Track – Aluminothermic Welding of Rails – Part 2: Qualification of aluminothermic welders, approval of contractors and acceptance of welds, CEN, I.Baskı, Br ksel, 2005.
- [6] Ilic, N., Jovanovi, M., Todorovic, M., Trtanj, M. ve Saponjic., “Microstructural and Mechanical Characterization of Postweld Heat-Treated Thermite Weld in Rails”, Materials Characterization, 1999.
- [7] Bay, K., Raylı Sistemlerde Kullanılan Alüminotermit Kaynağının Kalitesinin Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [8] Burrow, M., Bowness, D., ve Ghataora, G., “ A Comparison of Railway Track Foundation Design Methods”, Rail and Rapid Transit, Volume 221 (ISSN 0954-4097), 2011.
- [9] Giray, A., Demiryollarında Altyapının Teknik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [10] Yılmaz, E., Ankara-Konya Hızlı Tren Projesi Altyapı İşlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, S , Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
- [11] Onay, M., Demiryollarında Alüminotermit Kaynak İle Yakma Alın Kaynak Yöntemlerinin Teknik Ve Ekonomik Y nden Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

- [12] Öz Saraç, U., Raylı Taşıtlarda Teker Bandajı-Ray Sisteminde Dolgu Kaynağı Ve Sabo Parçalarının Aşınma Ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2005.
- [13] MEB, Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Raylı Sistemler Teknolojisi Alüminotermit Kaynağı kitabı, Ankara, 2008.
- [14] MEGEP, Raylı Sistemler Teknolojisi Elektrikli Direnç Alın Kaynağı, Ankara, 2008.
- [15] Lichtberger, B., Track Compendium Formation Permanent Way Maintenance Economics. Hamburg, Eurail Pres Tetzlaff Hestra, 624p, Germany, 2005.
- [16] Özkul, F., Demiryollarında Ray Birleştirme Yöntemlerinin İncelenmesi, Alüminotermit Ve Yakma Alın Kaynak Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [17] DIN EN 14587-2 Demiryolu Uygulamaları-Rayların Yakma Alın Kaynağı-Bölüm 2: Yeni R220, R260, R260Mn ve R350HT Derecedeki Rayların Sahada Mobil Kaynak Makinesiyle Kaynaklanması, Alman Normu, Berlin, Almanya, 2009.
- [18] Kozak, M., Demiryolunda Rayların Birleşim Noktaları ve Özelliklerinin Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:7, No:2, Türkiye, 2009
- [19] Özden, M., Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011.
- [20] Esveld, C., Modern Railway Track. Delft University Of Technology MRT Productions, 2, 654p, The Netherlands, 2001.
- [21] Chen, Y., Lawrence, F., Barkan, C. ve Dantzig, J., "Weld Defect Formations in Rail Thermite Welds", IMechE, 220:373-384, 2005.
- [22] Kaçer, İ., Ray Kaynağı Ve Uzun Kaynaklı Raylar Ders Notları. TCDD Eskişehir Eğitim Merkezi Müdürlüğü, 77s, Eskişehir, 2009.
- [23] Yılmaz, H., Ray Kusurlarının Örnek Hat Üzerinde Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi Ve Ray Gerilmelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [24] Apaydın, Y., Raylı Sistem Araçlarında Tahribatsız Muayene Uygulamaları, Kentiçi Raylı Sistemler Bülteni, 2007.

- [25] Sevim, R., İstanbul'da Kent İçi Raylı Sistemler Ve Üstyapı Hesapları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [26] Robnett, Q.L., Thompson, M.R., Hay, W.W., Flayabji, S.D., Peterson, H.C., Knutson, R.M., Baugher, R.W. Technical Data Bases Report, Ballast and Foundation Materials Research Program, FRA-OR&D-76-138, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, Amerika Birleşik Devletleri, 1995.
- [27] Arslan, C., Yüksek Hızlı Demiryollarının Dünya Üzerindeki Uygulamaları Ve Türkiye'ye Adaptasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [29] Tulumtaş, H., "Alüminotermit Ray Kaynağı Teknik Şartnamesi", TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, 2015.
- [30] Lennart, B., Jonas, W., Assessment of uncertainties in life prediction of fatigue crack initiation and propagation in welded rails, Chalmers University of Technology, Department of Shipping and Marine Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden, April 9, 2009.
- [31] Yazheng, C., Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Quenched Rails for Different Quenching Conditions Using the Temperature Directly From Rolling Heating, Faculty of Metal Fanning, Beijing Science and Technology University, Beijing, China, August 14, 2005.
- [32] Ekim, O., Yüksek Hızlı Demiryolları İçin Geometrik Özellikler Ve Altyapı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [33] Cevdet MERİÇ, Turgut ENGEZ, Termit Kaynağı İle Birleştirilen Bir Rayın Kaynak Bölgesindeki Sertlik Dağılımı Ve Metalurjik Özellikleri, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale, Türkiye, 1998.
- [34] Yazıcıoğlu, F., B., Uzun Kaynaklı Demiryolu Hatlarında Yanal Stabilite. Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2006.
- [35] MOTAMENI TABATABAEI, Ali, Fracture And Fatigue Crack Growth Characterization Of Conventional And Head Hardened Railway Rail Steels, Master of Science in Metallurgical and Materials Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, February 2014.
- [36] Tulumtaş, H., "Makinalı Ray Alın Kaynağı Teknik Şartnamesi", TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, 2014.

- [37] Kalaycıoğlu, O., Kardemir’de Ray Üretiminde İyileştirmeler, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2006.
- [38] Tulumtaş, H., “Sürekli Kaynak (SKR) Yapılması Teknik Şartnamesi”, TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, 2014.



## ÖZGEÇMİŞ

Cem Volkan YAVAŞCAN, 08.08.1982 tarihinde Eskişehir’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 1999 yılında Suadiye Lisesinden mezun oldu. Lisans eğitimine başladığı Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisansa başladı. 2013 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarında çalışmaya başladı. Halen aynı kurumda kontrol mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.