



**YÜKSEK HIZLI TREN RAYLARINDAKİ KAYNAK BÖLGESİ
GERİLMELERİNİN VE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL VE
TEORİK İNCELENMESİ**

Yasin SARIKAVAK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2017

Yasin SARIKAVAK tarafından hazırlanan “YÜKSEK HIZLI TREN RAYLARINDAKİ KAYNAK BÖLGESİ GERİLMELERİNİN VE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Başkan : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Prof. Dr. İbrahim USLAN

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Doç. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Endüstri Mühendisliği, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Tez Savunma Tarihi: 27/01/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.


Yasin SARIKAVAK
27/01/2017

YÜKSEK HIZLI TREN RAYLARINDAKİ KAYNAK BÖLGESİ GERİLMELERİNİN VE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Yasin SARIKAVAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2017

ÖZET

Yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan raylar, rayların farklı metodlarla kaynaklanarak birbirine bağlanmasıyla oluşur. Kaynaklı bağlantılarda oluşabilecek küçük bir hata kazalara veya telafisi güç olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu çalışmada, ağırlıklı olarak yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan ray kaynak metodu ile kaynaklanmış UIC 60 profil rayların, metalurjik ve mukavemet açısından etkileri incelenmiştir. Ray mantarında, gövdesinde ve tabanında; sertlik, mikroyapı ve makro dağlama parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak kaynak bölgesi ve geçiş bölgelerinin tespit edilmesi sağlanmıştır. Makro dağlama ve mikroyapı ölçümleri, sertlik deneyinde bulunan sonuçların doğrulamasında kullanılmıştır. Tespit edilen bölgeler için mekanik özellikler tekrardan değerlendirilmiştir. Sonuçlar sayısal çözümlemelerde veri olarak kullanılmış, statik ve dinamik analiz için mekanik çözümlemeler yapılmıştır. Elde edilen statik sonuçlar, deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 91421

Anahtar Kelimeler : Demiryolu, yüksek hızlı tren rayı, ray kaynağı, gerilme analizi, gerinim analizi.

Sayfa Adedi : 115

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF STRESS AND
FATIGUE BEHAVIOUR OF WELD REGION OF HIGH SPEED TRAIN RAILS

(Ph. D. Thesis)

Yasin SARIKAVAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2017

ABSTRACT

The rails used in high speed railway lines are constructed by attaching individual rails to each other, by using various welding techniques. A small defect in the welded joint may cause some tragic accidents and irrecoverable losses. In this study, the effects of welding process, which is commonly used in high speed railway lines, on metallurgical and strength considerations of welded UIC 60 rail profile were investigated. The investigated parameters were the hardness, microstructure and macro etching characteristics of the head, web and foot of the rail profile. The results were used to differentiate the transition zones, weld metal and main (parent) metal of the welded rails. Macro etching and microstructure measurements were also used to confirm the findings of hardness measurements and the mechanical properties were investigated for the specified zones. All experimental results were used as an input data for the numerical analysis. Mechanical solutions for static and dynamic analysis were conducted. The static results obtained were compared and validated with experimental work.

Science Code : 91421

Key Words : Railway, high speed train rail, rail welding, stress analysis, strain analysis

Page Number : 115

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Osman Selim TÜRKBAS

TEŞEKKÜR

Bu tezin konusunun seçiminden, son haline gelişine kadar pekçok hocamın katkısı olmuştur. Bu hocalarımdan özellikle, çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve değerli tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAS’a, tezimin konu seçiminden bitimine kadar her aşamasında beni yönlendiren, yakın desteği ve yardımını gördüğüm ve kendisinden çok şey öğrendiğim saygıdeğer hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN’a, çalışmalarım boyunca kıymetli bilgi, tecrübe ve yönlendirmelerini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. İbrahim USLAN’a en samimi duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma birçok kişinin yardımı olmadan başarılamazdı. Süreç içerisinde tecrübelerinden istifade ettiğim TCDD DATEM İşletme Müdürlüğü’nden değerli meslektaşlarım Güven KANDEMİR ve Atila KESKİN’e, deney numunelerinin temininde bana yardımcı olan Özgür ÜSTOĞLU’na, deneysel çalışmalarda yardımını gördüğüm Önder AKGÜNLÜ’ye, deney numunelerinin işlenmesinde bana yardımcı olan Veysel UZEL, Ercan TEKİN, Gökhan GÜR, Erkan ERGÜL ve Kemal KARAKOÇ’a ayrıca teşekkür ederim. TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii’nden meslektaşım Muharrem CAN’a destekleri için teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan babam Prof. Dr. Kazım SARIKAVAK, annem Satı SARIKAVAK ve ablam Beyza’ya şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜKSEK HIZLI TREN HATLARINDA KULLANILAN RAY KAYNAK METOTLARI	17
2.1. Aluminotermik Kaynak.....	17
2.2. Alın Kaynağı	18
2.3. Dolgu Kaynağı	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1. Ultrasonik Muayene	28
3.2. Sertlik Analizi.....	29
3.2.1. Numune hazırlama	29
3.2.2. Sertlik deneyi sonuçları	32
3.3. Makro Dağlama	36
3.4. Temel Mukavemet Değerlerinin Tespiti ve Ekstansometreli Çekme Deneyi	37
3.4.1. Numune hazırlama	37
3.4.2. Çekme deneyi sonuçları	40
3.5. Mikroyapı Analizi	45

Sayfa

4. SONLU ELEMENLAR METODU VE YORULMA ANALİZİ.....	49
4.1. Sonlu Elemanlar Analizi ve ANSYS Yazılımı.....	49
4.2. Modelleme.....	49
4.3. Sınır ve Çevresel Koşulların Tanımlanması.....	52
4.4. Statik Analiz, Yorulma Teorisi ve ANSYS Uygulaması	54
4.5. Kaynaklı Ray İçin Yorulma Analizi.....	60
5. GERİNİM ÖLÇERLER İLE KAYNAKLI RAY GERİLME ANALİZİ.	69
5.1. Deney Düzenekinin Hazırlanması.....	71
5.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları	81
5.2.1. Yüksek hızlı tren seti aks yükü altında ray kaynak profilinde oluşan gerilme değerleri.....	81
5.2.2. Yükseltilmiş aks yükleri altında ray kaynak profilinde oluşan gerilme değerleri.....	84
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	93
EKLER.....	99
EK-1. Çekme deney sonuçları	100
EK-2. Servohidrolik makinadan elde edilen grafikler	110
ÖZGEÇMİŞ	114

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. UIC 60 R260 ray çeliğinin kimyasal özellikleri	26
Çizelge 3.2. Alın kaynağı kuvvet, akım, yerdeğiştirme ve zaman değerleri	26
Çizelge 3.3. Ana metal ve geçiş bölgelerinin temel mukavemet değerleri.....	45
Çizelge 4.1. Yorulma analizi sonucu ray mantar ve tabanında elde edilen gerilme değerleri	64
Çizelge 6.1. Deneysel ve sayısal çözüm sonuçları	89



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deneysel numunelerin hazırlanmasında kullanılan Schlatter marka alın kaynağı makinası genel görünümü	19
Şekil 2.2. UIC 60 profil raya alın kaynağı işlemi	19
Şekil 2.3. Sıcak ve soğuk alın kaynağı yöntemlerinde zamana bağlı kaynak parametrelerinin değişimi	21
Şekil 2.4. Dolgu kaynağı sırasında rayda yapılacak ön ısıtma işlemi.....	22
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalar için hazırlanan alın kaynaklı ray numunelerine ait zamana bağlı kuvvet, akım ve yer değiştirme grafiği.....	24
Şekil 3.2. UIC 60 E1 ray profili ve teknik özellikleri.....	25
Şekil 3.3. Sıyırma sonrası kaynak dikiş kordonu yüksekliği	27
Şekil 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan ray numunelerinin sahada kesilmesi işlemi	27
Şekil 3.5. Ultrasonik muayenede kullanılan proplar, pozisyonları, tarama yönleri ve aranan kusurlar	29
Şekil 3.6. Sertlik testi için testere ile kesit alma	30
Şekil 3.7. Ray yüzeylerinin frezede işlenmesi	31
Şekil 3.8. Frezede işleme sonucu oluşan ray kesiti yüzeyi	31
Şekil 3.9. Ray numunesi üzerinde ölçüm alınan noktaların konumu (100 mm kaynak merkezi).....	32
Şekil 3.10. EN 14587-2'ye göre 1 nolu numuneden alınan sertlik değerleri.....	33
Şekil 3.11. 1 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri	33
Şekil 3.12. EN 14587-2'ye göre 2 nolu numuneden alınan sertlik değerleri.....	34
Şekil 3.13. 2 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri	34
Şekil 3.14. EN 14587-2'ye göre 3 nolu numuneden alınan sertlik değerleri.....	35
Şekil 3.15. 3 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri	35

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Taşlanmış ray kesiti yüzeyi	36
Şekil 3.17. Makro dağlama işlemi sonucu oluşan ray kesiti yüzeyi	37
Şekil 3.18 Çekme numunesi çıkartılan kaynaklı ray numunesi bölümleri ve numune kodları	38
Şekil 3.19. Çekme çubuğu numuneleri temel ölçüleri	39
Şekil 3.20. Hazırlanan çekme çubuğu numuneleri	39
Şekil 3.21. ZWICK Roell Z250 marka ve model, mekanik ekstansometreli çekme deney cihazı	40
Şekil 3.22. Kaynak merkez bölgesinden (1.Bölge) alınan K1 numunesine ait gerilme-gerinim diyagramı ve temel mukavemet değerleri	41
Şekil 3.23. Ana metalden hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme-gerinim diyagramı	42
Şekil 3.24. İkinci geçiş bölgesinden hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme-gerinim diyagramı	43
Şekil 3.25. Kaynak merkez bölgesinden (1.Bölge) hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme-gerinim diyagramı	44
Şekil 3.26. Kaynak çizgisi a) 50X b) 100X	46
Şekil 3.27. Yeniden kristalleşen bölge a) 50X b) 100X	46
Şekil 3.28. 1-2 Geçiş bölgesi yeniden kristalleşen bölge a) 50X b)100X	47
Şekil 3.29. 1-2 Geçiş bölgesi kalın taneli yapı a)50x b)100X	47
Şekil 3.30. 1-2 Geçiş bölgesi sınır bölgesi a)50X b)100X	48
Şekil 3.31. Ana yapı a) 50X b) 100X.....	48
Şekil 4.1. UIC 60 ray profili ve temel mühendislik değerleri.....	50
Şekil 4.2. ANSYS Design Modeller modülünde açılan kaynaklı ray modeli.....	51
Şekil 4.3. ANSYS Design Modeller modülünde açılan kaynaklı ray dört nokta yorulma test düzeneği.....	52
Şekil 4.4. Engineering Data modülünde tanımlanan malzeme değerleri.....	53
Şekil 4.5. Dört üçgen yüzlü şekilde (tetrahedron) ağlara bölünmüş model.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Yazılıma tanımlanan yük değerleri.....	54
Şekil 4.7. YHT setine ait tekerleğin kaynaklı raya statik yüklemesi sonucu oluşan toplam deformasyon.....	55
Şekil 4.8. Belirtilen sınır koşulları altında yapılan statik analiz sonucu elde edilen güvenlik faktörü değeri	57
Şekil 4.9. Toplam 70 kN statik yük altında oluşan gerilme değerleri.....	59
Şekil 4.10. Yorulma analizi sonucu elde edilen güvenlik faktörü	63
Şekil 4.11. Yorulma analizi sonucu ray mantarında ve ray gövdesinde elde edilen gerilme değerleri	65
Şekil 4.12. Yorulma analizi sonucu ray tabanında elde edilen gerilme değerleri.....	66
Şekil 4.13. Kaynaklı ray için yüke göre değişen çevrim sayısı diyagramı	67
Şekil 5.1. Çeyrek köprü gerinim ölçer şematik gösterimi	70
Şekil 5.2. Ray profili üzerinde, kaynak bölgesinde gerinim ölçerlerin yapıştirıldığı konumlar ve gerinim ölçerlerin kodları	72
Şekil 5.3. Kaynak üzerine gövde ve tabanda yerleştirilen gerinim ölçerler ve epoksi kaplama.....	73
Şekil 5.4. Bağlantı yapılacak boş konnektör.....	74
Şekil 5.5. İki adet gerinim ölçerin, konnektöre çeyrek köprü bağlantı yapılmış durumu.....	75
Şekil 5.6. Dört nokta eğme düzeneğine, yatay ve düşey eksen merkezinde hizalanan, alın kaynaklı UIC 60 profil ray numunesi	76
Şekil 5.7. Gerinim ölçerlerin yer aldığı dört nokta eğme test düzeneği	77
Şekil 5.8. Deney düzeneği genel görüntüsü.....	78
Şekil 5.9. IMC Studio ekran görüntüsü, mantarda yer alan gerinim ölçer için, çalışma ölçeği ve çeyrek köprü değerlerinin tanımlanması	79
Şekil 5.10. IMC Studio ekran görüntüsü, mantarda yer alan gerinim ölçer için, gerilme, elastisite modülü ve çeyrek köprü değerlerinin tanımlanması	80
Şekil 5.11. Ray üzerinde dört noktadan alınan zamana bağlı gerilme değerleri.....	81
Şekil 5.12. Tekerlek yüküne bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasında oluşan gerilme değerleri	82

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Sonlu elemanlar analizi sonucu alın kaynaklı rayın kaynak bölgesinde, mantar gövde ve tabanda hesaplanan gerilme değerleri	83
Şekil 5.14. Ray üzerinde dört noktadan alınan artırılmış yükler altında zamana bağlı ölçülen gerilme değerleri	84
Şekil 5.15. Artırılmış tekerlek yüklerine bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasından ölçülen gerilme değerleri	85



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
kA	Kiloamper
N	Newton
kN	Kilonewton
kg	Kilogram
m	Metre
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
K	Kelvin
°C	Santigrat
Hz	Hertz
MHz	Megahertz
m²	Metrekare
HB	Brinel sertlik
HV	Vickers sertlik
Pa	Paskal
MPa	Megapaskal
GPa	Gigapaskal
σ	Gerilme
ε	Gerinim
Ω	Ohm
dL	Uzunluktaki değişim
L	İlk uzunluk
dR	Dirençteki değişim
R	Direnç
k	Ölçüm faktörü
Ua	Ölçülen voltaj

Simgeler**Açıklamalar**

U_e	İkaz voltajı
m_E	Elastik modül
R_m	Çekme mukavemeti
R_{p0.2}	%0.2 kalıcı uzama miktarındaki akma değeri
F_m	Malzemenin dayandığı en yüksek kuvvet
A_{gt(corr)}	Çekme uzaması (toplam uzama)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AL	Ray ana metal bölgesi (sol)
AR	Ray ana metal bölgesi (sağ)
AWS	Amerikan Kaynak Derneği
DB	Alman Demiryolları
EN	Avrupa Standardı
ERRI	Avrupa Demiryolu Araştırma Enstitüsü
IIW	Uluslararası Kaynak Enstitüsü
IL	İkinci bölge (sol)
IR	İkinci Bölge (sağ)
ISO	Uluslararası Standard Kurumu
K	Birinci bölge (kaynak merkez bölgesi)
RTRI	Japon Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü
SG	Gerinim ölçer pulu
SKR	Sürekli kaynaklı ray
SNCF	Fransız Demiryolları
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TS	Türk Standardı
TTCI	Amerikan Taşımacılık Teknoloji Merkezi
UIC	Uluslararası Demiryolu Birliği
YHT	Yüksek hızlı tren

1. GİRİŞ

Ulaştırma sektöründe demiryolu, sanayi devrimi sırasında ortaya çıkmış kısa sürede önemi anlaşılarak tüm dünyaya yayılmıştır. Demiryolu geçtiği bölgelerde ve ülkelerde ticaretin, sanayinin ve tarımın gelişmesinde ve fiziki yapıların oluşmasında belirleyici olmuştur.

Cumhuriyet dönemi öncesi, Osmanlı İmparatorluğu'nda demiryolları İngiltere, Almanya ve Fransa'ya verilen imtiyazlı sözleşmeler karşılığında yaptırılmıştır. Anadolu topraklarındaki ilk demiryolu 23 Eylül 1856 tarihinde bir İngiliz şirketine verilen imtiyazla İzmir-Aydın arasında inşaa edilmiştir. 130 km uzunluğundaki bu hattın 1866 yılında inşaatı tamamlanmıştır [1].

Dünya savaşı sonrasında, Türkiye Cumhuriyeti milli sınırları içinde Osmanlı İmparatorluğu'ndan kalan demiryolu hat uzunluğu 4136 km'dir. Bu hat 24.05.1924 tarihinde çıkarılan 506 Sayılı Kanun ile ülke kaynaklarını harekete geçirmek amacıyla millileştirilmiştir.

Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluşundan sonra 1923-1950 yılları arasında 3764 km yol inşa edilmiş ve aynı zamanda demiryolu ile ilgili mevcut fabrikalar geliştirilmiş ve yeni fabrikalar kurulmuştur. 1950 yılından itibaren Marshall yardımıyla demiryolları adeta yok sayılarak karayolu yapımına başlanmış, bunun sonucu olarak demiryolunun toplam ulaşım sistemindeki payı son 50 yılda %60 azalmıştır [1, 2].

Küreselleşme ile birlikte değişen çevresel şartlar sürdürülebilir ulaşırma politikalarının oluşturulması bağlamında demiryollarının önemi artmıştır. 2000'li yıllardan itibaren ülkemizin ulaşırma politikası değişmiş ve demiryolları yatırımları artmıştır ve 2009 yılında hizmete giren Yüksek Hızlı Tren (YHT) işletmeciliği ile Türkiye hızlı tren teknolojisini kullanan ülkeler arasına girmiştir. 1967 yılında ilk kez Japonya'da kullanılmaya başlanan bu teknoloji dünya çapında hızla yayılmış ve bugün dünyada 17 ülkede hızlı tren işletmeciliği yapılmakta olup 29 792 km hızlı demiryolu hattı bulunmaktadır. Ülkemizde 2015 yılı sonu itibariyle 1 213 km yüksek hızlı tren hattı olmak üzere toplam 12 532 km'lik demiryolu hattı bulunmaktadır [3].

Yükü taşıyan ana unsur olarak ray malzemesi demiryollarının en temel ve önemli bileşenlerindendir. Ray malzemesinin dayanımını artırmak için çeşitli kaplama ve bağlantı metotları denenmiş ve halen denenmeye devam etmektedir [4-6]. Bilindiği üzere ülkemizde yüksek hızlı tren hatlarında sürekli kaynaklı raylar (SKR) serilmiştir. Sürekli kaynaklı raylar geleneksel cebire bağlantılı sistemlerle kıyaslandığında, başarıya ulaşmış bir gelişme olarak değerlendirilebilir, ancak kaynaklı rayların yuvarlanma yüzeyinde sertlik, düzensizlik ve mukavemet gibi parametrelerdeki farklılıktan ötürü rayda bir süreksizlik olarak tanımlanabilir [6]. Cebireli bağlantılar eski dönemlerde yaygın olarak kullanılan bir metoddur, ancak ray bitim noktalarında, cebire düzleminde ve cıvatalarında rapor edilen kırıklar ve bakım maliyetleri bu yöntemin uygulamasının azalmasına neden olmuştur [7]. Sürekli kaynaklı raylar yüksek dinamik performans, düşük bakım maliyetleri ve daha düşük çevresel kirliliğe neden olması gibi özelliklere sahip olduğu için tercih edilmektedir [8]. Yüksek hızlı tren hatlarında temasa bağlı yorulma hasarları sıklıkla görülmektedir. Mantar kenarlarında görülen bu hasarlar, ultrasonik muayene ile farkedilemeyebilmekte ve rayda kırılmalara neden olmaktadır. Yüksek hızlı işletmecilikte, dinamik yüklerin artması ve yorulma çatlaklarının oluşumundaki fiziksel teori oldukça karmaşık olduğundan, oluşturulan mevcut modeller hala tam anlamıyla yeterli değildir. Daha fazla teorik ve deneysel çalışmanın yapılması problemin çözümünde önemlidir [9].

Fransa demiryollarında (SNCF), demiryolu genelinde bir yılda meydana gelen hasarın %35,3'ü kaynaklı bağlantılardan, %18,6'sı ise yorulma hasarından; İsveç demiryollarında (Bankverket) meydana gelen hasarın %19,4'ü kaynaklı bağlantılardan ve Kuzey Amerika Demiryollarında (HH2) meydana gelen hasarın %41,2'si kaynaklı bağlantılardan meydana gelmiştir [9]. Ülkemiz 2023 yılı ulaştırma vizyonu çerçevesinde pek çok yeni hızlı tren hattının sınırlarımız içerisinde işletmeye alınması planlanmaktadır [2]. Demiryolu hattı üzerinde kaynaklı bölgeler kusur oluşması ve ilerlemesi açısından en riskli bölgelerdir. Dolayısıyla kaynak noktalarındaki mekanik davranışların dikkatli incelenmesi güvenli ve sürdürülebilir işletmecilik açısından önem arz etmektedir.

Demiryolu sistemlerinin kalbi olan ray, yüksek işletme yüklerine ve zorlu çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Raydaki potansiyel bir kırılma hadisesi, demiryolu araçlarında raydan çıkmaya ve telafisi güç olumsuzluklara neden olmaktadır [10]. Demiryollarında artan hızlar ve aks yükleri, raya gelen dinamik yüklerin artmasına ve potansiyel ray kaynak hatalarının oluşmasını hızlandırmaktadır. Türkiye dahil pek çok

ülkede ray malzemesi üzerinde oluşan hataların arttığı görülmüştür [6]. Yüksek hız, ağır yük ve karma demiryolu hatlarında, ağırlıklı olarak 1987'den beri rayın yorulması konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Avrupa Ray Araştırma Merkezi; demiryolu otoriteleri, ray üreticileri ve üniversitelerle ortak birçok araştırma projesi yürüterek teorik, deneysel, genel araştırma değerlendirmesi şeklinde çeşitli projeler yürütmüş ve bazı sonuçlara ulaşmıştır. Bu konuda çalışmalar halen devam etmektedir [11]. Literatürde ray ve kaynaklı rayın gerilme ve yorulma davranışları konusunda, sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Son yıllarda yüksek hızlı tren işletmeciliğinin artmasına paralel olarak, hatlarda serilen yüksek hızlı tren raylarının ve ray bağlantılarının mekanik davranışları konusunda ise ülkemizde yapılmış çalışmalar yok denilecek kadar azdır. Bu çalışmada kaynaklı ray bağlantısı kompozit malzeme gibi düşünülmüştür. Bağlantı üzerinde farklı bölgeler tespit edilmiş ve bu farklı bölgelerin özellikleri ayrı ayrı tespit edilmiştir. Ulusal ve uluslararası literatürde buna benzer herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada kullanılan ve benzer konularda literatürde yapılmış çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Salehi ve diğerleri aluminotermik kaynaklı rayların yüksek tonajlı yük altında çok eksenli yorulma davranışlarını incelemiştir. Tekerlek ray kontağı, eğilme, kalıntı ve ısı gerilmeler ve kaynak işlemi esnasında oluşabilecek eksenel bozukluklar yorulma çatlaklarının ve oluşan hasarın konumunda etkili parametrelerdir. Yorulma yaklaşımı, sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapan ANSYS bilgisayar yazılımı vasıtasıyla çözülmüştür. Metot işletme koşulları, ray destek koşulları ve ray sıcaklığı gibi parametreler dikkate alınarak uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda sonlu elemanlar simülasyonları gerilme ölçümleriyle doğrulanmıştır [12].

Zerbst, Madler ve Hintze'nin demiryolu uygulamalarında kırılma mekaniği başlıklı çalışmaları; hasar toleransı, güvenli ömür ve hasar ömrü gibi kırılma kavramlarının demiryolu uygulamaları üzerine uygulamasını genel giriş niteliğinde incelemiştir. Bunların yanında tekerlek, aks ve ray gibi önemli demiryolu bileşenlerinin güvenli işletilmesi ve hasar toleransı konuları incelenmiştir [13].

Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü (RTRI), Japonya'da demiryollarında kullanılan kaynak metotlarının, son 20 yıl açısından incelemesini yapmıştır. Hasarlanan kaynak miktarlarının en çok 53 hasarla aluminotermik kaynağında yaşandığı, sırasıyla 35 hasarla kapalı ark kaynağı, 21 hasarla gaz basınç kaynağı ve 12 hasarla alın kaynağında görüldüğü

belirtilmiştir. Hasarlanan kaynak şekillerinin %55’le en çok tabanda enine çatlak, %18’le mantarda enine çatlak, %16 ile gövde de enine çatlak ve %11’le boyuna çatlak olduğu gözlenmiştir. Diğer metotlarla kıyaslandığında alın kaynağında daha az hasar olması bu metodun yaygınlaşması açısından önemli bir istatistiktir [14].

Josefson ve Ringsberg; kaynaklı raylarda ömür tahmininde yorulma çatlaklarının başlaması ve ilerlemesi konulu çalışmalarında, kaynaklı raylarda yorulma çatlaklarının mantar ve gövdede oluşma riskini işletme yüklerini ve kalıntı gerilmeleri dikkate alarak lineer olmayan sonlu elemanlar analizi yöntemiyle incelemiştir. Çalışma sonucunda ray mantarı ve gövdesinde çatlak oluşması ve ilerlemesi riski, kalıntı gerilmelerine ve düzenli olmayan işletme yüklerine bağlı olduğu anlaşılmıştır [15].

Malzeme bilimindeki gelişmeler, periyodik tahribatsız muayene yöntemleri, ray taşıma ve yapılan diğer ölçümler güvenli demiryolu işletmeciliği için önemli olsa da, yorulma çatlaklarının ilerlemesi ve malzemenin hasarlanması bugün hala araştırılan önemli bir konudur. Zerbst ve diğerleri çalışmalarında raylarda çatlak ilerlemesi ve ray kırılması konusunda önemli soruları incelemişlerdir. Literatür özeti şeklinde de olan bu çalışma, tekerlek ve raylardaki kontak yüklerini, gerilmeleri, ray hasarlarındaki çatlak çeşitlerini ve potansiyel hasar senaryolarını incelemiştir. Sonuç olarak çatlak oluşumundan kırılma hadisesine kadar olan süreç tartışılmıştır [10].

Christodoulou ve diğerleri demiryolu uygulamalarında kullanılan perlitik 900A seviyesi çeliklerin yorulma ve kırılma davranışlarını incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda malzeme kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme direnci özellikleri bakımından diğer perlitik ray çeliklerine göre daha düşük mukavemet göstermiş ve gevrek kırılma karakteristikleri ortaya çıkmıştır. Mekanik performans açısından malzemenin çatlak oluşumuna karşı dirençli olduğu görülmüştür. Ancak yapısal bütünlüğün korunması açısından bakım faaliyetlerinin çatlağın ilerlemesine imkan vermeden, oluşum aşamasında tespit edilmesi gerektiği anlaşılmıştır [16].

Garnham ve Davis hasarlı rayların yorulma başlangıcına etkisi konusunda yaptıkları çalışmada, kesme ve çevrimsel yük altında rayın mikro yapısında meydana gelen değişimleri incelemiştir [17].

Skyttebol ve diğerleri kalıntı gerilme altındaki kaynaklı raylarda yorulma çatlağı ilerlemesini incelemiştir. Bu çalışmada kalıntı gerilmeleri hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kaynaklı düz bir ray için kalıntı gerilme dağılımı simule edilmiştir ve aks yükü, çatlak konumu, çatlak boyutu ve ray sıcaklığı gibi parametreler değerlendirmeye alınmıştır [18].

Godefroid ve diğerleri alın kaynaklı rayda yorulma sonucu oluşan hasarı incelemişlerdir. Yorulma yüküne maruz kalan yapısal bileşenlerde işletme güvenliğini sağlamak için, kaynak parametrelerinde ve kaynaklı bağlantının yüzey kalitesinde titiz bir kalite kontrol işlemi sağlanmalıdır. Bu çalışmada ray üzerinde çatlağın kaynak bölgesinde başladığı ve yük altında kaynaklı bölümden kırılarak hasara neden olduğu anlaşılmıştır. Çatlak kaynağın yanında başlayıp, gevrek modda yayılmıştır ve bu malzemede erken bir kırılmaya neden olmuştur. Yapılan detaylı analizde erken oluşan çatlakların kaynak metalinde düzgün yüzey işleme yapılmamasından kaynaklandığı ve bunun istenilmeyen gerilmelere sebep olduğu anlaşılmıştır. Demiryolu hatlarındaki kaza sayısını düşürmek amacıyla, kaynaklı bağlantılarda yüzey işleme prosedüründe değişiklik yapılması konusunda tavsiyede bulunulmuştur [19].

Desimone ve Beretta alın kaynaklı ray birleşmelerinde oluşan boyuna çatlakların yorulma koşullarında ilerlemesini incelemiştir. Tren tekerleğinin raydan geçişi esnasında oluşan gerçek gerilme yoğunluk faktörleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapılan simülasyonlar sonucu bulunmuştur. Simülasyonlar sonucu karışık modda yorulma çatlak ilerlemesi olduğu gözlenmiştir. Daha sonra servis koşullarını kapsayan karışık modda yorulma deney düzeneği tasarlanmıştır. Çatlak büyümesi ve ilerlemesinde kesme kuvvetlerinin önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın sonunda kesme modundaki çatlak ilerlemesi koşulları tartışılmıştır [20].

Ringsberg ve Lindback çalışmalarında rayların yuvarlanma yüzeyi yorulma analizini yapmışlardır. Çalışma ray imalat aşamasının ve tekrar eden ray tekerlek kontak yüklerinin sayısal simülasyonlarını da içermektedir. Kalıntı gerilmelerinin servis ömrüne ve çatlak oluşumuna etkileri iki boyutlu ısı mekanik sonlu elemanlar analiziyle ray soğumasını ve ray doğrultma işlerini de kapsayacak şekilde modellenmiştir. Modellemede İsveçteki 30 ton aks yüküne göre işletilen yük hattı durumu dikkate alınmıştır. Ray sonlu elemanlar modelinde üç durum dikkate alınmıştır: a) ön gerilmesiz ray, b) yeni imal edilmiş rayda

ölçülmüş kalıntı gerilme alanı, c) ray doğrultma ve soğutma analizleri sonucu hesaplanmış kalıntı gerilme alanı. Rayda yeni imalat işlemi sonucu oluşan, boyuna yöndeki çekme kalıntı gerilmeleri deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Hesaplamalar ve ölçümler arasında küçük farklar olduğu gözlenmiştir. Çalışma sonucunda çok yüksek aks yükü altında işletilen hatlarda tekerlek ray kontak yükleri ve ray imalatı esnasında oluşan gerilmeler yorulma ömrünü düşürmektedir [21].

Yüksek hız trafiğinin başlaması ve yaygınlaşmasıyla, tekerlek ray ara yüzünde oluşan gerilme değerleri belirgin şekilde artmıştır. Aşınma ve özellikle tekerlek ray kontağına bağlı oluşan yorulma hasarları maliyet açısından önemli faktörler haline gelmiştir. Teorik kabuller mantarı sertleştirilmiş rayların, ray tekerlek kontak yorulma hasarlarına karşı konvansiyonel raylara göre daha yüksek hasar direncine sahip olduğunu belirtmektedir. Bu teorik değerlendirmeyi araştırmak ve doğrulamak için Voestalpine Schienen GmbH ve Alman Demiryolları (DB AG) ortak bir projeyle ray test programı geliştirmiştir. Alman Demiryolları'nın çeşitli yüksek hızlı tren hatlarında 800 (220), 900A (260) ve HST (340HT) özelliğindeki rayların hasar davranışları araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Farklı seviyedeki rayların doğru bakım stratejilerini bulabilmek için raylar girdap akımları yöntemi ile muayene edilmiş ve taşıma testine tabi tutulmuştur. 3 yıllık değerlendirme sonucunda üç farklı ray çeşidinin hasar davranışları belirgin şekilde farklılık göstermiştir. Bu çalışmada mantarı sertleştirilmiş HSH raylarının ray hasar davranışının daha iyi olduğu anlaşılmış ve rayların işletme maliyetini düşürecek optimize edilmiş bakım stratejisi geliştirilmiştir [22].

Johnson ve diğerleri R260 ve R370CrHT perlitik ray çeliklerinin yorulma çatlağı büyümesini araştırmıştır. Yuvarlanma yönüne göre belirlenmiş iki düzlemde hazırlanan deney numuneleri kullanılarak yorulma sınır değerleri ve ani kırılma şartları incelenmiştir. Kırılma yüzeyleri lameller arası boşlukları ve mekanik özellikleri tayin etmek için mikro yapısal analize tabi tutulmuştur [23].

Mandal, izole ray bağlantılarının düşük çevrim yorulma hasarı konulu çalışmasında demiryolu koridorlarındaki sinyal sistemlerinin kritik bir parçası olan treni konumlandırmak için kullanılan ve rayda bir süreksizliğe neden olan izole rayların yorulmasını çalışmıştır. İzole ray contası geometrik ve mekanik gereklilikleri sağlamak için iki rayın bitim noktaları arasına yerleştirilen ve özellikle ağır yük taşımacılığının

olduğu hatlarda ray mantar metalinin plastik deformasyonu ve erken hasarlanmalara neden olan önemli bir demiryolu ray bileşenidir. Ray mantar malzemesindeki hasarlanmaları simüle etmek için üç boyutlu sonlu elemanlar analiz metodu uygulanmış ve ağır yük hattı için 182 kN dinamik tekerlek yükü tanımlanmıştır. 12 m uzunluğundaki global izole ray conta modeli ve alt elemanları kullanılmış, gerilme analizi yapılmıştır. Ray mantar malzemesinin, plastik deformasyon sonucu ray mantar hizasından 8 mm aşağıya kadar uzadığı ve kritik ray yüzey altı kusurları için gerilme değerlerinin yüzeyin 2-4 mm altında toplandığı görülmüştür. Düşük çevrimli yorulma koşulları altında ray mantarı malzemesinin hasarlandığı yapılan teorik ve pratik çalışmalar sonucu anlaşılmıştır [24].

Rhaya ve diğerleri çalışmalarında demiryolu raylarının davranışlarını tahmin etmek için olasılıksal bir yaklaşım yapmışlardır. Demiryolu ağında ray hasarlanmaları yüksek bakım maliyetlerine neden olmakta, ray malzemesinin geometrik ve mekanik parametrelerindeki bilgi eksiklikleri ise bakım yönetiminin optimize edilmesini güçleştirmektedir. Bu çalışma ray davranışlarını analiz etmek için yeni bir metodoloji önermektedir. Bu metodoloji önemli miktarda veriyi ve geometrik ve mekanik parametreleri göz önünde tutarak bunların istatistiksel analizini içermektedir. Numerik sonuçlar bu metodolojinin olabilirliğini göstermektedir. Bu çalışma, gelecekte demiryolu yönetimlerinin, bakım faaliyetlerini optimize etmeleri için önemli bilgiler vermektedir [25].

Tehrani ve Saket demiryollarında ömür tahmini ve yorulma çatlağı oluşumu isimli çalışmalarında, ANSYS v.11 yazılımı kullanarak, tekerlek ray kontağında yorulmayı simüle eden, elasto plastik 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Hesaplamalarda doğru ve verimli sonuçlar elde edebilmek için kontak noktalarındaki ağ hassasiyeti yüksek tutulmuştur. Sayısal olarak demiryolu raylarında gerilme analizi ve yorulma incelenmiştir. Bir çevrim yüklemedeki gerilme değerleri kullanılarak, dikey yüklemenin, malzeme sertliğinin ve tekerlek ray kontağının yorulma üzerine etkileri incelenmiştir [26].

Beretta ve diğerleri alın kaynaklı raylarda mode II yorulma hasarları başlıklı çalışmalarında kaynaklı ray gövdesinde yorulma hasarı sonucu oluşan kırıkları incelemişlerdir. Çatlak ilk aşamalarında ray yüzeyine paralel ilerler, bir süre sonra yüzeye eğimli bir şekilde ilerlemeye devam eder. Ray gövdesinde çatlak ilerlemesinin analizini amaçlayan bu çalışma gelecekte ray muayenesinin nasıl olması gerektiği hakkında öneriler içermektedir. Öncelikle tipik bir mod II hasarı üzerine kırılma analizi yapılmıştır ve bu

analiz mod I çatlağıyla bir noktadan sonra karıştığını göstermiştir. Trendeki yükleri ve tren geçişinin analiz edildiği sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Analiz, çatlakların, mod II gerilme faktörünün en yüksek olduğu noktaya doğru ilerleme konusunda meyilli olduğunu ve bu akışın mod I çatlak oluşumunu da maksimize ettiğini göstermiştir [27].

Wang ve Li yüksek hızlı tren araçlarında raydan çıkma simülasyonu, raydan çıkma mekanizmasının incelenmesi başlıklı çalışmalarında MATLAB yazılımında, tekerlek ray kontak noktası ve kontak kuvvetleri kullanılarak dinamik raydan çıkma modeli geliştirilmiştir. Çalışmada kontak halindeki malzemelerde dinamik zayıflamanın etkisiyle tekerleğin tırmanma hadisesi meydana gelmektedir. Dinamik zayıflama etkisine; hız, ray durumu ve tekerlek yük boşaltma oranı gibi bazı temel faktörlerin etkisi incelenmiştir. Bazı dinamik parametrelerin etkisi LS-DYNA yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Model yardımıyla aracın stabil hızı ve kritik etki hızı gibi değerlere ulaşılabilir. Sönümleme parametreleri bu kritik hızları direk etkilemektedir. Raydan çıkma olayını çevrimiçi bir testle yapmak tehlikeli ve zordur ancak, bu çalışmada geliştirilen modelin, raydan çıkma hadisesini anlamaya, bunu etkileyen önemli faktörleri bulmaya ve dinamik raydan çıkma mekanizmasını araştırmak için önemli bir yardımcı olduğu görülmüştür [28].

Demiryollarında raylar farklı şekillerde aşınmaya maruz kalmakta ve bu durum rayların işletme şartları altında etkin bir şekilde kullanım sürelerini düşürmektedir. Yorulma hasarlarının tahmin edilmesi ve ray ömrünün artırılması başlıklı bu araştırmada, ray yer değiştirmesini etkileyen belirlenmiş işletme şartları altında farklı parametrelerin yorulma hasarlarına etkisini incelemiştir. Polonya'da yer alan çeşitli demiryolu hatları analiz edilmiştir. Yorulma hasarları kullanılarak, türetilen bir fonksiyon yardımıyla ekstrapolasyon yapılarak, rayın dayanıklılığı işletme şartları altında tahmin edilmiştir. Ray taşıma için gerekli limit değerleri belirlenmiş ve ana hatlarda taşıma için ilk taslak plan oluşturulmuştur [29].

Raylarda ısıtma işlem görmüş aluminotermik kaynağı, kaynak sonrası mikro yapısal ve mekanik karakterizasyonu başlıklı çalışmada termik kaynaklı ray çeliklerinde ısıtma işleminden önce ve sonra sertlik karakteristikleri, mekanik özellikler ve kırılma mekanizmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Isıtma işlem görmüş kaynaklı bağlantılarda, mekanik özelliklerin (çekme dayanımı ve uzama) iyileştiği ve kırılma mekanizmasının gevrek kırılmadan süneğe doğru değiştiği görülmüştür. İyileşen dayanım ve uzama değerlerinin,

daha iyi ferrit-perlit mikro yapısı ve kırılma mekanizmasındaki değişimden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Kaynaklı bağlantıdaki kırılma yüzeyinde, mikro porozite ve çeşitli kalıntılar olduğu gözlenmiştir. Kalıntıların kimyasal kompozisyonunun incelenmesi sonucu, ergiyik termik karışımın, basamak ve besleyicide manyezit astarla reaksiyona girdiği görülmüştür [30].

Bileşendeki kalıntı gerilmeler dış mekanik bir gerilme olmadan meydana gelen gerilmelerdir. Homojen olmayan deformasyonlar ve bunları oluşturan temel fiziksel mekanizmalar kalıntı gerilimine neden olmaktadır. Farklı kesit alanlarda ve malzemelerde farklı ısı dağılım katsayılarına bağlı olarak, ısı kalıntı gerilmeleri oluşmaktadır. Yüzey şekillendirme esnasında uygulanan mekanik gerilmeler de kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Mikro yapıda zamana bağlı ve homojen olmayan faz değişimleri kalıntı gerilmelerini etkileyen bir diğer faktördür. Kalıntı gerilme değerleri üretimde ve işletmede yer alan kalite yönetim sistemlerinde, ömür yönetimi açısından önemli bir parametredir [31]. Ray malzemesi mantar, gövde ve tabanda farkı kesit alanlara sahiptir ve kaynak işlemleri sonucunda malzemede kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir.

Steenbergen kısa ray düzensizliklerinde dinamik teker-ray kontak kuvvetlerinin belirlenmesi ve ölçülmüş ray kaynaklarına uygulaması başlıklı çalışmada ray yüzeyindeki düzensizlikler ve tekerlek-ray etkileşimini kapsayan analitik bir model geliştirmiştir. Model yardımıyla raylardaki kısa düzensizliklere bağlı tekerlek-ray etkileşimindeki temel özellikler tanımlanmıştır. Model belirli sayıdaki kaynaklı raylarda da tekerlek ray kuvvetlerini hesaplamada kullanılmıştır. Ray geometrisi, tren hızı ve dinamik kontak yük seviyeleri arasındaki ilişkiler türetilmiştir. Bu yaklaşım hat boyunca oluşan dinamik kuvvetlerin tahmininde kullanılabilmektedir [32].

Mazzu ve diğerleri demiryolu tekerlek ve ray çeliklerinde yüzey hasarlarını deneysel metotla incelemiştir. Tekerlek ray çevrimsel hasar mekanizmasında; aşınma, yüzey ve yüzey altı çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi farklı mekanizmaların birleşimi yer almalıdır. Gerçek işletme koşullarına yakın çevrimsel testler hasar mekanizmasının analizi için önemlidir. Bunun yanı sıra mikroyapısal değişimler veya çatlak ilerleme yolu, testin bitimini müteakip tahribatlı yöntemlerle incelenebilmektedir. Bu çalışmada titreşim, tork ve Barkhausen gürültülerinin tahribatsız ölçümü, çevrimsel yükleme altında, hasarın değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bunların yanı sıra aşınma oranı, yüzeyin durumu,

yüzey altı mikro yapı ve çatlak oluşumunun hasar değerlendirilmesiyle ilişkisi gösterilmiştir [33].

Yu ve diğerleri, alın kaynak bağlantılı U71Mn rayın kırılma analizi başlıklı çalışmalarında, kırılma yüzeyi morfolojisini, mikro yapısını ve mikro sertlik değerlerini taramalı elektron mikroskobu, optik mikroskop ve mikro vikere sertlik cihazları kullanarak analiz etmişlerdir. Analiz sonuçları kaynaklı bağlantının yorulma sonucu kırıldığını ve kırılma yüzeyinin bölünmüş bir karakteristiğe sahip olduğunu göstermektedir. Kırılma yüzeyinin yanında metalografik morfoloji, kalıntılar ve mikro sertlik değeri normal seviyelerdedir. Kaynak bağlantısının dışından içine doğru gövde ve mantarda oluşan mikro yapıdaki serbest katılma ray kaynağında yorulmaya bağlı oluşan kırılmanın çatlak kaynağıdır. Eğilme gerilmelerine bağlı olarak çatlak ilk olarak bu alanda oluşmuş ve kademeli olarak kırılma oluşumuna kadar gövdede ilerlemiştir [34].

Günümüzde ray çelik kaliteleri iyileşmiş ve bu malzemeler plastik deformasyona, aşınmaya ve çatlak oluşumuna karşı dirençli bir yapıya ulaştı ancak buna paralel olarak rayın maruz kaldığı kuvvetler de artmıştır. Ray çatlakları hala öncelikli ana çalışma alanları arasında yer almaktadır. Çeliklere ait farklı mikroyapılar farklı yükler altında, değişik aşınma ve yorulma davranışlarına sahiptir. Bu nedenle rayın mikro yapısal ölçekte modellenmesi farklılıkları incelemek açısından gereklidir. Franklin ve diğerleri çalışmalarında aşınma ve çatlak oluşumuna karşı mikro yapısal modeller oluşturmuşlardır. Tesa bağlı çevrimsel yükleme altında perlitik mikroyapıyı tanımlayan yeni bir mekanizma önermişlerdir [35].

Ringsberg ve diğerleri temasa bağlı yorulma ile raylarda çatlak oluşumu, gerinim ve kalıntı gerilmeleri, sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Literatürde tekerlek ray teması ile oluşan yükler, gerilme ve gerinim değerlerini dikkate alan oldukça az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada sonlu elemanlar aracı kullanılarak modelleme yapılmıştır ve modelde gerilme, gerinim çatlak oluşumu gibi yorulma koşulları ve ray özellikleri, farklı malzemeler ve yüklemeler de dikkate alınmıştır. Model İsveç'te banliyö hattı koşullarına göre geliştirilmiştir. Modelde elde edilen sonuçlarda çatlak oluşum konumu ve yönleri saha çalışmalarında elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde benzerlik göstermiştir [36].

Schoenborn çalışmasında kaynaklı bağlantıların yorulma analizinin ANSYS Workbench ortamında uygulamasını incelemiştir. Büyük yapıların kaynaklı bağlantıları genellikle komple montaj içerisinde küçük detaylar olarak görülmektedir. Bu yapıların yorulma direnci, bölgesel gerilme alanları ve kritik noktalar işletme yüklerinin uygulanmasına bağlı olarak bölgesel deformasyonların ve dayanımların tespitinde önem arz etmektedir. IIW ve diğer uluslararası teşkilatlar kaynaklı bağlantıların detaylı bir şekilde tanımlanmasını gerektirmektedir. ANSYS Workbench ön işleme özellikleri, ANSYS alt model teknolojisiyle birleştirilmiş ve bu birleşim hızlı ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. ANSYS Workbench yorulma modülü yüksek çevrimli hesaplamalara olanak sağlamaktadır [37].

Tekerlek ray temas mekaniği demiryolu mühendisliğinde çalışılan, geniş uygulama deneyimi ve analiz yaklaşımları gerektiren, temel alanlardan birisidir. Problemin fiziğini tanımlayan analitik formülasyonlar sadece belirli tipteki basit geometriler için tanımlanabilmiş ve karmaşık geometriler için analitik modeller hala anlaşılamamıştır. Bu nedenle sayısal hesaplamalı modeller, problemin anlaşılması için sıklıkla kullanılmaktadır. Demiryolu mühendisleri, tekerlek ray kontak problemlerinde, gerçek durumda elde ettikleri sonuçları doğrulamak için sonlu elemanlar yöntemini sıklıkla kullanmışlardır. Bu çalışmaların çoğunluğunda sınır koşulları ve yüklemeler bazı varsayımlar kullanılarak tanımlanmıştır. Arslan ve Kayabaşı hafif raylı sistemlerde, tekerlek ray temasını sonlu elemanlar yöntemiyle modelledikleri çalışmalarında, üç boyutlu gerçekçi bir model geliştirerek problemi tanımlamışlar ve bu modelin gerçek koşullarla uyumlu olduğu görülmüştür [38].

Tekerlek ray kontak mekanizmasının değerlendirildiği sistemler kullanılarak tren işletme güvenliği, raydan çıkma, tekerlek apleti tespiti ve işletme yükleri analiz edilebilmektedir. Ancak tren hareket halindeyken gerçekçi ve kesin ölçümler yapmak oldukça güçtür. Milkovic ve diğerlerinin yaptığı çalışmada hat üzerinde gerinim ölçerler kullanılarak yükle orantılı sinyaller alınmıştır. Bu sinyallerle yatay ve dikey yüklemeler kayıt altına alınmıştır. Uygulanan sistemde tren geçişi esnasında temas noktası pozisyonu belirlenebilmektedir; bu durum temas geometrisinin optimizasyonuna, aşınma analizi vb. uygulamalara olanak sağlamaktadır [39].

Wang ve diğerkleri doğru akım alın kaynağı işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir. Metal ergime ve soğuma simülasyonda ısıl elektriksel birleşim ve yakma göz önünde tutulmuştur. Sonrasında kaynaklı birleşimde ısıl dağılım hesaplanmıştır. Isıdan etkilenen bölgede östenit tane büyümesini incelemek için Monte Karlo simülasyon teknolojisi kullanılmıştır. Hesaplanan ısıl dağılım değerleri temel alınarak, Monte Karlo simülasyonu ve gerçek zamanlı tane büyümesi kinetiği arasındaki ilişki incelenmiştir. Sıcaklığa bağlı tane büyümesi ve ısıdan etkilenen bölge incelenmiştir [40].

Kurada ve diğerkleri ısı kontrollü alın direnç kaynağı kullanarak ikili paslanmaz çeliği kaynak işlemine tabi tutmuşlardır. İşlem öncelikle yakma ve ardından temas direncini içeren iki aşamadan oluşmaktadır. Yapılan kaynak işlemi sonucu kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgede tane büyümesi güçlükle gözlenebilmiştir. Sıcaklığın 1373 K mertebelerine ulaşması, ince tanelerin artmasına bağlı olarak, çekme mukavemetinin ve çarpma enerjisinin artmasına neden olmuştur [41].

Vogt ve diğerkleri demiryolu araç gövdesinde kullanılan çelik yapı kaynaklarının çevrimsel yükleme altında yorulma davranışlarını incelemiştir. Demiryolu gövde altında kullanılan 2,7-4 mm kalınlığında değişen çapraz kirişlerdeki kaynaklarda yer alan eksenel farklılıklar yüklerde artışa neden olmaktadır. Kritik bölgelerdeki farklı numuneler, sabit genlikte çevrimsel yükleme altında yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Gerinim ölçerler kullanılarak çatlak oluşumu incelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan sayısal hesaplamalar sonucu gerilme değerleri incelenmiştir. Son olarak deneysel ve hesaplamalı elde edilen sonuçlar kullanılarak, numunenin S-N eğrileri türetilmiştir [42].

Donzella ve diğerkleri tekerlek ve rayın yüzeye yakın bölgelerinde çevrimsel yükleme altında hasar ilerlemesini incelemiştir. Bu çalışmada ray ve tekerlek malzemesi kullanılarak çift diskli temas testi uygulanmıştır. Farklı numune çiftleri için artan çevrim yükleri uygulanmış, daha sonra numuneler kesilerek yüzeye yakın bölgelerdeki hasar optik mikroskop ve elektron mikroskopu kullanılarak analiz edilmiştir. Oluşturulan sayısal model malzeme derinliği boyunca deneysel gerinim değerlerini çevrim yükünün bir fonksiyonu olarak hesaplamaktadır [43].

Stock ve Pippan çalışmalarında Voestalpine Schienen GmbH'ta yer alan tam ölçekli test düzeneğinde çeşitli perlitik ve beyritik ray çeliklerinin yorulma ve aşınma davranışlarını

incelemiştir. Perlitik rayların sertliği ve aşınma ve yorulmaya karşı direnç arasında net bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. Yüksek sertlik seviyelerinde, düşük aşınma gözlemlenmiştir. Beynitik çeliklerde davranış biraz daha farklıdır. Aynı sertlik seviyesinde perlitik çeliklere göre aşınma direncinin daha düşük, yorulma direncinin ise daha yüksek olduğu görülmüştür [44].

Wang ve diğerleri eğimli yorulma çatlakları ve kavisli raylarda aşınma ilişkisini saha çalışması ve teorik hesaplamalarla incelemiştir. Saha çalışmalarında, ray kenarındaki aşınmalar ciddi ise yorulma çatlaklarının görece daha hafif olduğu görülmüştür. Ray aşınma oranındaki artış, rayın yorulma hasarını hafifletebilmektedir. Bunun sonucu olarak virajlı hatlarda eğimli çatlak hasarını önlemek için yeni asimetrik bir ray taşıma metodu geliştirilmiştir. Saha sonuçları, asimetrik ray taşımanın, tekerlek flanşı ve ray arasındaki kuvvetleri artırdığı ve ray aşınmasını şiddetlendirdiği gözlenmiştir. Yeni ray taşıma metodu, yüksek hız eğimli raylarda, aşınma oranının artırılmasıyla, yorulma çatlaklarını azalttığı görülmüştür [45].

Ray mantarında oluşan kusurlar, tamirat için vakit kaybına ve bozulan alanda dolgu benzeri işlemlerin yapılmasını gerektirmektedir. Alın köşe kaynağı tamirati benzer ray mantarı hatalarının tamirati için yeni bir metot olarak geliştirilmiştir. Bu metotla diğer kaynak metotlarından farklı olarak, ısıdan etkilenen bölge minimum seviyelere düşmekte, herhangi bir porozite, çatlak veya katılama yapısı oluşmamaktadır. Bu durum tamir edilen alanın ana ray gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu metot AREMA ve AWS kaynak standartlarını karşılamaktadır. Yuvarlanma yükü altında alın köşe kaynağı, herhangi bir düzensiz aşınma veya çatlak oluşumu göstermemiştir. Mobil kaynak kamyonu kullanılarak tamirat 45 dakikadan kısa bir sürede tamamlanabilmekte ve sertlik değerleri ana ray malzemesiyle benzerlik göstermektedir. Bu tamirat metodu şu anda yüksek tonajlı hatlarda ve TTCI FAST/HAL'de yer alan test hattında ileri araştırmalar için test edilmektedir [46].

Alın kaynağı sürekli kaynaklı raylarda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bitmiş kaynaklarda, ray gövdesinde kalıntı çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler işletme yükleriyle birleşince rayda yorulma çatlakları oluşmaktadır. Kaynak kalıntı gerilmelerinin düşürülmesi, hasarlanma riskini azaltmaktadır. Tawfik ve diğerleri ray malzemesindeki faz dönüşüm karakteristiklerini sonlu elemanlar yöntemiyle ısıl mekanik modelle analiz etmişlerdir. Bu çalışmada AS60 ve AS68 raylarının kaynakları esnasında oluşan kalıntı

gerilme dağılımı, ısı dağılımı incelenmiştir. Kaynak sonrası ısı işlemin, lokal olarak gövdedeki kalıntı gerilime etkisi incelenmiştir. Kaynak sonrası soğuma oranını infrared termografiyle ve kalıntı gerilmeleri gerilme ölçerlerle ölçen bir deneysel program kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların sonlu elemanlar metodu sonuçlarını yeterli ölçüde doğruladığı görülmüştür. Kaynaktan hemen sonra ray tabanını hızlı bir şekilde ısıtmak yatay ve dikey ekseninde kalıntı gerilme seviyelerini düşürmüştür. Teorik ve deneysel sonuçlar yüksek aks yükü koşullarında, alın kaynağı yönteminde, prosedür modifikasyonların geliştirilmesinde kullanılacaktır [47].

ERRI D 173 programı çerçevesinde kurplu dört Avrupa demiryolu hattında farklı ray çeliği seviyelerinin çatlak oluşumu ve yorulmaya olan etkisi incelenmiştir. İki hatta lokomotif geçişlerinde yağlama kullanılmış, diğer iki hatta ise kullanılmamıştır. 900A (260 HB), UIC 830-V ve mantarı sertleştirilmiş 340 ve 370 HB çelikler kullanılmıştır. Yağlama ve çelik seviyesindeki sertliğin artmasıyla aşınma değerlerinde azalma görülmüştür. Yorulma hataları yüzey hatası şeklinde kurplu hatlarda görülmüştür ve çatlak boyutları 900 A çeliklerinde 340 ve 370 HB çeliklerine göre daha yüksektir. 900 A çeliklerinde 350 m'lik kurpta yer alan rayda, pullanma görülmüştür ve ray daha sonra değiştirilmiştir. Bu hattan alınan numunelerde 900 A çeliklerinin, soğuk deformasyona bağlı plastik şekil değiştirme sonucu pullandığı ve süneklik limitini erken aştığı tespit edilmiştir. Yüksek akma noktasına sahip olduğu için mantarı sertleştirilmiş rayların yorulma direncinin ve servis ömrünün daha fazla olduğu görülmüştür [48].

Literatürde kaynak işleminin modellenmesi ve simülasyonu hesaplamalı kaynak mekaniği olarak tanımlanmaktadır. 1970'lerin başına giden araştırmalar, kaynak işlemini ve esaslarını tanımlamaktadır. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde önemli olan kaynaklı yapının mekanik özelliklerinin tanımlanmasıdır. Kaynak işlemi sonrasında soğuma esnasında oluşan kalıntı gerilmeler, çekme yönündeki gerilmeler, kaynakta oluşan düzensizlikler ve faz dönüşümleri yorulma çatlaklarının oluşmasına ve ilerlemesine neden olan önemli parametrelerdir. Kaynağın modellenmesi konusunda farklı çalışmalar yapılmıştır. Sıcaklığa ve ısı birleşime bağlı plastisitenin hesaplamalı modellenmesi, faz dönüşümlerine bağlı modelleme, kaynakların yapısal dayanımlarının tahmini, farklı kaynak metodlarının modellenmesi gibi araştırmalar literatürde mevcuttur [49].

Ray yorulması demiryollarında servis ömrünü etkileyen önemli faktörlerden biridir. Ray hasarlandığı zaman hızlı bir şekilde tamir edilmeli veya değiştirilmelidir. Yorulma çatlakları tamirat, trafiğin aksaması ve kazalara sebebiyet verdiği için önemli maliyetler oluşturmaktadır. Shyr çalışmasında yorulma hasarlarının, bakım ve işletme uygulamalarına etkisini analiz etmiştir. Yorulma hasarına bağlı bakım ve işletme stratejilerinin geliştirilmesi için yorulma analiz metotları geliştirilmiştir. Ray yorulmasına bağlı hasarlı numune bulmak hat üzerinde genellikle zor ve sınırlı sayıdadır, ayrıca hattan alınan ölçümlere bağlı model geliştirilmesi, ölçümlerin hatalar içerebilmesi nedeniyle sağlıklı sonuçlar vermeyecektir. Bu çalışmada, malzeme özellik teorilerini ve laboratuvar sonuçlarını kullanılarak ray yorulmasını analiz eden Phoenix modeli geliştirilmiştir. Hattan alınan verilerin ve modelden alınan verilerin birleştirildiği bu çalışmada elde edilen verilerin hattan alınan ölçüm sonuçlarına göre herhangi bir dezavantaja sahip olmadığı görülmüştür [50].

Ray ve ray kaynağının kalitesi demiryolu güvenliğinde önemli bir rol oynar. Test metotları, kalite kontrolünün temel parçasıdır. Rayların testi ilgili uluslararası standartlarda tanımlanmış ve demiryolu otoriteleri ve ray kaynak firmaları bu standartlarda öngörülen temel değerleri sağlamak durumundadır. Saarna ve Laansoo, ray ve kaynaklı rayın temel test metotlarını uluslararası standartlar çerçevesinde değerlendirmiştir [51].

Xiao ve diğerleri yüksek hızda kaynaklı raylarda, rayın dinamik davranışını incelemişlerdir. Farklı kaynak düzensizliklerinin olduğu raydan geçirilen araçlar ve ray araç modeli kullanılarak, ray bileşenlerinin dinamik performansı incelenmiştir. Bu çalışmada araç ve ray dinamiğinde sırasıyla Hertzian temas teorisi ve Shen-Hendrick-Elkins tarafından önerilen teoriler tekerlek ray arasındaki kuvvetleri hesaplamak için kullanılmıştır. Araç ve ray hareket denklemleri açık integrasyon metodu kullanılarak çözülmüştür. Tren hızı, aks yükü, düzensizliğin dalga boyu, derinliği ve tekerlek ray çarpma yüklemeleri analiz edilmiştir [52].

Chen ve diğerleri, ray aluminotermik kaynaklarında kaynak hatalarının oluşumunu incelemişlerdir. Kaynak parametrelerinin kusur oluşumu üzerine etkisini inceleyen bir ısı transferi modeli geliştirmiştir. Mevcut normal termik kaynak koşullarında çekme boşluğu oluşumu, katlanma ve merkez çizgi hatalarının olduğu gözlenmiştir. Ön ısıtma süresinin artırılması veya sıvı sıcaklıkları bu kusurların artmasına ve ray mantarında mikro

boşlukların oluşumuna neden olmaktadır. Ön ısıtma süresinin artırılması ve sıvı sıcaklıklarına alternatif olarak 25 mm veya daha büyük kaynak boşlukları ile de aynı etkilerin görüldüğü anlaşılmıştır [53].



2. YÜKSEK HIZLI TREN HATLARINDA KULLANILAN RAY KAYNAK METOTLARI

TCDD konvansiyonel, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında bulunan raylarda kaynak işlemini uygulamaktadır. Sürekli kaynaklı raylar (SKR), yüksek dinamik performans ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle hızlı bir şekilde cebireli ve civatalı ray birleştirmelerin yerini almaktadır [12]. Hattın sürüş kalitesini ve işletme hızını artırmak, tamir ve bakım masraflarını düşürmek, ray kırılmalarını ve üstyapı malzemelerinin yıpranmasını önlemek, çeken ve çekilen araçlardaki bakım maliyetlerini azaltmak, çevre kirliliği ve sebeplerini ortadan kaldırmak amacıyla tren hatlarında ray kaynak işlemi uygulanmaktadır [54].

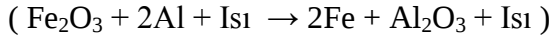
Sürekli kaynak yapılması için gerekli şartların oluşturulmuş olması gerekmektedir. Raylar, hat üzerinde sıcaklık değişimiyle birlikte genleşmeye çalışırlar. Bu genleşme ile yatay yönde uzunlamasına oluşacak gerilmeler hat üzerinde kaynak yapılmadan önce nötrlenmelidir. Kaynak işleminden sonra, kaynak bölgesi hacimsel süreksizlik ve boyutsal kusurlara karşı tahribatsız muayene yöntemleriyle test edilmelidir. TCDD’de aluminotermik ray kaynağı, alın kaynağı ve dolgu kaynağı metotları kullanılmaktadır [54].

2.1. Aluminotermik Kaynak

Aluminotermik ray kaynağı eski ve basit bir metot olması, düşük maliyet, hızlı kurulum ve taşınabilir ekipmanlara sahip olması nedeniyle halen rayların kaynaklanmasında ve hasarlı rayların değiştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Aluminotermik ray kaynağı bir döküm işlemi olması nedeniyle oluşabilecek döküm hataları ve kaynak kalitesinde operatör girdileri ve tecrübesi önemli bir parametredir [12].

Kaynak yapımı süresi, kaynak bölgesindeki hazırlıklara bağlı olmak üzere ortalama 30 dakikadır [54]. Bu süreç kaynak yapımına başlanması için kaynak başlarının kesilmesi ile başlayıp, kaba taşlamanın tamamlanmasına kadar devam eder. Süreç ray başlarının kesilmesi, bağlantı malzemelerinin sökülmesi, mastarlamının yapılması, kalıbın bağlanması, ön ısıtmanın yapılması, kaynak potasının hazırlanması, kaynağı yapılması, sıyırma işleminin yapılması, ön taşlama işleminin yapılmasını kapsar [54, 55].

Demir oksit (Fe_2O_3) ve alüminyum (Al) maddelerinden oluşan karışıma termik adı verilir. Termik karışımına ısı verildiği zaman, demir oksit ve alüminyum kimyasal tepkimeye girer ve bu tepkime sonucu;



oluşur.

18-28 saniye süren reaksiyon sonucu karışım sıcaklığı 2500°C 'ye ulaşır ve ergiyik hale geçer. Ergiyik karışımda demir metali ağır olduğu için alta çöker ve cüruf olan alüminyum oksit hafif olduğu için potanın üst kısmında toplanır. Potanın alt kısmından açılan delikten kalıbın içerisine akıtılan ergiyik, kalıp içerisinde bulunan ray uçlarını da ergiterek birleştirir ve kalıbın şeklini alır. Fazlalıklar sıyrıldığında düzgün kaynaklanmış ray profili elde edilir. Bu kaynak metodunda yeterli miktarda alüminyum varlığı, çeliğin paslanmasını önler, mukavemetini ve genişleme kabiliyetini artırır. Ancak alüminyum belirli bir miktarı aştığında çelik içerisinde kırılgan bir yapı oluşturur. Bu durum potadan eriyiğin kalıba daha kısa sürede akması sonucu oluşur [54-56].

2.2. Alın Kaynağı

Alın kaynağı yöntemi, demiryollarında konvansiyonel, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında bulunan rayların birleştirilmesinde ve sürekli kaynaklı rayların (SKR) oluşturulmasında kullanılan önemli bir direnç kaynağı yöntemidir [54, 57]. Kaynak işlemi için en az dokuz kişiden oluşan bir ekip tarafından yapılır. Ekip, en az bir kişiden oluşan kaynak makinesi operatörü, ray başlarının kaynak işlemine hazırlanması için bir ray kesme personeli, ray başlarının taşlanması için bir ray başı taşlama personeli, kaynak sonrası ön taşlamayı yapacak personel, ray travers bağlantılarının kaynak öncesi sökülmesi için en az iki personel, kaynak sonrası ray travers bağlantılarının tekrar yapılması için en az iki personel ve kaynak süreçlerini bilen tecrübeli bir ekip şefinden oluşur. Sahada yapılan hazırlıklara bağlı olmak üzere, saatte yaklaşık 6-8 kaynak yapılabilir [54, 57].

Şekil 2.1'de deneysel numunelerin hazırlanmasında kullanılan Schlatter marka alın kaynağı makinesinin genel görünümü yer almaktadır. Şekil 2.2'de UIC 60 profil raya yapılan alın kaynağı işlemi görülmektedir.



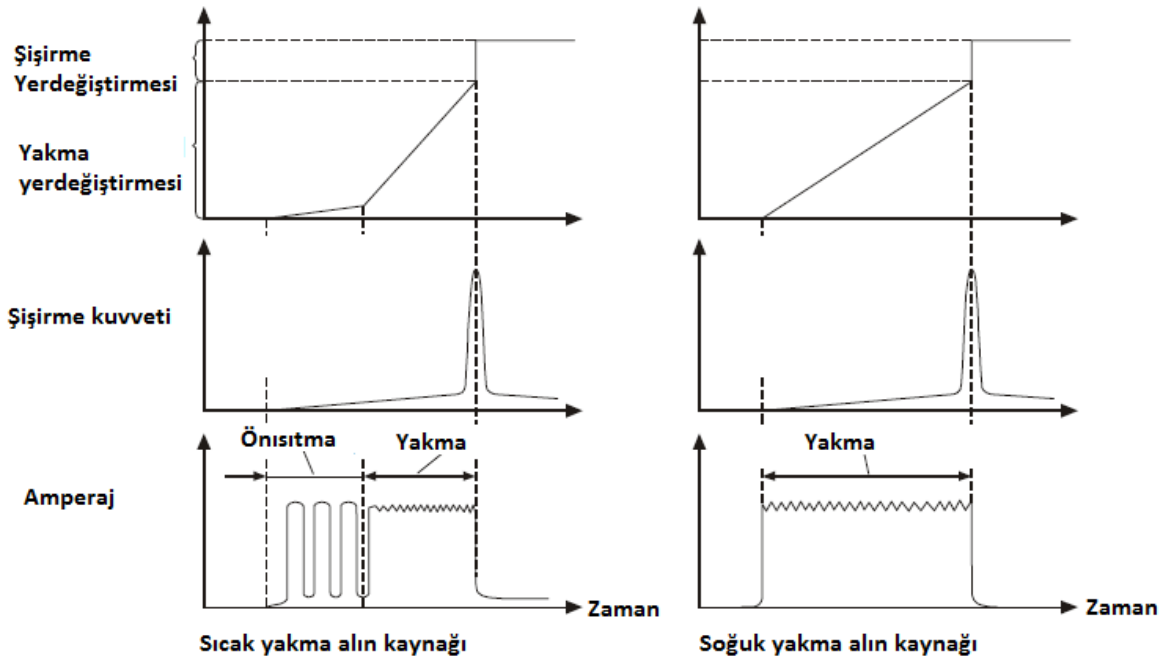
Şekil 2.1. Deneysel numunelerin hazırlanmasında kullanılan Schlatter marka alın kaynağı makinesi genel görünümü



Şekil 2.2. UIC 60 profil raya alın kaynağı işlemi

Alın kaynağı yönteminde, düşük gerilme yüksek akım değerleri kullanılır. Bakır alaşımlı elektrotlar kaynak yapılacak malzemelere temas eder. Yüksek akım altında ark oluşumu sağlanır ve çıkan ısı etkisiyle malzemeler kaynak sıcaklığına erişir [59]. Ray başları, yaklaşık 20 000 A seviyesinde yüksek elektrik akımı kullanılarak ergime derecesine kadar ısıtılır, gerilme değeri 380 Volt'tur. Ergimiş ray başları kaynak kafasında bulunan hidrolik sistem kullanılarak, rayları birbirine doğru bastırır ve kaynak işlemi tamamlanır. Kaynak makinesi kullanılarak, kaynak yapma süresi 120-180 saniye arasında değişmektedir. Kaynak makinası tipine göre değişmekle beraber genel olarak, hat üzerinde kaynak yapımı esnasında çekilen ray boyu tek taraflı en fazla 144-180 m'dir. Kaynaklanacak ray boyu makinenin çekme kapasitesinden uzun olması durumunda, ray kaynağı hatalı olacaktır. Kaynak sırasında her iki ray başında 15-22 mm (toplamda 30-44 mm) kısılma meydana gelmektedir [54].

Alın kaynağı işleminde raylara akım verildiği için, iletkenliğin sağlanması önemlidir. Bu nedenle elektrotların geldiği ray başlarının 50 cm'lik kısmı taşlanarak yağ, pas ve kirden arındırılmalıdır. Ray başları birbiri ile belirli noktalardan temas ettirilerek köprü tamamlanmalı ve yerel akım yoğunluğu bu noktalarda hızla artmalıdır. Metal sıvılaşır ve sonrasında kısmen buharlaşır. Malzeme eksilmesiyle iki ray başı birbirine doğru kademeli olarak ilerler. İşlem esnasında yeni temas köprüleri tekrar tekrar oluşturulur. Alın kaynağı yönteminde sıcak ve soğuk olmak üzere, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi iki temel çalışma yöntemi vardır. Sıcak alın kaynağı yönteminde, gerçek işleminden önce ön ısıtma işlemi uygulanır. Ray başları yeterli mertebede ısıtıldığında işlemi otomatik olarak başlar ve bundan sonraki süreç soğuk alın kaynağı işlemiyle aynıdır [60].



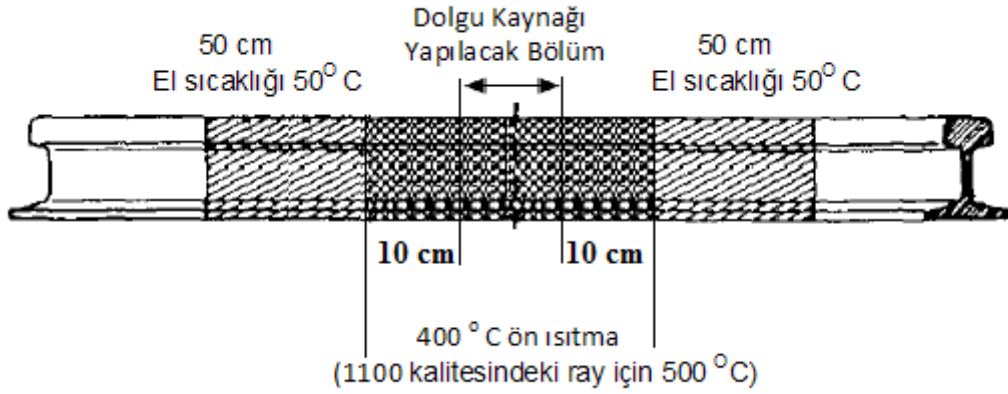
Şekil 2.3. Sıcak ve soğuk alın kaynağı yöntemlerinde zamana bağlı kaynak parametrelerinin değişimi [57]

Alın kaynağı yönteminde oluşabilecek kusurlar genellikle mekanik ve metalürjik kusurlar olmak üzere iki sınıfta kategorize edilmektedir. Mekanik kusurlar genellikle yetersiz sıkma ve şişirme kuvvetlerinden veya eksenel bozukluklardan kaynaklandığı için gözle muayene ile tespit edilebilmektedir. Tespiti zor ve sorunlu olan kusurlar genellikle metalürjik kusurlardır ve bunların tespitinde genellikle tahribatlı muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Metalürjik kusurlar özgün ve tektir ve kaynak parametreleri ve kaynak koşulları gibi faktörlere dayanmaktadır. Alın kaynağı işlemi sonucu oluşan metalürjik süreksizlikler her zaman hata olarak tanımlanmaz ve istenilen kalite parametrelerine göre sınıflandırılır. Boşluk, yanma, oksit kalıntıları veya çatlak bilinen alın kaynağı kusurlarıdır fakat bunların oluşum koşulları hakkında çok az bilgi vardır [61].

2.3. Dolgu Kaynağı

Dolgu kaynağı yöntemi, konvansiyonel, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında bulunan ray ve makaslarda kullanılmaktadır. Kaynak işlemi en az iki personel tarafından yapılmalıdır ve EN 15594 standardına göre demiryolu raylarının elektrik ark kaynağı konusunda tecrübeli personel tarafından yapılmalıdır.

Dolgu kaynağında ray Şekil 2.4’de belirtildiği gibi ısıtılmalıdır. Çubuk elektrot veya dolgu teli elektrotu kullanılarak dikiş boyu 150 mm’yi geçmeyecek şekilde kaynak yapılır. Dolgu yapılan bölgede ray ısısının 300-350 °C’nin altına düşmesi durumunda ön ısıtma işlemi yenilenmelidir.



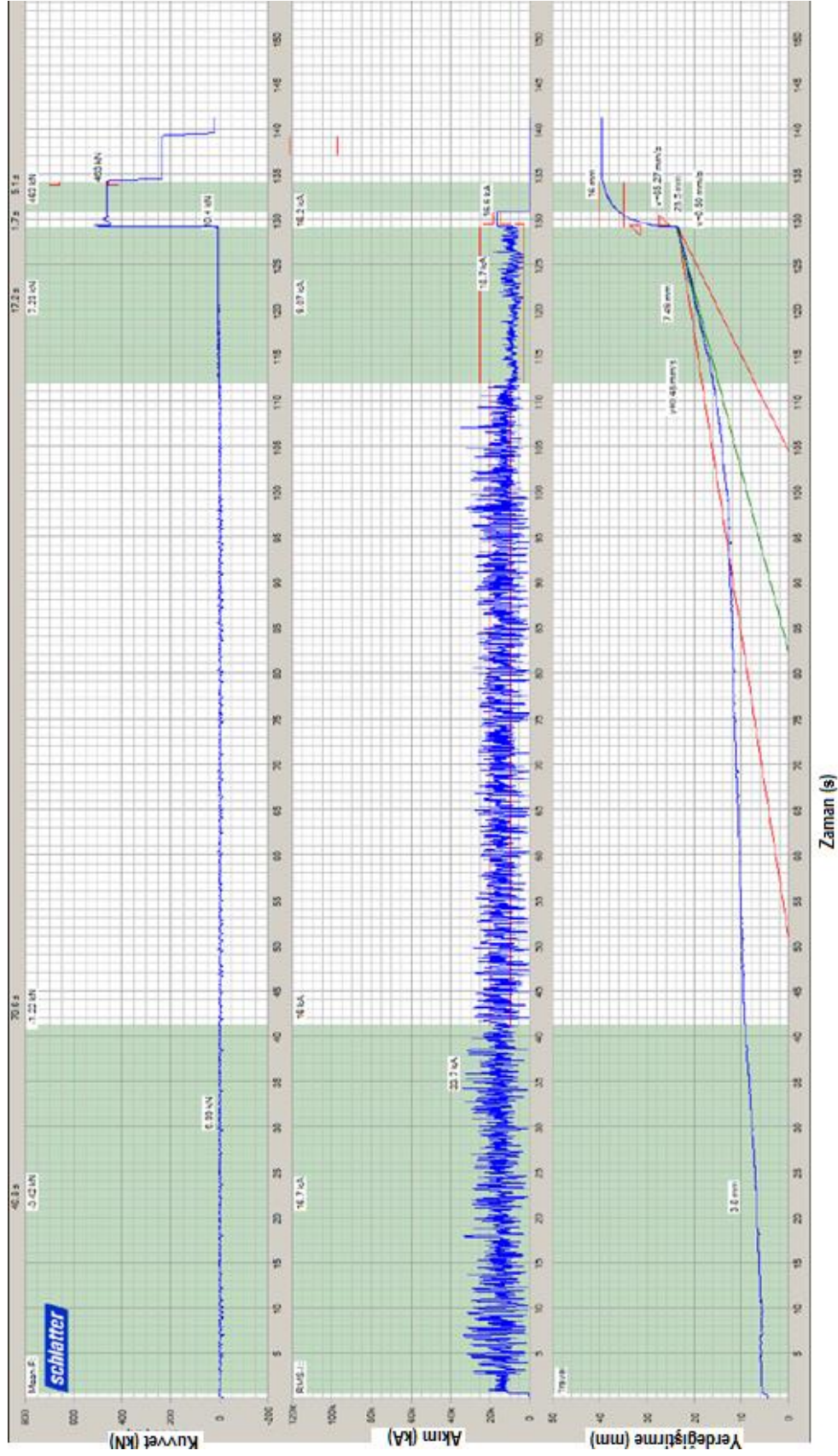
Şekil 2.4. Dolgu kaynağı sırasında rayda yapılacak ön ısıtma işlemi

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alın kaynağı yöntemi devamlı kaynaklı rayların hatlarda serilmesinde kullanılan önemli bir ray birleştirme yöntemidir. EN 14587-1'e göre yapılan fabrika kaynağı ve EN 14587-2'e göre yapılan mobil alın kaynağı yöntemleri demiryollarında yenilenen hatlarda ve yeni serilen konvansiyonel, hızlı tren ve yüksek hızlı tren demiryolu hatlarında sıklıkla uygulama alanı bulmaktadır [57, 61].

Kaynak noktalarındaki malzeme davranışlarını detaylı inceleyebilmek için, alın kaynağı yöntemiyle deneysel çalışmalar yapmak amacıyla kaynaklı ray numuneleri hazırlanmıştır. Ağırlıklı olarak yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan, Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) 60 E1 profil raylar kaynatılmıştır [63].

Bölüm 2.2'de belirtilen kurallara uygun olarak hatta kaynaklı numuneler hazırlanmıştır. Alın kaynağına işlemine ait akım, kuvvet ve yer değiştirme değerlerini gösteren grafik Şekil 3.1'de yer almaktadır. Şekil 3.2'de UIC 60 E1 profil rayın teknik özellikleri yer almaktadır. Kaynak sonrası sıyırma işlemi, kaynak kafasındaki otomatik sıyırma bıçakları ile makine tarafından yapılmıştır. Buna göre, sıyırma sonrası, ray yüzeyinde istenilen değerler Şekil 3.3'de verilmiştir [57, 62]. Ray mantarı ve alt bölgesinde 2 mm, mantar gövde birleşiminde 2,5 mm, ray gövdesinde 2 mm ve ray tabanında 1,5 mm dikiş kordon yüksekliğine müsaade edilmektedir. Sıyırma işleminden sonra istenilen değerlerin sağlanamaması durumunda, kaynak kordonu istenilen limite gelene kadar taşlanmıştır. Kaynak işleminin bitmesine müteakip ön taşlama işlemine başlanır. Ön taşlamanın erken yapılması, maliyetin azaltılması açısından önemlidir. Çünkü kaynak kordonu sıcakken taşlaması kolaydır. Soğudukça taşlama işi zorlaşır ve harcanan taş miktarı artar. Ön taşlama sonrasında kaynak kordonu yüksekliğinin ideal değeri 1 mm'dir. Ancak bu yükseklik 0,5 mm'nin altına düşmemelidir. Aksi halde kaynak bölgesi ile ray aynı sıcaklığa geldiğinde kaynakta çökme olacaktır. Kaynaklı bölge normal ray sıcaklığına düştüğünde son taşlama işlemi yapılır [58].



Şekil 3.1 Deneysel çalışmalar için hazırlanan alın kaynaklı ray numunelerine ait zamana bağlı kuvvet, akım ve yer değiştirme grafiği

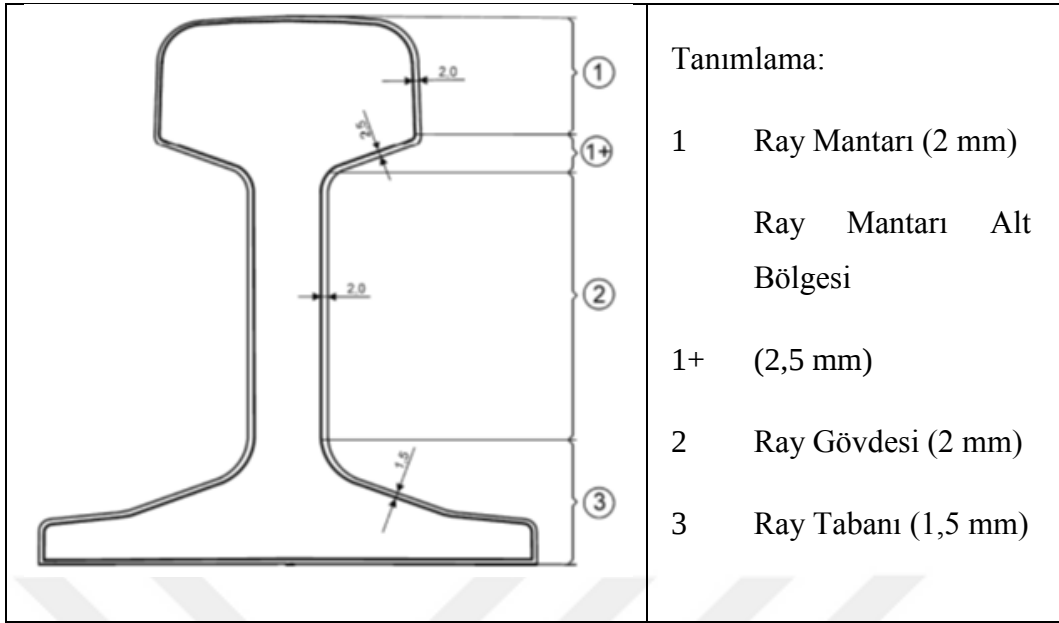
Çizelge 3.1. UIC 60 R260 ray çeliğinin kimyasal özellikleri [63]

Örnek Çelik sınıfı (UIC 60)		Kütlece %								10 ⁻⁴ % ppm. Maks. Kütlece	
		C	Si	Mn	P maks	Cr	Al maks	V maks	N maks	O ^a	H ^b
R 260	Sıvı	0,62/0,80	0,15/0,58	0,70/1,20	0,025	0,15 maks	0,004	0,030	0,009	20	2,5
	Katı	0,60/0,82	0,13/0,60	0,65/1,25	0,030	0,15 maks	0,004	0,030	0,010	20	2,5

UIC 60 profil rayın kaynaklanması esnasında uygulanan kuvvet, akım ve yerdeğiştirme değerlerinin zamana bağlı değişimi Çizelge 3.2’de yer almaktadır. İşlem esnasında farklı zaman aralıklarında meydana gelen toplam yerdeğiştirme ve ortalama akım değerleri çizelgede yer almaktadır. Kaynak esnasında en yüksek akım değerinin 33,7 kA’ye ulaştığı görülmüştür.

Çizelge 3.2. Alın kaynağı kuvvet, akım, yerdeğiştirme ve zaman değerleri

Zaman Aralığı (s)	Kuvvet (kN)	Akım (kA) (Ortalama)	Yerdeğiştirme (mm) (Toplam)
0 - 40,8	0,42	16,7	3,8
40,8 - 111,4	1,22	16	11,29
111,4 - 128,4	7,23	9,07	
128,6 - 130,3	10,4	16,2	
130,3 - 135,4	463	0	34,79
135,4 - 140	0	0	-



Şekil 3.3. Sıyırma sonrası kaynak dikiş kordonu yüksekliği [57]

Standartlara göre UIC 60 raylara yapılan alın kaynağı işlemi neticesinde sertlik ve makro dağlama işlemleri için, kaynak metalinin her iki tarafından 150 mm uzunluğunda, kaynak metali ortada kalacak şekilde ray numunesi testere ile kesilmiştir (Şekil 3.4).

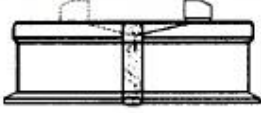
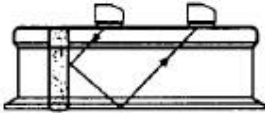
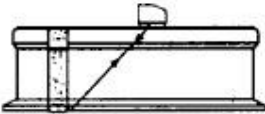
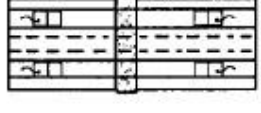
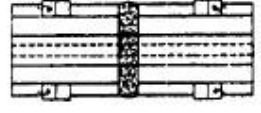


Şekil 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan ray numunelerinin sahada kesilmesi işlemi

3.1. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik muayene işletme koşullarında demiryollarında hacimsel süreksizliklerin tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu hatlarında kurplu bölgelerde işletme şartları altında mantarda yüzeysel ve yüzey altı çatlaklara da sıklıkla rastlanılmaktadır [64]. Yorulmaya bağlı oluşan çatlaklar ultrasonik muayene ile tespit edilemediği takdirde, hızla hasara sebebiyet vermekte ve kazalara yol açmaktadır [12].

Deneysel çalışmalar için hazırlanan numuneler, düzlemsel ve düzlemsel olmayan iç süreksizliklerin tespiti amacıyla ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda Gilardoni RDG 2500 ultrasonik hata tayin cihazı kullanılmıştır. Ses ve mesafe kalibrasyonu TS EN ISO 2400'e göre üretilmiş K1 blok kullanılarak 100 mm derinlik bölgelerinden alınan arka duvar ekosu ve ikincil arka duvar ekosu kullanılarak kalibre edilmiştir [65]. Duyarlılık kalibrasyonu için TS EN 14730-1 standardında tanımlanan kalibrasyon rayında bulunan suni hatalar kullanılmış, mesafe ve ses kalibrasyonu doğrulanmıştır [55]. Muayenede kullanılan problar ve konumları Şekil 3.5'de verilmiştir.

1	Düzlemsel olmayan kusurlar için mantar deneyi		Bir adet 70°'lik iki taraftan çift kristal probu
2	Düzlemsel kusurlar için mantar deneyi		İki adet 70°'lik tek kristal probu (TX & RX)
3	Düzlemsel kusurlar için gövde deneyi		İki adet 45°'lik tek kristal ard arda yerleştirilmiş probu bir de konumlandırma aparatı
4	Taban ortasının deneyi		Bir adet 45°'lik her iki taraftan tek kristal probu
5	Dirseklerin deneyi		Bir adet 70°'lik tek kristal probu
6	Taban uçlarının deneyi		Bir adet 70°'lik tek kristal probu

Şekil 3.5. Ultrasonik muayenede kullanılan proplar, pozisyonları, tarama yönleri ve aranan kusurlar

Şekil 3.5’de yer alan prob konumlarına göre, Dobbler marka proplar kullanılarak 45° ve 70° açıyla, 2 MHz frekansta, malzemeye ses dalgası gönderilmiştir. Bunların yanısıra kesit alınan ray yüzeylerinden SIUI marka 10 mm çaplı 4 MHz frekansta çalışan 0°'lik propla ayrıca tarama yapılmıştır [54, 55, 57, 62]. Yapılan analizler sonucu deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerde herhangi bir hacimsel süreksizliğe rastlanmamıştır.

3.2. Sertlik Analizi

3.2.1. Numune hazırlama

Demiryolu hattında 300 mm uzunluğunda kesilen kaynaklı numuneler ortadan kesit alınarak iki parçaya bölünmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sertlik testi için testere ile kesit alma

Ray mantarının dikey ekseninden tabana doğru, uzunlamasına kesit alınmıştır. Daha sonra sertlik testinin sağlıklı yapılabilmesi amacıyla kesit alınan yüzeyle, diğer yüzeyin paralelliğini sağlamak amacıyla iki yüzeyde frezede işlenmiştir (Şekil 3.7). Frezede işleme sonucu oluşan yüzey Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Ray yüzeylerinin frezede işlenmesi



Şekil 3.8. Frezede işleme sonucu oluşan ray kesiti yüzeyi

Daha sonra ölçüm alınacak yüzeylerde pürüzsüzlüğün sağlanması amacıyla taşlama işlemi yapılmıştır. Taşlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür ve değerlerin R_a olarak 0,1-0,2 μm mertebelerinde olduğu gözlenmiştir.

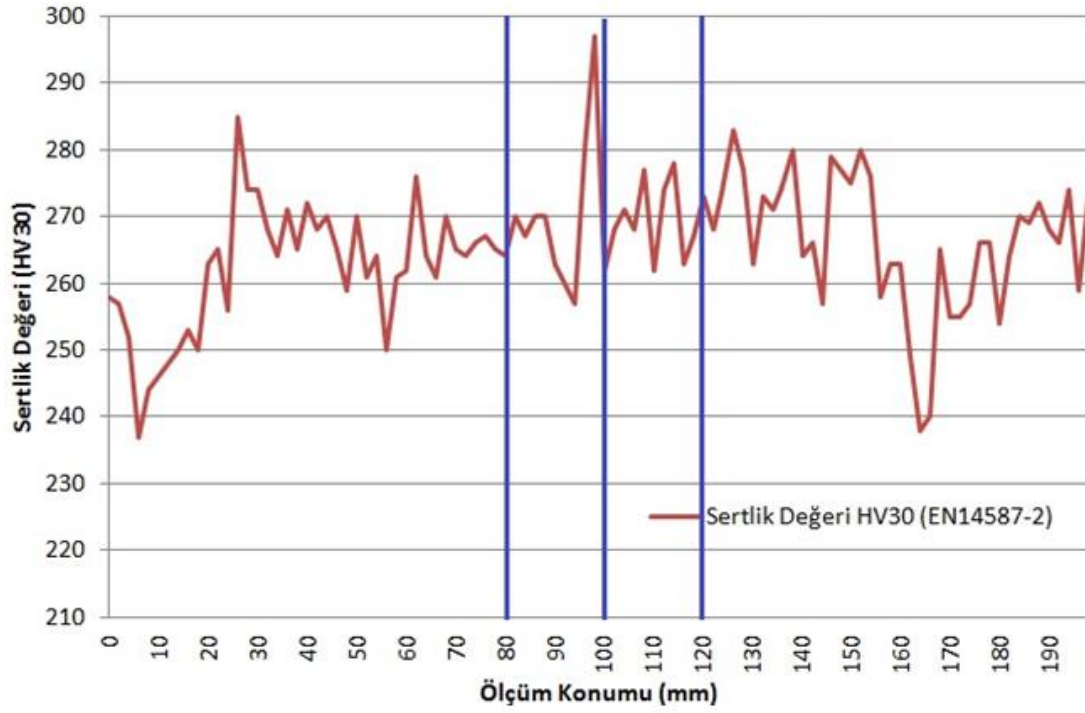
3.2.2. Sertlik deneyi sonuçları

Her iki kaynağın sıcaklıktan etkilenmiş olan bölgesindeki sertlikler arasındaki farklılık TS EN ISO 6507-1, TS EN ISO 6507-2 ve TS EN 14587-2 uyarınca ve ilgili maddelerde bulunan parametrelere uygun olarak Vickers sertlik testi kullanılmak sureti ile ölçülmüştür. İzler ray mantarının dikey uzunlamasına ekseninin 3 mm ile 5 mm altında yer alan bir çizgi üzerinde bulunacaktır ve her bir iz arasındaki mesafe 2 mm alınmıştır. HV 30 uç kullanılarak deneyler Q-Ness Q250 marka universal sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır [57, 65, 66]. Standartta tanımlanan bu ölçümün yanı sıra ray mantarı, gövdesi ve tabanından 10'ar mm aralıklarla her bir numuneden 60 olmak üzere toplamda 180 sertlik değeri alınmıştır. Kaynak metali merkezinden her iki yönde 100 mm'lik alandan ölçüm alınmıştır. Kaynak metalinin merkezi 100 mm olarak kabul edilmiş toplamda 200 mm'lik alan taranmıştır (Şekil 3.9) [65, 66]. Toplamda 492 adet sertlik değeri alınmıştır.

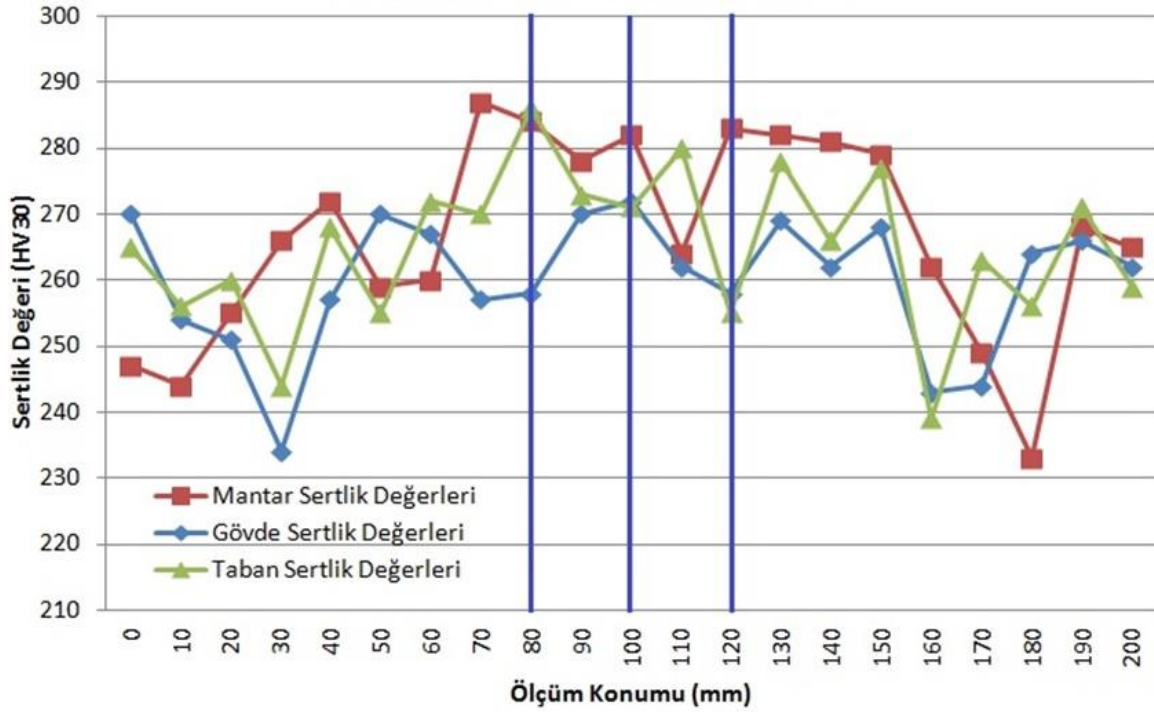
<i>Mantar</i>			
<i>Gövde</i>	0 mm	100 mm	200mm
<i>Taban</i>			

Şekil 3.9. Ray numunesi üzerinde ölçüm alınan noktaların konumu (100 mm kaynak merkezi)

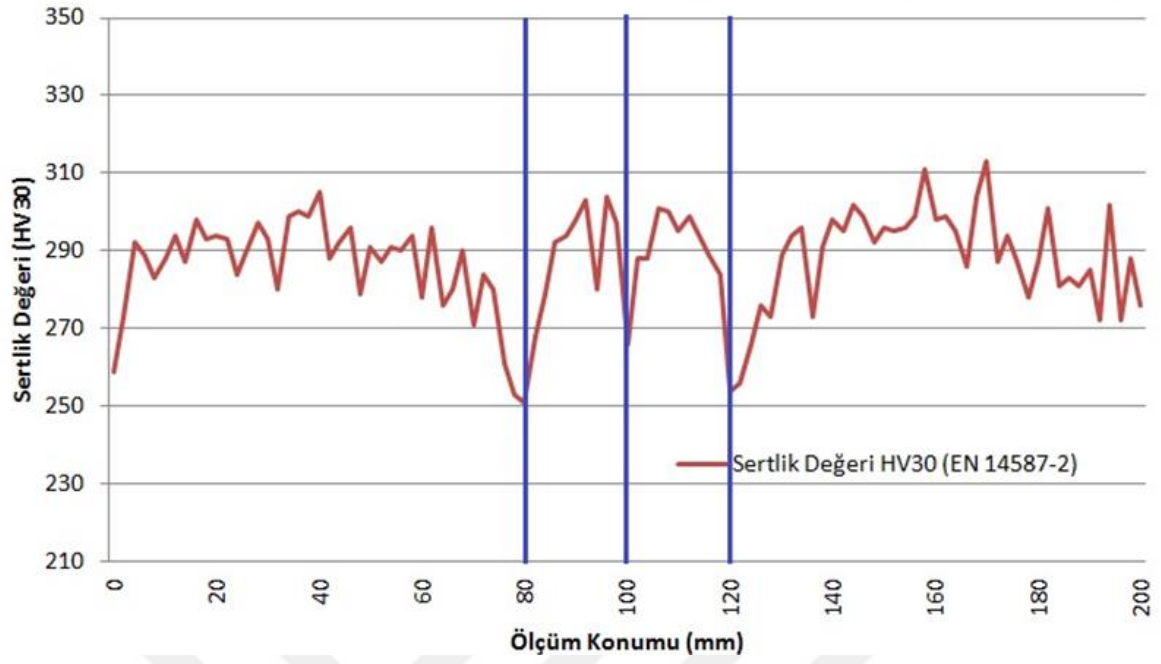
Şekil 3.10-3.15'de görüldüğü üzere, kaynak metali (birinci bölge) her iki yönde 20 mm olmak üzere 40 mm'lik alanda yayılmıştır. Bunun yanı sıra, kaynak metaline bitişik ikinci bölgenin yaklaşık 40 mm olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında ise ray ana metaline geçiş olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.



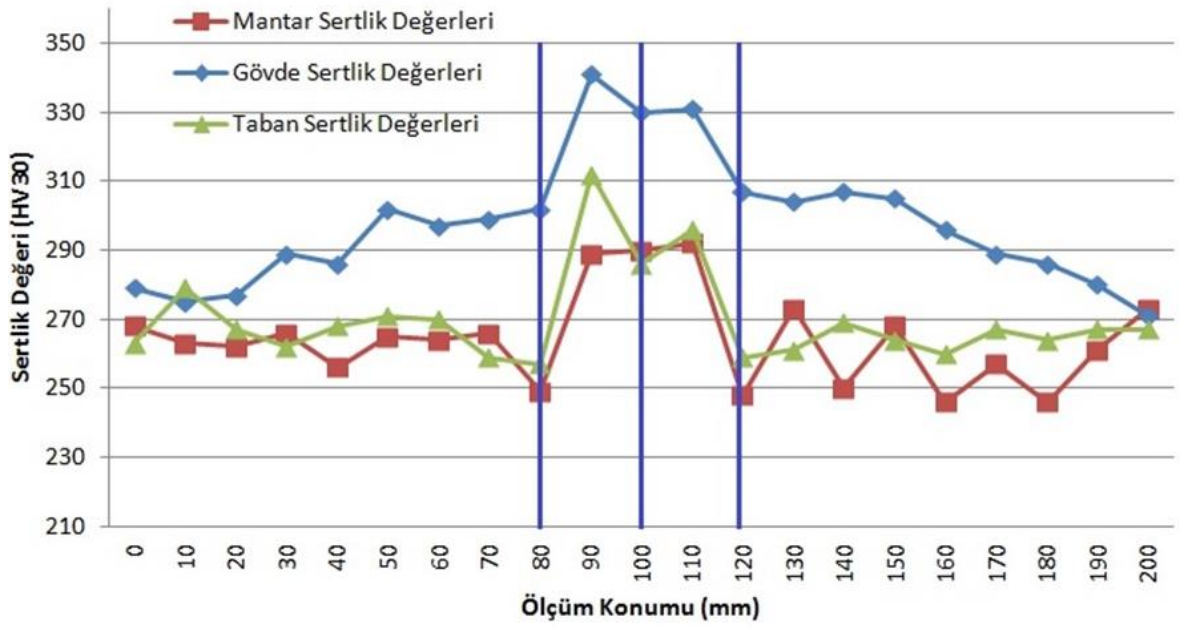
Şekil 3.10. EN 14587-2'ye göre 1 nolu numuneden alınan sertlik değerleri



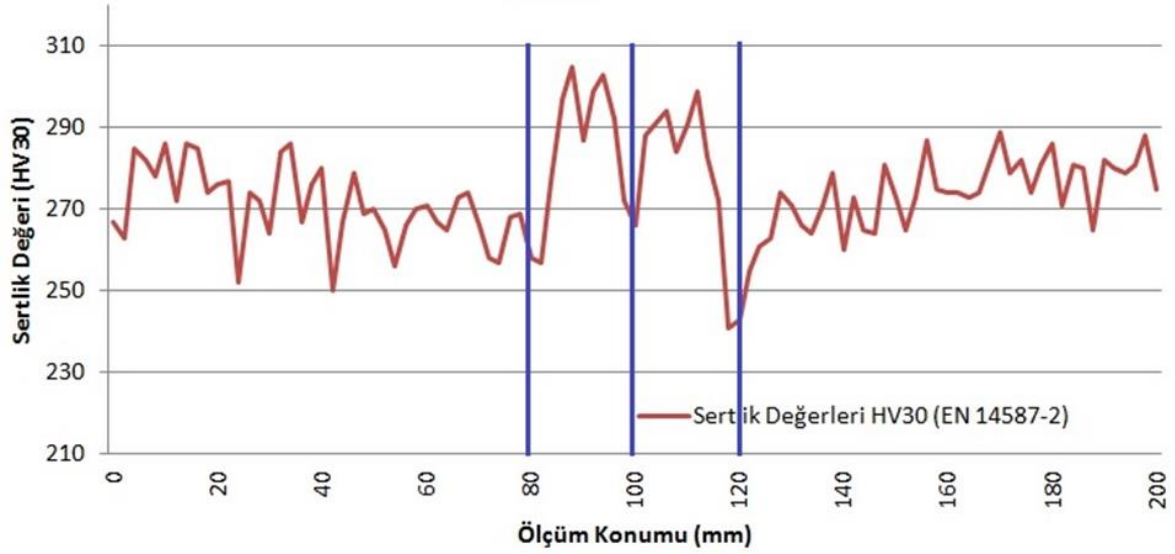
Şekil 3.11. 1 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri



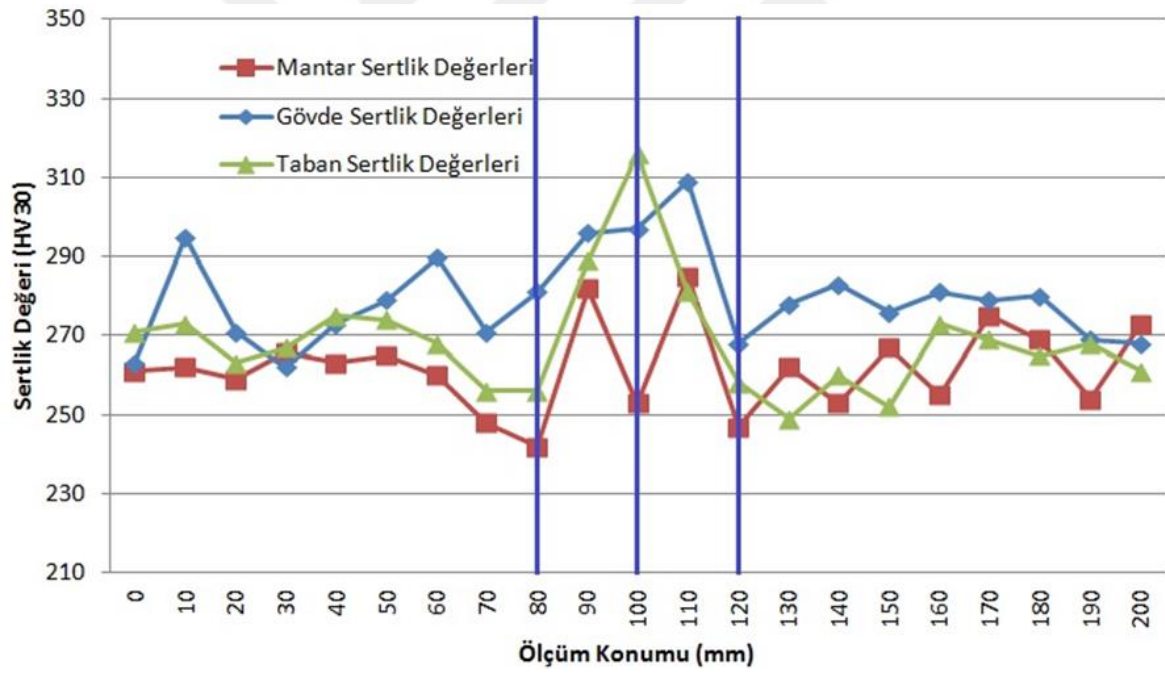
Şekil 3.12. EN 14587-2'ye göre 2 nolu numuneden alınan sertlik değerleri



Şekil 3.13. 2 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri



Şekil 3.14. EN 14587-2'ye göre 3 nolu numuneden alınan sertlik değerleri

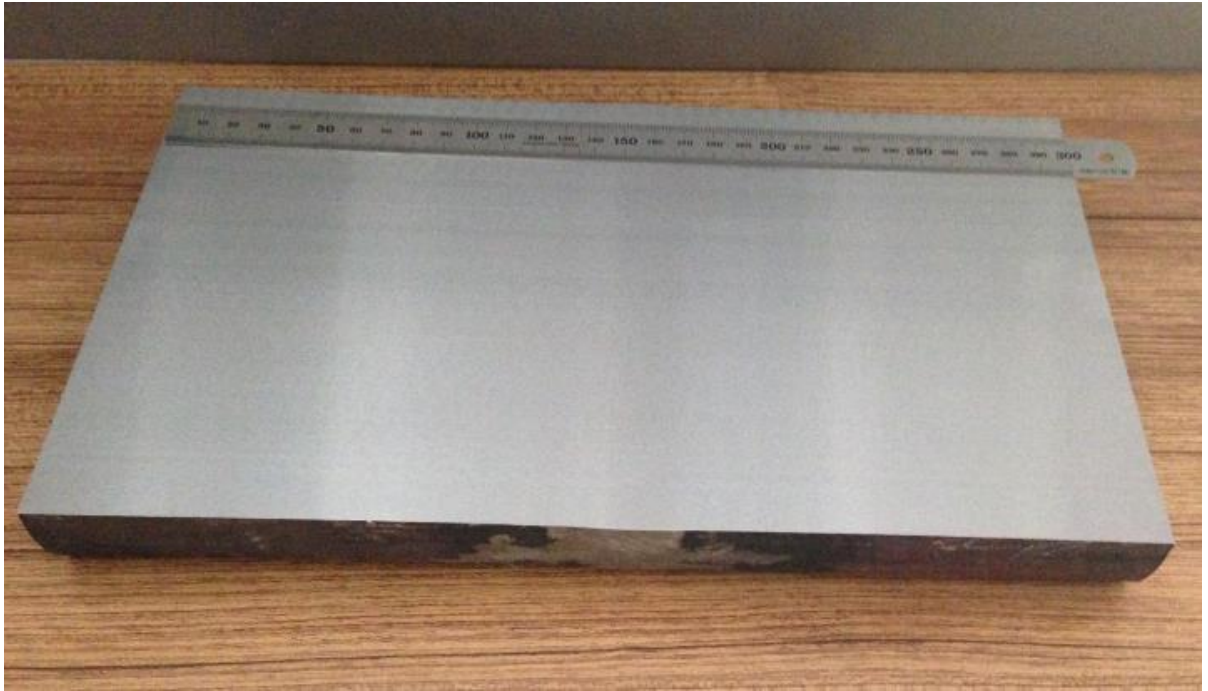


Şekil 3.15. 3 nolu numune mantar, gövde ve tabanından 10'ar mm aralıklarla alınan sertlik değerleri

Yapılan analizler sonucu malzemenin sertlik değerlerinde hızlı geçiş olan bölgeler tespit edilmiştir ve bu bölgeler sınıflandırılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda sertlik değerinde hızlı değişimin olduğu geçiş bölgelerinin sınırları, çatlakın oluşup ilerlediği bölgeler olarak değerlendirilmiştir [68].

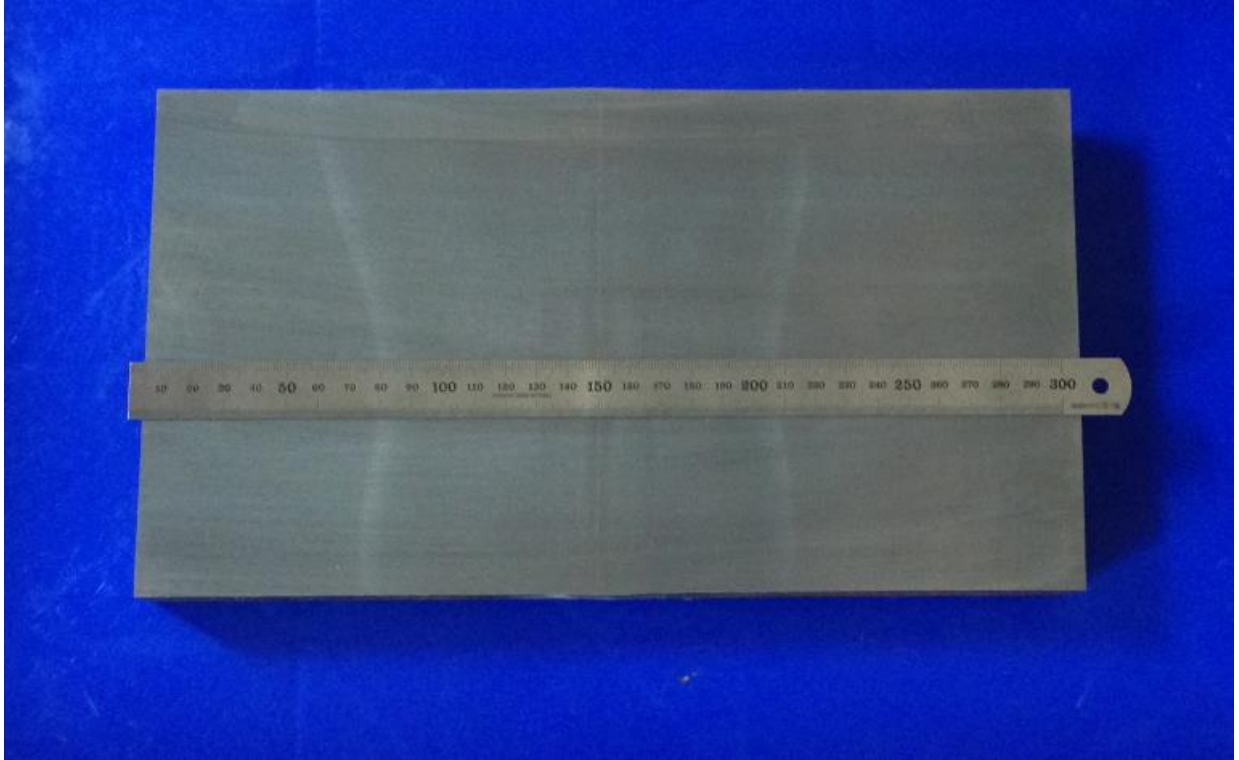
3.3. Makro Dağlama

300 mm uzunluğundaki ray kesitinin taşlanan yüzeyi (Şekil 3.16) kalıntılardan arındırılmak amacıyla yüzey etil alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Sonrasında %5'lik nitrik asit (HNO_3) ve etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) çözeltisinde rayın taşlanmış yüzeyi dağlanmıştır (makro dağlama işlemi). Çözelti yüzeyde 1,5 dakika bekletilmiş ve sonrasında etil alkolle temizlenerek yüzeydeki kaynak bölgeleri gözlemlenmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.16. Taşlanmış ray kesiti yüzeyi

Şekil 3.17'de yer alan ray kesit alanı, yüzeyde malzeme farklılıklarının olduğu sınır bölgelerini açık bir şekilde göstermektedir. Kaynak çizgisi, kaynak çizgisine bitişik birinci bölge, birinci bölgeye bitişik ikinci bölge ve ana metale geçiş çizgileri makro dağlama işlemi sonrası açık bir şekilde görülmektedir. Mantar, gövde ve tabanda kesitte yer alan ölçü farklılıkları nedeniyle gözlemlenen bölgeler farklılık göstermiştir. Buna göre tespit edilen bölgelerin, mantarda tabana göre daha geniş, tabanda ise gövdeye göre daha geniş olduğu anlaşılmıştır.



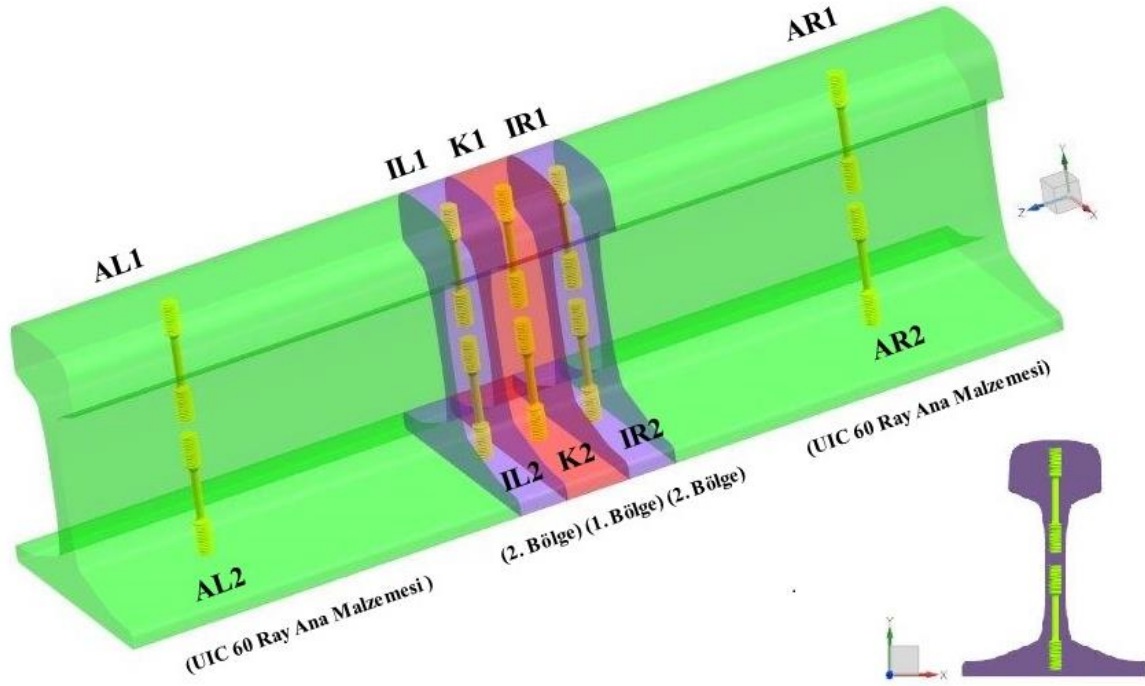
Şekil 3.17. Makro dağlama işlemi sonucu oluşan ray kesiti yüzeyi

Alın kaynağı işlemi sonucu özellikle ray gövdesinde ergiyik metalin diğer bölümlere göre daha hızlı soğuması sonucu oluşabilecek kaba taneler, boşluk ve kalıntılar, mukavemet açısından ray gövdesi bölgesinin en zayıf bölge olduğunu işaret etmektedir [69].

3.4. Temel Mukavemet Değerlerinin Tespiti ve Ekstansometreli Çekme Deneyi

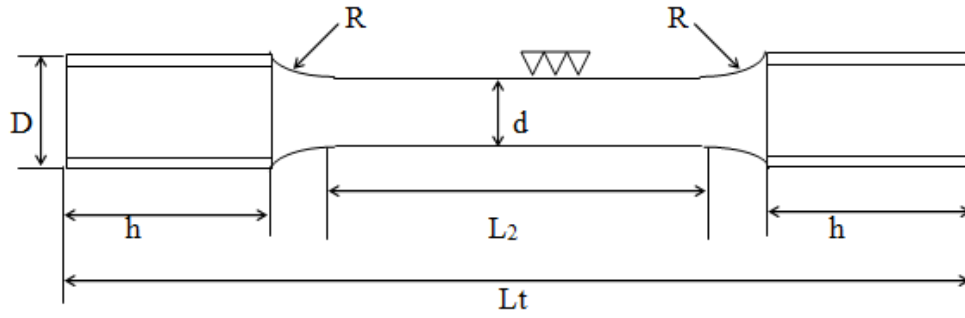
3.4.1. Numune hazırlama

Kaynaklı rayın ana metalinden ve tanımlanan geçiş bölgelerinden çekme çubuğu numuneleri hazırlanmıştır. Numune alınan bölgeler ve numune kodları Şekil 3.18’de yer almaktadır. Buna göre 10 adet çekme çubuğu numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 3.18. Çekme numunesi çıkartılan kaynaklı ray numunesi bölümleri ve numune kodları

TS EN ISO 6892-1 standardına göre M10 ölçüde hazırlanan çekme deney numunesi ölçüleri Şekil 3.19’da, hazırlanan deney numuneleri ise Şekil 3.20’de yer almaktadır [70].



	Ölçü mm	Toleranslar
D	M 10	
d	5	$\pm 0,03$
h	20	
R	3,75	
L_2	28	
L_t	75.5	

M10 çekme çubuğu
EN ISO 6892-1:2009 (silindirik numune)

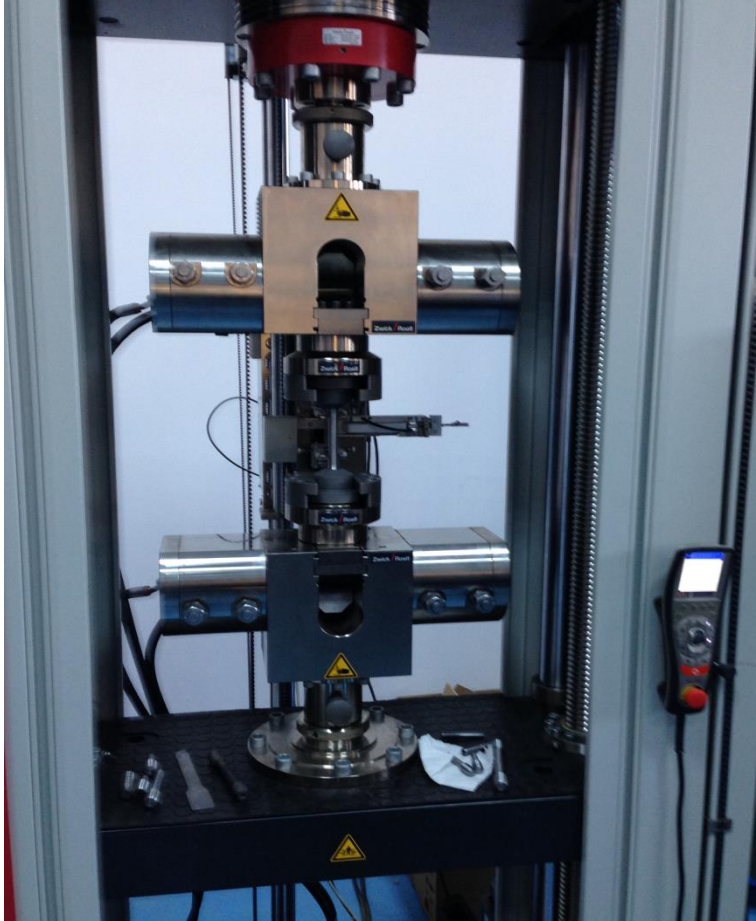
Şekil 3.19. Çekme çubuğu numuneleri temel ölçüleri



Şekil 3.20. Hazırlanan çekme çubuğu numuneleri

3.4.2. Çekme deneyi sonuçları

Deneyler ZWICK Roell Z250 marka ve model, mekanik ekstansometreli çekme deney cihazında yapılmıştır. Cihaza ait resim Şekil 3.21’de yer almaktadır.



Şekil 3.21. ZWICK Roell Z250 marka ve model, mekanik ekstansometreli çekme deney cihazı

K1 numunesine ait TS EN ISO 6892-1 (Metod B)’ye göre yapılan çekme deneyi sonucu elde edilen grafik ve temel mukavemet değerleri Şekil 3.22’de yer almaktadır. Deneysel sonuçların tamamı EK1’de verilmiştir. Buna göre çizelge ve tabloda yer alan kısaltmaların açıklamaları aşağıda belirtilmiştir.

m_E =Elastik modül

R_m =Çekme mukavemeti

$R_{p0.2}$ = % 0.2 kalıcı uzama miktarındaki akma değeri

F_m =Malzemenin dayandığı en yüksek kuvvet

$A_{gt(corr)}$ =Çekme Uzaması (toplam uzama)

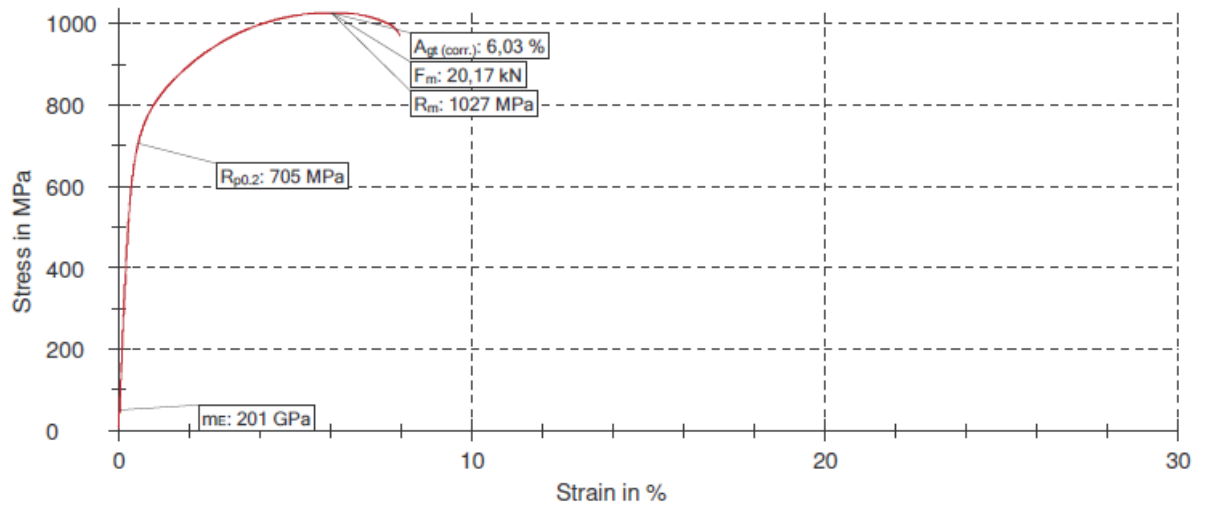
L_0 =Ekstensometreli ölçme boyu

Tester : YASIN SARIKAVAK
 Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen)
 Machine data : Zwick Roell Z250
 Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s
 Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s

Test results:

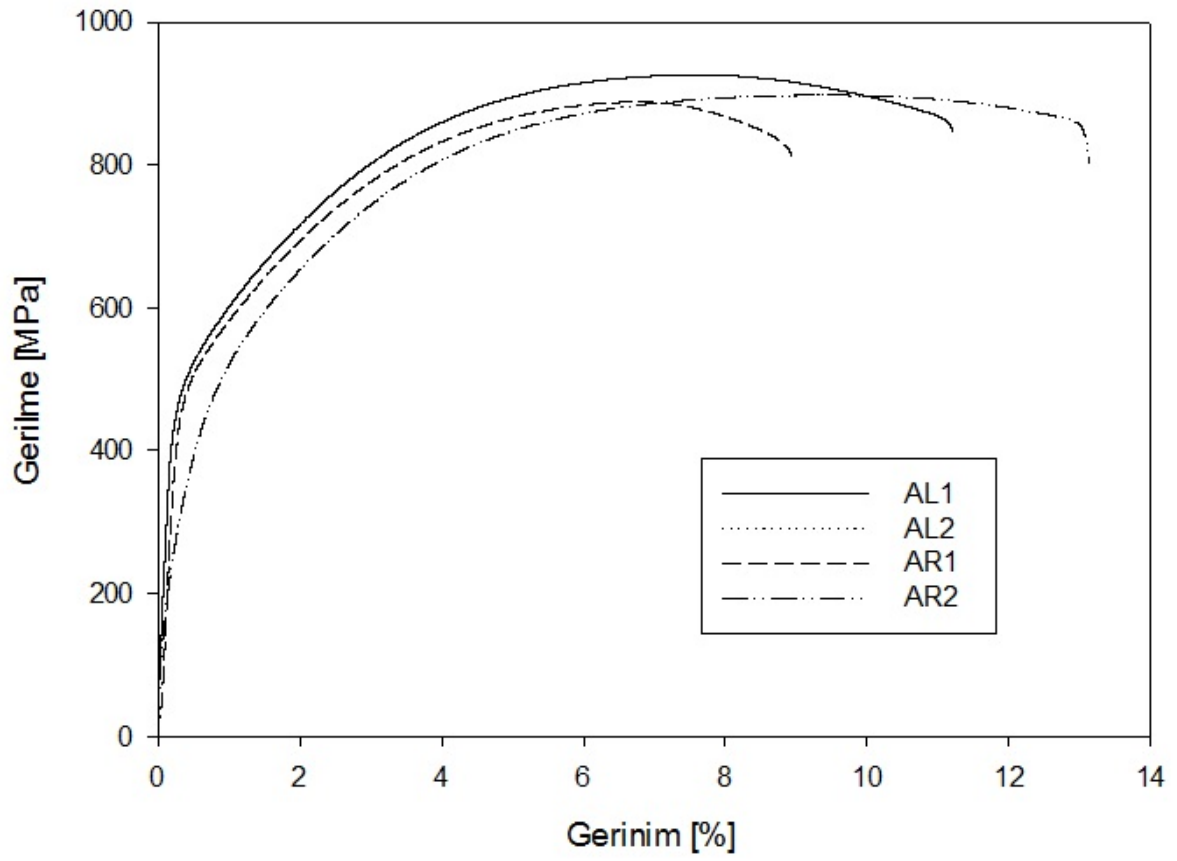
No.	m_E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	F_m kN	$A_{gt(corr.)}$ %	A_{25} %	L_0 mm	S_0 mm ²
1	201	705	1027	20,17	6,03	-	25,00	19,63

Series graph:

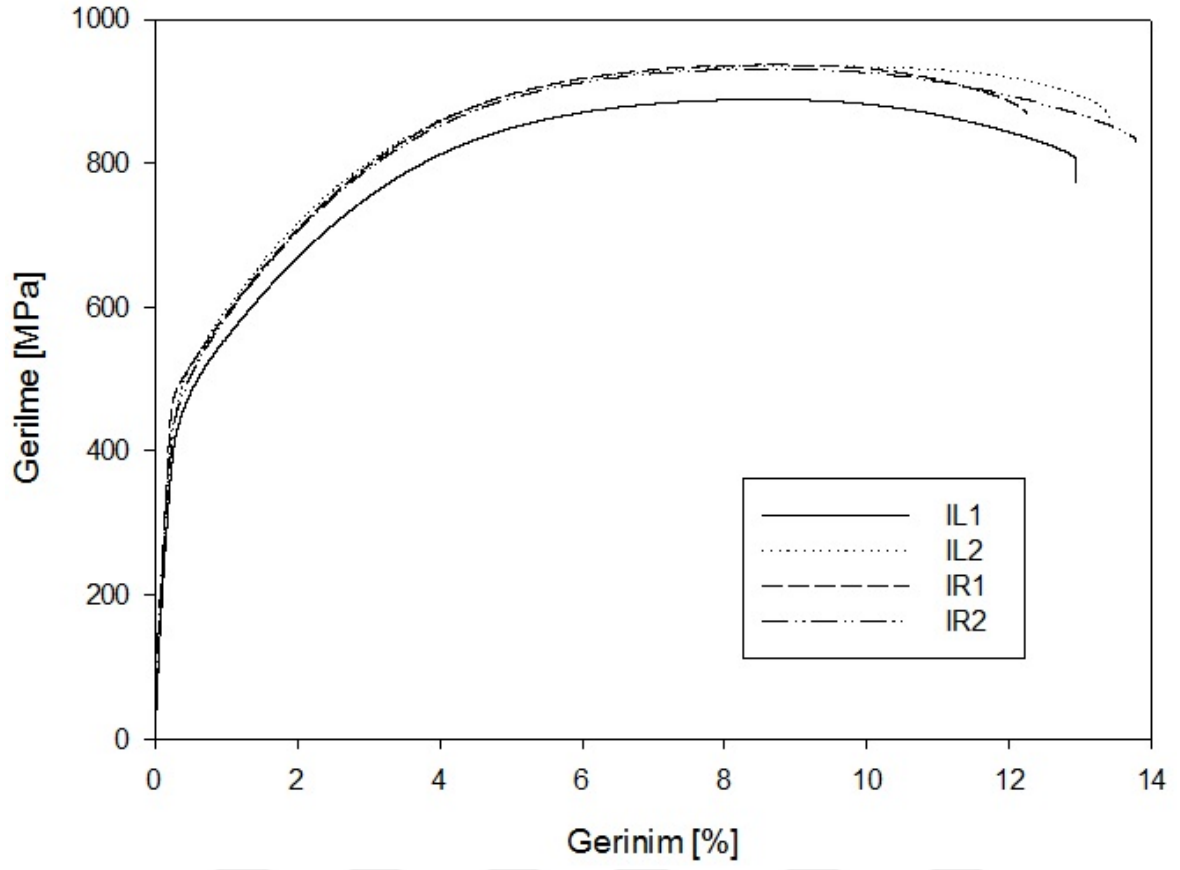


Şekil 3.22. Kaynak merkez bölgesinden (1.Bölge) alınan K1 numunesine ait gerilme-gerinim diyagramı ve temel mukavemet değerleri

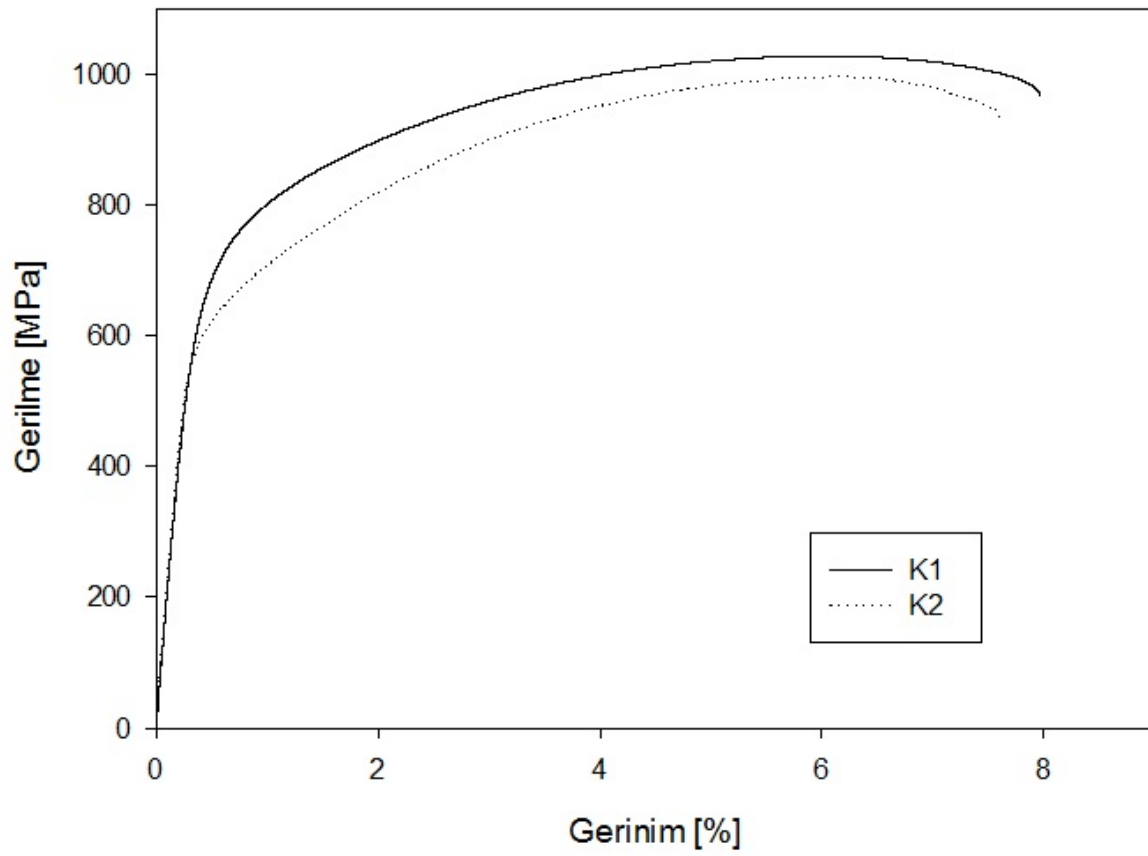
Ana metal, kaynak metali ve geçiş bölgelerinden alınan numunelere ait gerilme ve gerinim grafikleri Şekil 3.23-Şekil 3.25’de yer almaktadır.



Şekil 3.23. Ana metalden hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme gerinim diyagramı



Şekil 3.24. İkinci geçiş bölgesinden hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme gerinim diyagramı



Şekil 3.25. Kaynak merkez bölgesinden (1.Bölge) hazırlanan çekme çubuğu numunelerinin gerilme gerinim diyagramı

Çekme deneyleri sonucu elde edilen temel mukavemet değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

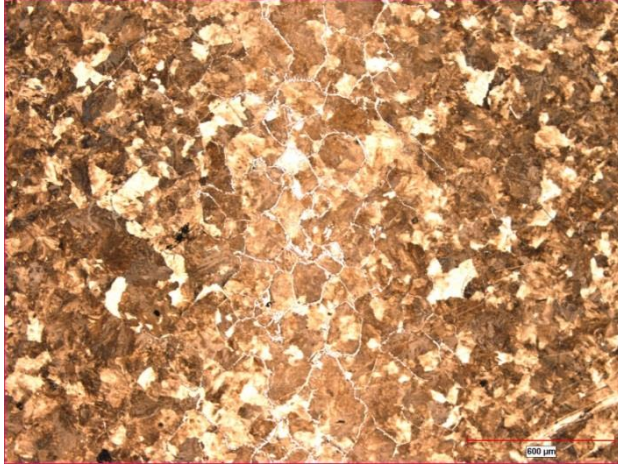
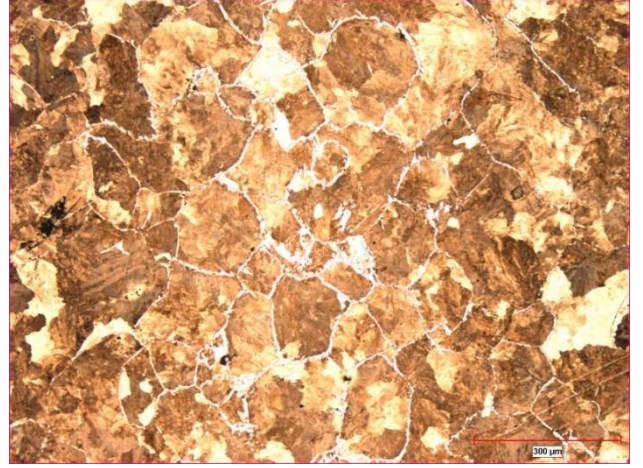
Çizelge 3.3. Ana metal ve geçiş bölgelerinin temel mukavemet değerleri

Numune Kodu / Değer	m_E (GPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	F_m (kN)	$A_{gt (corr.)}$ (%)	L_0 (mm)	S_0 (mm ²)
AL1	203,5	506,9	926,2	18,2	7,6	25	19,6
AL2	211,1	504,8	926,2	18,2	7,6	25	19,6
AR1	212,8	498,8	888,2	17,4	6,7	25	19,6
AR2	189,5	330,9	897,9	17,6	9,4	25	19,6
IL1	222,9	458,0	888,8	17,4	8,5	25	19,6
IL2	213,2	501,1	935,4	18,4	9,0	25	19,6
IR1	167,2	518,4	936,9	18,4	8,6	25	19,6
IR2	191,5	487,4	931,3	18,3	8,6	25	19,6
K1	200,9	704,9	1027,1	20,2	6,0	25	19,6
K2	222,5	614,1	995,6	19,5	6,1	25	19,6

3.5. Mikroyapı Analizi

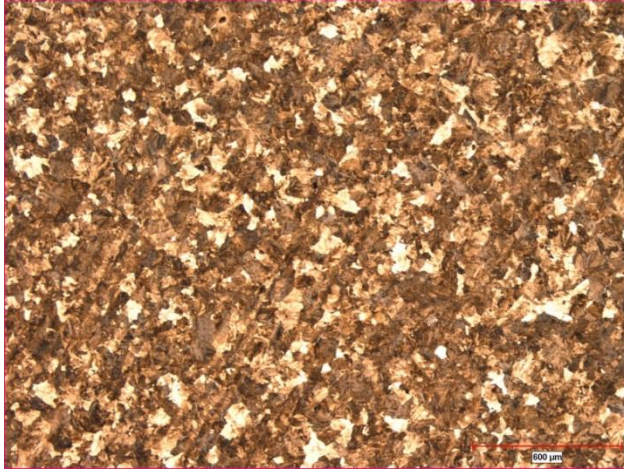
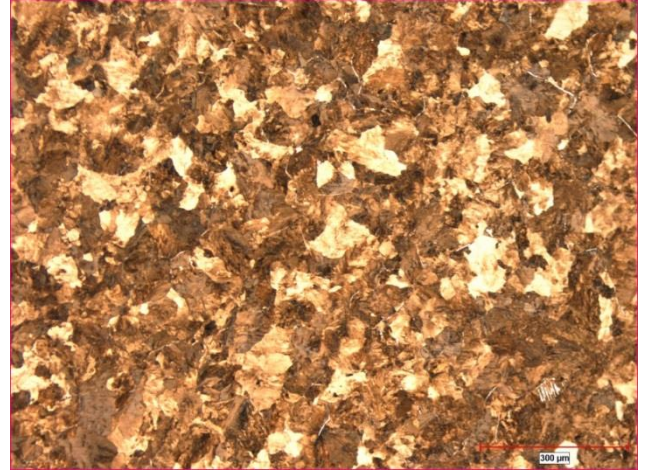
Kesit alınan numuneden, tanımlanan tüm bölgeleri kapsayacak şekilde numune çıkartılmıştır. Numune sırasıyla Metkon marka 320, 600, 800 ve 1200 grid zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır. Sonrasında sırasıyla 3 mikron ve 1 mikron elmas süspansüyunda parlatılmıştır. Parlatılan numune %5'lik Nital ile oda sıcaklığında 7 saniye dağlanmış ve mikroskopta yüzey görüntüleri incelenmiştir. Nikon Eclipse MA200 invert tip mikroskopta 50X ve 100X okülerler kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Clemex Vision Professional Edition NDS yazılımı kullanılarak ölçekli resim formatında kaydedilmiştir.

Buna göre kaynak bölgesinin merkezinden elde edilen görüntü Şekil 3.26'da yer almaktadır. Alın kaynağı merkezinde 2 mm'lik kısımda 0,10% mertebelerinde karbonsuzlama olduğu tespit edilmiştir. ASTM E 112'ye göre tane boyutu 2-3 olarak belirlenmiştir [71]. Şekil 3.26'da kahverengi bölgeler perlitik, beyaz bölgeler ise kaynak çizgisinde ferritik yapı olduğunu göstermektedir.

**a****b**

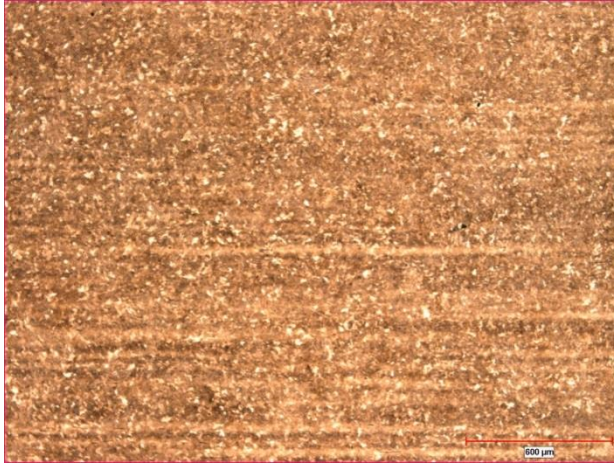
Şekil 3.26. Kaynak çizgisi a) 50X b) 100X

Şekil 3.27’de birinci bölge, yani yeniden kristalleşen bölgenin 50 ve 100 büyütme görüntüleri yer almaktadır. Ana yapının tamamen perlitik olduğu, tane sınırlarında ise ince hatlar şeklinde ferritler bulunduğu görülmektedir. Tane büyümesinin kaynak çizgisine göre daha az olduğu incelenmiştir. ASTM E 112’ye göre tane boyutu 5-6 olarak belirlenmiştir.

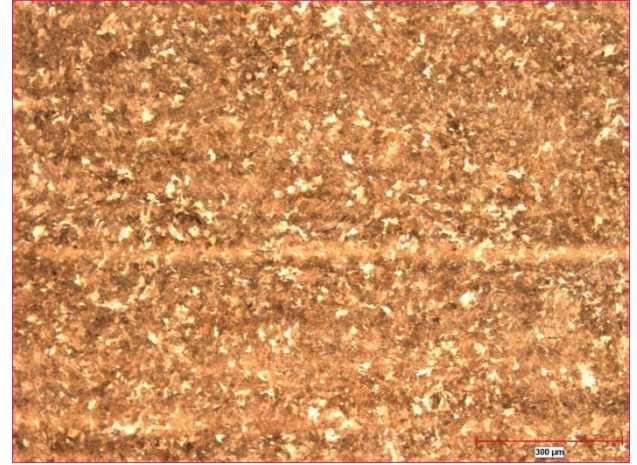
**a****b**

Şekil 3.27. Yeniden kristalleşen bölge a) 50X b) 100X

Şekil 3.28’de 1. ve 2. bölge arasında yeniden kristalleşen bölgenin 50X ve 100X görüntüleri yer almaktadır. Bu bölgede yapı tamamen perlitiktir. Tane yapısı incedir ve ASTM E112’ye göre tane boyutu 8’dir.



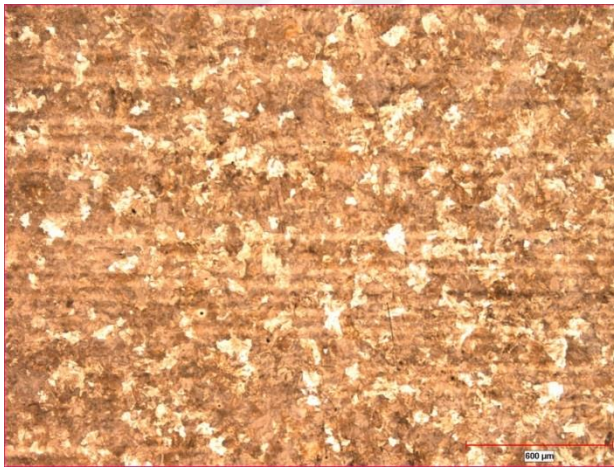
a



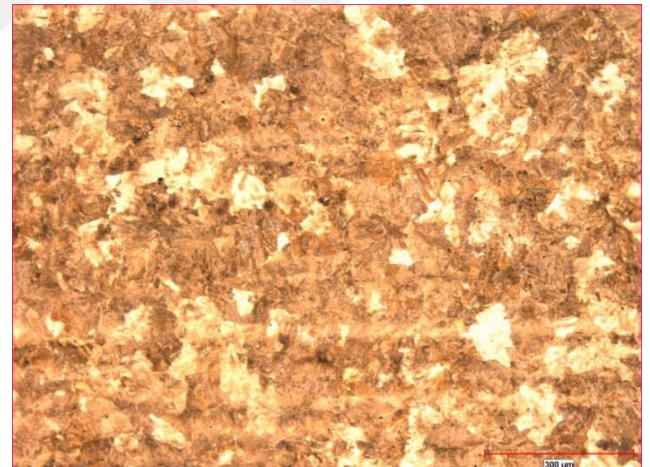
b

Şekil 3.28. 1-2 Geçiş bölgesi yeniden kristalleşen bölge a) 50X b) 100X

Şekil 3.29'da 1. ve 2. bölge geçişinde ince taneden sonra oluşan kalın taneli yapı yer almaktadır. ASTM E 112'ye göre tane boyutu 4-5 olarak tespit edilmiştir. Yapı tamamen perlitiktir.



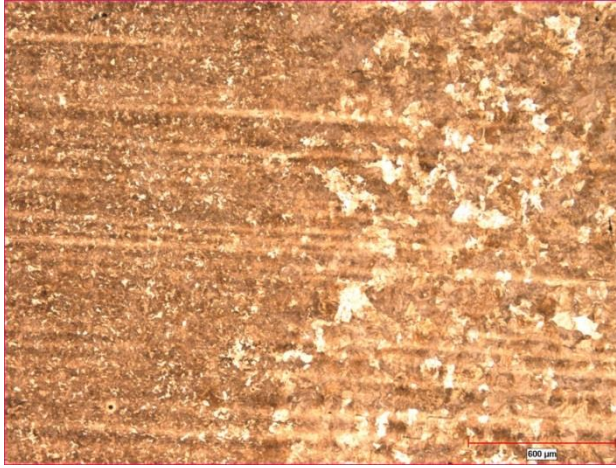
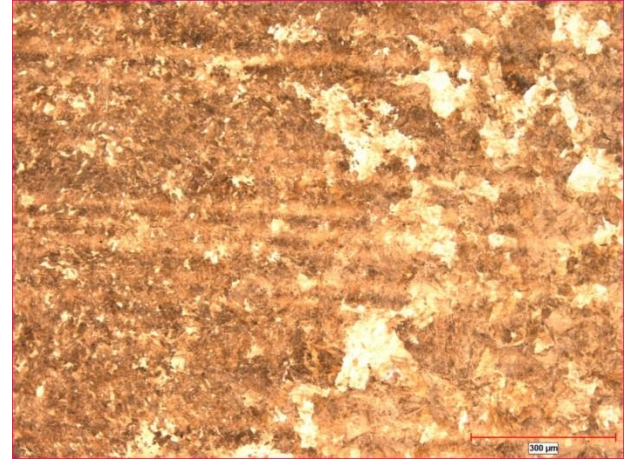
a



b

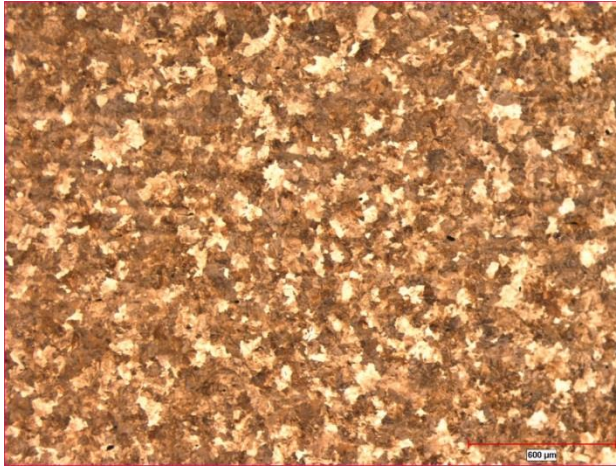
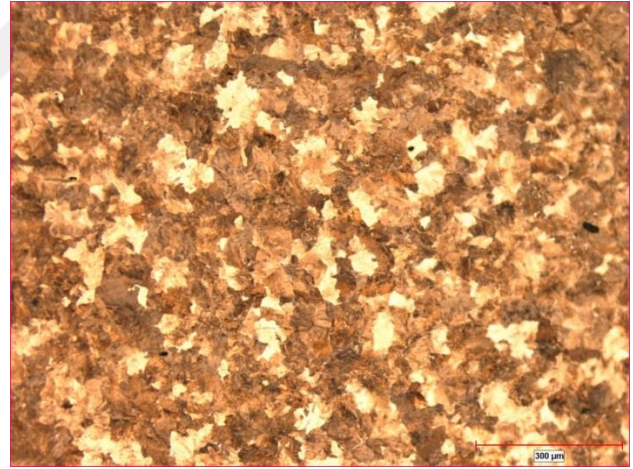
Şekil 3.29. 1-2 Geçiş bölgesi kalın taneli yapı a) 50X b) 100X

Şekil 3.30a ve Şekil 3.30b'de sol bölümde yeniden kristalleşme bölgesi, sağ bölümde ise östenit faz dönüşümü yarım kalmış yapı yer almaktadır. Yapı tamamen perlitiktir.

**a****b**

Şekil 3.30. 1-2 Geçiş bölgesi sınır bölgesi a) 50X b) 100X

Şekil 3.31’de diğer bölgelerde gözlemlenen ana yapı yer almaktadır. Bu bölümlerde yapı tamamen perlitiktir. ASTM E112’ye göre tane boyutu 5-6 olarak tespit edilmiştir.

**a****b**

Şekil 3.31. Ana yapı a) 50X b) 100X

4. SONLU ELEMANLAR METODU VE YORULMA ANALİZİ

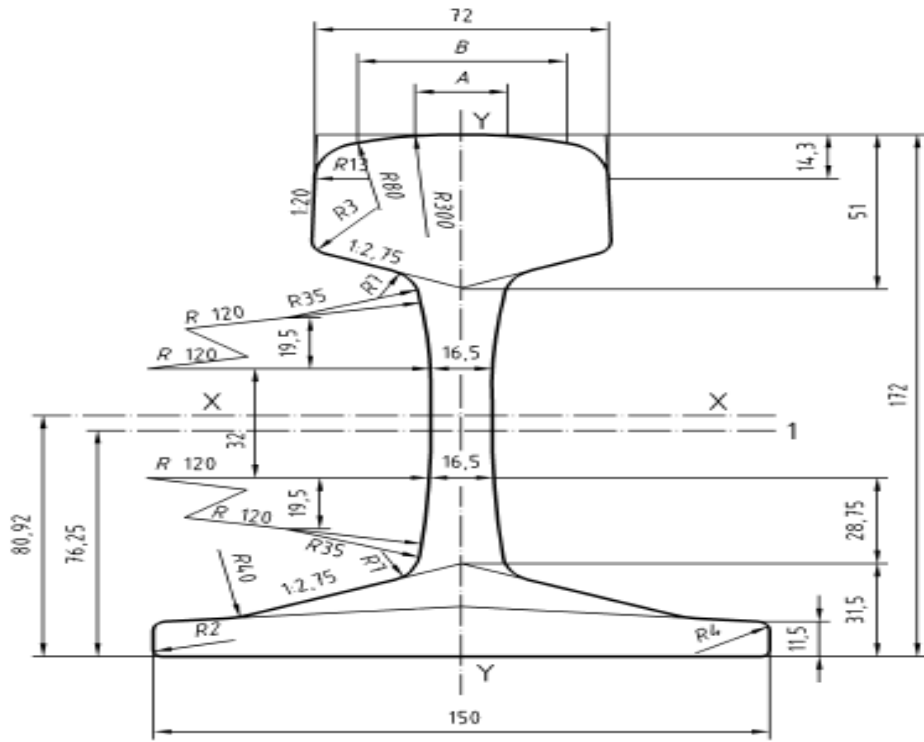
Mühendislik tasarım ve analizleri için birçok yazılım, araştırmacılar ve imalat sektöründe çalışan saha elemanları tarafından etkin olarak kullanılmaktadır. Mühendislik problemlerinin analizinde pek çok araştırmacı sonlu elemanlar metodunu kullanmaktadır [6, 10, 26, 37, 38, 49, 71, 72]. Sonlu elemanlar metoduyla analiz yapan programlar içerisinde ANSYS yazılımının literatürde yoğun olarak kullanıldığı görülmüştür [10, 26, 37, 38, 72, 71].

4.1. Sonlu Elemanlar Analizi ve ANSYS Yazılımı

ANSYS fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan bir paket programdır. Statik, dinamik, yapısal analizler (lineer ve lineer olmayan); akustik, elektromanyetik problemler; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan genel amaçlı bir yazılımdır. Analizler üç kademedede gerçekleşir. Bunlar; problemin tanımlanması, tasarımı sonlu elemanlar çözümü için ağırlara bölme (preprocessing), yüklerin ve sınır şartlarının atanması, çözümün gerçekleştirilmesi (solution) ve sonuçların değerlendirilmesidir (postprocessing). ANSYS yazılımında tasarım yapılabilen veya diğer bilgisayar destekli tasarım programlarında tasarlanan karmaşık geometri modelleri aktarılabilmektedir. Yapılan analizler sonucu mühendislik problemleri sanal ortamda simüle edilerek optimum çözümler üretilmektedir.

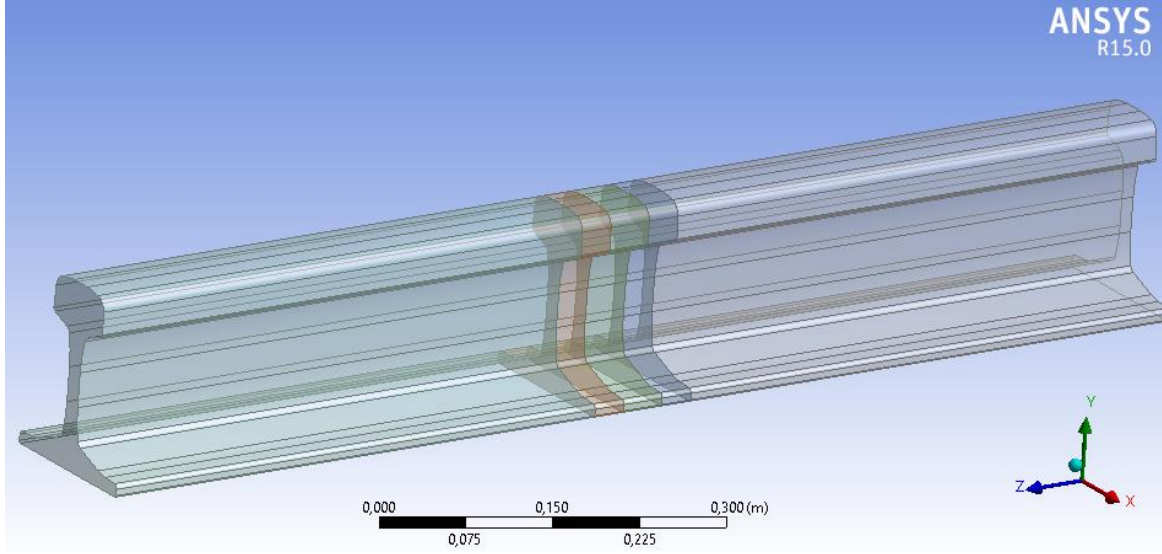
4.2. Modelleme

Deneyisel çalışmalarda UIC 60 ray profili kullanılmıştır. TS EN 13674-1 standardında tanımlanan ray profili ve temel teknik değerleri Şekil 4.1’de verilmiştir [63]. Buna göre rayın profil yüksekliği 172 mm, ray mantarının genişliği 72 mm, ray gövdesi daralan kesitte ilerlemekte ve en düşük genişlik değeri 16,5 mm olmakta, ray tabanının genişliği ise 150 mm’dir. Ray tabanının 80,92 mm üzerinde rayın nötr eksenini almaktadır ve buna göre atalet momenti $3038,3 \text{ cm}^4$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. UIC 60 ray profili ve temel mühendislik değerleri [63]

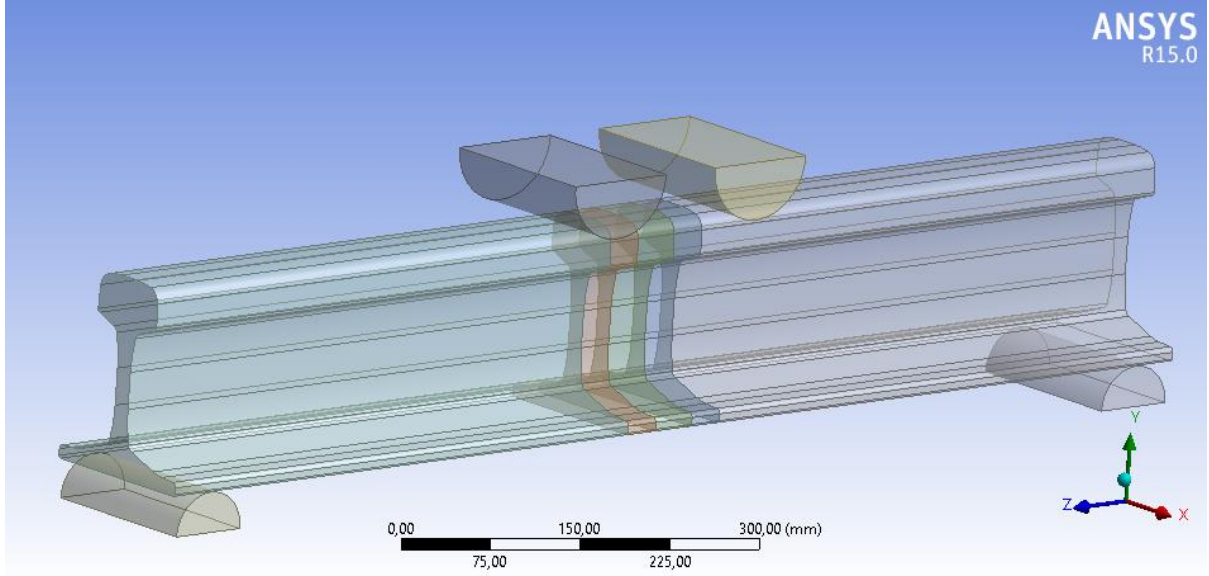
UIC 60 ray profili Siemens NX 9 katı model tasarım programında tasarlanıp ANSYS Workbench R.15.0 programına aktarılmıştır. ANSYS “Geometry-Design Modeller” modülüne aktarılan tasarım Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.2. ANSYS Design Modeller modülünde açılan kaynaklı ray modeli

Şekil 4.2’de yer alan modelde alın kaynaklı ray, tezin deneysel çalışmalar bölümünde elde edilen bulgulara göre tasarlanmıştır. Buna göre kaynaklı ray merkezde yer alan birinci bölge, birinci bölgeye bitişik ikinci bölge ve UIC ray ana malzemesinden oluşan üçüncü bölgeyi içermektedir. Rayın z eksenindeki uzunluğu 1100 mm’dir.

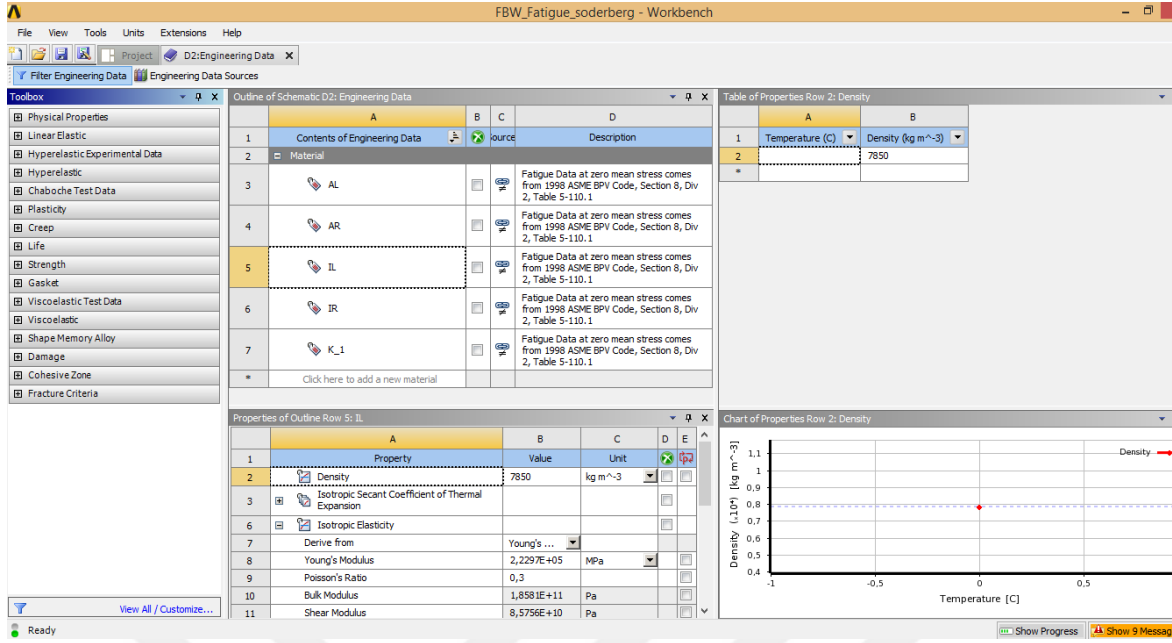
Şekil 4.3’de görüldüğü gibi dört nokta eğme yorulma analizi için, ray tabanında ve ray mantarında ikişer adet olmak üzere toplam dört adet mesnet tanımlanmıştır. Ray mantarında yer alan mesnetlerin yarıçapı 50 mm, tabanda yer alanlar ise 35 mm olarak tasarlanmıştır. Ray tabanındaki mesnet açıklığı 1020 mm ve ray mantarındaki mesnet açıklığı ise 154 mm olarak TS EN 14587-2 standardına uygun olarak tasarlanmıştır [58].



Şekil 4.3. ANSYS Design Modeller modülünde açılan kaynaklı ray dört nokta yorulma test düzeneği

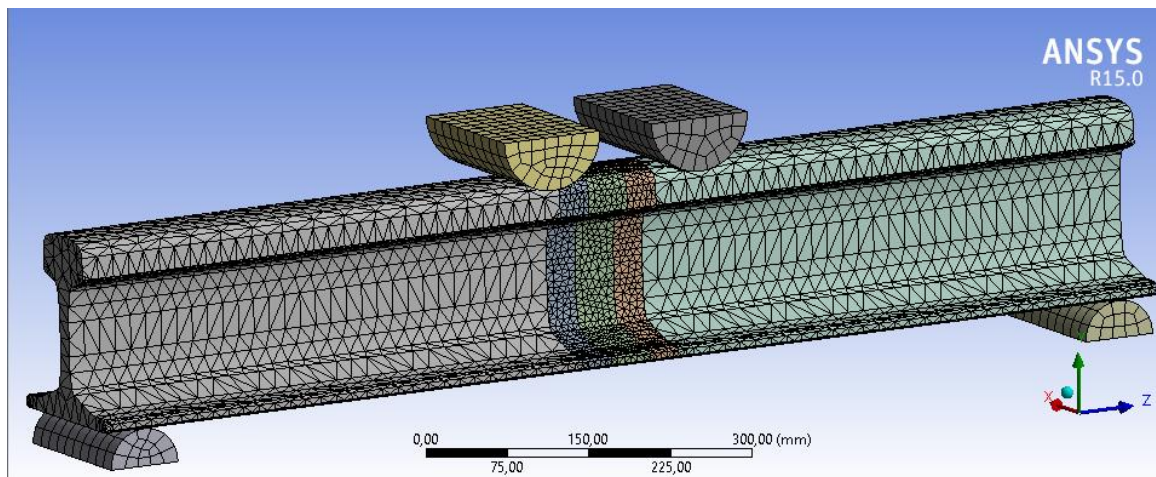
4.3. Sınır ve Çevresel Koşulların Tanımlanması

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen mühendislik değerleri ANSYS R15.0 programında “Engineering Data” modülünde malzeme değerleri olarak tanımlanmıştır. Buna göre Çizelge 3.4’de tanımlanan değerlerin ortalaması ANSYS Workbench R15.0’de tasarımın ilgili bölümlerine tanımlanmıştır. Birinci bölge için K1 ve K2 değerlerinin ortalaması, ikinci bölge için IL1, IL2 ve IR1, IR2 değerlerinin ortalaması, üçüncü bölge olan ray ana metali için ise AR1, AR2 ve AL1, AL2 değerlerinin ortalaması alınarak yazılımda tanımlanmıştır. Şekil 4.4’de yazılımda Engineering Data modülünde modele tanımlanan malzeme değerleri yer almaktadır [37].



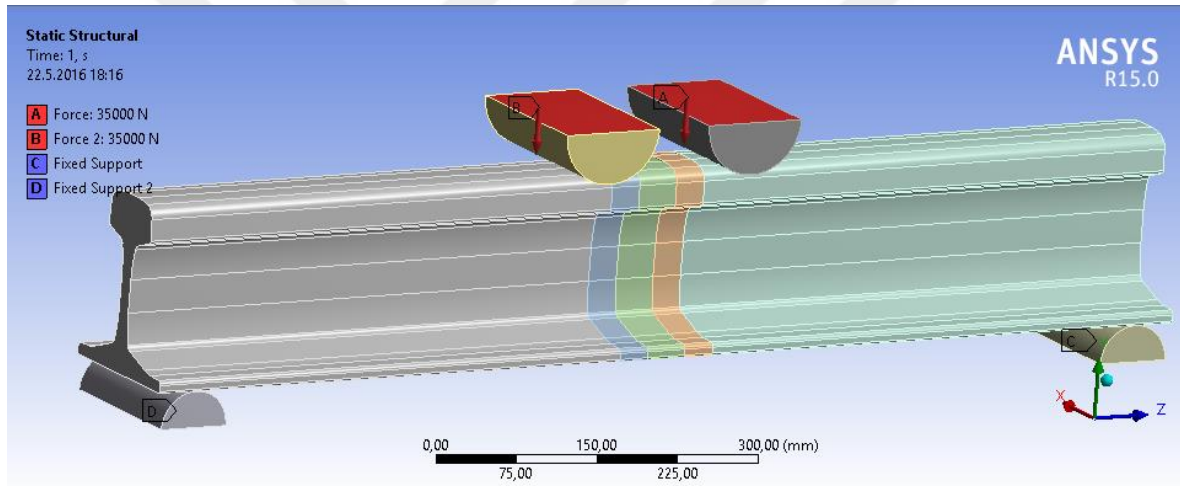
Şekil 4.4. Engineering Data modülünde tanımlanan malzeme değerleri

Daha sonra ANSYS Workbench R15.0 Mechanical modülünde sonlu elemanlar çözümü için, tasarım ağırlara (meshing) bölünmüştür. Model dört üçgen yüzlü şekilde (tetrahedron) ağırlara bölünmüş, hassas çözüm beklenen bölgelerde ağ boyutu küçük tutulmuştur. Birinci ve ikinci bölgede yer alan üç geometri içinde her bir ağ için 7 mm eleman boyu tanımlanmıştır. Ağırlara bölme işlemi sonucu tasarım 70 490 düğüm, 39 235 elemandan oluşmuştur [74]. Ağırlara bölünmüş model Şekil 4.5’de yer almaktadır.



Şekil 4.5. Dört üçgen yüzlü şekilde (tetrahedron) ağırlara bölünmüş model

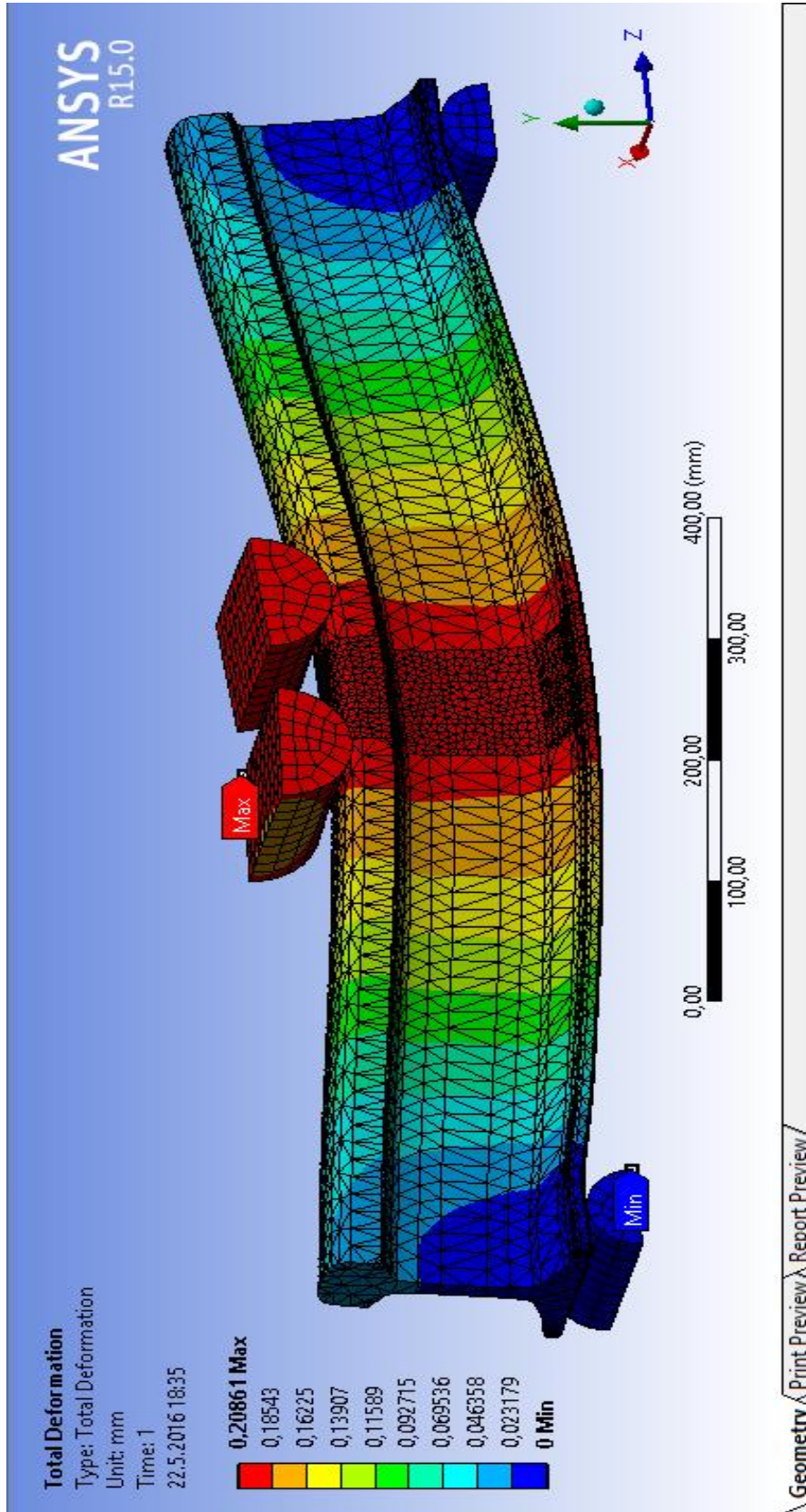
Malzeme mühendislik değerlerinin tanımlanmasının ve ağırlara bölme işleminin ardından, yükler ve mesnetler tanımlanmıştır. TCDD envanterinde çalışmakta olan CAF HT 6500 serisi yüksek hızlı tren 6 vagonundan oluşmaktadır. İlk ve son vagonlar TCB ve TCF olarak, aradaki vagonlar ise MIFc, MIF1A, MIF1B ve MIF2 olarak isimlendirilmiştir. Her bir vagona iki adet boji aksamı bulunmakta ve her bojide ise iki adet tekerlek aksı yer almaktadır. Buna göre en ağır vagon olan MIF1B referans alındığında her bir aks için ortalama yük değeri 140 kN olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla her bir tekerleğin kaynaklı raya uyguladığı statik yük 70 kN olmaktadır. Dört nokta eğme yorulma düzeneğinde 70 kN luk yük iki mesnete paylaştırılmış ve her birine 35 kN yük tanımlanmıştır [75]. Ray tabanında yer alan iki mesnet ise sabit olarak yazılıma tanımlanmıştır. Buna göre sınır koşulları tanımlanan kaynaklı ray düzeneği Şekil 4.6’da yer almaktadır.



Şekil 4.6. Yazılıma tanımlanan yük değerleri

4.4. Statik Analiz, Yorulma Teorisi ve ANSYS Uygulaması

ANSYS Workbench R15.0 yazılımının “Mechanical” modülünde tasarlanan ve sınır şartları belirtilen modelin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Öncelikle tek yüksek hızlı tren setine ait bir aksın tekerinin kaynaklı rayda yaptığı statik etki incelenmiştir. Buna göre tekerlek yükü olan 70 kN yük, ray mantarına etki eden iki adet mesnete paylaştırılmıştır. Statik yükleme sonucu rayda oluşan toplam deformasyon Şekil 4.7’de yer almaktadır.

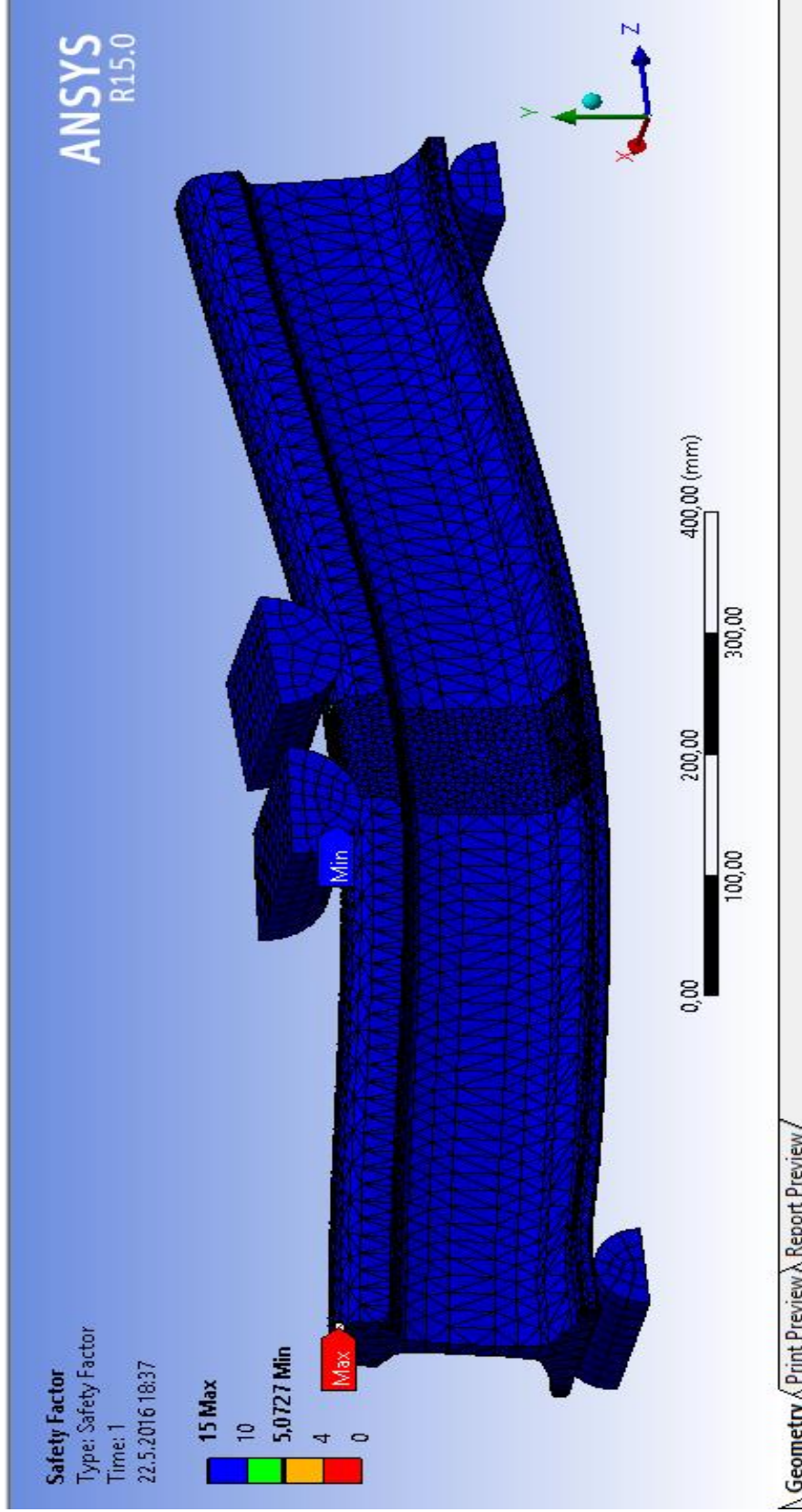


Şekil 4.7. YHT setine ait tekerleğin kaynaklı raya statik yüklemesi sonucu oluşan toplam deformasyon

Şekil 4.7’de deformasyon birimi milimetredir. Toplam deformasyonun birinci bölge, ikinci bölge ve ikinci bölgeye komşu olan ana ray malzemesi üzerinde olduğu görülmektedir. En yüksek değerine birinci bölgede ulaşmakta ve bu değer 0,20861 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Kaynaklı ray merkezi olan birinci bölgeden uzaklaştıkça bu değer kademeli olarak azalmaktadır.

Kaynaklı raya ait güvenlik faktörü Şekil 4.8’de yer almaktadır. Mevcut sınır koşulları altında tasarımın statik koşullarda ray genelinde en yüksek 15 kata kadar güvenli olduğu anlaşılmıştır.

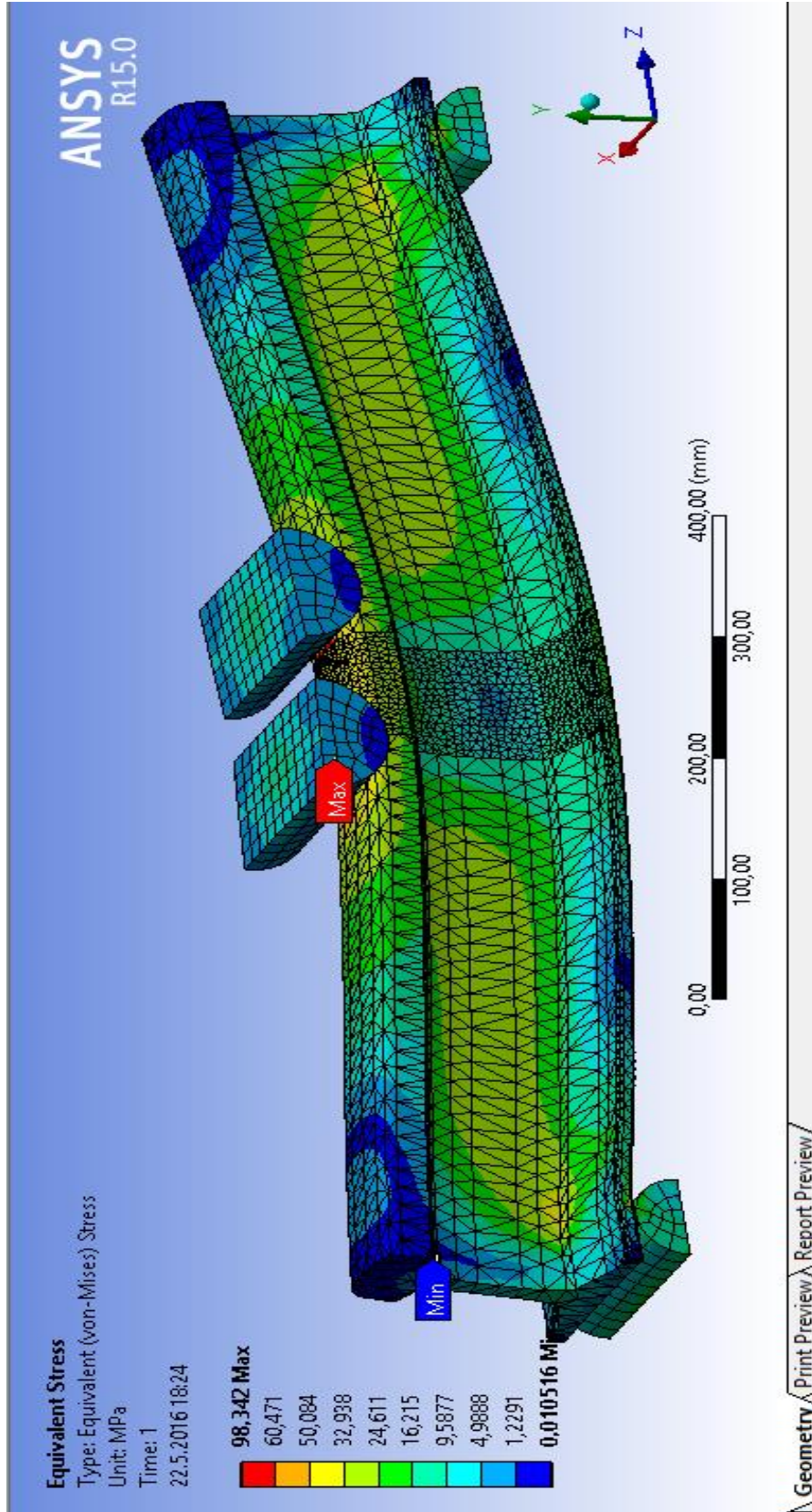




Şekil 4.8. Belirtilen sınır koşulları altında yapılan statik analiz sonucu elde edilen güvenlik faktörü değeri

Tanımlanan sınır koşulları altında 70 kN toplam tekerlek yükü sonucu oluşan gerilme değerleri Şekil 4.9'da yer almaktadır. Analiz sonucu gerilme değerleri en yüksek 98,34 MPa mertebelerine ulaşmaktadır. En yüksek değerlerin ray mantarında, ikinci bölge ile ray ana malzemesi arasındaki geçiş bölgelerinde olduğu görülmüştür. Ray mantarında kaynak merkezinde bu değer 38,86 MPa değerlerine kadar kademeli olarak düşmüş, kaynak merkezinden sonra diğer geçiş bölgesine kadar kademeli olarak yükselmiş ve en yüksek değere ulaşmıştır. Ray gövdesinde birinci bölge nötr ekseninde, gerilme değerinin 4,04 MPa mertebelerinde olduğu anlaşılmıştır. Ray tabanında kaynaklı bölgede 22,32 MPa gerilme değerleri kaydedilmiştir. Tabanda kaynaktan uzaklaştıkça gerilme değerlerinin kademeli olarak azaldığı anlaşılmıştır.





Şekil 4.9. Toplam 70 kN statik yük altında oluşan gerilme değerleri

4.5. Kaynaklı Ray İçin Yorulma Analizi

Makina elemanlarına etki eden yükler değişken kesitler altında farklı gerilmelerin oluşmasına neden olur. Değişken gerilmelerin etkisi altında malzemenin iç yapısındaki değişikliklere yorulma, malzemenin hasarlanmasına kadar geçen süreye ise ömür denilmektedir. Malzemenin ömrü genellikle çevrim sayısı ile ifade edilir. Çeşitli yüklerin etkisi altındaki parçaların tasarımında yorulma analizinin dikkate alınması oldukça önemlidir. Çeşitli yükler altında oluşan gerilmeler sınır değerlerinin çok altında olmasına rağmen, dinamik etkilerle malzemenin mikro yapısındaki değişimler sonucu aniden hasar oluşarak, sistem uygulanan yükü taşıyamaz hale gelmektedir. Yorulma özellikleri genellikle malzemenin yük veya gerilme ile ömre karşılık gelen tekrar sayısı arasındaki grafikte ifade edilir [76]. Ray ve tekerlek gibi demiryolu bileşenlerinde malzemelerin yağlanması yorulma ömrüne pozitif yönde etki yaptığı anlaşılmıştır [77].

Yorulma analizlerinde gerilme ömrü, gerinim ömrü ve kırılma mekaniği olmak üzere üç temel metot kullanılmaktadır. ANSYS Workbench R15.0 yazılımı gerilme ve gerinim ömrünü kullanarak malzemenin yorulma analizlerinin yapılmasına imkan sağlamaktadır. Gerinim ömrü metodu düşük çevrim sayılarını karakterize eden ve çatlak başlangıcını kapsayan bir yorulma analiz yöntemidir. Gerilme ömrü ise malzemenin toplam ömrünü kapsayacak şekilde analiz yapar. Genellikle ömür-çevrim sayısı diyagramına dayanır ve yüksek çevrimli yorulma analizlerinde kullanılmaktadır. Çatlak başlangıcı ve çatlak ömrünün toplamı malzemenin toplam ömrünü verir [72, 76 -77].

Alın kaynaklı ray yorulma analizleri için, saha koşullarını en iyi temsil eden dört nokta eğme yorulma düzeneği tanımlanmaktadır. Kaynaklı ray yüksek çevrim sayılarında yorulmaya neden olan eğilme yüklerine maruz kalmaktadır. Bu düzenekte ray mantarında bası, ray tabanında ise çeki gerilmeleri oluşmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda ağır yük hatları için ray üzerinde enine kusurun başlangıç noktası olan, merkez düzlemsel çatlaklar eğme yorulma yükü altında çeki gerilmesine maruz kalması sonucu oluşmaktadır. Ağır yük hatlarında ray üzerinden tekerlek geçmesi sonucu 200 MPa seviyelerinde gerilmeler oluşmaktadır ve bunun sonucunda çatlak başlangıç noktası yüzeyden 56 mm içeride konumlanmaktadır [80]. Standartlara uygun olarak tasarlanan deney düzeneği “Modelleme” bölümünde açıklanmıştır. Dört nokta eğme düzeneğinde gerilme değerleri Eş. 1 yardımıyla hesaplanmaktadır [74, 79, 80].

$$\sigma = Mc / I \quad (1)$$

Burada;

σ : En yüksek eğilme gerilmesi

M : Eğilme momenti

c : Nötr eksene olan uzaklık

I : Atalet momenti

Bu çalışmada UIC 60 profilli alın kaynaklı rayın toplam yorulma ömrü analiz edilmiştir. Analizde sabit genlik ve orantılı yükleme koşulları tanımlanmıştır. Malzemenin yorulma özellikleri tam değişken (fully reversed), sıfır tabanlı (zero-based), oransal (ratio) ve sabit genlikli testlerle elde edilir. Tam değişken yükleme koşulları olduğunda herhangi bir ortalama gerilme teoreminin tanımlanmasına gerek yoktur. Ancak gerçek koşullarda tam değişken yükleme olma durumu oldukça zordur. Bu nedenle malzeme üzerinde yorulma analizi için ortalama gerilmelerin hesaplanması gerekmektedir. Ortalama gerilmeleri hesaplamak için Soderberg, Goodman ve Gerber teorileri kullanılmaktadır [79, 80]. Soderberg teoremi düşük süneklilikteki malzemeler için uygundur ve çalışmada Soderberg teoremine göre çözüm yapılmıştır. Eş. 2, 3 ve 4'de Soderberg, Goodman ve Gerber ortalama gerilme hesaplama formülasyonları yer almaktadır [74, 76, 77, 79, 80].

$$\frac{\sigma_{Değişken}}{S_{Dayanma Limiti}} + \frac{\sigma_{Ortalama}}{S_{Akma Dayanımı}} = 1 \quad (2)$$

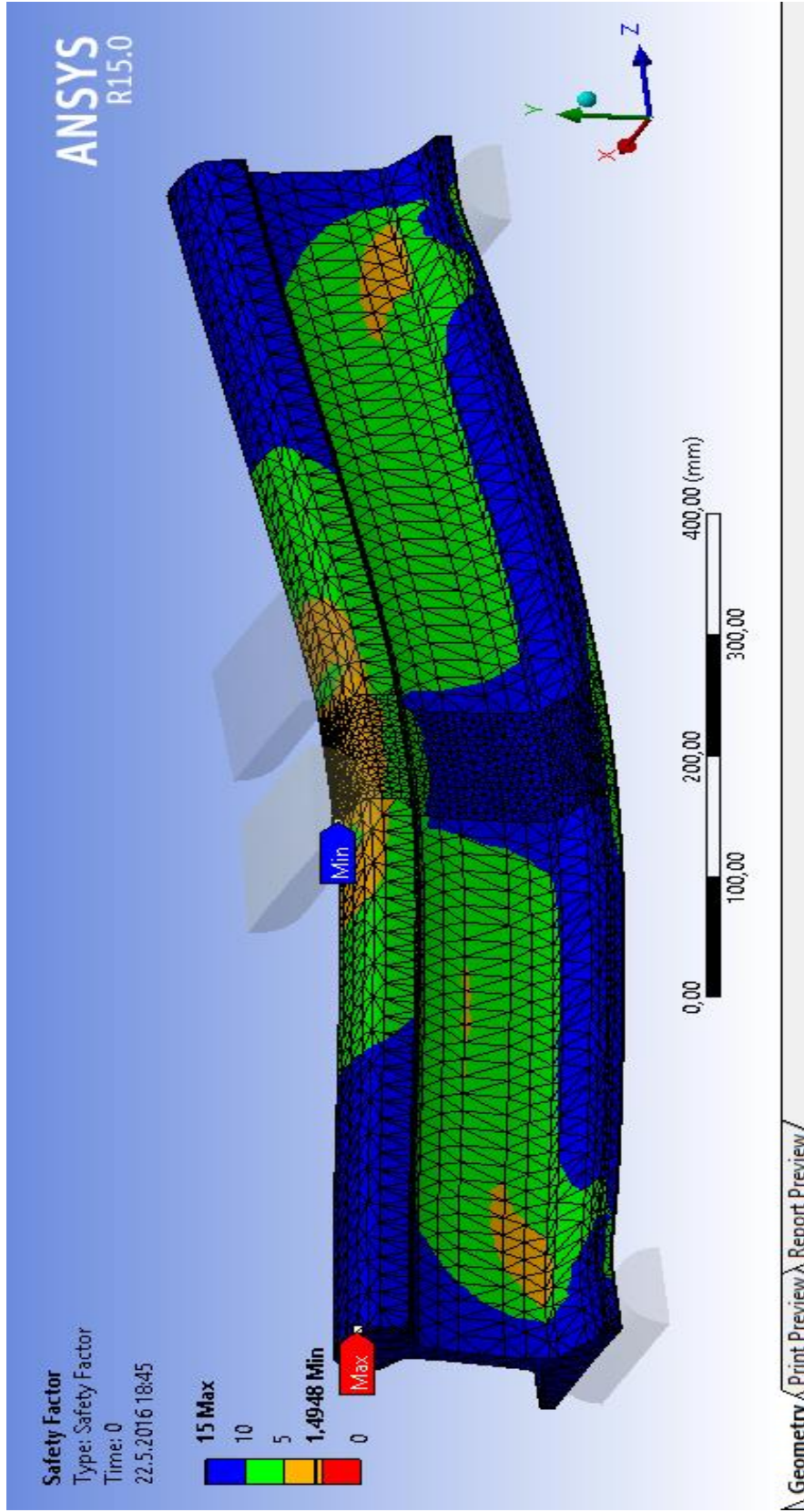
$$\frac{\sigma_{Değişken}}{S_{Dayanma Limiti}} + \frac{\sigma_{Ortalama}}{S_{En Yüksek Dayanım}} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{Değişken}}{S_{Dayanma Limiti}} + \left(\frac{\sigma_{Ortalama}}{S_{En Yüksek Dayanım}} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

Soderberg teoremi kullanılarak ortalama gerilmelerin hesaplandığı, sıfır tabanlı yorulma testi kullanılarak analiz yapılmıştır. Analiz tipi olarak gerilme ömrü seçilmiştir.

İki adet ray ana malzemesi, iki adet ikinci bölge ve bir adet birinci bölge olmak üzere beş elemandan oluşan tasarımda, yorulma hassasiyetine ait parametreler yazılımda tanımlanmıştır.

Yapılan yorulma analizi sonucu elde edilen güvenlik faktörü değeri Şekil 4.10'da yer almaktadır. Buna göre elde edilen en yüksek değer statik analizde elde edilen değerle benzerlik göstermektedir. En düşük değer ise mantarda ikinci bölge ve ray ana malzemesi arasındaki geçiş bölgesindedir. Bu değer 1,49 olarak analiz edilmiştir. Güvenlik faktörü kaynaklı ray malzemesinin tüm kesitinde homojen olarak dağılmamıştır. Buna göre kaynağının olduğu birinci ve ikinci bölgede, ray mantarında elde edilen değer birinci bölgeden itibaren ana ray malzemesine doğru 4, 3 ve 2 olarak düşerek ilerlemektedir. Ana ray malzemesine ulaştıktan sonra 7-8 mertebelerinde analiz edilmiştir. Bunun yanı sıra ana ray gövdesinde nötr eksene yakın bazı bölgelerde ve ray tabanında yer alan mesnetlere yakın bölgelerde yine 5 mertebelerine düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.10. Yorulma analizi sonucu elde edilen güvenlik faktörü

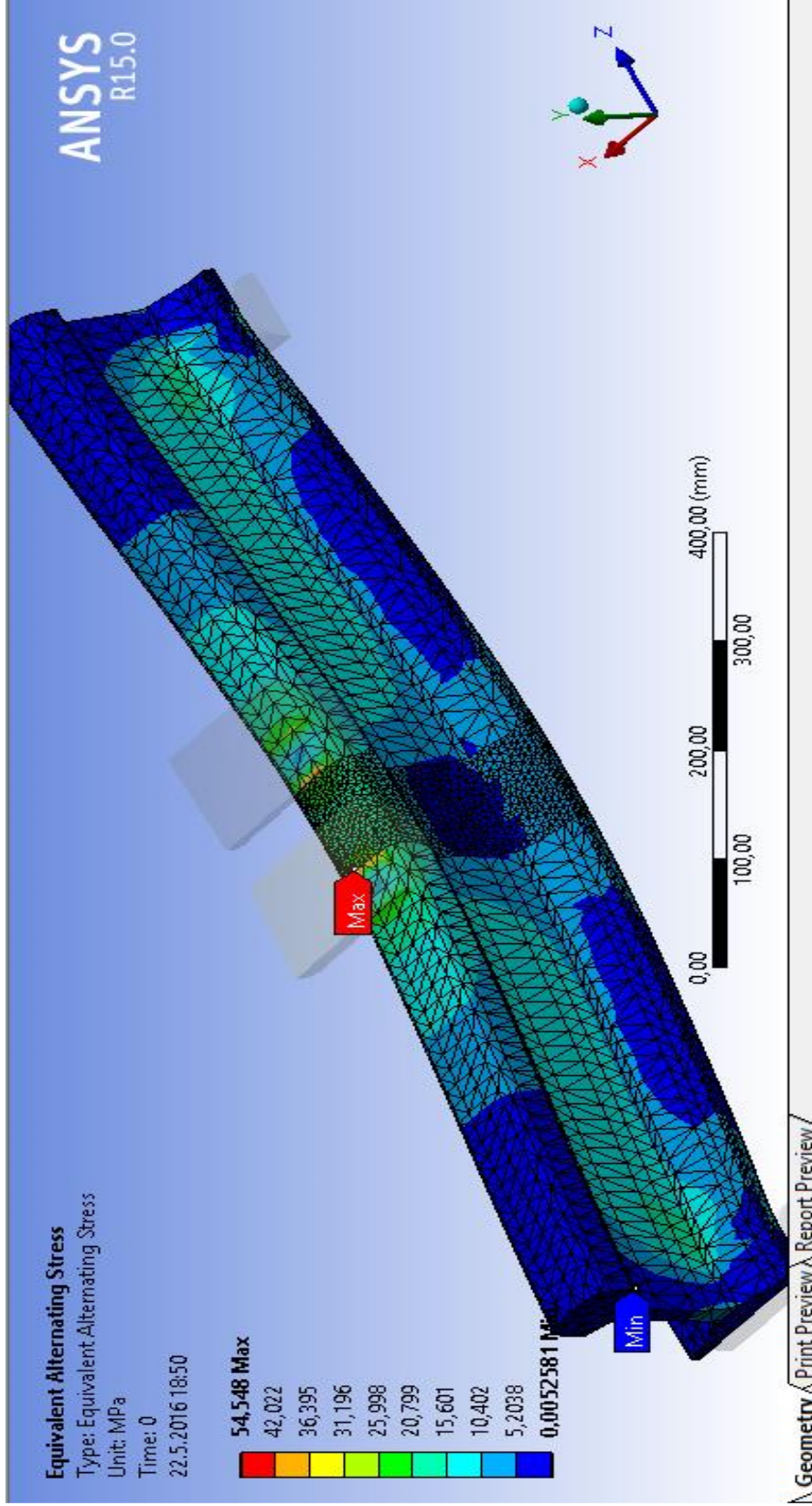
Yorulma analizi sonucu elde edilen gerilme değerleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de yer almaktadır. Şekil 4.11’de ray mantarında ve ray gövdesinde elde edilen analiz sonuçları yer almaktadır. Buna göre mantarda en yüksek gerilme değeri 54,5 MPa değerine ulaşmaktadır. Ray mantarında ikinci bölge ve ana ray malzemesi arasında yer alan geçiş bölgelerinde elde edilen bu değer birinci bölgeye doğru ilerledikçe azalmaktadır. Birinci bölgede mantar merkezinde 20,2 MPa, ikinci bölgede 25,5 MPa olarak hesaplanmıştır. Ray gövdesinde birinci bölgede yer alan nötr ekseninde gerilme değerleri 2 MPa seviyelerine kadar düşmektedir.

Şekil 4.12’de yorulma analizi sonucu ray tabanında oluşan gerilme değerleri yer almaktadır. Ray tabanının mesnetle temas eden bölgelerinde 44,3 MPa seviyelerine çıkan gerilme değerleri, mesnetlerle temas eden bölgeden uzaklaştıkça kademeli olarak düşmekte ve ray ana malzemesinde 0,2 MPa seviyelerine kadar düşmektedir. Tabanda en düşük gerilme değerinden sonra, ana metalden kaynak bölgesine doğru ilerledikçe tekrar kademeli olarak artış göstermekte ve ikinci bölgede 10,6 MPa mertebelerine ulaşmaktadır. Birinci bölgede 11,4 MPa olan gerilme değeri kaynak bölgelerinden uzaklaştıkça tekrar düşmektedir.

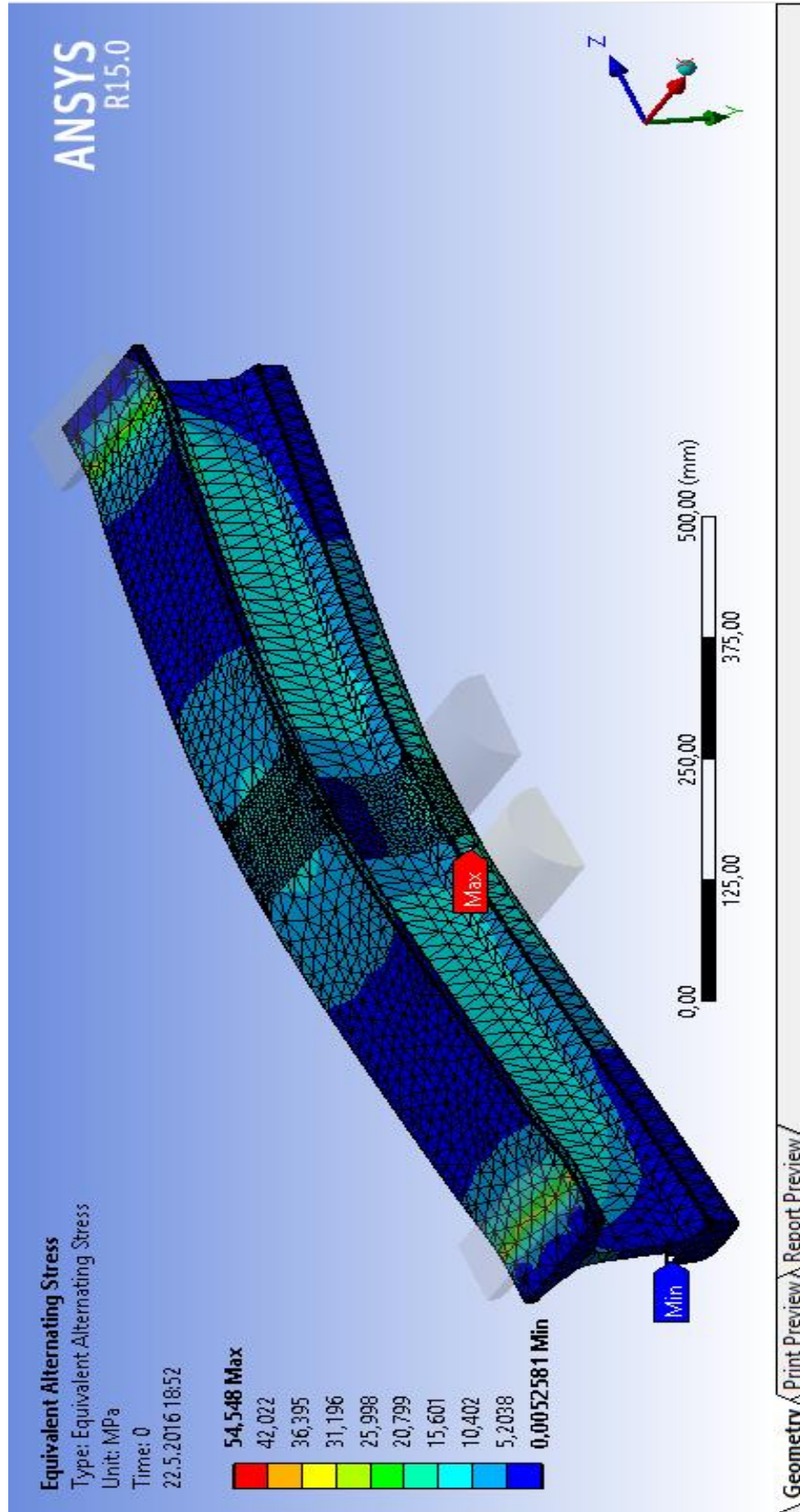
Çizelge 4.1’de birinci bölge, birinci bölge ve ikinci bölge arasında kalan geçiş bölgeleri, ikinci bölge ve ana metal geçiş bölgelerinde ve ana metalde çeşitli düğüm noktalarında elde edilen gerilme değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Yorulma analizi sonucu ray mantar ve tabanında elde edilen gerilme değerleri

Bölge/ Eş Değişken Gerilme	Ana Metal	Geçiş Bölgesi 1	İkinci Bölge	Geçiş Bölgesi 2	Birinci Bölge (Merkez)	Geçiş Bölgesi 3	İkinci Bölge	Geçiş Bölgesi 4	Ana Metal
Mantar (MPa)	24,58	50,57	22,29	19,41	20,29	20,94	25,50	54,54	26,14
Taban (MPa)	8,31	11,16	10,71	10,58	11,45	11,32	11,30	11,24	9,82



Şekil 4.11. Yorulma analizi sonucu ray mantarında ve ray gövdesinde elde edilen gerilme değerleri

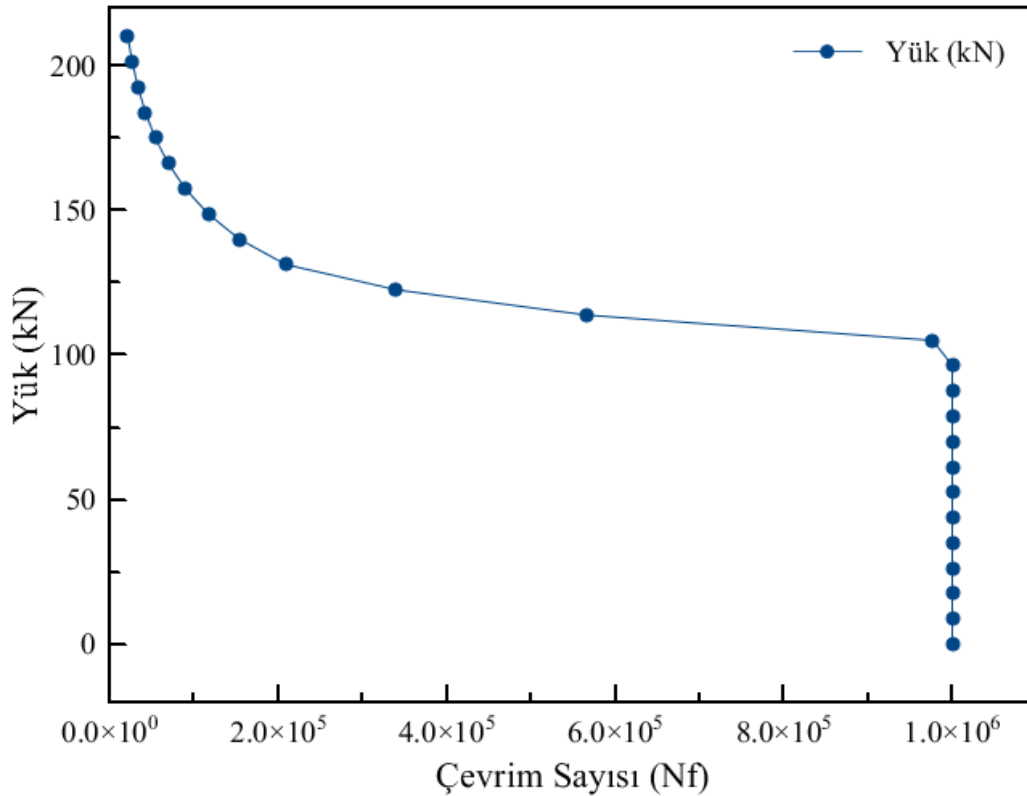


Şekil 4.12. Yorulma analizi sonucu ray tabanında elde edilen gerilme değerleri

Kaynaklı ray için yorulma ömrünü belirten çevrim sayısı ve uygulanan yük diyagramı Şekil 4.13'de yer almaktadır. CAF HT 6500 serisi yüksek hızlı tren setlerinin tekerlek yükü olan 70 kN yük altında, alın kaynaklı rayın milyon (10^6) çevrim sayısına, yani sonsuz ömre ulaştığı yapılan analiz sonucu anlaşılmıştır.

Kritik yük olan, 96,25 kN tekerlek yüküne kadar alın kaynaklı rayın milyon çevrim sayısına ulaştığı, ancak bu değerin üzerinde bir yükleme olduğunda çevrim sayısının azaldığı ve sonsuz ömürden uzaklaşıldığı anlaşılmıştır.

Yükleme statik değerin 1,5 katına çıktığında, yani 105 kN değerine ulaştığında sistemin dayanacağı çevrim sayısı $9,77 \times 10^5$, iki katına çıktığında yani 140 kN değerine ulaştığında $1,54 \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır. Yük arttıkça çevrim sayısının logaritmik olarak azaldığı görülmüştür. Buna göre, statik yükün iki buçuk katı altında, yani 175 kN yük altında 54 141 çevrim ve üç kat yükte, 210 kN altında 21 642 çevrim sayısına ulaştığı yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu anlaşılmıştır.



Şekil 4.13. Kaynaklı ray için yüke göre değişen çevrim sayısı diyagramı



5. GERİNİM ÖLÇERLER İLE KAYNAKLI RAY GERİLME ANALİZİ

Gerinim ölçerler, üzerine bağlandığı metalin genleşmesi sonucu oluşan uzama miktarını ölçmek için kullanılırlar. Deplasman ve pozisyon sensörlerinde, sağlamlık testleri ve esneklik algılama gibi pek çok alanda kullanılabilmektedir. Malzeme üzerindeki gerilmeye bağlı olarak, gerinim ölçer üzerinde bir kaç milivoltluk değişim gözlenmektedir. Gerinim ölçerler, ölçüm alınmak istenilen yüzeye monte edildikten sonra direnç değişimini hassas bir şekilde ölçmek için wheatstone köprüsü oluşturulması gerekir. Wheatstone köprüsü dört direnç ile oluşturulmaktadır. Wheatstone köprüsünün 4 düğüm noktasından iki tanesi bir ikaz voltajı ile beslenirken diğer iki noktadan ise köprüde deformasyona bağlı oluşan direnç değişimleri ölçülür. Gerinim değişimine ait eşitlik, Eş. 5’de yer almaktadır [74, 81].

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{dR/R}{k} \quad (5)$$

Burada;

- ε : Gerinim
- dL : Uzunluktaki değişim
- L : İlk uzunluk
- dR : Dirençteki değişim
- R : Gerinim ölçerin direnci
- k : Ölçüm faktörü (Gauge factor) (Bağıl uzunluk değişimine bağlı, dirençteki değişim oranını tanımlar)

Gerinime bağlı dirençteki değişim oldukça küçüktür. Bu nedenle, değişimleri voltaja çevirmek için köprü devreleri kullanılır. Devre tipine bağlı olarak birden dörde kadar gerinim ölçer devreye direnç olarak bağlanabilir. Buna göre voltaj değeri Eş. 6 ve Eş. 7’de verilen formüllerle hesaplanır [83].

$$U_a = U_e * \frac{dR}{4*R} = \frac{U_e}{4} * k * \varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{U_a * 4}{U_e * k} \quad (7)$$

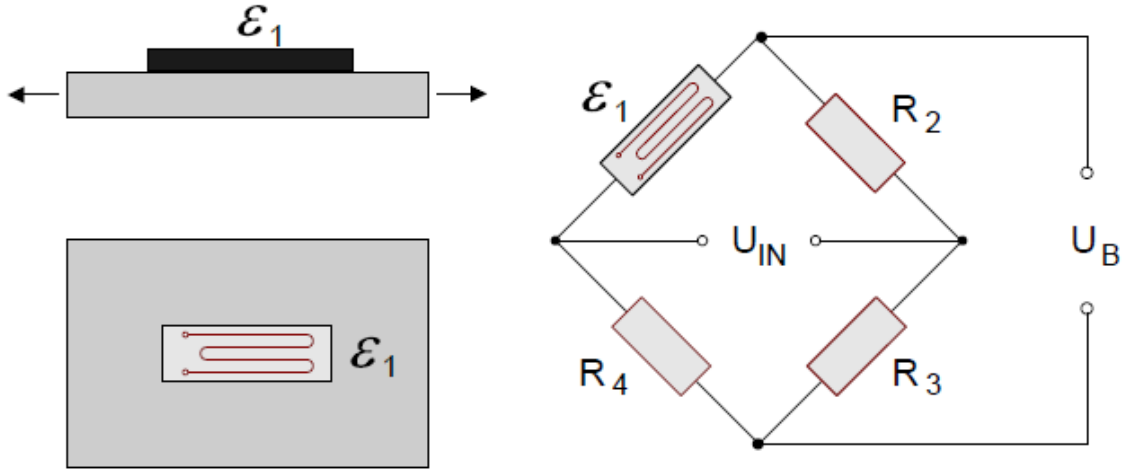
Burada;

ε : Gerinim

U_a : Ölçülen voltaj (measurement voltage)

U_e : İkaz voltajı (excitation voltage)

Çeyrek köprü gerinim ölçer Şekil 5.1’de yer almaktadır [81, 82]. Burada test numunesi üzerine yerleştirilen bir adet gerinim ölçer yer almaktadır. Bu gerinim ölçer tam köprüyü tamamlamak için üç adet pasif dirençle birleştirilmiştir. Burada gerinim ölçerdeki direnç değeri 120Ω ’dur.



Şekil 5.1. Çeyrek köprü gerinim ölçer şematik gösterimi

$$\frac{U_{IN}}{U_B} = \frac{k}{4} * N * \varepsilon \quad (8)$$

Eş. 8’de çeyrek köprü için $N=1$ alındığında gerinim için Eş. 9’da yer alan formülasyon kullanılabilir [84].

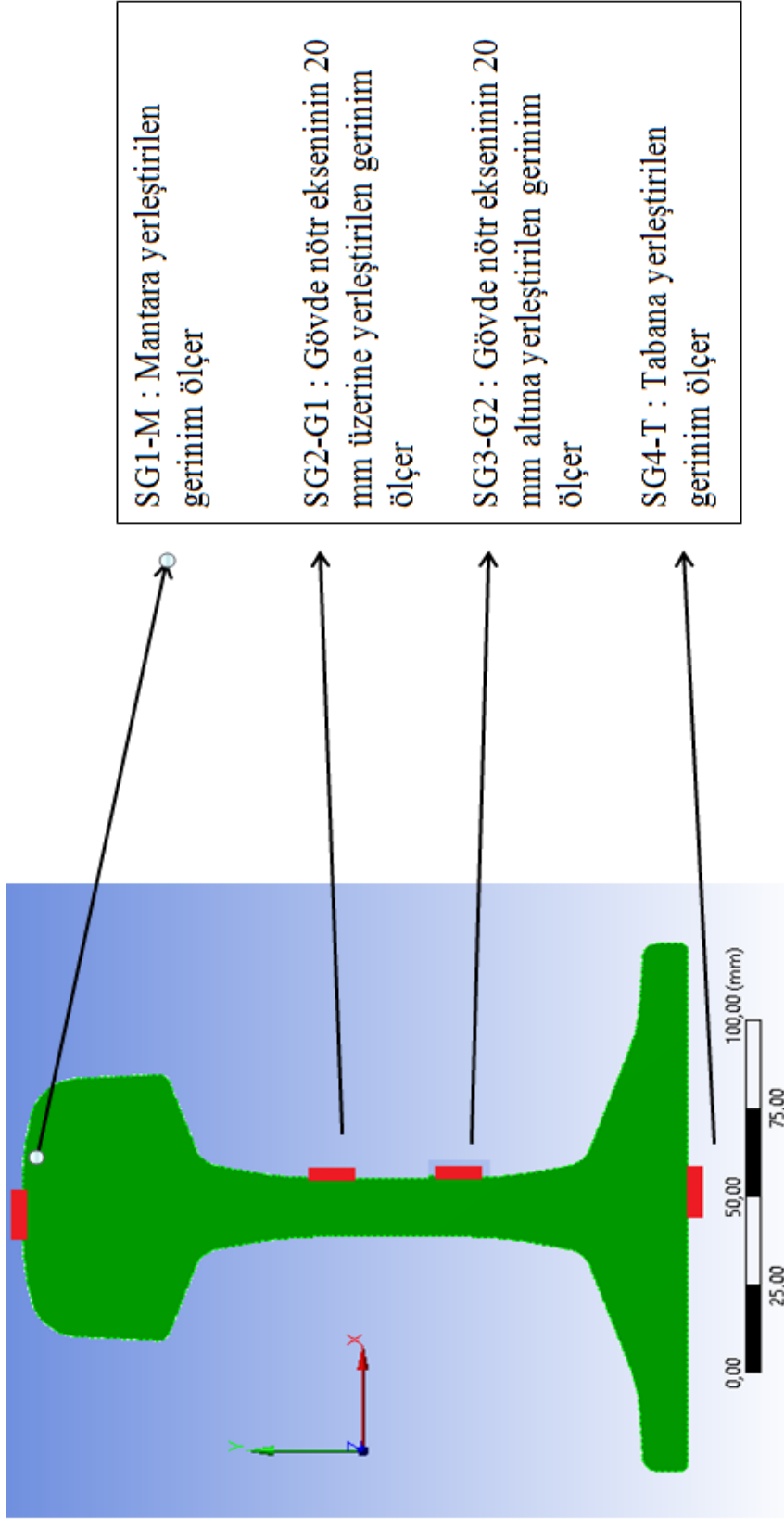
$$\varepsilon \left[\frac{\mu m}{m} \right] = \frac{4 * 1000}{k} * \frac{U_a \left[\frac{mV}{V} \right]}{U_e} \quad (9)$$

5.1. Deney Düzeneginin Hazırlanması

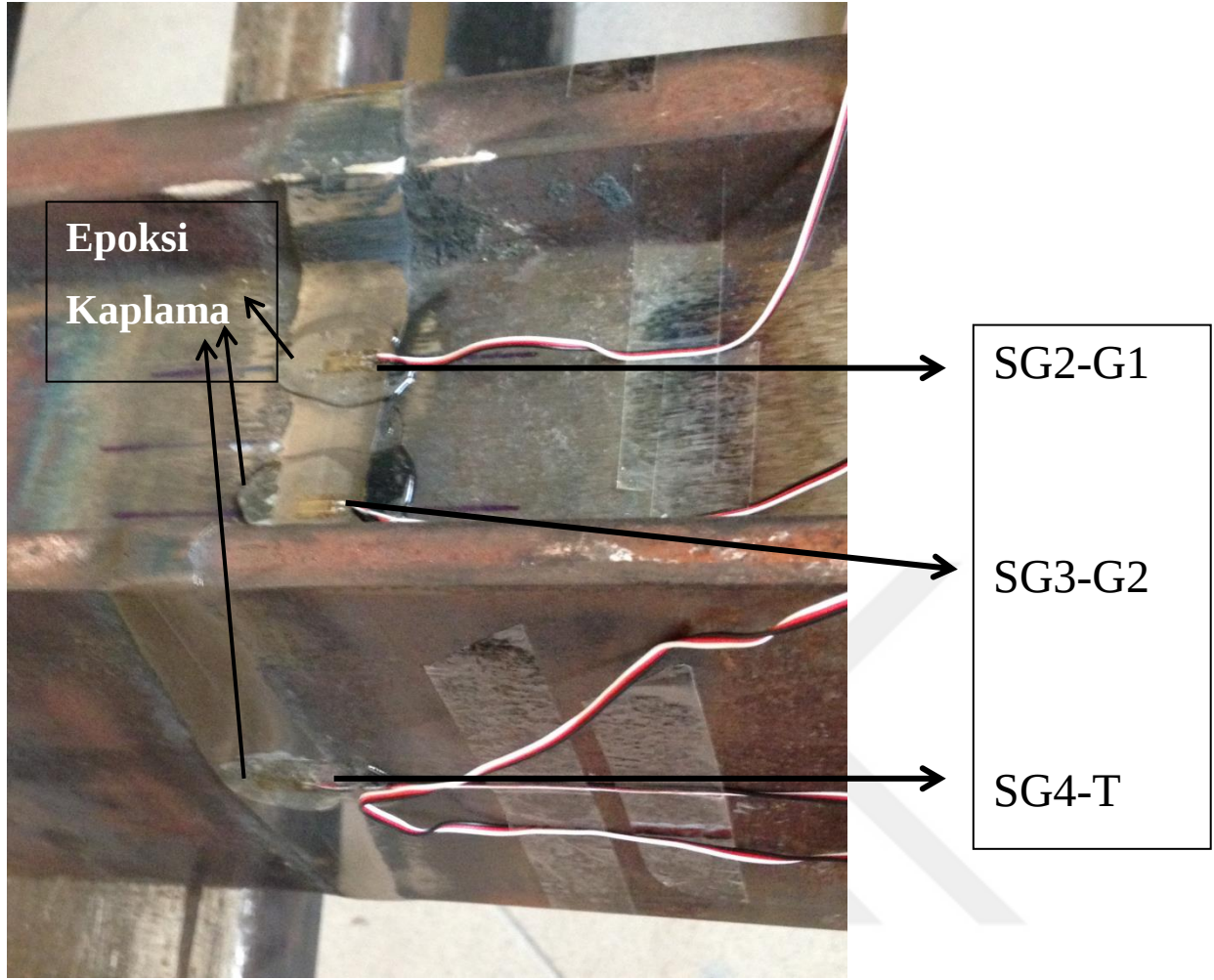
Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen gerilme değerleri, yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre ray üzerinde ray mantarı, ray tabanı ve ray gövdesine gerinim ölçerler yapıştırılmıştır. Gerinim ölçerden okunan değerler 32 kanallı, IMC CRONOSflex 2000G marka veri toplama cihazında toplanmış ve değerlendirilmiştir.

Rayın kaynaklı bölümü, gerinim ölçerlerin sorunsuz yapıştırılabilmesi ve ölçüm alınabilmesi için kalın ve ince taşla taşlanmıştır. Daha sonra elle zımparalanıp düz bir şekil aldıktan sonra, yüzey pürüzsüz ve temiz bir hale getirebilmek için temizleyici spreylere kullanılmıştır. Temizleyici spreylere yumuşak bir bezle herhangi bir kalıntı bırakmayacak şekilde temizlenip kurutulmuştur. Sonrasında dört adet gerinim ölçer Şekil 5.2’de belirtilen konumlara yapıştırılmıştır. Ray mantarında merkez ekseninde yer alan gerinim ölçer SG1-M, gövdede nötr eksenin 20 mm üzerinde yer alan SG2-G1, gövde de nötr eksenin 20 mm altında yer alan SG3-G2 ve tabanda yer alan ise SG4-T olarak kodlanmıştır.

Çalışmada 120 Ω dirençli, tek eksenli, 6 mm uzunluğunda Micro-Measurements marka gerinim ölçerler kullanılmıştır. Gerinim ölçerlerin, ölçüm faktörü $2.155 \pm 0,5\%$ olarak verilmiştir. UIC 60 profil ray üzerinde, merkez ekseninde mantar, gövde ve taban üzerine yapıştırılan gerinim ölçerler Şekil 5.3’de yer almaktadır. Gerinim ölçerleri, yapıştırdıktan sonra herhangi bir dış etkiden (toz, mekanik darbe vb.) izole etmek amacıyla kaplama yapılmıştır. BISON marka epoksi bazlı yapışkan kaplama malzemesi gerinim ölçerlerin üzerine enjekte edilmiş ve kurumasi için beş dakika beklenilmiştir (Şekil 5.3).

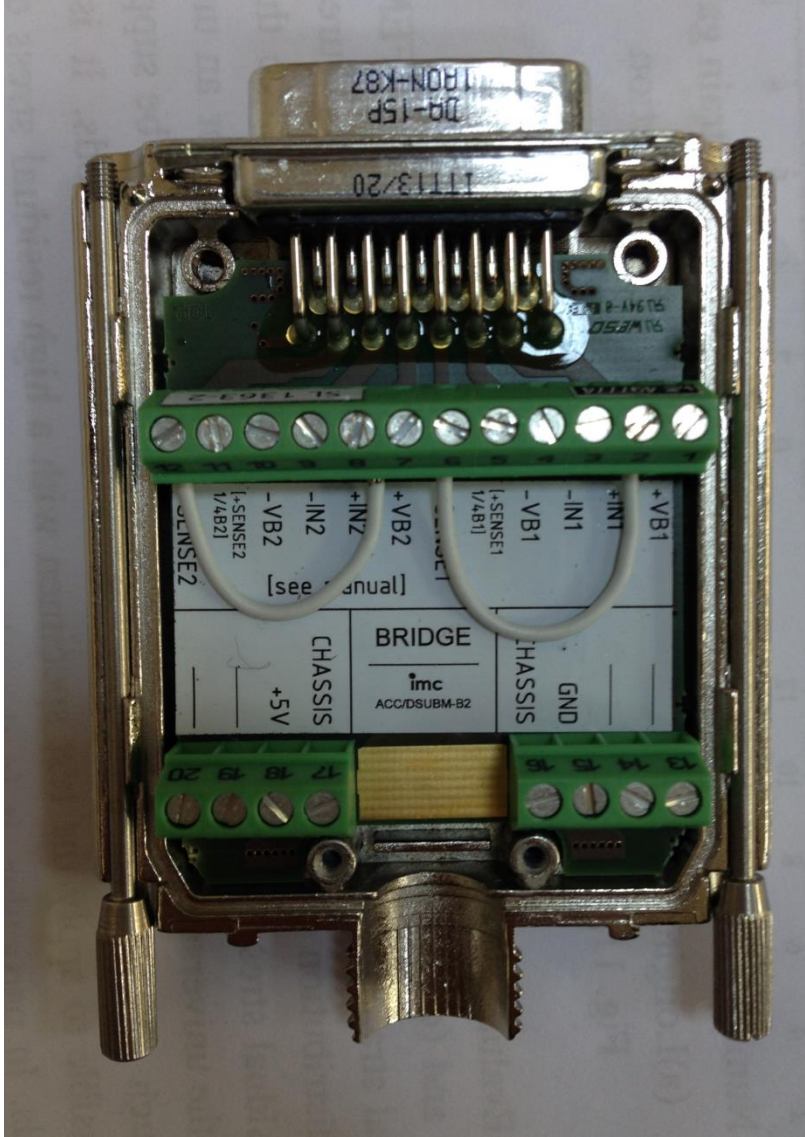


Şekil 5.2. Ray profili üzerinde, kaynak bölgesinde gerinim ölçerlerin yapıldığı konumlar ve gerinim ölçerlerin kodları

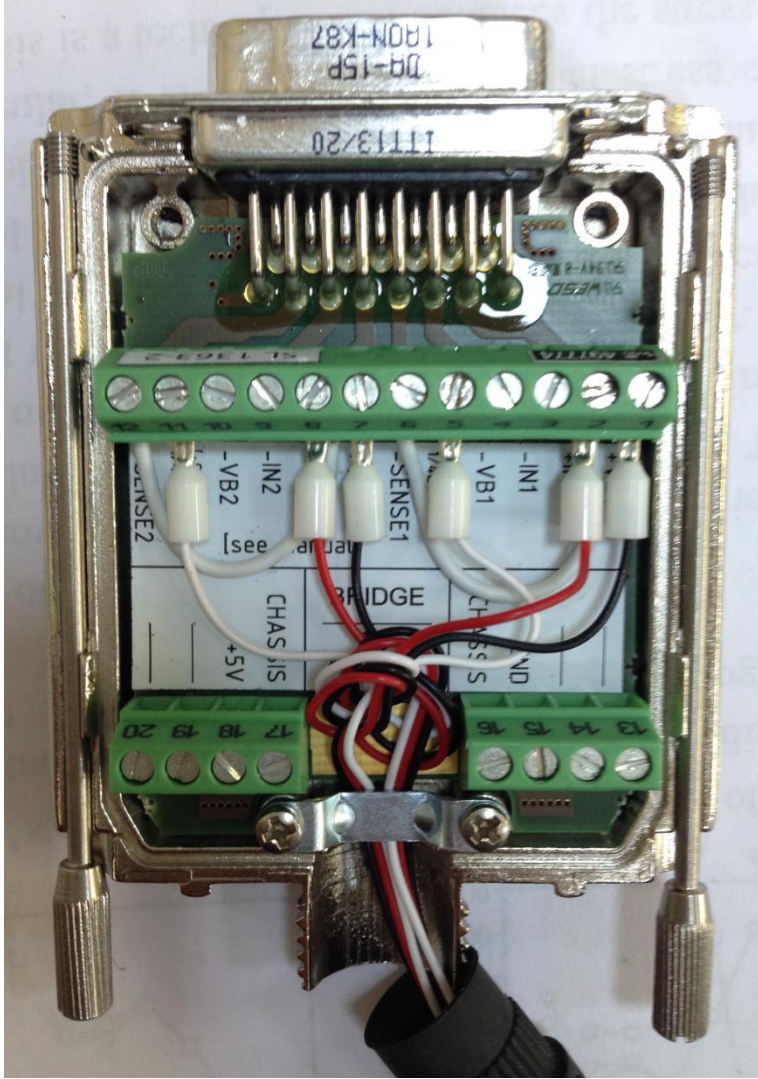


Şekil 5.3. Kaynak üzerine gövde ve tabanda yerleştirilen gerinim ölçerler ve epoksi kaplama

Bağlantı yapılacak boş konnektör Şekil 5.4’de yer almaktadır. Bir konnektöre iki adet gerinim ölçer bağlantısı yapılabilmektedir. Şekil 5.5’de iki adet gerinim ölçerin çeyrek köprü olacak şekilde bağlantı yapılmış şekli yer almaktadır. Her bir konnektöre bağlantı yapılan gerinim ölçerlerde, herhangi bir kopukluk veya bozulma olup olmadığı FLUKE marka avometre ile kontrol edilmiş, kablo uçlarının konnektörle bağlantılı noktalarında direnç değerleri ölçülmüştür. Buna göre yapıştırma, lehimleme ve bağlantı kablolarının sorunsuz çalıştığı anlaşılmıştır.

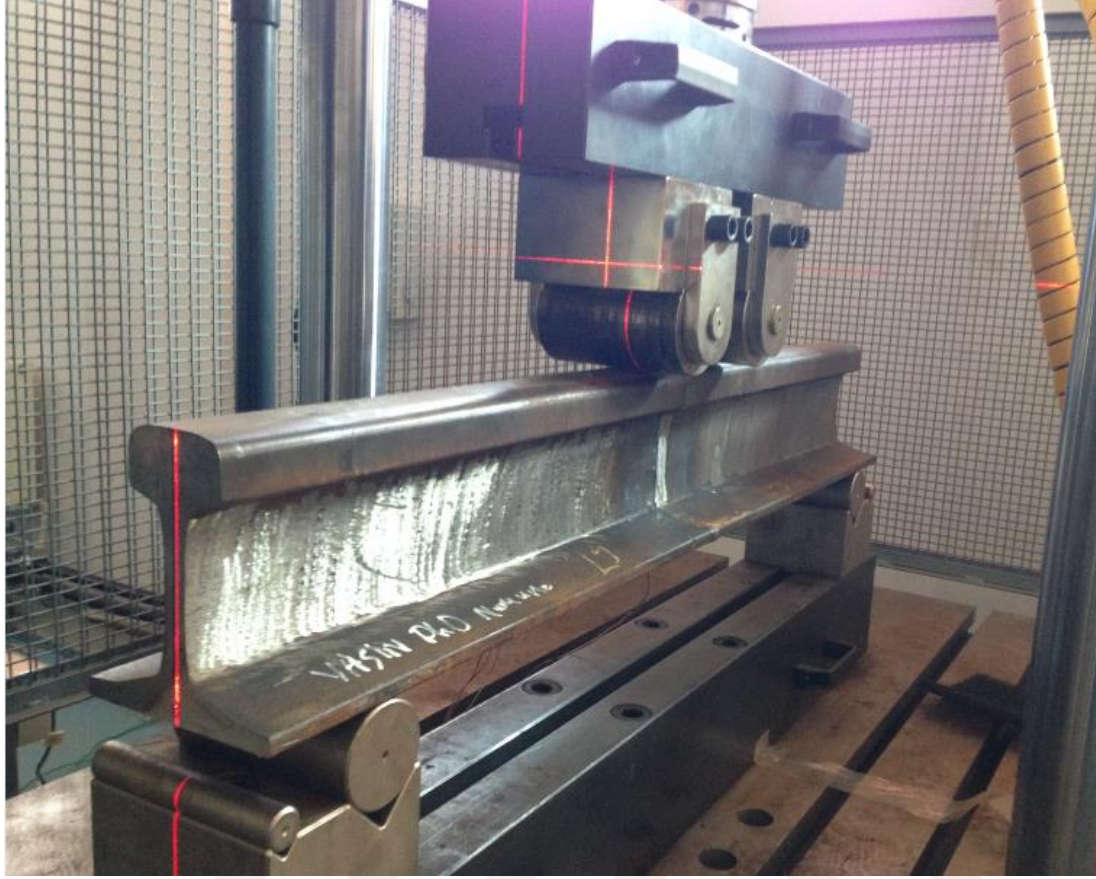


Şekil 5.4. Bağlantı yapılacak boş konnektör



Şekil 5.5. İki adet gerinim ölçerin, konnektöre çeyrek köprü bağlantı yapılmış durumu

Bağlantıları yapılan alın kaynaklı UIC 60 ray numunesi yatay tabla üzerinde yer alan, dört nokta eğme düzeneğine yerleştirilmiştir. Mesnetler sonlu elemanlar analizinde de kullanıldığı gibi, ilgili standartlara uygun olarak tasarlanmıştır. Üst mesnetler arasındaki açıklık 154 mm, alt mesnetler arasındaki açıklık ise 1020 mm olarak ayarlanmıştır. Ray mesnetler üzerine yatay ve dikey ekseninde merkezden hizalanarak yerleştirilmiştir (Şekil 5.6). Dört adet gerinim ölçerlerin yer aldığı, dört nokta eğme düzeneği Şekil 5.7’de yer almaktadır.

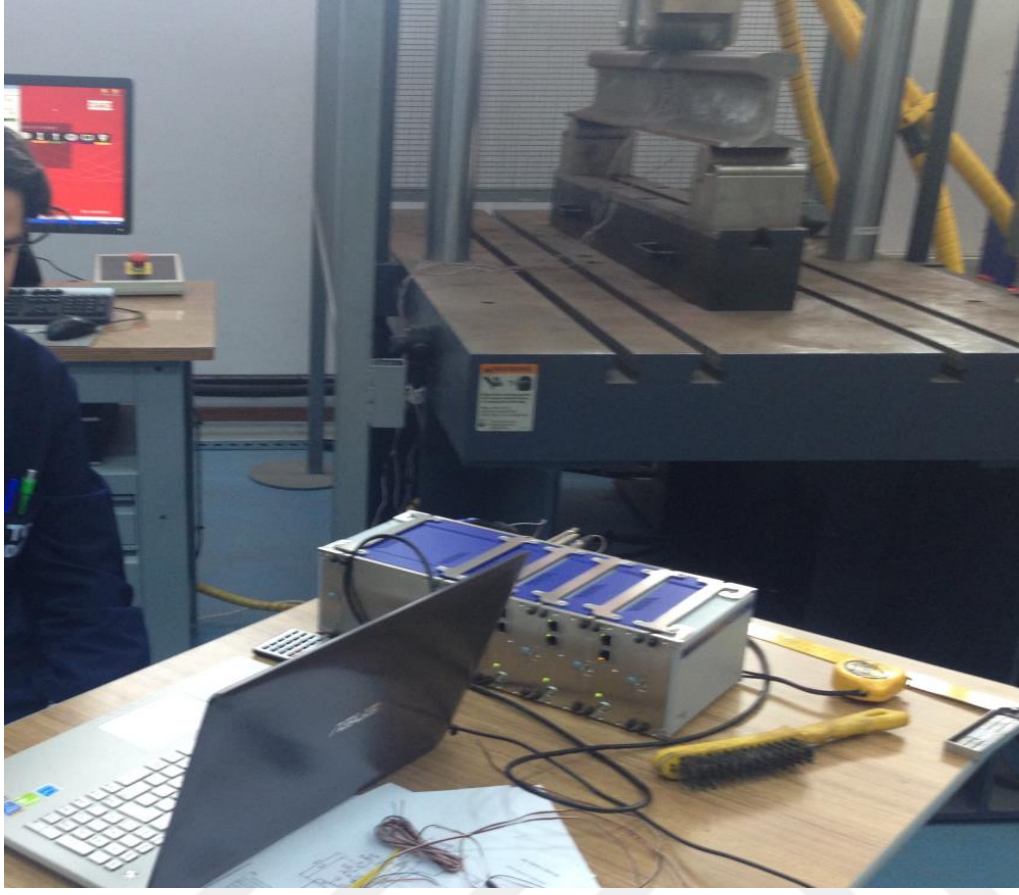


Şekil 5.6. Dört nokta eğme düzeneğine, yatay ve düşey eksen merkezinde hizalanan, alın kaynaklı UIC 60 profil ray numunesi



Şekil 5.7. Gerinim ölçerlerin yer aldığı dört nokta eğme test düzeneği

Servohidrolik dört nokta eğme düzeneği, UIC 60 profil alın kaynaklı ray numunesi, gerinim ölçerler ve IMC CRONOSflex 2000G marka veri toplama cihazından oluşan deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Deney düzeneği genel görüntüsü

Veri toplama cihazının ayarları IMC Studio programı vasıtasıyla yapılmıştır. İki konnektör ile veri toplama cihazına bağlantısı yapılan, dört adet gerinim ölçere ait ilk dört kanal aktif duruma getirilmiştir. Mantar gövde ve tabanda yer alan gerinim ölçerlerin kodlamaları yapılmıştır. Ölçüm modu olarak gerinim ölçer tanımlanmış, ölçüm aralığı yazılımda en düşük ölçek olan ± 400 MPa olarak ayarlanmıştır. Her bir gerinim ölçer için çeyrek köprü tanımlanmıştır. Değerler 100 Hz frekansta toplanmış ve gerinim ölçerlere ait ölçüm faktörü üretici teknik verilerinde yer aldığı gibi 2,155 olarak girilmiştir. Ölçülen değerler gerilme olarak kayıt edilmiş, kaynaklı rayın elastisite modülü 211 GPa olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da ayarların yapıldığı yazılıma ait ekran görüntüleri yer almaktadır.

imc STUDIO - StandardProject - YasinPHD070KNIMC

Home Extra

New Open Save Save as Setup Search for Devices Connect Disconnect Process Connect

Experiment Documentation Devices Analog channels Digital channels GPS Status Comment Connector

Device control Start Stop Save current Measurement Data Online FAMOS Assistants Show Panel Design Mode Print Data (device) Data (PC) Selection View

Sensors

Name	Channel type	Count	Status	Comment	Measurement mode	Range & Scaling	Sampling & Filtering	Strain gauge	Save (device)	Save (PC)
Channel type: Analog inputs (Count=32)										
SG1-M	[01] IN01	Active			Strain gauge	±400 MPa	100 Hz - AAF	120 Ω - Strain gau...	☒	☒
SG2-G1	[01] IN02	Active			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
SG3-G2	[01] IN03	Active			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
SG4-T	[01] IN04	Active			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_005	[01] IN05	Passive			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_006	[01] IN06	Passive			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_007	[01] IN07	Passive			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_008	[01] IN08	Passive			Full bridge - Linear	±1000 "mV/V"	100 Hz - AAF		☐	☐

Channel definition SG1-M

Mode Strain gauge

Correction Linear

Supply 5 V

Input range ±400 MPa

Coupling Bridge resistor

Wiring Differential

Isolated thermo couple

Logbook

Errors	Warnings	Information	Duplicates	Copy	Search	Clear All	Autoscroll	Send email	Logbook-Viewer	Options
Time	Code	Message								
11.10.2016 14:06:00	20000032	1 parameter(s) changed in consequence: SG1-M: PC filename = SG1-M.RAW								Setup
11.10.2016 14:05:59	20000032	1 parameter(s) changed in consequence: SG1-M: Device filename = SG1-M.RAW								Setup
11.10.2016 14:01:47	20000032	2 parameter(s) changed in consequence: SG1-M: Bridge unit = MPa, Unit = MPa								Setup
11.10.2016 14:01:47	20000032	1 parameter(s) changed in consequence: SG1-M: Bridge unit = MPa, Unit = MPa								Setup

Şekil 5.9. IMC Studio ekran görüntüsü, mantarda yer alan gerinim ölçer için, çalışma ölççeği ve çeyrek köprü değerlerinin tanımlanması

imc STUDIO - StandardProject - YasinPHD0-70kNIMC

Home Extra

New Open Save Save as Setup Search for Devices Process Connect Disconnect Start Stop Save current Measurement Data

Experiment

Documentation Devices Analog channels Digital channels GPS Status Comment

Device control

Online FAMOS

Show Panel Design Mode Panel

Print As PDF Print Explorer Data (PC) Selection View

Sensors

Name	Connector	Status	Comment	Current value	Variables	Measurement mode	Range & Scaling	Triggers	Sampling & Filtering	Strain gauge	Save (device)	Save (PC)
Channel type: Analog inputs (Count=32)												
SG1-M	[01] IN01	Active		652.122 mV/V	Strain gauge	Full bridge - Linear	±400 MPa		100 Hz - AAF	120 Ω - Strain gau...	☒	☒
SG2-G1	[01] IN02	Active			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
SG3-G2	[01] IN03	Active			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
SG4-T	[01] IN04	Active			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_005	[01] IN05	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_006	[01] IN06	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_007	[01] IN07	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_008	[01] IN08	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_009	[02] IN01	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_010	[02] IN02	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_011	[02] IN03	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐
Channel_012	[02] IN04	Passive			Full bridge - Linear	±1000 mV/V			100 Hz - AAF		☐	☐

Channel definition

Measurement mode

Range & Scaling

Strain gauge

Sampling & Filtering

Data transfer

Channel name

SG1-M

Coupling

Strain gauge - quarter-bridge

Resistor

120 Ω

Mode

Stress

Bridge factor N

1

Gauge factor

2.155

Unit

MPa

Quarter bridge with one active strain gauge. Strain gauge under single-axis tensile or pressure. Arrangement without temperature compensation.

Logbook

Errors Warnings Information Duplicates

Copy Search Clear All Autoscroll Send email Logbook-Viewer Options

Time	Code	Message
11.10.2016 14:06:00	20000032	1 parameter(s) changed in consequence: SG1-M; PC filename = SG1-M-RAW
11.10.2016 14:05:50	20000032	1 parameter(s) changed in consequence: Datum@DESKTOP-DE94LQD

Sender

Setup

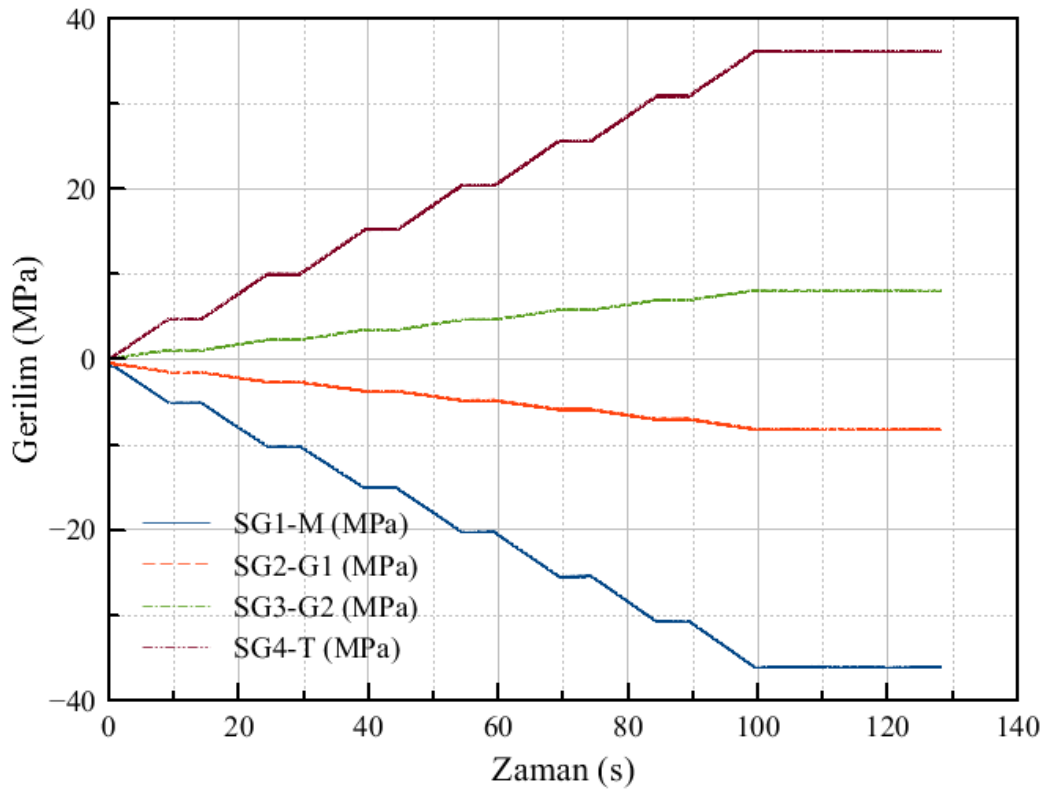
Setup

Şekil 5.10. IMC Studio ekran görüntüsü, mantarda yer alan gerinim ölçer için, gerilme, elastisite modülü ve çeyrek köprü değerlerinin tanımlanması

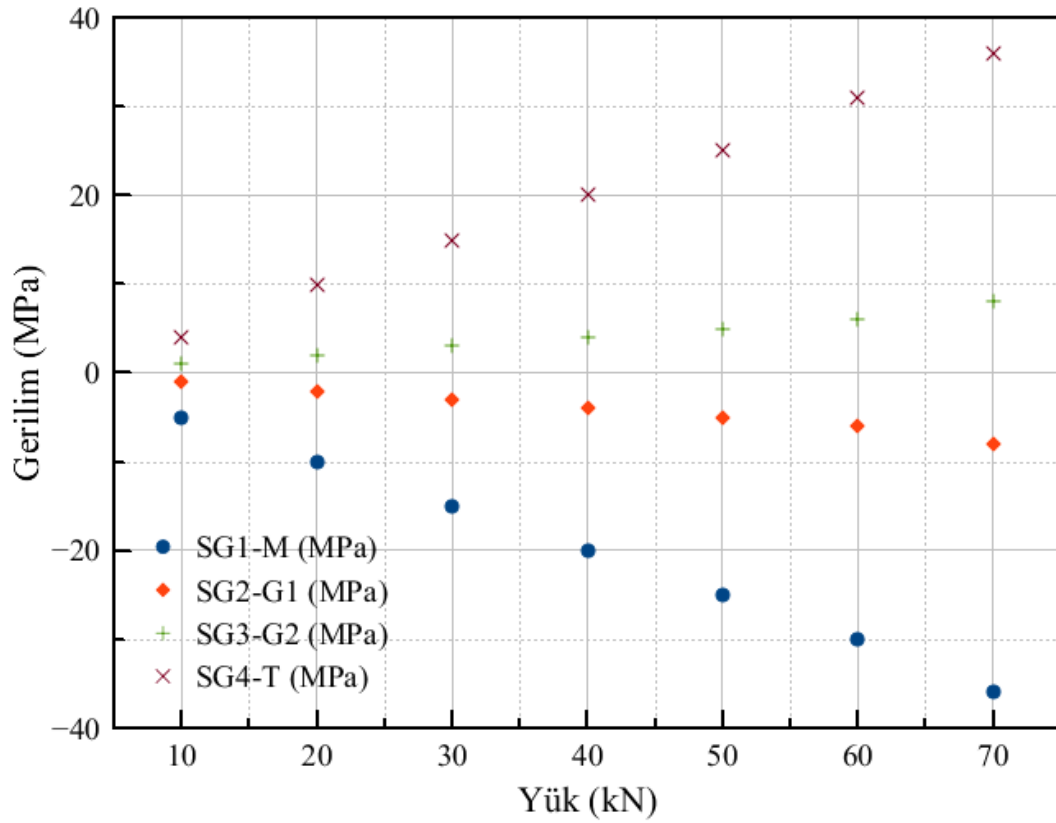
5.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları

5.2.1. Yüksek hızlı tren seti aks yükü altında ray kaynak profilinde oluşan gerilme değerleri

Yüksek hızlı tren aksına bağlı her bir tekerleğin raya uyguladığı yük değerinin 70 kN olduğu bilinmektedir [75]. Buna göre 10 kN'dan başlanılarak, en yüksek değer olan 70 kN'a kadar kaynaklı ray numunesine yüklemeler yapılmıştır. Servohidrolik test cihazı 10 kN aralıklarla yükleme yapmış her bir yüklemenin kararlı duruma gelmesi için her bir yük değerinde beşer saniye beklenilmiştir. Servohidrolik makineden elde edilen yük ve yer değiştirme eğrileri EK 2'de verilmiştir. Buna göre gerinim ölçerler ile dört noktadan elde edilen, zamana bağlı gerilme değerleri Şekil 5.11'de yer almaktadır. Tekerlek yüküne bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasında oluşan gerilme değerleri ise Şekil 5.12'de yer almaktadır.



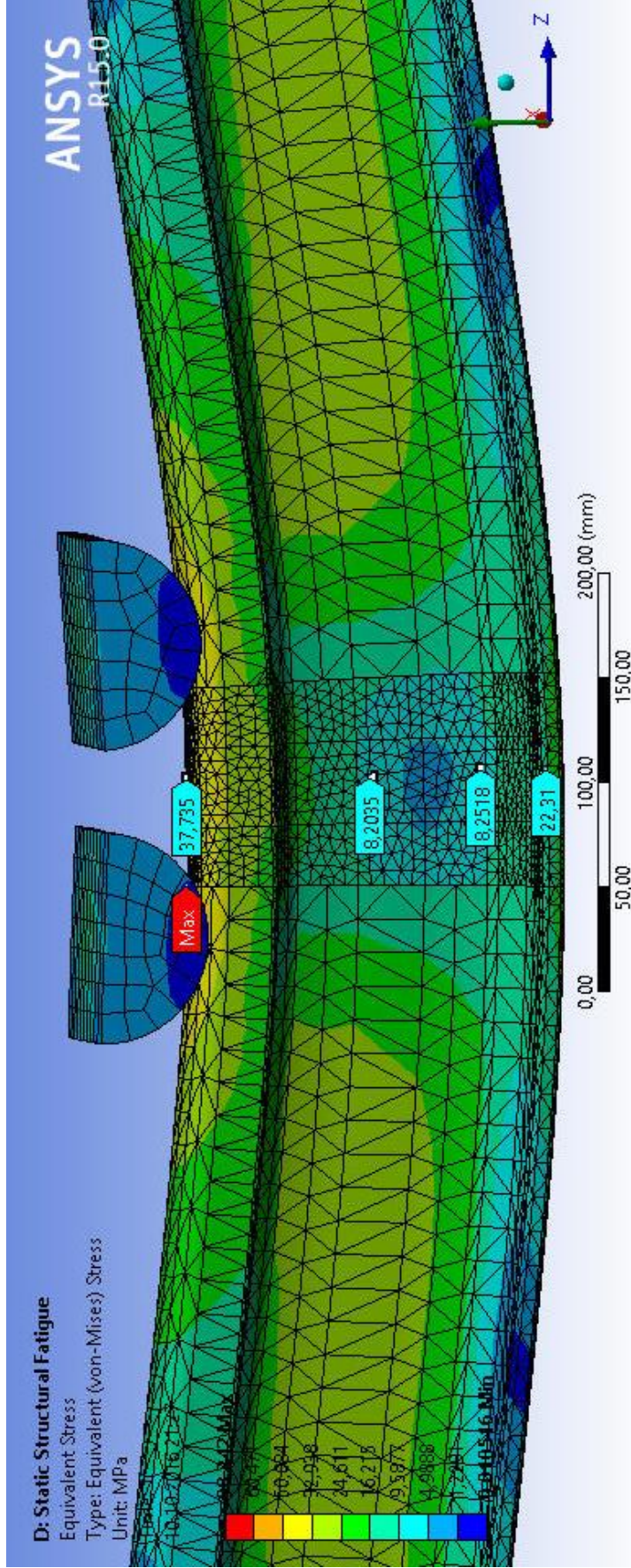
Şekil 5.11. Ray üzerinde dört noktadan alınan zamana bağlı gerilme değerleri



Şekil 5.12. Tekerlek yüküne bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasında oluşan gerilme değerleri

Buna göre 10 kN yük altında ray gövdesi nötr ekseninin 20 mm altında ve üstünde 1 MPa olan gerilme değeri mantarda 5 MPa, tabanda ise 4 MPa olarak ölçülmüştür. 40 kN yük altında bu değerler mantarda 20 MPa, gövde de 4 MPa, tabanda ise yine 20 MPa olarak ölçülmüştür. Yüksek hızlı tren aksı için en yüksek tekerlek yükü olan 70 kN yük altında mantarda ve tabanda 36 MPa olan gerilme değeri, gövde de 8 MPa olarak ölçülmüştür.

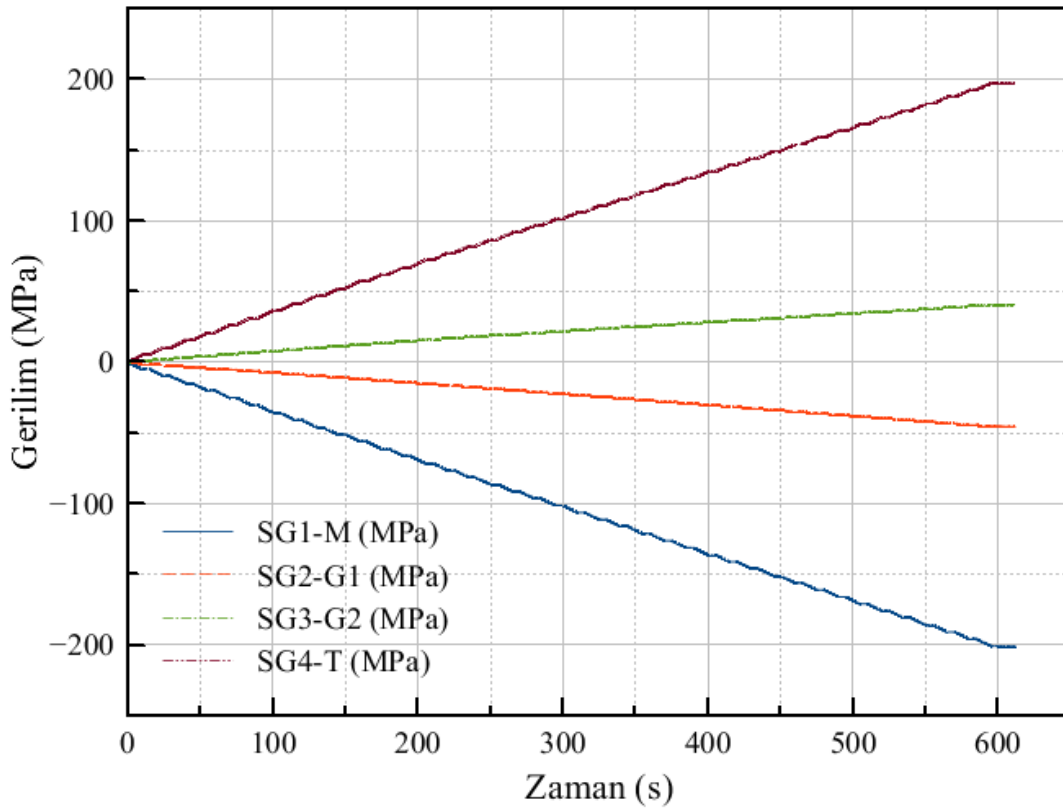
Yapılan sonlu elemanlar analizinde mantar, gövde (nötr eksenin 20 mm altı ve üstü) ve tabanda hesaplanan değerler Şekil 5.13’de yer almaktadır. Buna göre kaynak üzerinde mantarda hesaplanan değer 37,7 MPa, gövdede 8,2 MPa ve tabanda 22,3 MPa olarak hesaplanmıştır.



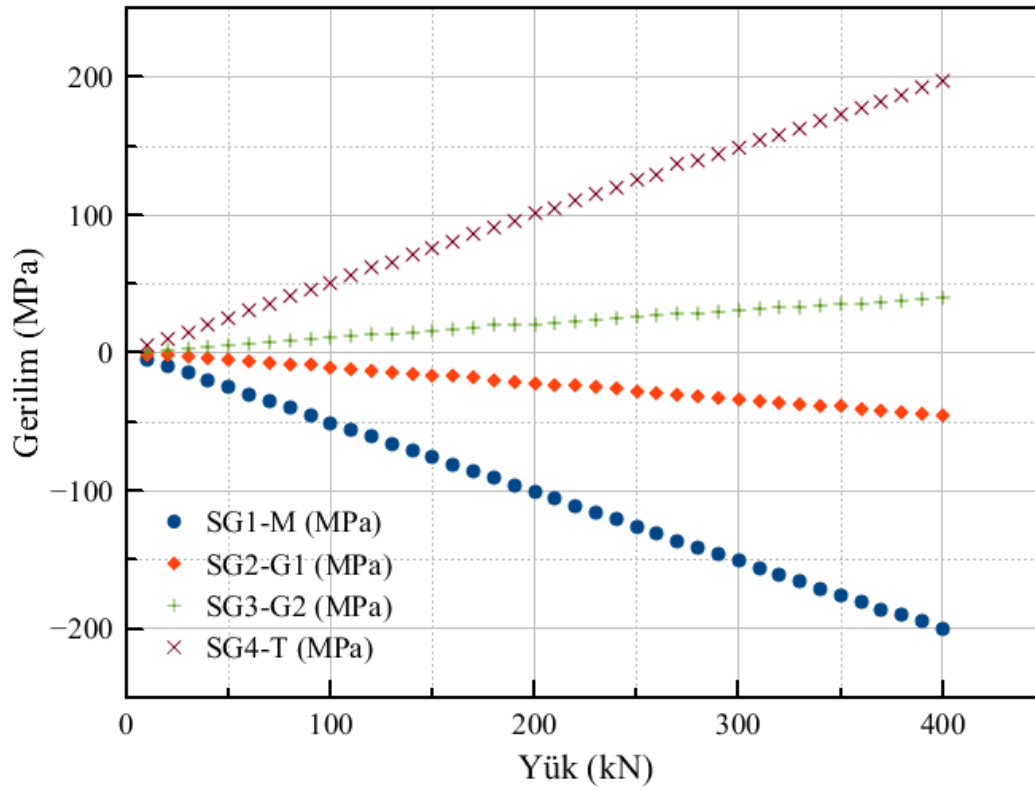
Şekil 5.13. Sonlu elemanlar analizi sonucu alın kaynaklı rayın kaynak bölgesinde, mantar gövde ve tabanda hesaplanan gerilme değerleri

5.2.2. Yükseltilmiş aks yükleri altında ray kaynak profilinde oluşan gerilme değerleri

Ray ve tekerlek etkileşimindeki küçük süreksizliklerin, ray ve tekerlek üzerinde oluşan kuvvetlerin etkisini önemli düzeylerde artırdığı bilinmektedir. Tekerlek üzerindeki küçük bir düzlenme veya rayın yuvarlanma yüzeyindeki ufak bir süreksizlik malzemenin maruz kaldığı etkiyi ve gerilme değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle gerinim ölçerlerin bağlandığı dört noktadan yükler artırılarak ölçümler alınmaya devam edilmiştir. Yine her bir yük değerinde yükün kararlı bir duruma gelebilmesi için beşer saniye beklenilmiş ve 10 kN aralıklarla artırılarak yükleme yapılmıştır. Buna göre artırılmış yükler için ray üzerinde dört noktadan alınan zamana bağlı gerilme değerleri Şekil 5.14’de yer almaktadır. Artırılmış tekerlek yüklerine bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasından ölçülen gerilme değerleri Şekil 5.15’de yer almaktadır.



Şekil 5.14. Ray üzerinde dört noktadan alınan artırılmış yükler altında zamana bağlı ölçülen gerilme değerleri



Şekil 5.15. Artırılmış tekerlek yüklerine bağlı olarak ray üzerinde dört ölçüm noktasından ölçülen gerilme değerleri

Grafikte de görüldüğü gibi tekerlek yükünün yaklaşık 1,5 katı olan 110 kN yük altında sırasıyla mantar gövde ve tabandan ölçülen değerler -56, -12, 12 ve 56 MPa olarak ölçülmüştür. Tekerlek yükü iki katına çıktığında, 140 kN yük altında -71, -15, 15 ve 71 MPa gerilme değerleri ölçülmüştür. 210 kN yükte -106, -23, 22 ve 105 MPa gerilme değerleri ölçülmüştür. 280 kN yükte ölçülen değerler -141, -31, 29 ve 139 MPa olarak ölçülmüştür. Yük beş katına çıktığında, 350 kN yükte -176, -39, 35 ve 173 MPa olarak ölçüm alınmıştır. 400 kN yük altında ise mantar, gövde ve tabandan ölçülen değerler sırasıyla -200, -45, 40 ve 197 MPa olarak ölçülmüştür.

Literatürde yapılan pek çok çalışmada, malzemelerin yorulma davranışlarını tayin edebilmenin, hasarların önüne geçebilmek için oldukça önemli olduğu ifade edilmiştir. Çevrim yükleri altında malzeme davranışlarının anlaşılması için, malzeme üzerinde oluşan gerilmeleri bilmek oldukça önemlidir [12].



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada soğuk alın kaynağı yöntemiyle hazırlanan UIC 60 ray profili numuneleri çeşitli deneysel testlere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli hesaplamalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler hacimsel süreksizliklere karşı ultrasonik muayene yöntemiyle kontrol edilmiş ve herhangi bir kusura rastlanılmamıştır.

HV30 uçla yapılan sertlik deneyi sonucu ray mantarında merkez noktada vikers skalasında 260 ölçülen sertlik değeri merkez noktalardan 20'şer mm uzaklaştıkça simetrik bir şekilde 250 mertebelerine düşmüştür. Dolayısıyla mantar üzerinde 40 mm'lik bir alanda bir geçiş bölgesi olduğu anlaşılmaktadır. Yine gövde ve tabanda alınan ölçümlerde bu duruma paralellik olduğu gözlenmiştir.

Toplamda 40 mm olarak tespit edilen birinci bölgeden sonra ana metale yaklaştıkça 30 ila 40 mm'lik bir alanda mantarda elde edilen sertlik değerinin vikers skalasında 290 mertebelerine kadar artış gösterdiği ve bu noktadan sonrada bu değere yakın değerlerde devam ettiği anlaşılmıştır.

Makro dağlama işlemi sonucu merkez ekseninde simetrik şekilde her iki yönde 20'şer mm olmak üzere, toplam 40 mm'lik alan birinci bölge olarak tanımlanmıştır. Birinci bölgeden sonra ray ana metaline doğru mantar, gövde ve tabanda farklı uzunluklarda olmak üzere 30 ila 40 mm uzunluğunda, bir diğer geçiş bölgesi olduğu anlaşılmıştır. Geçiş bölgesi mantarda daha geniş bir alana yayılmış, gövde de daralmış, tabanda ise tekrar genişlemiştir.

Alın kaynağı işlemi sonucu kaynak profilinde üç temel farklı bölgenin olduğu anlaşılmış ve tanımlanan bölgeler üzerine daha detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Kaynaklı ray numunesinden tanımlanan, birinci bölge, ikinci bölge ve ana ray malzemesinden hazırlanan çekme çubuğu numunelerine uygulanan ektansometreli çekme deneyleri sonucunda, birinci bölge, ikinci bölge ve ray ana metalinden elde edilen ortalama elastik modül değerleri sırasıyla 211,7 GPa, 198,7 ve 204,3 GPa olarak ölçülmüştür.

Merkezde yer alan birinci bölge ile ikinci bölge arasında yaklaşık 12 GPa'lık fark bulunmaktadır. Birinci bölge ve ikinci bölge arasında ani bir geçiş olduğu elastik modül değerlerinden anlaşılmaktadır.

Ortalama çekme mukavemeti değerleri birinci bölge, ikinci bölge ve ana ray malzemesi için sırasıyla, 1011,3 MPa, 923,1 MPa ve 909,6 MPa olarak ölçülmüştür. Kaynak merkezinin yer aldığı birinci bölge mukavemetinin diğer bölümlere göre yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Yapılan sayısal çözümleme sonucu;

- Kaynaklı rayın mevcut 70 kN statik yük altında 15 kata kadar güvenli olduğu;
- Analiz sonucu en yüksek gerilmenin mantarda, ikinci bölge ile ana ray malzemesi arasında yer alan geçiş bölgesinde olduğu;
- 98,3 MPa olan en yüksek gerilme değeri birinci bölgeye doğru ilerledikçe düştüğü ve 38,8 MPa seviyelerine ulaştığı;
- Ortalama gerilmeleri hesaplamak için Soderberg teoreminin kullanıldığı yorulma analizi sonucunda malzemenin 1,5 kata kadar güvenli olduğu;
- Kaynaklı rayın mantar bölgesinde güvenlik katsayısının en düşük değerlere ulaştığı;
- Yorulma analizi sonucu, kaynaklı bağlantının olduğu ikinci bölge ve ana ray malzemesi geçişinde, en yüksek gerilmelerin elde edildiği ve geçiş bölgesinde en düşük güvenlik faktörü değerinin olduğu;
- Yorulma analizi sonucu güvenlik faktörü değerlendirildiğinde, kaynaklı bölge mantarda en düşük mukavemet değerlerinin olduğu;
- Yorulma analizi sonucunda alın kaynaklı rayda en yüksek 54,5 MPa gerilme değerine ulaşıldığı ve statik analiz sonucu elde edilen 98,3 MPa'lık en yüksek gerilme değerinden daha düşük olduğu;
- Mantarda ikinci bölge ve ana ray malzemesi arasında elde edilen 54,5 MPa'lık en yüksek gerilme değerinin, kaynak merkezinde 20,2 MPa mertebelerine kadar düştüğü;
- Yorulma analizi sonucu elde edilen yük çevrim sayısı grafiğine göre malzemenin en düşük 96,2 kN yükte milyon çevrime, yani teorik olarak sonsuz ömür değerine ulaştığı;

- İşletme yükü iki katına çıktığında, 140 kN yük altında kaynaklı rayın dayanabildiği çevrim sayısının $1,54 \times 10^5$ olduğu;
- Yük üç katına çıktığında ise yani 210 kN'da, ulaşılan çevrim sayısının 21 642 olduğu;

anlaşılmıştır.

Alın kaynaklı ray numunesi üzerinden 70 kN'luk aks yükü altında sonlu elemanlar analizi ve gerinim ölçerlerle yapılan deneysel ölçüm sonuçlarının benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmada, farklı aks yüklerinde ray kaynağı üzerinde oluşan gerilmeleri tespit edebilmek amacıyla farklı yüklemeler yapılmıştır. Yükleme değerleri artırıldığında oluşan gerilmelerinde, doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Buna göre 110 kN yükte mantarda 56 MPa, 140 kN'da 71 MPa, 180 kN'da 91 MPa, 210 kN'da 106 MPa, 280 kN'da 141 MPa, 350 kN'da 176 MPa gerilme değerleri ölçülmüştür.

Bu çalışmada yapılan sayısal çözümler ve deneysel çalışmalar ile statik ve dinamik yüklemelerin malzeme yapısında oluşturduğu gerilme değerleri değerlendirilmiş kaynaklı rayın mukavemet açısından risk oluşturabilecek bölgeleri tespit edilmiştir. Analiz edilen gerilme değerleri gerçek şartlarda gerinim ölçerler kullanılarak doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal değerlerin oldukça yakın olduğu ve çalışmanın gerçek koşullarda elde edilen sonuçlara yakın olduğu doğrulanmıştır. Buna göre elde edilen değerler Çizelge 6.1'de yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Deneysel ve sayısal çözüm sonuçları

Ölçüm Alınan Konum / Gerilme (MPa)	Mantar	Gövde 1	Gövde 2	Taban
Gerilme (MPa) Sayısal Çözüm Değerleri	37,7	8,2	8,2	22,3
Gerilme (MPa) Deneysel Çalışma Değerleri	36,0	8,0	8,0	36,0

Literatürde yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi, ray üzerindeki küçük süreksizliklerin dinamik etkisinin oldukça büyük olduğu bilinmektedir. Buna göre 0,3 mm derinliğindeki

bir süreksizliğin kaynaklı ray üzerinde, yüksek hızda oluşturduğu etki kuvveti 206 kN'dur [6]. Hat ve araç bakımlarının düzenli ve doğru yapıldığı düşünüldüğünde etkimesi beklenen yükler normal seviyelerde olacaktır. Ancak araç veya hat üzerindeki küçük süreksizlikler malzeme üzerine gelen yüklerin değerlerinde logaritmik artışlara sebep olacaktır. Bu nedenle, ideal şartlarda sonsuz ömür beklenen kaynaklı rayın, oluşabilecek olumsuz şartları da göz önünde tutarak tahribatsız muayenelerinin ve bakım işlemlerinin düzenli olarak yapılması gerekmektedir. İşletme yüklerinin artması durumunda yapılan kontrollerin sıklığının artırılması önemlidir.

2017 yılı ocak ayı itibariyle Ankara-İstanbul, Konya-İstanbul, Konya-Ankara, Ankara-Eskişehir hatlarında karşılıklı hızlı tren işletmeciliği yapılmaktadır. Ankara-İstanbul hattında karşılıklı 6 sefer, Konya-İstanbul hattında karşılıklı 2 sefer, Ankara-Konya hattında karşılıklı 7 sefer, Ankara-Eskişehir hattında karşılıklı 5 sefer işletilmektedir. Buna göre mevcut durum itibariyle en yoğun hat Ankara-İstanbul hattıdır. Mevcut yüksek hızlı trenler 24 akstan oluşmaktadır. Dolayısıyla bir seferde, bir kaynaklı bağlantı üzerine 24 çevrim yükü uygulanmaktadır. En yoğun hat olan Ankara-İstanbul hattında Eskişehir trenleride göz önüne alındığında karşılıklı 11 sefer yani 22 tren işletilmektedir. Buna göre kaynaklı raya uygulanan günlük yük çevrim sayısı 528'dır. Bu değer haftada 3 696, yılda ise 192 192 çevrim sayısıdır. Mevcut statik işletme yükü altında bağlantının sonsuz ömre yani en az milyon çevrim sayısına ulaştığı anlaşılmıştır. Bir senede en yoğun hatta toplam çevrim sayısı sonsuz ömür kavramına ulaşmamaktadır. Dolayısıyla bir senelik çevrimde malzemede yorulmadan kaynaklı deformasyon beklenilmemektedir. Ancak kaynaklı bağlantıların düzenli olarak kontrolleri yapılmalıdır.

Kaynaklı raya yapılan dağlama işlemi ve sertlik muayeneleri sonucu birinci bölge, ikinci bölge ve ana malzeme olmak üzere üç temel bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Bu bölgelerin genişliklerinin 40 mm civarında olduğu hesaplanmıştır. Genellikle hat üzerinde yapılan alın kaynağı işlemi soğuk alın kaynağı yöntemidir. Burada ray malzemesine bir ön ısıtma yapılarak malzemeye kademeli olarak ısı girdisinin sağlanmasının ayrı bir araştırma konusu olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma alın kaynaklı UIC 60 profil demiryolu raylarının statik yüke karşı gerilme davranışları konusunda, ülkemizde yapılmış bir çalışma olarak alana katkı sunmaktadır. Alın kaynak parametreleri değiştirilerek yapılacak optimizasyon çalışmalarının, literatüre

katkısı olabileceği düşünölmektedir. Bunun haricinde yüksek hızlarda oluşın dinamik yüklerin tespit edilerek, bu etkilerin demiryolu için temel bileşen sistemlerine etkilerinin araştırılacağı yeni bilimsel çalışmalar bu konuda ölkemizin teknolojik altyapısının gelişmesine katkı sağlayacak ve daha kararlı ve sürdürülebilir demiryolu işletmeciliğinin oluşmasına altyapı hazırlayacaktır.





KAYNAKLAR

1. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcdd.gov.tr%2Ftarihce%2Bm76&date=2017-01-09>, Son Erişim Tarihi: 09.01.2017.
2. TCDD. (2015). TCDD 2014 Faaliyet Raporu; TCDD 2015-05. *TCDD Raporu*. Ankara.
3. TCDD. (2015). TCDD 2015 Yılı Sektör Raporu. *TCDD Raporu*. Ankara.
4. Hiensch, M., Larsson, P., Nilsson, O., Levy, D., Kapoor, A., Franklin, F., Nielsen, J., Ringsberg, J. W. and Josefson, B. L. (2005). Two-material rail development : field test results regarding rolling contact fatigue and squeal noise behaviour. *Wear*, 258, 964–972.
5. Carrascal, I. A., Casado, J. A., Diego, S. and Polanco, J. A. (2016). Dynamic behaviour of high-speed rail fastenings in the presence of desert sand. *Construction and Building Materials*, 117, 220–228.
6. Wen, Z., Xiao, G., Xiao, X., Jin, X. and Zhu, M. (2009). Dynamic vehicle-track interaction and plastic deformation of rail at rail welds. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1221–1237.
7. Mayville RA, H. P. (1984). Fracture mechanics analysis of rail-end bolt hole crack. *Theor Appl Fract Mech*, 1, 51–60.
8. Jeong, D. Y. (2001). *Progress in Rail Integrity Research*. Washington DC: Federal Railroad Administration, 20.
9. Sawley, K. and Reiff, R. (2000). *Rail failure assessment for the office of the rail regulator*. Colorado USA: Transportation Technology Center, Inc. A subsidiary of the Association of American Railroads Pueblo, 12-25.
10. Zerbst, U., Lundén, R., Edel, K. O. and Smith, R. A. (2009). Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails - a review. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(17), 2563–2601.
11. Cannon, D. F. and Pradier, H. (1996). Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute. *Wear*, 191(1), 1–13.
12. Salehi, I., Kapoor, A. and Mutton, P. (2011). Multi-axial fatigue analysis of aluminothermic rail welds under high axle load conditions. *International Journal of Fatigue*, 33(9), 1324–1336.
13. Zerbst, U., Madler, K. and Hintze, H. (2005). Fracture mechanics in railway applications - An overview. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(2), 163–194.

14. Terashita Y. and Tatsumi, M. (2003). Analysis of Damaged Rail Weld; 44,2. *Quarterly Report of RTRI*. Japan. 59–64.
15. Josefson, B. L. and Ringsberg, J. W. (2009). Assessment of uncertainties in life prediction of fatigue crack initiation and propagation in welded rails. *International Journal of Fatigue*, 31(8), 1413–1421.
16. Christodoulou, P. I., Kermanidis, A. T. and Haidemenopoulos, G. N. (2016). Fatigue and fracture behavior of pearlitic Grade 900A steel used in railway applications. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83, 51–59.
17. Garnham, J. E. and Davis, C. L. (2008). The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation. *Wear*, 265(9), 1363–1372.
18. Skyttebol, A. Josefson, B. L. and Ringsberg, J. W. (2005). Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(2), 271–285.
19. Godefroid, L. B., Faria, G. L., Cândido, L. C. and Viana, T. G. (2014). Fatigue Failure of a Flash Butt Welded Rail. *Procedia Materials Science*, 3, 1896–1901.
20. Desimone, H. and Beretta, S. (2006). Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds. *International Journal of Fatigue*, 28(5), 635–642.
21. Ringsberg, J. W. and Lindback, T. (2003). Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads. *International Journal of Fatigue*, 25(6), 547–558.
22. Heyder, R. and Girsch, G. (2005). Testing of HSH® rails in high-speed tracks to minimise rail damage. *Wear*, 258(7), 1014–1021.
23. Maya-Johnson, S., Ramirez, A. J. and Toro, A. (2015). Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 138, 63–72.
24. Mandal, N. K. (2014). On the low cycle fatigue failure of insulated rail joints (IRJs). *Engineering Failure Analysis*, 40, 58–74.
25. Rhayma, N. P., Bressollette, H., Breul, P., Fogli, M. and Saussine, G. (2011). A probabilistic approach for estimating the behavior of railway tracks. *Engineering Structures*, 33(7) 2120–2133.
26. Tehrani, H. and Saket, M. (2009). *Fatigue crack initiation life prediction of railroad*. Paper presented at the 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Cambridge, UK.
27. Beretta, S., Boniardi, M., Carboni, M. and Desimone, H. (2005). Mode II fatigue failures at rail butt-welds. *Engineering Failure Analysis*, 12(1), 157–165.
28. Wang, W. and xian Li, G. (2012). Development of high-speed railway vehicle derailment simulation - Part II: Exploring the derailment mechanism. *Engineering*

Failure Analysis, 24, 93–111.

29. Bogdaniuk, B., Massel, A. and Radomski, R. (2003). Increasing rail life by forecasting fatigue failure. *NDT and E International*, 36(3), 131–134.
30. Ilić, N., Jovanović, M. T. Todorović, M. Trtanj, M. and Šaponjić, P. (1999). Microstructural and mechanical characterization of postweld heat-treated thermite weld in rails. *Materials Characterization*, 43(4), 243–250.
31. Dobmann, G. (2001). *NDT for Stress Measurements in Components. Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 5967–5971. New York: Elsevier.
32. Steenbergen, M. J. M. M. (2008). Quantification of dynamic wheel-rail contact forces at short rail irregularities and application to measured rail welds. *Journal of Sound and Vibration*, 312(4), 606–629.
33. Mazzu, A. Solazzi, L. Lancini, M. Petrogalli, C. Ghidini, A. and Faccoli, M. (2015). An experimental procedure for surface damage assessment in railway wheel and rail steels. *Wear*, 342(343), 22–32.
34. Yu, X. Feng, L., Qin, Zhang, S. Y. and He, Y. (2015). Fracture analysis of U71Mn rail flash-butt welding joint. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 4, 20–25.
35. Franklin, F. J., Garnham, J. E., Fletcher, D. I., Davis, C. L. and Kapoor, A. (2008). Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation. *Wear*, 265(9), 1332–1341.
36. Ringsberg, J. Bjarnehed, W., Johansson, H. A. and Josefson, B. L. (2000). Rolling contact fatigue of rails - Finite element modelling of residual stresses, strains and crack initiation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 214(1), 7–19.
37. Schoenborn, K. (2006). Fatigue Analysis of a Welded Assembly Using ANSYS Workbench Environment, *CADFEM GmbH Report*, Germany.
38. Arslan, M. A. and Kayabaşı, O. (2012). 3-D Rail-Wheel contact analysis using FEA. *Advances in Engineering Software*, 45(1), 325–331.
39. Milković, D., Simić, G., Jakovljević, Tanasković, Ž. J. and Lučanin, V. (2013). Wayside system for wheel-rail contact forces measurements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(9), 3308–3318.
40. Wang, W., Shi, Y., Lei, Y. and Tian, Z. (2005). FEM simulation on microstructure of DC flash butt welding for an ultra-fine grain steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3), 497–503.
41. Kuroda, T., Ikeuchi, K. and Ikeda, H. (2006). Flash butt resistance welding for duplex stainless steels. *Vacuum*, 80(11), 1331–1335.

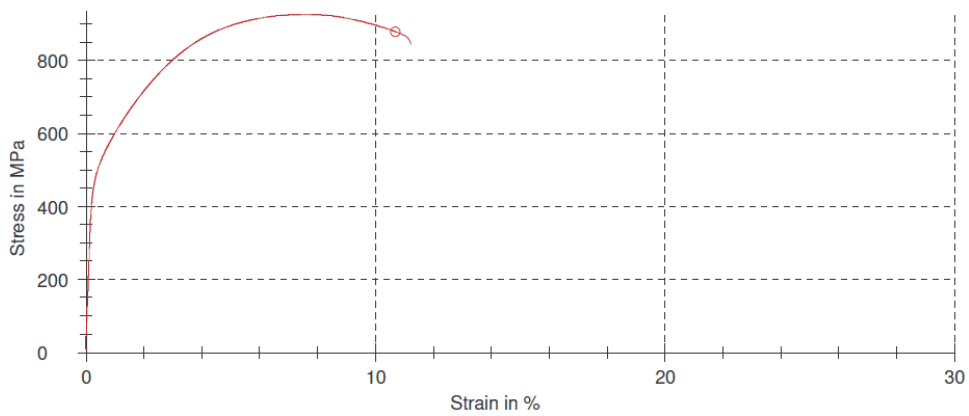
42. Vogt, M., Dilger, K. and Kassner, M. (2012). Investigations on different fatigue design concepts using the example of a welded crossbeam connection from the underframe of a steel railcar body. *International Journal of Fatigue*, 34(1), 47–56.
43. Donzella, G., Faccoli, M., Mazzù, A., Petrogalli, C. and Roberti, R. (2011). Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact, *Wear*, 271(1), 408–416.
44. Stock, R. and Pippan, R. (2011). RCF and wear in theory and practice-The influence of rail grade on wear and RCF. *Wear*, 271(1), 125–133.
45. Wang, W. J., Guo, J., Liu, Q. Y., Zhu, M. H. and Zhou, Z. R. (2009). Study on relationship between oblique fatigue crack and rail wear in curve track and prevention. *Wear*, 267(1), 540–544.
46. Workman, D. (2011). Flash butt wedge repair of weld head defects. *AREMA Report*. Minneapolis.
47. Tawfik, D., Mutton, P. J. and Chiu, W. K. (2008). Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised rapid post-weld heat treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1), 279–291.
48. Muster, H., Schmedders, H., Wick, K. and Pradier, H. (1996). Rail rolling contact fatigue. The performance of naturally hard and head-hardened rails in track. *Wear*, 191(1), 54–64.
49. Runesson, K., Skyttebol, A. and Lindgren, L.-E. (2003). Nonlinear Finite Element Analysis and Applications to Welded Structures. *Comprehensive Structural Integrity*, 255–320.
50. Shyr, F. Y. (1993). *Combining Laboratory and Field Data in Rail Fatigue Analysis*. Unpublished PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
51. Saarna, M. and Laansoo, A. (2004). *Rail and Rail Weld Testing*. Paper presented at the 4th International DAAAM Conference, Estonia.
52. Xiao, G., Xiao, X., Guo, Wen, J. Z. and Jin, X. (2010). Track dynamic behavior at rail welds at high speed. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 26(3), 449–465.
53. Chen, Y.R., Lawrence, F. V., Barkan, C. P. L. and Dantzig, J. A. (2006). Weld defect formation in rail thermite welds. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 220, 373–384.
54. TCDD. (2013). *TCDD Bakım El Kitabı Üstyapı Bölüm 8 Ray Kaynağı*. Ankara: TCDD.
55. Türk Standardı (TS EN 14730-1-A1). (2012). Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Rayların Aluminio termik Kaynağı - Bölüm 1: Kaynak İşlemlerinin Onayı no. 112. TSE. Ankara.

56. Türk Standardı (TS EN 14730-2). (2006). Demiryolu Uygulamaları - Şehir içi ve Banliyö Çeken ve Çekilen Taşıtlar için Havalandırma: Bölüm 2: Alumino termik Kaynakçıların Kalifikasyonu, Mütahitlerin Onayı ve Kaynaklarının Kabulü no. 112. TSE. Ankara.
57. Kim, D. C., So, W. J. and Kang, M. J. (2009). Effect of flash butt welding parameters on weld quality of mooring chain. *Archives of Materials Science and Engineering*, 38(2), 112–117.
58. Türk Standardı (TS EN 14587-2). (2010). Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant. TSE. Ankara
59. Turan, Ş. (2015). *Rayların Yakma Alın Kaynağı*. Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisinde sunuldu, Ankara.
60. Aachen University. (2005). Welding Technology ISF - Pressure Welding. *ISF Welding and Joining Institute Report*. Germany.
61. Rasanen, A.N. and Martikainen, J. (2011). Experimental review of metallurgical flash weld defects in welded joints : essence of flat spots , penetrators and oxide inclusions. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(6), 471–476.
62. Türk Standardı (TS EN 14587-1). (2008). Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant. TSE. Ankara.
63. Türk Standardı (TS EN 13674-1), “Demiryolu uygulamaları - Demiryolu hattı - Ray - Bölüm 1: 46 kg/m ve üzeri vignole demiryolu rayları,” 2013.
64. Eadie, D. T., Elvidge, D. K., Oldknow, R. Stock, P. Pointner, Kalousek, J. and Klauser, P. (2008). The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail–wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear*, 265(9), 1222–1230.
65. Türk Standardı (TS EN ISO 2400). (2013). Tahribatsız muayene - Ultrasonik Test - Kalibrasyon blok No 1 için Özellikler. TSE. Ankara.
66. Türk Standardı (TS EN ISO 6507-1). (2007). Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu. TSE, Ankara.
67. Türk Standardı (TS EN ISO 6507-2). (2007). Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 2: Deney cihazlarının doğrulanması ve kalibrasyonu. TSE. Ankara
68. Jun, H. K., Seo, J. W., Jeon, I. S., Lee, S. H. and Chang, Y. S. (2016). Fracture and fatigue crack growth analyses on a weld-repaired railway rail. *Engineering Failure Analysis*, 59, 478–492.
69. Mansouri, H. and Monshi, A. (2004). Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads. *Science and Technology of Welding and*

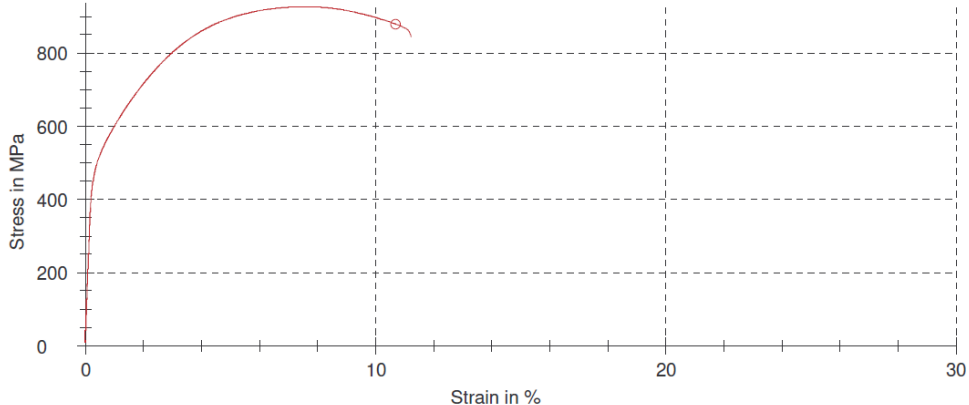
- Joining*, 9(3), 237–245.
70. Türk Standardı (TS EN ISO 6892-1). (2011). Metalik malzemeler - Çekme deneyi - bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu. TSE. Ankara.
 71. ASTM E 112. (2013). Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. *ASTM International*. West Conshohocken, PA.
 72. García, A. O. (2014). *Numerical and experimental analysis of the vertical dynamic behaviour of a railway track*. Unpublished Master's Thesis, Delft University of Technology. Nederland.
 73. Liu, Y., Stratman, B. and Mahadevan, S. (2006). Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels. *International Journal of Fatigue*, 28(7), 747–756.
 74. ANSYS Inc Proprietary. (2007). ANSYS Inventory # 002404. *ANSYS Inc Report*. Canonsburg, USA.
 75. TCDD. (2008). *CAF and Geminys Operators Manual*. Ankara: TCDD.
 76. Budynas, R. G. and Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9th Edition). New York: Mc Graw Hill.
 77. Steele, R. K. (1991). The effect of metal removal, steel cleanliness and wheel load on the fatigue life of rail. *Wear*, 144(1), 71–87.
 78. Saeed, M. (1999). *Finite Element Analysis Theory and Appplication with ANSYS* (4th Edition). New Jersey: Printice Hall.
 79. Browell, R. and Hancq, A. (2006). Calculating and Displaying Fatigue Results. *ANSYS Inc Report*, Canonsburg, USA.
 80. Sugino, K., Kageyama, H., Kuroki, Urashima, T. C. and Kikuchi, A. (1996). Metallurgical investigation of transverse defects in worn rails in service. *Wear*, 191(1), 141–148.
 81. Green, R. E. and McCauley, C. J. (1996). *Machinery's Handbook* (25th Edition). New York: Industrial Press Inc.
 82. Shigley, J. E. and Mischke, C. R. (1996). *Standard Handbook of Machine Design* (2nd Edition). New York: Mc Graw Hill.
 83. Khan, A. S. and Wang, X. (2001). *Strain Measurements and Stress Analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
 84. IMC Meßsysteme GmbH. (2013). *Instruction Book - IMC Cronos PL/SL CompactFlex, Version 4.0, R13 ed*. Berlin: IMC.



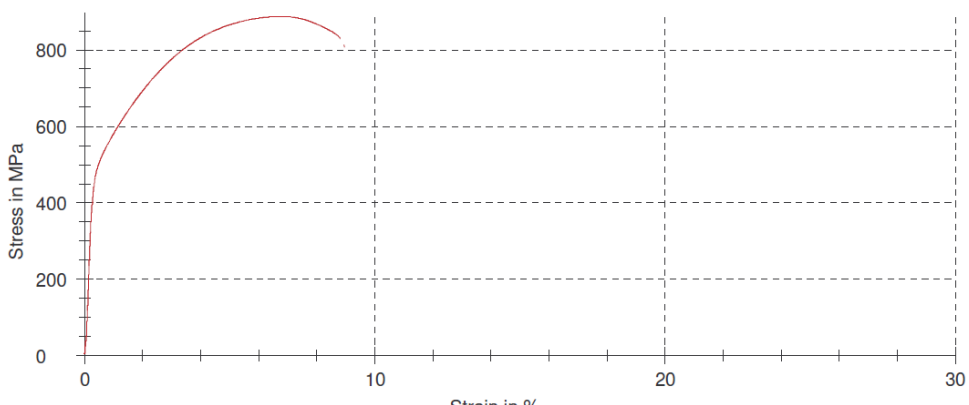
EK-1. Çekme deney sonuçları

 TCDD	MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ	 DATEM DEMİRTAŞI ARAŞTIRMA VE TEKNOLOJİ MERKEZİ																																				
Zwick / Roell	16.09.14																																					
Test report Customer : DOKTORA TEZ CALISMASI (PhD Thesis Report) Job no. : AL1 Test standard : TS EN ISO 6892-1 (Method B) Type and designation : ANA METAL (Base Metal) Material : ALIN KAYNAKLI UIC 60 PROFIL RAY NUMUNESI (Flash Butt Welded UIC 60 Rail Profile) Specimen removal : Specimen type : SILINDIRIK (Cylindrical) Pre-treatment : Tester : YASIN SARIKAVAK Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen) Machine data : Zwick Roell Z250 Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s																																						
Test results: <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>204</td> <td>507</td> <td>926</td> <td>18,19</td> <td>7,61</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> </tbody> </table>			No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	2	204	507	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																		
No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
2	204	507	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																														
Series graph: 																																						
Statistics: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Series n = 1</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>204</td> <td>507</td> <td>926</td> <td>18,19</td> <td>7,61</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> <tr> <td>s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	x	204	507	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63	s	-	-	-	-	-	-	-	-	v	-	-	-	-	-	-	-	-
Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
x	204	507	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																														
s	-	-	-	-	-	-	-	-																														
v	-	-	-	-	-	-	-	-																														

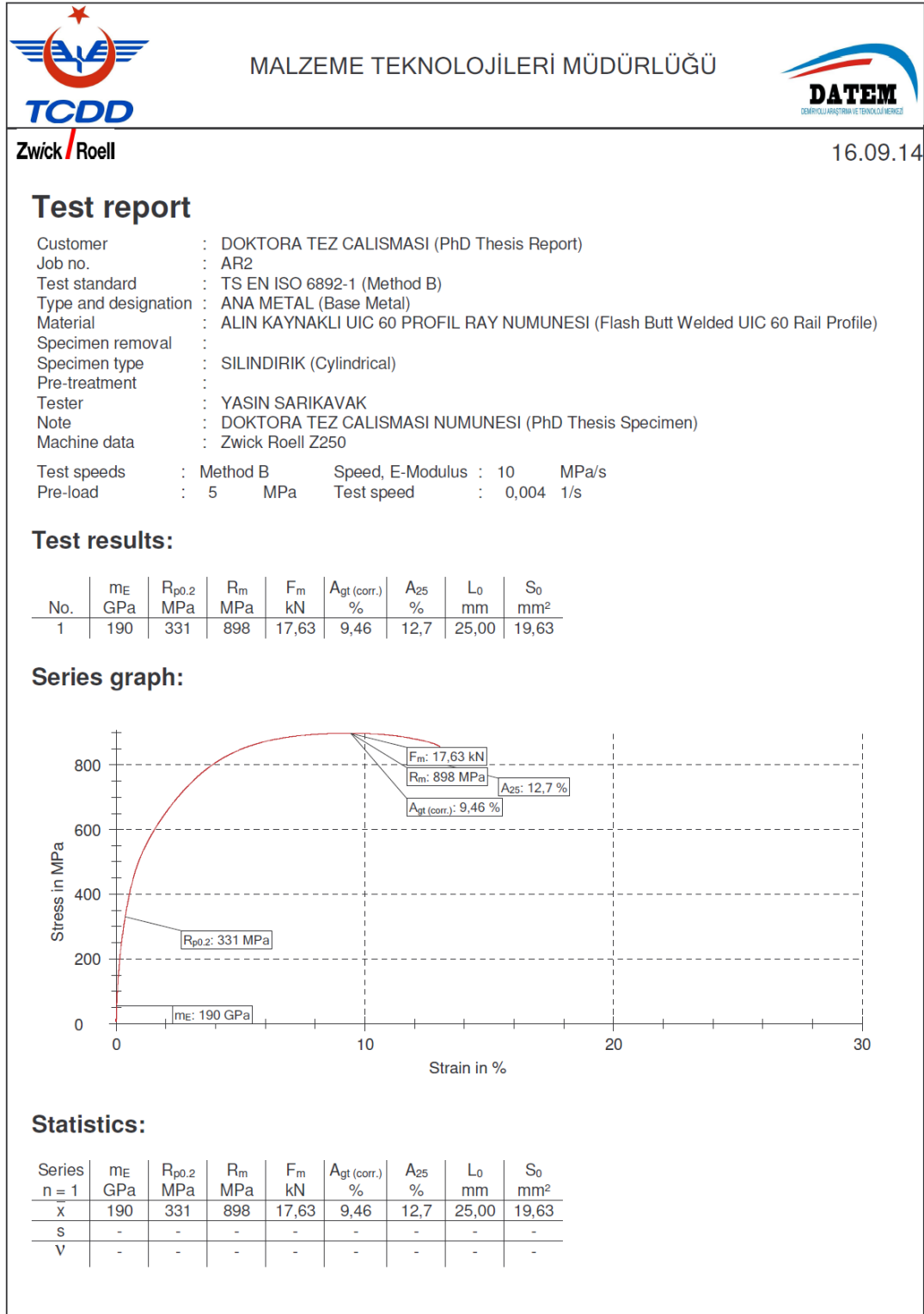
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları

 TCDD	MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ	 DATEM DEMİRYOLU ARAŞTIRMA VE TEKNİK KURUMU																																				
Zwick / Roell	16.09.14																																					
Test report Customer : DOKTORA TEZ CALISMASI (PhD Thesis Report) Job no. : AL2 Test standard : TS EN ISO 6892-1 (Method B) Type and designation : ANA METAL (Base Metal) Material : ALIN KAYNAKLI UIC 60 PROFIL RAY NUMUNESI (Flash Butt Welded UIC 60 Rail Profile) Specimen removal : Specimen type : SILINDIRIK (Cylindrical) Pre-treatment : Tester : YASIN SARIKAVAK Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen) Machine data : Zwick Roell Z250 Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s																																						
Test results: <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>211</td> <td>505</td> <td>926</td> <td>18,19</td> <td>7,61</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> </tbody> </table>			No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	2	211	505	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																		
No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
2	211	505	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																														
Series graph: 																																						
Statistics: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Series n = 1</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x̄</td> <td>211</td> <td>505</td> <td>926</td> <td>18,19</td> <td>7,61</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> <tr> <td>s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	x̄	211	505	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63	s	-	-	-	-	-	-	-	-	v	-	-	-	-	-	-	-	-
Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
x̄	211	505	926	18,19	7,61	-	25,00	19,63																														
s	-	-	-	-	-	-	-	-																														
v	-	-	-	-	-	-	-	-																														

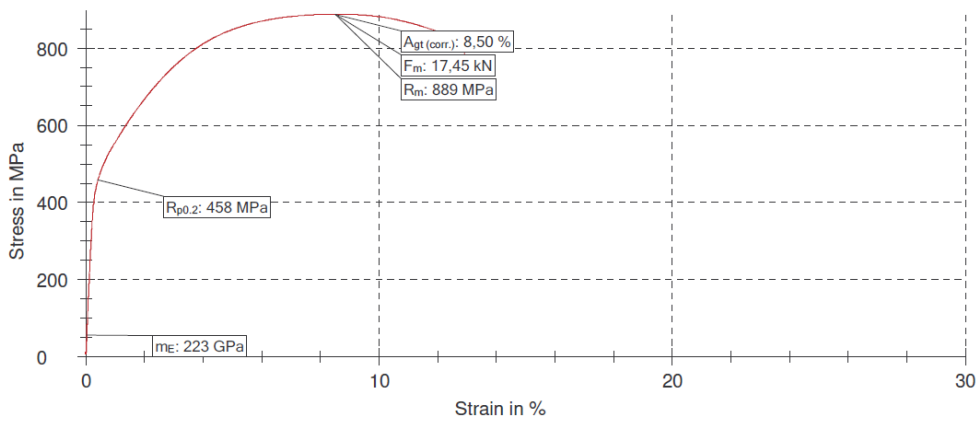
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları

 TCDD	MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ	 DATEM DEMİRCİLİK ARAŞTIRMA VE TEKNOLOJİ MERKEZİ																																				
Zwick / Roell	16.09.14																																					
Test report Customer : DOKTORA TEZ CALISMASI (PhD Thesis Report) Job no. : AR1 Test standard : TS EN ISO 6892-1 (Method B) Type and designation : ANA METAL (Base Metal) Material : ALIN KAYNAKLI UIC 60 PROFIL RAY NUMUNESI (Flash Butt Welded UIC 60 Rail Profile) Specimen removal : Specimen type : SILINDIRIK (Cylindrical) Pre-treatment : Tester : YASIN SARIKAVAK Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen) Machine data : Zwick Roell Z250 Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s																																						
Test results: <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>213</td> <td>499</td> <td>888</td> <td>17,44</td> <td>6,75</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> </tbody> </table>			No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	3	213	499	888	17,44	6,75	-	25,00	19,63																		
No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
3	213	499	888	17,44	6,75	-	25,00	19,63																														
Series graph:  Strain in %																																						
Statistics: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Series n = 1</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt} (corr.) %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>213</td> <td>499</td> <td>888</td> <td>17,44</td> <td>6,75</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> <tr> <td>s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	x	213	499	888	17,44	6,75	-	25,00	19,63	s	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-	-	-	-	-	-	-
Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt} (corr.) %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																														
x	213	499	888	17,44	6,75	-	25,00	19,63																														
s	-	-	-	-	-	-	-	-																														
V	-	-	-	-	-	-	-	-																														

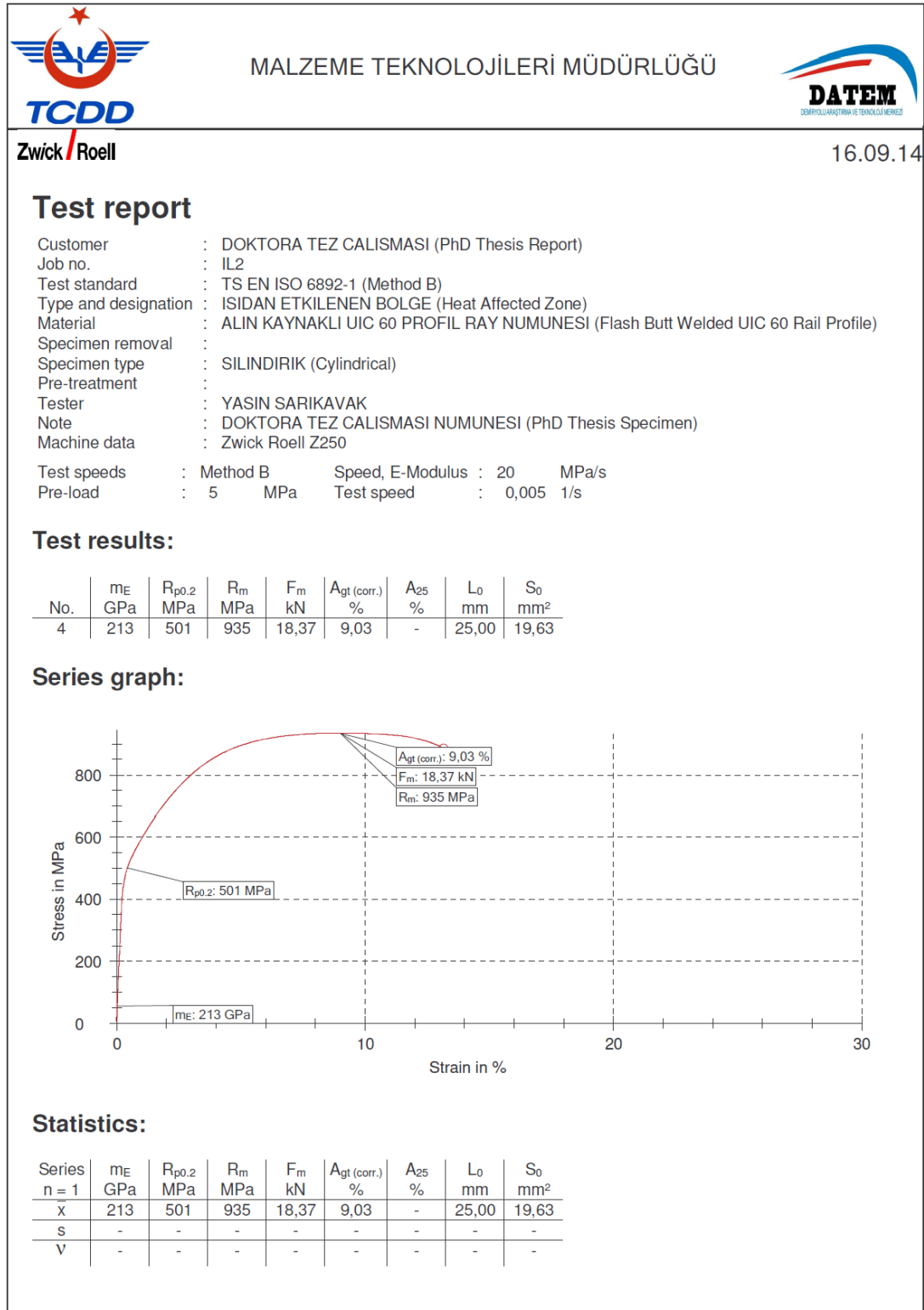
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları



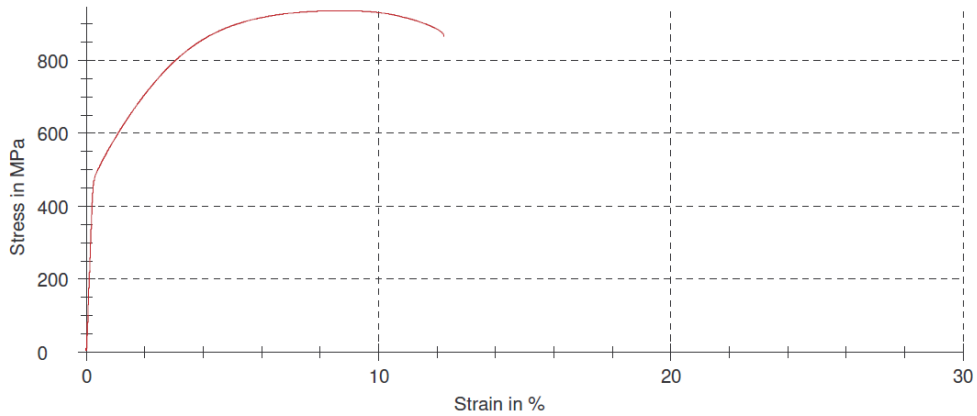
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları

		MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ																																							
Zwick / Roell		16.09.14																																							
Test report Customer : DOKTORA TEZ CALISMASI (PhD Thesis Report) Job no. : IL1 Test standard : TS EN ISO 6892-1 (Method B) Type and designation : ISIDAN ETKILENEN BOLGE (Heat Affected Zone) Material : ALIN KAYNAKLI UIC 60 PROFIL RAY NUMUNESI (Flash Butt Welded UIC 60 Rail Profile) Specimen removal : Specimen type : SILINDIRIK (Cylindrical) Pre-treatment : Tester : YASIN SARIKAVAK Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen) Machine data : Zwick Roell Z250 Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s																																									
Test results: <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt (corr.)} %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>223</td> <td>458</td> <td>889</td> <td>17,45</td> <td>8,50</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> </tbody> </table>						No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	1	223	458	889	17,45	8,50	-	25,00	19,63																		
No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																																	
1	223	458	889	17,45	8,50	-	25,00	19,63																																	
Series graph: 																																									
Statistics: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Series n = 1</th> <th>m_E GPa</th> <th>R_{p0.2} MPa</th> <th>R_m MPa</th> <th>F_m kN</th> <th>A_{gt (corr.)} %</th> <th>A₂₅ %</th> <th>L₀ mm</th> <th>S₀ mm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>223</td> <td>458</td> <td>889</td> <td>17,45</td> <td>8,50</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> <tr> <td>s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>						Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	x	223	458	889	17,45	8,50	-	25,00	19,63	s	-	-	-	-	-	-	-	-	v	-	-	-	-	-	-	-	-
Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																																	
x	223	458	889	17,45	8,50	-	25,00	19,63																																	
s	-	-	-	-	-	-	-	-																																	
v	-	-	-	-	-	-	-	-																																	

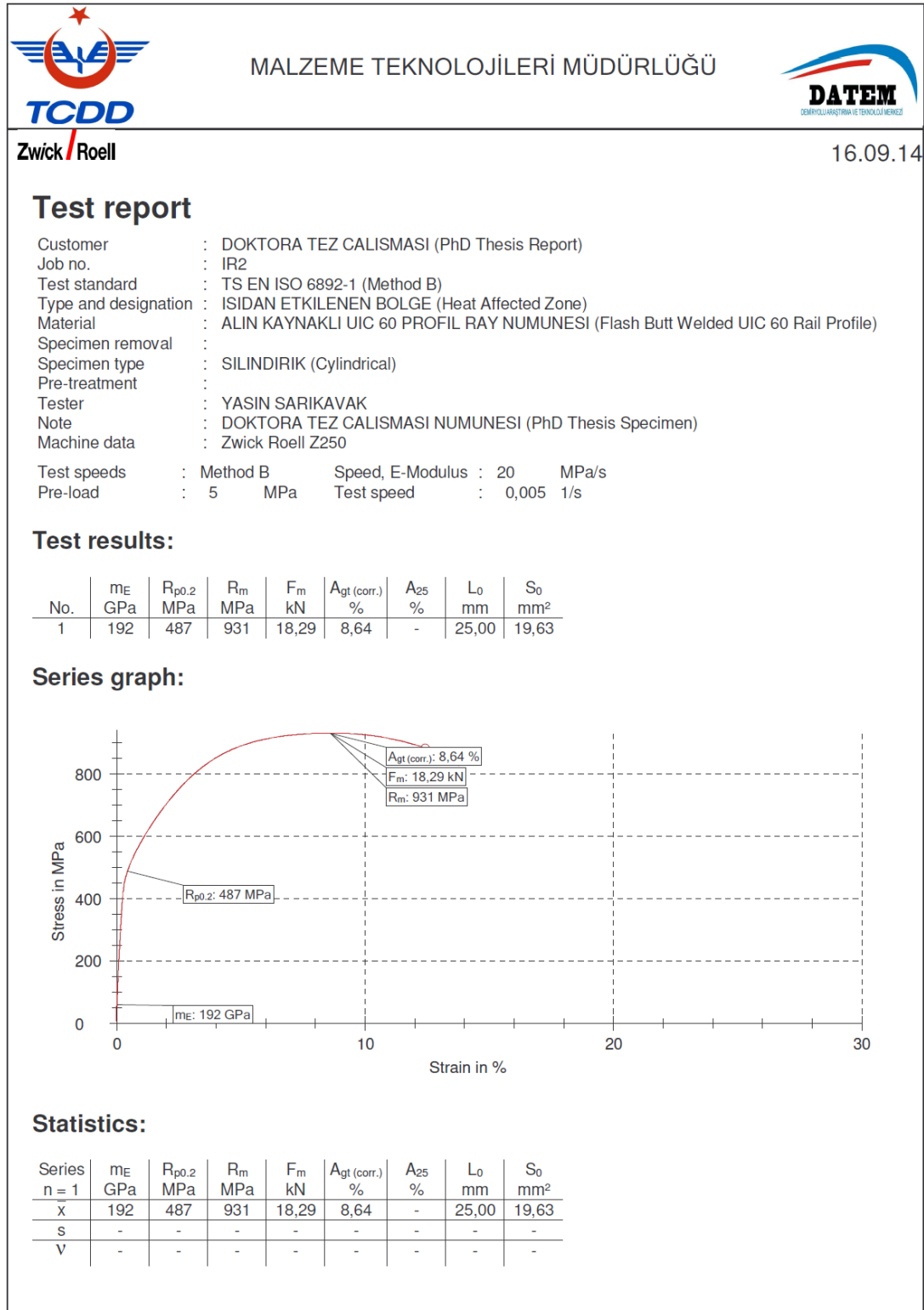
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları



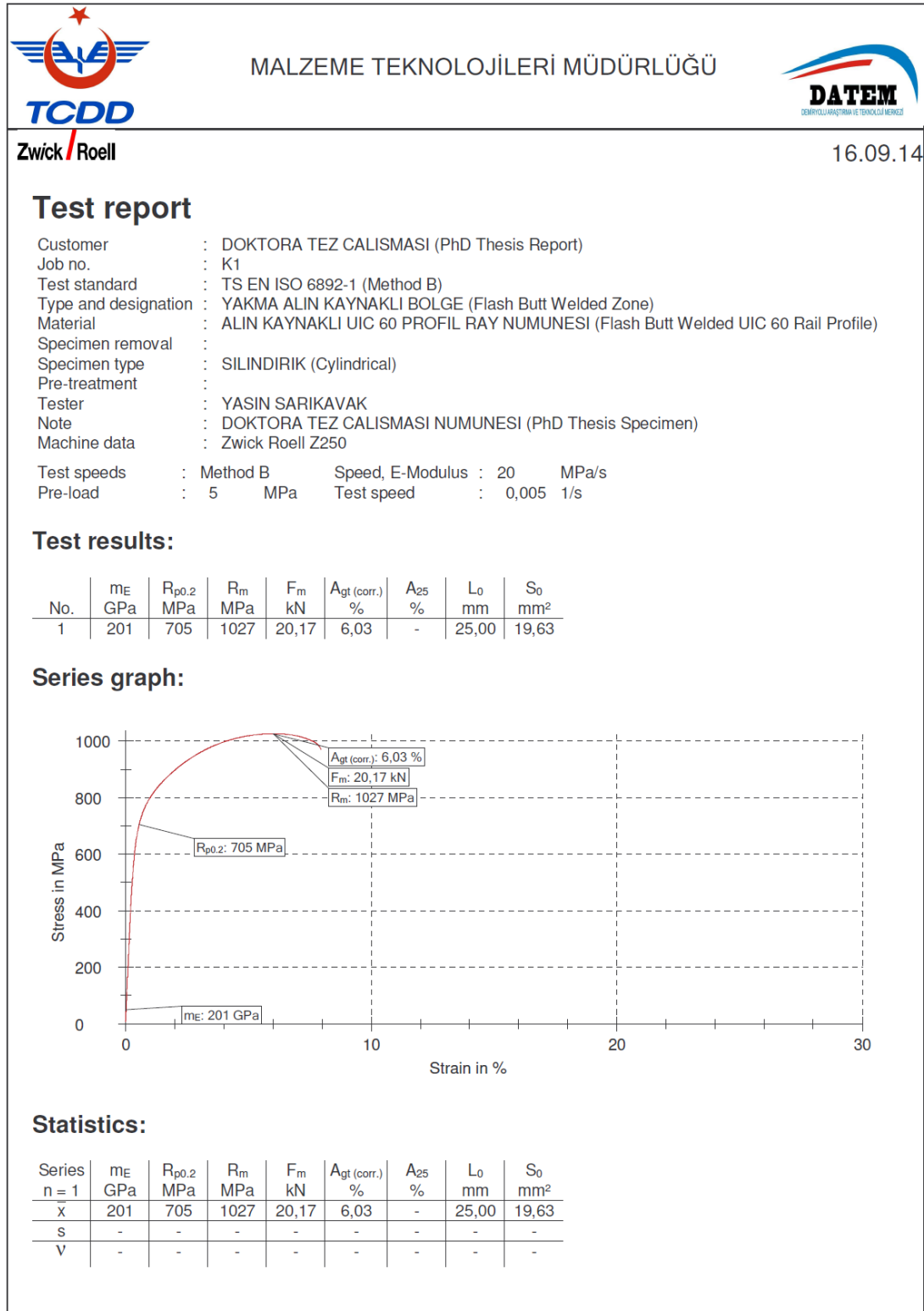
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları

 TCDD	MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ	 DATEM DEMİRCİLİK ARAŞTIRMA VE TEKNİKLERİ MERKEZİ																																										
Zwick / Roell		16.09.14																																										
Test report																																												
Customer : DOKTORA TEZ CALISMASI (PhD Thesis Report) Job no. : IR1 Test standard : TS EN ISO 6892-1 (Method B) Type and designation : ISIDAN ETKILENEN BOLGE (Heat Affected Zone) Material : ALIN KAYNAKLI UIC 60 PROFIL RAY NUMUNESI (Flash Butt Welded UIC 60 Rail Profile) Specimen removal : Specimen type : SILINDIRIK (Cylindrical) Pre-treatment : Tester : YASIN SARIKAVAK Note : DOKTORA TEZ CALISMASI NUMUNESI (PhD Thesis Specimen) Machine data : Zwick Roell Z250																																												
Test speeds : Method B Speed, E-Modulus : 20 MPa/s Pre-load : 5 MPa Test speed : 0,005 1/s																																												
Test results:																																												
No.	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																																				
3	167	518	937	18,40	8,63	-	25,00	19,63																																				
Series graph:																																												
Statistics:			<table border="1"> <tr> <td>Series n = 1</td> <td>m_E GPa</td> <td>R_{p0.2} MPa</td> <td>R_m MPa</td> <td>F_m kN</td> <td>A_{gt (corr.)} %</td> <td>A₂₅ %</td> <td>L₀ mm</td> <td>S₀ mm²</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>167</td> <td>518</td> <td>937</td> <td>18,40</td> <td>8,63</td> <td>-</td> <td>25,00</td> <td>19,63</td> </tr> <tr> <td>s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>						Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²	x	167	518	937	18,40	8,63	-	25,00	19,63	s	-	-	-	-	-	-	-	-	v	-	-	-	-	-	-	-	-
Series n = 1	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	F _m kN	A _{gt (corr.)} %	A ₂₅ %	L ₀ mm	S ₀ mm ²																																				
x	167	518	937	18,40	8,63	-	25,00	19,63																																				
s	-	-	-	-	-	-	-	-																																				
v	-	-	-	-	-	-	-	-																																				

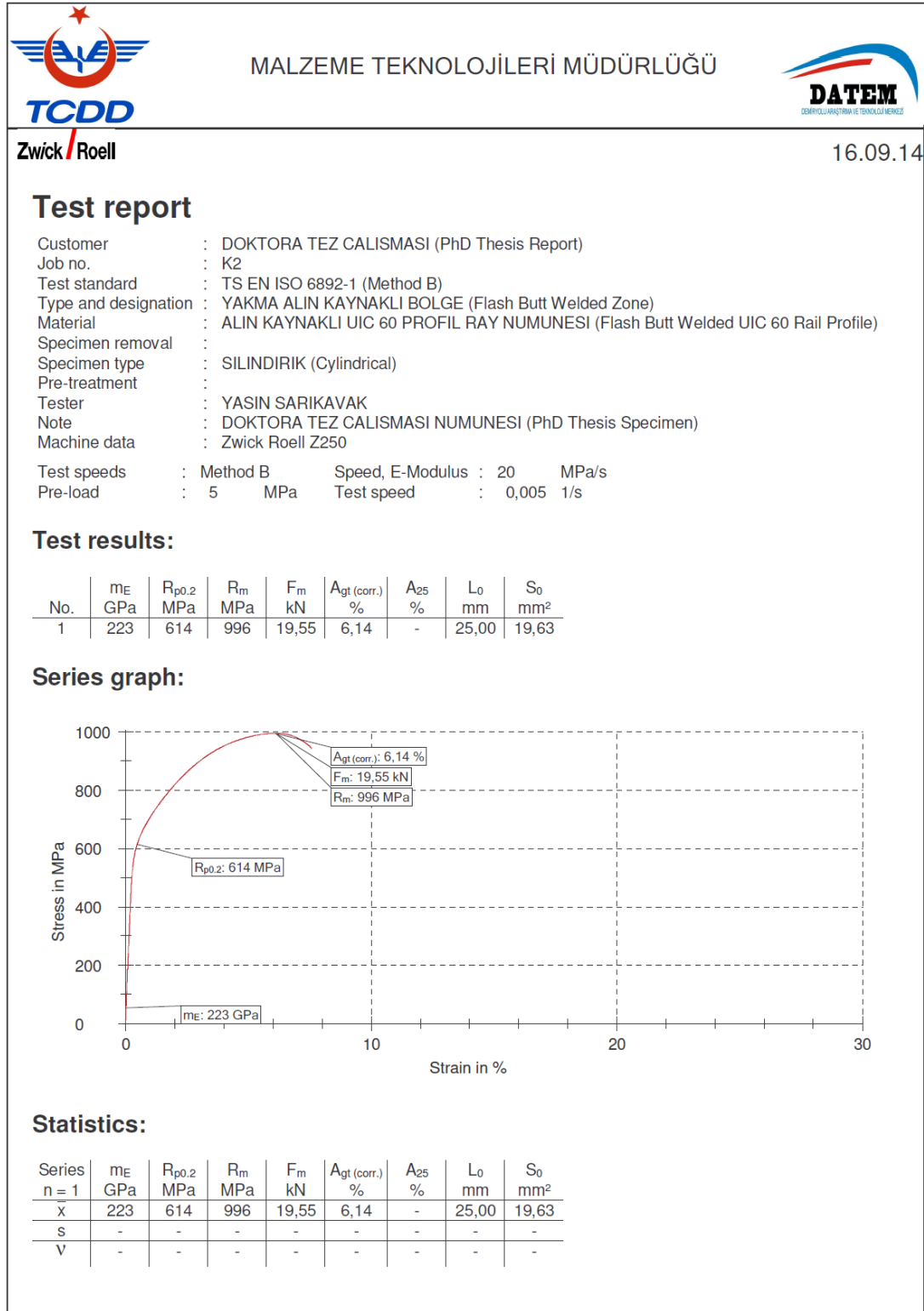
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları



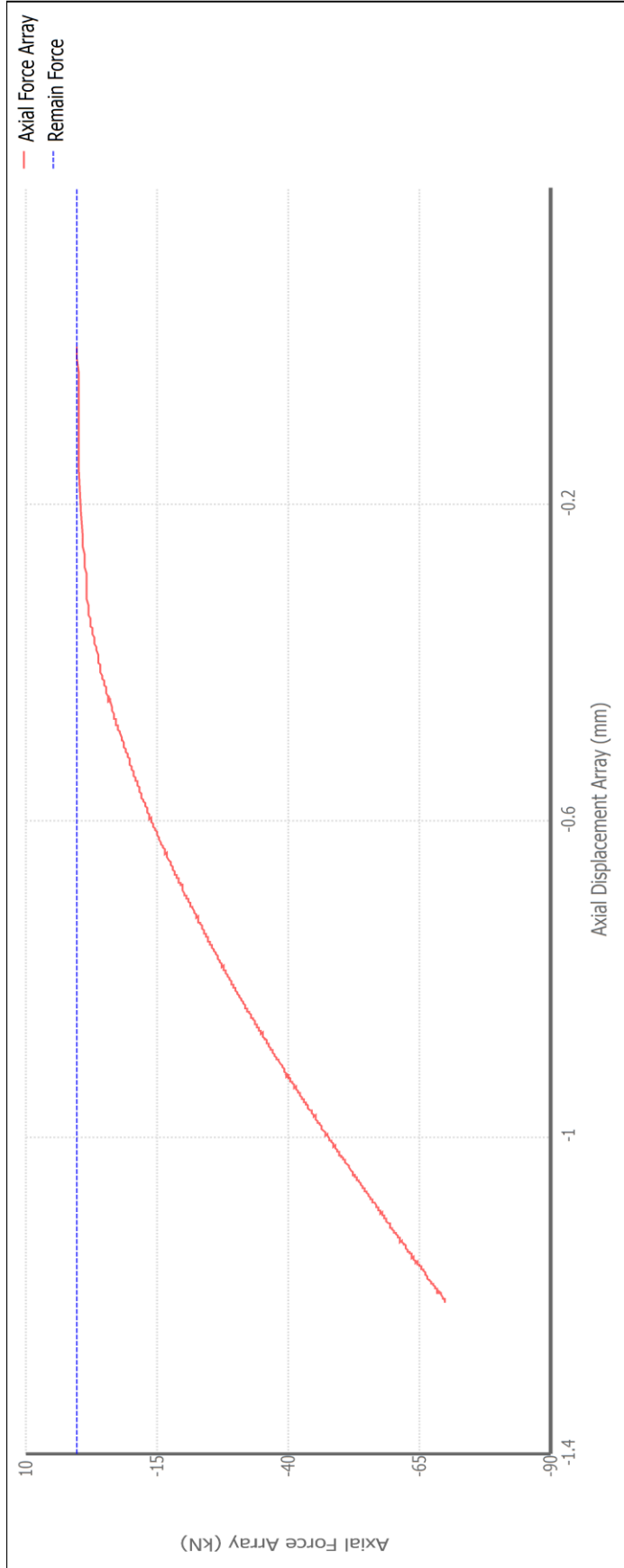
EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları



EK-1.(devam) Çekme deney sonuçları

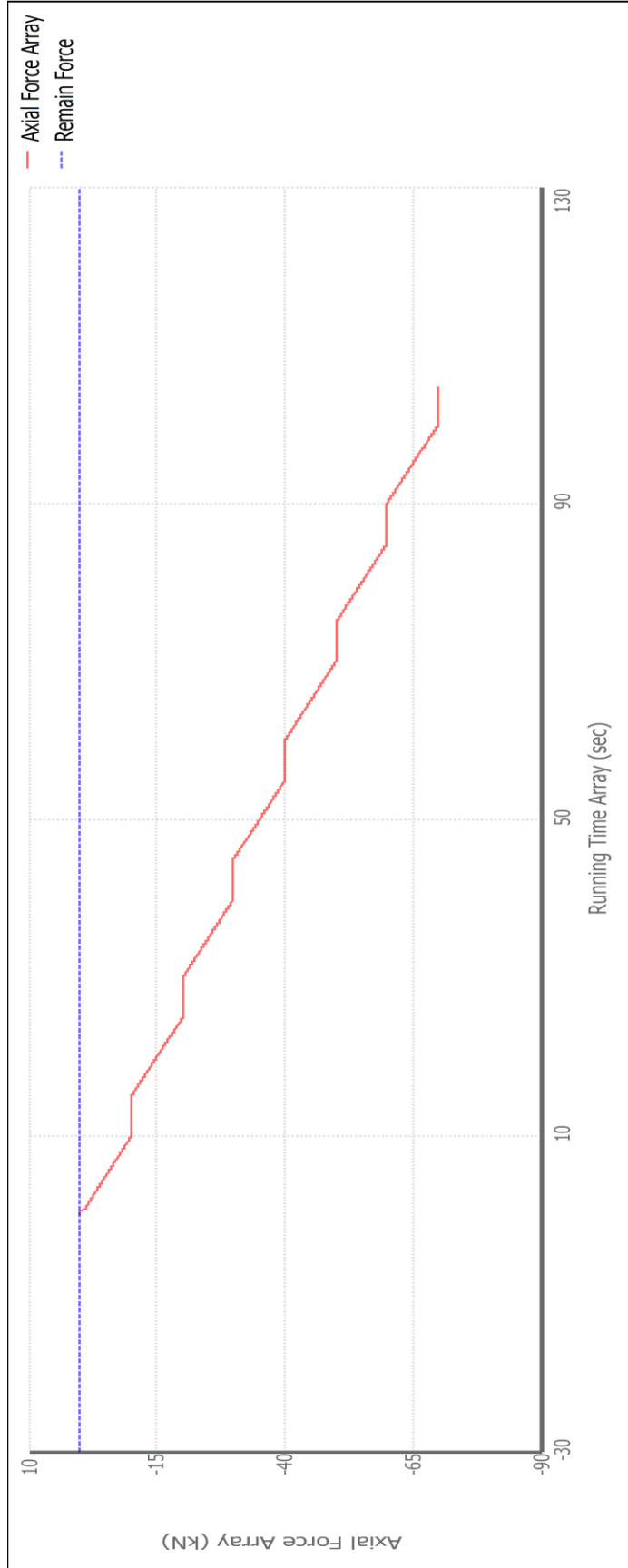


EK-2. Servohidrolik makinadan elde edilen grafikler



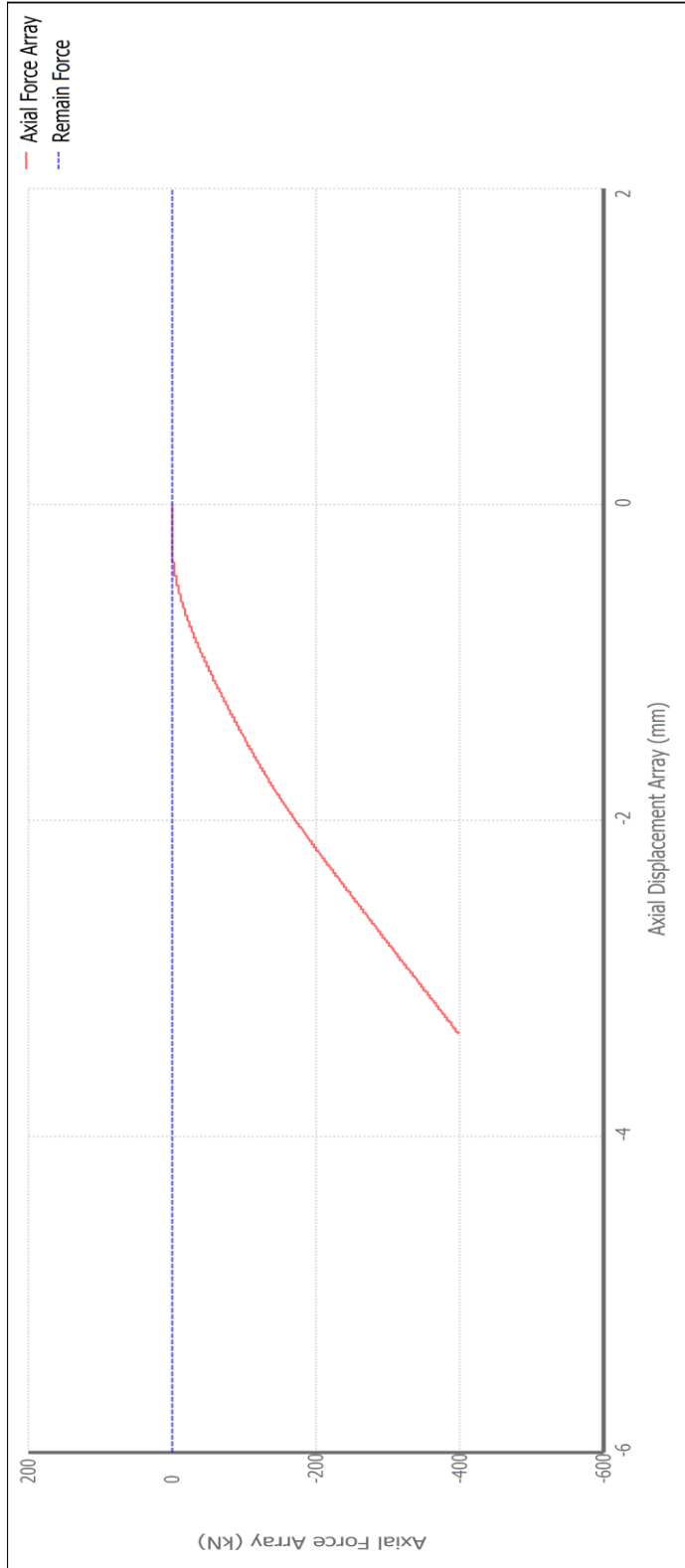
0-70 kN arası yükler için servohidrolik makinadan alınan kuvvet yerdeğiştirme grafiği

EK-2. (devam) Servohidrolik makinadan elde edilen grafikler



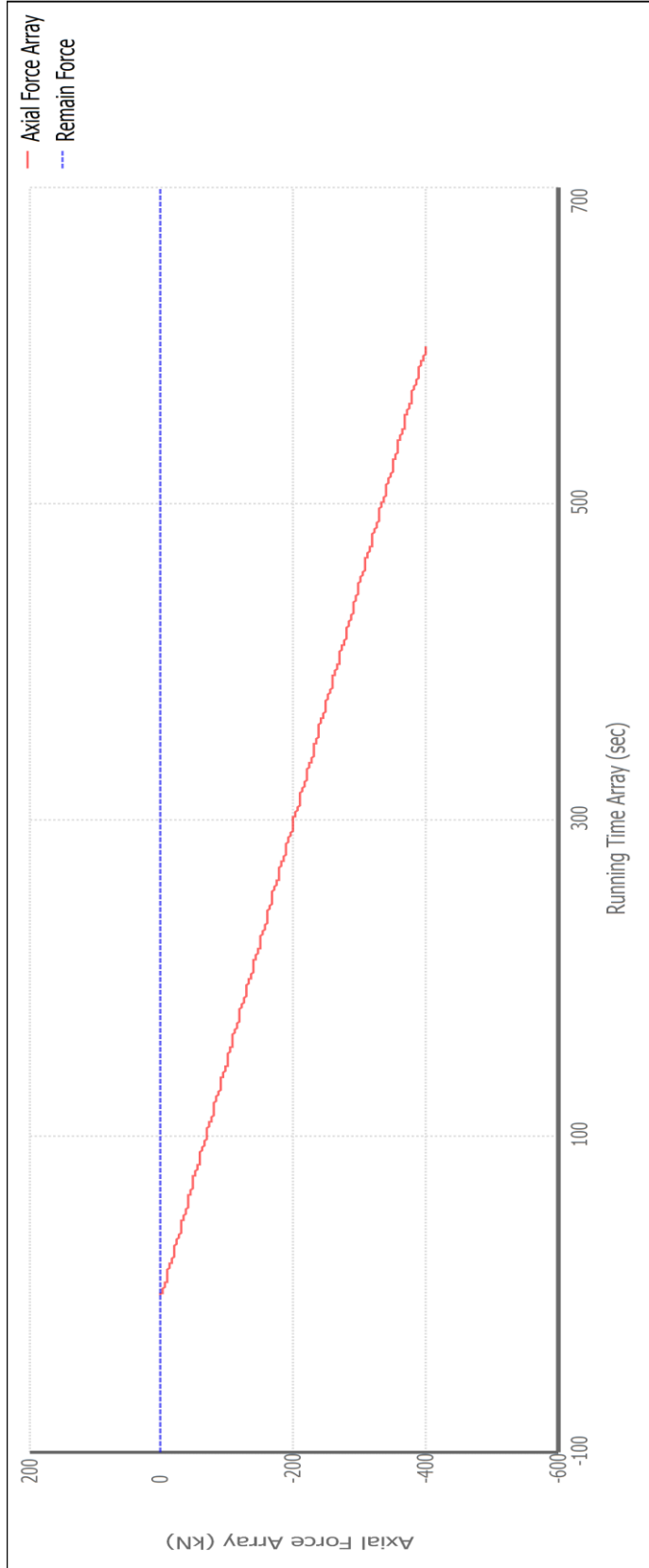
0-70 kN arası yükler için servohidrolik makinadan alınan kuvvet zaman grafiği

EK-2. (devam) Servohidrolik makinadan elde edilen grafikler



0-400 kN arası yükler için servohidrolik makinadan alınan kuvvet yerdeğiştirme grafiği

EK-2. (devam) Servohidrolik makinadan elde edilen grafikler



0-400 kN arası yükler için servohidrolik makinadan alınan kuvvet zaman grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARIKAVAK, Yasin
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.06.1983, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (506) 276 09 69
 e-mail : yasinsarikavak@tcdd.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	York Üniversitesi /Çevrebilimi ve Yönetim	2015
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2006
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-Halen	T.C. Devlet Demiryolları	Makina Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Keskin, A., Sarikavak, Y. and Tugyanoglu, M. (2016). *Failure Analysis of Traction Hook Used in Rail Coaches After the Maintenance*. Paper presented at the 3rd International Symposium on Railway Systems Engineering, Karabük, Turkey.
2. Sarikavak, Y., Coğun, C. and Türkbaş, O. S. (2015). *An Experimental Investigation on Metallurgical and Mechanical Aspects of Flash Butt Welded Rails of High Speed Train Lines*. Paper presented at the III. International Conference on Innovative Materials and Structures Technologies in Metallurgical Engineering, İstanbul, Turkey.

3. Sarikavak, Y. (2013). *Non-Destructive Inspection Techniques in Railway Industry: A Comparison of European and Japanese Approach*. Paper presented at the 2nd International Workshop on Railway Systems Engineering, Karabük, Turkey.
4. Sarikavak, Y. and Coğun, C. (2012). Single Discharge Thermo-Electrical Modeling of Micromachining Mechanism in Electric Discharge Machining. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(5), 1591-1597.
5. Keskin, A. Sarikavak, Y., Tugyanoglu, M. and Dilektasli, C. (2012). *Detecting the propagation of the kidney shaped fatigue failure analysis of rail on the train line*. Paper presented at the 1th International Workshop on Railway Systems Engineering, Karabük, Turkey.
6. Sarikavak, Y. and Coğun, C. (2010). Thermal Modeling of Machining Mechanism in Electric Discharge Machining. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 3, 517-531.

Hobiler

Basketbol, Fotoğrafçılık, Bilgisayar teknolojileri



GAZİ GELECEKTİR..