

**UIC60 HIZLI TREN RAYININ STATİK VE
DİNAMİK ANALİZİ**



Oğuzhan ÇAKMAK

UIC60 HIZLI TREN RAYININ STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Oğuzhan ÇAKMAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Ocak 2018

Oğuzhan ÇAKMAK tarafından hazırlanan “UIC60 HIZLI TREN RAYLARININ STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İsmail ESEN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 15/02/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. İsmail ESEN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif KOÇ (SAÜ)

23/02/2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitü Müdür V.



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

Oğuzhan ÇAKMAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UIC60 HIZLI TREN RAYLARININ STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Oğuzhan ÇAKMAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. İsmail ESEN

Şubat 2018, 118 sayfa

Ülkemizde demiryolu taşımacılığı her geçen gün daha da artmaktadır. Gerek nüfus sayımız gerekse yük taşıma açısından demiryolu taşıma kapasitesinin artması ve konforunun yükselmesi ülkemiz için önemli bir kazanç olacaktır. Çin'den Avrupa'ya ulaşacak modern ipek yolu projesi bilindiği üzere ülkemiz topraklarından da geçecektir. Bu çalışmada bu nedenle hızlı tren raylı sistemlerinde meydana gelen statik ve ray-teker kontak ilişkisinden kaynaklanan deformasyonlar incelenmiş ve analiz edilmiştir. Bu analiz için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Ayrıca demiryolu konforunda bir diğer nokta olan gürültü noktasında da hesaplamalar ve bir takım öneriler getirilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Kontak analizi, hızlı tren, statik, dinamik, Ansys, sonlu elemanlar yöntemi.

Bilim Kodu : 914.1.091

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF UIC60 HIGH SPEED RAILWAY TRACKS

Oğuzhan ÇAKMAK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. İsmail ESEN

February 2018, 118 pages

In our country, Railway transportation is increasing day by day. An increase in railway transport capacity and an increase in comfort both in terms of population census and cargo handling will be an important benefit for our country. The modern silkroad project that will reach Europe from China will also pass through the territory of our country as it is known. In this study, deformations due to the static and rail-to-wheel contact relationships occurring in high-speed railway systems were investigated and analyzed. The finite element method (FEM) was used for this analysis. Furthermore, other issue in comfort of railway is noise which calculated in this study.

Key Word : Transient analysis, high speed train, static, dynamic, Ansys, finite element method.

Science Code : 914.1.09

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. İsmail Esen'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Gerek Yüksek Lisans süresince gerek tezimi yazmam süresince bana her türlü desteği veren canım aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
DEMİRYOLU.....	2
2.1. DEMİRYOLLARININ TARİHÇESİ.....	2
2.2. DEMİRYOLLARININ YAPISI.....	3
2.3. ALT KATMAN.....	4
2.4. BALAST VE ALTBALAST TABAKASI.....	4
2.4.1. Balastın Görevleri.....	4
2.4.2. Altbalastın Görevleri	5
2.5. TRAVERS.....	5
2.5.2. Travers Türleri	7
2.5.3. Bağlantı Elemanları	11
2.5.4. Bağlantı Eleman Çeşitleri	13
2.6. RAYLAR.....	14
2.6.1. Rayların Görevleri Ve Çeşitleri	14
2.6.2. Rayın Kısımları.....	17
2.7. DEMİRYOLU TEKERLEK SETİ.....	18

	<u>Sayfa</u>
2.7.1. Tekerleklerin Yapısı	18
2.7.2. Tekerleğin Görevleri Ve Çeşitleri	19
2.7.3. Aks	20
BÖLÜM 3	22
RAYLARIN ÜRETİMİ	22
3.1. RAY KESİTLERİ	22
3.2. RAY DÖKÜM METHODLARI	23
3.2.1. OBM (Oxygen Bottom Maxhütte) Metodu	23
3.3. SÜREKLİ DÖKÜM METODU	25
3.4. RAYLARIN HADDELENMESİ	26
3.5. MERDANE SEÇİMİ	30
3.6. RAYLARIN ISIL İŞLEMİ	30
3.6.1. In-Line (Hat İçi) Sertleştirme	31
3.6.2. Off-Line (Hat Dışı) Sertleştirme	31
3.7. RAYLARIN BİRLEŞTİRİLMESİ	35
3.7.1. Rayların Cebireyle Birleştirilmesi	35
3.7.2. Rayların Kaynakla Birleştirilmesi	36
3.7.3. Raylarda Kaynak Yöntemleri	37
BÖLÜM 4	39
DEMİRYOLU TEKERLEKLERİNİN ÜRETİMİ	39
4.1. DÖKÜM İŞLEMİ	39
4.2. HADDELEME VE PRESLEME İŞLEMİ	40
4.3. ISIL İŞLEM	43
4.3.1. Isıl İşlem Gereksinimleri	43
BÖLÜM 5	45
DEMİRYOLLARINDA SES VE TİTREŞİM	45
5.1. TİTREŞİM NEDİR?	45
5.1.1. Mekanik Titreşim	45
5.1.2. Sönümlü Ve Sönümsüz Titreşimler	46

Sayfa

5.1.3. Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Titreşim	47
5.1.4. Serbest Ve Zorlanmış Titreşim	47
5.2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SÖNÜMLÜ BİR SİSTEMİN SERBEST TİTREŞİMLERİ.....	47
5.3. DEMİRYOLUNUN TİTREŞİM MODELLEMESİ	49
5.3.1. İki Serbestlik Dereceli Raylı Sistemin Modellenmesi.....	49
5.3.2. Beş Serbestlik Dereceli Raylı Sistemin Modellenmesi	51
5.4. SES İÇİN BAZI TANIMLAMALAR.....	55
5.5. YER TİTREŞİMLERİ.....	56
5.6. SESİN YAYILMASI	57
5.6.1. Geometrik Yayılma	57
5.6.2. Atmosferik Emilim	57
5.6.3. Toprakta Dalga Yayılımı	57
5.6.4. İnsan Algısı.....	60
5.6.5. Bariyer İle Kırınım	61
5.7. SESİN ÖZELLİKLERİ	61
5.7.1. Sesin Hızı.....	61
5.7.2. Basit Harmonik Hareket Saf Ton	62
5.7.3. Sesin Şiddeti Ve Basıncı.....	62
5.7.4. RMS Genlik.....	63
5.8. GÜRÜLTÜ SEVİYELERİ.....	63
5.8.1. Ses Basınç Seviyesi	63
5.8.2. Ses Gücü Seviyesi.....	66
5.8.3. Frekans Analizi Ve dB.....	66
5.8.4. Eşdeğer Gürültü Seviyesi (Leq).....	66
5.8.5. Ses Seviyelerinin Toplanması Ve Çıkarılması	67
5.9. DEMİRYOLLARINDA GÜRÜLTÜ HESABI	68
5.9.1. Toplumun Gürültüye Tepkisinin Ölçümü	68
5.9.2. Gürültü Değerlendirme Ölçümleri.....	69
5.10. FARKLI TREN HIZLARI İÇİN EŞDEĞER GÜRÜLTÜ SEVİYESİ ÖLÇÜMLERİ.....	70
BÖLÜM 6	73

	<u>Sayfa</u>
SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNETİMİ	73
6.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	73
6.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	73
6.2.1. SEA (FEA) İşlemleri	75
6.2.2. Sonlu Elemanlar.....	75
6.2.2.1. Bir Boyutlu Elemanlar	76
6.2.2.2. İki boyutlu Elemanlar	77
6.2.2.3. Üç Boyutlu Elemanlar.....	77
6.3. MESH TİPLERİ.....	77
BÖLÜM 7	79
TASARIM VE ANALİZ	79
7.1. MODELLEME.....	79
7.2. ANSYS PROGRAMINDA ANALİZ BAŞLANGIÇ ŞARTLARI ve MESH UYGULANMASI	85
7.3. STATİK STRUCTURAL ANALİZİ	85
7.3.1. Statik Structural Analizinin Sonuçları	87
7.3.2. Harmonic Response Analizi	99
7.3.3. Hızlı Tren Raylarında Transient (Kontak) Analizi.....	105
BÖLÜM 8	112
ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	112
8.1. STATİK ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	112
8.2. MODAL VE HARMONİK RESPONSE ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	113
8.3. TRANSİENT (KONTAK) ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	114
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	1189

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Demiryolu altyapısı	3
Şekil 2.2. Travers	6
Şekil 2.3. Ahşap travers	8
Şekil 2.4. 2 bloklı güçlendirilmiş UIC 41 travers (300 km/s ve üstü hızlar için)	10
Şekil 2.5. Ray bağlantı elemanı	12
Şekil 2.6. N tipi rijit bağlantı elemanı	13
Şekil 2.7. Ray çeşitleri (soldan sağa sırasıyla: oluklu ray, çift mantarlı ray, patenli ray)	15
Şekil 2.8. UIC 60 patenli (vinyol tipi) ray.....	16
Şekil 2.9. Solidworks'te modellenmiş UIC 60 rayı.....	17
Şekil 2.10. Tekerleğin bölümleri	19
Şekil 2.11. Tekerlek seti	20
Şekil 3.1. OBM işlemi	24
Şekil 3.2. Sürekli döküm prosesleri	25
Şekil 3.3. Haddeleme	27
Şekil 3.4. 1. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı	28
Şekil 3.5. 2. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı	28
Şekil 3.6. 3. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı	29
Şekil 3.7. Çıkış (Sıyırma) yoluğu	30
Şekil 3.8. Demir karbon denge faz diyagramı	32
Şekil 3.9. Isıl işlem östenit sıcaklığı hesaplama.	32
Şekil 3.10. Mikroyapılar (sırasıyla ferrit- ferrit ve perlit - perlit).	33
Şekil 3.11. UIC 60 rayının mikroyapısı (beynit)	34
Şekil 3.12. Cebire ile bağlanmış raylar	36
Şekil 4.1. Basınç kontrollü döküm	40
Şekil 4.2. Tren tekerleğinin üretim şeması	41
Şekil 4.3.. Halkanın haddelenmesi	43
Şekil 4.4. Haddeleme işlemi	43
Şekil 4.5. Beynit iç yapısı	44

Sayfa

Şekil 5.1. Yay sönüm sistemi .	46
Şekil 5.2. Tek serbestlik dereceli sönümlü yay .	47
Şekil 5.3. 2 serbestlik dereceli raylı sistem modeli .	49
Şekil 5.4. 5 serbest dereceli sistemin modeli.....	51
Şekil 5.5. Ses dalgaları .	55
Şekil 5.6. Rayleigh yüzey dalgalarının şematik çizimi .	59
Şekil 5.7. Kırınım .	61
Şekil 5.8. Suya atılan taşın oluşturduğu dalgalar .	62
Şekil 5.9. RMS .	63
Şekil 5.10. dB ve linear ölçeğin arasındaki ilişki.....	64
Şekil 5.11. Kaynaktan uzaklaştıkça ses basıncının da düşmesi	65
Şekil 6.1. Karmaşık geometrinin daha küçük parçalara ayrılması .	74
Şekil 6.2. Mesh eleman çeşitleri .	76
Şekil 6.3. 3 Boyutlu elemanlar .	78
Şekil 7.1. Solidworks'te modellenmiş beton travers.....	80
Şekil 7.2. Solidworks'te modellenmiş UIC60 rayı (900 mm uzunluğunda).....	81
Şekil 7.3. Solidworks'te modellenmiş 1000 mm çapında tren tekeri.....	82
Şekil 7.4. Parçaların montajlanmış halleri ve bağlantı elemanları (Dinamik Analiz için).....	83
Şekil 7.5. Ray-Teker kontak bölgesi.....	84
Şekil 7.6. Statik analiz için oluşturulan model.....	84
Şekil 7.7. Static Structural analiz yönteminin Workbench'e atılması.....	85
Şekil 7.8. Statik analizde yapılan mesh.....	87
Şekil 7.9. Static Structuralda toplam deformasyon.....	88
Şekil 7.10. Static Structural'da toplam deformasyon (ray mantarının altı).....	89
Şekil 7.11. Static Structuralda maksimum asal gerilme.....	90
Şekil 7.12. Static Structuralda maksimum asal gerilme.....	91
Şekil 7.13. Static Structural'da minimum asal gerilme.....	92
Şekil 7.14. Static Structural Minimum Principal Stress (2).....	93
Şekil 7.15. Static Structural'da eşdeğer gerilme.....	94
Şekil 7.16. Static Structural'da eşdeğer plastik gerilme.....	95

Sayfa

Şekil 7.17. Static Structural’da eşdeğer plastik gerilme.....	96
Şekil 7.18. Static Structural’da emniyet katsayısı.....	97
Şekil 7.19. Ray deformasyon gösterimi.	98
Şekil 7.20. Yorulma dayanımı emniyet katsayısı.....	98
Şekil 7.21. Yorulma dayanımı rayın ömrü.....	98
Şekil 7.22. Modal ve Harmonic Response’un Workbench’e atılması.	99
Şekil 7.23. Modal analizdeki mesh görünümü.....	100
Şekil 7.24. Modal analizin Harmonic Response’a bağlanması.....	101
Şekil 7.25. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları.....	101
Şekil 7.26. Modal analizinde total deformasyon sonuçları (mode 2).	102
Şekil 7.27. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları (mode 3).	102
Şekil 7.29. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları (mode 5).	103
Şekil 7.30. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları.....	104
Şekil 7.31. Frequency Response analizinin genlik ve faz açısı diagramları.	104
Şekil 7.32. Frekansa bağlı olarak deformasyon miktarları ve faz açısı.	105
Şekil 7.33. Normalize edilmiş frekans.	105
Şekil 7.34. Transient analizinin Workbench’e aktarımı.....	106
Şekil 7.35. Modelin mesh ağının oluşturulması.....	107
Şekil 7.36. Transient analizde Y eksenindeki deformasyon.	108
Şekil 7.37. Transient analizde Z eksenindeki deformasyon.....	109
Şekil 7.38. Transient analizde rayın Y eksenindeki ivmelenme.	109
Şekil 7.39. Transient analizde rayın Z eksenindeki ivmelenmesi.....	110
Şekil 7.40. Transient analizde ray ve tekerin emniyet katsayısı.	110
Şekil 7.41. Transient analizde toplam deformasyon.	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerde kullanılan monoblok öngerilmeli beton traverslerin mekanik özellikleri	11
Çizelge 2.2. Tren tekerleğinin kimyasal kompozisyonu	20
Çizelge 2.3. Aksların kimyasal kompozisyonu	21
Çizelge 2.4. Aksların mekanik özellikleri	21
Çizelge 3.1. TCDD'nin kullandığı rayların boyutları	22
Çizelge 3.2. 900 A kalite rayın kimyasal kompozisyonu.	31
Çizelge 3.3. Karbon oranının ve soğuma hızının sertliğe ve uzama miktarına etkisi	34
Çizelge 5.1. Oluşturduğu olumsuz etkilere bağlı olarak gürültü düzeyleri	65
Çizelge 5.2. Desibel toplanmasındaki kısaltma	67
Çizelge 5.3. Referans miktarları ve seviye formülleri	68
Çizelge 7.1. Raylı sistem ekipmanlarının malzeme özellikleri	86
Çizelge 7.2. Ray ve traversin element ve node sayıları.	86
Çizelge 7.3..Raylı sistemin sertlik ve sönümlenme değerleri.	99
Çizelge 7.4. Her bir ray ve traversdeki element ve node sayısı	100
Çizelge 7.5. Her bir parça için mesh sayısı.	107
Çizelge 7.6. 3. Mode için bazı deformasyon miktarları.	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- r : genlik
f : frekans (Hz)
t : zaman
x : dalganın aldığı yol
c : ses hızı
p : güç
I : şiddet (W/m^2)
P : basınç
L : ses basınç düzeyi
SWL : ses güç seviyesi
W : kaynakta ölçülen sesin gücü
P(t) : anlık ses basıncı
P₀ : referans ses basıncı
L_{max} : maksimum ses seviyesi
L_{min} : minimum ses seviyesi
L_{gag} : gün içinde alınan ses ölçümlerinin ortalaması
T : toplam ölçüm süresi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda ülkemizde demiryolu ağları önemli miktarda arttığı gözlenmektedir. Başta Kardemir A.Ş. olmak üzere önemli yatırımlar ve araştırmalar yapılmaktadır. Gerek karayoluna göre daha güvenli oluşu gerek taşıma kapasitesi bakımından demiryolları dünyada da önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu çalışmada da demiryolları raylarının araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma rayların üretimi, ısıl işlemleri, tribolojik incelemesi, mikro yapısı ve UIC60 raylarının dinamik ve statik analizinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (FEM) analizi üzerine olacaktır.

BÖLÜM 2

DEMİRYOLU

2.1. DEMİRYOLLARININ TARİHÇESİ

Antik Dönemler

Kanıtlar, 6 ila 8,5 km uzunluğundaki Diolkos kaldırım demiryolunun, M.Ö. 600 yılından itibaren Yunanistan'daki Korint'in Şehrinde gemileri naklettiğini gösteriyor.

Ahşap ray dönemi

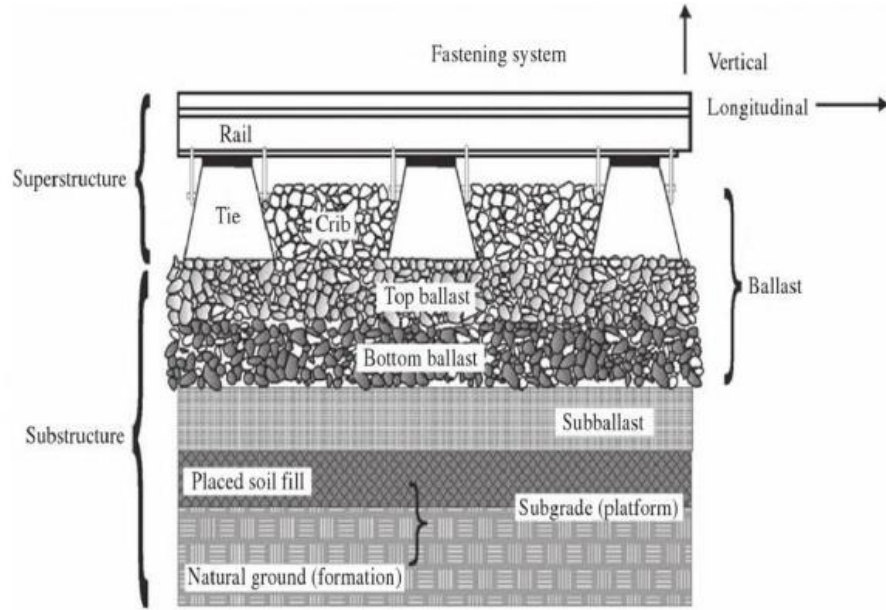
Demiryolu endüstrisinin başlangıcında, raylar dikkatlice oyulmuş taşlardan hatta ahşaptan yapılmaktaydı. Modern demiryolu taşıması, taşra tarım topluluklarının büyük pazarlarla bağlantısını sağlamak amacıyla 1820'lerde buharlı lokomotif ve çelik raylarla başladı. O günlerde, birçok insan toplulukları birbirine bağlayan ana taşıma şekli olan demiryollarında çalışıyorlardı. Çünkü çelik raylar karayollarından çok daha konforlu ve güçlüydü. Demiryolları, taşradaki maden ocaklarından ihtiyaç sahibi fabrika ve şehirlere kömür ve diğer gerekli madenleri taşımak için kullanılıyordu. Napolyon Savaşının başlangıcı savaşı devam ettirmek için barut ve kurşun, kıtlık nedeniyle pek çok hayvan ihtiyacı oluşturdu. At sırtında birçok piyade ve öküzler, yiyecek ve malzeme ile dolu askeri vagonu ve topları çevrelemek için halen kullanılmaya devam ediyordu. Demiryolu arabalarının birçoğu sadece kömür ve demir cevheri gibi maddelerle dolu olduğu için bu süre boyunca demiryolu malların ticari teslimatı için fazla kullanılmadı.

Her bir buharlı lokomotif yalnızca belirli sayıda ağır yüklü otomobilleri güvenilir bir şekilde çekebildiğinden öncelik, daha iyi ödemeyi sürdüren kömür ve demir cevheri piyasaları ile devam etmekte.

2.2. DEMİRYOLLARININ YAPISI

Bu bölümde demiryolu temel bileşenleri ve bunların görevleri hakkında bilgi verilecektir. Demiryolları 8 temel unsurdan oluşmaktadır. Bunları temelden yukarı sıralayacak olursak;

- Doğal Zemin
- Yerleştirilmiş Toprak dolgusu
- Balastaltı (Subballast)
- Alt Balast (Bottom Ballast)
- Üst Balast (Top Ballast)
- Travers
- Bağlantı
- Ray



Şekil 2.1. Demiryolu altyapısı [1].

2.3. ALT KATMAN

Alt katman, üzerine balast ve alt balast tabakalarının dayandığı malzeme tabakasıdır. Alt katman, ray yapısında çok önemli bir bileşen olup, ray hatalarının ve kötü ray kalitesinin geliştirilmesine neden olmuştur. Alt katmanın görevi taşıyıcı kısım olmasıdır. Üstteki bileşenlerin ilettiği yükleri taşımaktadır. Kısaca altyapı, bir ulaştırma yapısının konumunu oluşturan ve yolu dış etkilerden koruyan, ancak genelde yuvarlanma yüzeyinin altında kaldığı için “gözden irak olan” bir yapıdır. Oysa bir yolun hizmet düzeyi ve kalitesi en az %50 oranında altyapının kalitesine ve korunma koşullarına bağlıdır.

2.4. BALAST VE ALTBALAST TABAKASI

2.4.1. Balastın Görevleri

Balast traverse yataklık eden kübik, sağlam ve sert taşlara balast denir. İyi balastlar genelde granit ve bazalt taşlarından yapılmaktadır. Bu malzemelerden 30-60 mm boyutlarında kırılarak hazırlanır [3].

Balast tabakasının görevleri şöyle sıralanabilir;

- Demiryolu rayını sağlam bir şekilde ama elastik olarak destekler;
- Kuvvetleri demiryolu yatağının üst düzleminden altyapıya taşır;
- Trenin oluşturduğu titreşimlerin büyük bir bölümünü sönmeler;
- Demiryoluna uygun uzunlamasına, çapraz kesitin stabil olmasını ve direncini sağlamak;
- Yerleşim, yön ve büküm geometrisinin parametrelerini kalıcı hale getirmek;
- Yağmur suyunu dışarı atmak [2].

Balast yukarıda belirtilen görevleri tamamıyla yerine getiremez. İyi yüke dayanıklılık özellikleri ve ilave yol stabilitesi için, balastın iyi derecelenmesi ve kompakt olması gerektiği, bununla birlikte, suyun dağılmasını ilgili bakım ile birlikte daha zor hale

getirdiği sylenabilir. Balastın gerçekleştirmesi gereken çeşitli fonksiyonlar arasında dengeli olması gerekir.

2.4.2. Altbalastın Görevleri

Balastın altında yatan alt balastın görevleri aşağıdaki gibidir:

- Alt tabanın üst yüzeyinin balast taşlarına karşı korunması,
- Stresin daha da dağıtılması,
- Yağmur suyunun daha da uzaklaştırmak,
- Düzgün akışı sağlamak için alt yüzeyin üst yüzeyine enine bir eğim kazandırmak.

2.5. TRAVERS

Vagonların tekerleklerinden raylara geçen kuvvetleri balast ve altyapıya ileten elemana travers denilir. Traversler ezilmeye karşı dirençli kütlelerdir. Traversler ayrıca 2 ray arasındaki mesafenin ölçüsünü de sağlar.



Şekil 2.2. Travers [24].

Traversin görevleri;

- Raylardan gelen kuvvetleri balasta aktarmak;
- İki ray arası mesafeyi korumak;
- Ray titreşimini sönmölemek;
- Darbe dalgalarının ve sesin çevreye etkisini azaltmak [2].

TCDD 4. Bölge Müdürlüğü ön germe-ön çekmeli beton travers teknik şartnamesinde (2013) hat karakteristikleri şu şekilde verilmiştir.

Satın alınacak beton traversler aşağıda verilen karakteristiklere sahip hatlarda kullanılacaktır.

Ray : 60 E1, 900A kalitesinde

Dingil Yüğü : 22.5 ton/dingil

Maksimum Hız	: 250 km/saat
Minimum Kurb Yarı Çapı	: 200 m.
Maksimum Dever	: 130 mm
Maksimum Eğim	: %0,25
Ray Oturma Yüzeyi Eğimi	: 1/40
Ekartman Açıklığı	: 1435 (-1, +2) mm
Balast Çapı ve Derinliği	: 30-60 mm, Travers altından min. 30 cm
Traversler Arası Açıklık	: 60 cm.
Ray Birleşim Şekli	: Kaynaklı ve cebireli

2.5.2. Travers Türleri

2.5.2.1. Ahşap Travers

Mühendisler, geleneksel olarak, herhangi bir hammaddenin ilerlemesine yakın bir şekilde kullanılmaya çalışmaktadır. Ahşap o zaman için bariz bir seçimdi ve sonraki yüzyıl boyunca da traversler bütün dünyada ahşaptan imal edildi.

Ahşap traversler yükleri diğer traverslerden daha iyi bir şekilde dağıtır. Buna uygun olarak, beton traverslerin balast tabakası için nispeten daha fazla bir kalınlık gerektirdiği yerde, uygun veya kalitesiz alt katmanda döşenen ağlar için önerilir. Yüksek maliyetleri ve kısa ömürleri nedeniyle, Avrupa'daki kullanımı hali hazırda beton traverslerin kullanılmadığı durumlarla sınırlıdır. Ancak yine de Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılır. Ahşap traversler için günümüzde kullanılan ahşap çeşitleri şunlardır:

Avrupa ağaçlarından kayın ve meşe, tropikal ağaçlardan azobe kullanılmaktadır. Çam ağacı kerestesi de geçmişte kullanılmıştır. Bugün çeşitli demiryolları tarafından kullanılan ahşap traversler çoğunlukla daha dayanıklı ve daha güçlü olan tropikal

azobe ağacındandır. Yeraltı tünellerinde, Avustralya'da yetişen jarrah ağacından yapılan traversler kullanılır.

Ahşap traversler aşağıdaki etkilerden zarar görür:

- Ahşabın, kuru ve nemli veya sıcak şartlarda fiziksel ve kimyasal olarak parçalanması;
- Böcek ve mantarların saldırısı altında kalması.

Geometrik Özellikleri:

Ahşap traverslerin geometrik karakteristikleri UIC tarafından belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Ahşap travers [25].

Avantajları ve Dezavantajları: Ahşap traverslerin en önemli avantajı esneklik ve daha iyi yük dağıtımıdır. Ahşap traversler daha iyi yalıtım sağlar. Son olarak beton traverslerle karşılaştırsak ahşap traversler boy olarak daha kısaldır.

Dezavantajlarındaysa diğer traverslere nazaran kısa ömürleri, daha yüksek maliyet ve ağırlıklarının bir sonucu olarak enine dayanımının az olmasıdır. Bunun sonucu olarak trenin yüksek hızlara ulaşmasını engeller [26].

2.5.2.2. Beton Traversler

Monoblok betonarme traversler, ilk tanıtıldığında aşağıdaki ciddi içsel zayıflıkları ortaya koyuldu:

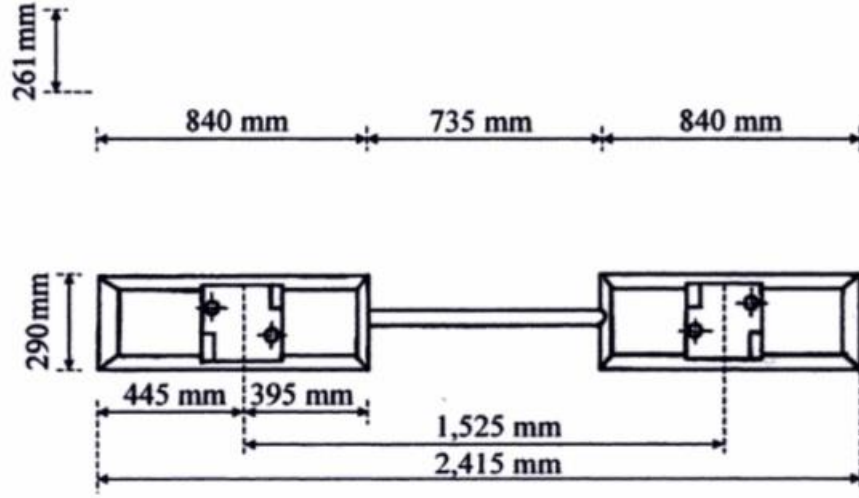
Dinamik tren yüklerinin etkisi altında kırılma eğilimi, geniş çatlaklar ve kusurlara neden olur;

Traversin merkezindeki parçada yüksek çekme gerilmesi halinde çok düşük yorulma dayanımı, Çekme dayanımı aşılsa, takviye çubuklarının kaymasına neden olur.

Bu iki zayıflığın üstesinden gelmek için bunlar gereklidir:

- Darbe yükünün azaltmasını sağlamak amacıyla ray ve traversin arasına absorbe edici malzemeden bir parça koymak; bu malzemeler lastik pedler içerir, bu da elastik tutturucuların kullanılmasını gerektirir,
- Betonla aynı ömürde olan takviye çubukları kullanmak.

UIC 41 türü traversler yüksek trafik yükleri ve yüksek hızlara uygundur (UIC 1 ve 2. Grup). Orta seviyede yük içeren ve 200 km/s az hızlı yollara, daha kısa 2,245 m ve 180 kg olan U31 adındaki traversler kullanılır (UIC 3 ve 4. Grup) [26].



Şekil 2.4. 2 bloklı güçlendirilmiş UIC 41 travers (300 km/s ve üstü hızlar için) [26].

Çift bloklı traverslere balast kalınlığı ve ahşap traverslerden daha fazla güç gerekir. Bu gereksinimler bir araya geldiği zaman, ikiz blok traverslerinin üzerine döşenen parça tatmin edici bir davranışa sahip olur. Alt zemin kalitesiz olduğunda özel bir bakıma alınmalıdırlar. Bu durumda balast kalınlığı daha fazla artırılmalıdır. Esnek bağlantı çubuklarının yüzünden, ikiz bloklı traversler ekstra bakıma ihtiyaç duyarlar. Böylece iki bloğun farklı şekilde eğilmemesi ve gevşememesi sağlanır. İkiz bloklı traversler için olan Avrupa standartlarında, çelik bağlantı elemanlarında şu gereksinimlerin sağlanması gereklidir:

- Kimyasal kompozisyon: $0.28\% < C < 0.80\%$, $0.45 < Mn < 1.40\%$, $P < 0.08\%$, $S < 0.08\%$, $Si < 0.50\%$,
- Mekanik Özellikler: çekme dayanımı 550-1030 MPa aralığında olmalıdır, Kayma dayanımı 400 MPa'dan büyük ise minimum uzama miktarı $> \%8$ olmalıdır. Eğer kayma dayanımı 350 ile 400 MPa arasında olursa minimum uzama miktarı $> \%14$ olmalıdır.
- Brinell sertliği 160-300 aralığında olmalıdır.

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerde kullanılan monoblok öngerilmeli beton traverslerin mekanik özellikleri [26].

Ülke	Travers boşluğu	Ray tipi	Maksimum tren hızı (km/s)	Her aksa düşen yük miktarı	Traverslerde gelişen maksimum moment (M_{max})	Beton için izin verilen gerilme (kg/cm^2)
Avustralya	550-600	53/60 kg/m	160	24,5	1,62	23
Kanada	610	132RE/136RE	130	29,2	2,01	33
Çin	550	50kg/m	120	24,5	1,62	26
Almanya	600-650	S54/UIC60	250	22,1	1,60	30
İngiltere	650-700	BS113A	200	24,5	1,65	45
İtalya	600	UIC60	180	22,1	1,19	47
Japonya	590	50,4/60,8 kg/m	210	16,4	0,96	n.a
İsveç	600-650	SJ50	130	22,2	1,47	30
ABD	610	65/69 kg/m	200	32,1	2,33	50
Güney Afrika	700	48/47 kg/m	160	22,1	1,38	28
Hindistan	650	UIC60	130	22	1,49	20
Rusya	500-643	R50/R65/R70	200	26,5	1,95	20

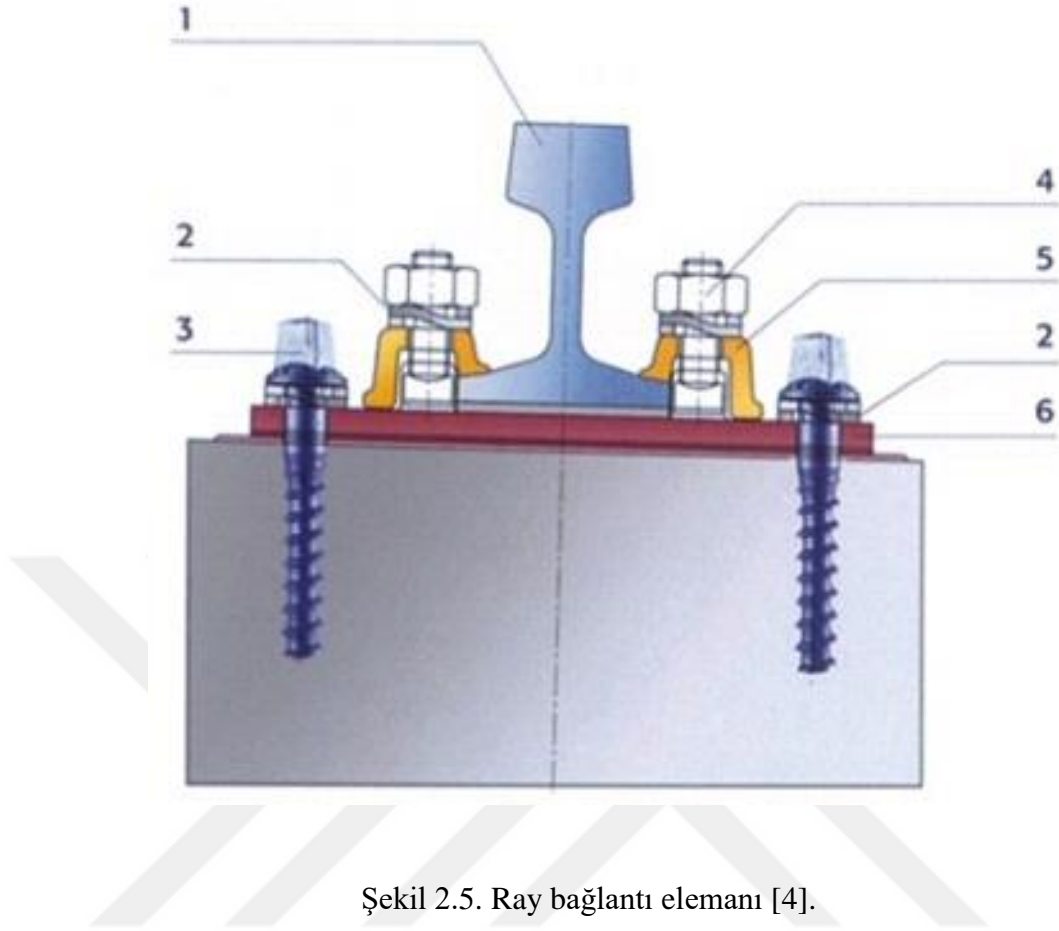
Avantajları ve Dezavantajları

Monoblok traversler, ikiz bloklü traverslere benzer davranışlar sergiler. Bu traversler, ray uzaklıklarını tatmin edici bir şekilde tutar ve uzun ömürlüdürler. Elastik bağlantı elemanlarına ve sinyal için özel aksesuarlara ihtiyaç duyarlar.

Ancak monoblok traversler ikiz blok traverslerden yükü daha iyi iletse de ahşap traversler kadar iyi iletmezler. Monoblok traverslerin en dirençleri ikiz bloklardan düşüktür, ama ahşap traverslerden iyilerdir. Ayrıca monoblok traversler bakım muayeneleri için de iyi bir yüzey sağlarlar.

2.5.3. Bağlantı Elemanları

Rayları traverslere bağlayan, rayların hareket etmesini önleyen ve raylardaki kuvvetleri traverse ileten bağlantı elemanlarıdır [4].



Şekil 2.5. Ray bağlantı elemanı [4].

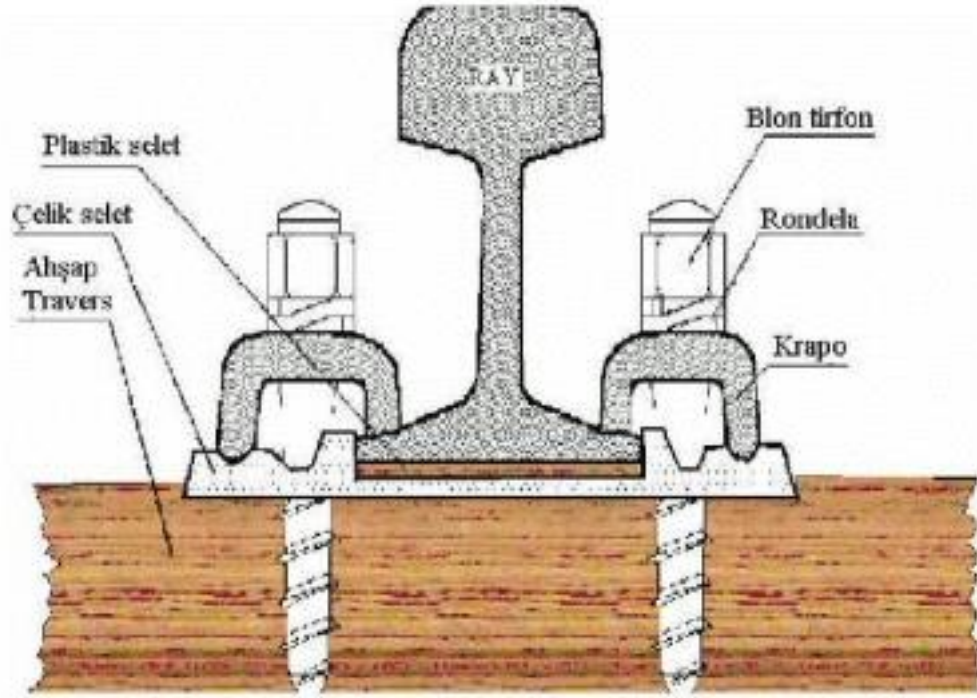
Ray bağlantı elemanlarının başlıca görevleri;

- Rayların sabit kalmasını sağlamak,
- Ekartmanın korunması,
- Rayların plastik şekil değişimini önlemek,
- Rayların tekerleklerden aldığı kuvvetleri traverse iletmek,
- Tren trafiğinin neden olduğu titreşimleri azaltmak ve hafifletmek,
- Kolay kurulum ve bakım,
- Elektrik yalıtımı,
- Bileşenler arasındaki aşınmadan ve aşırı gerilmeden kaçınma,
- Makul maliyet ve ömrünün traverslerle uyumlu olması,
- Rayların sökülmesini engellemektir.

2.5.4. Bağlantı Eleman Çeşitleri

2.5.4.1. Rijit Bağlantılar

Demiryolunun kullanılmaya başlanmasıyla beraber rijit bağlantı elemanları kullanılmaya başlanmıştır. Ahşap traverslere rayların bağlanması, demir travers bağlantısı ve N tipi bağlantı elemanları rijit bağlantı elemanlarına örnektir. Ancak bu rijit bağlantı elemanlarının elastikiyet sorunlarından dolayı her tren geçişinde deplasmanlar meydana gelmiş ve bu bağlantı elemanları buna uyum gösterememişler. Bu sebeple bu bağlantı elemanları zamanla görevini düzgün yerine getirememekte ve bakım maliyetlerine yol açmaktadır.



Şekil 2.6. N tipi rijit bağlantı elemanı [5].

2.5.4.2. Elastik Bağlantı Elemanları

Çok fazla sayıda elastik bağlantı elemanı vardır. Nabla, Vossloh, Pandrol bunlardan bazılarıdır. Elastik bağlantıların bir kısmı seletli bir kısmı seletsiz olmaktadır. Bu bağlantı elemanları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Seletsiz doğrudan montaj ile sabitleme,
- Seletsiz dolaylı yoldan montaj ile sabitleme,
- Seletli doğrudan montaj ile sabitleme,
- Seletli dolaylı yoldan montaj ile sabitleme.

2.6. RAYLAR

2.6.1. Rayların Görevleri Ve Çeşitleri

Rayların görevleri şu şekilde sıralanabilir.

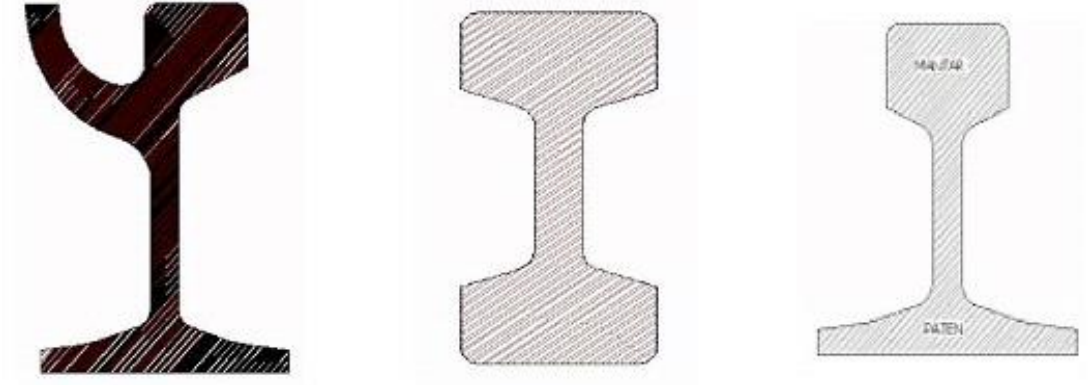
- Trenlerin tekerlekleri ve yol arasında sürtünme katsayısını azaltarak yuvarlanma yüzeyi oluşturmak;
- Tekerlekler için kılavuz oluşturmak;
- Tekerleklerden aldığı yükleri traverse iletmek.

Rayların çeşitlerini sıralamak gerekirse;

- Oluklu raylar;
- Çift mantarlı raylar;
- Patenli raylar (Vinyol tipi raylar) [5].

2.6.1.1. Oluklu Raylar

Oluklu raylar tramvaylarda kullanılan ray çeşididir. Demiryoluyla karayolunun kesiştiği yerlerde de kullanılır [6].



Şekil 2.7. Ray çeşitleri (soldan sağa sırasıyla: oluklu ray, çift mantarlı ray, patenli ray) [5].

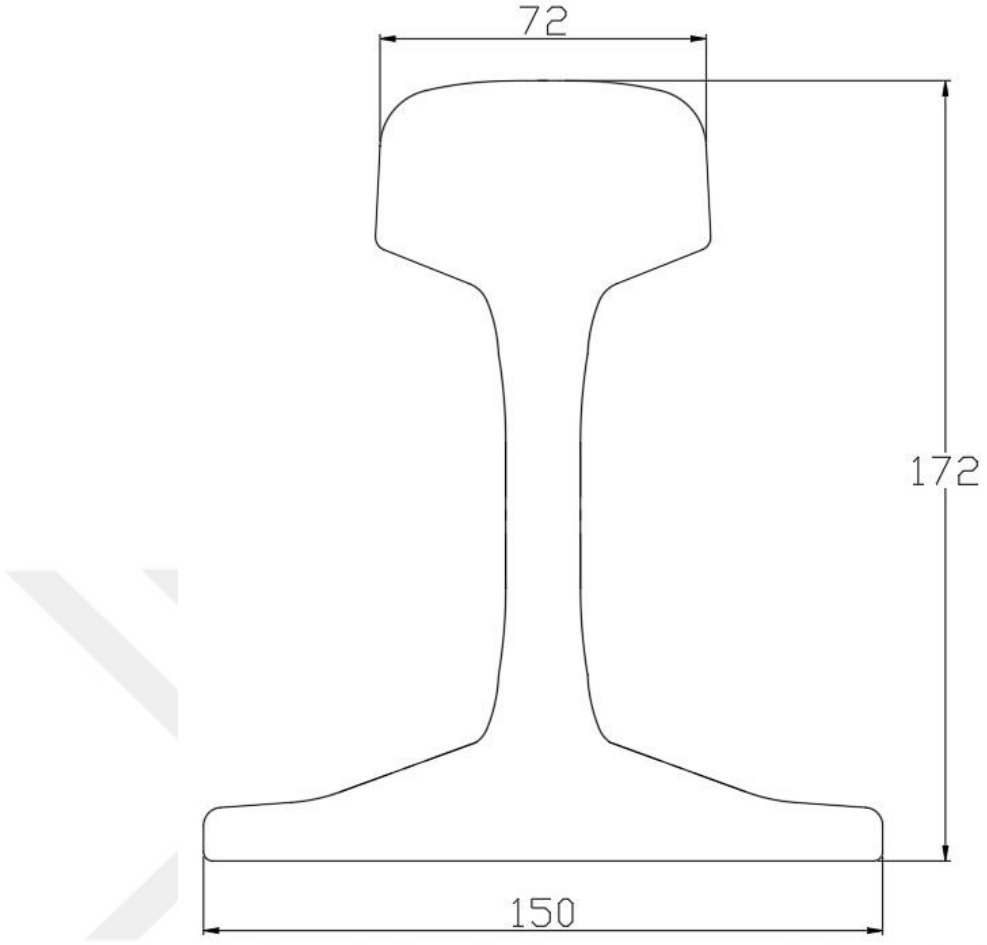
2.6.1.2. Çift Mantarlı Raylar

Simetrik bir yapıya sahip olan çift mantarlı rayların kullanım amacı üst mantarın tren tekerleğinin ray yüzeyinde oluşturduğu aşınmayı rayı çevirerek düzeltmekti. Ama rayın üstü aşınırken altının da aşınacağı düşünülmemişti. Bu yüzden artık kullanılmıyor. En son İngiltere’de 1938 yılında kullanılmış. Şu anda da Fransa’nın bazı bölgelerinde ikinci derece hatlarda kullanılmaktadır [6].

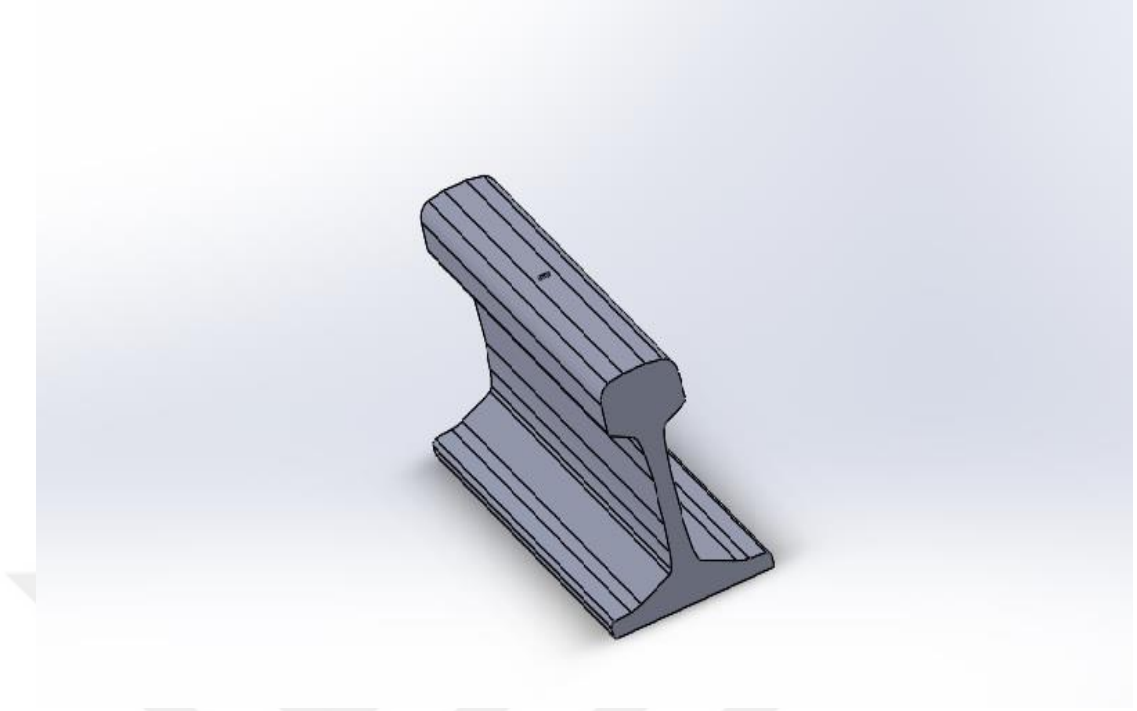
2.6.1.3. Patenli Raylar (Vinyol Tipi Raylar)

Her ne kadar Vinyol ismiyle anılsa da bu rayı ilk üreten Amerikalı Stevens olmuştur. Vinyol, geniş alanda kullanımını sağladığı için onun adı verilmiştir. Şu anda tüm dünyada kullanılan ray tipidir.

İlk raylar 25 kg/m’den daha küçük ağırlıklarda idi. Sonraları dingil yükleri ve hızların artması ile beraber bakım masraflarını azaltacak şekilde rayın birim ağırlığı 40, 50, 60 ve hatta 70 kg/m ye kadar çıktı [6].



Şekil 2.8. UIC 60 patenli (vinyol tipi) ray.



Şekil 2.9. Solidworks'te modellenmiş UIC 60 rayı.

Ray boyutları ilk 12 m olarak üretilirken bu sakıncalı bulunup değiştirilmiştir. Bunun sebebi iki dingilli araçların dingil arası mesafesinin 12 m olmasıdır. Aynı anda ön ve arkada dingilin contalara çarpmalarıdır. Raylar günümüzde kaynaklanarak boyutları uzatılmaktadır. En çok üretilen ray boyları 18, 24, 30, 36 m'dir. Almanya'da 60 m, Avusturya'da 108 m uzunlukta raylar üretilmektedir [6].

Rayların aşınmaya karşı mukavemetlerinin yüksek olması istenir. Bu sebeple üretim aşamasında %C oranı yüksek olmalıdır. Döküm aşamasında içine manganez katkısı da eklenerek aşınma mukavemeti artırılmak amaçlanır. Tabi aşınma mukavemetindeki bu artışın kopma uzamasının yani tokluğunun azalmasına neden olması istenmez. Kullanılan diğer katkı elementleri ise silis, kükürt ve fosfordur. Kükürtle fosfor malzemeyi gevrekleştirdiği için istenmez. Ama tam olarak da engellenemez. Ray çeliklerindeki %C oranı 0.3 - 0.6 arasında olmalıdır.

2.6.2. Rayın Kısımları

Ray 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Mantar,
- Gövde,
- Taban.

2.7. DEMİRYOLU TEKERLEK SETİ

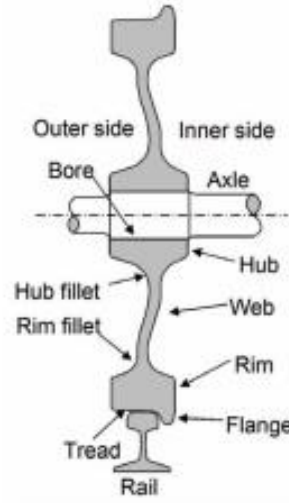
Demiryolu tekerlekleri, aksla beraber demiryolu araçlarının güvenli yolculuğu açısından hayati öneme sahip parçalardır. Tekerlekler bütün vagonun ağırlığını taşırlar; bununla birlikte, ciddi bir problem olması durumunda diğer bölümler yedekleme sisteminin uygulandığı bir yapı olarak tasarlanamazlar.

Bu nedenle mukavemet açısından kesinlikle yüksek güvenilirlik talep edilir. Bu açıdan tekerleklerin en önemli özelliği dayanımı olmalıdır. Bununla birlikte kırılmaz olması önemli bir tekerlek özelliğidir, çünkü avantajlı performans açısından, aşınma direnci, termal çatlama direnci ve gürültü-titreşim gibi dayanım dışı özellikler göz önünde bulundurulur. Özellikle tekerlekler aşınan parçalar olduğundan, ömrü bakım maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir faktör olacaktır.

Bu özelliklerin geliştirilmesi amacıyla bugüne kadar çeşitli çalışmalar yapılmış ve teknolojik gelişmeler yaşanmıştır. Tekerlek performansını artırmak için genellikle 2 farklı yaklaşım bulunmaktadır: malzeme tasarımı ve yapılandırma tasarımı [31].

2.7.1. Tekerleklerin Yapısı

Bir demiryolu tekerleği Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi 3 parçadan oluşur. Aksın takıldığı göbek, ray ile temas eden yüzey ve ağ.



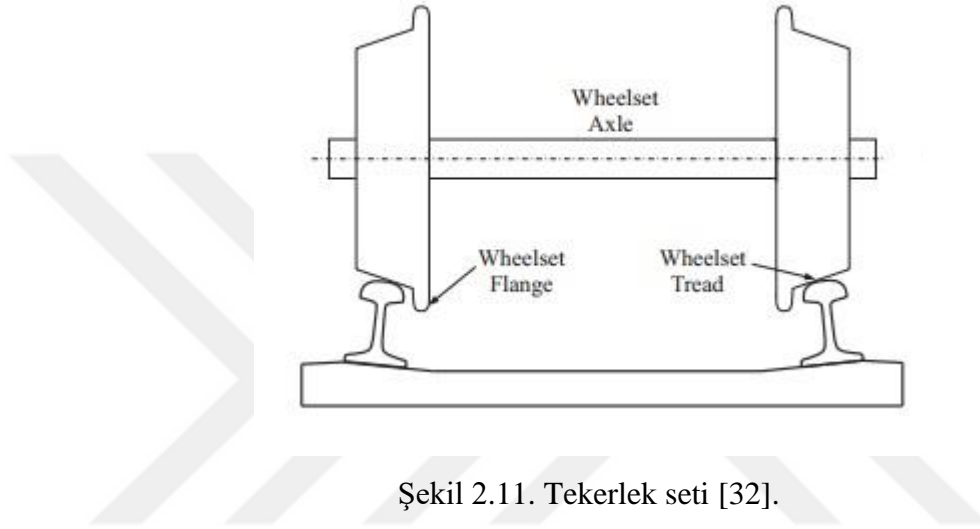
Şekil 2.10. Tekerleğin bölümleri [31].

Bu bölümde görülen kısımların Türkçe karşılıkları verilecektir. Outer side olarak bahsedilen kısım tekerleğin dış kısmını inner side olarak bahsedilen kısım ise iç kısımdır. Axle olarak bahsedilen kısım ise aksıdır. İki teker ve bir aksın oluşturduğu sisteme tekerlek seti denilmektedir. Bore olarak adlandırılmış kısım aksın oturduğu deliktir. Hub ise tekerleğin merkezini göstermektedir. Web yani ağ ise tekerin merkezini çalışma yüzeyine bağlayan kısımdır. Rim ise tekerlek çerçevesi ya da ispit olarak çevrilebilir. Flanş ise ray mantarının yan bölgesine oturan çıkıntıdır. Tread ise tekerleğin dış yüzeyi yani raya temas eden yüzeydir. Tekerleklerin hafif olması özellikle yüksek hızlı trenlerde önemlidir. Çünkü bu parçalar ray üzerinde aşağı yukarı hareket etmektedir. Bu yüzden yolcu konforu açısından hafif olması tercih edilir. Tekerlek ağı ise vagonun kaynaklanan tekrarlı mekanik yüklerle dayanacak kadar yorulma mukavemetine sahip olmalıdır. Tekerleğin temas yüzeyiyle ray mantarı arasındaki temas gerilmesine dayanmak için yeterli yorulma dayanımına sahip olmalıdır [31].

2.7.2. Tekerleğin Görevleri Ve Çeşitleri

Tüm demiryolu araçlarında ortak olan temel bileşen, tekerlek ve tekerlek setidir. Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi, ortak bir aksa sabitlenmiş iki tekerlektir. Tekerlekler bağımsız olarak dönmezler, çünkü aynı dönme hızı ve iki tekerlek

arasında sabit bir mesafe söz konusudur. Tekerleklerin kaymamaları amacıyla dış yüzeyi koniktir. Tekerlek seti diğer bileşenler arasında en fazla araç stabilizesini ve eğim performansını sağlayan bileşendir. Tekerleğin dış yüzeyi genellikle 1/20 veya 1/40 eğimle ray ile temas halindedir. Flanş kısmı ise tekerleklerin iç kısmında bulunur. Bu sayede tekerleklerin yanal hareketine engel olur. Ve raydan çıkma ihtimalini azaltmış oluşturur [32].



Şekil 2.11. Tekerlek seti [32].

Tekerlekler akstan gelen yükleri karşılar ve raya iletirler. Rayla temas halinde çalıştığı için aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdırlar. Ayrıca aksın göbeğe uyguladığı kuvvet dolayısıyla tekerlek göbeğinin mukavemeti yüksek olmalıdır.

Çizelge 2.2. Tren tekerleğinin kimyasal kompozisyonu [33].

Alaşım Elemanları	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni
%	0,52	0,4	0,8	0,3	0,3	0,08	0,3

2.7.3. Aks

Aks tekerleklerin gövdesine bağlanıp tekerlek setini oluşturan mile denir. Bu parçanın ana görevi tekerleklere hareketi iletmektir. Ayrıca vagonun gelen ağırlıkları tekerleklere iletmektedir. Aksın kırılması durumunda tren raydan çıkıp ciddi sonuçlara neden olabilir. 1842 yılında Versay'da aksın kırılması sonucunda tren

raydan çıkmış ve 70 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu bilinen ilk büyük kayıplı tren kazası olarak kayıtlara geçmiştir. Bu yüzden aksların yorulma dayanımı fazla olmalıdır.

Çizelge 2.3. Aksların kimyasal kompozisyonu [34].

Çelik	%wt								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Al	P	S
EA1N	0,39	0,34			0,79	0,091	0,027	0,01	0,017
EA4T, EA4T-V	0,33	0,35	0,77	0,92	0,21	0,079	0,053	0,013	0,017
EA4T-A	0,287	0,27	0,75	1,14	0,2	0,146	0,03	0,014	0,008

Çizelge 2.4. Aksların mekanik özellikleri [34].

Çelik	Üst Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	HV 30
EA1N	379,3	578,3	164
EA4T	484	676	199
EA4T-A	572,5	736,4	229
EA4T-V	798	1049	331

BÖLÜM 3

RAYLARIN ÜRETİMİ

3.1. RAY KESİTLERİ

Demirden yapılmış raylar ilk kez maden ocaklarında 18. Yüzyılda oluşan bir kriz yüzünden ahşap rayların aşınmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. Bu ilk demir rayın amacı taşımak değil tahta rayın aşınmasını engelleyen kaplama aracı olarak kullanılmıştır.

1789 yılında JESSOP mantar ve gövdeden oluşan, taşıma gücüne sahip ilk rayı yapmış ve bunları 1 m aralıklı olarak dizilmiş taş mesnetlere oturarak ilk demiryolunu meydana getirmiştir [7].

TCDD yeni hatlarda S49 rayını kullanmaktadır. Ağır trafiğe sahip hatlarda dingil basınçlarının yükseltilebilmesi amacıyla UIC 60 rayı kullanılması planlanmaktadır [7]. Bu çalışmada da UIC 60 raylarının üzerinde durulacaktır. Bu sebeple UIC 60 rayları hakkında diğer raylara nazaran daha fazla bilgi aktarılacaktır.

Çizelge 3.1. TCDD'nin kullandığı rayların boyutları [8].

Ray Cinsi	Taban Genişliği (mm)	Yüksekliği (mm)	Mantar Genişliği (mm)	Gövde Kalınlığı (mm)
60.340 kg/m	150	172	72	16,5
49.050 kg/m	125	148	67	14
49.430 kg/m	125	149	67	14
46.303 kg/m	134	145	64	15
39.520 kg/m	120	138	62	12

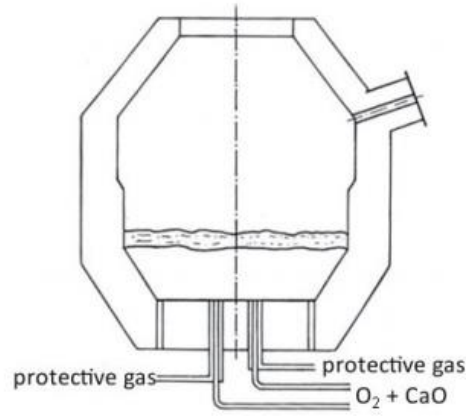
3.2. RAY DÖKÜM METHODLARI

1940lara kadar ray çelikleri Bazik Bessemer, Asid Bessemer, Siemens-Martin ve Elektrik fırınlarında üretilirdi. “1950-1960 arasında oksijen üfleme metotları yerleşmeye başladı. 1960-1970 yılları arasında bu metot ray çeliği üretimi için kullanılmaya başlandı. OBM metodu, çelik üretiminde sıcak metal banyosuna oksijen üfleme suretiyle uygulanan bir methodur.”

Basic Oxygen Furnace (Temel Oksijen Fırını) önemli çelik yapma metotlarından biri haline gelmiştir. Modern fırınları 150-300 ton yükü tek seferde 40 dakika içerisinde çeliğe dönüştürecek. Sıcak metal Basic Oxygen işleminde kullanılan temel malzemedir. İlk olarak sıcak metal desülfirize edilir. Fırın önce hurdayla sonra ergimiş demirle doldurulur. Ergimiş demirin oranı yükün %70'ini oluşturmalıdır. Suyla soğutulan oksijen üfleme borusu fırının altından yüksek saflıkta kuru oksijen metalin için yüksek hızda üflenir. Oksijen, karbon ve diğer istenmeyen elementlerle reaksiyona girer. Bu sayede ergimiş metaldeki saf olmayan katkıları engellenmiş olur [16].

3.2.1. OBM (Oxygen Bottom Maxhütte) Metodu

20. yüzyılın altmışlı yıllarında hala Thomas dönüştürücüleriyle çelik üreten Alman çelik fabrikaları, havanın oksijenle değiştirilmesini düşünüyorlardı. Özellikle, Sulzbach-Rosenberg'deki Maxmilianhütt çelik fabrikası, Kanadalı Air Liquide şirketi ile birlikte, bir dönüştürücü tabanında bulunan püskürtme borularına oksijen akışı üflenen bir yöntem geliştirdi. Bu oksijen akışı, püskürtme boruları ağızlarının soğumasını sağlayan koruyucu bir hidrokarbon tabakası ile çevriliydi. Böylece 1967'de orijinal Bessemer patenti uygulandı. Pik demirin sırasıyla saf oksijen ile oksijen / ince öğütülmüş kireç karışımı, bir dönüştürücünün altındaki püskürtme boruları vasıtasıyla rafine edildi [9]. Propan ya da %98 metan gazı içeren doğalgaz püskürtme borusunun termal koruması için kullanılır. Fransız çelik fabrikaları OBM teknolojisini geliştirmiş ve dönüştürücünün altındaki püskürtme borusunu korumak için sıvı yakıt yağı kullanmışlardır. Bu süreç CLU prosesi olarak belirtilir [9].



Şekil 3.1. OBM işleminin [9].

3.2.1.1. Fosfor Esaslı Sıcak Metalle Çalışan OBM İşleminin Özellikleri

1. P miktarı: Tek fazla çalışırken, P miktarı Bazik Bessemer metodundaki değerler kadar oluşur. (0,050-0,060) 2 fazlı çalışma ve N₂ ile temizlemede LDAC işlemindeki değerler oluşur.

2. S₂ Miktarı: Bazik Bessemer metodundaki değerler oluşur yalnız S miktarı azalır. Sıcak metalin desülfürizasyonu ve çift cüruflla çalışma LDAC'daki değerlerin ortaya çıkmasını sağlar.

3. N₂ Miktarı: Soğutma ortamı olarak propan kullanıldığında (ki, N₂ ihtiva etmez) LD işlemindeki değerler oluşur. Eğer %15 N₂ ihtiva eden doğal gaz kullanıldığında çelik içindeki N₂ miktarı 0,0015 değerine ulaşabilir.

4. C, Mn, Si Miktarı: Arzu edilen C, Mn, Si miktarları potaya grafit Ferro Mangan Ferro Silis ilavesi ile elde edilir. Kardemir'de %0,80 C, %1,80 Mn'a kadar çelik yapılabilmektedir.

5. H₂ Miktarı: Konverterdeki çeliğin H₂ miktarı (OBM prosesinde) diğer oksijen üfleme proseslerinde olan orandan daha fazladır. Bu da nozulun soğutulması için kullanılan hidrokarbonlar tesiri ile olmaktadır. Konverterdeki çelik banyosunun H₂

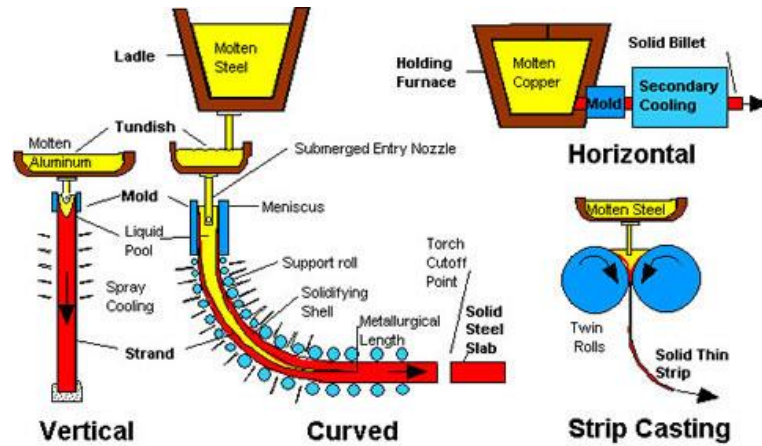
ihtivası normal bir üflemeden sonra büyük çapta değişim gösterir. Bu öncelikle üfleme sonundaki sıcaklığa bağlıdır [10].

3.3. SÜREKLİ DÖKÜM METODU

Sürekli döküm; bir potada bulunan ergimiş çeliği kalıp sürekli olarak aynı kesitte, fakat farklı boylarda katılaştırabilme isteğinden ortaya çıkmıştır. Sıvı çelik, bir taret içine yerleştirilen 150-350 tonluk bir pota içerisinde tedarik edilir. Bu taret 2 pota içerebilir. Böylece birisinin döküm işlemi devam ederken diğer pota hazırlanabilir. Bu yolla işlem sürekli olarak devam eder. Bütün çelikler atmosfer oksidasyonundan pota, sıvı çelik potası ayrıca sıvı çelik potası ve kalıp arasında bulunan refrakter borusuyla korunur [16].

Sıvı çeliğin içerdiği süper ısı miktarı, dökme bloğun iç metalurjik kalitesi üzerine derin bir etkiye sahiptir. Tekli ısıtıcının içindeki sıvı çelik sıcaklığı sıvı öz artı 15 °C aralığında tutulur [16].

Döküm kalıpları, çeliğin bakır kalıbına yapışmasını önlemek için döküm hızı osilasyon strokuna bağlı olarak dakika başına 60-200 devir frekansı ile salınır. Döküm hızı yaklaşık 0,8 m/dak kadardır. Katılma yapısını geliştirmek için, çubuklar elektromanyetik karıştırma bobinleri ile donatılmıştır [16].



Şekil 3.2. Sürekli döküm prosesleri [16].

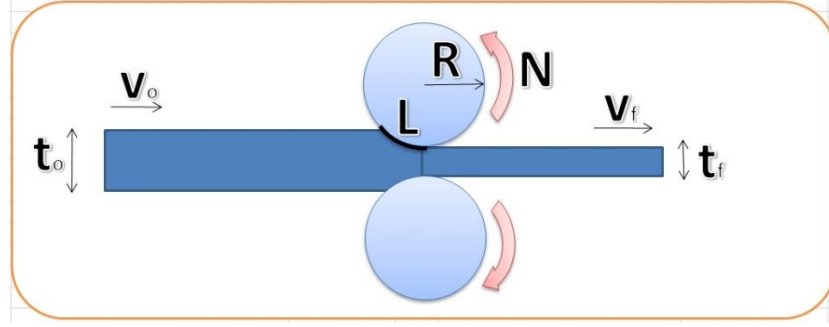
Genellikle şekilsiz veya az şekilli parçaların dökümü yapılabilir. Sürekli dökümün avantajları:

- Düzgün olmayan teşekküller ve bozulmalar önlenir.
- Randıman %100'dür.
- İngotlara göre daha düzgün yüzey elde edilir.
- Segregasyonların azalması sebebi ile yüksek kalitede malzeme elde edilir.
- Soğutma hızı kontrol edilerek tane büyüklüğü ve yapının ayarlanma imkânı vardır.
- İşlem ekonomiktir [11].

Piping (iç yapıdaki borumsu bozukluk), sürekli döküm yönteminde tamamen engellenmiş geleneksel ray üretim yöntemlerinde oldukça yaygın bir hatadır. Bu hatanın oluşma nedeni ise ergimiş metalin ingot kalıba akarken hızlı soğumasıdır. Külçenin ilk soğuyan kısımları, kalıbın soğuk duvarlarıyla temas halindeki taraflardır ve kalıp üstündeki serbest atmosfere maruz kalan serbest yüzeylerdir. İşte bu yüzeylerle temas halinde bulunan ergimiş metal oldukça hızlı bir şekilde soğuyacaktır. Kalıbın dış yapısı ve boyutları soğuma hızı belirleyen faktörlerdir. İngotun merkezi en son katılırken bu bölgeler katılmış olurlar. Bunun sonucu olarak ingotların %10'nundan fazlası haddeme için uygun olmamaktadır. Fakat sürekli döküm yönteminde ingot yoktur bundan dolayı piping hatası da oluşmaz. Potansiyel ray hataları tamamen engellenmiş olur [12].

3.4. RAYLARIN HADDELENMESİ

Öncelikle metallerin haddelenmesi ve haddeme metotlarına bakalım. Metallerin şekillendirilmesinde 3 yöntem bulunmaktadır. Bunlar döküm, haddeme ve dövmedir. Haddeme ve dövmede metal soğuk olarak şekillendirilirler. Bu 2 şekil verme türü plastik şekil verme yöntemidir. Haddeme sıcak veya soğuk olarak uygulanabilir. Haddeme sırasında, metal 3 ekseninde de gerilmeye maruz bırakılır.



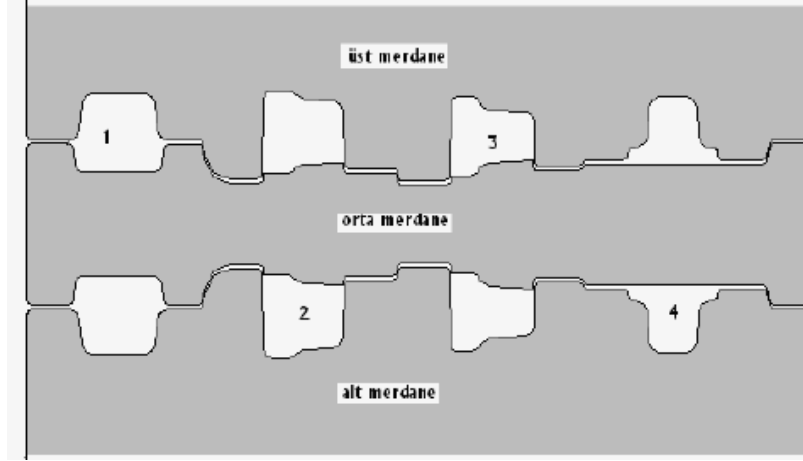
Şekil 3.3. Haddelene [10].

Sürekli döküm yöntemiyle oluşturulan kütükler son mamulün iyi bir yüzeye sahip olması amacıyla bozukluklarından arındırılır. Daha sonra kütükler özel imal edilmiş fırınlarda 1250°C 'ye ısıtılarak tavllanır. Fırından çıkarılan kütüklerin üzerine 200 barlık basınçla su püskürtülür. Bu işlemle amaçlanan hadde ve haddelenecek kütüklerin yüzeyinin zarar görmesini engellemektir.

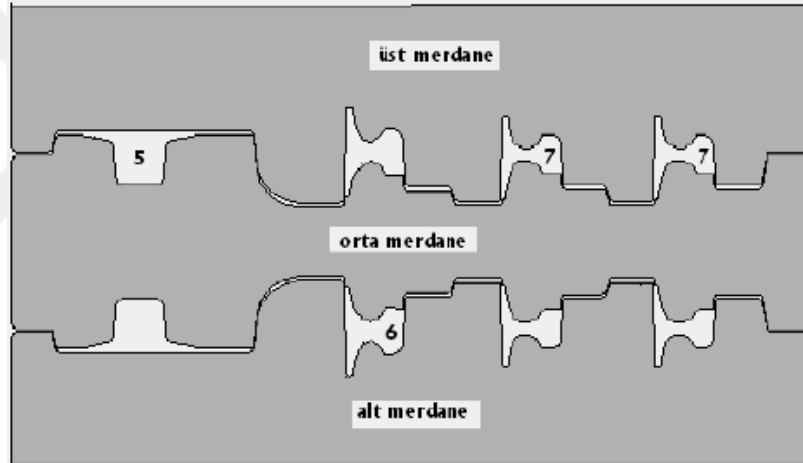
Kütükler ray biçimini almadan evvel ilk şeklinin verilmesi amacıyla ön haddeden geçer. Ray halini alabilmesi için 8-11 arasında haddeden geçmesi gereklidir. İlk olarak kütük yüzeyine dik olan iki bıçak geçer ve ilk çıkıntıyı yapar. Oluşan ilk çıkıntıları yatay olarak yeniden düzeltme ray tabanının dinamik eğilme gerilimi altındaki davranışını düzenler.

Ray üreticilerinin bir kısmı sırayla şekil vererek yapılan universal hadde sistemini kullanırlar. Bu sayede iyi bir yüzey kalitesi elde edilir.

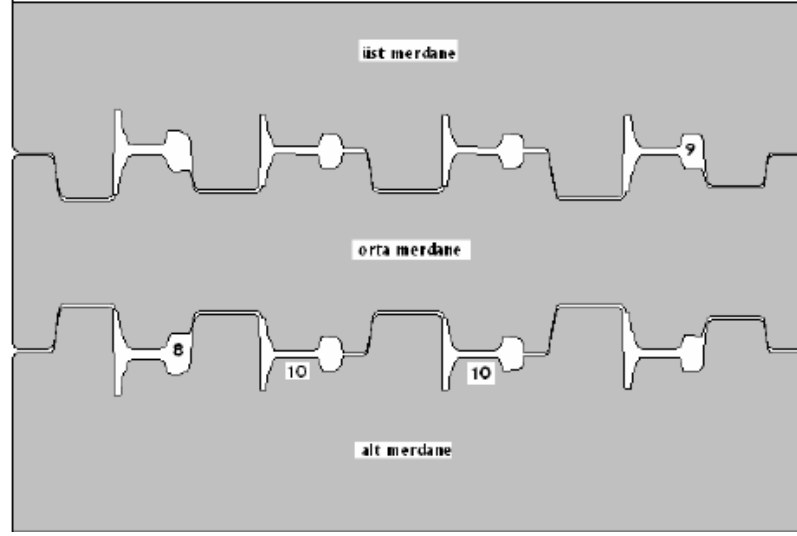
Son aşamada ise ürün yüzeyi temizlenir. Son haddeleme aşamasından geçerken ray üzerinde markalama yapılır. Markanın amacı; üretici hakkında bilgi, üretim yılı, üretildiği bölüm ve ray kalitesini göstermektir [7].



Şekil 3.4. 1. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı [10].



Şekil 3.5. 2. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı [10].



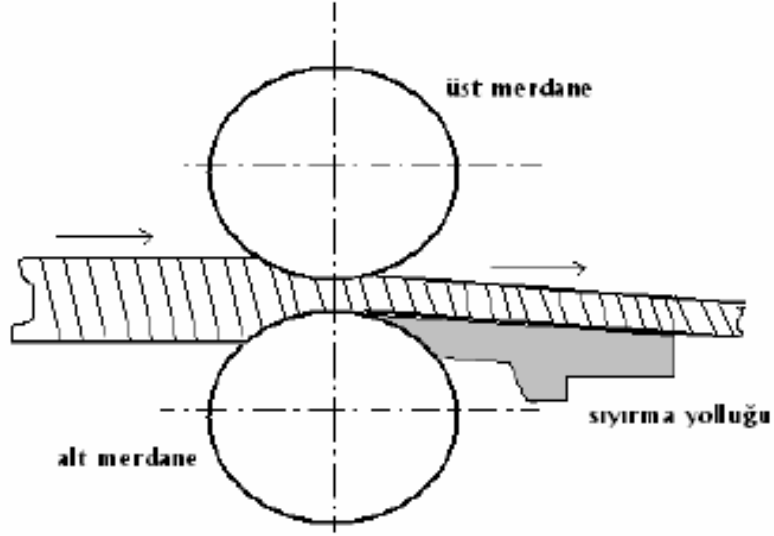
Şekil 3.6. 3. Profil hadde tezgâhı paso dağılımı [10].

Yukarıda bulunan paso resimlerinde görüldüğü gibi 1. hadde tezgâhında öncelikli olarak rayın ayak kısımları, 2. hadde tezgâhında ise rayın mantar kısmı oluşturulmaktadır. 3. tezgâhta ise ray son halini almaktadır [10].

Haddelemede dikkat edilmesi gereken diğer konular ise;

- Giriş yollukları
- Çıkış (Sıyırma) yolluklarıdır.

Giriş yolluklarının kullanım amacı kütüğün paso girişine hizalanmasıdır. Çıkış yolluklarının kullanım amacı ise kütüğün pasodan çıkışı esnasında merdaneden sıyırmaktır. Ray malzemelerinin yüksek karbonlu oluşu nedeniyle bu iki yolluk profil üretiminde kullanılan yolluklara nazaran daha sağlam ve hassas olması gereklidir. Bir diğer nedeni ise rayın diğer profillere göre asimetrik oluşudur [10].



Şekil 3.7. Çıkış (Sıyırma) yoluğu [10].

3.5. MERDANE SEÇİMİ

Rayların UIC 900 standartlarına uygun toleranslarda olabilmesi için merdane seçimi de ray üretiminde önemli parametrelerden biridir. Ön şekillendirme için kullanılacak merdaneler genellikle %0,5-1,5 arası C bulunduran Krom-Molibden, Krom-Nikel Molibden veya Krom-Nikel tipi merdanelerdir.

Ray haddelenmesinde kullanılacak merdaneler ise yüksek karbonlu, alaşımlı yarı çelik merdaneler (%2,4 C, %0,37 Mn, %0,86 Si, %0,06 S %0,17 P, %0,95 Cr ve %0,50 Ni) kullanılmaktadır. Bu merdanelerin gövde sertliği 330-350 BHN, gövde mukavemeti 7-8 kg/mm² ve hadde başlığı mukavemeti ise 20 kg/mm²'dir [13].

3.6. RAYLARIN ISIL İŞLEMİ

Haddeleme sonrası ısıl işlemi için 2 aşama bulunmaktadır.

- Off-line (hat dışı) sertleştirme
- In-line (hat içi) sertleştirme

3.6.1. In-Line (Hat İçi) Sertleştirme

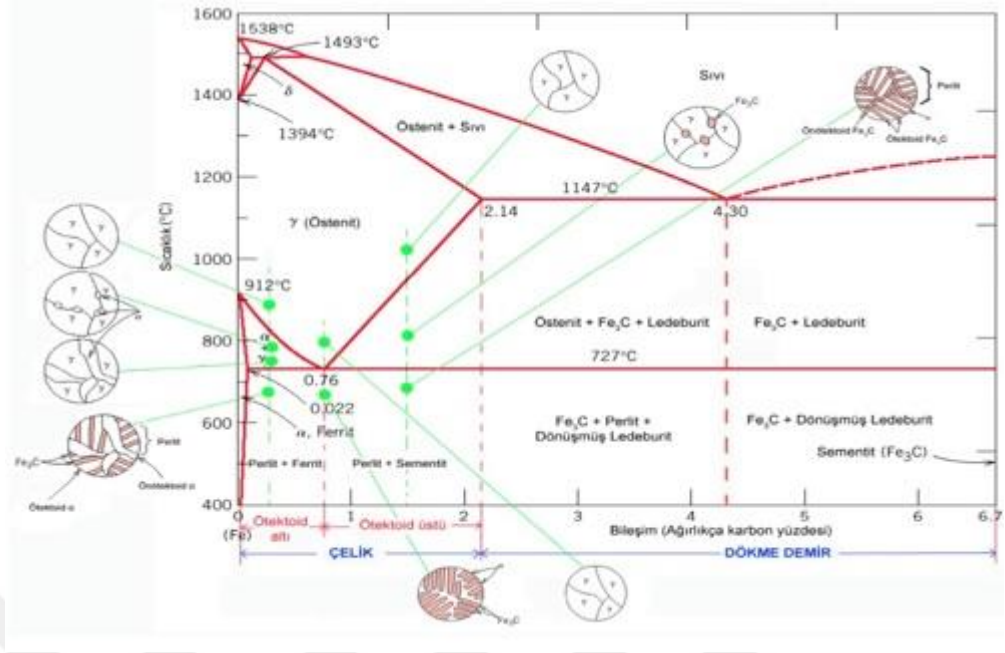
Haddeleme sonrası zaten sıcaklığı yüksek olan (yaklaşık olarak 900 °C) ray ek bir ısıtmaya gerek duymadan otomasyon kontrollü su jetleri tarafından 3-5 °C/sn hızla 550-600 °C'ye kadar soğutulur. Sertlik değeri 300 BHN ile 400 BHN arasında değişir [13].

3.6.2. Off-Line (Hat Dışı) Sertleştirme

Off-line sertleştirme, doğrultma prosesinden sonra yapılır. Rayın mantar kısımları indüksiyon bobiniyle sarılarak ısıtılır. Isıtılma aşamasından sonra istenilen soğutma derecesine kadar soğutulur. Burada önemli nokta ray çeliğinin içeriği olmaktadır. Kompozisyonu incelenerek gerekli östenit sıcaklığı tespit edilmelidir. 900 A kalite standardı için çeliğinin kompozisyonuna bakarsak eğer;

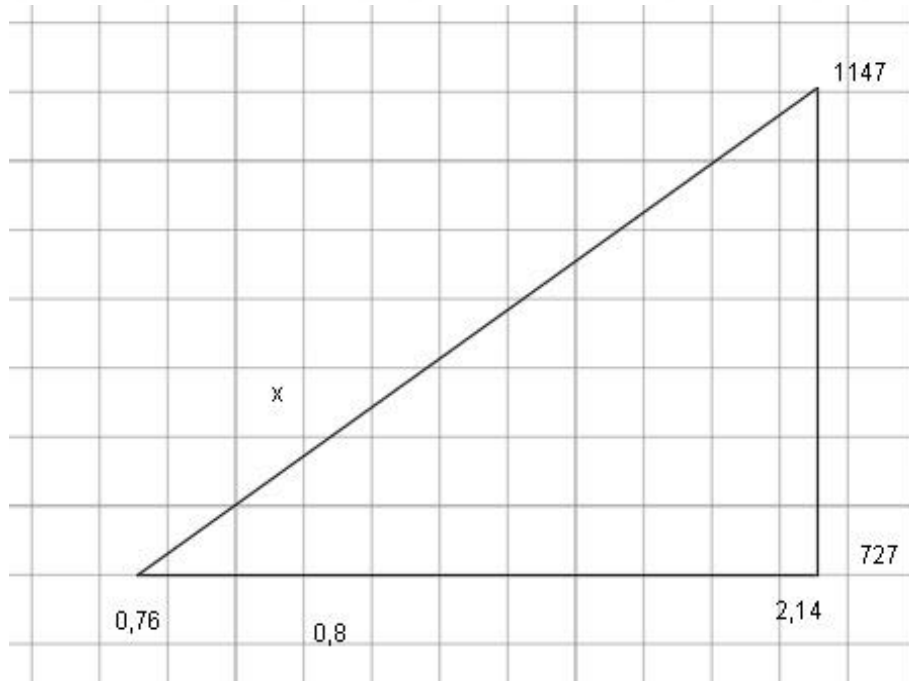
Çizelge 3. 2. 900 A kalite rayın kimyasal kompozisyonu.

Standart	Kalite	C	Si	Mn	P	S	Rm	Uzama
UIC 860-O	900 A	0,6- 0,8	0,1- 0,5	0,8- 1,3	<0,04	>0,04	880- 1030	>10



Şekil 3.8. Demir karbon denge faz diyagramı [14].

Eğer karbon yüzde oranını 0,8 olarak alırsak;



Şekil 3.9. Isıl işlem östenit sıcaklığı hesaplama.

$$\begin{array}{r} 0,8 - 0,76 \\ 2,14 - 0,76 \end{array} \quad \begin{array}{r} x \\ 1147 - 727 \end{array}$$

$$(0,8 - 0,76) x (1147 - 727) = (2,14 - 0,76) \cdot x$$

$$0,04x420 = 1,38x$$

$$11,72 = x$$

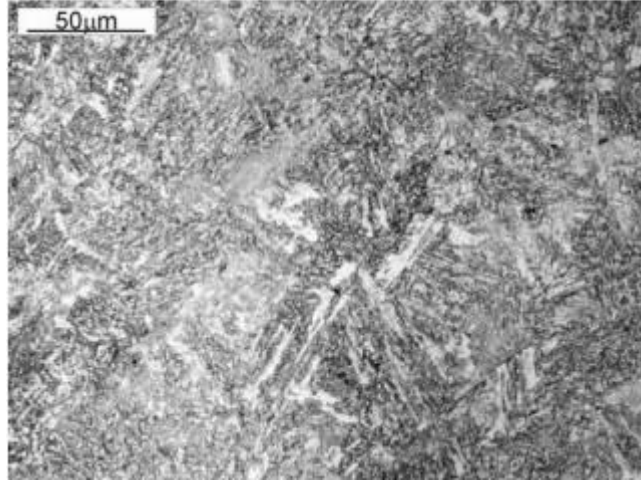
$$727 + 12,17 = 740 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bu sıcaklığa diğer elementlerin varlığını da düşünerek 50-60 °C eklenmelidir. %0,8C oranı olan bir çelik için 800 °C'ye kadar ısıtılması doğru olacaktır.

Östenit sıcaklığına çıkıldıktan sonra soğutma işlemi başlatılır. 3-4 °C/sn soğuma hızıyla 500 °C'ye sıcaklık düşürülüp arkasından oda sıcaklığında havayla soğuma işlemi tamamlanacaktır. Bu sayede beynitik bir yapı elde edilecektir.



Şekil 3.10. Mikroyapılar (sırasıyla ferrit- ferrit ve perlit - perlit).



Şekil 3.11. UIC 60 rayının mikroyapısı (beynit) [27].

Perlitik yapı, Ferrit (α)+Sementit (Fe_3C) yapılarının birleşiminden oluşmuştur. %0,8 C oranı olan çeliklerin östenit fazından yavaşça soğuması sonucunda oluşan bir yapıdır. Yapı içindeki sementit miktarı artarsa yapı daha sert ama daha gevrek olacaktır. Eğer ferrit miktarı artarsa yapı daha az sert ama daha tok bir yapı elde edilecektir. Rayların hem sert hem de tok olması istendiğinden dolayı en uygun faz yapılarından biri beynittir.

Çizelge 3.3. Karbon oranının ve soğuma hızının sertliğe ve uzama miktarına etkisi [10].

Karbon %	Yavaş Soğuma			Hızlı Soğuma		
	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
0,15	285	386	37	324	424	37
0,20	295	395	36,5	347	441	36
0,30	341	464	31	345	521	32
0,40	353	519	30	374	590	28
0,50	366	636	24	428	748	20
0,60	372	626	23	421	776	18
0,80	376	616	25	524	1010	11
0,95	379	657	13	500	1014	9,5

Karbon oranı %0'a doğru yaklaşıkça ferrit(α) fazı arttığından, sementit miktarındaki azaldığından dolayı çekme ve akma miktarında ciddi düşüşler gözlenirken uzama miktarında da ciddi miktarda artış gözlemlenmektedir. Karbon oranı arttıkça ise sementit fazı artıp ferrit fazının azalmasından dolayı akma ve çekme dayanımı artarken uzama miktarında ise azalma görülür.

3.7. RAYLARIN BİRLEŞTİRİLMESİ

3.7.1. Rayların Cebireyle Birleştirilmesi

Cebire rayları birbirine bağlayan bir parçadır. Cebireler, yumuşak çelikten üretilen ve ray tipine, kullanımına göre değişiklik gösteren parçalardır. Ray uçlarındaki yuva sayısına göre 4 veya 6 delikli modelleri bulunmaktadır. Tam olarak rayın üstüne oturmayan cebireler 5-6 mm arasında rayla aralarında boşluk kalacak şekilde monte edilirler. Cebireler 2 yılda bir bakıma alınmalıdırlar. Cebirelerin dış yüzeyi tel fırçayla fırçalandıktan sonra yağlama işleminin yapılarak geri yerine monte edilmelidir. İki ray birleőtirilirken ısınarak genleēeceđi de hesap edilerek dilatasyon payı bırakılmaktadır. Ancak cebireyle birleőtirilme yapılan yerlerde sık sık kırılmalar, yatay ve dikey ekseninde bozulmalar meydana gelerek bakım maliyetlerini artırmaktadır. Cebireler ne kadar ilk yapım maliyeti olarak kaynaktan daha uygun olsa da ilerleyen zamanlarda bakım masrafları yüzünden kaynakla birleőtirmeden çok daha maliyetli hale gelmektedir. Ayrıca titreşim ve gürültü miktarını da bağlantı yapısı nedeniyle fazlaca artırmaktadır.



Şekil 3.12. Cebire ile bağlanmış raylar [28].

3.7.2. Rayların Kaynakla Birleştirilmesi

Cebire yöntemiyle yapılan montajlarda görülen zorluklar ve yüksek maliyetler nedeniyle rayların kaynakla birleştirilmesi yaygınlaşmıştır. Raylara uygulanan kaynak türlerinin hepsinde rayların alınları karşılıklı olarak yatay ve dikey dengede olacak şekilde tutularak kaynaklanır. Türkiye’de 3 kaynak metodu kullanılmaktadır. Bunlar atölyede alın kaynağı, inşaat sahasında alın kaynağı ve aluminotermite kaynağıdır. Bu kaynaklardan, aluminotermite kaynağı genellikle sahada bakım faaliyetleri amacıyla kullanılmaktadır. Aluminotermite kaynağı, iki rayın arasını birleştirmek için farklı bir malzeme eriterek dolgu yapma yöntemidir. Ve bu dolgu malzemesinin ana malzemedan farklı olması bazı dezavantajlar ortaya çıkarmaktadır. Tren tekerinin kaynak metaline sürtünmesiyle bu malzeme kolayca aşınmaktadır. Aşınan yüzeyden geçen trenlerde titreşim, konforsuz yolculuk, vuruntu ve yuvarlanma yüzeyinde aşınmalara yol açmaktadır. Bu sebeple genel olarak alın yakma kaynağı kullanılmaktadır.

Sıcaklık değişikliklerin etkisiyle raylarda meydana gelen uzamaların demiryolunu bozulmaması amacıyla kısa boylu raylarda (12-24-36 m), ray uçlarına boşluklar bırakılır. Ancak uzun kaynaklı raylarda bu etkiden kurtulma amacıyla sıkı bir balast tabakası, ray ve traverslerde büyük bir gerilme direnci gereklidir.

3.7.3. Raylarda Kaynak Yöntemleri

3.7.3.1. Yakma Alın Kaynağı

Kalite bakımından, yakma alın kaynağı, termik kaynaklardan daha iyidir. Mobil yakma alın kaynak makineleri de mevcuttur, böylece bu kaynaklar ray üzerinde yapılabilir. Mobil makineden üretilen yorulma mukavemeti, tarafından görüldüğü üzere metalürjik kaynak kalitesi, sabit makine tarafından üretilene eşittir. Ancak iyi geometrik özellikler elde etmek zordur. Kaynak işlemleri özetle şöyledir:

- Ray uçları bilyeyle sertleştirilir;
- Raylar konumlandırılır;
- Elektrik gerilimi uygulanır;
- Elektrik arkları, ray uçlarını dövme sıcaklığına getirir;
- Ray uçları yüksek basınçta bozulmuştur;
- Kaynak bileziği soyulur ve zımparalanır;
- Kaynaklar soğutulur, düzeltilir ve son kat yapılır.

3.7.3.2. Termit Kaynağı

Termit kaynaklar, nispeten basit teçhizat kullanarak pistte iyi bir metalürjik kaynak yapılmasını mümkün kılmak için geliştirildi. Yöntem, alüminyum tozu ve demir oksit karışımını kullanır; yüksek sıcaklıkta alüminyum ve çelik haline dönüştürülür. Serbest kalan ısı, sıcaklığın yaklaşık 2500 °C'ye yükselmesine neden olur. Yaklaşık olarak 15 dakika süren spesifik kaynak bölümü süreci temelde aşağıdaki gibidir:

- Ray uçları hizalanır;
- Kalıp birleşme yerinin etrafına monte edilir;
- Pota kurulur;
- Raylar, propan yakıcı kullanılarak yaklaşık 900 °C'ye ön ısıtma yapılır;
- Karışım alevlenir, reaksiyon: $2Al + Fe_2O_3 > Al_2O_3 + 2Fe + 850 \text{ kJ}$;
- Pota ve kalıp çıkarılır;

- Kaynak bileziği soyulur ve zımparalanır.

3.7.3.3. Elektrik Ark Kaynağı

Elektrik ark kaynağı işleminde elektrotları kullanarak ray tabanı bir bakır kasaya yerleştirilir. İşlem 15-20 dakika sürmektedir ve özetle aşağıdaki gibidir:

- Propan yakıcı kullanılarak 200-250 °C ön ısıtma yapılır;
- Alttan üste doğru kaynak boşluğu doldurulur;
- Kasa sökölür



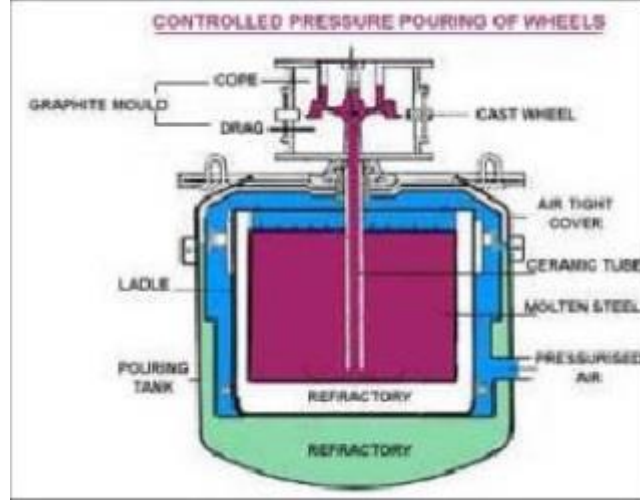
BÖLÜM 4

DEMİRYOLU TEKERLEKLERİNİN ÜRETİMİ

4.1. DÖKÜM İŞLEMİ

Yüksek kalitede bir tren tekerleği üretirken, üretim hatlarının çoğu basınçlı döküm işlemini kullanacaktır. Basınçlı dökümde erimiş metal gaz basıncı ile yukarı doğru metal bir kalıp içine zorlanır. Basınç, erimiş metal tamamen katılaşıncaya kadar devam eder. Erimiş metal aynı zamanda çözünmüş gazları uzaklaştıran ve daha düşük gözenekli bir döküm üreten vakumla yukarı doğru zorlanabilir.

Fabrikalarda genelde hammadde olarak demiryolu hurdası kullanılmaktadır. Hurda elektrikli ark fırınında eritilmektedir. Erimiş metalin kimyasal kompozisyonu bilgisayarlı spektrometrelerle hassas bir şekilde ölçülür. Bu, çelik imalatında, zorlu koşullar için gerekli olan optimum metalurjik özelliklerin elde edilmesi için, çelik bileşiminin hassas kontrolünü mümkün kılmaktadır. Döküm, şekillendirme aletleri kullanılarak hassas olarak işlenmiş olan ingrafit kalıplarda yapılır. Bu tüm tekerleklerin aynı boyutlarda ve toleranslarda olmasını sağlar [35].

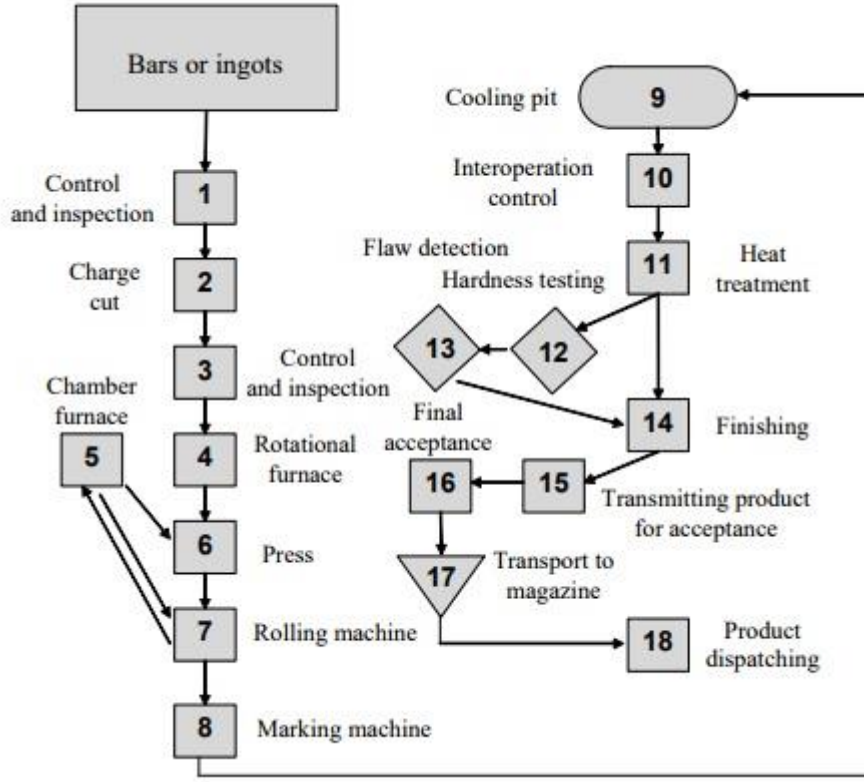


Şekil 4.1. Basınç kontrollü döküm [35].

Erimiş metal potası odaya konur ve hava geçirmez bir kapakla kapatılır. Kapağa seramik dökme tüpü takılmıştır. Odaya zorla basılan basınçlı hava, çeliği dökme borusundan geçer ve kalıbın içine iter. Erimiş çelik tekerleği oluşturmak için kalıbı alttan doldurur. Çelik, kontrollü bir hızda kalıba zorlandığında, tekerlek son derece yakın toleransla dökülür [35].

4.2. HADDELEME VE PRESLEME İŞLEMİ

Tren tekerleğinin üretilme şeması Şekil 4.2.'de verilmiştir. Birinci işlem gelen hammadde parçaların kalite kontrolü olarak düşünülür. Sonra malzeme kesilir ve bir sonraki kalite kontrol işlemi yapılır. Daha sonra hammadde plastik şekillendirme için hazırlanır [36].



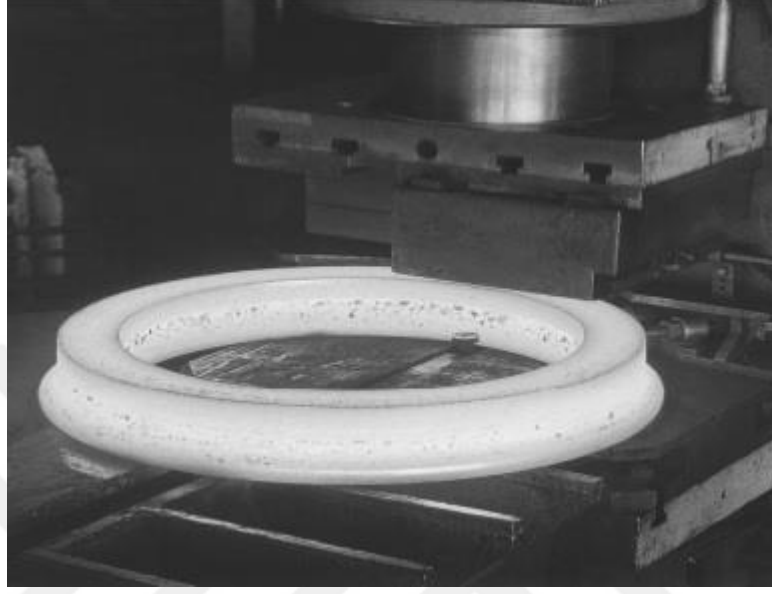
Şekil 4.2. Tren tekerleğinin üretim şeması [36].

Hazırlanan malzeme sıcak preslenir veya haddelenir. Bu işlemden sonra damgalanır. Daha sonra özel bir yatakta soğumaya bırakılır. Bu aşamadan sonra halka oluşturulmaya başlanır. Oluşturulan halkalar boyutsal parametrelerini doğrulamak üzere kontrol edilir. Kontrol işlemi bu proses için önemlidir, çünkü üretim maliyetlerini düşürür.

Daha sonra kontrol edilen halkalara ısı işlem uygulanır. Üretimin son aşaması bitirme işlemi ve son kontrolden oluşur. Üretici müşterinin gereksinimlerinin sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmelidir. Onay alan parçalar saklanır.

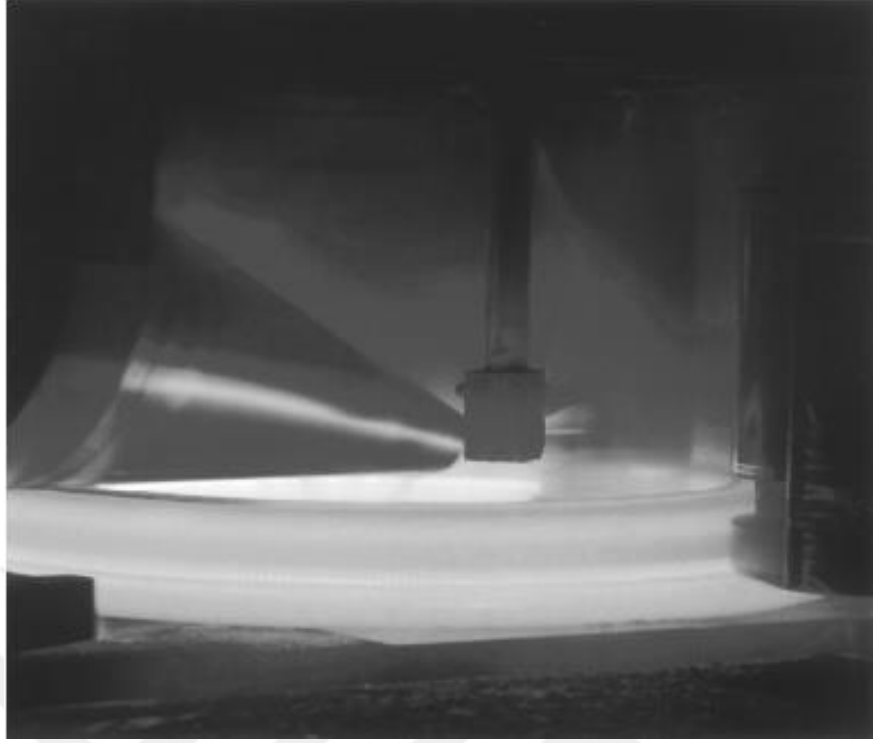
Şematik üretim sürecinin analiz edilirse beş kalite kontrol aşaması olduğu görülür. Bu tür işlemler üreticinin gerekli kalite kontrol aşamalarını sağlamasına olanak tanır. Ayrıca kalite kontrol işlemleri belirli bir proses izleme sistemi oluşturmaktadır. Düşük seri üretimde kalite güvencesi için anahtar unsur budur.

Presleme tekerlek halkasını şekillendirmenin ana işlemidir. Bu aşamada hidrolik bir pres kullanılır. Şekillendirme işlemi Şekil 4.3.'de verilmiştir. Bu işlemin sonunda ön şekillendirilmiş halkalar oluşmuş olacaktır [36].



Şekil 4.3. Halkanın preslenmesi [36].

Sıradaki işlem haddeme olacaktır. Bu işlem de Şekil 4.4.'de gösterilmiştir. Haddeme işlemi 4 silindir seti ve özel merkezleme kollarıyla radyal ve aksenal yönde haddeme yapmaktadır. Merkezleme kolları malzemenin eksen boyunca konumunu kontrol eder. Üretilen halkanın ovalitesinden kaçınmayı sağlar. Halkaların boyutları işlem sırasında artacaktır. Bu yüzden işlem bilgisayar tarafından desteklenmelidir. Doğru geometrik parametrelerin elde edilmesi önemlidir çünkü halkanın özellikleri, elde edilen geometri faktörlerine kuvvetle bağlıdır. Bu noktada ana işleme işlemi sona erer. Bir sonraki aşamada diğer işlemler yapılır [36].



Şekil 4.4. Haddeleme işlemi [36].

4.3. ISIL İŞLEM

Demiryolu tekerlekleri, demiryolu araçlarının en çok gerilmeye maruz kaldığı elemandır. Tekerlekler 25 tondan fazla akslardan gelen yükleri taşırlar. Trenin ray üzerinde, eğimlerle ve makaslarla yönlendirilir ve aşınma proseslerine tabi tutulurlar. Bu yüzden ısıtım işlemi tren tekerlekleri için çok önemlidir.

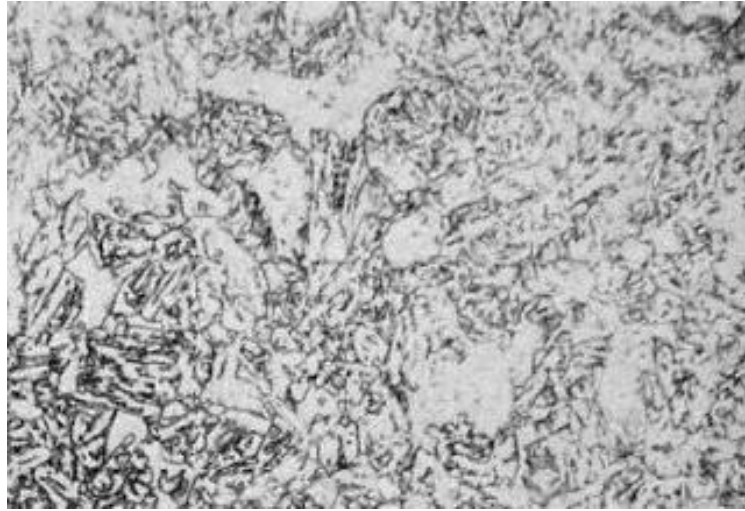
4.3.1. Isıtım İşlem Gereksinimleri

Tekerleklerin ısıtım işlemi, tekerleğe gerekli ürün özelliklerini verme de temel bir öneme sahiptir. Demiryolu tekerlekleri, jant sertleştirme işlemi olarak adlandırılan bir işlemle ısıtım işleminden geçirilir. 900 °C'ye yakın sıcaklıklarda östenit sıcaklığına çıkarılan işleminden sonra, sadece jant kenarı genellikle su kullanarak yaklaşık 300 °C'ye kadar soğutulur. Jant soğumayı tamamladıktan sonra, merkez ve göbek geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklardadır. Daha fazla soğutma havada gerçekleşir, tekerlek jantına yüksek mukavemet ve basınç gerilimi verir ve daha esnek bir tekerlek merkezi oluşturur.

Yaklaşık 500 °C'de yapılan son tavlama adımı, tekerlek malzemesinin mikroyapısını veya mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik yapmayan bir stres giderme işlemi olarak düşünülebilir. Tekerleklerde genellikle beynit yapı istenir. Bunun nedeni tekerleğin gelen yüklere karşı tokluğa ihtiyacı olmasıdır [37].

EN 13262 Avrupa standardı, ağırlıkça en çok %0,6 kadar karbon, %0,8'e kadar manganez ve %0,4 kadar silikondan oluşan dört farklı çelik kalitesini tanımlamaktadır (EN 2004). Çelik sınıfına bağlı olarak, bu standarda göre üretilen tekerlekler için şartlar:

- Jantın gerilme mukavemeti (780 ile 1.050 MPa arasında),
- Jantın darbe tokluğu (>9 J olmalı, çentik testi ortam sıcaklığında ölçülmüştür.),
- Artık gerilme (üretilen tekerlek jantlarında basma gerilmeleri gerekir),
- Merkezin çekme mukavemeti (ağız mukavemetinden 100 ila 130 MPa daha düşük),
- Merkezin yorulma dayanımı (>450 MPa, işlenmiş merkeze, 107 tekrarlı yük).



Şekil 4.5. Beynit iç yapısı [38].

BÖLÜM 5

DEMİRYOLLARINDA SES VE TİTREŞİM

Son yıllarda demiryolu taşımacılığı sistemleri, hatların yanında ve yeraltı hattının üstünde yaşayan insanların şikâyetlerini giderek daha fazla alıyor. Rahatsızlık genellikle demiryolundaki gürültünün veya titreşimin doğrudan emilsyonundan kaynaklanır, ancak bazen binalarda gürültü, titreşen duvarlar tarafından üretilir ve buna, tekrar yayılan gürültü denir. Titreşimler ve yapıdan kaynaklanan ses çoğunlukla 50 Hz'nin altındaki düşük frekanslarda görülür. Yüksek frekanslarda bu titreşimler gittikçe hızlı bir şekilde azalır. Daha yüksek frekanslardaki enerjiler esasen tekerlekler ve raylar aracılığıyla gürültü olarak yayılır. Kabaca, titreşimler ve yapı kaynaklı gürültü 0-100 Hz frekans aralığında ve 30-2000 Hz frekansında ortaya çıkar [16].

5.1. TİTREŞİM NEDİR?

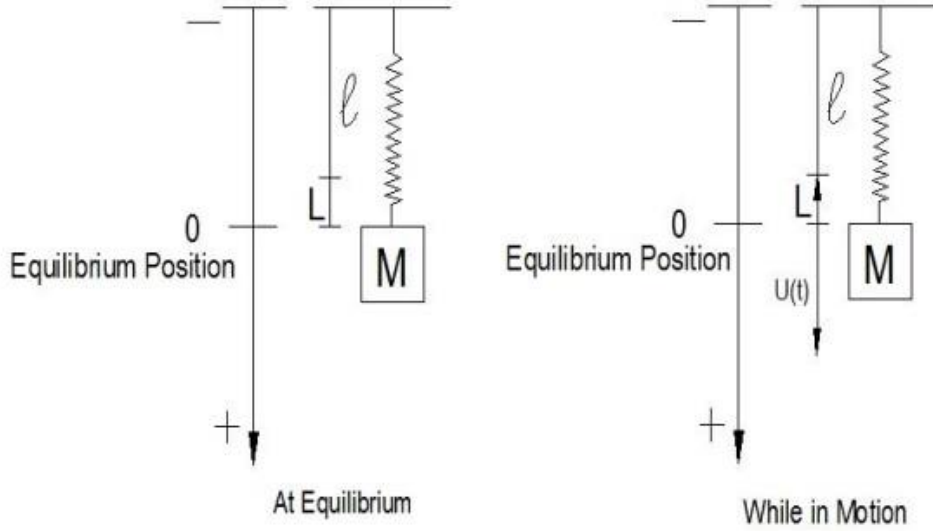
Bir sistemin denge konumu civarında yapmış olduğu salınım hareketine titreşim denir. Yapılan salınım belirli bir sürede (T) kendini tekrar ediyorsa buna periyodik hareket denir [40].

$$x(t)=x(t+nT) \quad (5.1)$$

5.1.1. Mekanik Titreşim

Bir kütle (m), bir yayın ucunda asılıdır, ağırlığı yayı statik bir duruma (sistemin denge konumu) ulaşması için L uzunluğunda uzatır. Kütle için denge konumuna göre zamanın bir fonksiyonu olarak yer değiştirmesini $u(t)$ ifade etsin. Sayfanın aşağı doğru olumlu olduğunu düşünelim. Bu nedenle, $u>0$, yayın denge uzunluğunun ötesine uzandığı

anlamına gelir; $u < 0$ ise yay sıkıştırıldığı anlamına gelir. Daha sonra kütle hareketi geçirildiği varsayılır (çeşitli yollardan herhangi biri ile) [40].



Şekil 5.1. Yay sönüm sistemi [40].

Hooke kanuna göre;

$$mg = kL \quad (5.2)$$

Hareket halindeyse;

$$m\ddot{u} + y\dot{u} + ku = F(t) \quad (5.3)$$

5.1.2. Sönümlü Ve Sönümsüz Titreşimler

Bir cisim titreşim halindeyken, titremesine engel olmaya çalışan bir etki yoksa titreşim hali sonsuza kadar devam edecektir. Buna sönümsüz titreşim denir. Sistem başladığı noktadan enerjisinin yettiği mesafeyi kat edip tekrar başladığı noktaya dönen bir döngüye girecektir. Ve toplam enerjisi azalmayacaktır. Ancak titreşimi azaltacak bir sönüm elemanı olursa titreşim enerjisinin dönüşümüyle duracaktır [41].

5.1.3. Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Titreşim

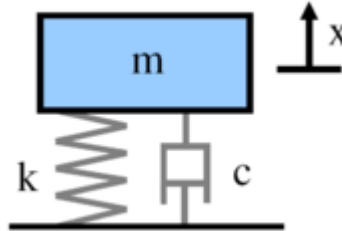
Titreşim halindeki sistemlerin her elemanı aynı yönde titreşmeyebilir. Böyle sistemlere doğrusal olmayan titreşim denir. Eğer aynı yönde titreşim var ise buna doğrusal titreşim denir [41].

5.1.4. Serbest Ve Zorlanmış Titreşim

Titreşen sistemi durmaya zorlayan bir durum yoksa bu serbest titreşimdir. Eğer titreşim durdurulmaya çalışılıyorsa buna zorlanmış titreşim denir [41].

5.2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SÖNÜMLÜ BİR SİSTEMİN SERBEST TİTREŞİMLERİ

Tek kütleli, ağırlıksız ve k yay sabitine sahip yay ve oluşturduğu bir sistemde formüllerini çıkaralım. Sistemimiz Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Tek serbestlik dereceli sönümlü yay [42].

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0 \quad (5.4)$$

Bu denklem görüldüğü üzere adi diferansiyel denklemdir. Ve çözüm kökleri;

$$\begin{aligned} x &= ae^{st} \\ \dot{x} &= sae^{st} \\ \ddot{x} &= s^2ae^{st} \end{aligned} \quad (5.5)$$

olacaktır.

Bu kökleri yerine koyarsak;

$$Ms^2ae^{st} + bsae^{st} + kae^{st} = 0 \quad (5.6)$$

$$ae^{st}(ms^2 + cs + k) = 0 \quad (5.7)$$

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (5.8)$$

Bu denklemin, diskriminantla köklerini bulursak eğer;

$$x_{1,2} = -\frac{b}{2a} \mp \frac{1}{2a}\sqrt{b^2 - 4ac} \quad (5.9)$$

$$x_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m}\sqrt{c^2 - 4km} \quad (5.10)$$

Bilindiği üzere diskriminantın sıfırdan büyük, sıfıra eşit ve sıfırdan küçük olması durumlarında farklı sonuçlar oluşturmaktadır. Ayrıca $4km$ ifadesi kritik sönümün karesi olmaktadır.

$$c_{kr} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_R \quad (5.11)$$

Sönüm oranı formülünü verirsek;

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} \quad (5.12)$$

$$x_{1,2} = -\zeta\omega_R \pm \omega_R\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (5.13)$$

Burada sönüm oranı 3 farklı durumu olacaktır:

- $\zeta > 1$ ise kökler gerçek ve negatiftir. Sistem salınım yapmadan sönümlenir.
- $\zeta = 0$ ise kökler gerçek ve bir tanedir. Sistemde hareket sönümlenecektir.
- $\zeta < 1$ ise kökler reel değildir. Sistem titreşim hareketi yapmaktadır.

Eğer genlik bulacaksak titreşimde olmalı yani 3. durumu göz önüne alırız.

$$x_{1,2} = -\zeta w_r \pm i w_r \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.14)$$

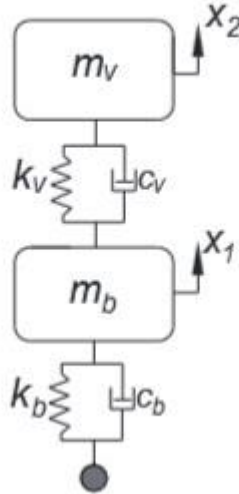
Doğal frekansı ise;

$$w_d = w_R \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.15)$$

5.3. DEMİRYOLUNUN TİTREŞİM MODELLEMESİ

5.3.1. İki Serbestlik Dereceli Raylı Sistemin Modellenmesi

Bu raylı sistemlerin sayısal olarak modellenmesinin en basitleştirilmiş kısmıdır. Bu bölümde sadece boji ve vagonun dikey olarak hareketi göz önünde bulundurulur. Bu sistemde 2 sönüm elemanı yani süspansiyon bulunmaktadır. Tekerlek ve boji arasında, bojiyle vagon arasında süspansiyonlar bulunmaktadır. Şekil 5.3.'de sistemin görseli verilmiştir [41].



Şekil 5.3. 2 serbestlik dereceli raylı sistem modeli [41].

Lagrange metodu kullanılarak yapılacak çözümlemede ilk olarak modelin enerjisi bulunur:

$$E_k = \frac{1}{2}m_b\dot{x}_1 + \frac{1}{2}m_v\dot{x}_2$$

$$E_p = \frac{1}{2}k_b\dot{x}_1 + \frac{1}{2}k_v(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (5.16)$$

$$D = \frac{1}{2}C_b\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}c_v(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2$$

$$L = E_k - E_p \quad (5.17)$$

$$L = \frac{1}{2}m_b\dot{x}_1 + \frac{1}{2}m_v\dot{x}_2 - \frac{1}{2}k_b\dot{x}_1 - \frac{1}{2}k_v(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (5.18)$$

$$q_1 = x_1, \dot{q}_1 = \dot{x}_1, q_2 = x_2, \dot{q}_2 = \dot{x}_2, Q_1 = 0, Q_2 = 0 \quad (5.19)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k} = Q_k \quad (5.20)$$

k=1 için;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = 0 \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = m_b\dot{x}_1$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = m_b\dot{x}_1 = m_b\ddot{x}_1$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = -k_b\dot{x}_1 - k_v\dot{x}_1 + k_v\dot{x}_2 \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = c_b\dot{x}_1 + c_v\dot{x}_1 - c_v\dot{x}_2$$

$$m_b\ddot{x}_1 + k_b\dot{x}_1 + k_v\dot{x}_1 - k_v\dot{x}_2 + c_b\dot{x}_1 + c_v\dot{x}_1 - c_v\dot{x}_2 = 0 \quad (5.23)$$

k=2 için;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = 0 \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} = m_v\dot{x}_2$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_v \dot{x}_2) = m_v \ddot{x}_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = -k_v x_2 + k_v x_1 \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = c_v \dot{x}_2 + c_v \dot{x}_2$$

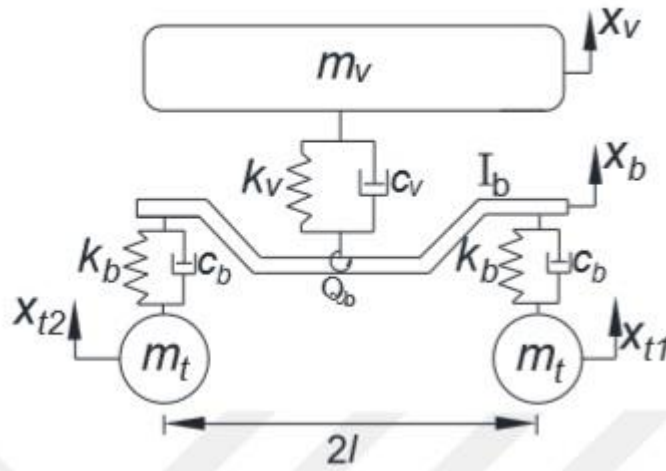
$$m_v \ddot{x}_2 + c_v (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_v (x_2 - x_1) = 0 \quad (5.26)$$

Eğer bulduğumuz formülleri matris halinde gösterirsek;

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_v & -c_v \\ -c_v & c_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_v & -k_v \\ -k_v & k_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

5.3.2. Beş Serbestlik Dereceli Raylı Sistemin Modellenmesi

Bu sistemde bir öncekinden farklı olarak 2 tekerleğinde dikey hareketi göz önünde bulundurulacaktır. Yani 2 tekerlek, birer boji ve vagon, bir de bojinin merkez etrafında dönebilmesi göz önünde bulundurularak denklemler çıkarılacaktır. Sistemin görseli şekil 5.4.'de gösterilmiştir [41].



Şekil 5.4. 5 serbest dereceli sistemin modeli.

Şekil 5.4.'de görünen sisteme çeyrek raylı araç modeli denilmektedir. Bu sistemin Lagrange metoduyla denklemini bulunur;

Önce sistemin enerji denklemini çıkarılır:

$$\begin{aligned}
E_k &= \frac{1}{2}m_v\dot{x}_v^2 + \frac{1}{2}m_b\dot{x}_b^2 + \frac{1}{2}m_t\dot{x}_{t1}^2 + \frac{1}{2}m_t\dot{x}_{t2}^2 + \frac{1}{2}I_b\dot{\Theta}_b; \\
E_p &= \frac{1}{2}k_v(x_v - x_b)^2 + \frac{1}{2}k_b(x_b - x_{t1} + \Theta_b l)^2 + \frac{1}{2}k_b(x_b - x_{t2} - \Theta_b l)^2 + \\
&\frac{1}{2}k_h(x_{t1} - x_r)^2 + \frac{1}{2}k_h(x_{t2} - x_r)^2;
\end{aligned} \tag{5.28}$$

$$\begin{aligned}
D &= \frac{1}{2}c_v(\dot{x}_v - \dot{x}_b)^2 + \frac{1}{2}c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_{t1} + \dot{\Theta}_b l)^2 + \frac{1}{2}c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_{t2} - \dot{\Theta}_b l)^2; \\
L &= E_k - E_p
\end{aligned} \tag{5.29}$$

$$\begin{aligned}
L &= \frac{1}{2}m_v\dot{x}_v^2 + \frac{1}{2}m_b\dot{x}_b^2 + \frac{1}{2}m_t\dot{x}_{t1}^2 + \frac{1}{2}m_t\dot{x}_{t2}^2 + \frac{1}{2}I_b\dot{\Theta}_b - \frac{1}{2}k_v(x_v - x_b)^2 - \frac{1}{2}k_b(x_b - x_{t1} + \\
&\Theta_b l)^2 - \frac{1}{2}k_b(x_b - x_{t2} - \Theta_b l)^2 - \frac{1}{2}k_h(x_{t1} - x_r)^2 - \frac{1}{2}k_h(x_{t2} - x_r)^2
\end{aligned} \tag{5.30}$$

$$\begin{aligned}
q_1 &= x_v, \quad q_2 = x_b, \quad q_3 = \Theta_b, \quad q_4 = x_{t1}, \quad q_5 = x_{t2} \\
\dot{q}_1 &= \dot{x}_v, \quad \dot{q}_2 = \dot{x}_b, \quad \dot{q}_3 = \dot{\Theta}_b, \quad \dot{q}_4 = \dot{x}_{t1}, \quad \dot{q}_5 = \dot{x}_{t2}
\end{aligned} \tag{5.31}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k} = Q_k \tag{5.32}$$

k=1 için;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_v} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_v} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_v} = Q_1 \tag{5.33}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_v} &= m_v \dot{x}_v \\
\frac{\partial}{\partial t} (m_v \dot{x}_v) &= m_v \ddot{x}_v \\
\frac{\partial L}{\partial x_v} &= -k_v x_v - k_v x_b \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_v} &= c_v \dot{x}_v + c_v \dot{x}_b
\end{aligned} \tag{5.34}$$

1. Hareket denklemi;

$$m_v \ddot{x}_v + c_v \dot{x}_v - c_v \dot{x}_b + k_v x_v - k_v x_b = 0 \quad (5.35)$$

k=2;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_b} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_b} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_b} = Q_2 \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_b} = m_b \dot{x}_b$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_b \dot{x}_b) = m_b \ddot{x}_b$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_b} = -k_v x_b - k_v x_v - 2k_b x_b + k_b x_{t1} + k_b x_{t2} \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_v} = c_v \dot{x}_b + c_v \dot{x}_v + 2c_b \dot{x}_b - c_b \dot{x}_{t1} - c_b \dot{x}_{t2}$$

2. Hareket denklemi;

$$m_b \ddot{x}_b + (c_v + 2c_b) \dot{x}_b - c_v \dot{x}_v - c_b \dot{x}_{t1} - c_b \dot{x}_{t2} + (k_v + 2k_b) x_b - k_v x_v - k_b x_{t1} - k_b x_{t2} = 0 \quad (5.38)$$

k=3;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_b} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_b} = Q_3 \quad (5.39)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = I_b \dot{\theta}_b$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (I_b \dot{\theta}_b) = I_b \ddot{\theta}_b$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = -2k_b \theta_b I^2 + k_b x_{t1} I - k_b x_{t2} I \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_b} = 2c_b \dot{\theta}_b I^2 - c_b \dot{x}_{t1} I + c_b \dot{x}_{t2} I$$

3. Hareket denklemi;

$$I_b \ddot{\Theta}_b + 2c_b I^2 \dot{\Theta}_b - c_b I \dot{x}_{t1} + c_b I \dot{x}_{t2} + 2k_b I^2 \Theta_b - k_b I x_{t1} + k_b I x_{t2} = 0 \quad (5.41)$$

k=4;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{t1}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_{t1}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{t1}} = Q_4 \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{t1}} &= m_t \dot{x}_{t1} \\ \frac{\partial}{\partial t} (m_t \dot{x}_{t1}) &= m_t \ddot{x}_{t1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_{t1}} &= -k_b x_{t1} + k_b x_b + k_b \Theta_b I - k_h x_{t1} + k_h x_r \\ \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{t1}} &= c_b \dot{x}_{t1} - c_b \dot{x}_b + c_b \dot{\Theta}_b I \end{aligned} \quad (5.43)$$

4. Hareket denklemi;

$$m_t \ddot{x}_{t1} + c_b \dot{x}_{t1} - c_b \dot{x}_b - c_b I \dot{\Theta}_b + (k_b + k_h) x_{t1} - k_b x_b - k_b I \Theta_b - k_h x_r = 0 \quad (5.44)$$

k=5;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{t2}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_{t2}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{t2}} = Q_5 \quad (5.45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{t1}} &= m_t \dot{x}_{t1} \\ \frac{\partial}{\partial t} (m_t \dot{x}_{t1}) &= m_t \ddot{x}_{t1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_{t2}} &= -k_b x_{t2} + k_b x_b + k_b \Theta_b I - k_h x_{t2} + k_h x_r \\ \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{t2}} &= c_b \dot{x}_{t2} - c_b \dot{x}_b + c_b \dot{\Theta}_b I \end{aligned} \quad (5.46)$$

5. Hareket denklemleri;

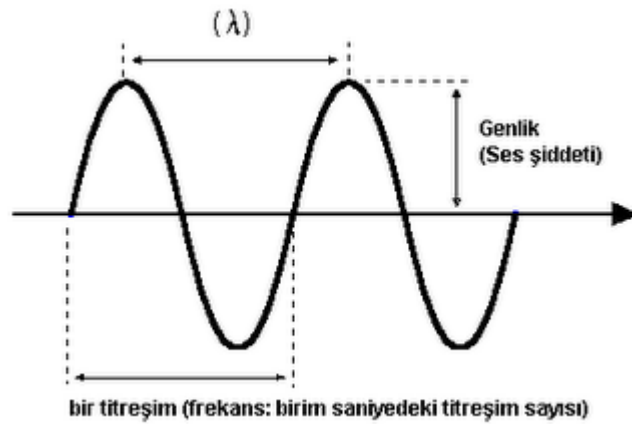
$$m_t \ddot{x}_{t2} + c_b \dot{x}_{t2} - c_b \dot{x}_b - c_b I \dot{\Theta}_b + (k_b + k_h)x_{t2} - k_b x_b + k_b I \Theta_b - k_h x_r = 0 \quad (5.47)$$

Şimdi bulduğumuz formülleri matris formunda yazalım;

$$\begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{t1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{x}_b \\ \dot{\Theta}_b \\ \dot{x}_{t1} \\ \dot{x}_{t2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v & 0 & 0 & 0 \\ -c_v & (c_v + 2c_b) & 0 & -c_b & -c_b \\ 0 & 0 & 2c_b I^2 & -c_b I & c_b I \\ 0 & -c_b & -c_b I & c_b & 0 \\ 0 & -c_b & c_b I & 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ x_b \\ \Theta_b \\ x_{t1} \\ x_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_h x_r \\ k_h x_t \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

5.4. SES İÇİN BAZI TANIMLAMALAR

Ses için önemli iki faktör vardır. Bunlar genlik ve frekanstır. Çoğunlukla ses farklı frekans bileşenlerine sahiptir ve bu bileşenler sesin spektrumlarını oluşturur.



Şekil 5.5. Ses dalgaları [29].

Şekil 5.5.'te görüldüğü üzere genlik maksimum ve minimum basınç arasındaki farktır. Bu dalgalar kendini sinüsün bir fonksiyonu şeklinde tekrar etmektedir. Bu dalgaların herhangi bir andaki genliğini bulmak için;

$$y=r.\text{Sin}[2\pi f(t-x)/c] \quad (5.49)$$

formülü kullanılır [18].

5.5. YER TİTREŞİMLERİ

Titreşimler tekerlekler ve raylar arasındaki büyük kuvvetlerden kaynaklanır. Bu kuvvetler, geniş bir frekans aralığında tekerlek ve ray pürüzlülüğüne tepki olarak dalgalanmaktadır. Buna ek olarak, bir trendeki dingil yüklerinin dağılımı sabit bir noktadan geçerken de bir kuvvet uyarımı oluşturur. Sonraki etki, araç geçiş frekansına ve harmoniklerine karşılık gelen frekanslarda uyarıma neden olur. Tekerlek veya ray pürüzlülüğüne bağlı kuvvetler pürüzlülüğün dalga boyu ve araç hızında belirlenen bir periyodikliğe sahiptir [16].

Kombine araç / ray sistemi karmaşıktır ve birçok doğal frekansa sahiptir. Uyarım frekanslarından biri sistemin doğal bir frekansına karşılık geldiğinde, özellikle kuvvetli bir titreşim vardır. Sistemin bir uyarım frekansı veya doğal frekansı uyuyan geçiş frekansına karşılık gelirse güçlü bir titreşim de oluşur. Buna karşın, sistemin doğal frekansları, çalışma hızından bağımsızdır. Travers geçiş frekansı hızlanma hızıyla orantılı olarak artar. Hız arttıkça, frekansların tesadüfleri meydana gelebilir ve titreşimler zirve noktasına ulaşacak ve böylece azalacaktır. Titreşimler hızla artmaz ve bir hız düşüşü bazen titreşimleri daha da kötüleştirebilir [16].

Titreşim sıkıştırma dalgaları, kayma dalgaları ve yüzey (Rayleigh) dalgaları vasıtasıyla toprağın içinden patlar. Her dalga türü için enerji, kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Bu, geometrik dağılım ve zemindeki enerji emiliminden kaynaklanmaktadır. En düşük frekanslar en az sönümlüdür [16].

Yer altı demiryollarında, titreşim enerjisi, sıkıştırma ve kayma dalgaları yoluyla 30-150 Hz frekans bandında iletilir. Genellikle 50 Hz bölgesinde bir enerji zirvesine sahip olan bu titreşimler, genellikle 5 ila 25 H'de titreşen duvarlar ve tavanlardan gürleyen bir ses olarak fark edilir [16].

Ana hat demiryollarına yakın binalar genellikle yüzey dalgaları kalırken basma ve kayma dalgaları nedeniyle oluşan titreşimlerin kaybolduğu mesafededir [16]. En kritik koşullar, zemin titreşiminin baskın frekansı bir binanın doğal frekansı ile çakıştığında ortaya çıkar. Yanal titreşimlerin temel frekansı 1 ila 10 Hz arasında olmasına rağmen, bileşenlerin doğal frekansları daha yüksek olabilir [16].

5.6. SESİN YAYILMASI

5.6.1. Geometrik Yayılma

Ses dalgalarının yayılması bir yayın sıkışıp genişmesiyle benzerlikler gösterir. Havanın da sıkışması bu yay örneğindeki sıkışmaya oldukça benzerdir. Bu sıkışma ve genişleme hareketi havadaki moleküllerin sıkışıp genişmesine neden olur ve havadaki basınç değişimleri dağılarak ilerler. Ses dalgaları olarak adlandırdığımız bu titreşimler havada yan yana bulunan molekülleri harekete geçirerek katı, sıvı ve gaz ortamlarında ilerler [16].

5.6.2. Atmosferik Emilim

Hava üzerinde yayılan ses dalgaları havanın direnci yüzünden zamanla enerjisi ve genliği azalacaktır. Ses dalgasının enerjisi ısı enerjisine dönerek azalacaktır [16].

5.6.3. Toprakta Dalga Yayılımı

Titreşim enerjisi, vücut ve yüzey dalgaları şeklinde toprak boyunca iletilir. Bir dalganın parçacık hareketi u , dalga yayılım hızı c ve dalga boyu λ ile karakterizedir. C hızında x yönünde ilerleyen bir düzlem dalga, aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir [16]:

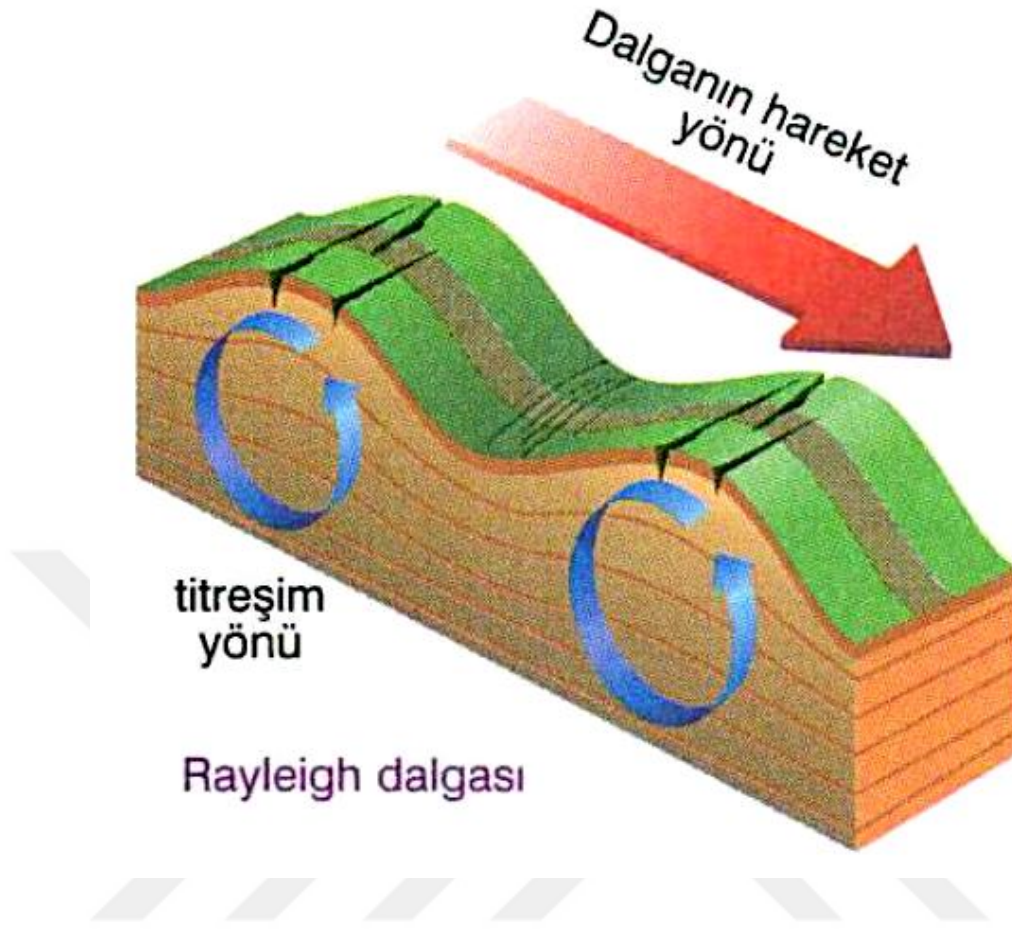
$$U = Ae^{\frac{2\pi}{\lambda}(x - ct)} \quad (5.50)$$

Yük uyarımı kararlı durum özelliğine sahipse, parçacık hareketinin frekansı uyarma frekansına karşılık gelir. Dalga boyu λ , uyarım frekansı f ve dalga yayılım hızı c ile ilişkiye göre belirlenir [16].

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (5.51)$$

Geçici yüklerde f frekansı, zemin yapısının katmanlı doğasının titreşim iletimine üstün olduğu frekansa karşılık gelecektir [16].

Basma dalgalarının parçacık hareketi dalga yayılımı yönündedir, buna karşılık kesme dalgalarının parçacık hareketi buna dik bir düzlemedir. Serbest yüzeyin yakınında meydana gelen Rayleigh dalgaları durumunda, zemin parçacıkları, Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi geriye doğru eliptik hareketi (saatin ters yönünde) izlemektedir. Yüzeyde, düşey yer değiştirme, yatay yer değiştirmenin yaklaşık 1.5 katındadır [16].



Şekil 5.6. Rayleigh yüzey dalgalarının şematik çizimi [30].

Titreşimin büyük kısmı (%67) yüzey dalgaları olarak iletilirken kesme dalgaları ve sıkıştırma dalgaları sırasıyla %26 ve %7'dir. Bu nedenle, yüzey dalgaları genellikle pratik önem taşır. Rayleigh dalgalarının genliği uzaklığa bağlı olarak;

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (5.52)$$

A_1 ve A_2 , ses kaynağından R_1 ve R_2 uzaklığı olarak belirlenmiş 2 noktadaki titreşim genlikleridir. Bu denklemde Barkan formülünde emilim katsayısı α malzeme sönümlemesinin bir ölçüsüdür. Emilim katsayısı α zemin türüne ve su doymunluğunun derecesine bağlıdır ve doymuş gevşek topraklarda ve yoğun topraklarda sırasıyla 0,01-0,1 m^{-1} arasında değişir. İç mekândaki geometrik sönümlenme R^{-1} 'e orantılı olduğu ve yüzey boyunca R^{-2} 'ye eşit olduğu için vücut dalgalarının genlikleri çok daha hızlı azalır [16].

Bir trenin geçişi esnasında dalgaların oluşması, az çok kararlı bir durum süreci olarak kabul edilebilir. Dalgalar yoluyla yayılan enerji, tren yükü ve yer değişimi arasındaki aktarım fonksiyonuna bağlıdır [16].

Frekansla ilgili bu fonksiyon, parça ve zemin özelliklerine bağlıdır. Açık alanda düz ray üzerindeki çoğu demiryolu titreşim problemi için, yük spektrumlarının baskın frekansları 5 ila 50 Hz arasındadır. Rayleigh dalga hızı yaklaşık 50 ila 250 m/s arasında değiştiği için Rayleigh dalgalarının dalga boyunun 5 ila 50 m aralığında olması beklenir [16].

Çoğu zaman tabakalandırılmış olan doğal toprak birikintilerinde rezonans etkileri ortaya çıkabilir. Homojen bir zeminin kalınlığı h olan en düşük doğal frekansı f ile belirlenebilir:

$$f_n = \frac{c_T}{4h} \quad (5.53)$$

c_T kesme dalgasının yayılma hızıdır. Örneğin, 5 m kalınlığa ve 100 m/s'lik bir kayma dalgası hızına sahip bir kil tabakası, 5 Hz'lik bir rezonans frekansına sahiptir. Yüksek hızlarla ilgili kısıtlamalardan birisi, istenmeyen girişim olgusundan kaçınmak için hızın dalga yayılım hızının çok altında olmasıdır [16].

5.6.4. İnsan Algısı

İnsan vücudu aşağıdaki titreşim frekanslarına duyarlıdır;

0.1 – 0.2 Hz: Denge organının rezonansı

4-8 Hz: Karın boşluğunun ve göğüs boşluğun rezonansı

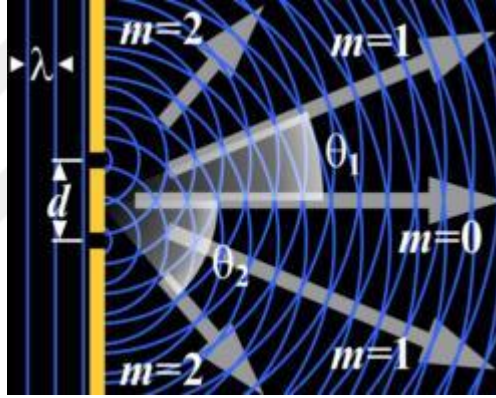
30-80 Hz: Göz çukurundaki gözlerin rezonansı; dikkat kaybıyla sonuçlanır.

Genel olarak, 5 Hz'de 0,2 mm'lik genliklerin binalarda herhangi bir hasara neden olmadığı varsayılmaktadır. Bu değer, algılama sınırının yaklaşık 200 katı olduğu için,

bu tür titreşimlerin şikâyetleri başlatması o kadar enteresan değil. Titreşimler yer değiştirme, hız ve hızlanma açısından ifade edilebilir. Ortak birim mm/sn cinsinden hızdır.

5.6.5. Bariyer İle Kırınım

Ses dalgalarının yansımaları sağlamak amacıyla deniz veya okyanuslardaki dalga kıranlara benzer bariyerler kullanılarak gürültü seviyesinin düşmesi sağlanır. Ancak tam anlamıyla engellenemezler. Kırınımı ise şöyle ifade edebiliriz; ses dalgalarının önündeki cisme çarparak yön değiştirerek ilerlemesi olayıdır. Düşük frekanslı ses dalgalarının kırınım özelliği yüksek frekanslı dalgalara göre daha yüksektir [18].



Şekil 5.7. Kırınım [31].

5.7. SESİN ÖZELLİKLERİ

5.7.1. Sesin Hızı

Sesin hızı dalga boyunun frekansından etkilenmez. Yalnızca nem ve basınçtan bir miktar etkilenmektedir ve hızı m/sn olarak alınır. Hava sıcaklığı ses hızı için önemli bir etmendir. Mesela 20 °C hava sıcaklığında 344 m/sn hızla ilerleyen hız, düşen her 1 °C sıcaklığın etkisiyle 0,61 m/sn artar. Havayı ideal gaz olarak ele alırsak eğer aşağıdaki formülle sıcaklığa bağlı ses hızı bulunabilir [18].

$$V=331,5 + (0,61 \times T) \text{ m/sn} \quad (5.54)$$

5.7.2. Basit Harmonik Hareket Saf Ton

En basit dalga şekli, sinüs dalgalarıdır. Eğer bir ses dalgası tek frekanstan oluşuyor ise bu dalga saf ton olarak adlandırılır. Bu ses dalgaları kendini tekrarlayan basit harmonik hareketten oluşan bir dalgadır [18].

5.7.3. Sesin Şiddeti Ve Basıncı

Ses dalgaları genellikle birbiri üstüne binmiş birçok frekanstan meydana gelir. Noktasal bir kaynaktan yayılan ses dalgaları suya atılmış bir çakıl taşının suda oluşturduğu dalgalar gibi havada yayılır.



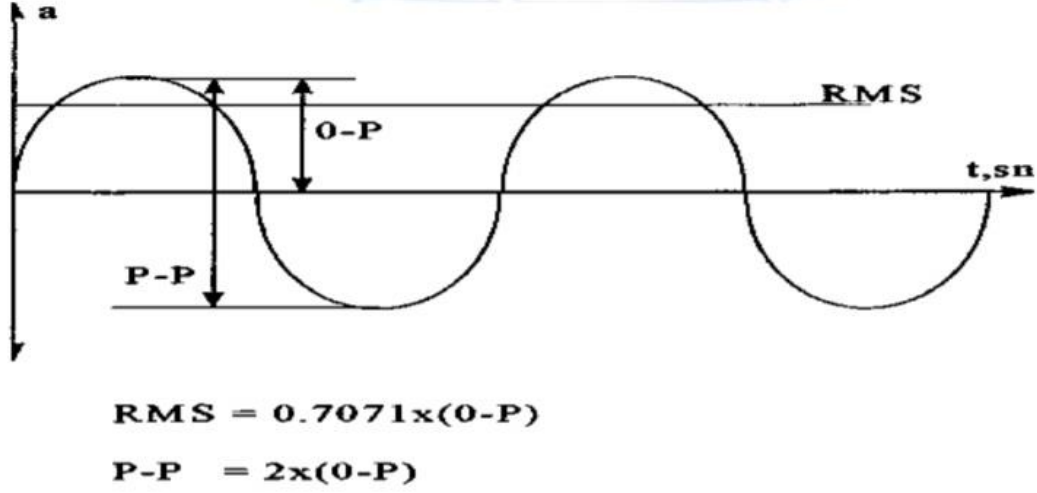
Şekil 5.8. Suyu atılan taşın oluşturduğu dalgalar [19].

Kaynağın ürettiği dalgalar yanındaki komşu moleküle basınç uygulayarak enerji akışı ortaya çıkarır. Bu enerjinin belirli yönde birim zamanda birim alandan geçen miktarına ses şiddeti (watt/m^2) denir. Dalga ses kaynağından uzaklaştıkça küresel alanı da karesi miktarında artacaktır.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (5.55)$$

5.7.4. RMS Genlik

RMS (root mean square) yani kareler toplamının karekökü titreşimin efektif değeridir. Yani kaynaktan hissedilen titreşim seviyesidir. Basit harmonik harekette 0-P değerinin 0.7071 katıdır [20].



Şekil 5.9. RMS [20].

5.8. GÜRÜLTÜ SEVİYELERİ

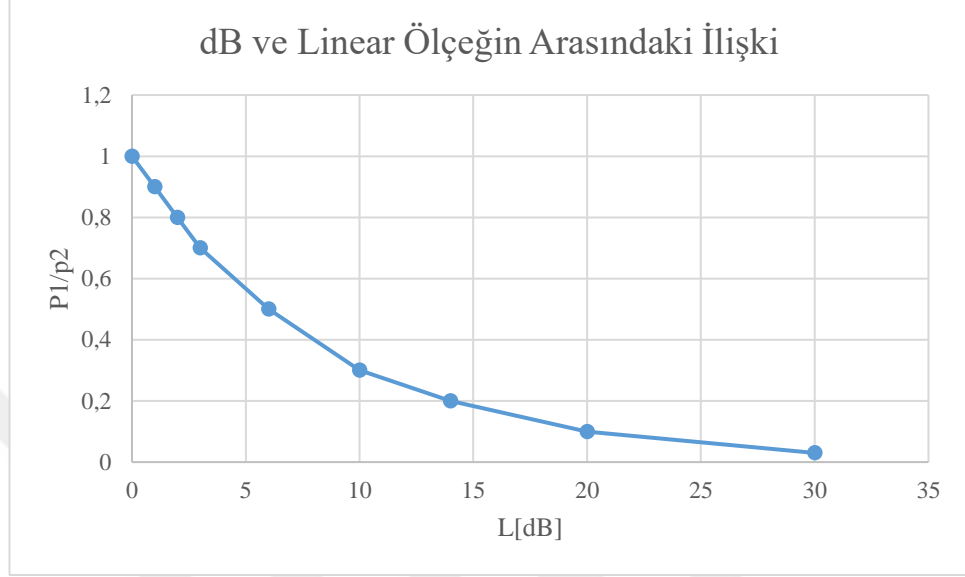
5.8.1. Ses Basınç Seviyesi

Ses basıncı seviyesi ortamdaki gürültü şiddetinin bir ölçüsüdür. Ve desibelle (dB) ölçülür. Spektral değerlerin dinamik aralığı oldukça büyük olduğu için, çoğunlukla dB cinsinden logaritmik bir ölçekte gösterilir.

$$L[dB] = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \quad (5.56)$$

Şekil 5.10. doğrusal ölçek ile dB ölçeği arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Güç spektral değerleri çoğunlukla 1/3 oktav bandı başına ortalama karekök (rms) veya efektif değer olarak hesaplanır. Titreşimlerle ilişkili düşük frekanslarda hızlanma genellikle hız üretmek için entegredir [16].



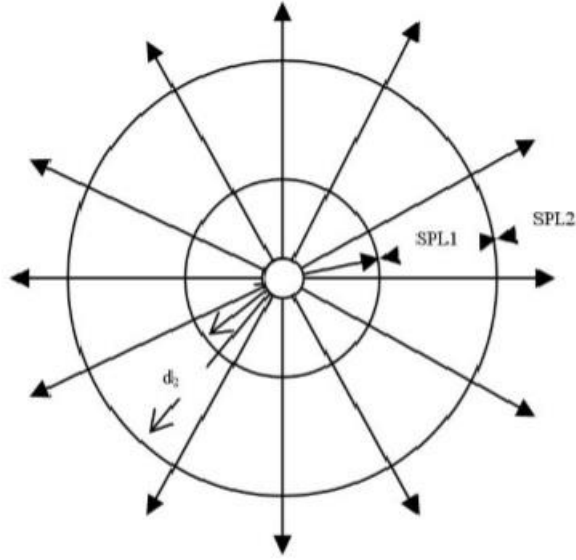
Şekil 5.10. dB ve linear ölçeğin arasındaki ilişki.

Onları dB değerleri olarak ifade ederken, bir referans değeri verilmelidir. Gürültü değerleri normalde bir referans değeri 2×10^{-5} 'ye göre ifade edilir.

A-filtresi, anılacağı üzere 200 Hz'in hemen altındaki tüm katkı paylarını ortadan kaldırır. Gürültü seviyeleri normalde A-ağırlıklı olduktan sonra sunulmaktadır. Bu dB (A) cinsinden gösterilir. Uygulamaya bağlı olarak, spektrumlar A-ağırlıklı olarak sunulabilir veya sunulmayabilir [16].

Çizelge 5. 1. Oluşturduğu olumsuz etkilere bağlı olarak gürültü düzeyleri [17].

Gürültü Derecesi	Etkilenme Aralığı(dBA)	Sağlık Üzerine Etkileri
1. Derece Gürültüler	30-65	Konforsuzluk, öfke, kızgınlık, uyku düzensizliği ve yoğunlaşma bozukluğu
2. Derece Gürültüler	65-90	Fizyolojik reaksiyonlar; kas gerilmeleri, stres, kan basıncında artış, kalp ayışlarının ve kan dolaşımının değişmesi, göz bebeği büyümesi, solunum hızlanmasıdır.
3. Derece Gürültüler	90-120	Fizyolojik reaksiyonlar; baş ağrıları.
4. Derece Gürültüler	120-140	İç kulakta devamlı hasar, denge bozulması.
5. Derece Gürültüler	>140	Ciddi beyin tahribatı, kulak zarının yırtılması.



Şekil 5.11. Kaynaktan uzaklaştıkça ses basıncının da düşmesi [18].

$$d_2=2d_1 \quad (5.57)$$

$$SPL_2=SPL_1-6dB \quad (5.58)$$

Ses düzeylerindeki 3 dB'lik artış (bu yaklaşık olarak 1.4 kat artış olmaktadır.) ancak hissedilebilir bir artış olmaktadır. Eğer bu artış 10 dB'lik bir artış olsaydı sesin bir kat daha gürleştigi hissini uyandırırdı [18].

5.8.2. Ses Gücü Seviyesi

Sesin kaynaktan çıkış gücüne ses gücü seviyesi denmektedir. Ses miktarının doğrudan bir göstergesidir [18].

$$SWL=10\log\frac{W}{W_0} \quad (5.59)$$

5.8.3. Frekans Analizi Ve dB

Gürültünün çok sayıda ses sinyalinin karmaşık yapısından oluştuğunu düşünürsek, frekans analizi bize bu ses sinyallerinin hangi büyüklük ve frekansta olduğunu gösterir. Elde edilen frekans sayısı analizin hassasiyetini belirleyen bir durumdur ve analizi yapan tarafından belirlenebilir [18].

Ses sinyallerinin analizini yapabilmek için frekans filtreleri kullanılır. Mikrofon sesleri alır ve sinyal yükseltici kullanılarak sinyal seviyesi yükseltilir. Daha sonra sinyal frekans filtrelerinden geçerek standart zaman sabitlerine sahip olacak şekilde rektifiye olur ve dB şeklinde ekrana yansıtılır [18].

5.8.4. Eşdeğer Gürültü Seviyesi (Leq)

Belirli bir zaman aralığında düzenli veya düzensiz seslerin enerji ve basınçlarının birim zamandaki karşılığına denir. Birimi desibeldir [18].

$$Leq=10\log\frac{1}{T}\int_0^T\left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^2 \quad (5.60)$$

T toplam ölçüm süresini, p(t) anlık ses basıncını, p₀ referans ses basıncını (20μPa) ifade etmektedir.

Maksimum ses seviyesi (L_{max}): Ölçüm sırasında alınan en yüksek ses seviyesidir.

Minumum ses seviyesi (L_{min}): Ölçüm sırasında alınan en düşük ses seviyesidir.

L_{gag} : Gün içinde farklı zaman dilimlerinde alınan ses ölçümlerinin ortalamasıdır.

5.8.5. Ses Seviyelerinin Toplanması Ve Çıkarılması

Desibel logaritmik bir değer olduğundan aritmetik bir işlem yapılamamaktadır. Eğer elimizde iki adet 100 dB'lik ses olduğunu düşünürsek [18];

$SWL=10\log\frac{W}{W_0}$ formülümüzü kullanarak,

$$100=10\log\frac{W}{1.10^{-12}}$$

$W=10^{-2}$ Watt olacaktır.

İki adet 100 dB'lik sesimiz olduğu için;

$$10^{-2}+10^{-2}=2.10^{-2} \text{ Watt olacaktır.}$$

Tekrar bu sesleri desibelle çevirmek istersek;

$$SWL=10\log\frac{2.10^{-2}}{10^{-12}}$$

$SWL=103\text{dB}$ olacaktır. Yani 100dB ile 100dB'in toplamı 103dB yapmaktadır.

Çizelge 5.2. Desibel toplanmasındaki kısaltma [18].

İki ses kaynağı arasındaki fark (dB)	Büyük olan ses kaynağına eklenecek fark (dB)
0dB-1dB	3dB
2dB-3dB	2dB
4dB-9dB	1dB
>10dB	0dB

Çizelge 5.3. Referans miktarları ve seviye formülleri [18].

İsim	Formül	Referans Miktarlar
Ses basınç seviyesi	$20\log(p/p_0)$	20×10^{-6} Pascal
Ses güç seviyesi	$10\log(W/W_0)$	10^{12} Watt
Ses yoğunluğu seviyesi	$10\log(I/I_0)$	10^{12} Watt/m ²
Vibrasyon ivmelenme seviyesi	$20\log(a/a_0)$	10^{-5} m/sn
Vibrasyon hızı seviyesi	$20\log(v/v_0)$	10^{-8} m/sn
Vibrasyon yerdeğiştirme seviyesi	$20\log(d/d_0)$	10^{-11} m
Vibrasyon gücü seviyesi	$20\log(F/F_0)$	10^{-6} N
Enerji	$10\log(E/E_0)$	10^{-12} J

5.9. DEMİRYOLLARINDA GÜRÜLTÜ HESABI

5.9.1. Toplumun Gürültüye Tepkisinin Ölçümü

İnsanların demiryollarında oluşan gürültüye verdikleri hassasiyet çeşitli yollarla hesaplanabilir. Bunlar L_{eq24} , $L_{güğe}$ 'dir. Gürültüye tepki sadece geçen vagon ve lokomotif sayısına bağlı değildir. Rahatsız olan insanın yaşına, oturduğu yere ve ailesinin büyüklüğüne de bağlıdır [18].

Bir trenin geçişi sırasındaki gürültü aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$NEL_T = 10\log(10^{NEL_V/10} + 10^{NEL_L/10}) \text{ dB} \quad (5.61)$$

Bu formülde NEL_T tren geçerken oluşan toplam gürültü seviyesi, NEL_V bir ya da daha fazla vagon geçerken oluşan gürültü seviyesi, NEL_L ise bir veya daha fazla lokomotif geçişi sırasında oluşan gürültü seviyesidir [18].

Şimdi ise vagon ve lokomotif gürültü seviyelerinin nasıl hesaplandığının formüllerini inceleyelim;

$$NEL_L = L_{ALmax} + 10\log TE_L \text{ (dB)} \quad (5.62)$$

$$NEL_V = L_{AVmax} + 10\log TE_V \text{ (dB)} \quad (5.63)$$

Bu iki formülde geçen L_{ALmax} lokomotiften kaynaklanan azami gürültü seviyesi denilebilir; L_{AVmax} ise vagonlardan kaynaklanan azami gürültü seviyesidir. TE_L lokomotif için etkin geçiş süresidir, TE_V ise vagon için etkin geçiş süresidir [18]. Aşağıdaki formüllerle de TE_L ve TE_V formüllerini verelim;

$$TE_L = \frac{\pi d n_L}{2v} \text{ (sn)} \quad (5.64)$$

$$TE_V = \frac{1}{v} \left(1 + 1,2 \frac{d}{l}\right) \text{ (sn)} \quad (5.65)$$

Formüllerde l trenin toplam uzunluğu d , hattın uzaklığı (m), v hız (m/s), n_L lokomotif sayısıdır.

L_{AVmax} ve L_{ALmax} aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$L_A = 74 + 30 \log \left(\frac{v}{v_0}\right) \quad \text{dB(A)} \quad (5.66)$$

Formülde v tren hızı, v_0 trenin referans hızını göstermektedir.

5.9.2. Gürültü Değerlendirme Ölçümleri

Bir tren ağı için L_{eq24} ve $L_{güge}$ aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$L_{eq24} = L_{güge} = NEL_T + 10 \log(N-49) \quad (5.67)$$

Bu formülde NEL_T seçilen tren tipi için ortalama enerji seviyesi ve N geçiş sayısını belirtmektedir.

L_{eq24} için;

$$N = N_{gündüz} + N_{akşam} + N_{gece} \quad (5.68)$$

$L_{güge}$ için;

$$N = N_{\text{gündüz}} + N_{\text{akşam}} + 10N_{\text{gece}} \quad (5.69)$$

$N_{\text{gündüz}}$ saat 7 ile 19 arası; $N_{\text{akşam}}$ saat 19 ile 22 arası; N_{gece} saat 22 ile 7 arası geçen sayıları temsil eder.

5.10. FARKLI TREN HIZLARI İÇİN EŞDEĞER GÜRÜLTÜ SEVİYESİ ÖLÇÜMLERİ

Bu bölümde 250 km/h hızla giden 6 vagondan oluşan ve vagon uzunluğu 27350 mm olan bir hızlı trenin gürültü seviyesi formüllerle hesaplanacaktır. Bu tren İspanyol Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF) tarafından üretilmiş tarafından üretilmiş ve TCDD tarafından kullanılan HT65000 model hızlı tren modelidir. Bu hesaplar trenin maksimum hızında gittiği düşünülerek hattan 40 m uzaklık için hesaplanacaktır. İlk olarak vagonlar için çıkan maksimum gürültü seviyesini hesaplayalım;

$$L_{\text{Amax}} = 74 + 30 \log(250/60) = 93 \text{ dB(A)} \quad (5.70)$$

Vagon için etkin geçiş süresi için hızı m/s cinsinden bulursak 69,4 m/sn

$$T_{\text{EV}} = \frac{1}{69,4} \left(1 + 1,2 \frac{40}{27350} \right) = 0,0144 \text{ sn yaklaşık olarak geçiş süresi olacaktır.}$$

Lokomotifler için etkin geçiş süresini $n_L = 1$ için hesaplırsak;

$$T_{\text{EL}} = \frac{\pi \times 40 \times 1}{2 \times 69,4} = 0,905 \text{ sn yaklaşık olarak geçiş süresi olacaktır.}$$

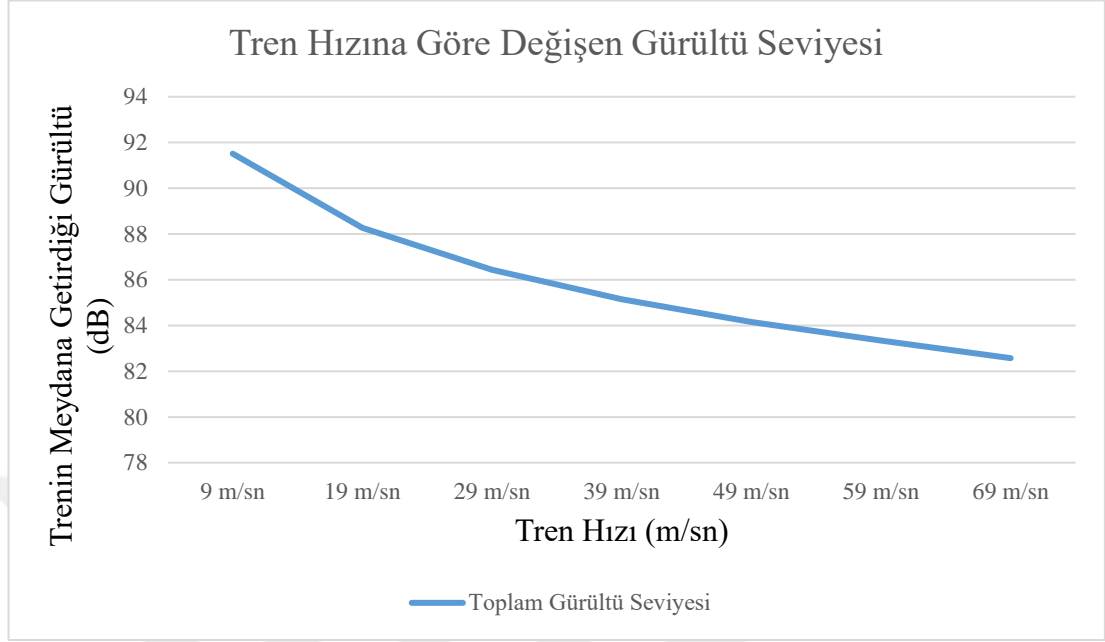
$$N_{\text{ELV}} = 83 + 10 \log 0,0144 = 64,58 \text{ dB}$$

$$N_{\text{ELL}} = 83 + 10 \log 0,905 = 82,57 \text{ dB}$$

Toplam gürültü seviyesini bulursak;

$$N_{\text{ET}} = 10 \log (10^{64,58/10} + 10^{82,57/10}) = 82,64 \text{ dB}$$

Eğer bu hesaplamayı 10 m/sn hız aralıklarıyla maksimum hıza kadar hesaplasaydık

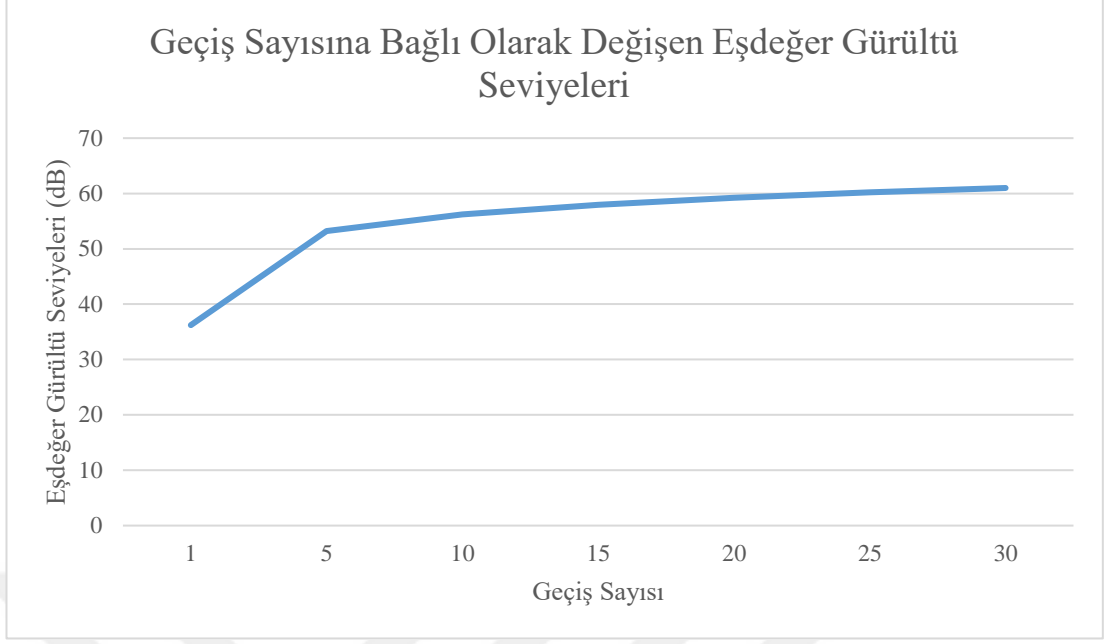


Şekil 5.12. Tren hızına bağlı olarak değişen gürültü seviyeleri.

Bu grafikte görüldüğü üzere artan hızlar etkin süreyi azalttığı için gürültü seviyesini de azaltmaktadır. NEL_T için bir ortalama alırsak;

$NEL_{Tort}=95,22$ dB olacaktır. Bir geçiş için gürültü seviyesine bakarsak;

$$L_{eq}=95,22+(10\log 1)-49=36,22 \text{ dB}$$



Şekil 5.13. Geçiş sayısına bağlı olarak değişen eşdeğer gürültü seviyeleri.

BÖLÜM 6

SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNETİMİ

6.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Yüzlerce yıldır mühendisliğin amacı gerek doğada karşılaşılan zorlukları gerekse doğadan elde edilebilecek kazanımları elde etmektir. Bu kazanım ve zorlukları matematik ve fizik kanunlarıyla açıklamaya çalışarak daha iyi bir yaklaşım sunulmaya çalışılmaktadır. Karmaşık problemler daha az karmaşık olan problemlere bölünerek çözülmeye çalışılmaktadır. Çözülen daha az karmaşık olan problemler daha sonra birleştirilerek ana sorunda bir çözüm elde etmek hedeflenir. Ama doğadaki zorlukların tam olarak matematiksel modellemesi yapılamadığından sorunlar genellikle kabul edilebilir bir yakınlıkla çözüme kavuşturulmaya çalışılır. İşte bu aşamada;

- Fiziksel olayların matematiksel formülasyonu,
- Matematiksel modelin numerik analizi yapılarak çözüme ulaşılmaya çalışılır.

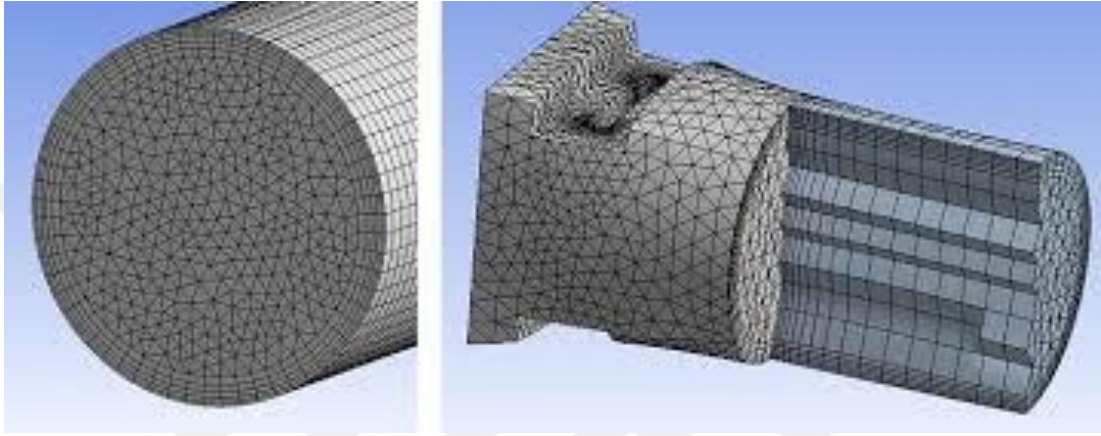
Sonlu elemanlar yöntemi ise birçok mühendislik sorununa kabul edilebilir bir yaklaşımla yanıt arayan bir numerik çözüm yöntemidir.

6.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu analiz yönteminde dizayn ettiğimiz bir sistemi matematik olarak modelleriz. Daha sonra bu modellemeyi daha küçük parçalara ayırılabilen ve gerek sınır şartları gerekse malzeme özelliklerine sahiptir. Bu analiz yönteminde üç temel metot kullanılmaktadır.

- Geometrik açıdan karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar adıyla anılan daha küçük parçalara ayrılır.

- Her küçük parçadaki, sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.
- Aranan sonuçların, düğüm noktalarında ulaşılan bilgilerin, problemin çözümünde yeterli olmasıdır [21].



Şekil 6.1. Karmaşık geometrinin daha küçük parçalara ayrılması [21].

Sonlu elemanlar analizini yapan bazı ticari yazılım programları aşağıda verilmiş;

- Ansys (ABD merkezli ve geliştirilmiş bir bilgisayar destekli mühendislik(CAE) yazılımıdır.
- Abaqus (lineer olmayan ve dinamik analiz için kullanılan yazılımdır.)
- Nastran (Aslında NASA için geliştirilmiş bir programdı. Artık birçok yazılım şirketinden temin edilebilir.)
- Dyna-3D (Etki tepki analizi yapılmaktadır.)

Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları şunlardır;

- Mesh diye tabir ettiğimiz modeli parçalara ayırdığımız şekillerin boyut ve geometrisinin değişken olması nedeniyle modelin tam olarak temsil edilebilmesi,

- Birden çok delik veya köşe gibi zor şartlar kolayca incelenebilir olması,
- Farklı geometri ve malzeme özellikleri bulunan modellerin incelenebilmesidir.
- Sınır şartları basitçe uygulanabilir.



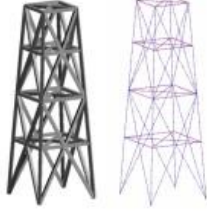






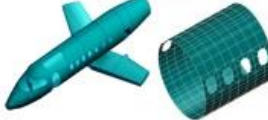




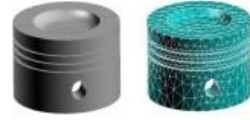


6.2.1. SEA (FEA) İşlemleri

- Öncelikli olarak hangi analiz tipini kullanmak problemin sonucuna götüreceği belirlenmelidir.
- Daha sonra modelde kullanılacak malzemeleri belirlemek ve özelliklerini bilmek gerekir.
- Bu aşamada ise model gerek CAD programlarıyla gerekse SEA programları yardımıyla oluşturulmalıdır. Model çizildikten sonra ağ yapısı (mesh) oluşturulmalıdır.
- Sınır şartları uygulanmalıdır.
- Yükleri ve diğer etmenleri model üzerinde uygulamak gerekir.
- Son olarak ise çözüm optimize edilir.

6.2.2. Sonlu Elemanlar

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), karmaşık yapıların davranışını daha küçük ve daha basit parçalara bölünerek araştırılan sayısal bir yaklaşım yöntemidir. Bu küçük parçalara (sonlu) elemanlar denir. Elemanlar, düğüm noktalarında birbirine bağlıdır. Bu elemanlara ve düğümlere de kafes denir. Elementlerin ve düğümlerin birleştirilmesine sonlu elemanlar modeli denir [39].

Mesh elemanları 1 boyutlu, 2 boyutlu ve üç boyutlu olabilirler.

	Geometry	Model name	Finite element	Example
1D		Bar/Truss		
		Beam		
		Tube/Pipe		
2D		Plate		
				
3D		Solid		
				

Şekil 6.2. Mesh eleman çeşitleri [39].

FEA modeli her zaman 3 boyutlu bir modeldir, bu nedenle 1D veya 2D elemanlar kullanılırsa, analiz edilmesi için 1 veya 2 boyutların tanımlanması gerekir.

6.2.2.1. Bir Boyutlu Elemanlar

1D elemanlar, yapının uzunluğu genişliğinden ve kalınlığından 8 ila 10 kat daha fazla olduğunda ve harici yükler sadece derzlere uygulandığında kullanılır.

Üç çeşit 1 boyutlu eleman vardır:

- Çubuk eleman: sadece sıkıştırma taahhüdünde bulunan;
- Kiriş (çubuk) elemanı: gerginlik ve sıkıştırmayı üstlenmek;
- Işın elemanı: gerilme, sıkıştırma, kesilme ve moment üstlenme Elemanlar için bölüm ve malzeme özellikleri atanmalıdır [39].

6.2.2.2. İki boyutlu Elemanlar

Yapının uzunluğu ve genişliği kalınlığından belirgin derecede büyük olduğunda 2D öğeler kullanılır. Farklı 2D elemanlar vardır:

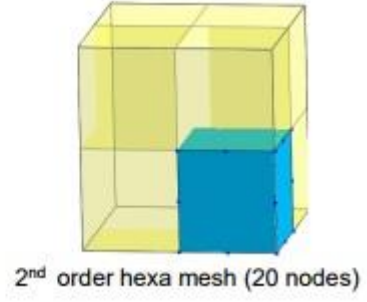
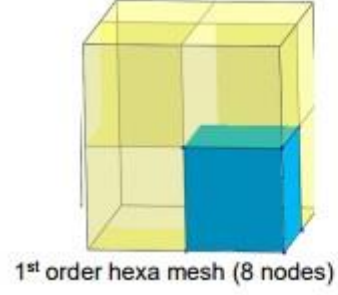
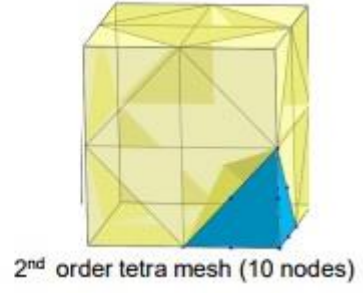
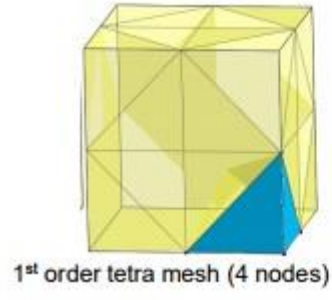
- Plaka: genel 2D elemanı,
- Membran: bükülme yok,
- Yüzey: kalınlık yok,
- Düzlemsel uzama:
- Kompozit Kabuk: Kompozit tabakalı 2d plaka elemanları.
- Elemanlar için kalınlık ve malzeme özellikleri atanmalıdır [39].

6.2.2.3. Üç Boyutlu Elemanlar

3D unsur özellikleri yalnızca Malzemeleri ve Malzeme Koordinat Sistemlerini 3D kafeslere atamak için mevcuttur.

6.3. MESH TIPLERİ

Tetrahedral elemanlar (4 yüz, 4 düğüm) ve heksadral elemanlar (6 yüz, 8 düğüm) olmak üzere 2 ana tip 3 boyutlu eleman vardır. İkinci dereceden elemanlar, ayrıca kuadratik elemanlar olarak adlandırılır, her kenara 1 orta düğüm ekler. Hesaplama, heksadral elementler, tetrahedral elemanlardan daha doğrudur. Ve ikinci dereceden öğeler için daha doğrudur çünkü yaklaşma işlevi doğrusal yerine karesel olacaktır [39].



Şekil 6.3. 3 Boyutlu elemanlar [39].

BÖLÜM 7

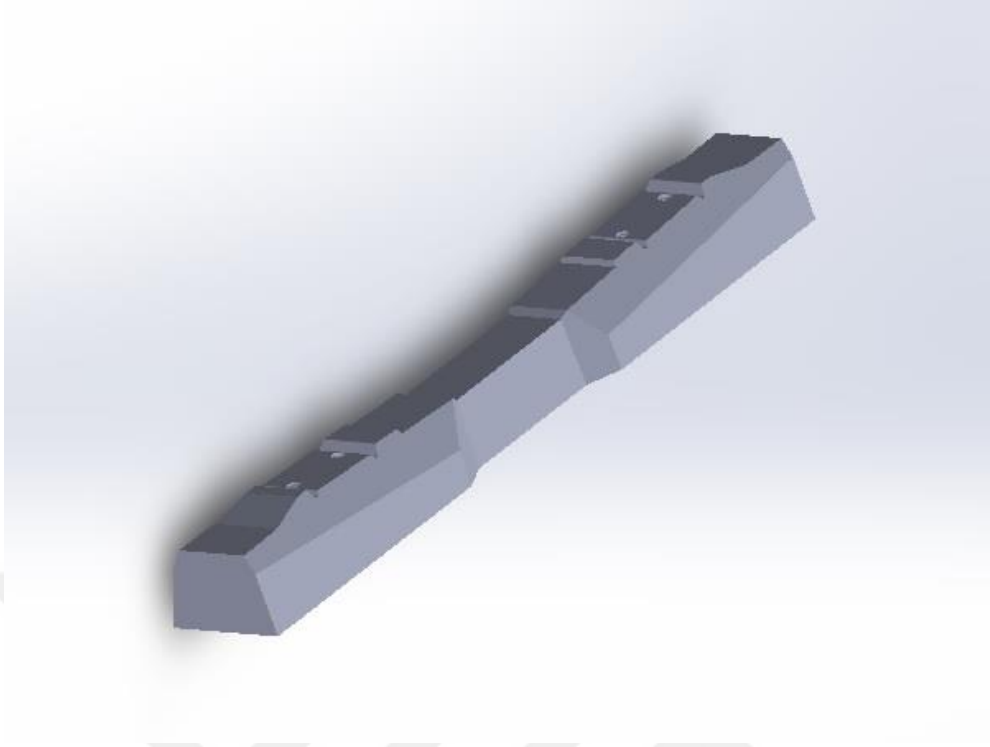
TASARIM VE ANALİZ

3 boyutlu olarak Solidworks bilgisayar destekli dizayn programıyla statik analiz için 2 traversten oluşan 950 mm uzunluğa sahip 2 ray içeren bir demiryolu modeli, dinamik analiz için 6 traversten oluşan 4600 mm ray içeren bir demiryolu modeli oluşturuldu. Modelleme aşamasında birçok CAD programı ve ANSYS programında da çizim bölümü olmasına rağmen SOLİDWORKS programının seçilmesinin nedeni 3 boyutlu tasarımların kolayca yapılabilmesidir. Sadece rayın alını AUTOCAD programıyla 2 boyutlu olarak çizilip SOLİDWORKS'e aktarılmış ve burada 3 boyutlu hale getirilmiştir. Yapacağım analizler için 2 farklı model oluşturulmuştur. Bir tanesi statik analizler için bir tanesi ise dinamik analiz için modellenmiştir.

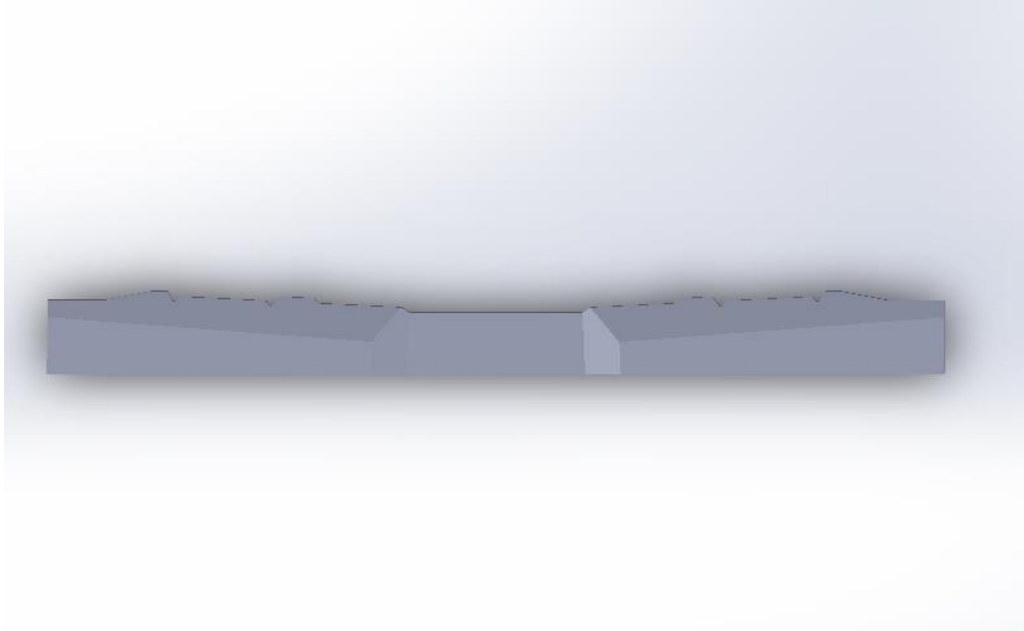
7.1. MODELLEME

Modelleme aşamasında birçok CAD programı ve ANSYS programında da çizim bölümü olmasına rağmen SOLİDWORKS programının seçilmesinin nedeni 3 boyutlu tasarımların kolayca yapılabilmesidir. Sadece rayın alını AUTOCAD programıyla 2 boyutlu olarak çizilip SOLİDWORKS'e aktarılmış ve burada 3 boyutlu hale getirilmiştir. Yapacağım analizler için 2 farklı model oluşturulmuştur. Bir tanesi statik analizler için bir tanesi ise dinamik analiz için modellenmiştir.

Demiryolu standartlarında belirtilen ölçüler kullanılarak tek tek çizilen parçalar, daha sonra SOLİDWORKS programının montaj kısmı kullanılarak birleştirildi. Parçalar birleştirilip son hale getirildikten sonra 3 boyutlu tasarım farklı kaydet yöntemiyle .x_t uzantısıyla kaydedilmelidir. Ansys Workbenchte .x_t uzantılı geometriler import edilebilmektedir.

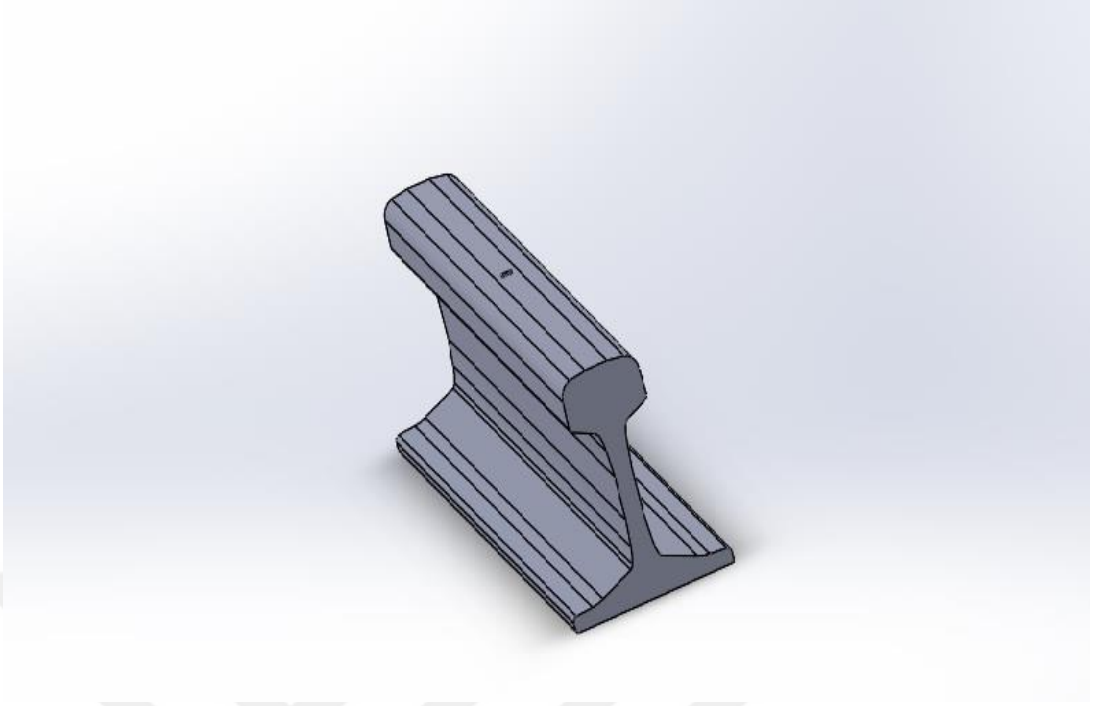


(a)

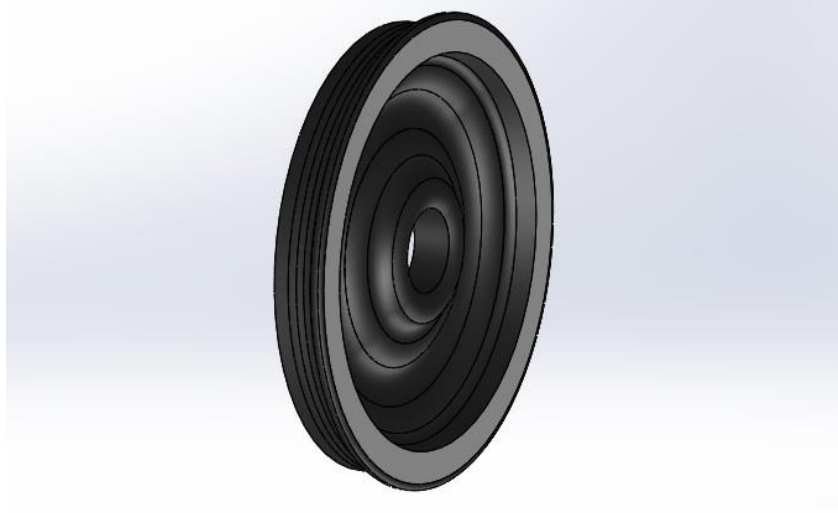


(b)

Şekil 7.1. Solidworks'te modellenmiş beton travers. a) perspektif görünüş b) yan görünüş



Şekil 7.2. Solidworks'te modellenmiş UIC60 rayı (900mm uzunluğunda).

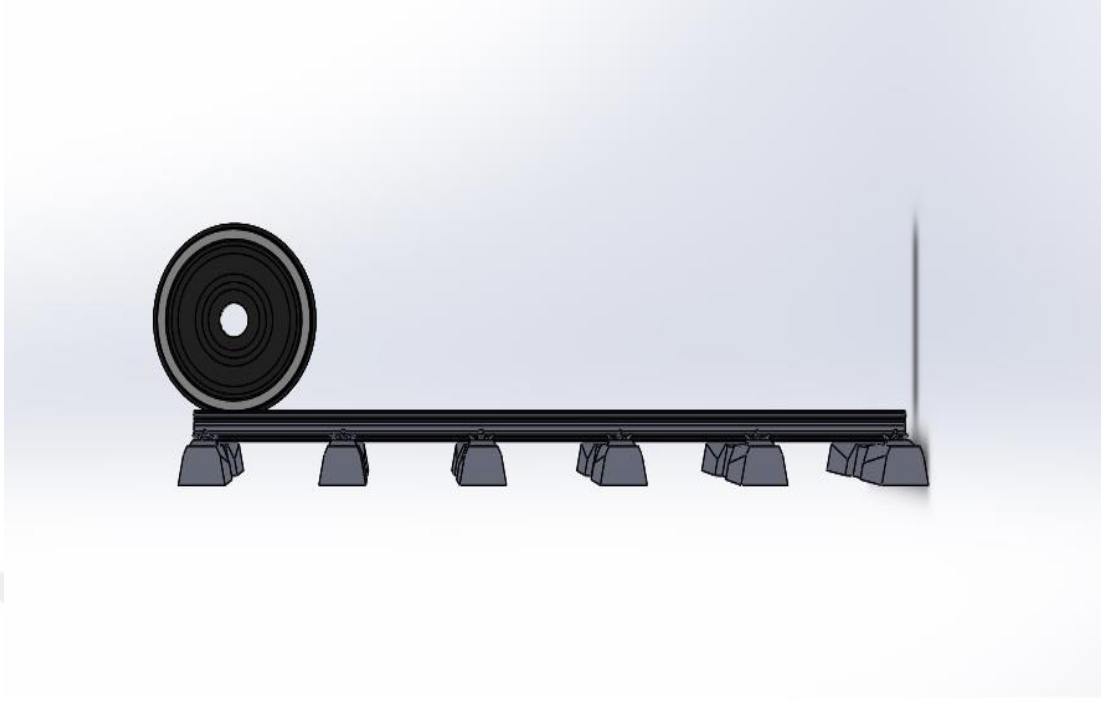


(a)



(b)

Şekil 7.3. Soliworks'te modellenmiş 1000mm çapında tren tekeri. a) iç yüzeyi b) dış yüzey

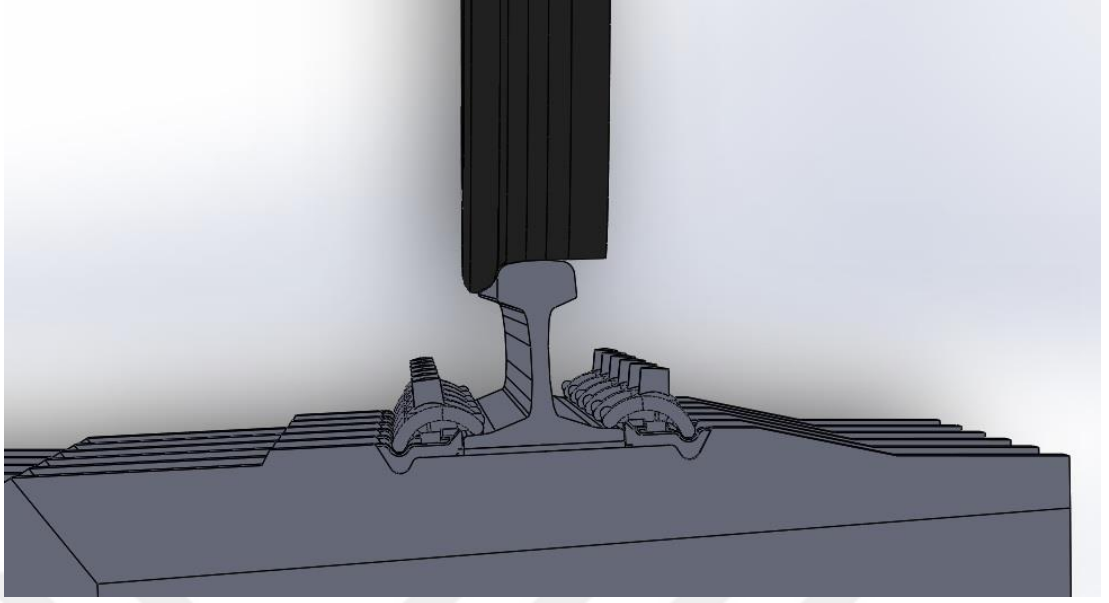


(a)

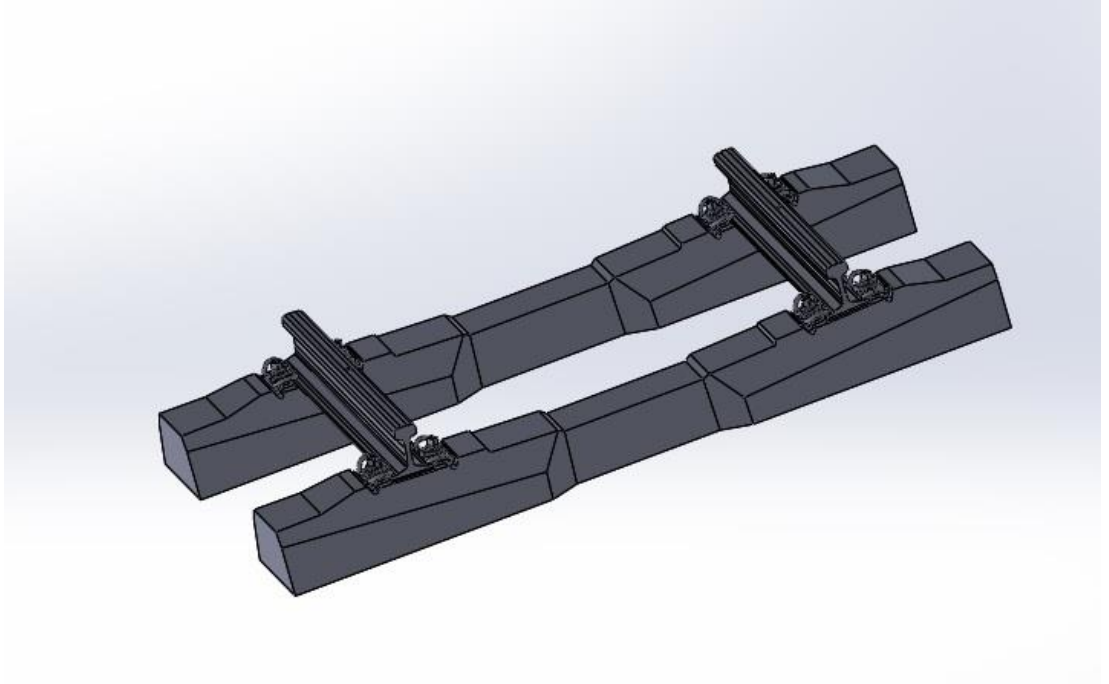


(b)

Şekil 7.4. Parçaların montajlanmış halleri ve bağlantı elemanları a) ön görünüş b) üst görünüş



Şekil 7.5. Ray-Teker kontak bölgesi.



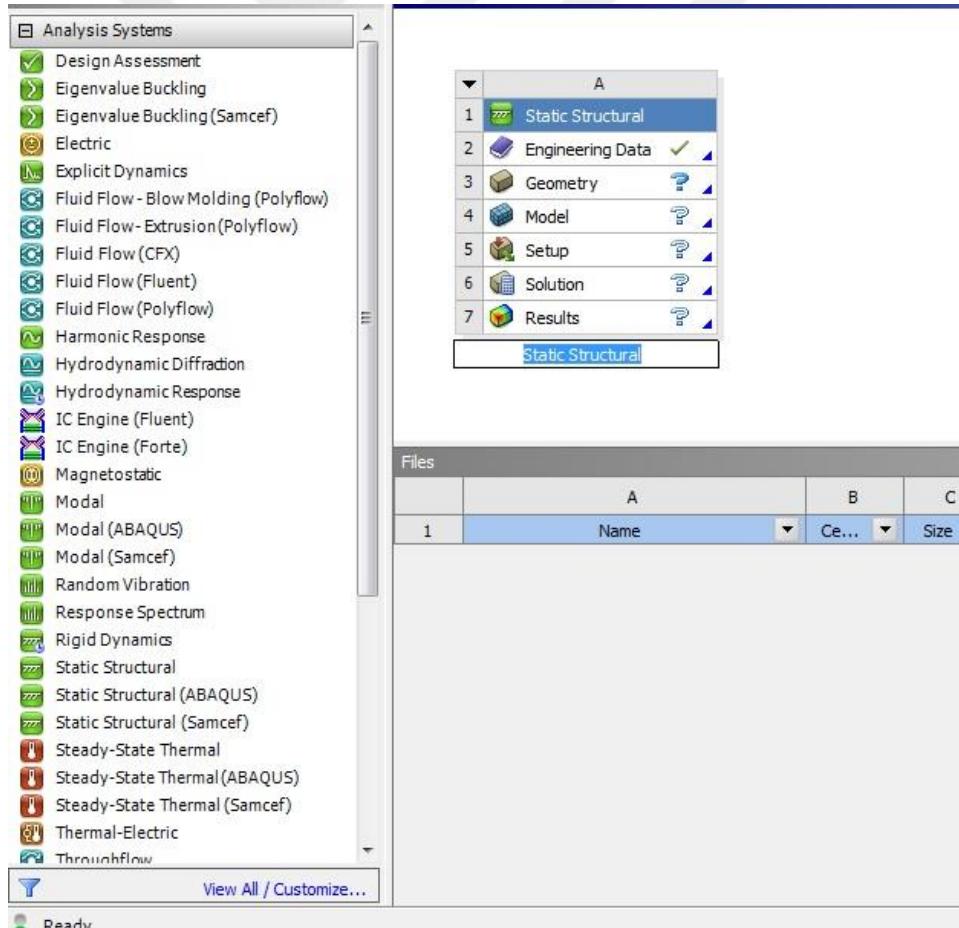
Şekil 7.6. Statik analiz için oluşturulan model.

Yukarıda resimleri bulunan modellerin travers arası açıklıkları 600 mm olarak alınmıştır. Rayla traversler arasında elastik ped bulunmaktadır. Ayrıca rayı traverse bağlayan bağlantı elemanları da resimde görüldüğü üzere modellenmiştir.

7.2. ANSYS PROGRAMINDA ANALİZ BAŞLANGIC ŞARTLARI ve MESH UYGULANMASI

Analizlerin tamamı ANSYS 17.0 sürümünde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ANSYS programında bulunan birçok analiz yönteminden kullanacağımız analizi Workbench'e aktararak işe başlamalıyız.

7.3. STATİK STRUCTURAL ANALİZİ



Şekil 7.7. Static Structural analiz yönteminin Workbenche atılması.

Şekil 7.7.'de görüldüğü gibi Workbench'in sol tarafında bulunan Analysis Systems panelinden kullanacağımız Static Structural Workbench'e atılmıştır. Bu aşama Engineering Data yani malzeme bilgilerini girerek ve bu malzemeleri adlandırarak tamamlanır. Aşağıdaki Çizelge'de kullanılan bu bilgiler verilecektir.

Çizelge 7.1. Raylı sistem ekipmanlarının malzeme özellikleri [22].

Parça Adı	Elastisite Modülü (GPa)	Plastisite Modülü (GPa)	Akma Gerilimi (MPa)	Poisson Oranı
Ray	206,9	22,7	483	0,295
Tekerlek	205	22,7	640	0,3
Ped	1			0,45
Beton Travers	37			0,2

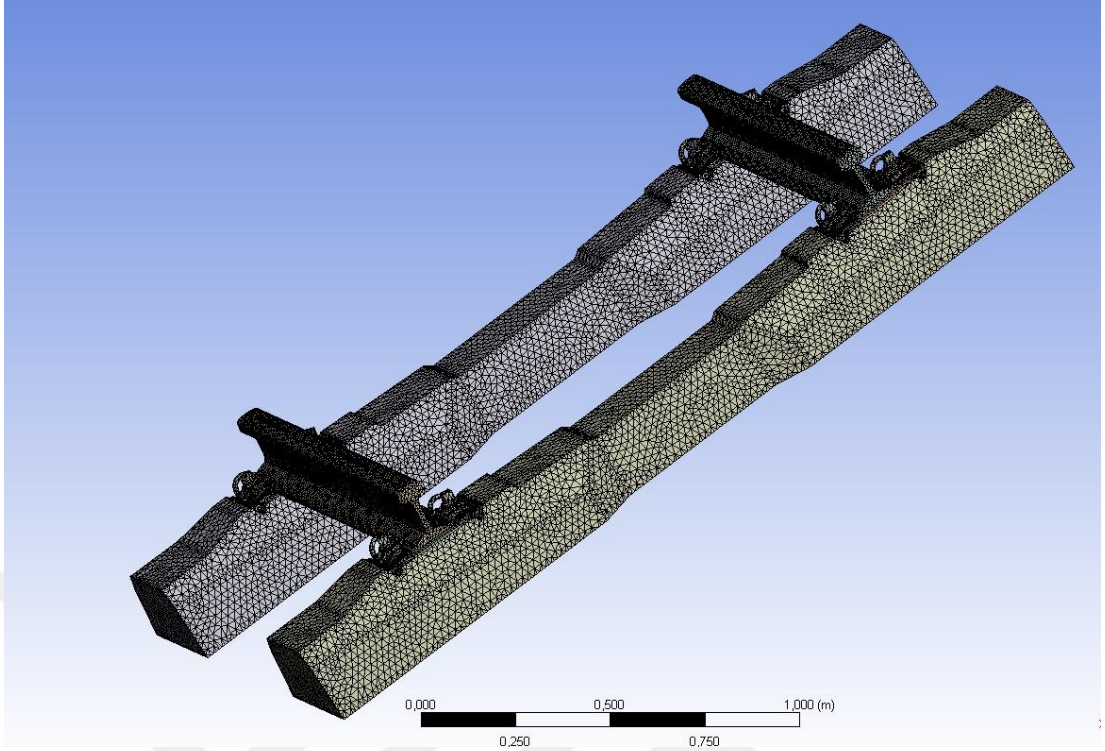
Malzeme özellikleri girildikten sonra Geometry bölümüne sağ tıklayarak Import Geometry seçeneğine tıklayıp daha önce .x_t uzantısıyla kaydettiğimiz montajlı çizimlerimizi Geometry bölümüne yükledi. Ve model kısmına girildi. Model kısmında hem analizi yapacağımız koşullar oluşturulacak hem de mesh ağı oluşturulacaktır. Mesh sayısı ne kadar fazla olursa bilgisayardaki kaynakları (RAM, Harddisk, CPU) o kadar fazla kullanacak ve analiz süreside bir o kadar uzayacaktır. Bu amaçla yapacağım analizde bizim için daha önemli olan kısımlara daha sık diğer yerlere daha az mesh atılmıştır. Ayrıca bu bölümde raylara 100000 N kuvvet koyulmuştur. Bunun nedeni vagon ağırlığı yaklaşık olarak 800000 N dur. Bir vagona 8 tekerlek bulunduğu için;

$800000/8=100000$ N kuvvet uygulanmıştır.

Mesh atarken raylara sizing methoduyla element boyutu 10 mm olacak şekilde mesh uygulanmıştır.

Çizelge 7.2. Ray ve traversin element ve node sayıları.

Parça	Element Sayısı	Node sayısı
Ray	37297	66354
Travers	47265	82295

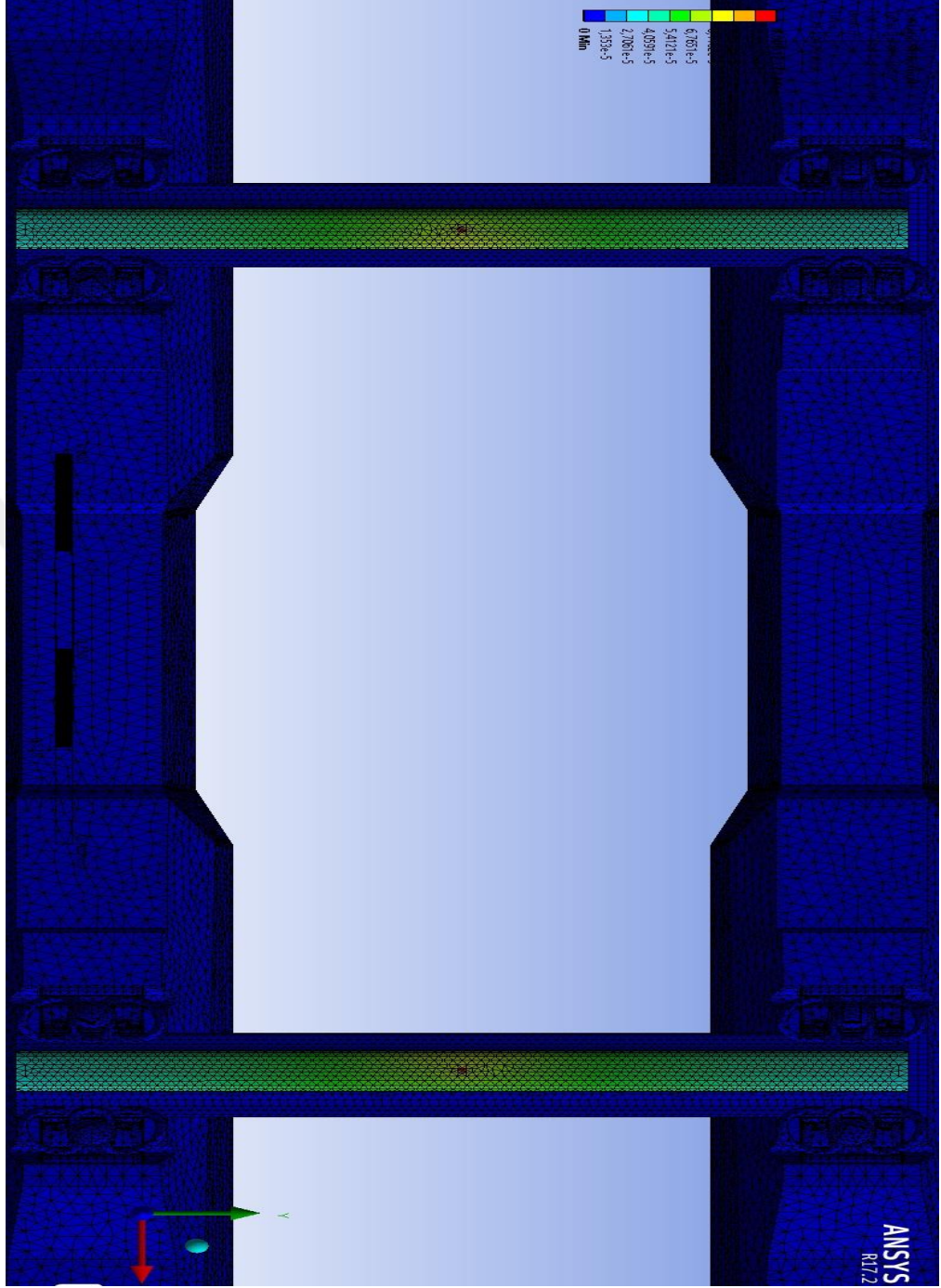


Şekil 7.8. Statik analizde yapılan mesh.

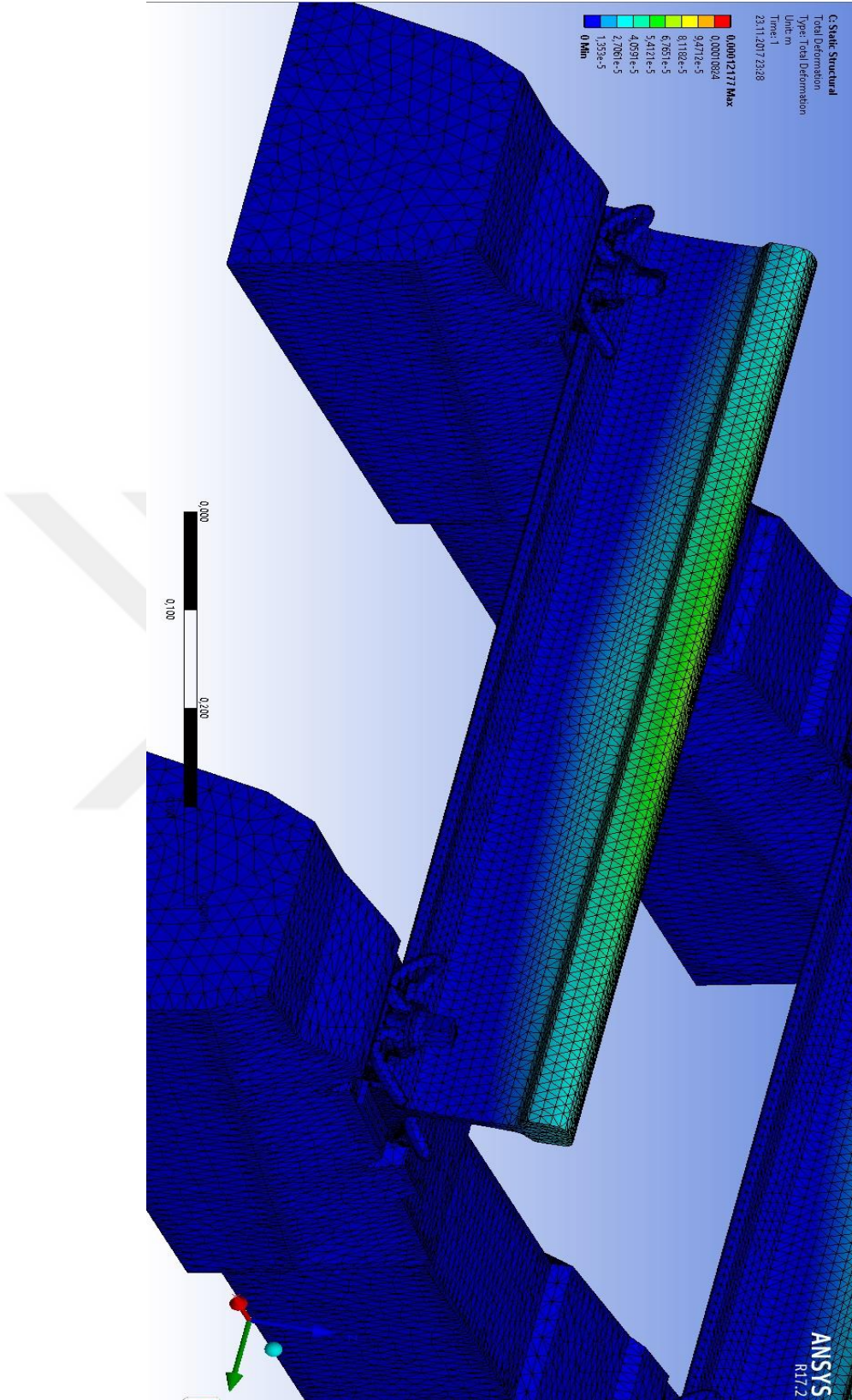
Model kısmında ayrıca contact kısmı mevcuttur. Geometri import edildiğinde program otomatik olarak kontak olduğunu düşündüğü yerleri belirler. Ama bunlar genelde doğru değildir. Bu yüzden bu bölümü silip tekrar kontak ve jointler verilmiştir. Jointler oluşturulurken parçaların hangi koordinat yönünde hareket edebileceğinin doğru bir şekilde anlaşılıp ANSYS’de de bu şekilde uygulanmalıdır. Bu işlemler tamamlandıktan ve kuvvetler rayın orta noktasına uygulandıktan sonra Solve sekmesine tıklayarak analiz başlatılmıştır.

7.3.1. Statik Structural Analizinin Sonuçları

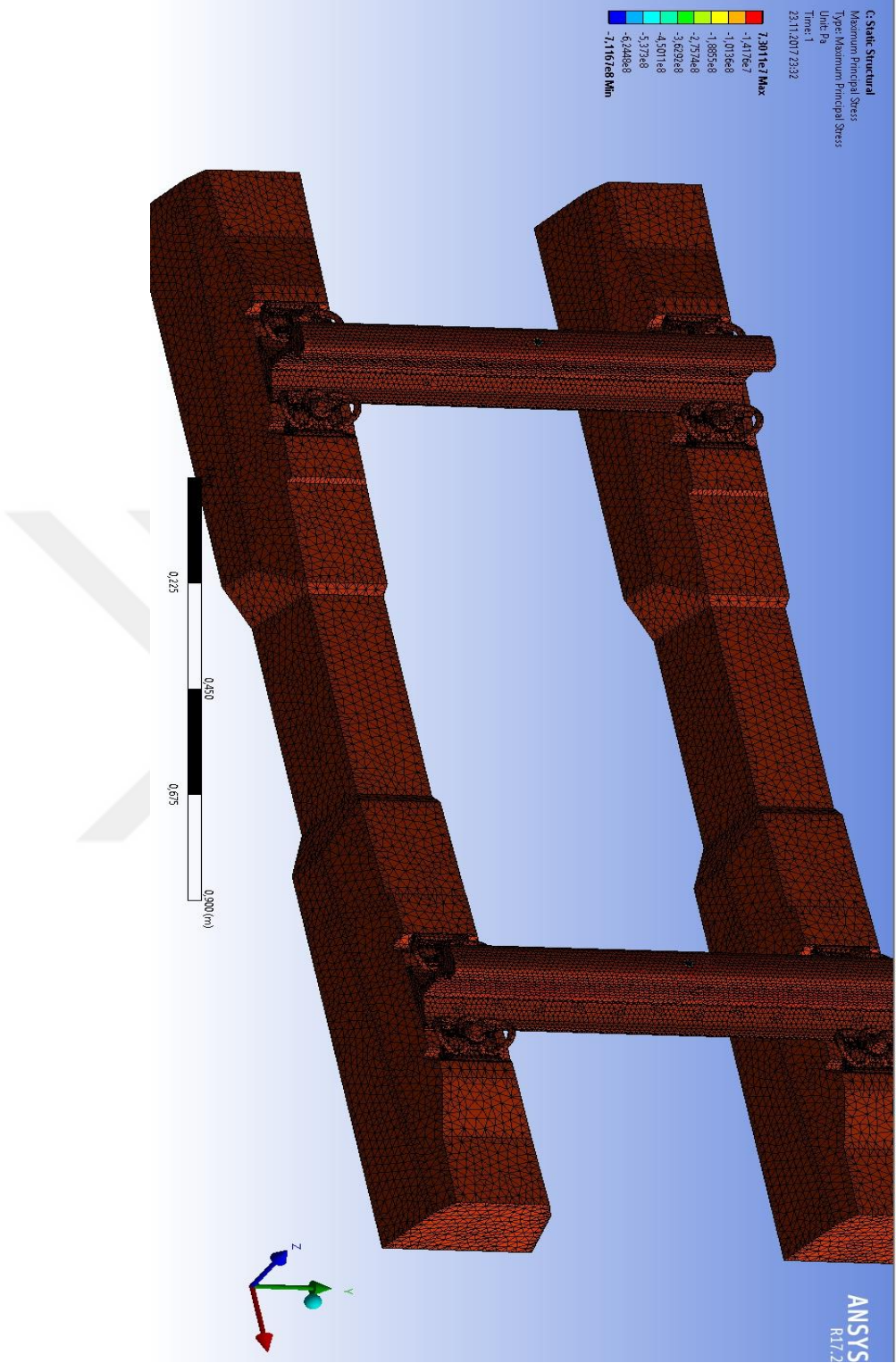
Bu bölümde Static Structural analizinden elde edilen sonuçların ekran görüntüleri paylaşılacaktır. Bu bölümde verilen sonuçların değerlendirilmesi 7. bölümde yapılacaktır. Ray başına uygulanan 100000 N’luk kuvvetin raylı sistem modelinde oluşturduğu değişim ve tahribatlar gösterilecektir.



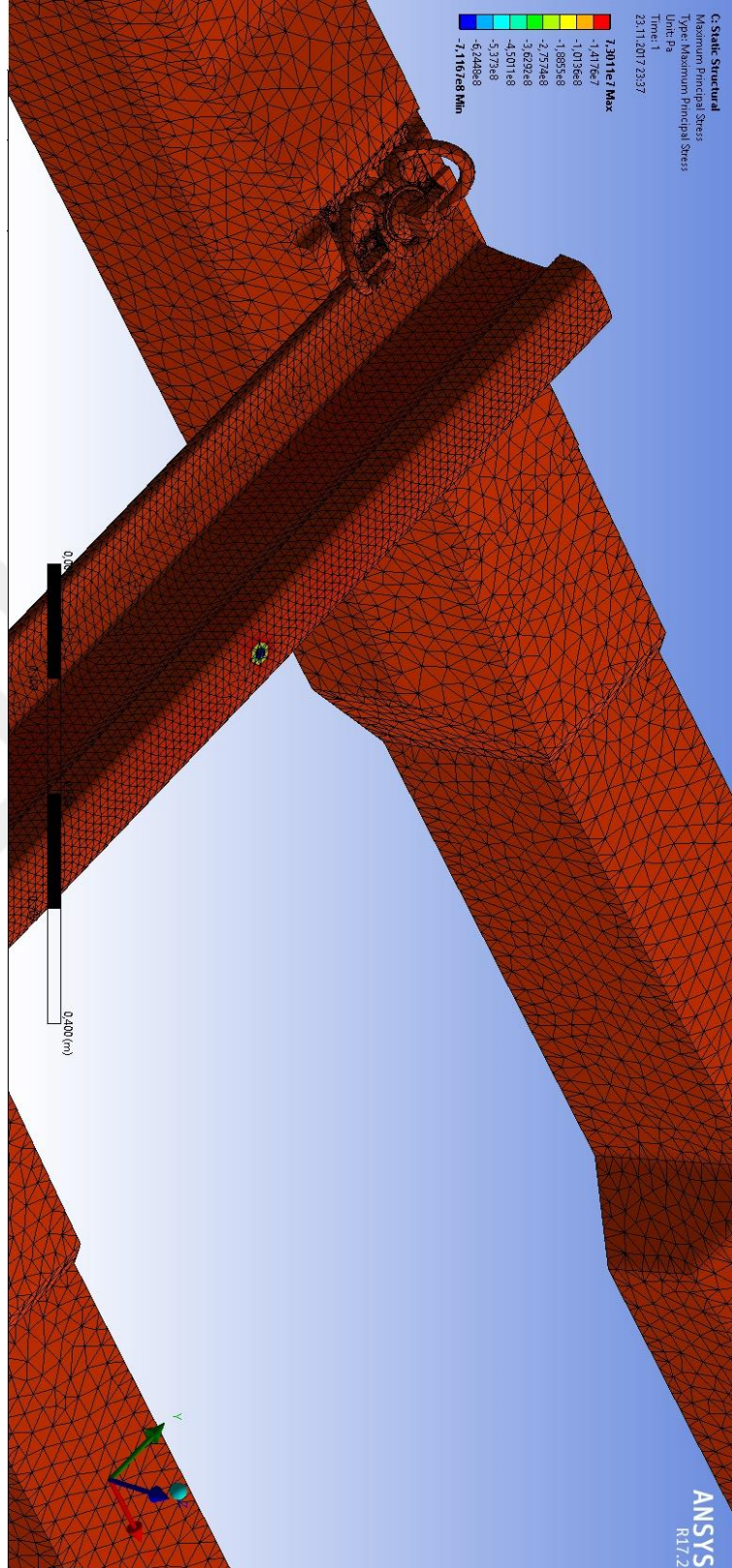
Şekil 7.9. Statik analizde toplam deformasyon.



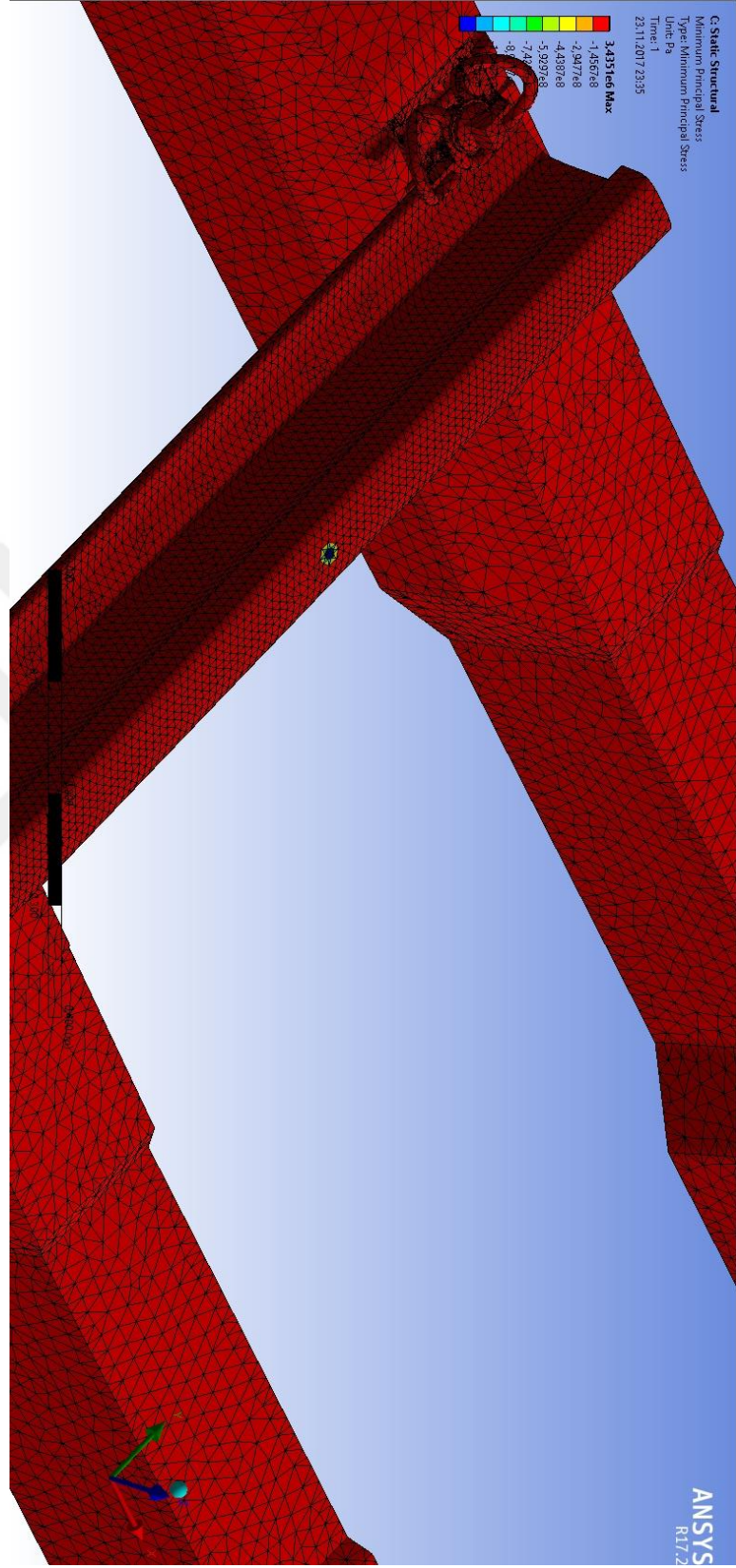
Şekil 7.10. Statik analizde toplam deformasyon (ray mantarının altı).



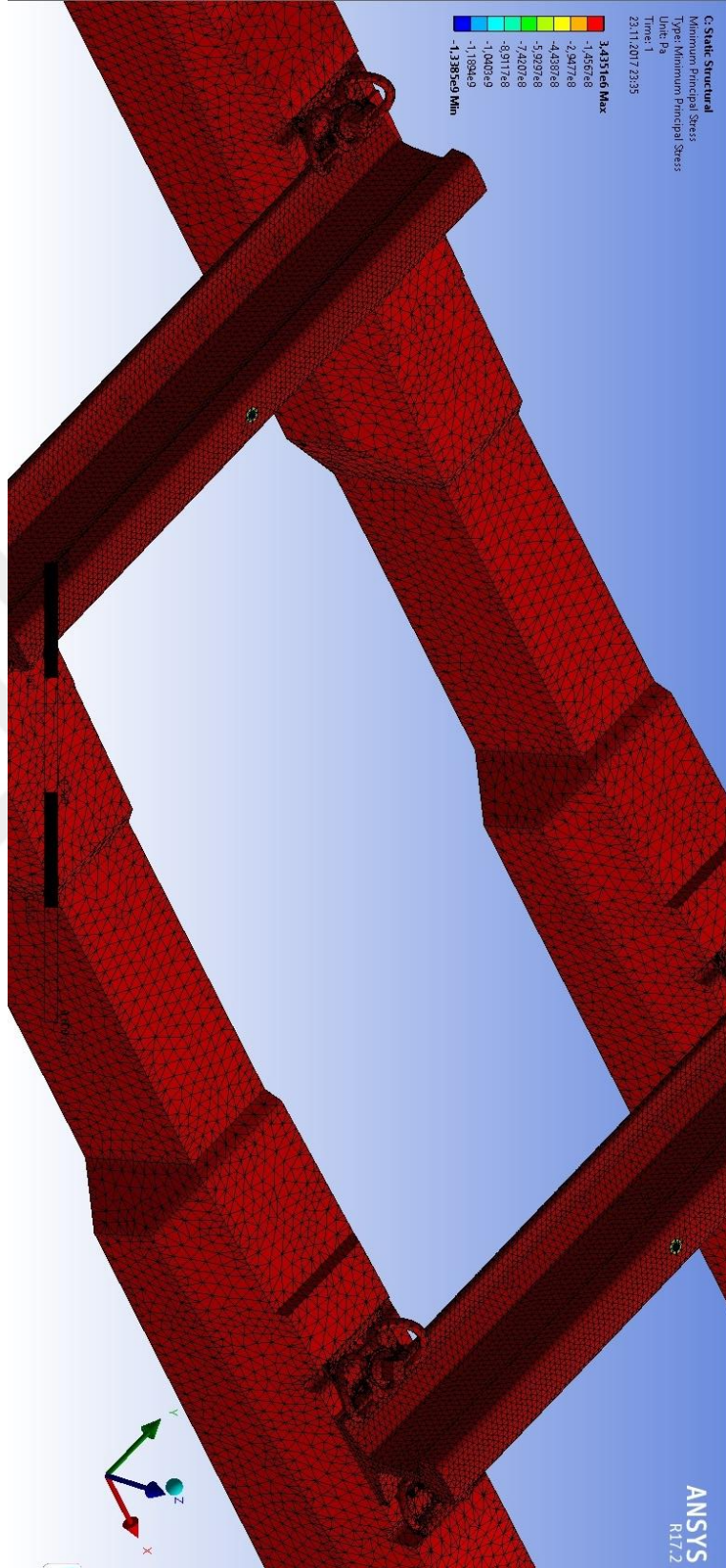
Şekil 7.11. Statik analizde maksimum asal gerilme.



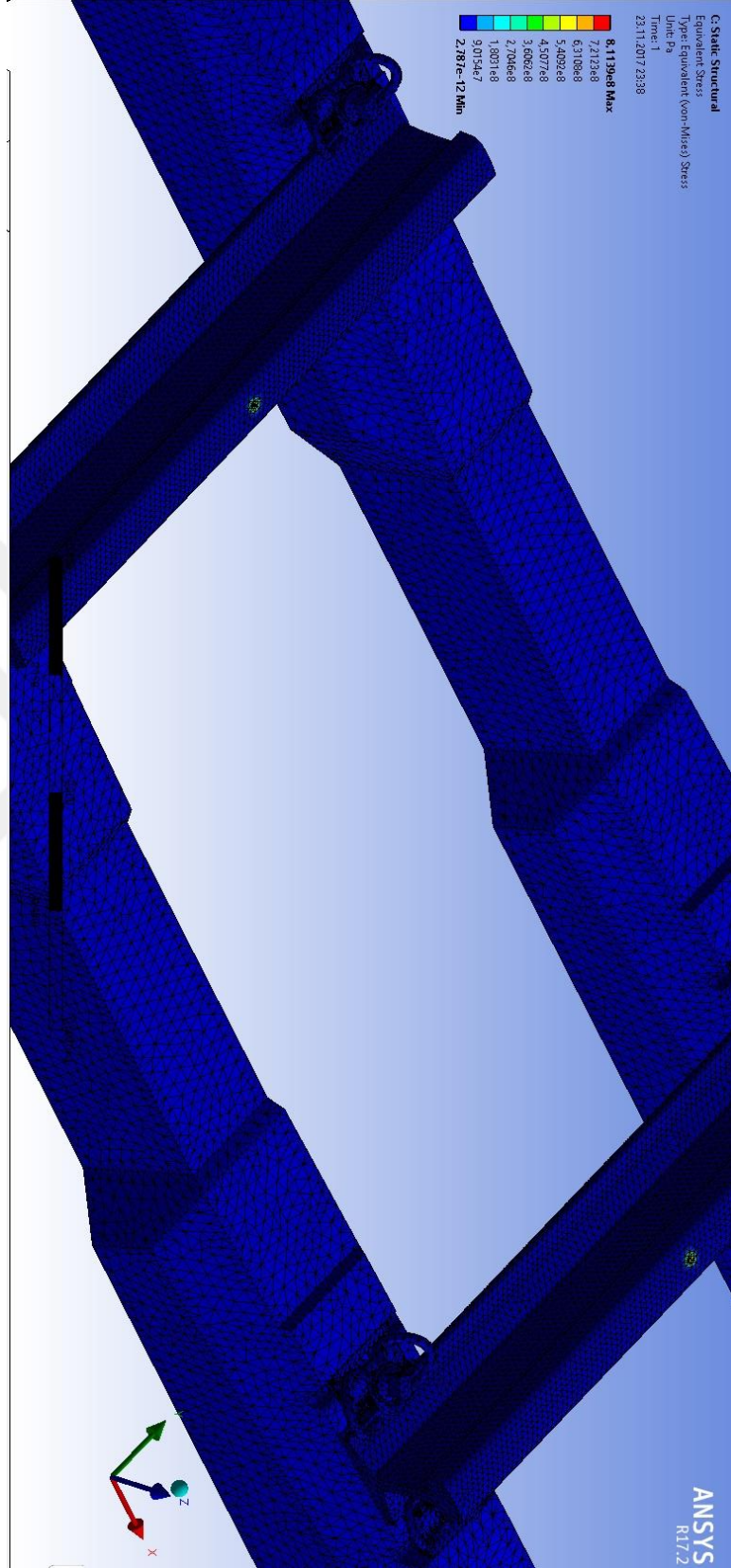
Şekil 7.12. Statik analizde maksimum asal gerilme.



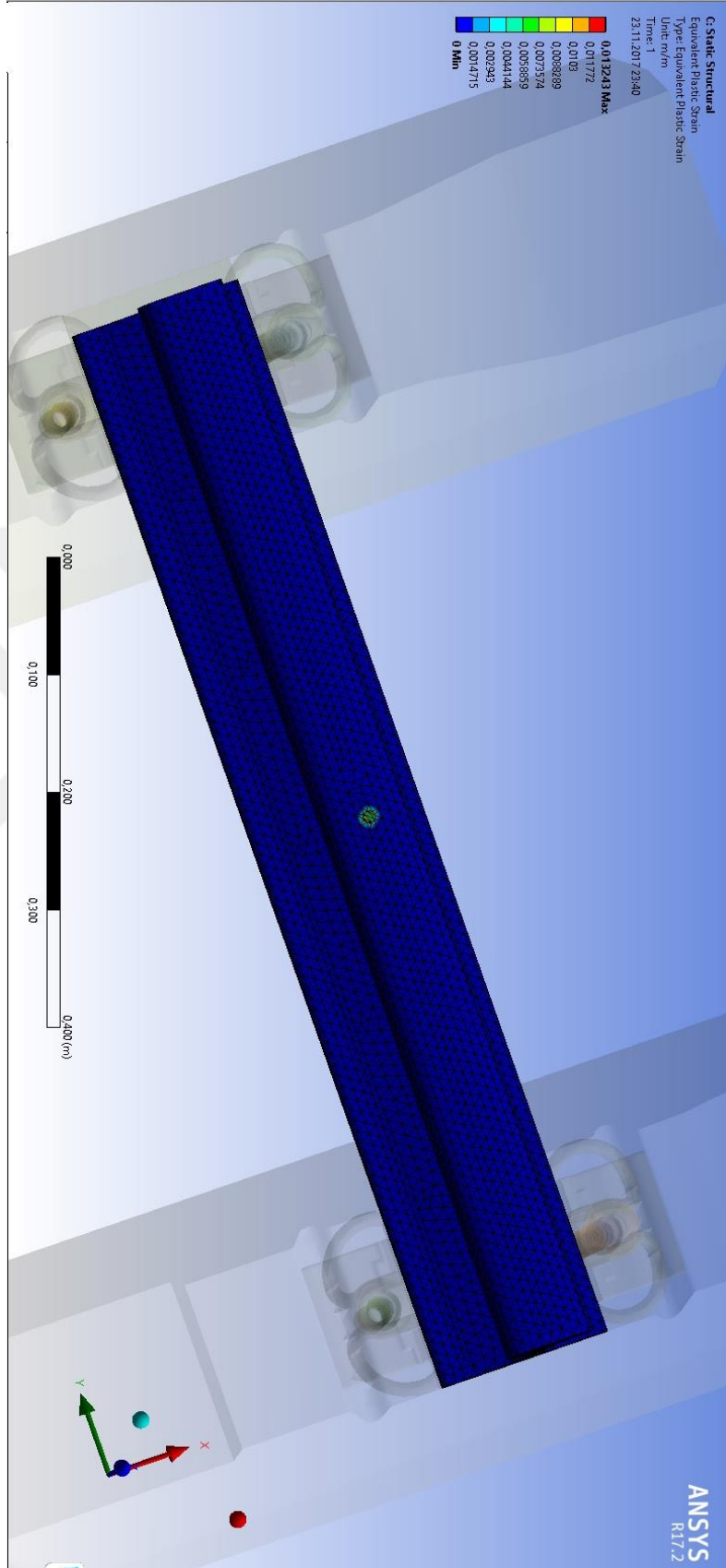
Şekil 7.13. Statik analizde minimum asal gerilme.



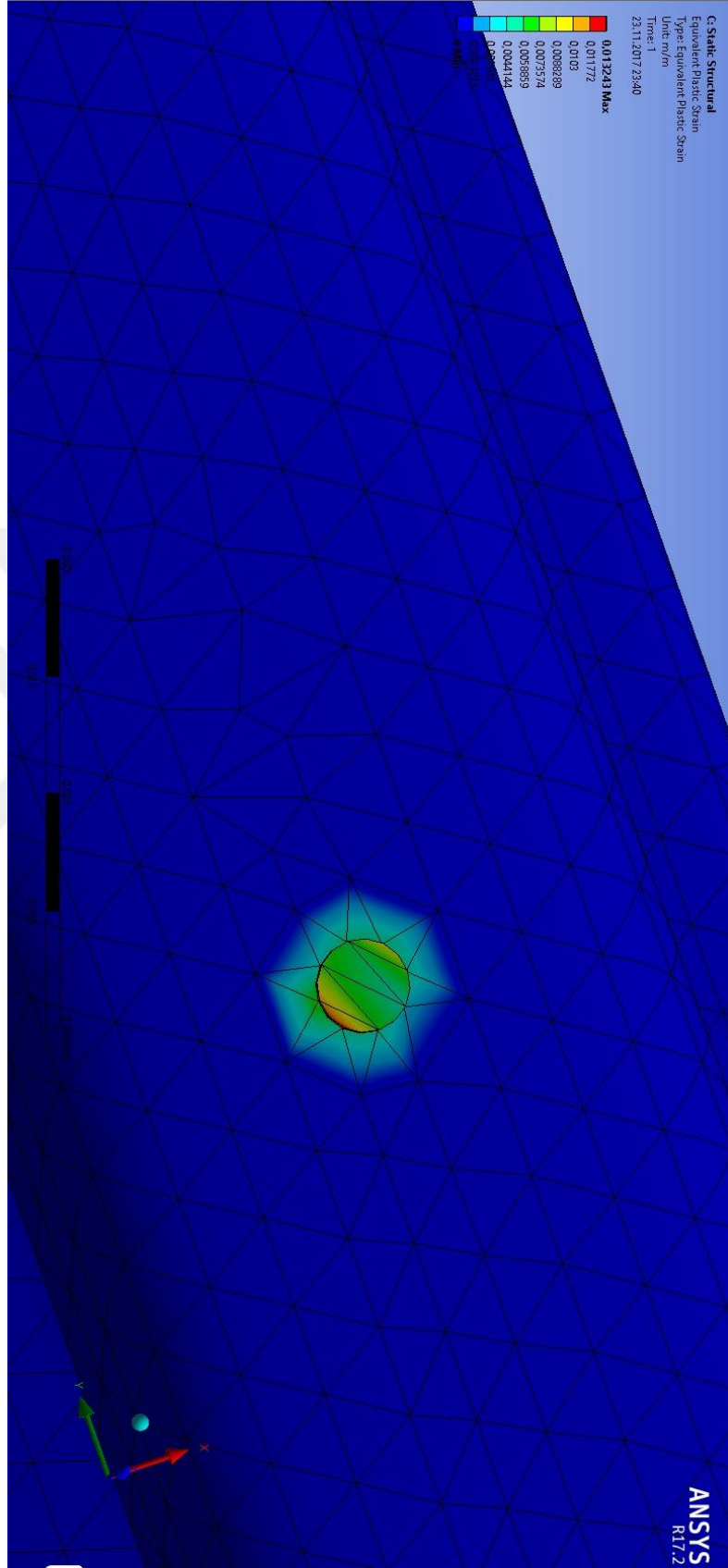
Şekil 7.14. Statik analizde minimum asal gerilme (2).



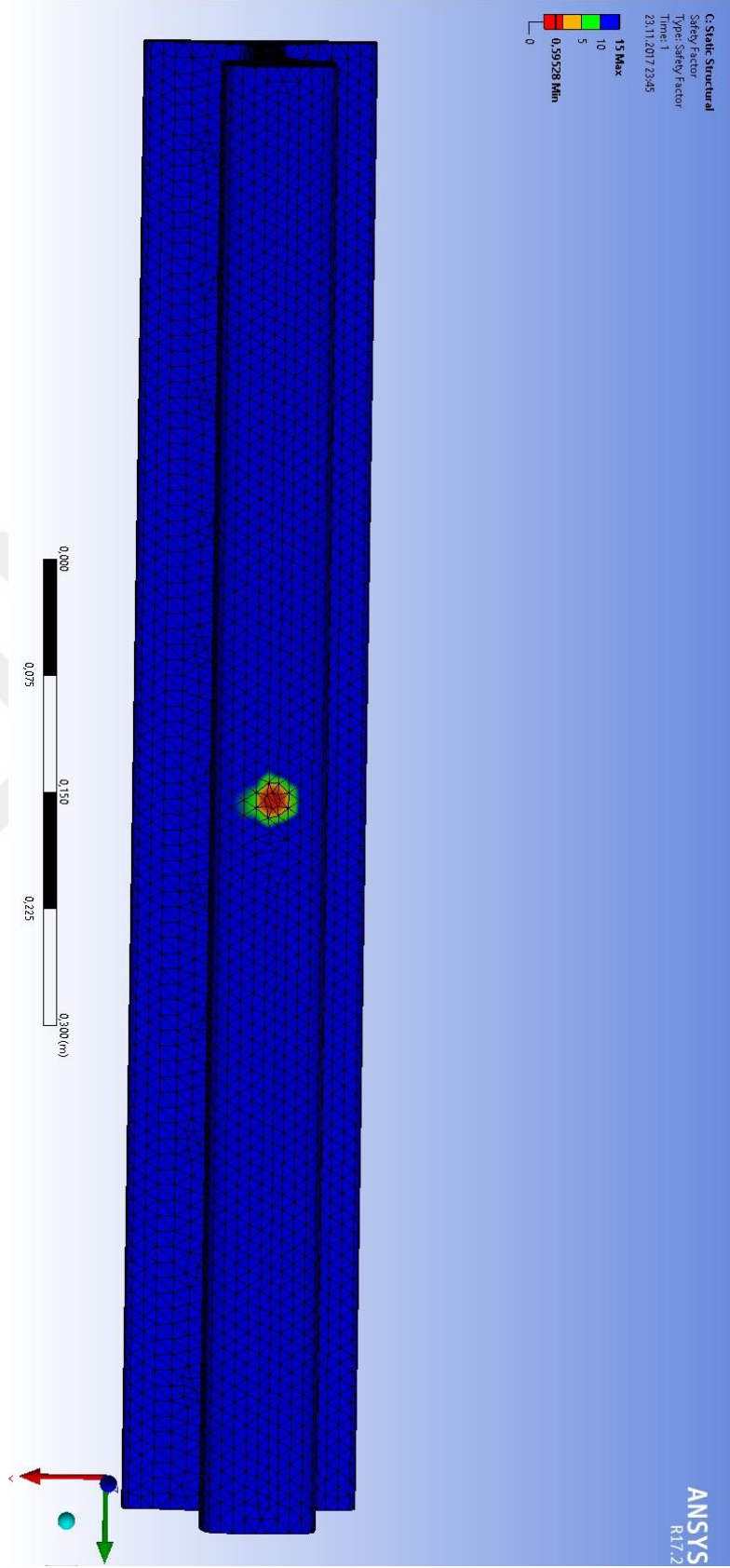
Şekil 7.15. Statik analizde eşdeğer gerilme.



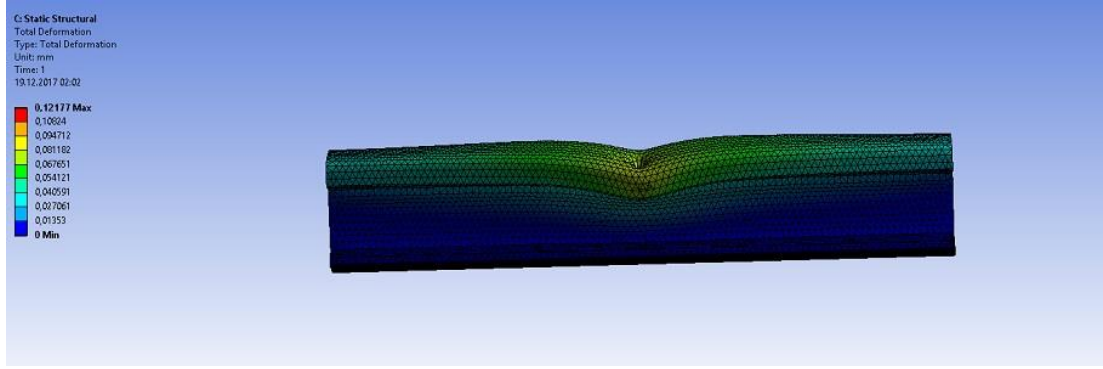
Şekil 7.16. Statik analizde eşdeğer plastik gerilme.



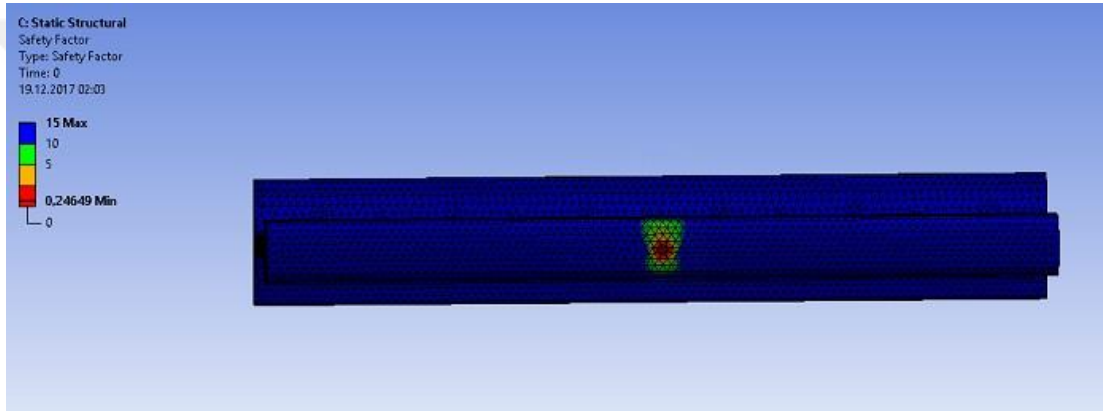
Şekil 7.17. Statik analizde eşdeğer plastik gerilme.



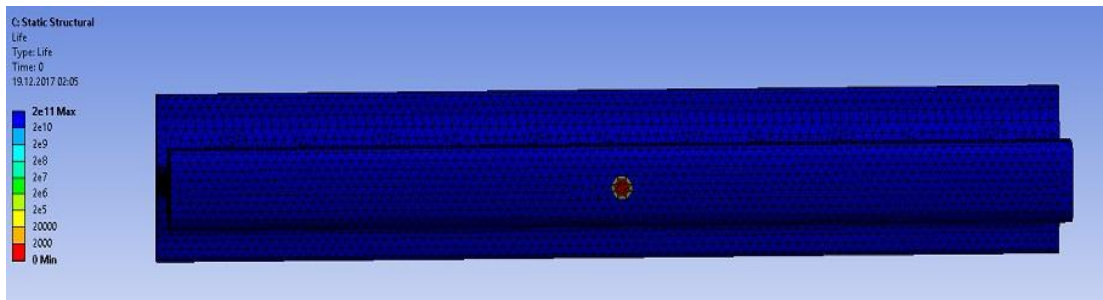
Şekil 7.18. Statik analizde emniyet katsayısı.



Şekil 7.19. Ray deformasyon gösterimi.



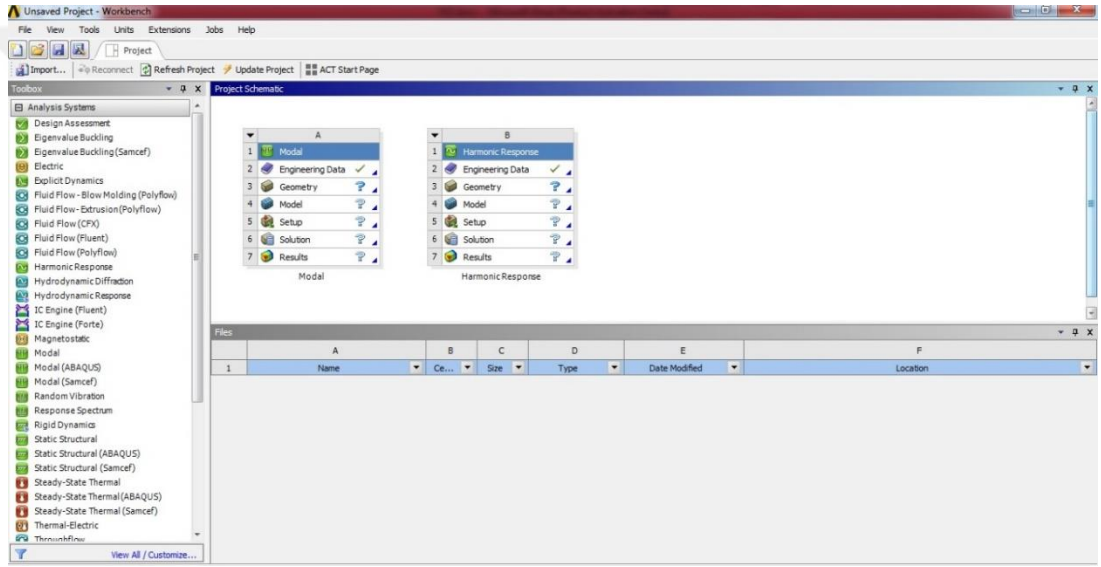
Şekil 7.20. Yorulma dayanımı emniyet katsayısı.



Şekil 7.21. Yorulma dayanımı rayın ömrü.

7.3.2. Harmonic Response Analizi

Bu bölümde Harmonic Response analizinden elde edilen sonuçların ekran görüntüleri paylaşılacaktır. Bu bölümde verilen sonuçların değerlendirilmesi 7. Bölümde yapılacaktır. Ray başına uygulanan 100000 N'luk kuvvetin raylı sistem modelinde oluşturduğu frekans tepkisi gösterilecektir. Bu analizin öncesinde Modal analiz yapılarak sonuçları Harmonic Response'a bağlanmıştır. Yine öncelikle Workbenche istediğimiz analiz yöntemi olan Modal analizi workbenche sürüklüyoruz. Ve yanına da Harmonic Response modülünü sürüklüyoruz.



Şekil 7.22. Modal ve Harmonic Response'un Workbench'e atılması.

Analiz sistemlerimizi Workbench'e attıktan sonra modal analizde Engineering Data bölümü Static Structural'da anlatıldığı gibi düzenlendi. Ve geometri import edildi. Geometriye ek olarak ray petinin ve balastın yay ve sönümleri de eklendi.

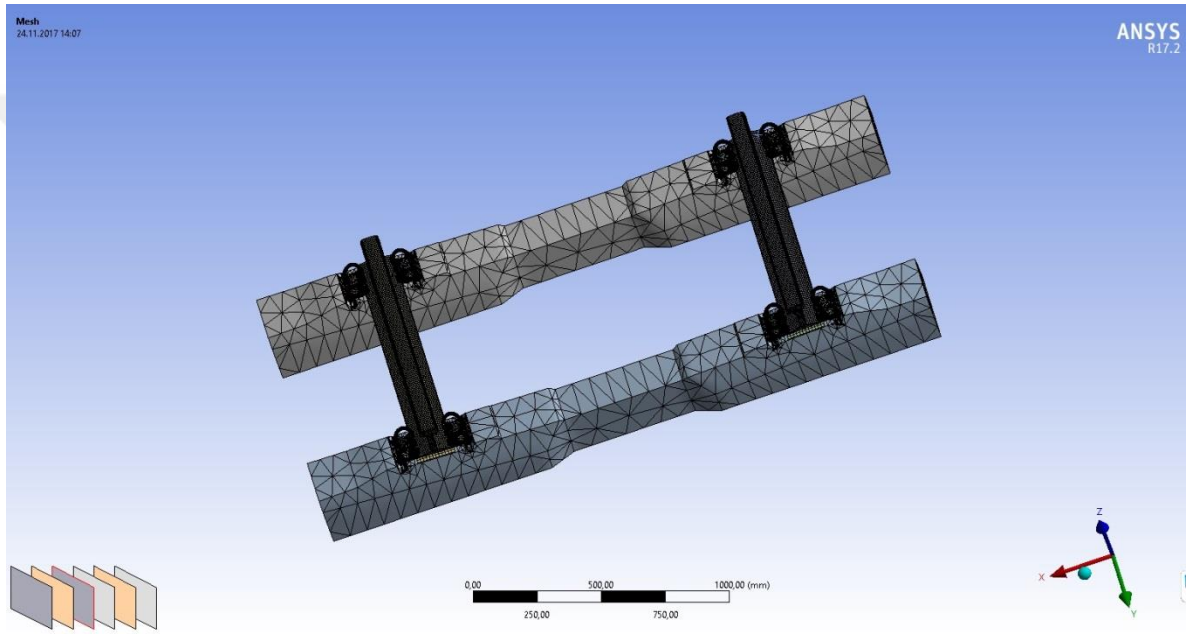
Çizelge 7.3..Raylı sistemin sertlik ve sönümleme değerleri.

Parametre	Değer
Ped Sertliği	120 MN/m
Ped Sönümleme	75 kNs/m
Balast Sertliği	182 MN/m
Balast Sönümleme	58,8 kNs/m

Daha sonra modele mesh atıldı. Tüm yüzeylere kaba bir mesh atılırken raya sizing mesh uygulanarak element boyutu 7 mm olan bir mesh ağı oluşturuldu.

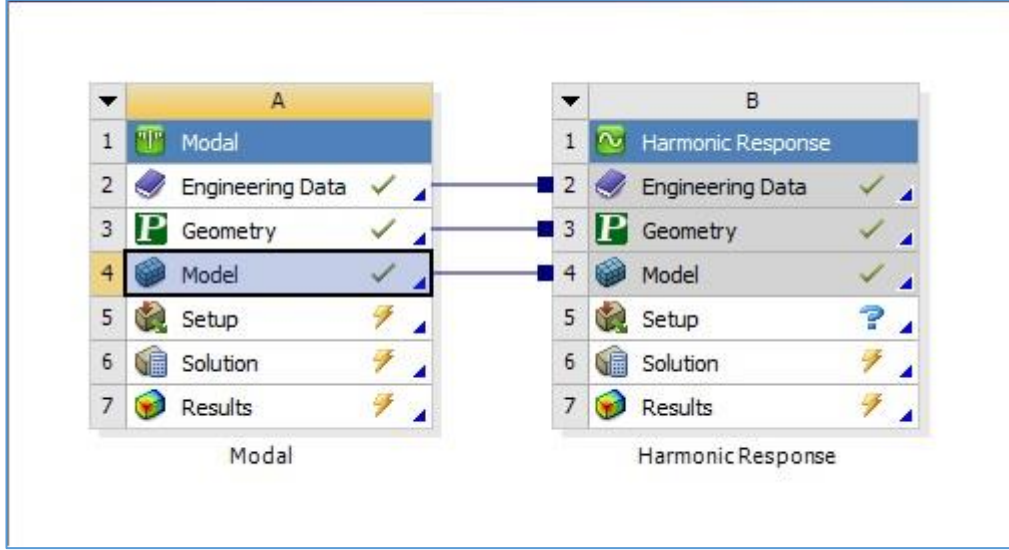
Çizelge 7.4. Her bir ray ve traversdeki element ve node sayısı [22].

Parça	Element	Node
Ray	28560	138534
Travers	11125	18373



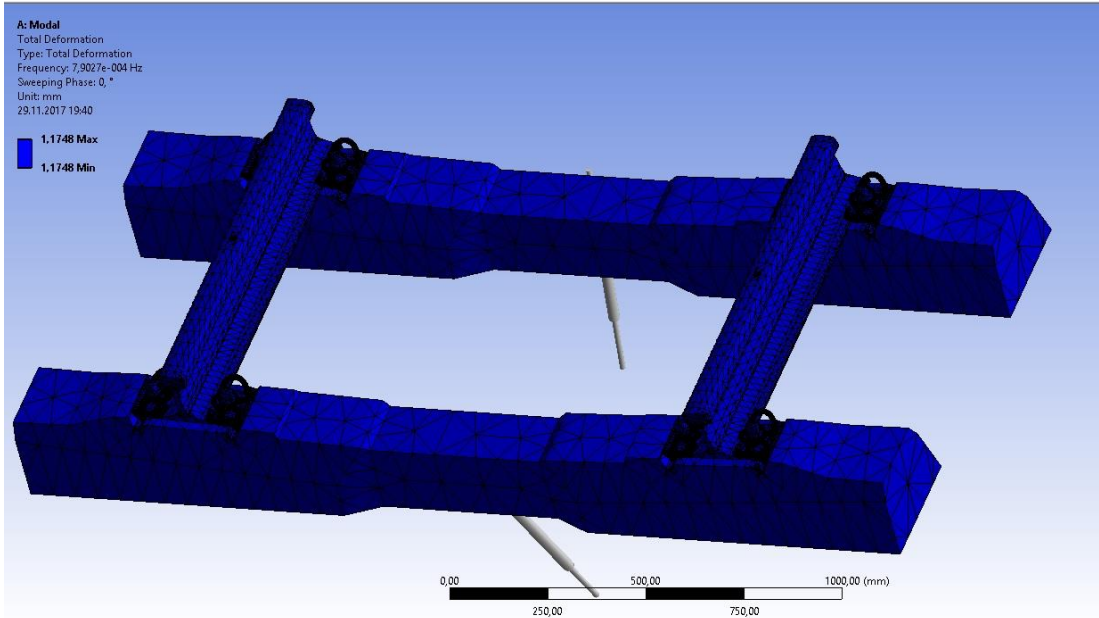
Şekil 7.23. Modal analizdeki mesh görünümü.

Modal analiz uygulandıktan sonra Harmonic Response analizine model kısımlarından bağlanmıştır. Bu sayede aynı mesh ve aynı bağlantılar kullanılabilmiştir.

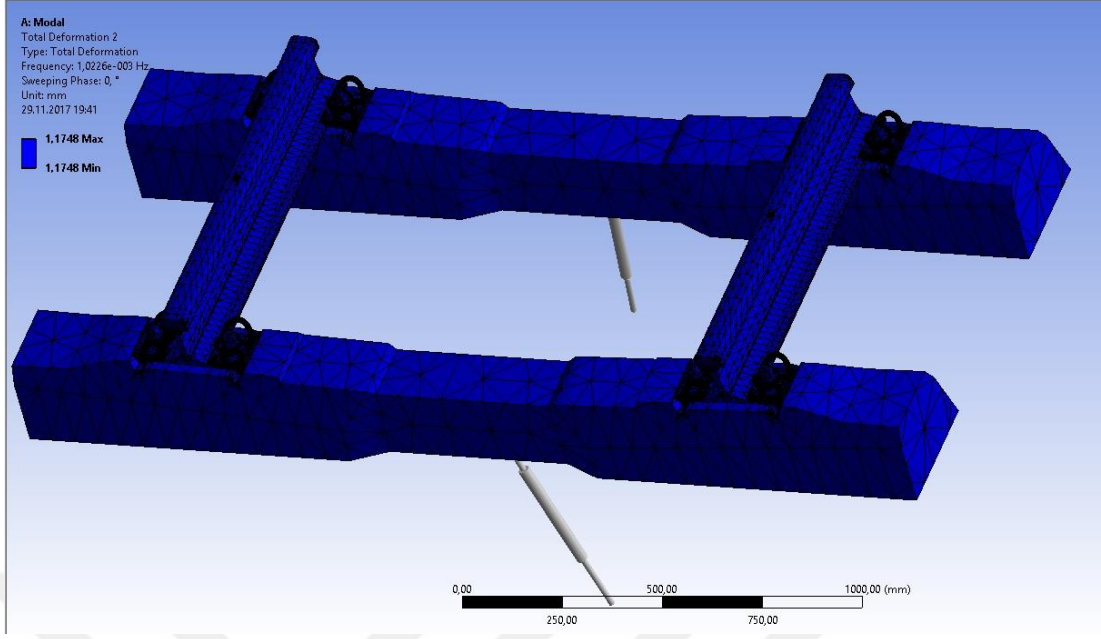


Şekil 7.24. Modal analiz için Harmonic Response'a bağlanması.

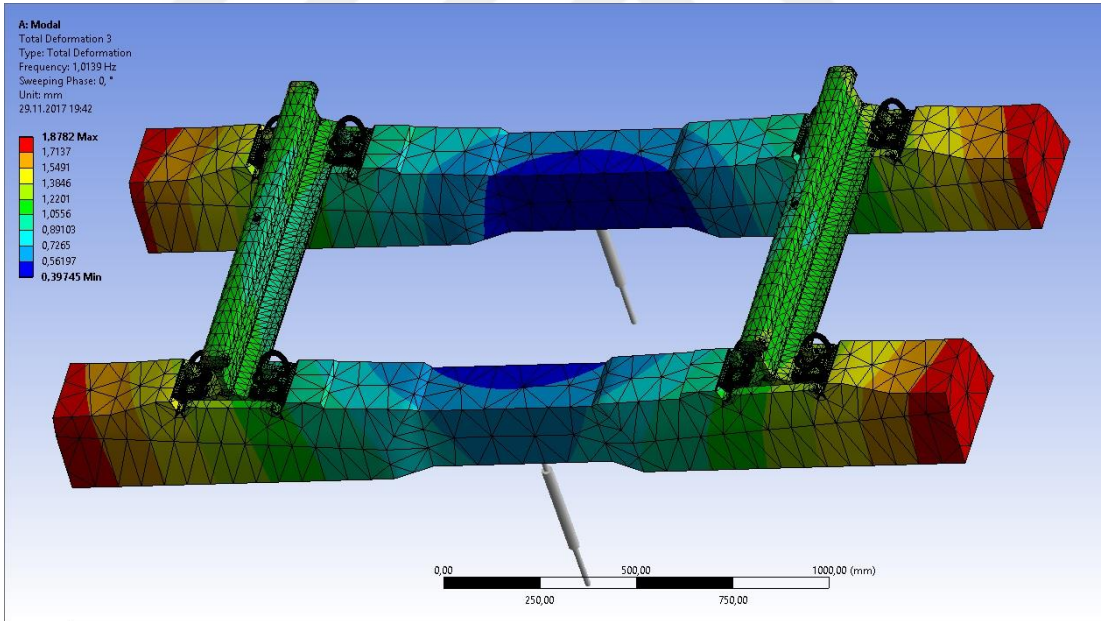
Modal analiz için 0-1500 Hz arası frekans belirlenerek analiz başlatılmıştır. Ray tekerlek kontak frekansı ve demiryolu elemanları için koyulan standart 0-1500 Hz olarak belirlenmiştir. Aşağıda Şekil 7.22.'den Şekil 7.27.'ye kadar modal analiz deformasyon sonuçları görsel olarak paylaşılacaktır.



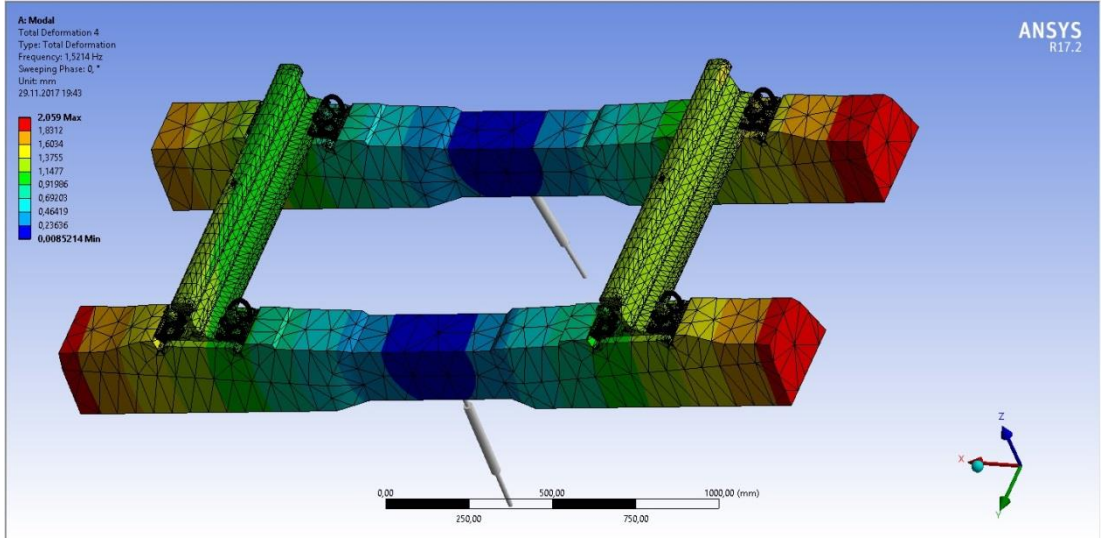
Şekil 7.25. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları.



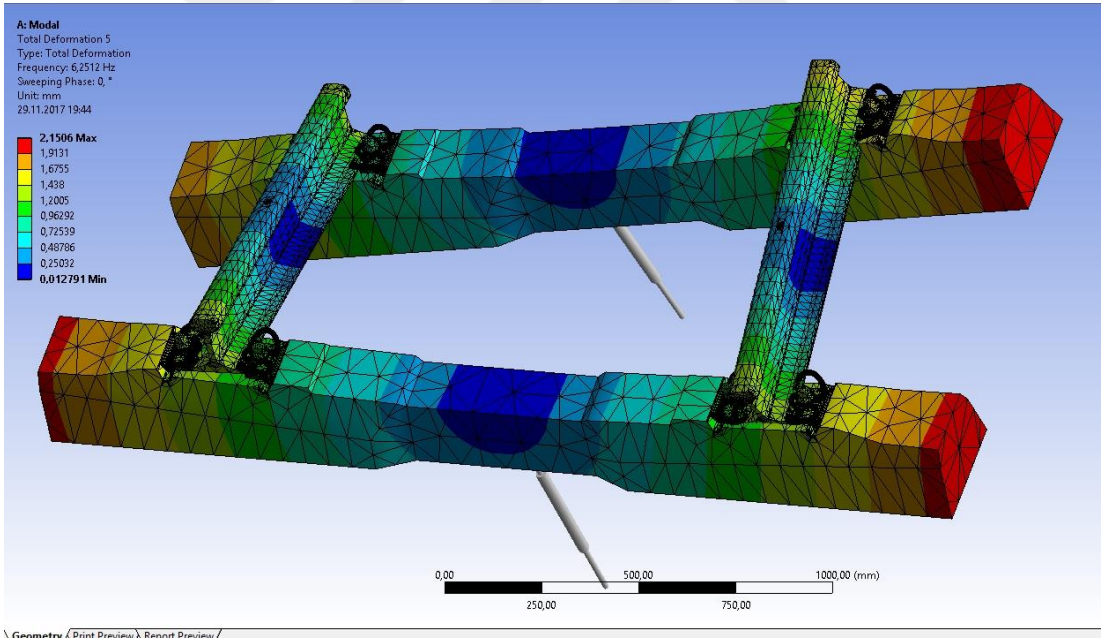
Şekil 7.26. Modal analizinde total deformasyon sonuçları (mode 2).



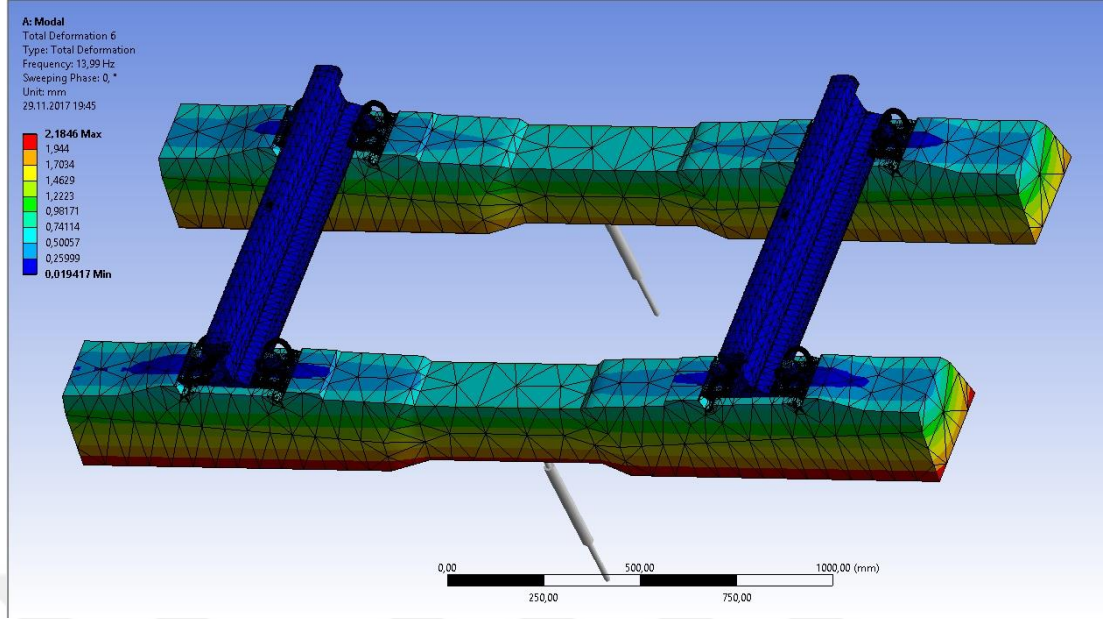
Şekil 7.27. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları (mode 3).



Şekil 7.28. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları (mode 4).

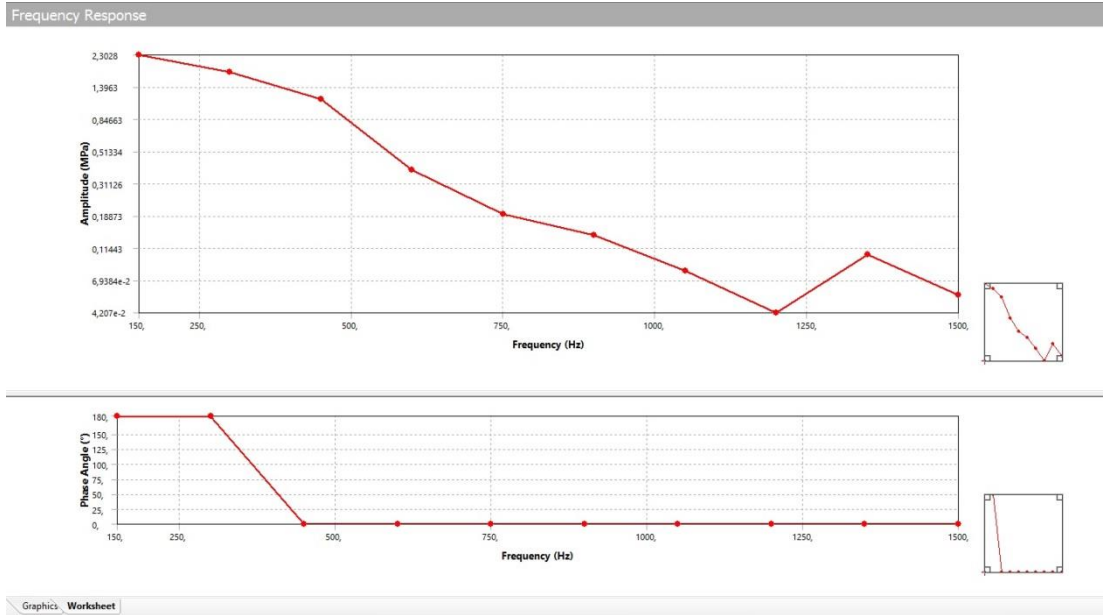


Şekil 7.29. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları (mode 5).

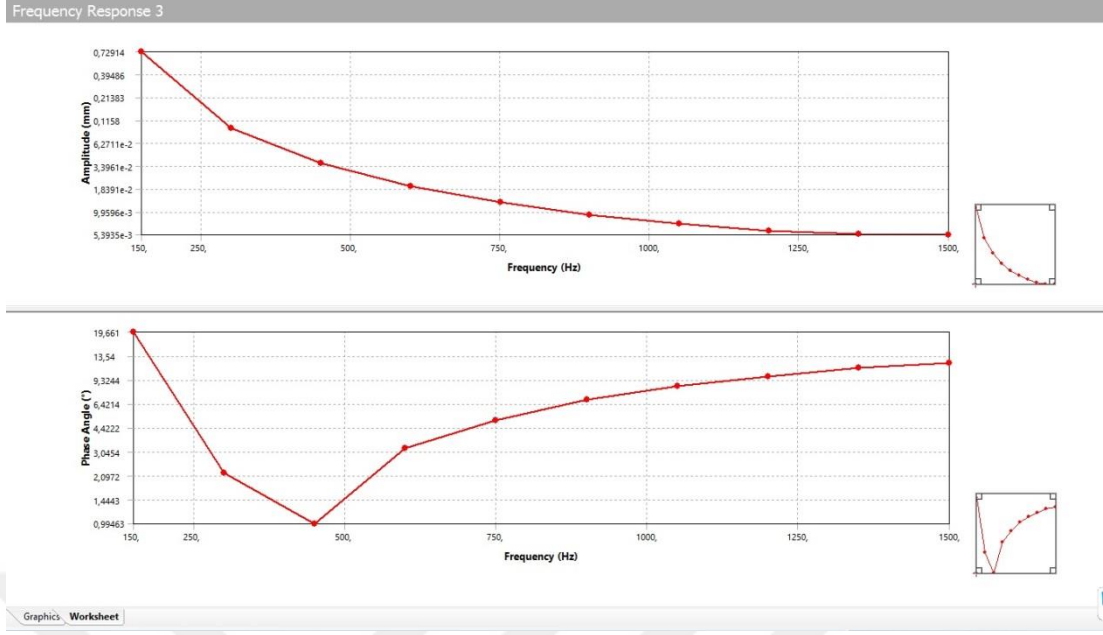


Şekil 7.30. Modal analizinde toplam deformasyon sonuçları.

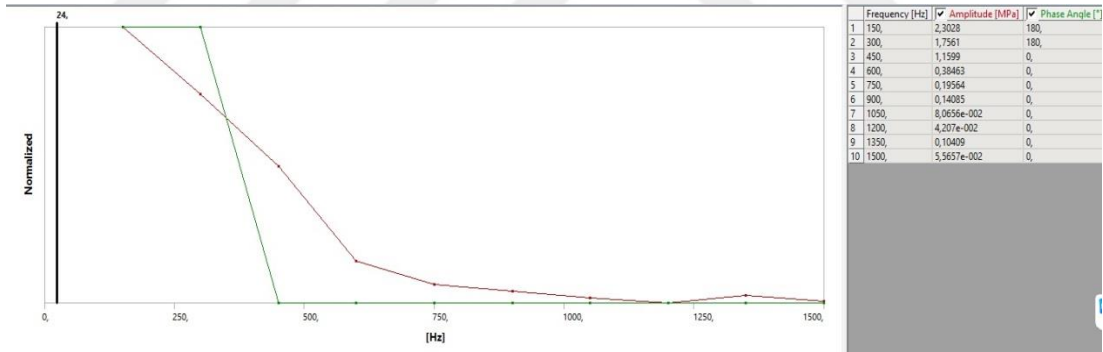
Modal analiz tamamlandıktan sonra rayların orta noktalarına ray başına 100 kN kuvvet uygulanarak Harmonic analiz yapılmıştır. Frequency Response analiz sonucu aşağıdaki Şekil 7 31 ve 7 32’da görüldüğü gibidir.



Şekil 7.31. Frequency Response analizinin genlik ve faz açısı diagramları.



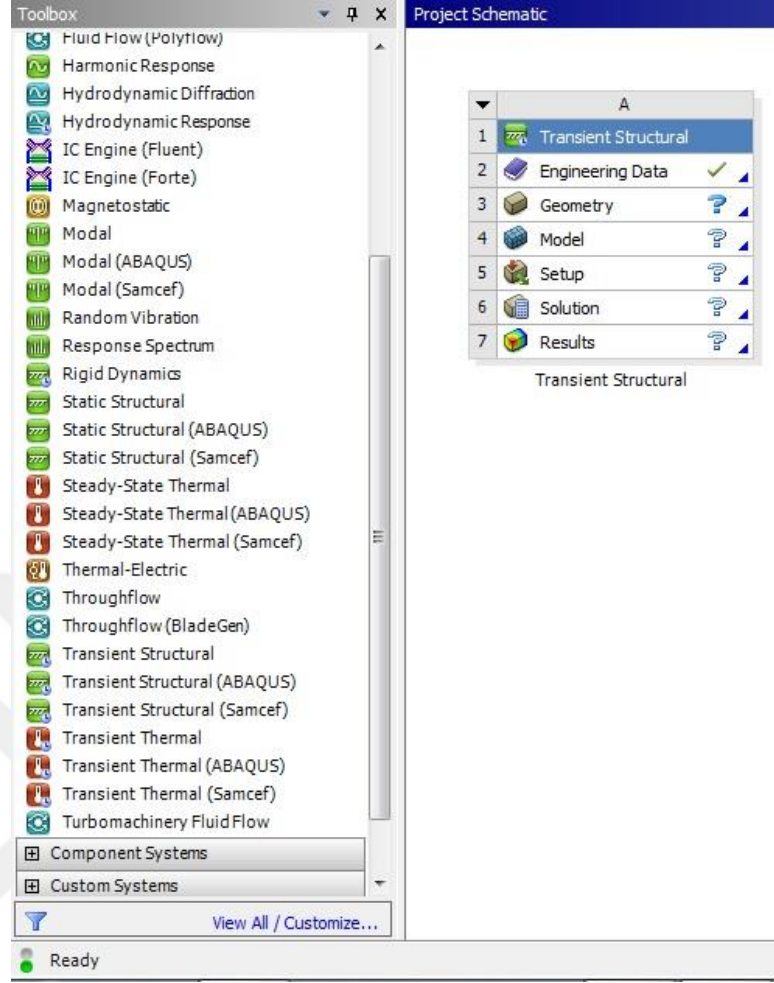
Şekil 7.32. Frekansa bağlı olarak deformasyon miktarları ve faz açısı.



Şekil 7.33. Normalize edilmiş frekans.

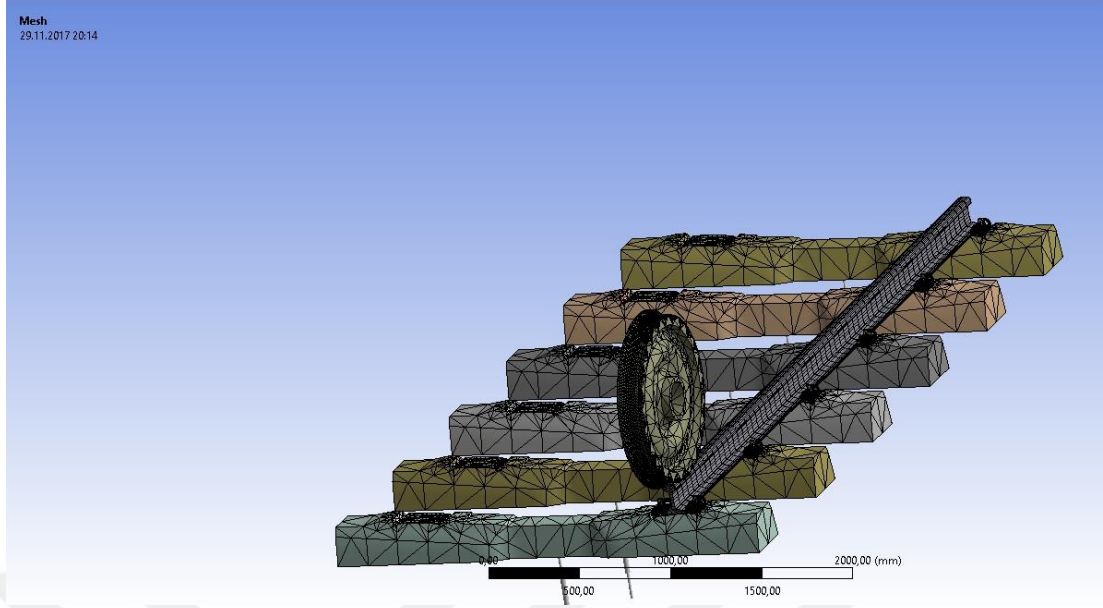
7.3.3. Hızlı Tren Raylarında Transient (Kontak) Analizi

Öncelikle Workbench'e girip sol taraftaki toolboxtan analiz yöntemi Workbench'e aktararak işleme başlandı.



Şekil 7.34. Transient analizinin Workbench'e aktarımı.

Bu işlemden sonra Engineering Data modülü açılıp burada raylı sistemlerin elemanları için malzeme bilgileri girildi. Hemen arkasından daha önce Solidworks'te çizimi yapılan ve montaj dosyası oluşturulan 6 beton travers, ray ve bağlantı elemanlarından oluşan geometri Ansys'e import edildi. Model modülüne girildi ve raylı sistem elemanlarının kontak noktaları belirlendi. Burda ray ve teker arasında Frictional Contact kullanıldı. Ve sürtünme katsayısı 0,3 olarak girildi [22]. Daha sonra modele mesh atıldı. Teker ve ray arasında face sizing kullanılarak çalışan yüzeylerde daha hassas mesh elde edildi. Bunun nedeni mesh sayısı arttıkça hem vakit hem de bilgisayar kaynaklarının fazlaca harcanmasıdır. Mesh sayısı ne kadar fazla olursa analiz süreleri o kadar uzamaktadır. Aşağıda Şekil 7.35.'de meshlenmiş modelin görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 7.35. Modelin mesh ağının oluşturulması.

Aşağıdaki çizelgede ise her bir parça için mesh sayıları verilecektir.

Çizelge 7.5. Her bir parça için mesh sayısı.

Parça	Node	Element
Ray	27640	5302
Teker	29054	16396
Travers	6037	3578
Shoulder	5259	2890
Klips	2886	1361
Vida	4961	2800
Dübel	28157	16419
Ped	268	30

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra modele yerçekimi kuvveti ve raya 100000 N'luk kuvvet eklendi. Daha sonra tekere ray üzerinde 90° dönüş eklendi. Bu analiz sırasında trenin hızı 250 km/sa olarak kabul edildi. Ve analize tekerin hareket hızı 69.4 m/sn olarak yazıldı. Sistemin hareket süresini hesaplamak içinse tekerin çevresi;

$$\Ç = \pi D = 3,14 \times 1000$$

$\Ç = 3140$ mm olarak bulundu.

Lakin tekerimiz 360° değil 90° döneceğinden;

3140 360°

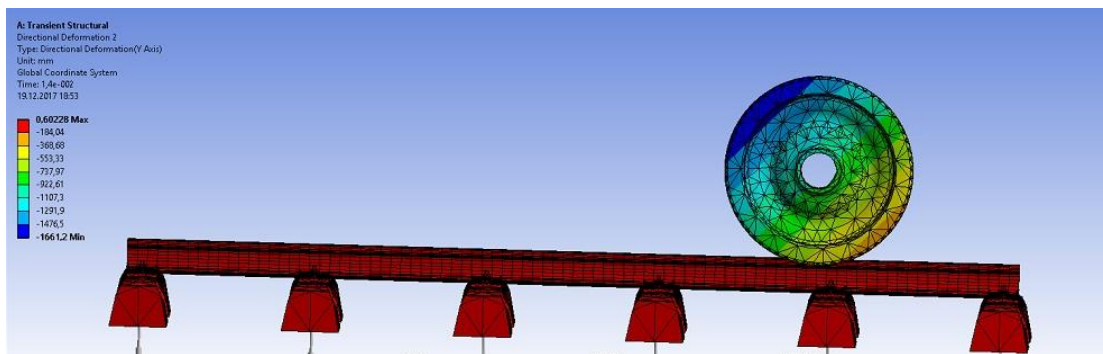
X 90°

X=785 mm'dir. Yani 0,785 m mesafede hareket edecek sistem saniyede 20 m hızla hareket edeceğinden;

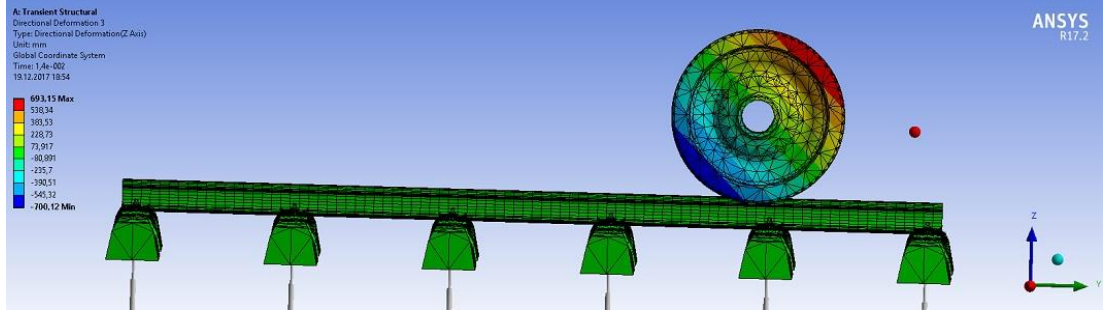
0,785=69.4.t

T= 0,014 sn bulunmuştur. Sistem on adıma bölündüğü için 0'dan başlamak üzere her adımda bir önceki adımın üstüne 0,0014 sn eklenmiştir. Bu sebeple dönüş açısı da adımlara bölünmek zorunda olduğundan 0. Saniyede 0 olmak üzere her adımda 9° artmak şartıyla sistem hareketi bitirdiğinde 90° dönmesi sağlanmıştır. Eğer rotate kısmında bu işlem unutulursa teker çok küçük bir sürede 90° dönmeye çalışacağından “unconverged system” hatası alınacaktır. Sistemdeki parçalar çok fazla şekil değişimine uğrayacağından analiz sonuca ulaşmadan hata verecektir.

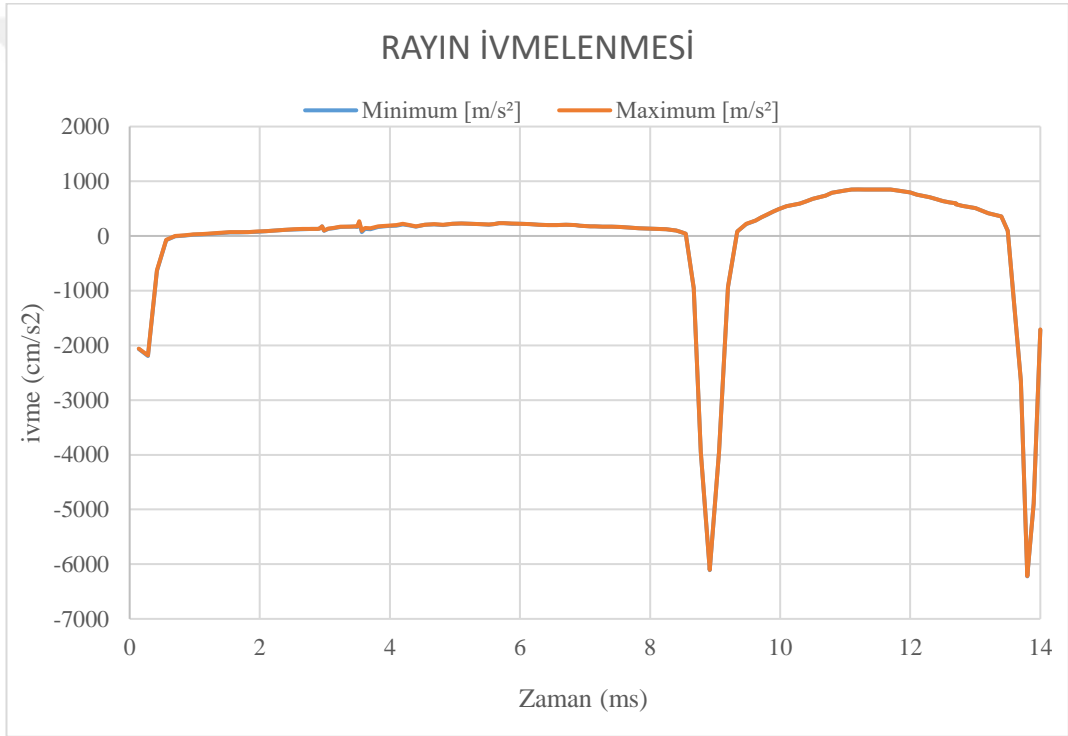
Bu bölümden itibaren Transient (kontak) analizinin sonuçlarının ekran görüntüsü verilecektir. 3 boyutlu sistemde x, y ve z koordinatlarındaki deformasyona, teker ile rayın emniyet katsayılarına bakılacaktır.



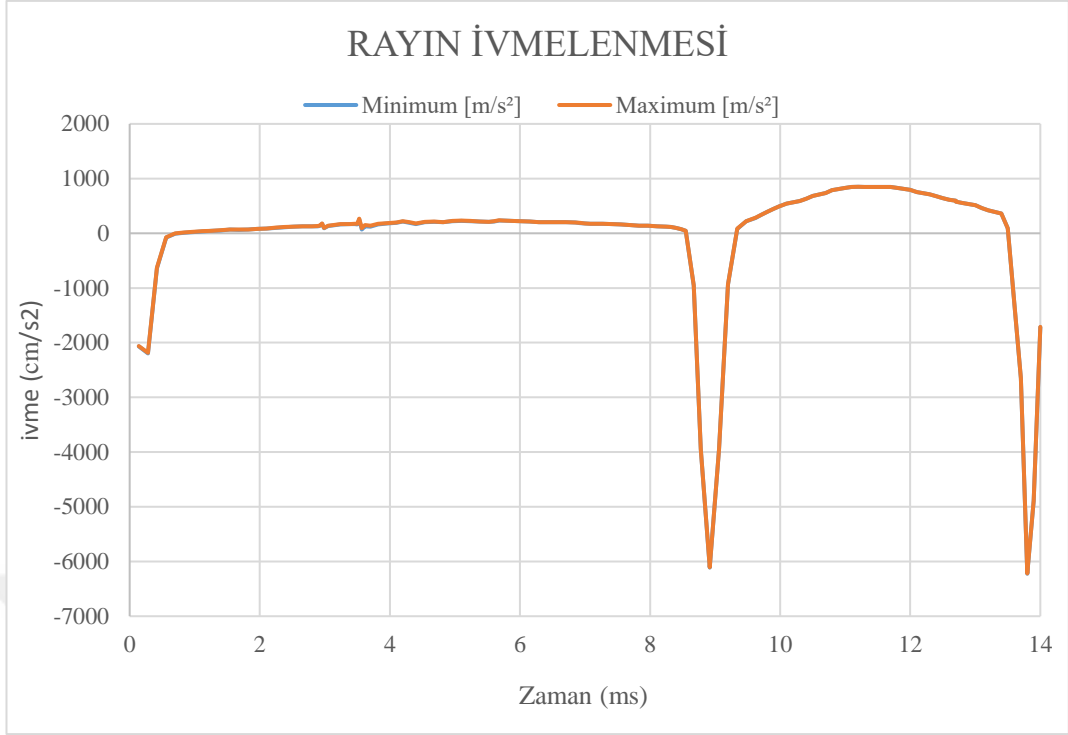
Şekil 7.36. Transient analizde Y eksenindeki deformasyon.



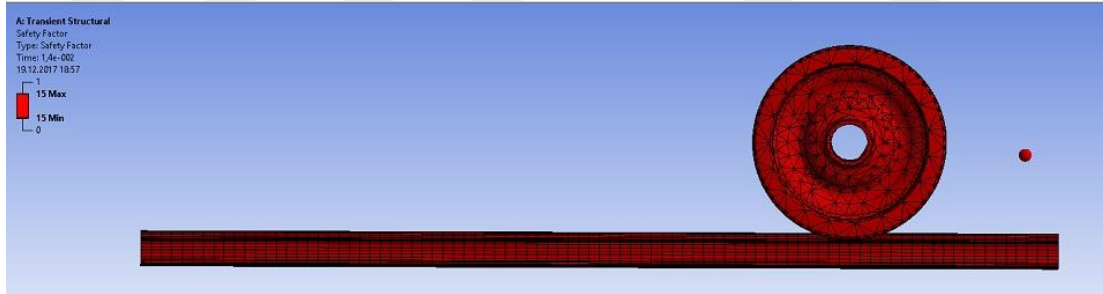
Şekil 7.37. Transient analizde Z eksenindeki deformasyon.



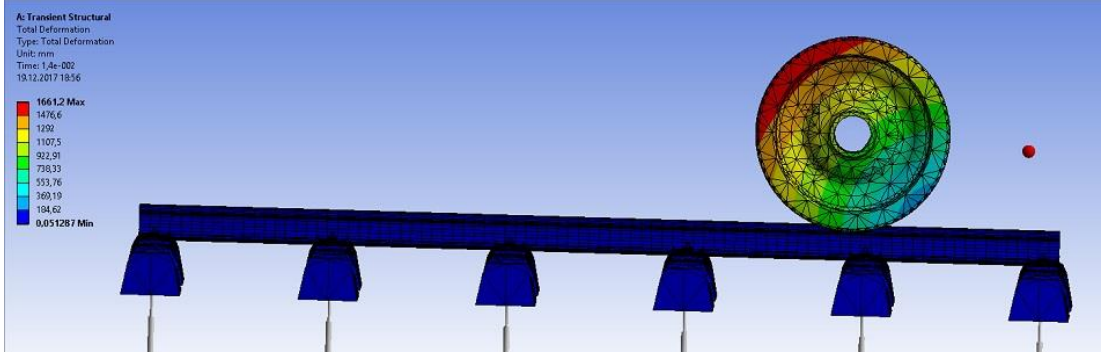
Şekil 7.38. Transient analizde rayın Y eksenindeki ivmelenme.



Şekil 7.39. Transient analizde rayın Z eksenindeki ivmelenmesi.



Şekil 7.40. Transient analizde ray ve tekerin emniyet katsayısı.



Şekil 7.41. Transient analizde toplam deformasyon.

BÖLÜM 8

ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1. STATİK ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

2 traverten oluşan 950 mm'lik ray uzunluklu sistemde yapılan analizler sonucunda toplam deformasyonun en fazla yükün uygulandığı kısımda görülmesi beklenen bir sonuç olmakla beraber, kuvvetin uygulandığı alandan uzaklaştıkça deformasyon miktarı sifira yaklaşmaktadır. Kuvvetin uygulandığı bölümde deformasyon 0,12 mm'ye ulaşırken kuvvetten uzaklaştıkça rayın yüzeyinde en düşük 0,04 mm'ye kadar bir yelpaze oluşmaktadır. Ayrıca ray mantarının altında 0,01 mm'ye kadar deformasyon gözükmemektedir (Şekil 7.9. ve Şekil 7.10.). Modelin maksimum normal gerilme analizine baktığımız zaman Şekil 7.11. ve Şekil 7.12.) statik kuvveti uyguladığımız bölümde 711 MPa değerinde bir basma gerilmesi meydana gelmektedir. Bu bölgeden uzaklaştıkça 73 MPa değerinde bir gerilmesi meydana gelmektedir. Bu sonuçta kuvvetin uygulandığı bölgeden uzaklaştıkça kuvvetin etkisinin azaldığını göstermektedir. Eğer modelin minimum normal gerilmesine bakacak olursak (Şekil 7.13., Şekil 7.14. ve Şekil 7.15.) yine kuvvetin uygulandığı bölgede 1311 MPa değerinde bir gerilme meydana gelmektedir. Yine kuvvetin uygulandığı bölgeden uzaklaştıkça gerilim azalmaktadır. Sistemin genelinde 3 MPa değerinde gerilme meydana gelmektedir. Modeldeki eşdeğer gerilme yani Von-Mises gerilmesine bakarsak 100 kN'luk kuvvetin uygulandığı bölgede 811 MPa değerinde eşdeğer gerilme ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu bölgede 540 MPa değerine kadar eşdeğer gerilme azalmaktadır. Kuvvetin uygulandığı bölgenin dışından uzaklaştıkça 450 MPa değerinden $2,787 \times 10^{-18}$ MPa değerine kadar düşmektedir. Eşdeğer plastik mukavemetine baktığımızda (şekil 7.16. ve şekil 7.17.) kuvvetin uygulandığı bölümde eşdeğer plastik mukavemeti de en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu değer 0,013 olmakla beraber bölgeden uzaklaştıkça 0 değerine ulaşmaktadır. Statik structural analizinde son bakacağımız analiz sonucu ise emniyet katsayısıdır. Emniyet katsayısı

kuvvetin uygulandığı yüzeyde 0,6 iken sırasıyla uzaklaştıkça 5, 10 ve 15 değerlerini almaktadır. Bu sonuç bize trenin her geçişinde rayın yüzeyindeki ince bir tabakada şekil değişimi ve aşınma meydana getireceğini göstermektedir. Bu yüzden rayların bakımları can ve mal güvenliği, yolcu konforu açısından ciddi bir önem arz etmektedir. Rayların bakımları düzenli bir şekilde yapılmalı ve fazla aşınma oluşmuş raylar değiştirilerek olası risklerin önüne geçilmelidir.

8.2. MODAL VE HARMONİK RESPONSE ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde modal analiz ve harmonik response analizinin sonuçları değerlendirilecektir. Bu analizler statik analizde kullanılan modele uygulanmıştır. Ve sistemin doğal frekanslarda verdiği tepki ve deformasyonlar incelenmek istenmiştir. İlk iki frekans küçük değerlerde meydana gelmiş ve bütün sistemde 1,1748 mm'lik bir deformasyona yol açmıştır. 3. Frekansda ise traverslerin bazı bölgelerinde 1,8782 mm değerinde deformasyon oluşurken bazı bölgelerinde 0,4 mm deformasyon oluşmuştur. Rayın bazı bölgelerinde en yüksek 1,06 mm deformasyon oluşurken bazı bölgelerinde en düşük 0,73 mm deformasyon oluşmuştur.

Çizelge 7.6. 3. Mode için bazı deformasyon miktarları.

Parça	En yüksek deformasyon (mm)	En düşük deformasyon (mm)
Travers	1,8782	0,4
Ray	1,06	0,73
Shoulder	1,22	1
Klip	1,06	1
Vida	1,38	1,22
Dübel	1,38	1,38

Mode 4'de ise traverslerin alın kısmındaki bölgelerde deformasyon 2 mm'ye ulaşırken merkezinde 0,009 mm olmaktadır. Raylarda ise 1.37 mm maksimum deformasyon bulunmaktadır. Minimum deformasyon ise 1 mm olmaktadır.

Mode 5’de yine traverslerin alın kısmındaki bölgelerde deformasyon 2,15 mm’ye ulaşırken merkezinde 0,012 mm olmaktadır. Raylarda ise 1.68 mm maksimum deformasyon bulunmaktadır. Minimum deformasyon ise 0,012 mm olmaktadır.

Mode 6’da traversin balast yüzeyine temas ettiği bölgede 2,18 mm maksimum deformasyon oluşurken üst yüzeyinde ise minimum deformasyon oluşur. Bu değer 0,26 mm olmaktadır. Raylarda ise 0,02 mm deformasyon oluşmaktadır.

Harmonic response analizinde 0-1500 Hz arası analiz yapılmıştır. Bu analizde yük altındayken sistemin frekanslara tepkisi incelenmek istenmiştir. Şekil 6 28, şekil 6 29 ve şekil 6 30’da analiz sonuçları gösterilmiştir. Analiz sonuçlarında görüldüğü üzere maksimum deformasyon 150 Hz’de oluşurken maksimum gerilme de 150 Hz frekansında oluşmaktadır. Gerilme-frekans ve deformasyon-frekans grafiklerinin benzeşmesi beklenen bir durumdur.

8.3. TRANSİENT (KONTAK) ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4 m uzunluğundaki bir ray ve 1 m çapındaki tekerde sisteme dahil edilmiştir. Bu analizde tekerin ray üzerindeki hareketinin etkisi gözlenmek istenmiştir. Şekil 7.33.’de görüldüğü üzere rayın ve tren tekerinin kontakta olduğu bölgelerde deformasyon miktarı artmıştır. Diğer bölgelerde deformasyon miktarı daha az kalmıştır. Ayrıca rayın ivmelenmesine baktığımızda 1460 m/s^2 ve -1967 m/s^2 arasında ivmelenme grafiği gösterdiği görülmektedir. Bilindiği üzere tren tekerinin 90° döndürerek yaptığımız analizimizde işlem süresi çok kısa olduğu için rayda y ve z doğrultusunda küçük yer değiştirmeleri hızlı bir şekilde yaptığı görünmektedir. Sistemin genel olarak emniyet katsayısı 15 olarak analiz sonuçlarında görülmektedir. Lakin yüzey bölgelerinde emniyet katsayısının düştüğü de gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak tren tekeri ve rayın temas yüzeyinde ufak boyutta aşınmalar meydana gelecektir. Bu durumda ray ve tren ekipmanlarının bakımları ciddi bir önem arz etmektedir. Toplam deformasyon sonuçlarına bakacak olursak eğer tekerin raya temas etmeyen yüzeyi ve traverslerde minimum deformasyon gerçekleşirken tekerin raya temas eden bölgelerinde deformasyon maksimuma çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Islam, Al Saif Ahmed and Subha, Nasir “Bangladesh Railway Materials Case Study”, *Ahsanullah University of Science and Technology*, Bangladesh (2014).
2. Fischer, Eller, Kada and Nemeth, “Railway Construction”, *Szechenyi Istvan University*, Gyor (2015).
3. Dilaver Ş., “Makinistler İçin Demiryolu Eğitimi El Kitabı”, *İstanbul Ulaşım A.Ş.*, İstanbul (2003).
4. Özden M., “Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, Isparta (2011).
5. Anonim, “Raylar ve Bağlantılar”, Raylı Sistemler Teknolojisi, *T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi*, Ankara (2013).
6. Sevim R., “İstanbul’da Kent İçi Raylı Sistemler ve Üstyapı Hesapları”, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul (2015).
7. Tulumtaş H. “Ray Üretim Teknolojisindeki Gelişmeler ve Türkiye’de Üretim İmkânları”, *5. Ulaştırma Kongresi Bildiriler Dergisi*, 283-292 (2001).
8. Anonim, “Raylar ve Bağlantılar”, Raylı Sistemler Teknolojisi, *T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi*, Ankara (2008).
9. Adolf Z. “Technology of Production of Steel in Converters”, *Technical University of Ostrava*, Ostrava (2014).
10. Kalaycıoğlu O., “Kardemir’de Ray Üretiminde İyileştirmeler”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya (2006).
11. Usher, Ray and Uhlenbush, “Continuous Measurement of Liquid Steel Temperature in the Tundish,” *MPT International Vol 4* 124-131 (1989).
12. Mundrey J.S., “Railway Track Engineering Fourth Edition”, *Tata McGraw-Hill Education Private Limited*, New Delhi (2010).
13. Anonim, “Ray Üretimi ve Isıl İşlem Mukavemeti”, (2008).
14. İnternet: Kocaeli Makine <http://www.kocaelimakine.com/ders-notlari/demir-karbon-denge-diyagrami/> (2017).

15. Yelbay ve Gür, “Demiryolu Raylarında Kalıntı Gerilmelerinin Manyetik Barkhausen Gürültüsü Yöntemi ile Ölçülmesi”, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı* (2015).
16. Esveld C., “Modern Railway Track”, *Delft University of Technology*, Delft (2001).
17. Esen ve Tacir, “Ev Tipi Çamaşır Makinasında Titreşim Analizi” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 443-452 (2016).
18. Özgen Ö., “Demiryolu Gürültüsü ve Etkili Önlemlerin İncelenmesi”, *İstanbul Üniversitesi*, İstanbul (2010).
19. İnternet: [http://blog.milliyet.com.tr /tas-tim-yine-deli-gonlum /Blog/?BlogNo=401857](http://blog.milliyet.com.tr/tas-tim-yine-deli-gonlum/Blog/?BlogNo=401857) (2017).
20. İnternet: Demir C. “Titreşim Ders Notları”, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/Makina%20Dinamigi_titresim.pdf (2017).
21. İnternet: Demir C. “Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları”, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf (2017).
22. Esen and Eroğlu, “Dynamic Analysis of Wheel/Rail Interaction Using Finite Element Method”, *2nd International Iron and Steel Symposium (IISS'15)*, Karabük (2015).
23. İnternet: UIC60 tren rayının görünümü, <http://awscf.caradisiac.com/prod/photos/3/5/4/1420354/5460294/img-546029453c.jpg?v=1> (2017).
24. İnternet: Travers Resmi, <http://www.demiryolu.net/tcdd-turkiye-devlet-demiryollari-haberleri/tarihi-demiryolu-hatti-yeniden-hayata-geciyor.html> (2017).
25. İnternet: Ahşap travers resmi, <http://www.railroad-fasteners.com/railway-sleepers.html> (2017).
26. Profollidis V., “Railway Management and Engineering”, *Democritus Thrace University*, Greece (2015).
27. Pacyna J., “The Microstructure and Properties of the New Bainitic Rail Steels”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 28 Sayfa 19-22 (2008).
28. İnternet: [Cebire Bağlantı Resmi, http://www.cgcrail.com/index.php?sayfa=Ray-Baglantilari](http://www.cgcrail.com/index.php?sayfa=Ray-Baglantilari) (2017).
29. İnternet: Frekans-Genlik Resmi, <http://uzmzysmn.blogspot.com.tr/2012/04/frekans-ve-genlik-nedir.html> (2017).

30. İnternet: Rayleigh Dalgaları, <http://www.fizik.net.tr/site/deprem-dalgalari/> (2017).
31. Okagata Y., “Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects”, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, No:105 Sayfa:26-33, Osaka (2013).
32. Shaltout D., “Multibody Approach for Railway Dynamic Analysis”, *Universidad Politecnica de Valencia*, Valencia(2010).
33. Çuğ ve Candan, “Döküm Yöntemi ile Tren Tekerleğinin Üretilirliğinin Araştırılması”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük(2009).
34. Linhart, Cibera ve Mikulova, “Fretting Fatigue of Steels with İfferent Strength”, *Metal 2011* sayfa:18-20, Brno (2011).
35. Usamah A., “Identification and Description of the Metal Working Processes That Are Required to Manufacture a Train Wheel and an Automobile Wheel Rim”, *International Islamic University of Malaysia*, Gombak.
36. Topolska S., “Quality Control in the Process of Rings of Train Wheels Manufacturing”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 31 Issue 2, Gliwice(2008).
37. Poschmann, Tschapowetz and Rinnhofer, “Heat Treatment for Railway Wheels, Tyres and Rings”, *Advanced Forging Technologies*, Düsseldorf (2005).
38. İnternet: Beynit İç Yapı Görseli, <http://malzemeciyyiz.blogspot.com.tr/search/label/sementit> (2017).
39. İnternet: Understand Different Mesh Types: http://www.descargas.simulsoft-ingenieros.es/nfx/documentacion/Understand_different_mesh_types-midas_NFX.pdf (2017).
40. İnternet: Mekanik Titreşimler, <https://sites.psu.edu/f17m250s2n7/files/2017/08/10.Mechanical-Vibrations-1frrsuf.pdf> (2017).
41. Eroğlu M., “Yük Trenlerinde Dikey Yöndeki Ray/Teker Etkileşiminin Modellenmesi”, *Karabük Üniversitesi*, Karabük (2017).
42. İnternet: Yay-Sönüm Görseli, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Titre%C5%9Fim> (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan Çakmak 1991 yılında İzmir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Karşıyaka Lisesi’nden mezun oldu. 2010 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2015 yılında mezun oldu. 2016 Şubat ayında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisansı kazandı. Ekim 2016- Şubat 2017 yılları arasında Karabük Üniversitesinde kısmi zamanlı olarak öğretim görevliliği yaptı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (551) 415 0552
E-posta : ouzhacakmak@gmail.com