

**BİR YÜK VAGONUN UZUN SÜRELİ FRENLENMESİ SONUCU AÇIĞA
ÇIKAN ISININ İKİ FARKLI TEKERLEK SETİ ÜZERİNDEKİ DAĞILIMININ
SAYISAL ANALİZ METODU İLE İNCELENMESİ**

Nail KARAGÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
2015**

**T.C
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR YÜK VAGONUN UZUN SÜRELİ FRENLENMESİ SONUCU AÇIĞA
ÇIKAN ISININ İKİ FARKLI TEKERLEK SETİ ÜZERİNDEKİ
DAĞILIMININ SAYISAL ANALİZ METODU İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nail KARAGÖZ
(201292091017)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Halil İbrahim ACAR

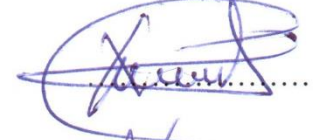
**SİVAS
HAZİRAN 2015**

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Halil İbrahim ACAR**
Cumhuriyet Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Burhan SELÇUK**
Cumhuriyet Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Abdullah KEÇECİLER
Dumlupınar Üniversitesi



ONAY

Bu tez çalışması ^{21.07.2015} .././... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Nail Karagöz , 2015

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

21.07.2015


Nail KARAGÖZ

ÖZET

BİR YÜK VAGONUN UZUN SÜRELİ FRENLENMESİ SONUCU AÇIĞA ÇIKAN ISININ İKİ FARKLI TEKERLEK SETİ ÜZERİNDEKİ DAĞILIMININ SAYISAL ANALİZ METODU İLE İNCELENMESİ

Nail KARAGÖZ

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halil İbrahim ACAR

2015, 114 sayfa

Demiryolu taşımacılığı, hacmi ve ağırlığı büyük malzemelerin uzun mesafeli taşımacılığında ekonomik yönüyle ön plana çıkmaktadır. Güvenli bir taşımacılık için fren sistemi ve tekerlek setleri vagona en önemli bileşenlerdir. Frenleme, fren pabuçları ile tekerlek yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Uzun süreli fren yapılması sonucunda tekerleklerde çok yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık tekerleklerde çeşitli arızalara sebep olmanın yanında orman, vagon vb. yangın riskini artırmaktadır. Fren kapasitesi yüksek tekerlek seti ve uygun fren pabucunun (sabo) kullanılması gerek sürüş ve çevre güvenliğinin artırılmasını gerekse yük vagonlarında en büyük ithalat kalemi olan tekerlek seti sarfiyatını ve bakım onarım maliyetlerini azaltacaktır.

Bu çalışmada iki farklı tip yük vagonu tekerlek setinin frenleme kapasitesi analiz edilmiştir. Aynı dingile sahip fakat tekerlek ağırlıkları ve tekerlek gövde geometrileri oldukça farklı olan M 1111 ve BA 004 teknik resim numaralı tekerlek setlerinde uzun süreli frenleme sonucu tekerlek yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı incelenmiş ve Türkiyenin coğrafik ve çevresel yapıları göz önüne alındığında hangi tekerlek seti kullanımının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

Analiz için yeni ve aşınmış tekerlek setlerine ait hazırlanan 3D model ANSYS programının içerisine aktarılmıştır. ANSYS 14.0 Workbench yazılımı ortamında, Isıl Zamana Bağlı Analiz kullanılmıştır. Analiz TSI ve UIC standartlarında verilen senaryoya uygun test koşulları altında yapılmıştır. Senaryoda, döküm sabo (P10) ile frenleme esas alınmış, kompozit sabo ile frenleme ayrıca incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekerlek Seti, Frenleme Kapasitesi, Isıl Dağılım, Yük Vagonu, Döküm Sabo, Kompozit Sabo, Ansys Isıl Analiz.

ABSTRACT

THE STUDY OF HEAT DISTRIBUTION ON TWO DIFFERENT TYPES OF WHEELSETS BY USING NUMERICAL ANALYSIS METHODE AFTER A LONG BRAKE APPLICATION ON A FREIGHT WAGON

Nail KARAGÖZ

Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Department

Supervisor: Prof.Dr. Halil İbrahim ACAR

2015, 114 pages

Railroad transport comes to the fore for its economical aspects in long distance transportation of heavy and bulky goods. Brake system and wheelsets constitute the most crucial elements of a freight wagon for safe transportation. Brake action is maintained by friction force created between brake blocks and wheel tread surface. Very high temperatures arise on wheels as a result of a long brake application. Not only do high temperatures cause various failures on wheels but also increase risk of fire on wagons and forests etc.

Using high braking capacity wheelsets and appropriate brake blocks (brake shoes) will both contribute to safety of operation and environment and also reduce amount of wheelsets consumed, which are quantitatively a major import item, together with reduction in maintenance and repair costs.

In this study, braking capacity of two different freight wagon wheelsets is analysed. Temperature distribution formed on the surface of wheels as a result of long brake application on both types of wheelsets having technical drawing numbers of M 1111 and BA 004 accommodating same type of axles but with quite different wheels in weight and web geometries is studied and thus which type of wheelset would suit better to Turkey is suggested, considering geographical and environmental conditions.

3D models of new and worn wheelsets to be analysed are transferred into ANSYS software. Analysis is performed using Thermal Zamana Bağlı module of ANSYS 14.0

Workbench in accordance with test scenarios described in TSI and UIC leaflets with cast iron brake blocks (P10), braking with composite brake blocks is also studied separately.

Key Words : Wheelset, Braking Capacity, Thermal Distribution, Freight Wagon, Cast Iron Brake Block, Composite Brake Block, ANSYS Thermal Analysis.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tez çalışmalarımın her aşamasında bana yol gösteren, yardım ve emeğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Halil İbrahim ACAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca tez yazım aşamasında bana değerli görüşleriyle rehberlik eden Prof. Dr. Burhan SELÇUK ve Yard. Doç. Dr Abdullah KEÇECİLER'e, çalışmalarımda bana birçok noktada yardımcı olan Zühtü ÇOPUR, Murat BEKTAŞ, Mehmet KAYA ve Ercan AKPINAR'a, teşviklerinden dolayı Mahmut DEMİR, Eyyüp S.BARIŞ, Sefa YAZICILAR, Erol ŞİMŞEK ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bana her konuda sabırla destek olan eşim Tuğba KARAGÖZ'e ve beni yüksek lisans yapmaya teşvik eden ağabeyim Yard. Doç. Dr. Naim KARAGÖZ'e minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1.GİRİŞ	1
2. DEMİRYOLU YÜK VAGONLARINDA FREN SİSTEMİ	2
2.1 Frenlemenin Amacı	2
2.2 Fren Sistemleri	2
2.3 Yük Vagonlarında Fren	3
2.3.1 Endirekt Etkili Basınçlı Hava Freni	4
2.3.1.1 Yavaş Etkili ve Hızlı Etkili Fren.....	5
2.3.1.2 Dolu Boş konumu.....	6
2.3.1.3 Otomatik Yük Kontrollü Fren.....	7
2.4 Yük Vagonunda Hız Rejimi	7
2.5 Yük Vagonlarında Kullanılan Sabolar	8
2.5.1 Saboların Sürtünme Karakteristikleri.....	9
2.5.2 FrenlemedeKullanılanFarklı Sabo Konfrigasyonları	10
2.6 Bojiye Monteli Kompakt Fren Sistemi	11
3. DEMİRYOLU YÜK VAGONLARINDA TEKERLEK SETİ	13
3.1 Monoblok Tekerlek	13
3.2 Tekerlek Dingili	15
3.3 Tekerlek Seti	16
4.YÜK VAGONLARINDA MAKSİMUM YÜK İÇİN FREN HESABI	17
4.1 Fren Ağırlığı ve Fren Yüzdesi.....	18
4.2 Toplam Sabo Kuvvetinin Hesabı	19
4.3 Silindir Piston Kuvveti	20
4.4 Regulator ve Manivelalar	22
4.5 Frenleme Mesafesi	24
4.6 Farklı Yükler için Fren Hesabı.....	25
5. VAGONA ETKİ EDEN DİRENÇ KUVVETLERİ	26
5.1 Hava Direnci	26
5.2 Yuvarlanma Direnci	27
5.3 Atalet (Eylemsizlik) Direnci	28
6. TEKERLEKTE ISIL KAYNAKLI HASARLAR	32
6.1 Isıl Çatlaklar	35
6.2 İspit Yüzeyinde Oyuklanma Veya Kabuklanma	37
6.3 Tekerlek Yüzeyinde Yığılma	38
6.4 Apletli Yüzeyler	38
6.5 Tekerlek Yüzeyinden Yan Taraflara Yayılma	39
7.TEKERLEKLERİN FREN KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI	39
7.1 Fren Kapasitenin Hesaplanması İçin Referans Senaryo	40

7.2 FEM (Sonlu Elemanlar Metodu) Analizi	44
7.3 Isıl Analizi Yapılacak Olan Tekerlek, Dingil ve Sabo Teknik Resimleri	44
7.4 FEM Analizinde Kullanılacak Parametreler	49
7.5 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde FEM Analizi	51
7.5.1 FEM Analizinde Amaç	51
7.5.2 CAD Modeli ve Yapılan Çalışmalar	52
7.5.3 Sonlu Elemanlar Modeli	52
7.6 Yeni Tekerlek Setinde Zamana Bağlı FEM Isıl Analiz	53
7.6.1 Yeni Tekerlek Setinin Zamana Bağlı FEM Isıl Ön Analizi	54
7.6.2 BA 004 ve M 1111 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı FEM Isıl Analizi	56
7.7 Aşınmış Tekerlek Setinde Zamana Bağlı FEM Isıl Analiz	59
7.7.1 Aşınmış Tekerlek Setinin Zamana Bağlı FEM Isıl Ön Analizi	59
7.7.2 BA 004 ve M 1111 Aşınmış Tekerlek Seti Zamana Bağlı FEM Isıl Analizi	62
7.8 BA 004 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde Kompozit Sabo Kullanılması	64
7.9 BA 004 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde 120 dk Frenleme Sonucunda Oluşan Maksimum Sıcaklıklar	67
8. SONUÇ	69
KAYNAKLAR	71
EKLER	74
Ek-1 B 004 YENİ TEKERLEK SETİNİN ZAMANA BAĞLI ISIL ANALİZ RAPORU ...	74
Ek-2 M 1111 YENİ TEKERLEK SETİNİN ZAMANA BAĞLI ISIL ANALİZ RAPORU.	94

ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Direkt Etkili Fren	3
Şekil 2.2 Endirekt Etkili Fren	4
Şekil 2.3 Vagonlarda G-P Konumu	5
Şekil 2.4 Vagonlarda ‘Dolu-Boş’ Konumu.....	7
Şekil 2.5 Döküm Sabo (P10) ve Kompozit Sabo.....	8
Şekil 2.6 Teker-Sabo Sürtünme Katsayısının Hıza Bağlı Değişimi	9
Şekil 2.7 Değişik Sabo-Teker Konfrigasyonu	11
Şekil 2.8 Bojiye Monteli Kompakt Fren Sistemi	12
Şekil 3.1 Monoblok Tekerlek	14
Şekil 3.2 Monoblok bir tekerin üretim aşamaları	14
Şekil 3.3 Yük Vagonu Tekerlek Setinde Kullanılan Dingil.....	15
Şekil 3.4 Yük Vagonu Tekerlek Seti	16
Şekil 4.1 Sgss Konteyner Vagonu ve Y25 Ls(s)d1 boji	18
Şekil 4.2 Hız Rejimlerine Göre Dingil Yüğü-Fren Ağırılığı Yüzdesi	19
Şekil 4.3 Fren Silindiri ve Distribütör Valfi	20
Şekil 4.4 Fren Devresi ve Fren Silindirinde Oluşan Kuvvetler	21
Şekil 4.5 Regülatör ve Manivela.....	22
Şekil 4.6 Sgss Vagonu Yarı Fren Sistemi Şematik Gösterimi.....	23
Şekil 4.7 Sgss Fren Manivelası	24
Şekil 5.1 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Hava Direnci Grafiğı.....	26
Şekil 5.2 Kayma Oranı ‘ξ’	27
Şekil 5.3 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Yuvarlanma Direnci Katsayısı	28
Şekil 5.4 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Yuvarlanma Direnci Grafiğı	28
Şekil 5.5 Çekme Kuvveti –Kayma oranı (ξ) Grafiğı	29
Şekil 5.6 Tekerleğe Gelen Kuvvetler.....	29
Şekil 5.7 Tekerleğe Gelen Kuvvetler.....	30
Şekil 5.8 Tekerleklerde Apleti Durumu	30
Şekil 5.9 Maksimum Tekerlek Ray Tutunma Kuvveti, Tekerlek Sabo Sürtünme Kuvveti. 31	
Şekil 6.1 Yeni Tekerlekve Kullanılmış Tekerlek İçin Örnek Kalıntı Gerilim Değerleri.....	32
Şekil 6.2 EMAT ve PET Yöntemi ile Tekerlek Kalıntı Gerilim Ölçümü.....	33
Şekil 6.3 Fren Tezgahında Ağır Fren Yapılmış Tekerlek (sol) ve Kullanımda Olan Tekerlek İçin Örnek Kalıntı Gerilimi (sağ) (MPa).....	33
Şekil 6.4 Tekerlek Seti İçin Manyetik Parçacık Testi.....	34
Şekil 6.5 Ultrasonik Test İstasyonu	34
Şekil.6.6 Isıl Çatlaklar	35
Şekil 6.7 Martensit Göstergesi Beyazlaşmış Bölgeler	35
Şekil 6.8 Tekerlekte 3.Derece, 4.Derece ve 5. Derece Çatlak Resimleri.....	36
Şekil 6.9 Tipik Bir Tekerlek Kırığı	37
Şekil 6.10 1., 2., 3. ve 4. Dereceden Oyuklanma Olan Tekerlekler.....	37
Şekil 6-11 3., 4. ve 5. Dereceden Yığılma Olan Tekerlekler	38
Şekil 6.12 3., 4. ve 5. Dereceden Apleti Olan Tekerlekler	39
Şekil 6.13 Tekerlek Yüzeyinin Yanlara Doğru Yayılması	39
Şekil 7.1 Kademeli Fren Durumunda Kondüvit - Fren Silindir Basınç Diagramı	40
Şekil 7.2 Tekerlek İçin Frenleme Tezgah Deneyi	42
Şekil 7.3 Yüğe Göre Değişen Tekerlek-Ray Temas Yüzeyi Yaklaşık Ölçüleri	43
Şekil 7.4 Isının İletim (Kondüksiyon) Yoluyla Yayılması	43
Şekil 7.5 BA-004 Monoblok Tekerlek Teknik Resmi	45

Şekil 7.6	M 1111 Teknik Resim Numaralı Monoblok Tekerlek	46
Şekil 7.7	Her İki Tekerlek İçin Kullanılan M1114 Numaralı BA 002 Dingil Teknik Resmi	47
Şekil 7.8	M 3350 Numaralı P(10) Döküm Sabo Teknik Resmi	47
Şekil 7.9	BA 004 Tekerlek Seti Teknik Resmi	48
Şekil 7.10	M 1111 Tekerlek Seti Teknik Resmi	48
Şekil 7.11	Aşınma Limitine Gelmiş Tekerlek	49
Şekil 7.12	Tekerlek Seti Bölgeleri	51
Şekil 7.13	Yeni Tekerlek Seti 3D CAD Görünümü.....	52
Şekil 7.14	Aşınmış Tekerlek Seti 3D CAD Görünümü	52
Şekil 7.15	SOLID 187 Geometrisi	53
Şekil 7.15	Zamana Bağlı FEM Ön Analiz Sıcaklık Sonucu	55
Şekil 7.16	BA 004 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu	57
Şekil 7.17	BA 004 Yeni Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği	57
Şekil 7.18	M 1111 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu	58
Şekil 7.19	M 1111 Yeni Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği	58
Şekil 7.20	Zamana Bağlı FEM Ön Isıl Analiz Sonucu	61
Şekil 7.21	Aşınmış BA 004 Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu.....	62
Şekil 7.22	BA 004 Aşınmış Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği..	62
Şekil 7.23	Aşınmış M 1111 Tekerlek Setinin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu.....	63
Şekil 7.24	M 1111 Aşınmış Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği..	63
Şekil 7.25	Yeni BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu	64
Şekil 7.26	Yeni BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği	65
Şekil 7.27	Aşınmış BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu.....	66
Şekil 7.28	Aşınmış BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği	66
Şekil 7.29	Frenlemede Döküm Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Yeni Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu.....	67
Şekil 7.30	Frenlemede Döküm Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Aşınmış Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu	67
Şekil 7.31	Frenlemede Kompozit Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004..... Tekerlek Setinin Yeni Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu.....	68
Şekil 7.32	Frenlemede Kompozit Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004..... Tekerlek Setinin Aşınmış Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Vagonların ‘G-P’ Konumunda Fren Karakteristiği	6
Çizelge 2.2 50 km/sa Hızda Saboların Yaklaşık Kayma Sürtünme Katsayısı.....	10
Çizelge 2.3 Döküm Sabo (P10) Kimyasal Bileşenleri	10
Çizelge 3.1 ER7 Çeliğinde bulunan Çeşitli Elementlerin Azami Yüzde Oranları	13
Çizelge 3.2 ER7 Çeliğinin Fiziksel Karakteristikleri.....	13
Çizelge 3.3 Ürün analizi ile Sınır Değerler	15
Çizelge 3.4 Dingil Çeliğinin Fiziksel Karakteristiği.....	15
Çizelge 4.1 Bgu Türü Döküm Sabo (16 adet) İçin UIC 544-1 ‘de Verilen Değerler	20
Çizelge 4.2 Sgss Vagonunda Kullanılan Fren Silindiri Karakteristiği	21
Çizelge 4.3 Frenleme Konumuna Göre Doldurma Boşaltma Zamanı	21
Çizelge 4.4 Fren Hesabında Kullanılan Bazı Değerler	23
Çizelge 4.5 Fren Ağırlığı Yüzdesi ve Hıza Göre Fren Mesafesi Hesabı	25
Çizelge 5.1 Çevre Koşullarına Göre Tutunma (Aderans) Sürtünme Katsayısı	29
Çizelge 7.1 Tekerlekte Isıl Kapasitenin belirlenmesi İçin Referans Vaka Değerleri	41
Çizelge 7.2 Bölgelerin Ortalama Sıcaklıklarına Göre Taşınım ve İletim Katsayıları.....	51
Çizelge 7.3 Monoblok Tekerlekler İçin Bazı Fiziksel Değerler	53
Çizelge 7.4 Ön Analiz İçin Bölgelerin Tahmini Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım ve iletim Katsayıları ve Işınım Yayıma Oranı.....	54
Çizelge 7.5 Zamana Bağlı FEM Isıl Analizinde Kullanılacak Değerler.....	55
Çizelge 7.6 Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık ve Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık	56
Çizelge 7.7 Bölgelerin Ön Analizde Bulunan Ortalama Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları.....	56
Çizelge 7.8 Aşınmış Monoblok Tekerlekler İçin Bazı Fiziksel Değerler.....	59
Çizelge 7.9 Ön Analiz İçin Bölgelerin Tahmini Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları.....	60
Çizelge 7.10 Zamana Bağlı FEM Isıl Analizinde Kullanılacak Değerler.....	60
Çizelge 7.11 Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık ve Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık	61
Çizelge 7.12 Bölgelerin Ön Analizde Bulunan Ortalama Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları.....	61

KISALTMALAR DİZİNİ

DB	: Deutsche Bahn (German Railways)- Alman Demiryolları
COTIF	: Convention Concerning International Carriage by Rail- Uluslararası Demiryolu Taşımalarına İlişkin Sözleşme
DRS	: Trenlerin trafiğinin elektrikli sinyallerle yerel olarak idaresi sistemi
EMAT	: Electro-Magnetic Acoustic Transducer
EN	: European Norm (standard) Avrupa Normu (standartı)
ERRI	: European Railway Research Institute (Avrupa Demiryolları Araştırma Enstitüsü)
GCU	: General Contract of the Use for Wagons (Yük Vagonlarının Tek Tip Kullanım Sözleşmesi)
ISO	: International Standards Organisation (Uluslararası Standartlar Örgütü)
OTIF	: Intergovernmental Organization for International Carriage by Rail -Uluslararası Demiryolu Taşımalarına İlişkin Hükümetler Arası Örgüt
PET	: Piezo-Electric Transducer
RID	: Regulation Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail Tehlikeli Malların Demiryolu ile Uluslararası Taşımacılığa İlişkin Anlaşma
RIV	: Agreement Governing the Exchange and the Use of Wagons between Railways Undertaking (Demiryolu Kuruluşları Arasında Vagonların Değişimi ve Kullanılmasına İlişkin Anlaşma)
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü
TSİ	: Trenlerin trafiğinin elektrikli sinyallerle merkezden idaresi sistemi
TSE	: Turkish Standards Institute (Türk Standartları Enstitüsü)
TÜDEMSAŞ	: Türkiye Demiryolu Makinaları Sanayi A.Ş
UIC	: International Union of Railways (Uluslararası Demiryolu Birliği)

1.GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin azaldığı, dünyamızda çevreci, ekonomik ve güvenli ulaşım ve taşıma imkanı sunan demiryolu sektörünün önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Hacmi ve ağırlığı büyük malzemelerin uzun mesafeli taşımacılığında ekonomik yönüyle ön plana çıkan demiryolu taşımacılığında ülkemizde son yıllarda büyük atılımlar gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde alt yapının gelişmesiyle birlikte yük vagonlarında taşıma kapasitesi ve hızın artması frenlemenin önemini de artırmaktadır. Hız ve yükün artmasıyla kinetik enerjisi artan yük vagonlarının çeşitli eğim değerlerine sahip olan yollarda vagon hızının sabitlenmesi azaltılması veya vagonun belli bir mesafe içinde durdurulması, pik veya kompozit sabo (fren pabucu) ile tekerlek arasında oluşan sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Frenleme esnasında oluşan sürtünme sebebi ile yüksek ısı açığa çıkmakta ve bu ısı tekerlek ve sabo üzerinden havaya iletilmektedir. Oluşan yüksek sıcaklıklar, tekerleklerde ciddi geometrik deformasyonlar, istenmeyen kalıntı gerilimler ve buna dayalı birçok tekerlek hasarlarının oluşmasının sebebiyet vermesinin yanında, orman, vagon vb. yangınların çıkma riskinide artırmaktadır. Bu tür hasarlı tekerlekler seyir güvenliğinin korunması için onarılmalı veya yenileriyle değiştirilmelidir. Frenleme sonucu oluşan ısıyı havaya daha iyi transfer edebilen (frenleme kapasitesi iyi olan) tekerleklerin seçimi, yük vagonlarında en önemli ithalat kalemi olan tekerlek ithalatının, bakım onarım masraflarının ve çevre sorunlarının azalmasına ciddi katkıda bulunacaktır.

Bu çalışmada monoblok tekerlek gövde geometrisi ve monoblok tekerlek ağırlıkları farklı, yeni ve aşınmış M 1111 tekerlek seti ile BA 004 tekerlek seti için, TSI ve UIC tarafından belirlenen ağır çalışma koşullarını modelleyen senaryoya göre Zamana Bağlı FEM Isıl Analiz yöntemi kullanılarak tekerlek setinde oluşan sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Yapılan analiz için döküm sabo kullanımı esas alınmış, kompozit sabo kullanılma durumu ayrıca incelenmiştir.

2. DEMİRYOLU YÜK VAGONLARINDA FREN SİSTEMİ

2.1 Frenlemenin Amacı

Haraket halindeki bir vagona, itme-çekme kuvvetleri, yerçekimi kuvveti ve haraket yönünün tersine sürtünme kuvvetleri, frenlemeden dolayı oluşan kuvvetler, hava direnci gibi farklı direnç kuvvetleri etki etmektedir. Frenleme kontrol edilebilir bir direnç kuvvetidir.

İtme-çekme kuvveti ve yerçekimi kuvveti sebebiyle vagon kinetik ve potansiyel enerjiye sahiptir. Direnç kuvvetleri ise vagonun kinetik ve potansiyel enerji toplamının azalmasına sebep olmaktadır. Frenleme sebebiyle vagonun kinetik ve potansiyel enerji toplamındaki azalma çok büyük bir oranda ısı enerjisine dönüşmektedir.

Haraketli bir vagona frenlemenin amacı, vagonun sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerji toplamının azaltılması veya kinetik enerjinin yok edilmesidir. Aşağı yönlü haraketlerde vagonun hız artışının azaltılması, hızının azaltılması ve gerektiğinde vagonun durdurulması, eğimli olmayan yollarda hızın azaltılması ve vagonun durdurulması frenleme yardımıyla gerçekleşmektedir. Ülkemizde trenler; TSI ve DRS bölgelerinde 1000 m, diğer bölgelerde 700 m uzaklıkta emniyetle durabilmelerine yetecek kadar fren ağırlığı bulunacak şekilde hazırlanır [1]. TSI standardına göre 120 km/sa hızda gidebilen SS tipi vagonlarda maksimum frenleme mesafesi 700 m, minimum frenleme mesafesi 580 m olarak verilmiştir [2].

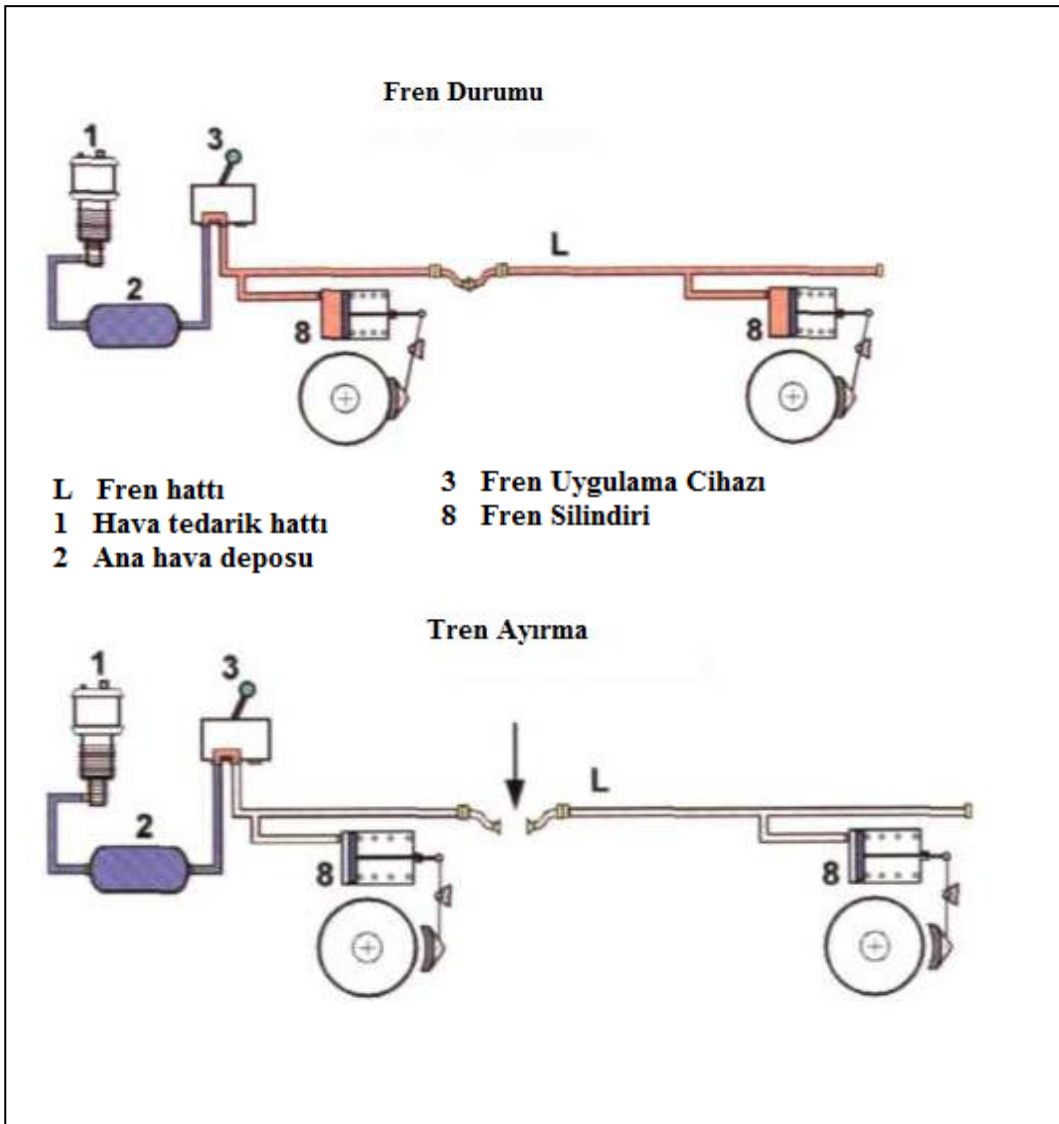
Haraketsiz vagonlarda frenlemenin amacı, eğimli yollarda vagonun haraket etmemesidir. Bu amaçla el frenleri kullanılır. El frenleri ‰ 40 eğimde vagonun haraket etmesine engel olabilmelidir. El freni, 0,12 seviyesinin üstünde olmayan bir tekerlek/ray (çelik/çelik) tutunma katsayısını hesaba katarak tasarlanmalıdır [2].

2.2 Fren Sistemleri

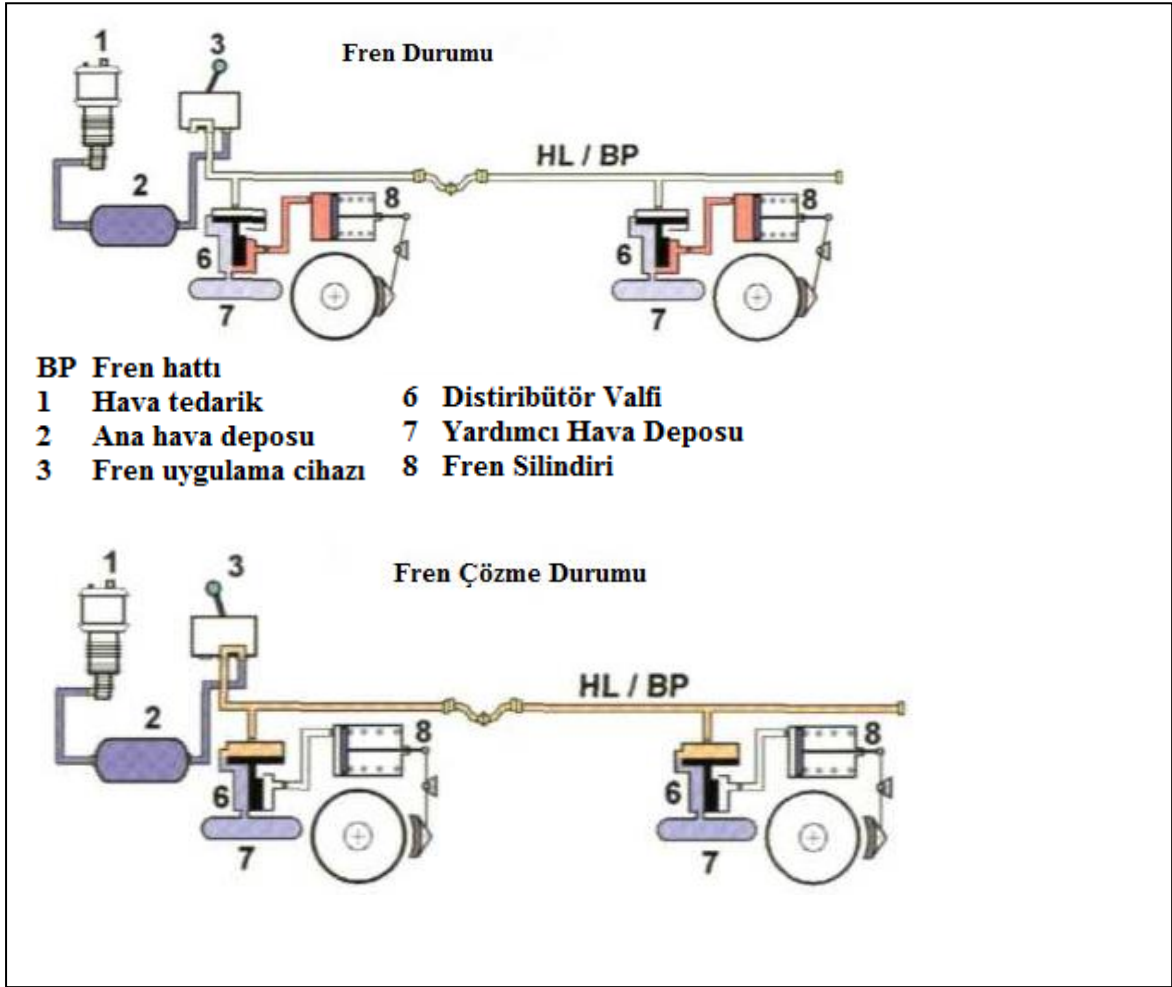
Demiryolu araçlarında kullanılan frenler genel itibariyle ‘Adezyona Bağımlı Frenler’ ve ‘Adezyona Bağımlı Olmayan Frenler’ olarak ikiye ayrılabilir. Adezyona bağımlı olmayan frenlerde fren kuvveti direkt raya verilir. Ray frenleri ‘Manyetik Ray Freni’ ve ‘Eddy Akımı Freni’ olarak ikiye ayrılır. Adezyona bağımlı frenlerde fren momenti tekerlek seti üzerine uygulanır. Adezyona bağımlı frenler ‘Dinamik Frenler’ ve ‘Sürtünme Frenleri’ olarak ikiye ayrılır. Dinamik frenler ‘Elektro Dinamik Fren,’ ‘Dönen Eddy Akımı Freni’ ve ‘Hidro Dinamik Fren’ olmak üzere üçe ayrılabilir. Sürtünme Frenleri ise ‘Sabo Freni’, ‘Disk Freni’ ve ‘Birleşik (Sabo/Disk) Freni’ olmak üzere üçe ayrılabilir [3]. Hızı maksimum 120 km/saat olan yük vagonlarında ‘Sabo Freni’ kullanılır.

2.3 Yük Vagonlarında Fren

Yük vagonlarının frenlenmesinde ‘Basınçlı Hava Freni’ kullanılır. Basınçlı hava frenleri Şekil ‘Direkt Etkili Frenler’ ve ‘Endirekt Etkili Frenler’ olmak üzere ikiye ayrılır. Eğer taŐıtlar üzerinde bulunan fren silindirlerine gönderilen basınçlı hava, bütün vagonların silindirlerine bir yerden doğrudan doğruya gönderilir ise bu tip frenlere direkt etkili fren denir (Şekil 2.1). Eğer her vagonun silindirine basınçlı hava, taŐıt üzerinde bulunan kendisine ait bir depodan gidiyorsa bu tip frene endirekt etkili basınçlı hava freni denir (Şekil 2.2) [4].



Şekil 2.1 Direkt Etkili Fren [3]



Şekil 2.2 Endirekt Etkili Fren [3]

Direkt etkili basınçlı hava frenlerinde fren hattındaki herhangi bir sorunda veya vagonların birbirinden ayrılması durumunda vagonları frenlemek imkansız hale gelmektedir. Buna karşın endirekt etkili basınçlı hava freninde hava tedarik hattındaki herhangi bir basınç düşmesi vagonlarda frenlemeyi aktif hale getirdiği için daha emniyetlidir. Bu sebeple yük vagonunda endirekt etkili basınçlı hava freni kullanılmaktadır.

Demiryolu ile uluslararası taşımacılık yapıldığı için Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) ortak özelliklere sahip basınçlı hava frenlerinin şartlarını belirlemiştir [5].

2.3.1 Endirekt Etkili Basınçlı Hava Freni

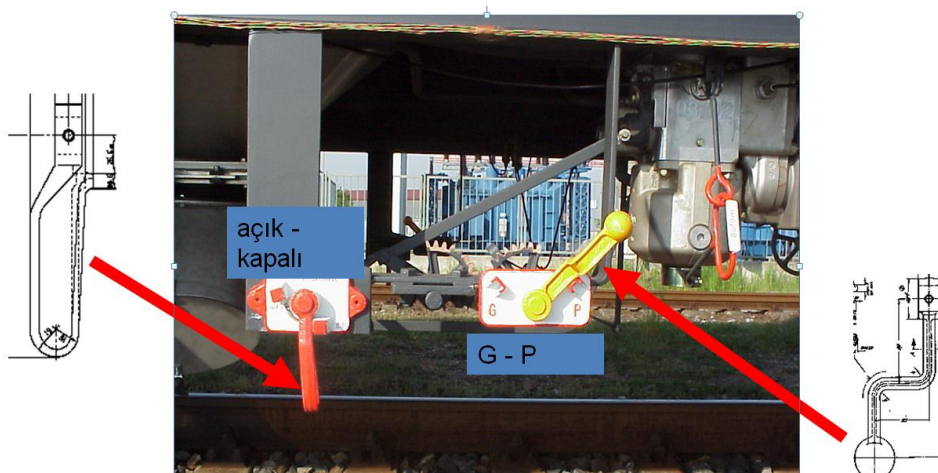
Freni çözülmüş durumunda olan bir vagonun fren hattında 5 bar basınçlı hava bulunur. Bu hava, distribütör valfi yardımıyla yardımcı hava deposunu (rezerve) 5 bar havayla doldurur. Yardımcı hava deposu distribütör valfi ile silindir arasında bulunmaktadır. Frenleme esnasında fren hattındaki (kondüvit) basınç düşürülür. Basınç düşmesi sebebiyle fren

hattından distribütöre hava akışı durur, yardımcı hava deposundaki basınçlı hava distribütör valfi üzerinden fren silindirine gider. Maksimum 3,8 bar basınçlı havanın oluşturduğu kuvvet manivelalar yardımıyla sabolar üzerinden tekerleklere iletilir. Bu şekilde frenleme gerçekleştirilmiş olur. Frenin çözülmesi için Fren hattındaki basınç tekrar 5 bar seviyesine getirilir, distribütör valfi yardımıyla bir taraftan basınçlı hava tekrar yardımcı hava rezervesini doldururken diğer taraftan fren silindirindeki hava boşaltılır. Fren hattında olabilecek hasar sebebiyle veya vagonların birbirinden ayrılması sebebiyle fren hattında oluşan basınç düşmesi vagonların otomatik olarak frenlemeye geçmesine sebep olacağı için bu tür fren, endirekt etkili otomatik fren olarak da adlandırılır. Bu gibi durumlarda vagonların otomatik frene geçmesi seyrü sefer güvenliği açısından da çok önemlidir.

2.3.1.1 Yavaş Etkili ve Hızlı Etkili Fren

Bir endirekt (otomatik) frende, frenlemeyi başlatmak için, bütün trende fren hattındaki havanın basıncı azlatılmalıdır. Bu makinist musluğu vasıtasıyla gerçekleşir. Uzun bir tren olduğu durumda ilk vagon ve son vagon arasında basınç farkı oluşur. Bunun bir sonucu olarak, son vagona fren silindir basıncı geç ve çok yavaş artar. Fren kuvveti böylece trenin başında daha fazladır ve trenin gerisi ona çarpar. Bu şekilde trende doğrusal kuvvetler artabilir. Tren çözüldüğü zaman, fren sistemi benzer olarak tersine hareket eder [3].

Yukarıda belirtilen durumların en aza indirilmesi için yük vagonlarında distribütör üzerinden farklı zamanlarda frenlemeyi sağlayan ‘Yavaş Etkili Fren’ ve ‘Hızlı Etkili Fren’ konumu mevcuttur. Yavaş etkili fren ‘G’ ile hızlı etkili fren ‘P’ ile gösterilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Vagonlarda G-P Konumu

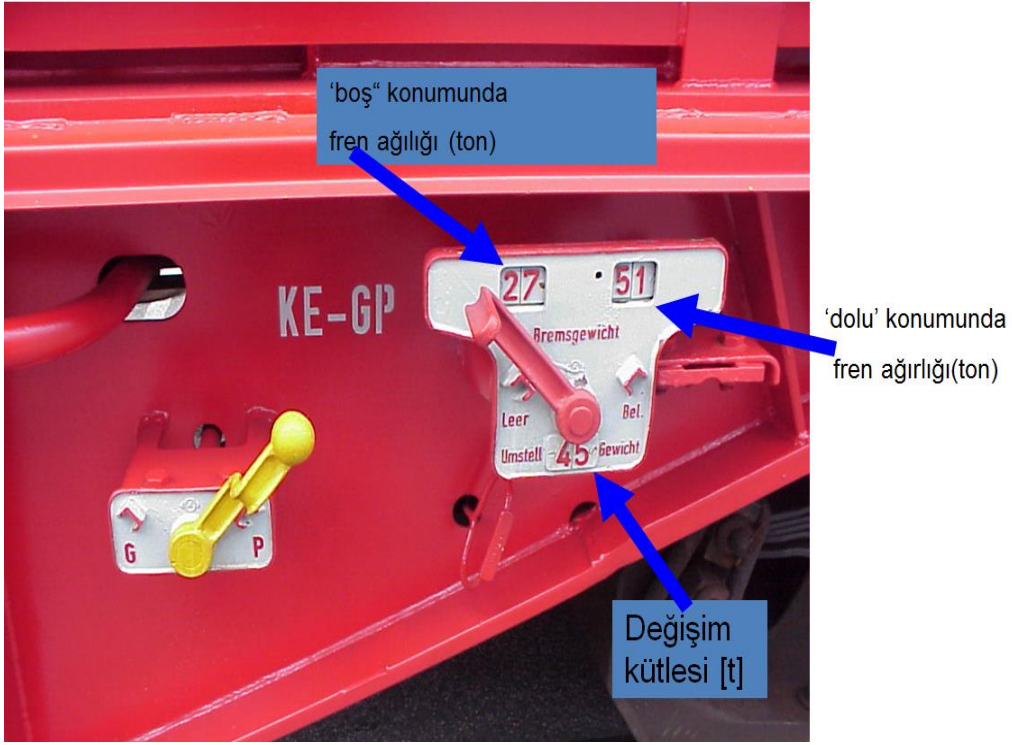
Çizelge 2.1 Vagonların ‘G-P’ Konumunda Fren Karakteristiği

Yük Vagonlarında Fren Konumu (UIC 540)	Yavaş Etkili Fren Konumu ‘G’	Hızlı Etkili Fren Konumu ‘P’
Maksimum Hız (km/sa)	90	100/120
Uygulama Süresi (saniye)	18-30	3-5
Çözme Süresi (saniye)	45-60	15-20

Yukardaki çizelgeden de görüleceği gibi 100/120 km/sa hıza uygun (S ve SS tipi) vagonlardan oluşan vagon dizilerinde 90 km/sa hızla gidilecekse fren konumu P seçilmelidir. Aksi takdirde ‘G’ konumunda vagon hızı 90 km/sa‘ den fazla ise vagon belirlenmiş maksimum fren mesafesinde duramaz. Ayrıca yolcu vagonlarıyla birlikte çalıştırılmak zorunda kalırsa yük vagonlarıda ‘P’ konumuna alınmalıdır. Yük vagonlarından oluşan çok uzun vagon dizilerinde öndeki bir kısım vagon ‘G’ konumuna diğerleri ‘P’ konumuna alınabilir. ‘G-P’ konumunun tekerleklere uygulanan fren kuvvetine etkisi yoktur.

2.3.1.2 Dolu-Boş Konumu

Vagonun frenlenmesi esnasında, yeterli frenin gerçekleştirilmesi ve gerekenden fazla frenleme kuvveti uygulayarak tekerleğin kilitlenmemesi istenir. Fazla frenleme kuvveti tekerin dönmesini engelleyerek vagonun kaymasına dolayısıyla tekerlekte apletiye (tekerlek yüzeyinde oluşan düzleşme) neden olur. Bu sebeple UIC yük vagonlarında uygulanacak frenleme kuvvetini, fren yüzdesi en az % 65 en fazla % 125 olacak şekilde düzenlemiştir. Yük sensörlü olmayan geleneksel vagonlarda bu şartın sağlanması için ‘Dolu-Boş’ konumu geliştirilmiştir (Şekil 2.4). Vagon, hesaplama yoluyla elde edilen bir ağırlığa kadar ‘Boş’ konumuna, bu ağırlıktan sonrası için dolu konumuna getirilir. ‘Boş’ konumunda iken fren silindirinde 1,5-1,8 bar basınç oluşur [6]. ‘Dolu’ konumunda fren silindirinde oluşan basınç 3,8 bardır. Distribütör valf tarafından ayarlanan bu basınç değeri ve fren silindir çapı fren silindirinde de oluşan kuvveti belirlemektedir. Daha eski vagonlarda hamule kutusu vasıtasıyla mekanik olarak manivela üzerinden farklı kuvvetler oluşturulmaktadır. Bu tür vagonlarda silindirde oluşan basınç yaklaşık 3,8 bar dır. Silindirde oluşan kuvvet manivelalar, regülatör ve sabolar yoluyla tekerleğe iletilmektedir.



Şekil 2.4 Vagonlarda 'Dolu-Boş' Konumu

2.3.1.3 Otomatik Yük Kontrollü Fren

Son yıllarda TÜDEMSAŞ tarafından üretilen boji yük vagonlarında da yük sensörleri kullanılmaktadır. Yük sensöründen distribütör valfe gelen sinyal sayesinde vagon ağırlığı arttıkça frenleme esnasında fren silindirinde oluşan hava basıncıda artmaktadır. Bu basınç distribütör valf tarafından ayarlanmaktadır. Böylece vagon ağırlığı arttıkça fren kuvvetide artmakta ve daha etkili bir frenleme sağlanmaktadır. Bu tür frenlere 'Otomatik Yük Kontrollü Fren' denir. Yük sensörlü vagonlarda Dolu-Boş kolu bulunmaz.

2.4 Yük Vagonunda Hız Rejimi

Yük vagonlarında hız rejimi ana hatlarıyla 'Yük Rejimi', 'S-Rejimi' ve 'SS Rejimi' olarak üçe ayrılabilir. 'Yük Rejimi' nde vagon hızı en fazla 90 km/sa, fren konumu 'G' olup günümüzde bu hız rejimine ait yük vagonu ülkemizde üretilmemektedir. 'S-Rejimi' vagonların dolu iken hız maksimum 100 km/sa olmakla birlikte boş vagonlarda frenleme yüzdesi 'λ' 100 ile 125 arasında olması sebebiyle, boş vagonlar 120 km/sa hız ile gidebilir. 'SS-Rejimi' vagonlar 120 km/sa hıza çıkabilir. 22,5 ton dingil yüküne sahip bu tür bir

vagonun 100-120 km/sa hızla gidebilmesi için dingil yükü 18 ton'a indirilmelidir [6]. Vagonlarda hız rejimi ile ilgili teknik sınırlamalar UIC 541 ve UIC 543 fişlerinde belirlenmiştir.

2.5 Yük Vagonlarında Kullanılan Sabolar

Vagonların frenlenme işleminde döküm (P10) saboların kullanımı çok yaygındır. P10 döküm sabolar (Şekil 2.5.a) gri dökme demirden imal edilmiş olup teknik özellikleri UIC 832 fişinde tanımlanmıştır [7]. Yük vagonlarında kullanılan diğer bir sabo tipi ise son yıllarda kullanımı artan kompozit sabolardır (Şekil 2.5.b). 23 Haziran 2006'da yürürlüğe giren TSI-Noise ve 1 Aralık 2012'de yürürlüğe giren COTIF UTP-Noise adlı Avrupa Birliği ve OTIF dokümanlarında, yeni üretilen ve mevcut yük vagonlarının meydana getirdiği gürültünün ölçümü ve sınır değerleri belirlenmiştir [8]. Bu dokümanlarda belirtilen gürültü seviyelerine ulaşma gereği, kompozit saboları ön plana çıkarmaktadır. UIC tarafından onaylanan iki tip kompozit sabo olup bunlardan biri döküm saboya göre yüksek sürtünme katsayısına sahip olan K tipi sabo, diğeri ise döküm sabo yerine de kullanılabilir, döküm saboyla yakın sürtünme katsayısına sahip LL tipi sabolardır.

Kompozit saboların uzun ömürlü olması, sürtünme katsayısının şartlara göre hemen hemen sabit kalması, gürültü seviyesini düşürmesi, hafif olması, bakım onarımda kolaylık sağlaması gibi önemli avantajlarına karşın, maliyetinin fazla olması, tekerleklerde daha çok ısınmaya sebep olması gibi dezavantajlara sahiptir.



a) Döküm Sabo



b) Kompozit Sabo

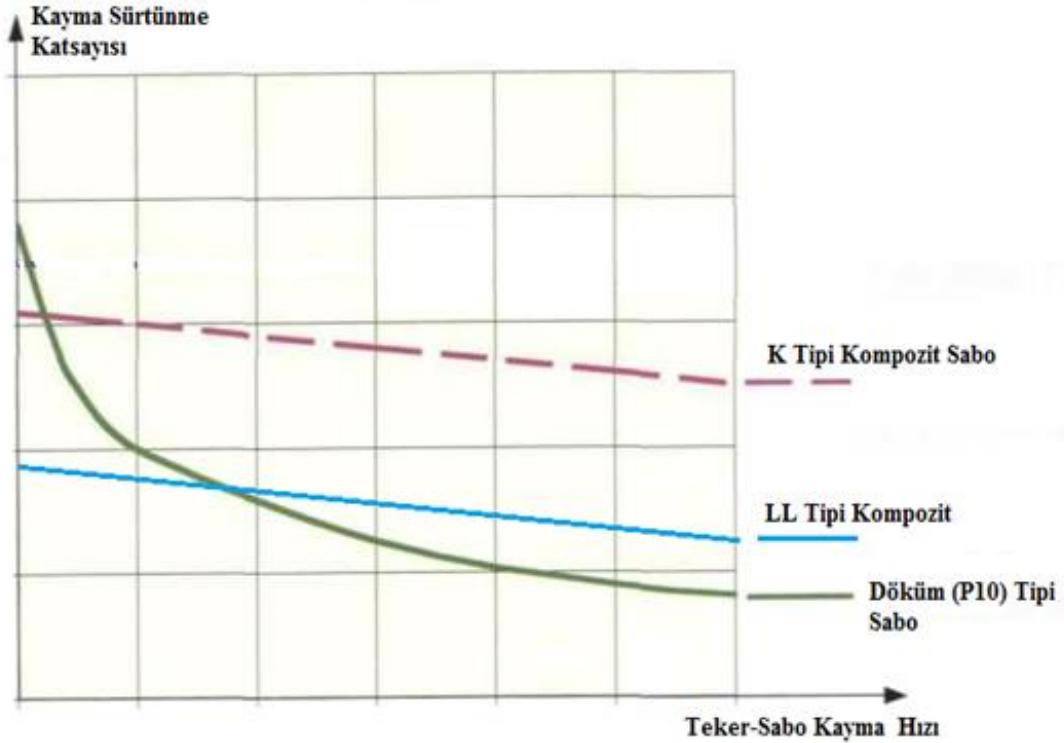
Şekil 2.5 Döküm Sabo (P10) ve Kompozit Sabo

UIC tarafından P10 döküm sabolar yerine kullanılacak olan LL saboların denenmesi ve Döküm, LL, K tipi saboların karşılaştırılması amacıyla 2010 yılında ‘Avrupa Treni’ adlı proje kapsamında 16 tren 2 yıl boyunca 200.000 km yol kat etmiştir. Bu deney sonucunda bazı LL tipi sabolar UIC tarafından onaylanmıştır. Deney sonucunda hazırlanan rapor, kullanılan sabo tiplerinin vagon dinamiğine etkilerini, sabo ve teker aşınma miktarlarını da içermektedir. Ayrıca raporda, LL tipi saboların gürültü seviyesini 10 dB(A) kadar azaltma potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir. Gürültü seviyesindeki bu azalma, mevcut gürültü şiddetinin yaklaşık yarıya inmesi anlamına gelmektedir [9].

2.5.1 Saboların Sürtünme Karakteristikleri

Frenleme esnasında frenleme kuvvetinin hesaplanabilmesi için tekerlek-sabo arası kayma sürtünme katsayısının bilinmesi gerekir.

Düşük fosforlu perlit dökme demirden yapılan döküm sabonun kayma sürtünme katsayısı çalışma hızıyla ve temas basıncıyla değişmektedir. Düşük hızlarda kayma sürtünme katsayısı ciddi miktarda artmaktadır. Buna karşın kompozit sabolarda kayma sürtünme katsayısı hıza çok bağlı değildir (Şekil 2.6) [3].



Şekil 2.6 Teker-Sabo Sürtünme Katsayısının Hıza Bağlı Değişimi [3]

Kompozit saboların içeriği ve sürtünme katsayıları firmalara göre değişebilmekte olup ortalama kayma sürtünme katsayıları Çizelge 2.2’ de verilmiştir.

Çizelge 2.2 50 km/sa Hızda Saboların Yaklaşık Kayma Sürtünme Katsayısı [10]

Sabo Tipi	Döküm Sabo	LL Tipi Sabo	K Tipi Sabo
50km/sa Hızda Yaklaşık Kayma Sürtünme Kat Sayısı	0,19	0,17	0,30

Döküm saboların statik sürtünme katsayısı UIC 544-1 de 0,35 olarak verilmiştir. Döküm saboların kimyasal bileşenleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

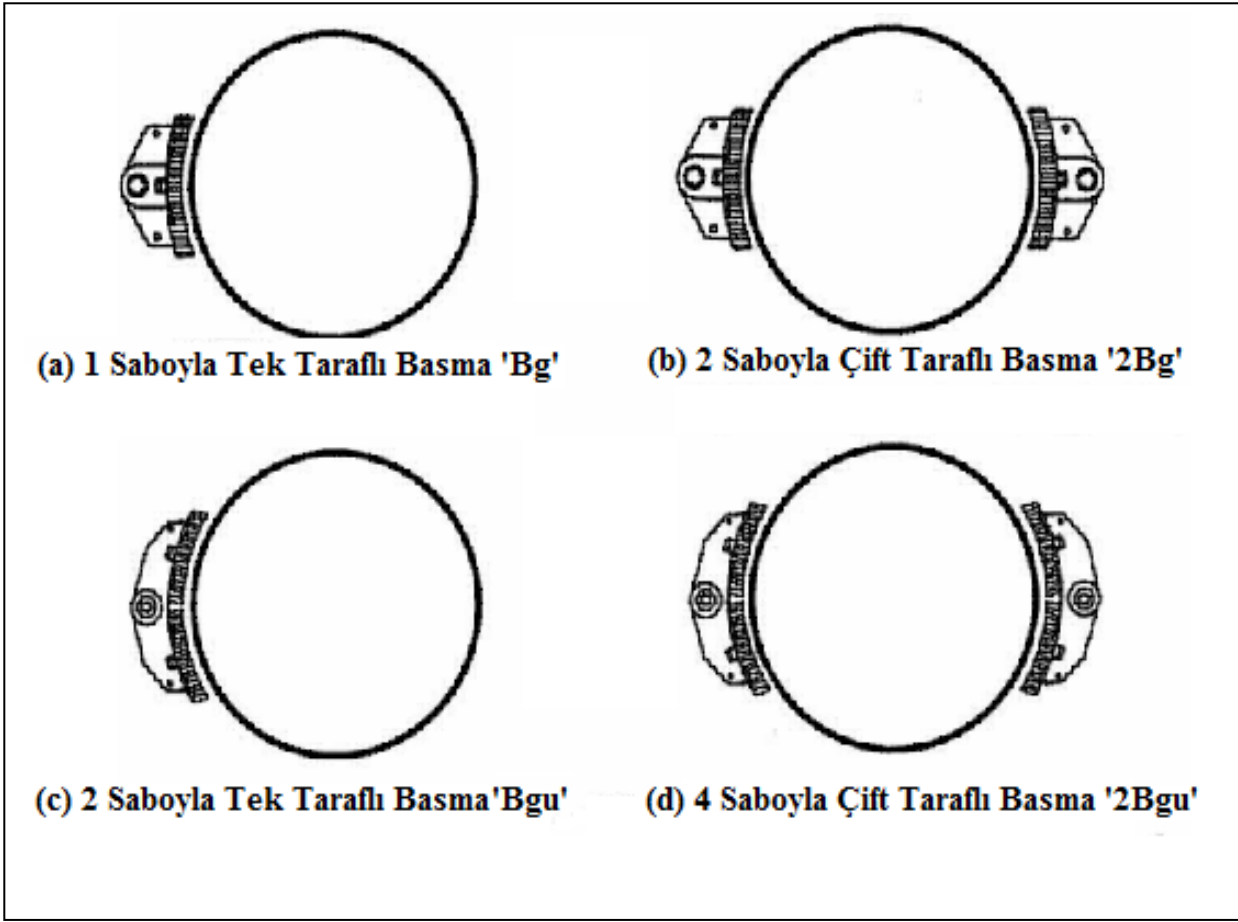
Çizelge 2.3 Döküm Sabo (P10) Kimyasal Bileşenleri [11]

% C	%Si	%Mn	% P	% S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Co
3,22	1,55	0,795	0,970	0,0416	0,514	0,030	0,0041	0,055	0,067
%Cu	%Nb	%Ti	% V	% W	%Pb	%Sn	%Mg	%Fe	
0,450	0,0035	0,0253	0,011	0,0047	0,0002	0,069	0,0002	92,29	

UIC tarafında yapılan Avrupa Treni Projesi sonucunda elde edilen verilere binaen bazı LL tipi saboların döküm sabo yerine kullanılmasına izin verilmiştir.

2.5.2 Frenlemede Kullanılan Farklı Sabo Konfrigasyonları

Fren sistemlerinde genel itibariyle UIC tarafından belirlenen farklı sabo-tekerlek konfrigasyonu kullanılmaktadır (Şekil 2.7). Genel itibariyle tek taraflı, çift taraflı basma ve tek sabo ve çift sabo ile basma durumlarına göre dört farklı konfrigasyon kullanılmaktadır. Tek taraflı basma durumunda tekerlek setinde dengelenmeyen kuvvetler oluşmaktadır. Bojiye entegreli fren sistemli (CFCB) vagonlarda yüksek sürtünme katsayısına sahip K-Tipi kompozit sabo ve konfrigasyon olarakta ‘Bgu’ konfrigasyonu kullanılmaktadır. Döküm sabo kullanılan ‘SS’ hız rejimine sahip vagonlarda ise çift taraftan tekere baskı uygulayan ‘2Bgu’ konfrigasyonu kullanılmaktadır.

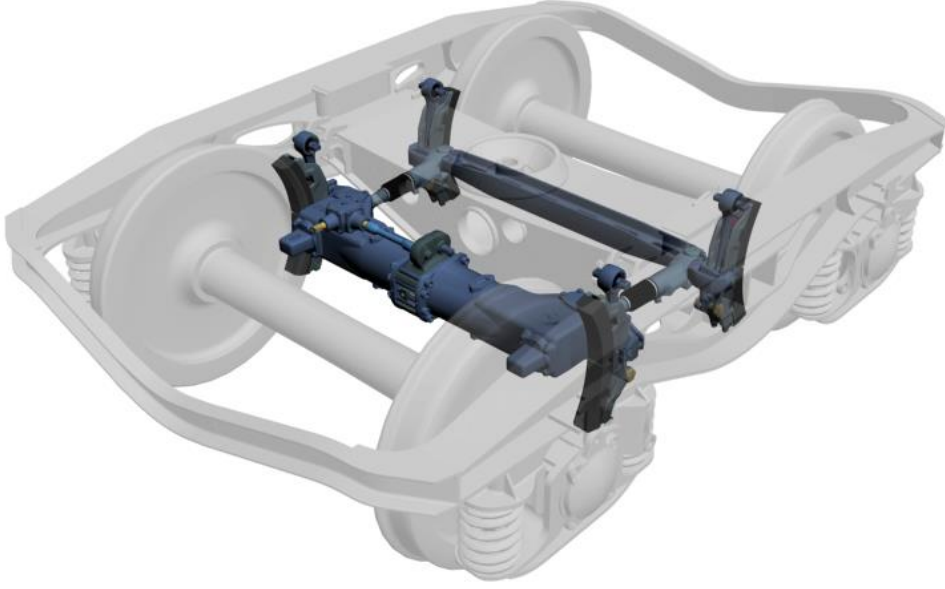


Şekil 2.7 Değişik Sabo-Teker Konfrigasyonu [12]

2.6 Bojiye Monteli Kompakt Fren Sistemi

2015 yılından itibaren TÜDEMSAŞ tarafından üretimine başlanan dingil yükü 22,5 ton olan ve 'S' hız rejimine uygun olan TSI sertifikalı Y25 bojiler de 'Bojiye Monteli Kompakt Fren Sistemi' (CFCB) kullanılmaktadır (Şekil 2.8). Fren silindiri, regülatörü ve el freni boji üzerinde olan bu frende K Tipi kompozit sabo kullanılmaktadır. Sabo tekerleğe tek taraftan basmakta olup Bgu konfrigasyonu kullanılmaktadır. Manivela sayısının ve büyüklüklerinin azalması, çok daha küçük fren silindiri, regülatör, yardımcı hava deposu kullanılması ve el freni mekanizmasının hafiflemesi gibi sebeplerden dolayı iki bojili bir vagona fren sisteminin ağırlığı geleneksel fren sistemine göre yaklaşık 1 ton azalmaktadır. Avrupada da kullanımı yeni olan bu fren sistemi kompakt yapısından dolayı geleneksel sistemle karşılaştırıldığında korozyon, kirlenme, tozlanma gibi dış etkenlere daha dirençli, bakımı daha kolay, gürültü seviyesi daha düşüktür. Ancak şu an için maliyeti daha yüksek olmakla birlikte kullanımın yayılması ile birlikte maliyetinin geleneksel sistemlere yaklaşacağı

öngörülmektedir [13].



Şekil 2.8 Bojiye Monteli Kompakt Fren Sistemi [13]

3. DEMİRYOLU YÜK VAGONLARINDA TEKERLEK SETİ

3.1 Monoblok Tekerlek

ER7 kalite çelikten üretilen tekerlekler dövme-haddeleme yöntemi veya basınçlı döküm yöntemi ile üretilir. Kuzey Amerika'da yük vagonlarında basınçlı döküm yöntemi kullanılarak üretilen tekerlekler kullanılmıştır. Yapılan araştırmalara göre basınçlı döküm yöntemi ile üretilen tekerlek kullanımı, dövme-haddeleme yöntemi kullanılarak üretilen tekerlek kullanımına göre tekerlek ray aşınmasını çok ciddi oranda azaltmaktadır [14]. Döküm tekerlek, UIC tarafından henüz onaylanmamıştır ancak taslak EN standardı hazırlanmaya başlanmıştır. Avrupa ve Türkiye demiryollarında dövme-haddeleme yöntemi ile üretilen tekerlekler kullanılmaktadır. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de dövme-haddeleme yöntemi ile üretilen tekerleklerin kimyasal içerikleri ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 ER7 Çeliğinde bulunan Çeşitli Elementlerin Azami Yüzde Oranları [15]

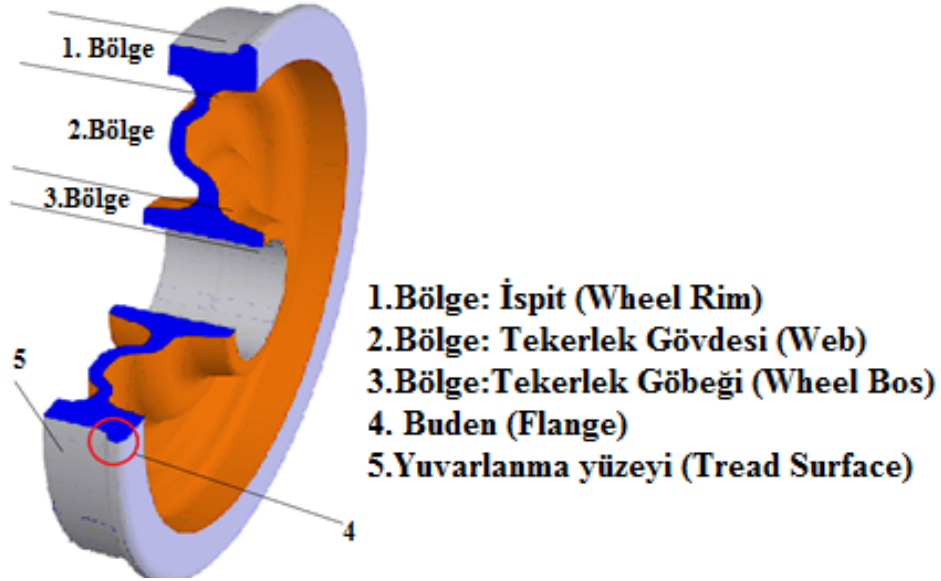
Çelik Kalitesi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
ER7	0,52	0,40	0,8	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

Çizelge 3.2 ER7 Çeliğinin Fiziksel Karakteristikleri [15]

R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A ₅ %	Brinell Sertlik Kategori 1	Brinell Sertlik Kategori 2
≥520	820/940	≥ 14	245	235

Monoblok bir tekerlek kesiti 'İspit', 'Tekerlek Gövdesi' ve 'Tekerlek Göbeği' olarak üç bölgeye ayrılabilir (Şekil 3.1). Ülkemizde yük vagonlarında, anma çapı 1000 mm ve 920 mm olan tekerlek kullanılmaktadır. Bojili yük vagonu tekerleklerinin anma çapı 920 mm olup bu tekerlekler 840 mm çap'a kadar kullanılabilir [16].

Tekerlekler üretilirken ispit bölümünde basma kalıntı gerilimi olacak şekilde üretilir. Basma yüzeyi ise sertleştirilir. Basma kalıntı gerilimi ve yüzey sertleştirme, yorulmaya karşı direnci artırır [17].



Şekil 3.1 Monoblok Tekerlek [18], [19]

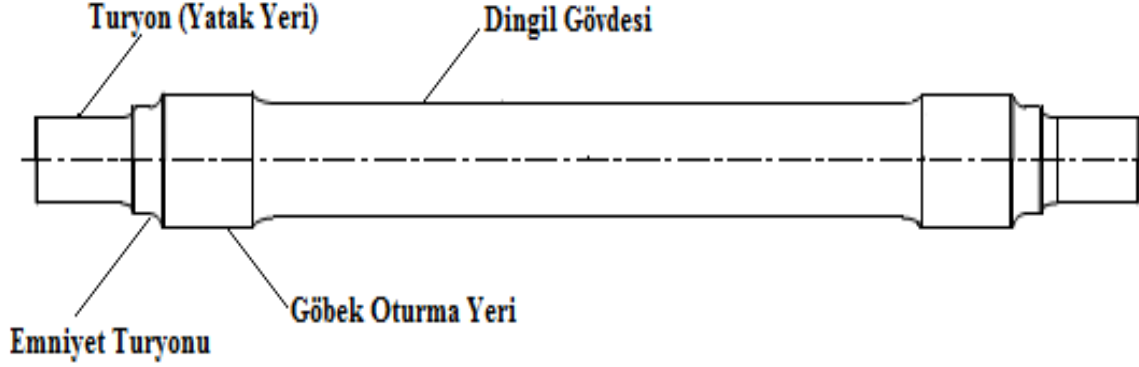
Dövme-haddeleme yöntemi ile üretilen bir tekerleğin üretim aşamaları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Monoblok bir tekerin üretim aşamaları [20]

3.2 Tekerlek Dingili

Yük vagonlarında vakumla gazı alınmış EA1N çelik kalitesinden imal edilmiş, dövme ve haddelenmiş içi dolu dingiller (Şekil 3.3) kullanılmaktadır. Dingillerin mamul özellikleri TS EN 13261 standardında belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Yük Vagonu Tekerlek Setinde Kullanılan Dingil [19]

Dingil bileşiminde bulunan çeşitli elementlerin en yüksek muhteva yüzdeleri Çizelge 3.3 de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Ürün Analizi ile Sınır Değerler [21]

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cr(%)	Cu(%)	Mo(%)	Ni(%)	Vi(%)
0,4	0,5	1,2	0,020	0,020	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06

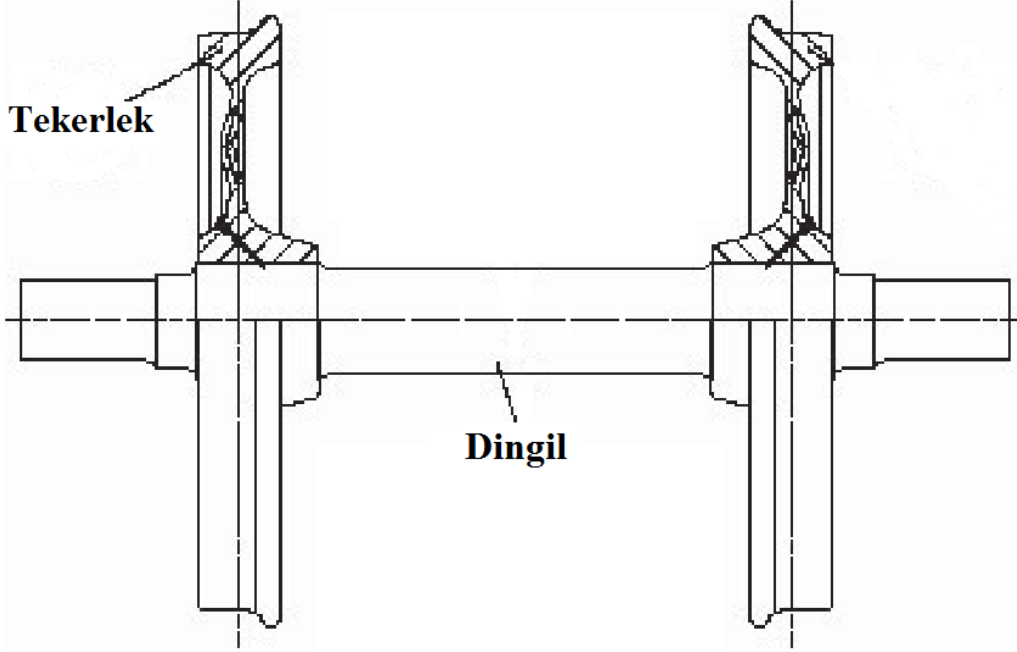
İçi dolu dingilin yarıçapının ortasında veya içi boş dingilin dış ve iç yüzeyleri arasındaki mesafenin ortasında elde edilecek değerler Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Dingil Çeliğinin Fiziksel Karakteristiği [21]

R_{eH} (N / mm ²)	R_m (N / mm ²)	A5 %
≥320	550-650	≥ 22

3.3 Tekerlek Seti

Monoblok tekerleğin, sıkı geçme pres yöntemi kullanarak dingile montaj edilmesiyle tekerlek seti (Şekil 3.4) oluşur. Tekerlek takımının mamul gerekleri TS EN 13260+A1 standardında verilmiştir.



Şekil 3.4 Yük Vagonu Tekerlek Seti [22]

4-YÜK VAGONLARINDA MAKSİMUM YÜK İÇİN FREN HESABI

Makinist farklı amaçlarla, farklı durumlarda çeşitli fren uygulamaları yapabilir. Servis fren uygulaması, tam servis fren uygulaması, acil durum freni uygulaması en önemli fren uygulamalarıdır.

Servis fren uygulamasında kondüvitte ki basınç aşama aşama 5 bar'dan 3,5 bar'a düşürülür buna karşılık olarak fren silindirinde basınç aşama aşama artar. Daha konforlu bir frenleme yaparak durmak veya hız kontrolü yapmak için bu tür frenleme tercih edilebilir.

Bir tam servis fren uygulaması, makinistin, makinist musluğu yardımıyla kondüvitteki basıncı 5 bar'dan 3,5 bar civarına düşürdüğü bir servis fren uygulamasıdır. Bu şekilde yapılan frenlemede maksimum fren etkisi elde edilir.

Acil durum fren uygulamasında makinist, kondüvitteki basınçlı havayı tamamen ve hızlı bir şekilde boşaltır. Bu durumda en kısa zamanda maksimum fren etkisi elde edilir [3].

Yük vagonlarında fren hesapları tam servis fren uygulaması esas alınarak hesaplanmaktadır. Fren hesapları ülkelere göre değişebilen frenleme mesafesi esas alınarak yapılmaktadır. Ülkemizde trenler TSİ ve DRS bölgelerinde 1000 m, diğer bölgelerde 700 m uzaklıkta emniyetle durabilmelerine yetecek kadar fren ağırlığı bulunacak şekilde hazırlanır [2]. TSI standardına göre 120 km/sa hızda gidebilen SS tipi vagonlarda maksimum frenleme mesafesi 700 m minimum frenleme mesafesi 580 m olarak verilmiştir [2]. Frenleme hesapları UIC 544-1 fişinde belirlenmiştir.

Fren hesabı yapılacak örnek vagon olarak TÜDEMSAŞ tarafından üretilen Sgss tipi konteyner vagonu alınabilir. Frenleme kapasiteleri incelenecek tekerlek setlerinin de kullanılabileceği, Y25 Ls(s)d1 bojiye (Şekil 4.1) sahip olan 22,5 ton dingil yüküne sahip Sgss konteyner vagonu yükü birlikte maksimum ağırlığı 90 ton dur. SS hız rejimine sahip olan bu vagon 90 ton toplam ağırlıkta 100 km/sa, 72 ton toplam ağırlıkta 120 km/sa hızla gidebilmektedir. Sgss vagonu yük sensörlü bir vagon olduğu için değişen vagon ağırlığına göre değişen fren kuvveti tekerlekler uygulanmaktadır. Vagonda döküm sabo (P10) kullanılmakta, Bgu tipi sabolar tekerlere iki taraftan basmaktadır. İki adet 16" fren silindirine sahiptir. Aşınmalar sonucu ısıtadaki kalınlık azalması sebebiyle oluşan sabo ve teker arası

mesafe artışına engel olan DRV2A-450-H2 tipi regülatör kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 Sgss Konteyner Vagonu ve Y25 Ls(s)d1 boji

SS hız rejimine sahip olan vagonlarda fren hesapları hızlı etkili frenleme konumuna (P) göre yapılır [6].

4.1 Fren Ağırlığı ve Fren Yüzdesi

'Fren Ağırlığı' terimi demiryollarında araçların frenleme performansını belirtmek için kullanılır. Bu değer UIC 544-1'e göre hesaplama veya test yöntemi ile tesbit edilebilir [23]. 'Fren Ağırlığı Yüzdesi' fren ağırlığının toplam ağırlığa oranının 100 katıdır.

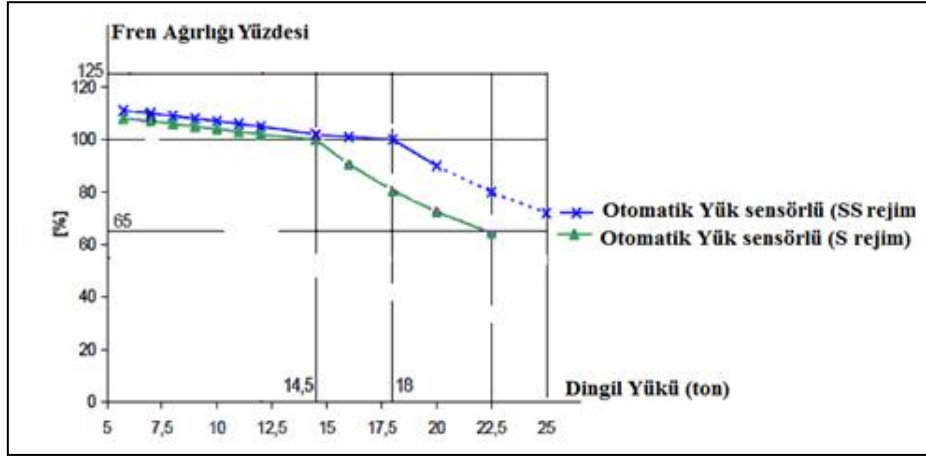
$$\lambda = B \times 100 / m$$

λ : Fren Ağırlığı Yüzdesi (%)

B: Fren Ağırlığı (ton)

m: Toplam Vagon Ağırlığı (ton)

UIC 544-1'e göre S hız rejimine göre tasarlanmış yük sensörlü frene sahip vagonların maksimum ağırlığı için minimum frenleme yüzdesi $\lambda = 65$ verilmiştir. UIC 544-1'e göre SS hız rejimine göre tasarlanmış yük sensörlü frene sahip vagonların minimum fren ağırlığı yüzdesi 72 ton için $\lambda = 100$, 80 ton için $\lambda = 90$ olarak verilmiş olup 90 ton için bu değer hesaplanmamış olmakla birlikte Avrupa demiryollarında fren ağırlığı yüzdesi $\lambda = 80$ olarak alınmaktadır (Şekil 4.2). SS hız rejimine sahip bir yük vagonun 100-120 km/sa hızla gidebilmesi için fren ağırlığı yüzdesi $\lambda = 100$ veya üzeri olmalıdır. Bu sebepten dolayı söz konusu Sgss vagonu bu hızlarla götürülmek istenirse, maksimum ağırlığı 72 ton'u geçmemelidir.



Şekil 4.2 Hız Rejimlerine Göre Dingil Yüğü-Fren Ağırlığı Yüzdesi [3]

Sgss vagonu SS hız rejimine sahip olup 22,5 ton dingil yüküne sahiptir. Dolayısıyla dört dingile sahip olan bu vagonun maksimum ağırlığı 90 ton olup maksimum ağırlık için fren ağırlığı yüzdesi $\lambda=80$ olarak alınmalıdır.

$\lambda=B*100/m$ formülü kullanılırsa 'Fren Ağırlığı' **B=72 ton** bulunur.

4.2 Toplam Sabo Kuvvetinin Hesabı

UIC544-1 göre;

' $B=k \times \Sigma F/g$ ' dir.

B: Fren Ağırlığı (ton)

ΣF : Toplam Sabo Kuvveti (N)

k: Fren Hesaplama Faktörü

g: Yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/sn}^2$)

Döküm sabo (P10) kullanılan, 920 mm anma çaplı tekerleklere sahip olan vagonlarda, Bg ve Bgu konfigürasyonu için bir saboya karşılık gelen fren ağırlığı, sabo kuvveti ve fren hesaplama faktörü değerleri, UIC 544-1'de verilmiştir.

16 tane saboya sahip olan Sgss vagonunda 72 ton fren ağırlığına ancak 2Bgu tipi fren konfigürasyonu ile ulaşılabilmektedir. Bg türü sabonun yüzey alanı Bgu türü saboya göre daha küçük olması bir saboda teker-sabo arası basıncı artırmaktadır. Teker sabo arası basıncın artması fren hesaplama faktörünü düşürmekte dolayısıyla UIC 544-1'de verilen tabloya göre Bg türü döküm sabolar, 22,5 ton dingil yüküne ve SS hız rejimine sahip bir vagon için gerekli fren ağırlığını sağlayamamaktadır.

Çizelge 4.1 Bgu Türü Döküm Sabo (16 adet) İçin UIC 544-1 'de Verilen Değerler

Toplam Fren Ağırlığı 'B'	Fren Hesaplama Faktörü 'k'	Toplam Sabo Kuvveti 'ΣF'
4.5x16=72 ton=72000kg	0,916	48170x16=770120 N

Çizelge 4.1'de verilen tabloya göre toplam sabo kuvveti

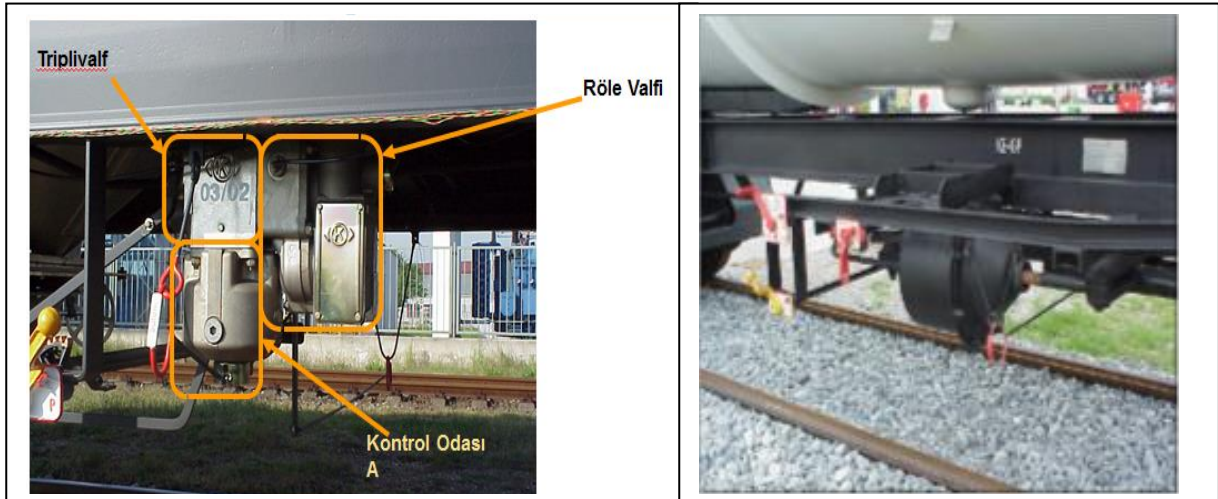
$\Sigma F=770120$ N dur.

Sgss vagonunda toplam 16 adet (Ns) Bgu türü sabo kullanılmaktadır. Bu saboların yüzey alanı (As) 400 cm² dir. Bir sabo yüzeyinde oluşan basınç (Psa) bir saboya gelen kuvvetin sabo yüzey alanına oranlanmasıyla bulunabilir.

' $P_{sa}=(\Sigma F/Ns)/A_s$ ' formülünden $P_{sa}=120$ N/cm² bulunur.

4.3 Silindir Piston Kuvveti

UIC 540 fişine göre tam yükte silindirde oluşacak basınç 3,8 bar olarak belirlenmiştir. Bu basınç distribütör valfi vasıtasıyla oluşturulur. Makinist tarafından kondüvit borusunda ki hava basıncının düşürülmesiyle birlikte distribütör valfi (Şekil4.3.a), kondüvitten yardımcı hava deposuna giden yolu kapatır, yardımcı hava deposundaki yaklaşık 5 bar basınçlı hava, distribütör valfi üzerinden fren silindirine (Şekil 4.3.b) ulaşır. Distribütör valfi, tam yükte fren silindirine giden hava basıncının 3,8 bar olmasını sağlar.

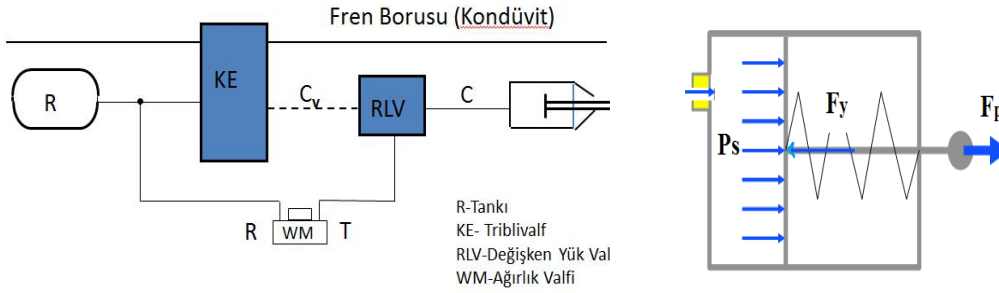


b) Distribütör Valfi

a) Fren Silindiri

Şekil 4.3 Fren Silindiri ve Distribütör Valfi [6]

Şekil 4.4’de Fren Devresi ve Fren Silindirinde Oluşan Kuvvetler verilmiştir.



Şekil 4.4 Fren Devresi ve Fren Silindirinde Oluşan Kuvvetler

Çizelge 4.2 Sgss Vagonunda Kullanılan Fren Silindiri Karakteristiği

Fren Silindir Tipi	Fren Silindiri Sayısı n	Etkili Piston Alanı A_s	Silindir Yay Direnç Kuvveti F_y (UIC544-1)	Tam Yükte Silindir Basıncı P_s (UIC544-1)
BG 16''	2	$1295 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	1500 N	3,8 bar = $3,8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Silindir pistonunda oluşan kuvvet

$$F_p = P_s \times A_s - F_y$$

Çizelge 4.2’de verilen değerler alındığında ‘Piston Kuvveti’

$$F_p = 47710 \text{ N}$$

bulunur.

UIC 540 fişine göre, maksimum ağırlığı 70 ton’u geçen yük sensörlü yük vagonlarında frenleme konumuna göre fren silindiri doldurma ve boşaltma zamanları çizelge 4.3 de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Frenleme Konumuna Göre Doldurma Boşaltma Zamanı

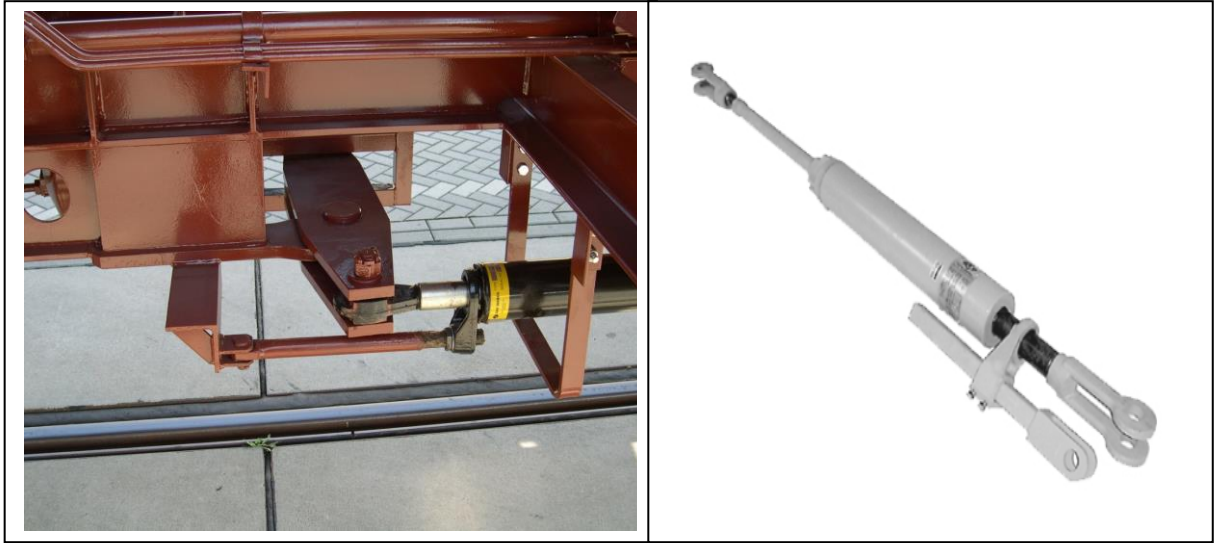
	Frenleme Konumu G	Frenleme Konumu P
Fren Silindiri Doldurma Zamanı	18 sn ile 30 sn arası	3 sn ile 6 sn arası
Fren Silindiri Boşaltma Zamanı	45 sn ile 60 sn arası	15 sn ile 25 sn arası

90 km/sa hızdan daha fazla hız yapılması düşünülen tren katarlarında vagona bulunan G-P kolu yavaş etkili frenleme konumundan (G) hızlı etkili frenleme konumuna (P) alınmalıdır. Frenleme konumu değişikliği azami frenleme mesafesinde vagonun durdurulabilmesi için önemlidir.

4.4 Regulator ve Manivelalar

Pistonda oluşan kuvvet, manivelalar, kollar ve regulator (şekil 4.5) vasıtasıyla sabolara iletilir. Manivelalar genelde pistonda oluşan kuvveti Uygun Frenleme Ağırlığını oluşturacak şekilde artırırlar.

Regulatorun (boşluk ayarlayıcısı) görevi fren pabuçlarında, tekerlek yüzeyinde ve bağlantılarda meydana gelen aşınmalar sebebiyle oluşan boşluğu telafi ederek en iyi kuvvet iletimini sağlamaktır. Bağımsız bir şekilde de yerleştirilebilir ya da fren silindirinin içine ilave edilebilirler. Sabolu frenlerde sũrtũnme elemanlarının aşınmasıyla birlikte tekerlek ve sabo arasındaki mesafe (açıklık) daha da genişler. Daha geniş tekerlek-sabo açıklığı, fren silindirinde daha bũyũk piston stroğu demektir. Eğer gerekli ȃnlemler alınmazsa piston stroku izin verilen değerleri aşar. Otomatik fonksiyonlu regulator kullanarak hemen hemen sabit sabo-teker açıklığı elde edilebilir.



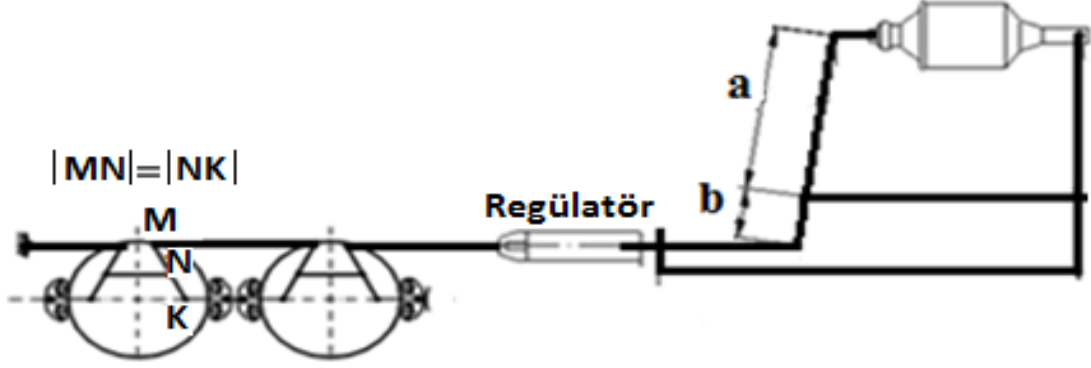
şekil 4.5 Regulator ve Manivela

Sgss vagonunda DRV2A-450-H2 tipi regulator kullanılmakta olup bu regulatorun içinde kullanılan yaylar sebebiyle frenleme esnasında bir miktar karşı kuvvet oluşmaktadır. Bu oluşan karşı kuvvet UIC 544-1 de belirlenmiş olup **2000 N** dur.

Silindir pistonunda oluşan kuvvetin bir kısmı fren donanımında sũrtũnme gibi sebeplerden dolayı saboya iletilememektedir. Fren donanımının verimi UIC 544-1 de **0,83** olarak verilmiştir.

Piston kuvveti silindir-regulator arasında bulunan maniveladan dolayı a/b katına çıkacaktır.

Şekil 4.6 gösterilen regülatör-tekerlek arasındaki manivelalar sebebiyle sabolarda oluşan toplam kuvvet, regülatörün çıkışında oluşan kuvvetin, bir silindirin etki ettiği tekerlek seti sayısının 2 katı ile çarpımına eşit olacaktır.



Şekil 4.6 Sgss Vagonu Yarı Fren Sistemi Şematik Gösterimi

Sgss vagonunda 2 silindir (n=2), 2 regülatör bulunmaktadır. Ayrıca bir silindirin etki ettiği tekerlek seti sayısı 2 (t=2) dir.

UIC 544-1 fişinde toplam sabo kuvvetinin formülü verilmiştir.

$$\Sigma F = n \times (F_p \times \dot{I}_G - \dot{I}_R \times F_R) \times \mu_d$$

Bu formülde Çizelge 4.4 de verilen değerler yazılarak ‘Silindir Sonrası Toplam Fren Oranı’ hesaplanacak olursa

$\dot{I}_G = 9,89$ bulunacaktır.

Çizelge 4.4 Fren Hesabında Kullanılan Bazı Değerler

t	Bir Silindir Kuvvetinin Etki Ettiği Tekerlek Seti Sayısı (2)
\dot{I}	Regülatör Sonrası Fren Oranı =2xt
\dot{I}_G	Silindir Sonrası Toplam Fren Oranı =2xtx(a/b)
F_R	Regülatör Karşı kuvveti (2000 N) - UIC 544-1
F_p	Silindir Piston Kuvveti (47710 N) - Bölüm 4.3’de hesaplandı
n	Vagonda Bulunan Toplam Silindir Sayısı (2)
μ_d	Fren Donanım Verimi (0.83) - UIC 544-1
ΣF	Toplam Sabo Kuvveti (770120 N) -Bölüm 4.2’de hesaplandı

$I_G=2 \times t \times (a/b)$ formülünde $t=2$ yazılırsa

$a/b=2,47$ bulunur.

Manivela uzunluğu genelde 700 mm, bazı durumlarda 840 mm olarak seçilir. Manivela uzunluğu 700 mm olarak seçilecek olursa

$$a+b=700$$

$$a/b=2,47 \text{ için}$$

$$a=498,3 \text{ mm}$$

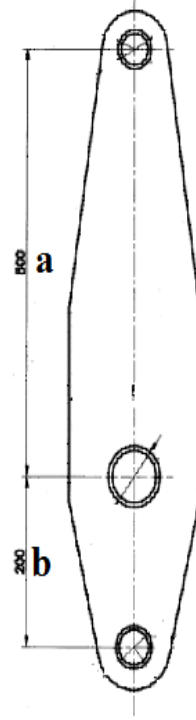
$$b= 201,7 \text{ mm bulunur.}$$

TÜDEMSAŞ tarafından üretilen Sgss vagonunda

$$a=500 \text{ mm}$$

$$b=200 \text{ mm alınmıştır (Şekil 4.7).}$$

Bu ölçülerde üretilen manivela ile gerekli 'Fren Ağırlığı Yüzdesi'ne ulaşılabilecektir.



Şekil 4.7 Sgss Fren Manivelası

4.5 Frenleme Mesafesi

Fren hesapları ülkelere göre değişebilen frenleme mesafesi esas alınarak yapılmaktadır. Ülkemizde trenler; TSİ ve DRS bölgelerinde 1000 m, diğer bölgelerde 700 m uzaklıkta emniyetle durabilmelerine yetecek kadar fren ağırlığı bulunacak şekilde hazırlanır [2].

UIC 544-1 fişinde 'Frenleme Mesafesi (S)', 'Fren Ağırlığı Yüzdesi (λ)' ile 'Vagon Hızına (V)' bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır.

$$‘ S=f (V, \lambda) ‘$$

Uzun yıllar boyunca yapılan ve gözlem ve deneyler sonucunda Fren Ağırlığı Yüzdesi ve Hız değişkenlerine bağlı grafikler elde edilmiş ve formül geliştirilmiştir.

$$‘ S= C /(\lambda+D) ‘ \text{ (UIC 544-1 Ek-B Tek Vagon İçin Fren Mesafesi)}$$

UIC 544-1 de verilen hız rejimine bağlı 'C' ve 'D' değerleri Çizelge 4.5 de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Fren Ağırlığı Yüzdesi ve Hıza Göre Fren Mesafesi Hesabı

Hız (km/sa)	C	D	Maksimum Vagon Ağırlığı (SS Hız rejimi)	Minimum Fren Yüzdesi (λ)	Fren Mesafesi $S=C/(\lambda+D)$
100	52840	10	22,5x4=90 ton	80	587 m
120	83634	19	18x4=72 ton	100	702 m

Şekil 4.2 de verilen grafikte de görüleceği gibi bir vagonun 120 km/sa hızla gidebilmesi için fren konumu, hızlı etkili fren konumuna alınmalı fren ağırlığı yüzdesi %100 değerinin altına düşmemelidir. Bu fren ağırlığı yüzdesi ancak dingil yükü en fazla 18 ton (toplam ağırlık 18x4=72 ton) için sağlanmaktadır. Dingil yükü 22,5 ton (toplam ağırlık 4x22,5=90 ton) için vagon en fazla 100 km/sa hız yapabilmekte ve fren ağırlığı yüzdesi %80 olmaktadır.

4.6 Farklı Yükler için Fren Hesabı

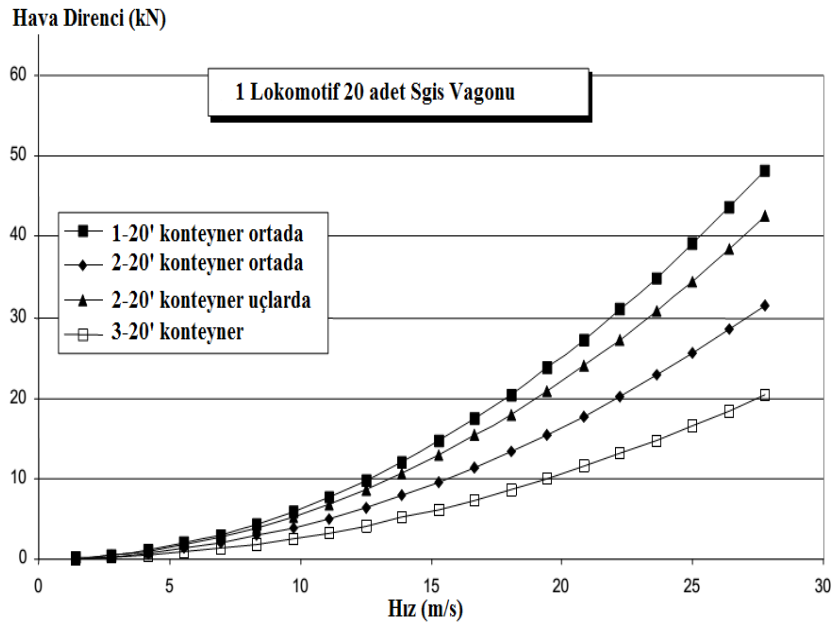
Yük sensörlü vagonlarda, distribütör valfi değişen vagon ağırlıklarıyla birlikte yük sensörlerinden gelen sinyallere göre fren silindirine farklı basınçta hava göndermektedir. Bu basınç değerleri kullanılarak silindir piston basıncı hesaplanabilir. Farklı yükleme senaryoları için Bölüm 4.4 de yapılan hesaplamalara göre üretime karar verilen manivelada belirlenen 'a' ve 'b' değerleri kullanılarak toplam fren kuvveti, fren ağırlığı ve fren ağırlığı yüzdesi hesaplanabilir. Fren ağırlığı yüzdesi ve vagon hızı kullanılarak Bölüm 4.5 de gösterildiği şekilde fren mesafesi hesaplanabilir.

5. VAGONA ETKİ EDEN DİRENÇ KUVVETLERİ

Bir vagona hareket yönüne ters yönde etkiyen çeşitli direnç kuvvetleri mevcuttur. Yuvarlanma direnci, hava direnci, hızlanma ve yavaşlama durumunda atalet (eylemsizlik) direnci, yanal hareketlerle birlikte tekerlek budeni ile ray arasında sürtünme direnci, kurplarda (dönemeç) merkez kaç kuvveti sebebiyle tekerlek budeni (flanş) ile ray arasında oluşan sürtünme direnci ve yukarı yönlü eğimli yollarda yerçekimi kuvveti sebebiyle oluşan direnç kuvveti, vagona etki eden en önemli direnç kuvvetleridir [24].

5.1 Hava Direnci

En önemli iki dirençten biri yuvarlanma direnci diğeri hava direncidir. Hava direnç kuvvetini belirleyen en önemli etkenler vagon tipi, doluluk oranı, vagon hızı, hava yoğunluğudur. Toplam hava direnç kuvveti vagonun dik kesit alanı ve hızın karesi ile doğru orantılıdır [25]. Şekil 5.1' de lokomotif ve 20 adet konteyner vagonunun (Sgis Vagonu) değişen konteyner sayısına göre deneysel yöntem kullanılarak elde edilen hıza bağlı hava direnç kuvvet değerleri verilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre bir vagonda bulunan konteyner sayısı azaldıkça türbülansın artması sebebiyle konteynerler arasında oluşan hava direnç kuvveti artmaktadır [25].



Şekil 5.1 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Hava Direnci Grafiği [25]

5.2 Yuvarlanma Direnci

Tekerlekler ray üzerinde dönerken, tekerlek ray arası temas yüzeyinde yuvarlanma direnci vardır. Tekerleklerde, tekerlek ray değme noktasındaki anlık hız, öteleme hızı ile dönme hızı arasındaki farka eşittir. Bu fark sebebiyle tekerlek-ray değme bölgesinin bir bölümünde mikro kaymalar görülür (Şekil 5.2) [25]. Sabit hızla giden bir araçta yuvarlanma direncini, büyük oranda bu mikro kaymalar sebebiyle oluşan sürtünme kuvveti ve ray-tekerlek arasında oluşan elastik deformasyonlar belirler.

Vagonun durdurulması veya hızlandırılması amacıyla uygulanan kuvvetler sebebiyle vagona ivme meydana gelir. Çekme veya frenleme kuvveti sebebiyle oluşan bu ivmeyle birlikte tekerlek-ray arasındaki değme bölgesinde tutunma yüzeyi azalırken kayma yüzeyi artar. Çekme veya frenleme kuvvetinin artırılmasına paralel olarak tutunma yüzeyi çok azalır ve tutunma yüzeyi oluşmayabilir. Tutunma yüzeyinin oluşmadığı en küçük kuvvetin vagon ağırlığına oranı maksimum tutunma katsayısını verir. Çekme kuvveti bu değere ulaşırsa vagon patinaj yapmaya başlar, frenleme kuvvetinin bu değere ulaşmasıyla birlikte tekerlek bloke olur, dönmez. Her iki durumdada tekerleklerde apletler (tekerlek yüzeyinde düzleşme) oluşur.

$$\xi = \frac{(V - \omega r)}{(V + \omega r)/2} \times 100 \quad [26]$$

ξ : Kayma Oranı

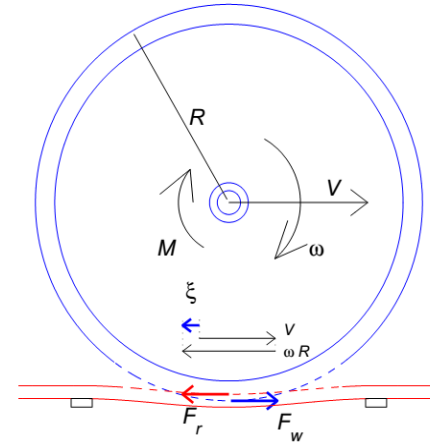
ω : Açısal Hız

Sabit hızla gitmeye çalışan bir vagona 'V' ile ' ωr ' yaklaşık birbirine eşit olduğu için ' ξ ' kayma oranı çok küçüktür.

Sürtünme oranı ' ξ ' arttıkça teker ray arası sürtünme kuvveti artar.

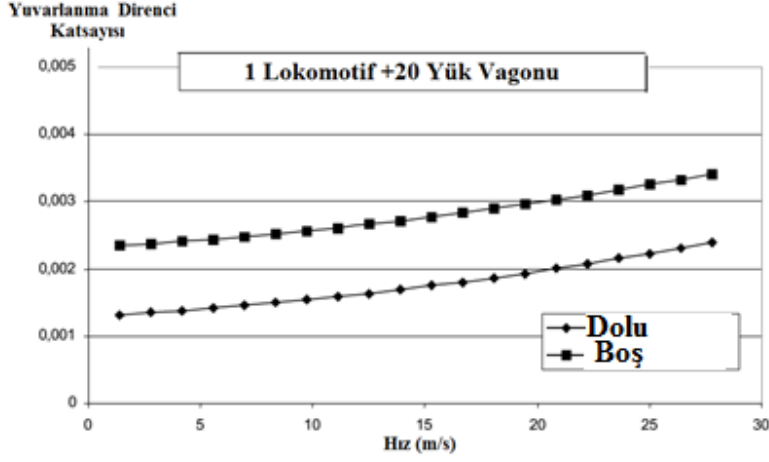
İvmesiz harekette kayma oranı ' ξ ' çok küçük olduğu için tekerlek-ray arası yuvarlanma sürtünme

katsayısı, statik ve dinamik sürtünme katsayısına göre çok küçüktür ve 4×10^{-4} - 8×10^{-4} aralığındadır [28]. Ancak vagonlarda hızla birlikte artan salınım hareketi, tekerleklerde oluşan apletli yüzeyler gibi birçok etkenden dolayı yuvarlanma sürtünme katsayısı daha büyük çıkabilir. Şekil 5.3'de lokomotif ve 20 adet yük vagonunun yüklü ve boş durumu için deneysel yöntemle elde edilen hıza bağlı yuvarlanma direnç katsayısı değerleri verilmiştir [25]. Verilere göre boş vagona yuvarlanma direnci daha fazladır. Bu durumun sebebi boş



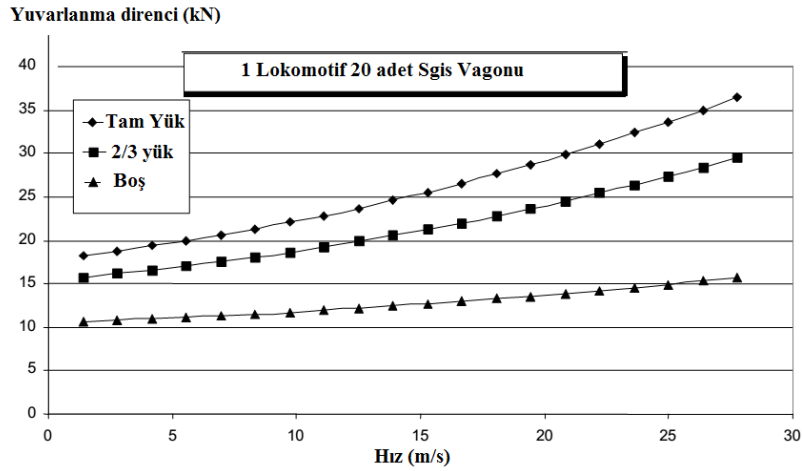
Şekil 5.2 Kayma Oranı ' ξ ' [27]

wagonlarda salınım hareketinin daha fazla olması olabilir. Ayrıca hız arttıkça yuvarlanma direnci artmaktadır



Şekil 5.3 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Yuvarlanma Direnci Katsayısı [25]

Şekil 5.4 de lokomotif ve 20 adet yük vagonunun yüklü ve boş durumuna göre deneysel olarak elde edilen hıza bağlı yuvarlanma direnç kuvveti değerleri verilmiştir [25].



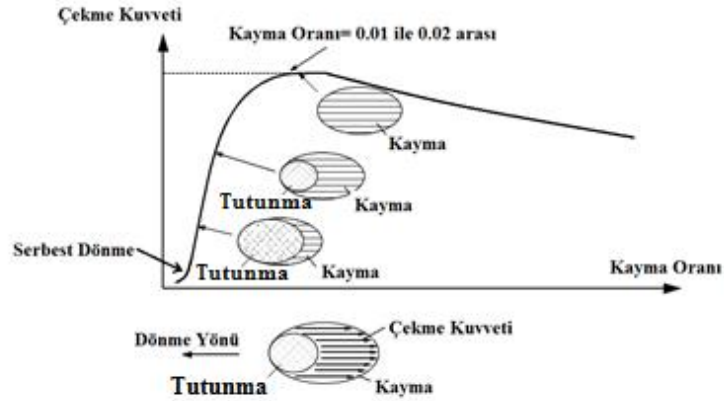
Şekil 5.4 Örnek Bir Tren Katarı İçin Hız-Yuvarlanma Direnci Grafiği [25]

5.3 Atalet (Eylemsizlik) Direnci

Vagonların hızlanması yavaşlaması ilk kalkış ve frenleme esnasında oluşan ivmelenmelerden dolayı atalet kuvvetleri oluşur. Lokomotifin tekerleklerine verilen tahrik kuvvetine raylar tarafından gösterilen tepki kuvveti tren katarının hareketini sağlar. Çekme veya frenleme kuvveti sebebiyle oluşan ivmeli hareket, tekerlek-ray arası kayma oranını 'ξ' artırır.

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi Tekerlek ray arası değme yüzeyi tutunma ve kayma bölgesi

olarak ikiye ayrılabilir. Kayma oranının artmasıyla birlikte tutunma bölgesi azalır kayma bölgesi artar. Kayma oranı (ξ) 0.01-0.02 değerleri arasına ulaştığında maksimum çekme kuvvetine ulaşılmış olur. Bu kayma değerlerinin aşılmasıyla birliktetekerlek-ray arası yüzeyin tamamını kayma bölgesi oluşturur, tekerleğin ray üzerinde dönmesini sağlayan tutunma bölgesi kalmadığı için daha fazla çekme kuvveti elde edilemez, daha fazla çekme kuvveti uygulanırsa tekerlek patinaj yapmaya başlar [29]. Patinaj yapma durumu vagonlarda gözlemlenmez lokomotiflerde gözlemlenir. Patinajla birlikte lokomotifte tekerlek ray arasında sürtünme katsayısı düşeceğinden çekme kuvvetide düşecektir.



Şekil 5.5 Çekme Kuvveti –Kayma oranı (ξ) Grafiği [29]

Tekerleğe gelen kuvvetler Şekil 5.6’da verilmiştir.Maksimum çekme kuvvetinin ağırlığa oranı maksimum tutunma sürtünme katsayısını verir.

$$\mu_{ad} = F_t / F_N$$

F_t : Çekme Kuvveti

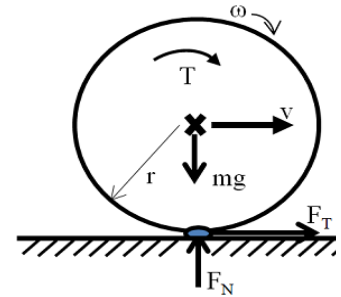
F_N : Ağırlığı Karşılayan Kuvvet

μ_{ad} : Maksimum tutunma (aderans) sürtünme katsayısı

Lokomotiflerde, tekerleklerle ray arasına kum püskürten kum püskürtme sistemi bulunması

durumunda, kumun püskürtülmesi ile birlikte maksimum tutunma sürtünme katsayısı artmakta dolayısıyla cer kuvveti artırılabilir.

Maksimum tutunma sürtünme katsayısı çevre koşullarına bağlıdır. Çizelge 5.1’de değişik çevre koşulları için yaklaşık tutunma (aderans) sürtünme katsayısı verilmiştir [26].



Şekil 5.6 Tekerleğe Gelen Kuvvetler

Çizelge 5.1 Çevre Koşullarına Göre Tutunma (Aderans) Sürtünme Katsayısı [26]

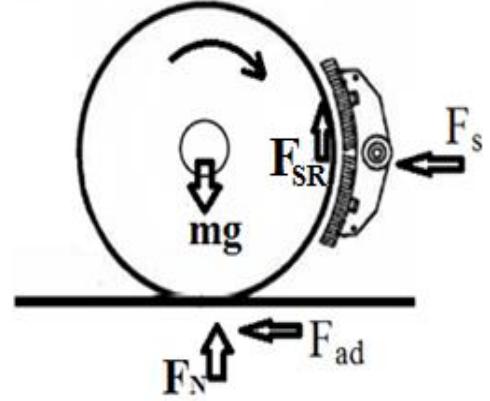
Ray Durumu	Aderans Katsayısı	Ray Durumu	Aderans Katsayısı
Kuru ve temiz	0,25-0,30	Nemli	0,09-0,15
Kuru ve kumlu	0,25-0,33	Hafif karlı	0,10
Islak ve temiz	0,18-0,20	Hafif karlı ve kumlu	0,15
Islak ve kumlu	0,22-0,25	Islak yapraklı	0,07
Gresli	0,15-0,18		

Vagonların frenlenmesi durumunda sabo tarafından tekerleğe uygulanan kuvvet (F_{sa}) tekerlek-sabo arası sürtünmeden dolayı bir kayma sürtünme kuvveti (F_{SR}) oluşturur. Bu kuvvet sebebiyle vagon hareket yönüne ters yönde ivmelenir. Bu durumda tekerlek-ray arasında bir frenleme kuvveti (F_{ad}) oluşur (Şekil 5.7). Maksimum frenleme kuvveti, tekerlek-ray arası maksimum tutunma (aderans) sürtünme katsayısı ile (μ_{ad}) vagon ağırlığına ($F_N=mg$) bağlıdır.

$$F_{ad} = F_N \times \mu_{ad}$$

$$\text{maks}(F_{ad}) = F_N \times \text{maks}(\mu_{ad})$$

Eğer sabo-tekerlek arası kayma sürtünme kuvveti (F_{SR}), maksimum frenleme kuvvetini geçerse tekerlekler bloke olur (dönmez) ve tekerlek dönmeden ray üzerinde kaymaya başlar. Bu durumda tekerleklerde çok ciddi apletler (düzleşmeler) oluşabilir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Tekerleğe Gelen Kuvvetler

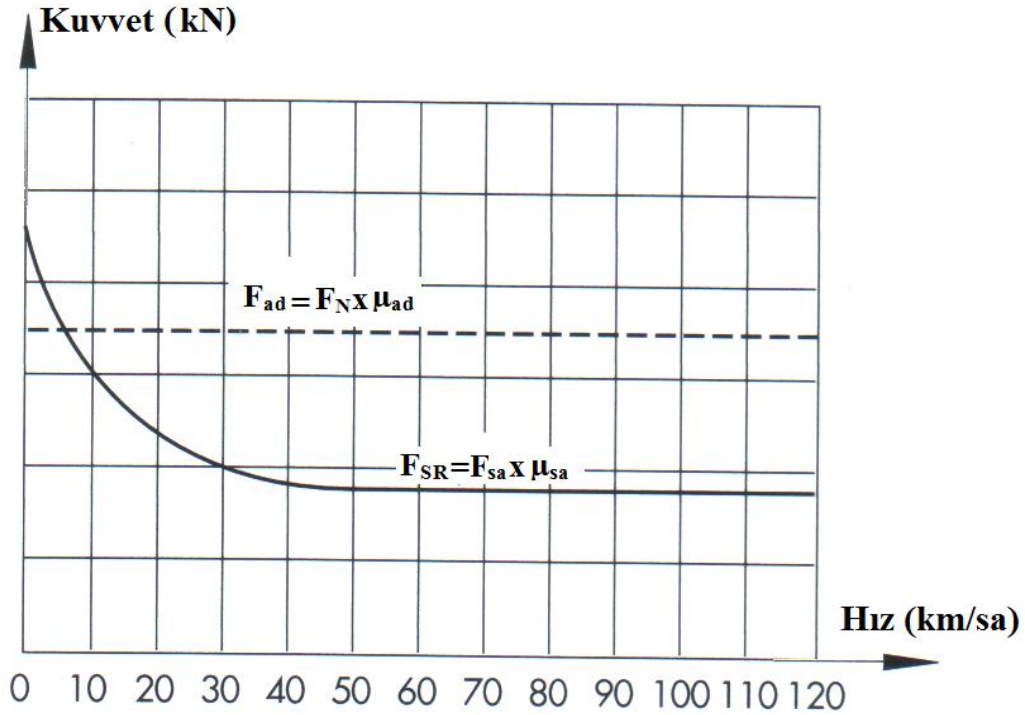


Şekil 5.8 Tekerleklerde Apleti Durumu [22]

Vagonlarda frenleme yapıldığında tekerleklerin bloke olmaması için tekerleklere gelen sabo kuvveti sınırlandırılır. Farklı çevresel koşullarda maksimum tutunma katsayısının düşmesi, dolu-boş kolunun uygun şekilde konumlandırılmaması, uygun olmayan sabo kullanımı, el freninin çözülmemiş olması ve frenlemede yapılan hatalar sonucunda apleti riski artar.

Fren sürtünme kuvveti (F_{SR}), tekerlek sabo arasındaki kayma sürtünme katsayısına ve sabo kuvvetine bağlıdır. Şekil 2.6' da görüleceği üzere düküm (P10) sabolarda kayma sürtünme katsayısı hıza bağlıdır. Çok düşük hızlarda kayma sürtünme katsayısı çok yükselir ve teker- sabo arası sürtünme kuvveti, teker ray arası oluşan maksimum tutunma kuvvetini geçebilir ve tekerlekler bloke olabilir. Bu durumun önlenmesi için makinist frenleme yaparken durmaya yakın bir zamanda frenin çözülmelerini sağlamalıdır.

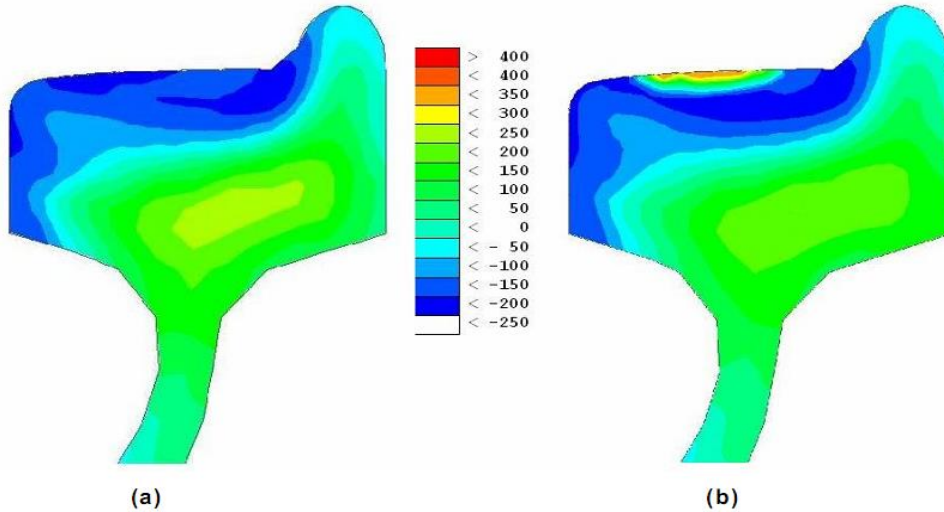
Tekerlekte meydana gelen kuvvetlerin (Şekil 5.7) hıza bağlı olarak değişimi Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9 Maksimum Tekerlek-Ray Tutunma Kuvveti ve Tekerlek Sabo Sürtünme Kuvveti [23]

6. TEKERLEKTE ISIL KAYNAKLI HASARLAR

Seyir güvenliği açısından tekerlekler bir vagonun en kritik elemanıdır. Tekerlek hasarlarının en önemli sebebi, uzun süreli frenleme sonucu tekerleklere aktarılan ısı yükü, tekerleklerin kalıntı gerilimlerinde oluşturduğu olumsuz değişikliklerdir. Kalıntı gerilimler çeşitli üretim/imalat aşamalarından sonra parçada kalan elastik gerilimlerdir. Kaynaklı imalat, döküm, yüzey işlemleri ve ısı işlemler sonucunda malzeme içerisinde homojen olarak dağılmadan kalan plastik deformasyonlar veya ısıl değişimler, kalıntı gerilim oluşmasındaki ana nedenlerdendir. Kalıntı gerilimler parçanın içerisinde kaldığından kullanım sırasında dışarıdan uygulanacak olan gerilimler kalıntı gerilimlerle birlikte parçaya etki eder. Bu nedenle kalıntı gerilim içeren bir parçada, parçaya etkiyen gerçek yükleme durumu analiz/hesaplama sonucunda tahmin edilenden çok farklı olabilir [31]. Tekerlekler üretilirken ısıta yuvarlanma yüzeyi bölümünde basma kalıntı gerilimi olacak şekilde üretilir (Şekil 6.1 a). Basma yüzeyi ise sertleştirilir. Basma kalıntı gerilimi ve yüzey sertleştirme, yorulmaya karşı direnci artırır [17]. Kullanılan tekerleklerde frenleme sonucu oluşan ısıdan dolayı yüzeydeki basma gerilimi zamanla çekme gerilimine dönmektedir (Şekil 6.1.b). Bu durum Yorulma Çatlaklarının (Isıl Çatlakların) oluşmasına, büyümesine sebep olabilmektedir [32]. Tekerleklerde oluşan kalıntı gerilimlerin büyüklükleri EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer), PET (Piezo-Electric Transducer) (Şekil 6.2) gibi ultrasonik gerilim ölçme aletleri ile tesbit edilebilir [33].



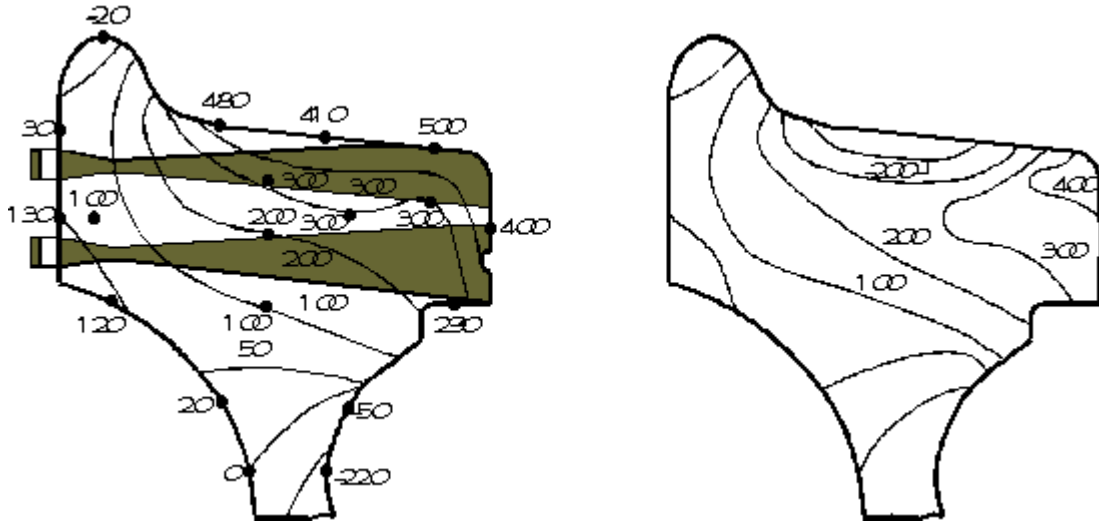
Şekil 6.1 Yeni Tekerlek (a) ve Kullanılmış Tekerlek (b) İçin Örnek Kalıntı Gerilim Değerleri (MPa) [32]



Şekil 6.2 EMAT ve PET Yöntemi ile Tekerlek Kalıntı Gerilim Ölçümü [33]

TS EN 13262+A2 standardına göre yeni tekerlekte yuvarlanma yüzeyine yakın ölçülmüş çevresel kalıcı basma gerilmeleri seviyesi 80 MPa ile 150 MPa arasında olmalıdır. Bu gerilmeler 35 mm ve 50 mm arası bir derinlikte sifira eşit olmalıdır [15].

Kullanımda olan R6 ve R7 kalite çelikten yapılan Kategori-2 tekerleklerin eğer tokluk değeri biliniyorsa kalıntı çekme gerilim sınırı 400 MPa dır [16].



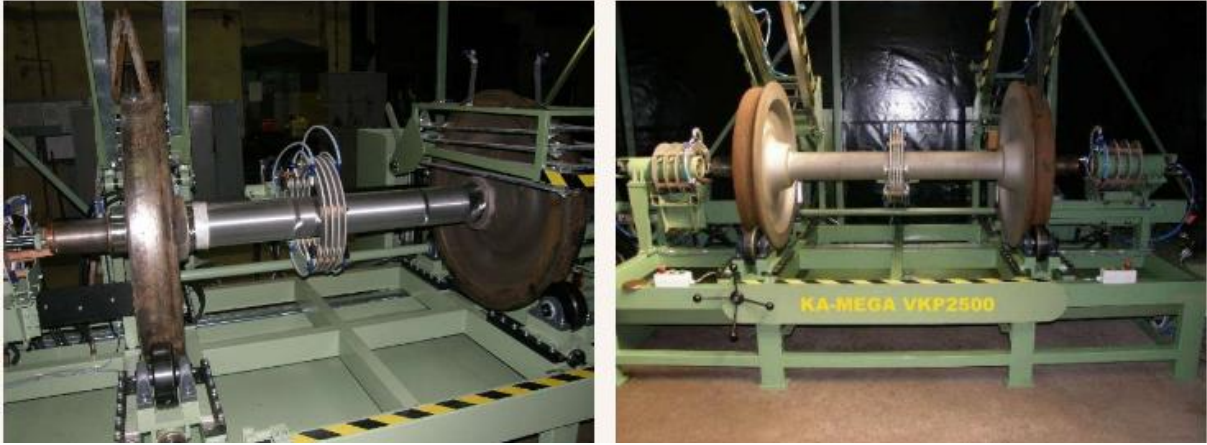
Şekil 6.3 Fren Tezgaahında Ağır Fren Yapılmış Tekerlek (sol) ve Kullanımda Olan Tekerlek İçin Örnek Kalıntı Gerilimi (sağ) (MPa) [34]

Monoblok tekerlek gövdeleri ısıya duyarlı bir boya sistemi ile 100 µm lik kuru tabaka olacak şekilde kaplanmalıdır. Isıya duyarlı boya ile kaplanmış tekerlekler aşırı ısıl yüke maruz kalmaları halinde boyanın renginde değişiklikler olur.

Aşırı ısıl yüklenme belirtileri aşağıdaki gibidir:

- Tekerlek gövdesinde belirgin düzeyde birikmiş boya yanıkları
- Tekerlek ispitinde oksitlenme izleri
- Fren sabolarında erime ve metal yığılması
- Tekerlek arası mesafenin artması [35].

Yüzeyden başlayan veya yüzeyin hemen altında yer alan kusurların tespit edilmesi için manyetik parçacık testi (Şekil 6.4) yapılır. Bu test ince çatlakların gözle görünür hale gelmesini sağlamaktadır. Son derece küçük çatlaklar bile bu testte net bir şekilde görülebilmektedir. Tekerleğin ispit kısmının iç bölgesinde olabilecek çatlakların tesbiti için tekerlek ultrasonik teste (Şekil 6.5) tabi tutulur. Yapılan testler sonucunda çatlak tesbit edilen tekerlekler ve yapılan kalıntı gerilim testi sonucunda, izin verilen kalıcı çekme geriliminin aşıldığı ortaya çıkan monoblok tekerlekler yenileriyle değiştirilmelidir [35].



Şekil 6.4 Tekerlek Seti İçin Manyetik Parçacık Testi

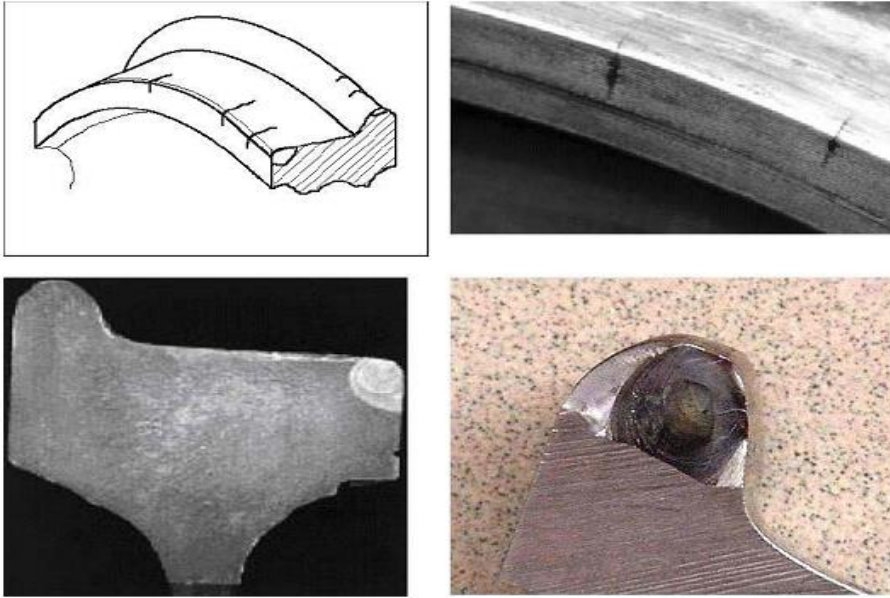


Şekil 6.5 Ultrasonik Test İstasyonu

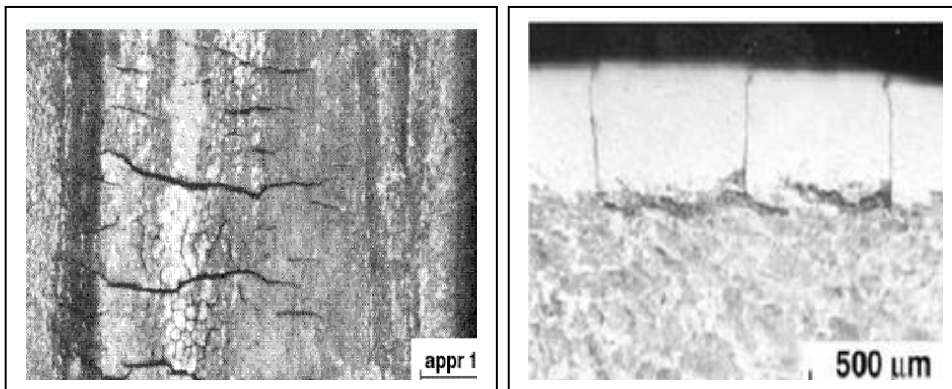
Tekerleklerde gözlemlenen hataların büyük bir bölümü tekerleklerin aşırı ısınmasıyla alakalıdır. Isıl çatlaklar (yorulma çatlakları) (Şekil 6.6), tekerlek yüzeyinde oluşan oyuklanma ve kabuklanma, tekerlek yüzeyinde oluşan yığılmalar, apletli yüzeyler, tekerlek yüzeyinde yanlara yayılma en çok gözlemlenen arızalardır [36].

6.1 Isıl Çatlaklar

Sürtünme sonucu aşırı ısı yüküne maruz kalan tekerlek yüzeyi ve ispitinde oluşan sıcaklık ostentik sıcaklığı geçer ve yeterince hızlı bir şekilde soğursa martenzit oluşumu gerçekleşebilir (Şekil 6.7). Bu durum tekerlekte çatlak oluşumunun ve tekerlek kırılmalarının önemli sebebidir [37].



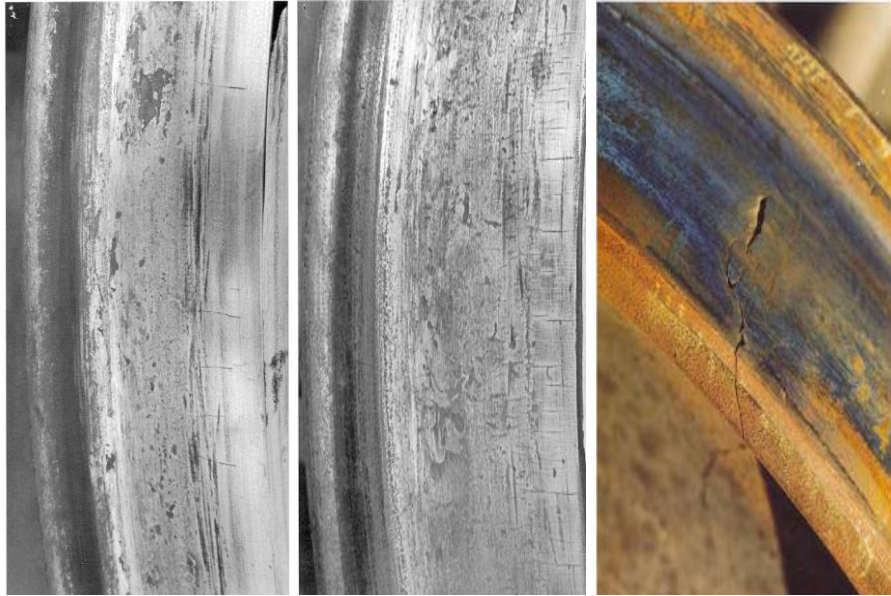
Şekil.6.6 Isıl Çatlaklar [22]



Şekil 6.7 Martenzit Göstergesi Beyazlaşmış Bölgeler [38]

Isıl çatlaklar tekerlek arızalarının en tehlikelidir. Aşırı ısıl yüke maruz kalan tekerlekler çatlak testleri için ultrasonik çatlak testine, mağnetik parçacık testine, oluşan iç gerilimlerin tesbiti için kalıntı gerilim testine (EMAT, PET vb.) tabi tutulmalıdır.

Yüzeyde görülen çatlaklar 30 mm ile 40 mm arası olması durumunda, 3.dereceden ısıl çatlak kabul edilir. Bu durumdaki yük vagonları tamire gönderilir. Yüzeyde görülen çatlaklar 40 mm den fazla veya ispitin buden kısmında yada tekerleğin diğer köşesine yakın bölgede uzunluğu 10 mm den fazla olan ısıl çatlaklar, 4.dereceden ısıl çatlak kabul edilir (Şekil 6.8). Bu durumdaki yük vagonları 40 km/sa daha düşük hızda tamire gönderilir, ilgili tekerleğin bulunduğu vagonun freni iptal edilmelidir. Çatlak, ispit yüzeyinden tekerlek gövdesine doğru ilerlemiş ise 5.dereceden ısıl çatlaktır. Bu durumda vagon hareket ettirilemez [39].



Şekil 6.8 Tekerlekte 3.Derece, 4.Derece ve 5. Derece Çatlak Resimleri [39]

Frenleme sonucu oluşan ısıl yükün büyük bölümü tekerlek üzerinden atılır. Döküm sabo yerine kompozit sabonun kullanılması bu oranı daha da artırmaktadır. Aşırı ısıl yükle yüklenmiş tekerlek hızlı bir şekilde soğuduğunda plastik deformasyonlarla birlikte kalıntı (residual) gerilimler oluşur. Yeterince büyük kalıntı gerilimle birlikte tekerlek yüzeyi köşesinde çatlak oluşumu başlar ve ilerleyerek tekerleğin kırılmasına sebep olabilir (Şekil 6.8) [40].



Şekil 6.9 Tipik Bir Tekerlek Kırığı [40]

6.2 İspit Yüzeyinde Oyuklanma Veya Kabuklanma

Tekerlek - ray veya tekerlek -sabo arasında, ısıl sebeplerden dolayı değme yüzeyleri kaynak olur ve kırılır böylece çukur veya kabuklaşmış yüzey oluşur (Şekil 6.10). Oyukların çapı 12 mm geçmiyor ve oyuklanmış bölge tekerlek yüzeyinin (buden hariç) en fazla % 10'u kadar ise 1.dereceden oyuklanma olarak kabul edilir. Oyuk çapı en fazla 25 mm olup oyuklanmış bölgenin kapladığı alan, yüzey alanının en fazla % 20'si ise 2. dereceden oyuklanma olarak kabul edilir. Oyuk çapı 25 mm den fazla, oyuklanmış bölgenin kapladığı alan yüzey alanının en fazla % 50'si ise 3. dereceden oyuklanma olarak kabul edilir ve bu durumdaki yük vagonu sefer sonrası servis dışına alınır. Yüzey torna edilerek tekerlek tamir edilir. Oyuklanmış bölgenin kapladığı alan yüzey alanının en fazla % 50'si ise veya budende oyuklanmalar mevcut ise 4. dereceden oyuklanma olarak kabul edilir ve bu durumdaki yük vagonu sefer sonrası servis dışına alınır. Vagonun hızı 40 km/sa geçemez [39].



Şekil 6.10 1. , 2. , 3. ve 4. Dereceden Oyuklanma Olan Tekerlekler [39]

6.3 Tekerlek Yüzeyinde Yığılma

Frenleme esnasında tekerleklerde kayma, bloke olma gibi durumlarda malzeme ısınıp yeterince yumuşadığında tekerlek yüzeyine doğru akar. Bu bölgede bulunan toz veya yabancı maddelerle birleşir ve soğur böylece yüzeyde bir birikinti oluşturur. Metal yığılması yüksekliği 1mm kadar ise 3.derecen bir yığılma, 1 mm ile 15 mm arası ise 4. dereceden yığılma, metal yığılması 15 mm' den fazla ise 5.dereceden yığılma olduğu kabul edilir (Şekil 6.11) [38].



Şekil 6.11 3., 4. ve 5. Dereceden Yığılma Olan Tekerlekler [39]

6.4 Apletli Yüzeyler

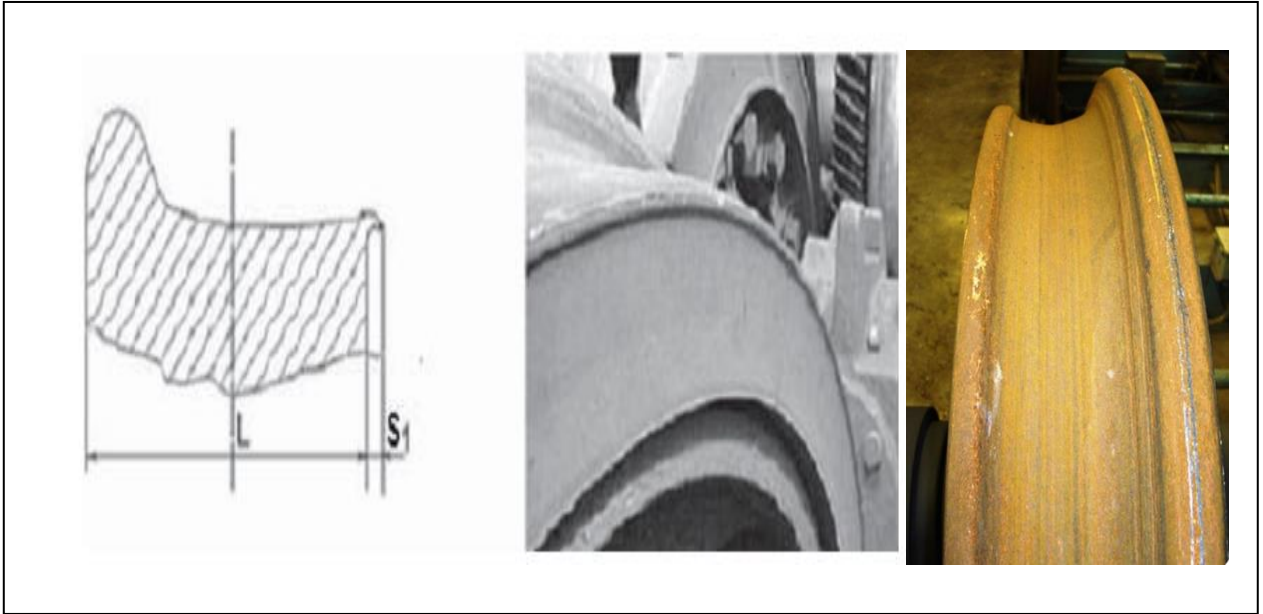
Frenleme esnasında tekerleğin bloke olup dönmemesi veya hareket halinde tekerleğin ray üzerinde kayması ile oluşan düzleşmiş yüzeylerdir (Şekil 6.12). Bir adet apleti var ve bunun uzunluğu 40 mm ile 60 mm arası ise 3. dereceden apleti vardır ve bu durumdaki vagon en fazla 40 km/sa hızla tamirata yapılacak yere kadar götürülebilir. Bir adet apleti var ve bunun uzunluğu 60 mm ile 100 mm arası ise 4. dereceden apleti vardır ve bu durumdaki vagon en fazla 25 km/sa hızla tamirata yapılacak yere kadar götürülebilir. Bir adet apleti var ve bunun uzunluğu 100 mm' den fazla ise 5. dereceden apleti vardır (Şekil 6.12) ve bu durumdaki vagon hareket ettirilmez.



Şekil 6.12 3. , 4. ve 5. Dereceden Apleti Olan Tekerlekler [39]

6.5 Tekerlek Yüzeyinden Yan Tarafıya Yayılma

Fren yapılan tekerleklerde oluşan ısı sebebiyle çelik yumuşayabilir ve tekerlek yüzeyi yanlara doğru yayılabilir (Şekil 6.13). Daha ileri durumlarda tekerleğin yan tarafında yeni bir buden oluşabilir.



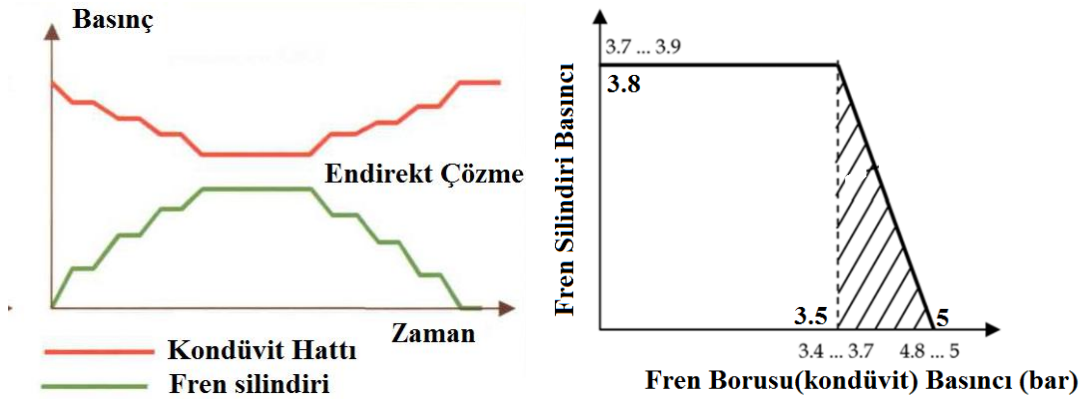
Şekil 6.13 Tekerlek Yüzeyinin Yanlara Doğru Yayılması [22]

7-TEKERLEKLERİN FREN KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI

7.1 Fren Kapasitenin Hesaplanması İçin Referans Senaryo

Gerek vagonun fren performansı gerek tekerleğin fren (ısıl) kapasitenin tesbiti için referans senaryo olarak en büyük frenleme enerjisini oluşturacak senaryo alınmalıdır. Referans senaryo olarak aşağı yönde eğime sahip bir yolda V_a hızında ki bir vagonun hızının sabit tutulması için t_a zamanı süresince frenleme yapılarak, tekerlek sabo arasına P_a ısıl gücünün uygulanması alınabilir. Deney yeni bir tekerlek (anma yuvarlanma yüzeyi çapı 920 mm) ile aşınmış bir tekerlek (yuvarlanma yüzeyi çapı aşınma sınırında 840 mm) için yapılmalıdır [41].

Çekme freni kısmi fren uygulamasıdır. Aşağı yönlü eğimli yollarda trenin hızını sabit tutmak için bir zaman periyodunda uygulanan fren türüdür [42]. Servis freni kademeli bir frendir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Kademeli Fren Durumunda Kondüvit - Fren Silindir Basınç Diagramı [3]

Seçilecek referans senaryoda çekme freni uygulanarak vagonun hızının sabit tutulması için gerekli frenleme enerjisi, fren hesaplarında tam yükte sabonun tekerleğe uyguladığı fren kuvveti ve sabo fren arası sürtünme katsayısı kullanılarak hesaplanabilir. Ancak çekme freninde UIC 510-5 göre fren yapma ve fren çözme şeklinde periyodik şekilde fren yapılması (sürekli olarak yapılmaması), frenin kademeli fren olması, her fren kademesi için farklı fren kuvvetlerinin oluşması ve sabo-teker sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişmesi gibi sebeplerden dolayı fren hesaplarında tam yük için bulunan fren kuvveti ve sürtünme katsayısı kullanılarak referans vakada frenleme enerjinin hesaplanması zordur.

TSI dokümanlarına göre frenin ısıl kapasite deneyinde 920 mm tekerlek anma çapı ve 22,5 t dingil yükü için referans senaryo, % 21 aşağı yönlü eğimde 40 km boyunca vagon hızı 70 km/sa sabit tutmak için, tekerlek başına 45 kW ısıl güç uygulaması alınabilir [2], [43].

Referans senaryoda dingil yükü 22,5 ton olan 4 dingilli bir vagon (90 ton) 40 km boyunca ‰ 21 aŒađı yönlü eğimde kaybettiği potansiyel enerji E_p hesaplanabilir.

$$E_p = m \cdot g \cdot h = 90000 \cdot 9,80665 \cdot (40000 \cdot 21 / 1000) = 741382,7 \text{ kJ}$$

Vagonun hızının artmaması için bu enerji frenleme yolu ile kinetik enerji yerine ısı enerjisiye dönüŒtürülmelidir.

Bir tekerlekte frenleme ile ısı enerjisiye dönüşen enerji E_{tek} ;

$$E_{tek} = E_p / 8 = 92672,8 \text{ kJ bulunur.}$$

Referans vakada süre ' t_a ', (40/70) saat, yaklaşık 34 dakikadır.

Buradan bir tekerleğe uygulanan ısı gücü ' P_a ' hesaplanabilir.

$$P_a = E_{tek} / t_a = 92672,8 / 2057 = 45 \text{ kW}$$

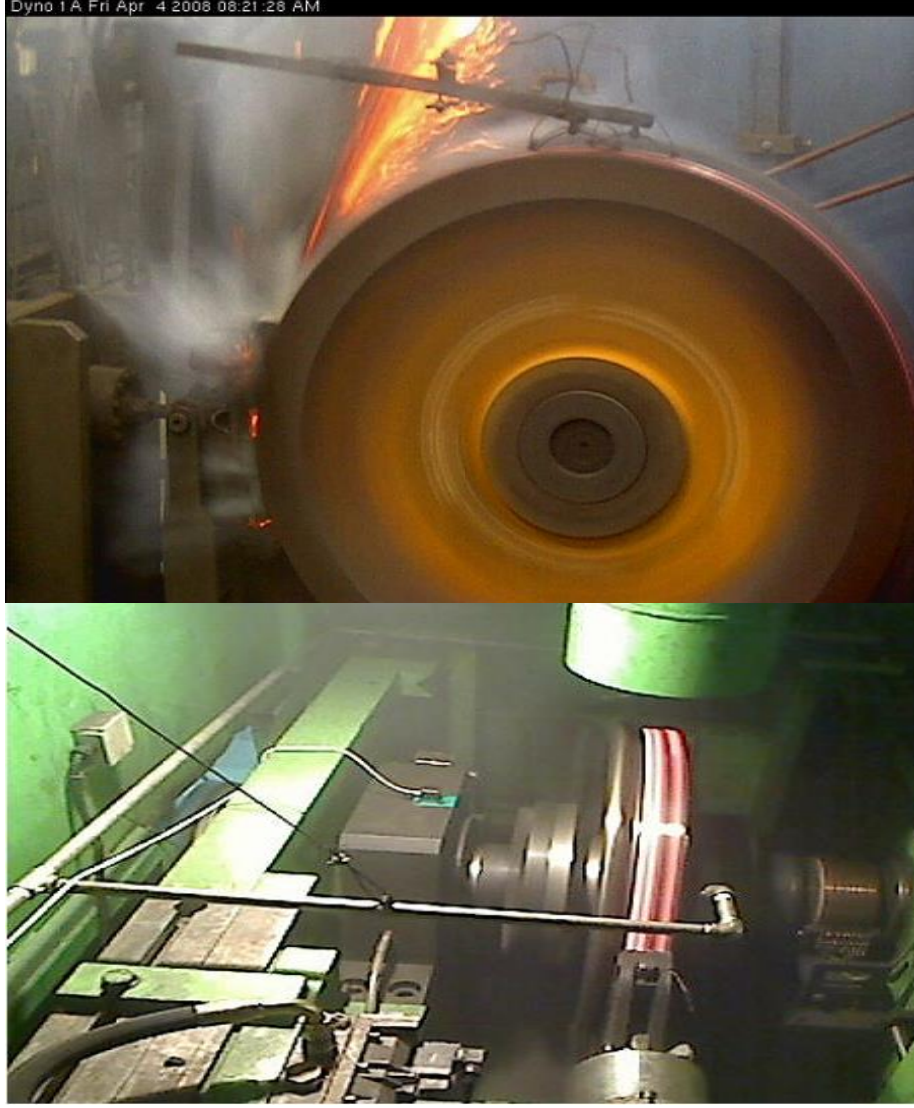
Hesaptan da görüleceği üzere TSI dokümanlarında verilen referans vakaya göre hızı sabit tutulması gereken vagonun potansiyel enerjisindeki azalma, tamamıyla frenleme yoluyla ısı enerjisiye dönüŒtüđu kabul edilmiŒtir. Hava direnci gibi bazı dirençler ihmal edilmiŒtir.

Tekerleklerin termomekanik özelliklerinin tesbiti için referans senaryo, TSI ve OTIF'de fren kapasitesinin karşılaştırılması için verilen referans senaryo ile aynıdır [2]. Referans senaryo değerleri Çizelge 7.1'de verilmiŒtir. Referans senaryoya göre, tekerlek yeni ve sınır değerlerinde iken fren kapasite incelenmelidir

Çizelge 7.1 Tekerlekte Isıl Kapasitenin belirlenmesi İçin Referans Senaryo Değerleri

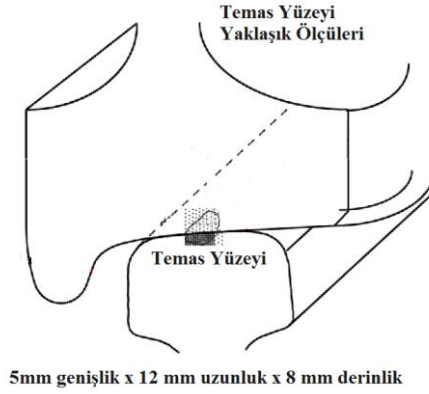
Sembol	Tanım	Birim	Değer
m	Her Tekerleğe Düşen Araç Kütle	kg	22500/2=11250 kg
g	Serbest düşme ivmesi	m/s ²	9.80665 m/s ²
α	Hattın ortalama eğimi	‰ olarak eğim	‰ 21(binde 21)
t _a	Zaman (deney süresi)	s	2040 s (34 dak)
V _a	Araç hızı	m/s	19,44 m/s (70 km/saat)
P _a	Bir Tekerlek Uygulanan Isıl Güç	kW	45 kW
dt	Tekerlek Çapı (anma çapı 920 mm)	mm	Maks: 920 mm (yeni) Min: 840 mm (aşınma sınırı)
ks	Döküm Sabo Kalınlığı (2Bgu)	mm	Maks: 60 mm (yeni) Min: 15 mm (aşınma sınırı)

Tekerleklerde termomekanik davranışın değerlendirilmesi için TS EN 13979 frenleme tezgah (fren dinamometre) deneyi (Şekil 7.2) istenmektedir. Frenleme tezgah (fren dinamometre) deneyi demiryolu araçlarının fren performansının simülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [44].

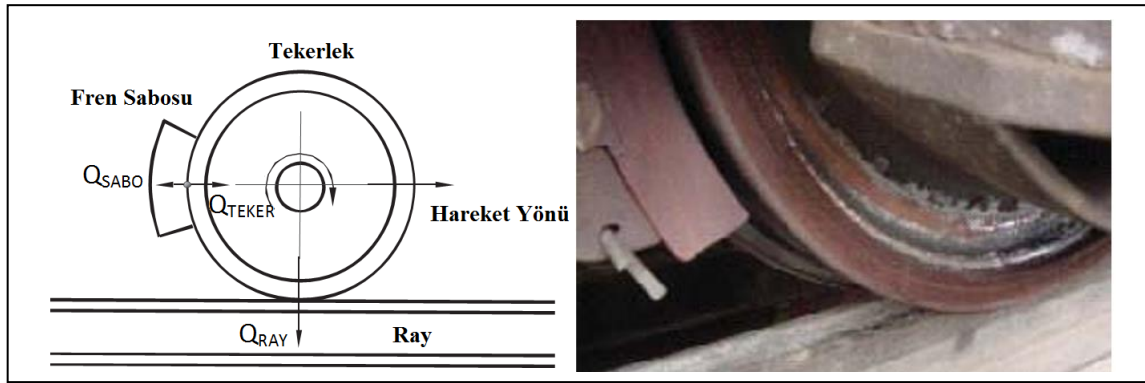


Şekil 7.2 Tekerlek İçin Frenleme Tezgah Deneyi [44], [17]

Tekerlek-ray arasında sürtünme kuvvetleri vagona frenleme etkisi yapması sebebiyle frenleme kuvvetine eklenmiş kabul edilebilir. Çünkü frenleme gücü hesaplanırken vagonun kaybettiği potansiyel enerjinin tamamıyla ısı enerjisiye çevrildiği varsayılmıştır ve bu enerjinin bir kısmı ray tekerlek arasında oluşmaktadır. Ama ray tekerlek arası temas bölgesinin küçüklüğü (Şekil 7.3) sebebiyle rayların soğutma etkisi bir başka ifadeyle kondüksiyon yolu ile tekerlekten raya transfer edilen (Şekil 7.4) ısı miktarı sonucu çok etkileyecek bir parametre olarak alınmayabilir. Frenleme tezgahında rayların soğutma etkisi göz önüne alınmamıştır.



Şekil 7.3 Yüke Göre Değişen Tekerlek-Ray Temas Yüzeyi Yaklaşık Ölçüleri [45]



Şekil 7.4 Isının İletim (Kondüksiyon) Yoluyla Yayılması

TSI ve TS EN 13979 verilerine göre ısı kapasitenin belirlenmesinde, sıcaklığı 45 °C olan kuru hava, çevre koşulları için kötü senaryo olarak alınabilir [2],[41].

Frenleme esnasında tekerlek sabo arasında oluşan ısı enerjinin önemli bölümü tekerleğe bir bölümü ise saboya geçmektedir. ERRI datalarına göre döküm sabo kullanılması halinde ısı enerjinin yaklaşık % 70'i tekerleğe geçmektedir [46], [18]. Bu oran sinterli kompozit sabo kullanıldığı takdirde yaklaşık % 90, organik kompozit sabo kullanılması halinde ise yaklaşık % 95 olmaktadır [12], [18]. Döküm sabo (P10) kullanılması halinde tekerleklerde ısı geriliminin daha az olacağı görülmektedir. Ancak 23 Haziran 2006'da yürürlüğe giren TSI-Noise ve 1 Aralık 2012'de yürürlüğe giren COTIF UTP-Noise adlı Avrupa Birliği ve OTIF dokümanlarında, yeni üretilen ve mevcut yük vagonlarının meydana getirdiği gürültünün ölçümü ve sınır değerleri belirlenmiştir. TSI gürültü sınır değeri yeni yük vagonları için 80 km/saat hızda birim uzunluktaki dingil sayısına bağlı olarak 82-85 dB(A) iken, yenilenmiş yük vagonlarında 84-87 dB(A) dır [8]. Bu gürültü seviyesinin sınırları içinde kalmak döküm

sabo kullanılan vagonlarda çok zordur. Kompozit sabo, gürültüyü pik saboya göre % 50 kadar azaltmaktadır [9].

Standartlara göre, senaryoda verilen çekme freni uygulaması sonrasında yeni tekerleklerde, tekerleğin sabo basma yüzeyinin 9 mm altında maksimum sıcaklık değeri 500°C'yi ve aşınmış tekerleklerde tekerleğin sabo basma yüzeyinin 9 mm altında maksimum sıcaklık değeri 600°C'yi geçmemelidir. Rayların soğutma etkisi bu senaryoda göz önüne alınmaz [47], [12].

7.2 FEM (Sonlu Elemanlar Metodu) Analizi

Isıl etkilerin belirlenmesi için model oluşturmak demiryolu için büyük önem arz etmektedir. Bilgisayar simülasyonu, mühendisler için yeni dizaynlar üretmek, var olan dizaynlar arasından uygun olanı seçmek açısından deneysel deneme yaparak sonuca ulaşmaya göre daha hızlı ve ekonomik açıdan çok daha uygundur [48].

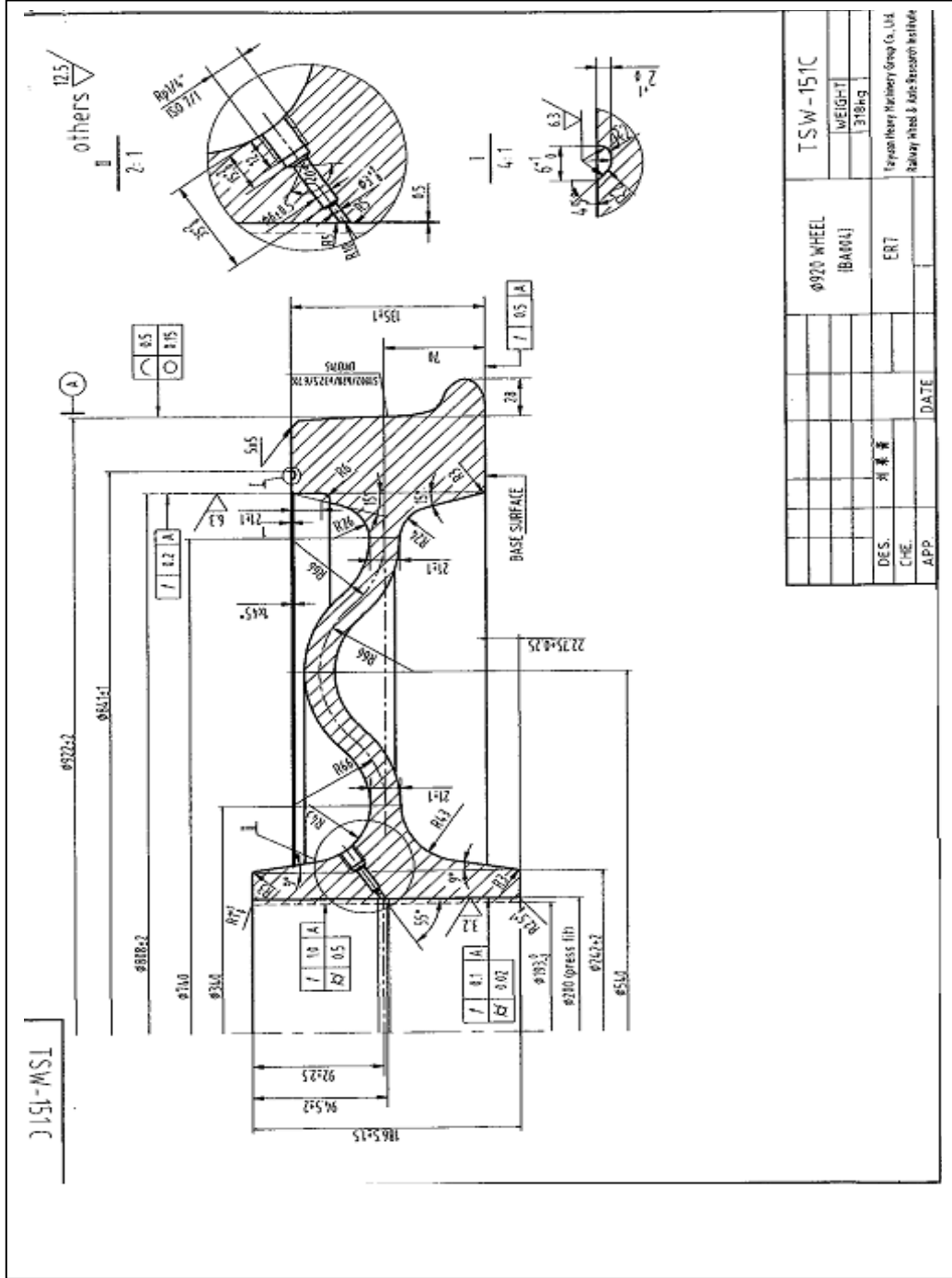
Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. Sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir [49].

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodu kullanılacak tek metod olmaktadır [49].

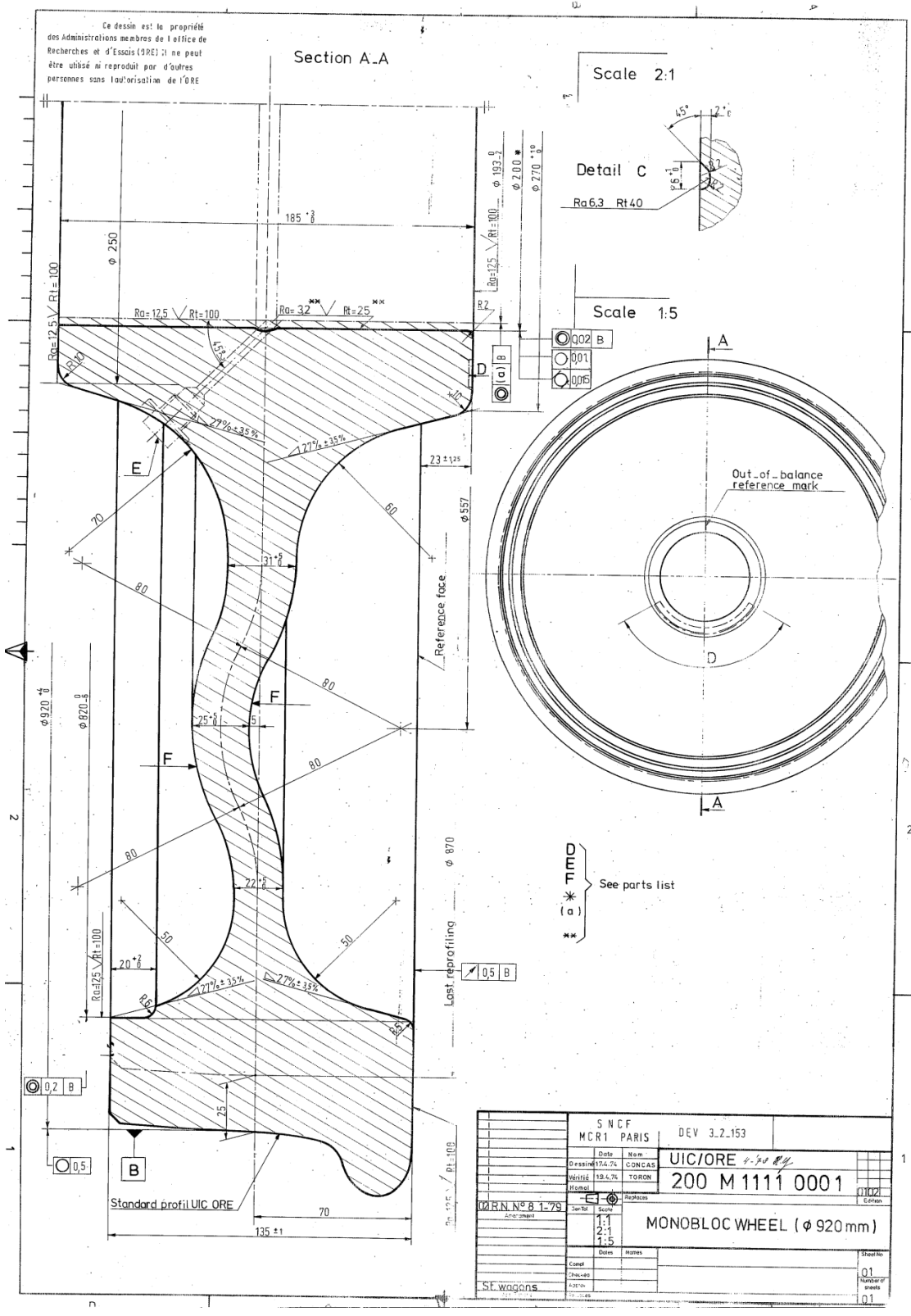
UIC 510-5 (Technical approval of monoblock wheels –Application document for standart) fişinde ve EN 13979-1'de tekerleklerin mekanik özelliklerinin tesbiti için FEM modellerinin değerlendirilme metodu verilmektedir.

7.3 Isıl Analizi Yapılacak Olan Tekerlek, Dingil ve Sabo Teknik Resimleri

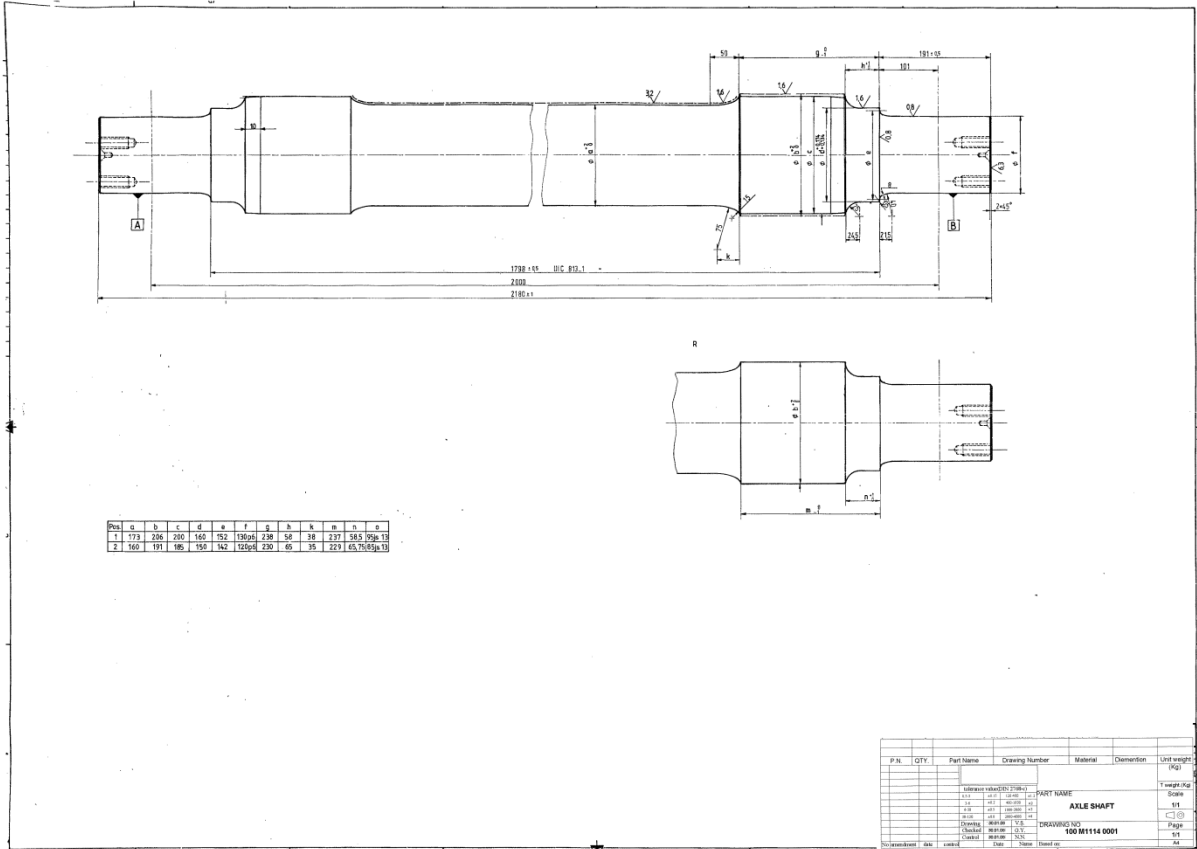
Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10'da Zamana Bağlı Isıl Analizi yapılacak olan tekerlek, dingil, sabo ve tekerlek setlerinin teknik resimleri verilmiştir.

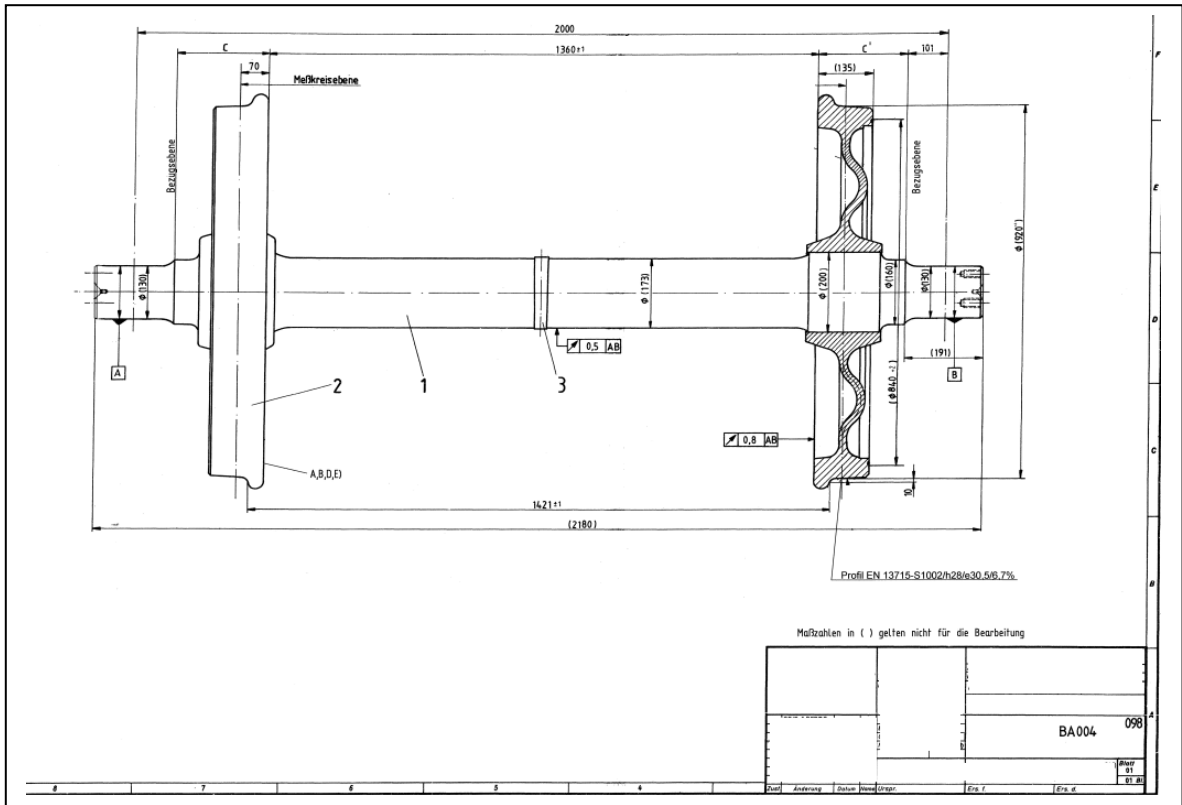


Şekil 7.5 BA-004 Monoblok Tekerlek Teknik Resmi

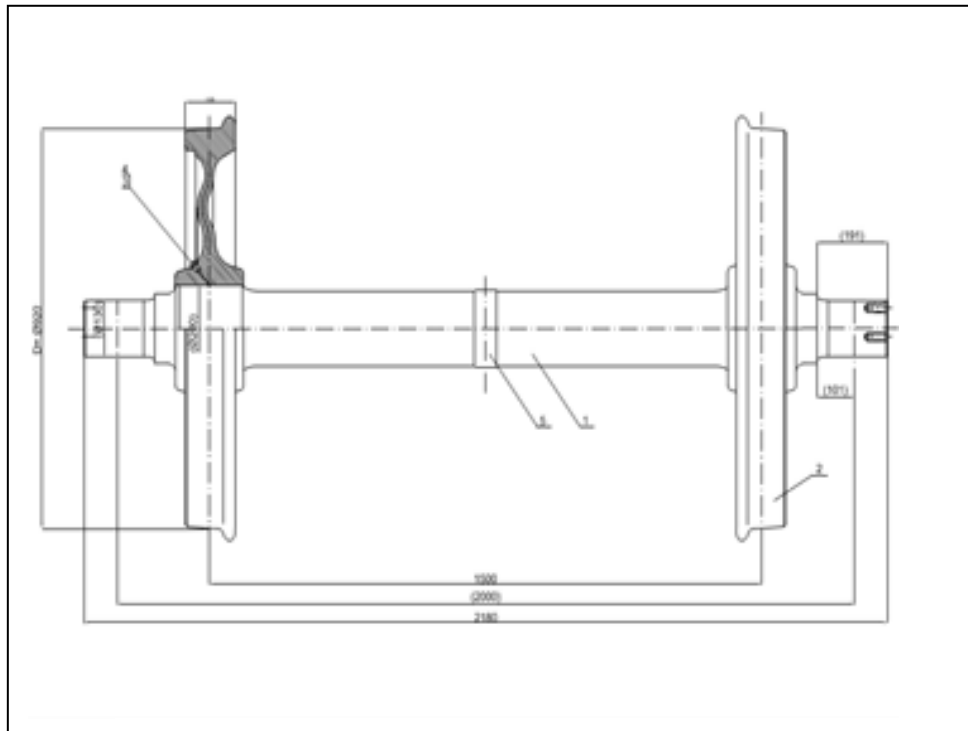


Şekil 7.6 M 1111 Teknik Resim Numaralı Monoblok Tekerlek

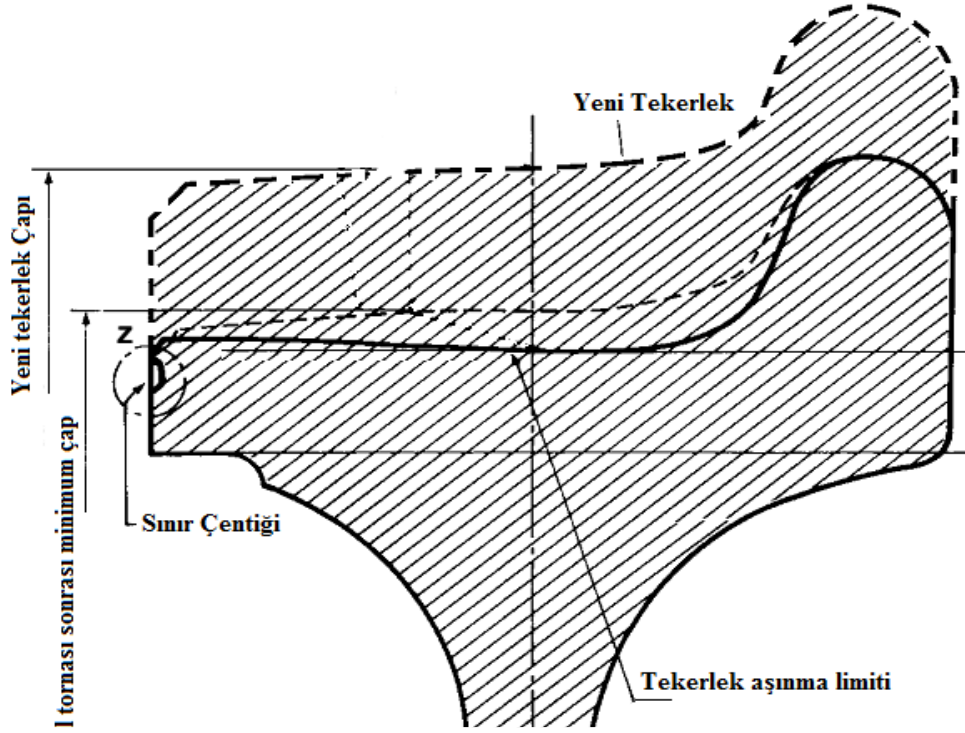




Şekil 7.9 BA 004 Tekerlek Seti Teknik Resmi



Şekil 7.10 M 1111 Tekerlek Seti Teknik Resmi



Şekil 7.11 Aşınma Limitine Gelmiş Tekerlek [16]

920 mm çapındaki bir tekerlek, yuvarlanma çapı 840 mm olana kadar kullanılabilir (Şekil 7.11) [16].

7.4 FEM Analizinde Kullanılacak Parametreler

TSI dokümanlarına göre tekerleğin fren kapasitesinin tesbitinin yapabilmek için, 34 dakika süresince % 21 aşağı yönlü eğimde 70 km/sa hızla giden bir vagon ve bu vagonun, 920 mm tekerlek anma çapı ve 22,5 t dingil yükü için tekerlek başına 45 kW fren gücü uygulanması referans senaryo olarak alınabilir [2], [43]. ERRI datalarına göre döküm sabo kullanılması halinde ısı enerjisinin yaklaşık % 70'i tekerleğe geçmektedir [46], [18]. Dolayısıyla analizde tekerleğe sabo basma yüzeyinden 45 kW enerjinin % 70 olan 31,5 kW enerji verilmiştir. Isıl kapasite için çevre koşulları TSI ve TS EN 13979 verilerine göre 45°C sıcaklığında kuru hava kötü senaryo olarak alınabilir. Rüzgar hızı 20 km/sa 'den fazla olmamalıdır [2], [41].

FEM analizinin yapılabilmesi için Isı Taşınım Katsayısı (h), Isı İletim Katsayısı (k) ve Işınım Yayıma Oranı (ϵ) bilinmelidir. Isı taşınım katsayısı yüzey geometrisine, akışkan hareketinin türüne ve akışkanın termodinamik ve aktarım özelliklerine göre belirlenen sınır tabakadaki koşullara bağlıdır [50].

Isı taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için akışın laminar mi yada türbülans mı olduğu tesbit edilmelidir. ORE Rapor 169'da tekerleklere etkiyen hava hızı "0,6xVagon Hızı" olarak alınmıştır. Uygulanacak senaryoda vagon hızı 70 km/sa (19,4 m/s) olduğuna göre tekerleklere etkiyen hava hızı (U_{∞}) 42 km/sa (11,7 m/s) alınabilir. Akışın laminar mi ya da türbülans mı olduğunu tesbit etmek için, tekerlek bir silindir kabul edilerek Reynold sayısı bulunmalıdır.

Çevre sıcaklığı 45°C ve ortalama tekerlek sıcaklığının, yapılan ön FEM analizi sonuçlarına göre 255°C alınması uygundur. Bu değerlere göre film sıcaklığı (T_f) bulunur.

$$T_f = (45+255)/2=150^{\circ}\text{C}$$

Bu film sıcaklığında havanın kinematik viskozitesi (ν) ilgili tablodan bulunur [51].

$$\nu = 28,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tekerlek çapı (D) 0,92 m ve tekerleklere etkiyen hava hızı (U_{∞}) 11,7 m/s için;

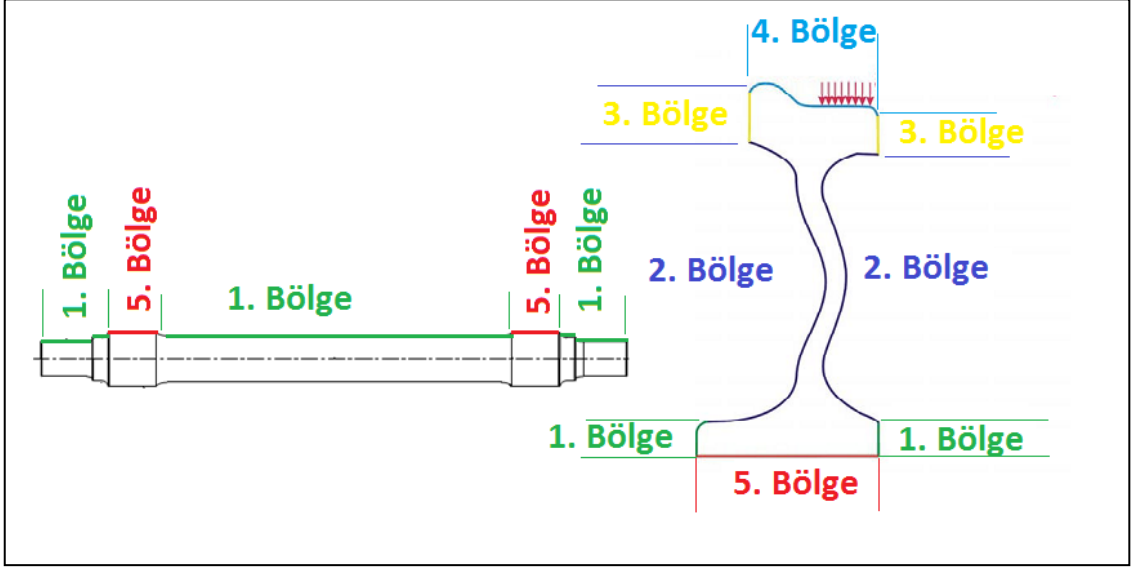
$Re = U_{\infty} \cdot D / \nu$ formülünden

Reynold Sayısı **Re=373750** bulunur.

Reynold sayısı 5000'i geçtiğinde tekerlek yüzeyindeki akış türbülanstır. Türbülans akışta sıcaklık ve hız dağılımı da teorik analizi hemen hemen imkansız kılacak kadar karmaşıktır. Bu nedenle silindir üzerinden akışta teorik sonuçlardan çok deneysel sonuçlardan elde edilen eş ilişkiler kullanılır [51].

Uzun yıllar boyunca yapılan çok sayıda deneysel sonuçlara göre hazırlanan ORE Rapor 169 verilen değerlerin FEM analizinde kullanılması teorik hesaplara göre daha doğru sonuçlar verecektir.

Isı Taşınım Katsayısı, Isı İletim Katsayısı ve Işınım Yayıma Oranı 1987 de yayınlanan ERRI (ORE) Rapor 169 da yayınlanmıştır [52]. Bu raporda senaryo olarak dingil yükü 22,5 ton, 920 mm çaplı UIC tekerleğe sahip olan vagonun 60 km/sa hızda gittiği senaryo alınmıştır. Bu senaryoya göre tekerleklere etki eden hava hareketi 0,6xVagon Hızı alınmıştır. Fren gücü olarak 30 kW alınmış, oluşan ısınımın % 70' nin tekerleğe geçtiği kabul edilmiştir. Frenleme süresi 2700 s dir [52]. Uygulamasını yapacağımız senaryoda 34 dakika (2040 s) sürmekte ve vagon hızı 70 km/sa hızdaki vagona frenleme gücü 45 kW alınmaktadır. Senaryolar çok yakın olup ERRI Rapor 169 da verilen tekerlek bölgelerine göre (Şekil 7.12) verilen Isı Taşınım Katsayısı (zorlanmış), Isı İletim Katsayısı ve Işınım Yayıma Oranının referans senaryo için kullanılması uygundur (Çizelge 7.2).



Şekil 7.12 Tekerlek Seti Bölgeleri

Çizelge 7.2’de 4. Bölgenin 3. Bölgeden daha sıcak olmasına rağmen, 4. Bölgenin taşınım katsayısının 3. Bölgeden daha küçük verilmesinin nedeni 4.Bölgenin en sıcak bölgesinin yaklaşık 1/3’ünün saboların altında kalmasıdır.

İşinim yayma oranı paslı tekerlek seti için 0,80 alınabilir [55].

Çizelge 7.2 Ortalama Sıcaklıklara Göre Taşınım ve İletim Katsayıları [53], [54], [30]

Ortalama Sıcaklığı T (°C)	Taşınım Katsayısı (h) W/(m ² .K)				İletim Katsayısı(k) W/(m.K)
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge
0	17	17	37	31	47,3
100	23	23	42	39	45
200	27	27	50	43	44,1
400	43	43	70	62	
600	68	78	95	84	

7.5 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde FEM Analizi

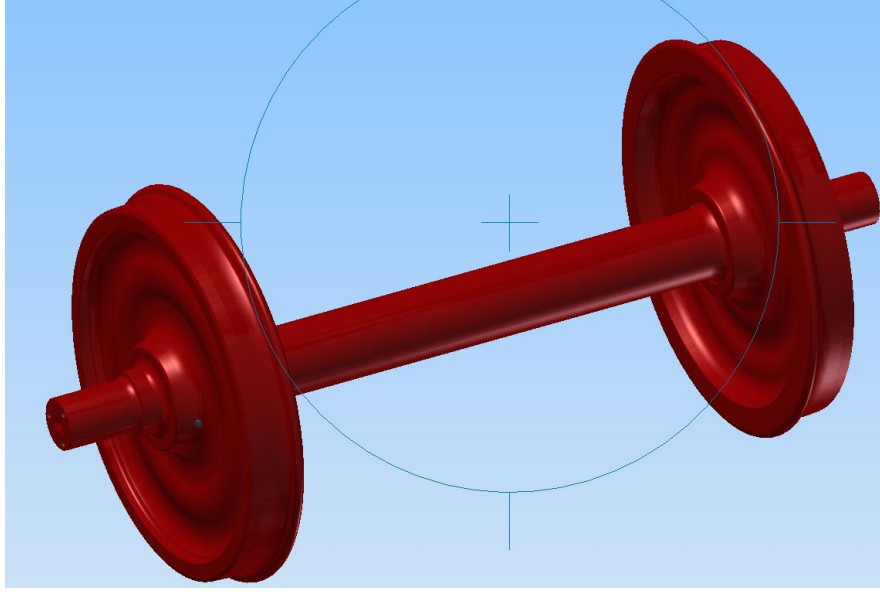
7.5.1 FEM Analizinde Amaç

Bu projenin amacı, TÜDEMSAŞ tarafından kullanılan farklı iki tekerlek setinin yeni ve aşınmış durumda TSI ve UIC standartlarında verilen senaryoya uygun olacak şekilde, belirtilen test koşulları altında Zamana Bağlı (Transient) Isıl Analizle sayısal simülasyon hesaplamalarını gerçekleştirerek, tekerlek setinin farklı bölgelerinde oluşan sıcaklık

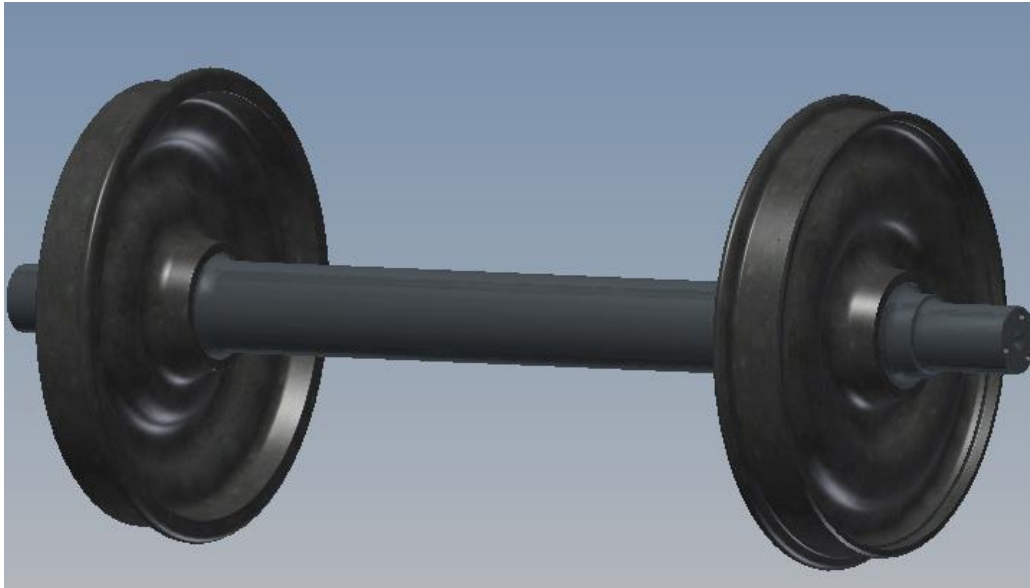
dağılımını hesaplamaktır. Analizler, 614812 lisans nolu ANSYS 14.0 sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

7.5.2 CAD Modeli ve Yapılan Çalışmalar

Tekerlek setlerine ait model, Autodesk Inventor programında tasarlanmış (Şekil 7.13, Şekil 7.14), step formatında ANSYS programı içerisine aktarılmıştır. ANSYS Workbench yazılımı ortamında, Isıl Zamana Bağlı Analizi yapılmıştır.

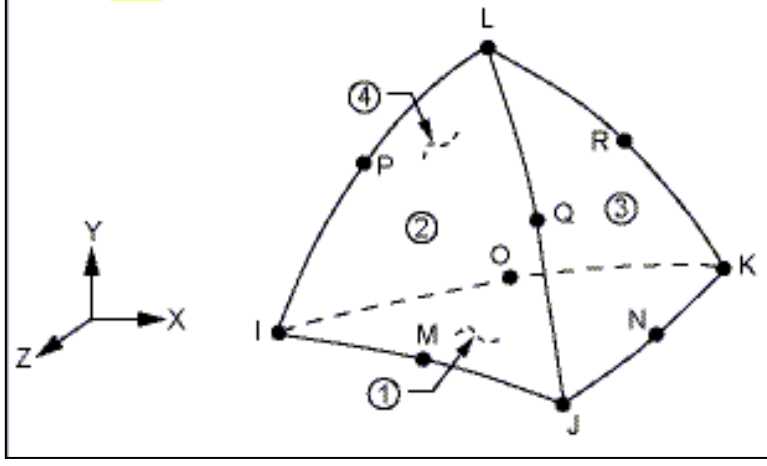


Şekil 7.13 Yeni Tekerlek Seti 3D CAD Görünümü



Şekil 7.14 Aşınmış Tekerlek Seti 3D CAD Görünümü

Sonlu eleman modellerinde bir eleman tipi kullanılmıştır: SOLID187, katı modellerin dörtyüzlü (tetragonal) elemanları için kullanılan ikinci dereceden (higher order) bir eleman tipidir. Eleman boyutu 20 mm dir. Bu eleman tipinin geometrisi Şekil 7.15’te gösterilmiştir.



Şekil 7.15 SOLID 187 Geometrisi

7.6 Yeni Tekerlek Setinde Zamana Bağlı FEM Isıl Analiz

Analizi Yapılacak olan BA 004 ve M 1111 Tekerlekler BA 002 aksını kullanmaktadır. Kimyasal özellikler aynı olan yeni monoblok tekerleklerin fiziksel özellikleri ve analizde kullanılan bazı geometrik değerler Çizelge 7.3 de verilmiştir.

Çizelge 7.3 Monoblok Tekerlekler İçin Bazı Fiziksel Değerler

1 Adet Tekerlek	BA 004 Monoblok Tekerlek	M 1111 Monoblok Tekerlek
Ağırlık (kg)	315	337
Hacim (mm ³)	40157663	42908458
Yüzey Alanı (mm ²)	2242126	2115926
İletim için Yüzey Alanı (mm ²)	110480	110480
Isı Transferi Yapılan Tekerlek Sabo Süpürme Alanı (mm ²)	164160	164190

Çizelge 7.3’e göre M 1111 tekerlek BA 004 tekerleğe göre % 7 daha ağır olmasına rağmen yüzey alanı % 5,6 daha küçüktür. Bojili bir vagona 8 tekerlek (4 tekerlek seti) bulunmaktadır. BA 004 tekerlek M 1111 tekerleğinden 22 kg daha hafiftir. Bu değerlere göre BA 004 tekerlek kullanılan vagonun darası 176 kg daha hafif olacaktır.

Analizde tekerlek-sabo arasında oluşan 45 kW ısıl gücün % 70 'i olan 31,5 kW ısıl güç tekerleğe transfer edilmiştir. Bu ısıl güç sabo basma yüzeyinden tekerleğe transfer edilmiştir. Bu yüzey alanları Çizelge 7.3' de görüldüğü gibi BA 004 ve M 1111 tekerlekleri için aynıdır.

7.6.1 Yeni Tekerlek Setinin Zamana Bağlı FEM Isıl Ön Analizi

Taşınım katsayısının (h) sıcaklıklara göre değişmesi sebebiyle Zamana Bağlı FEM ısıl ön analizi yapmak hatayı azaltmak için gereklidir. Ön senaryoda çevre sıcaklığı 45 °C, ortalama operasyon süresi olan 17 dakika (1020 s) için, ortalama tekerlek sıcaklıkları 1. ve 5. Bölge için 70°C, 2. Bölge için 150°C, 3. Bölge 250°C ve 4. Bölge 300°C alınması bu konuda yapılan deneysel sonuçlara göre uygundur [54]. Ön senaryoda (17 dakika) verilen ortalama bölge sıcaklık değerlerinin bulunan değerlerle çok farklı olmaması durumunda, gerçek senaryoda (34 dakika) ısı taşınım katsayısı bulunan bu ortalama bölge sıcaklıklarına göre alınabilir.

Verilen bölgelerin ön senaryoda verilen ortalama sıcaklıklara göre ısı taşınım katsayısı (zorlanmış), ısı iletim katsayısı Çizelge 7.2'de verilen değerlere göre doğrusal interpolasyon yapılarak bulunmuştur. Ön analizde ısı yama oranı (ϵ) (paslı tekerlek seti) 0,80 alınmıştır [55].

Ön analizde 4. Bölgede döküm sabo basma yüzeyinden 31,5 kW ısı verilmiştir. Analizde Çizelge 7.4 ve Çizelge 7.5 verilen değerler kullanılmıştır. Farklı mesh yoğunluklarıyla yapılan denemeler sonucu mesh ölçüsünün 20 mm yerine 15 mm alınmasının, sonucu % 1 den daha az etkilediği ancak çözüm süresini % 30 artırdığı görülmüş bu sebepten dolayı mesh ölçüsü 20 mm alınmıştır.

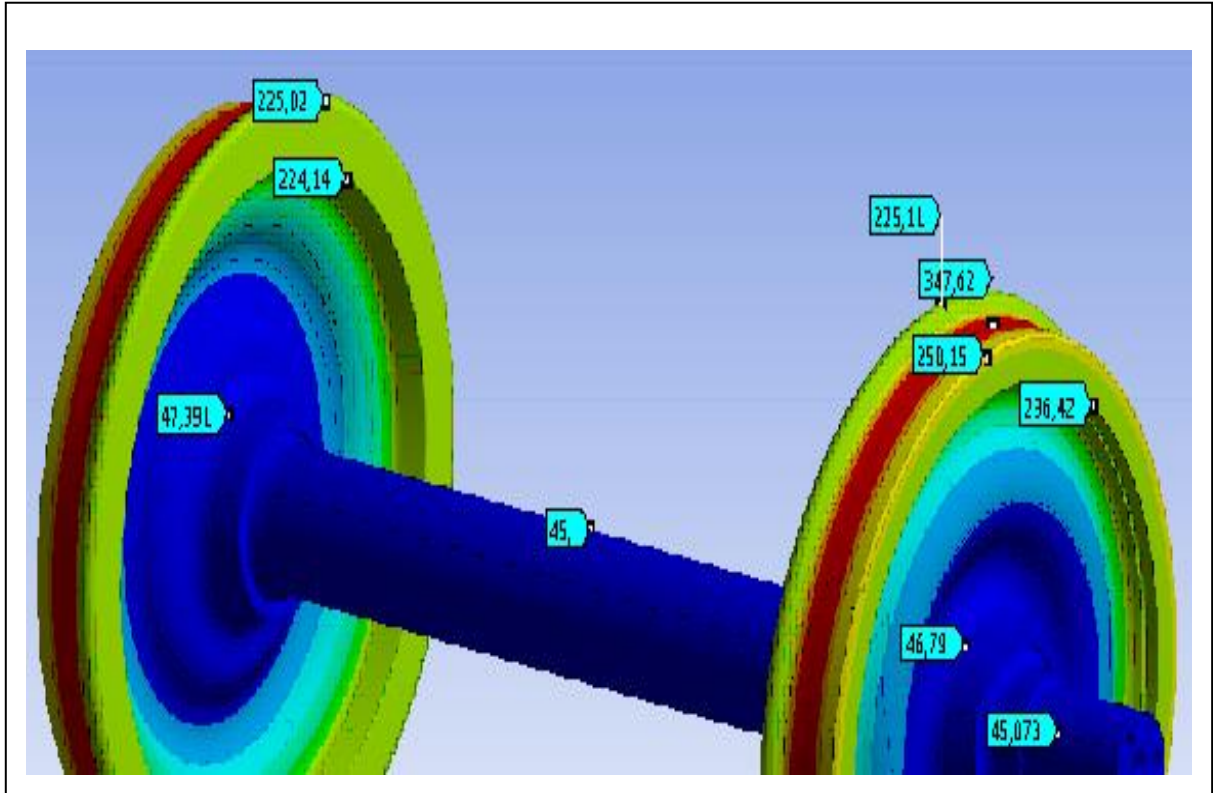
Çizelge 7.4 Ön Analiz İçin Bölgelerin Tahmini Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım ve iletim Katsayıları ve Işınım Yama Oranı

Ortalama Bölge Sıcaklığı	Taşınım Katsayısı (h) W/(m ² .K)			
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
T (°C)				
70	21			
150		25		
250			55	
300				52

Çizelge 7.5 Zamana Bağlı FEM Isıl Analizinde Kullanılacak Değerler

Sıcaklık (°C)	İletim Katsayısı (k) W/(m.K)	Özgül Isı J/(Kg.°C)	İşinim Yayıma Oranı (ε) (Paslı Tekerlek Seti)	Yoğunluk Kg/m ³
0	47,3	440	0,80	7850
100	45	480	0,80	7850
200	44,1	510	0,80	7850
300		519	0,80	7850
400		528	0,80	7850
500		537	0,80	7850

Şekil 7.15 verilen ön analiz sonucunda tekerlek setinin bölgelere göre bulunan ortalama sıcaklıkları ile ön kabullerde verilen sıcaklıklar birbirlerine çok yakındır. Yeni tekerlekler için yapılacak Zamana Bağlı FEM analizinde, ortalama zaman (17 dakika) için hesaplanan Zamana Bağlı FEM ön analizinde elde edilen ortalama bölge sıcaklıkları kullanılacaktır. Ön analizde kullanılan tahmini ortalama sıcaklık ve analiz sonucunda bulunan ortalama sıcaklık Çizelge 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.15 FEM Transient Ön Analiz Sıcaklık Sonucu

Çizelge 7.6 Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık ve Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık

Bölgeler	Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık	Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık
1.Bölge	70	50
2.Bölge	150	150
3.Bölge	250	230
4.Bölge	300	300

Bölgelerin ön analizde bulunan ortalama sıcaklıklarına göre interpolasyonla hesaplanan taşınım katsayıları Çizelge 7.7’de verilmiştir.

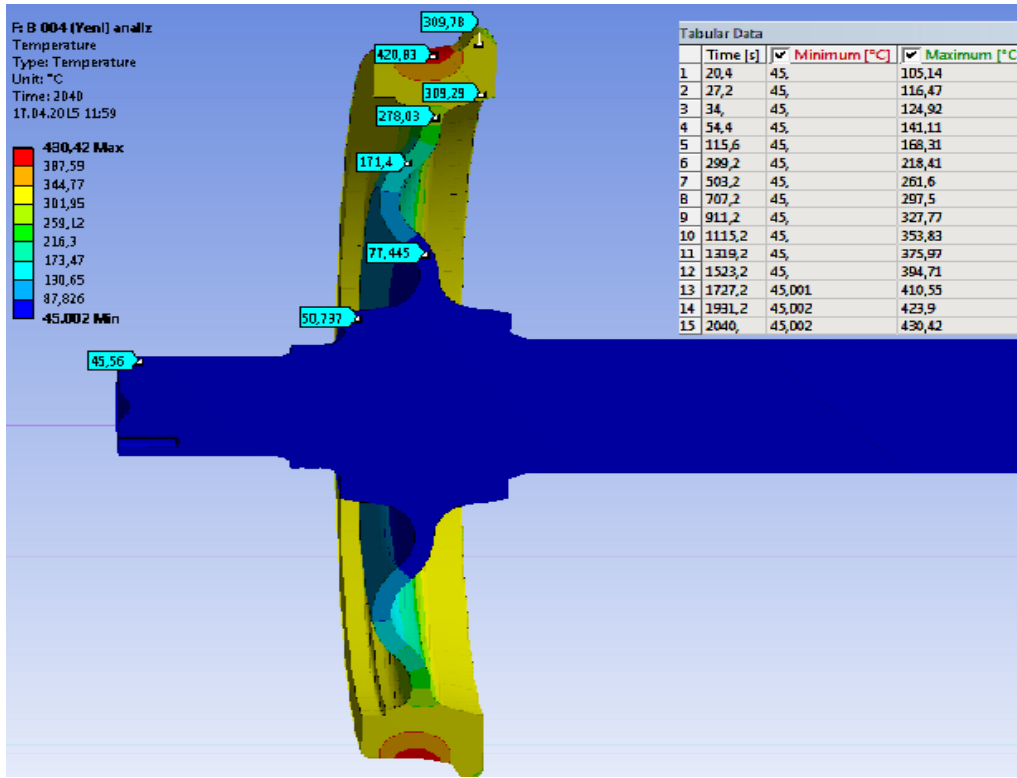
Çizelge 7.7 Bölgelerin Ön Analizde Bulunan Ortalama Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları

Ortalama Film Sıcaklığı T (°C)	Taşınım Katsayısı (h) W/(m ² .K)			
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
50	20			
150		25		
250			53	
300				52

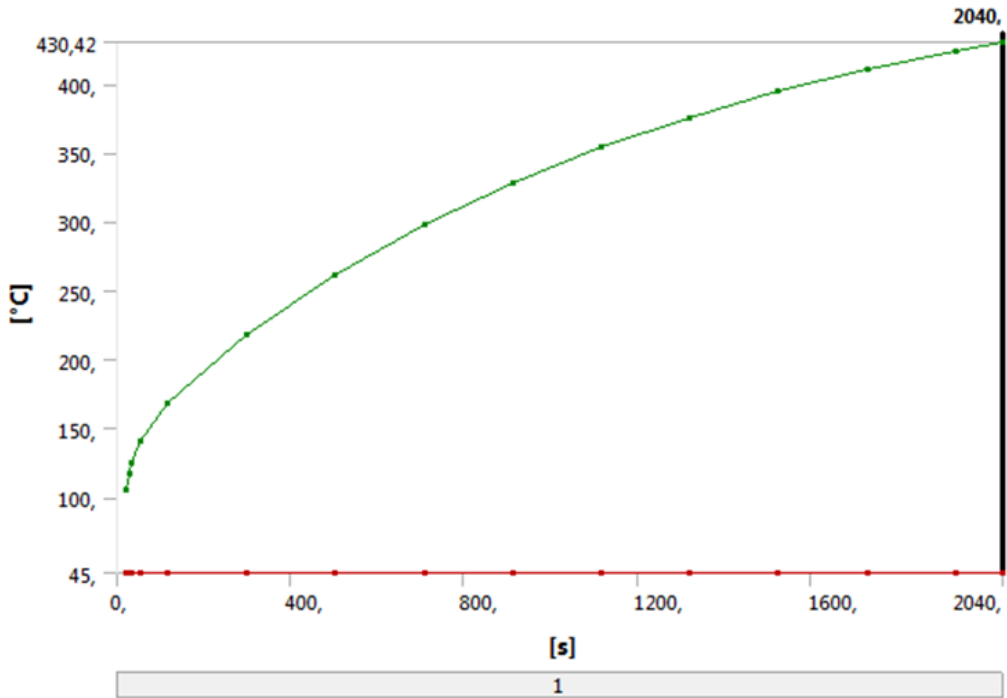
7.6.2 BA 004 ve M 1111 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı FEM Isıl Analizi

BA 004 ve M 1111 yeni tekerlek setinin Zamana Bağlı FEM ısıl analizinde Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.7’de verilen değerler kullanılmıştır. Analiz de her iki tekerlek için malzeme özellikleri, çevre koşulları, bölgelere göre ısı taşınım katsayıları, sıcaklıklara göre ısı iletim katsayıları, yayma oranı, tekerleğe verilen ısıl enerji ve verildiği yüzey alanı, kullanılan mesh tipi ve büyüklüğü vb. değerler eşit verilmiştir. Girilen değerler, bölgeler ve test sonuçları Ek-1 ve Ek-2 de detaylı bir şekilde verilmiştir.

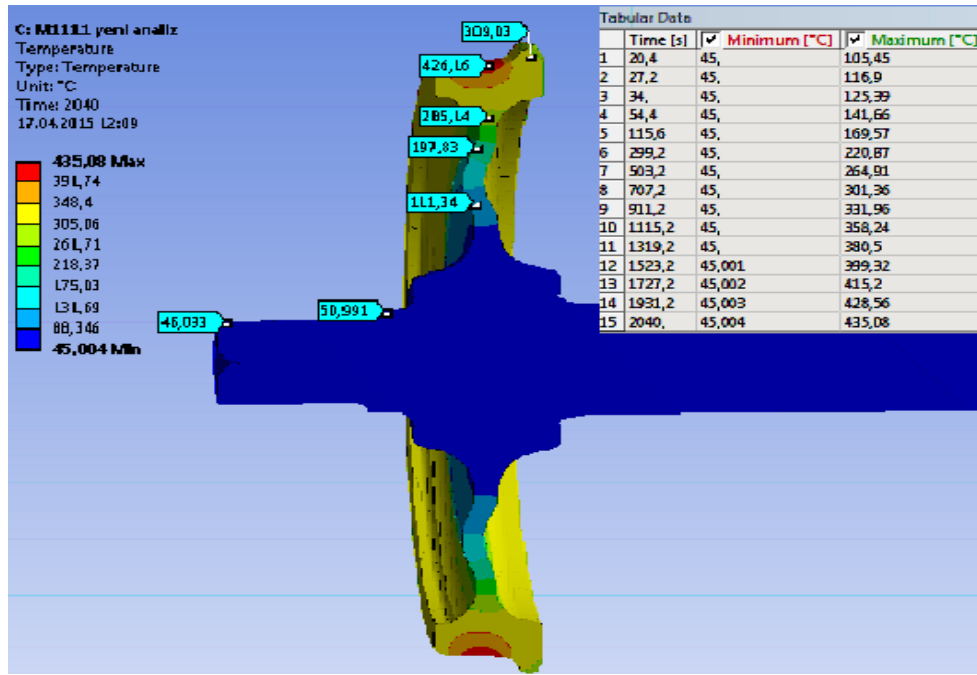
Şekil 7.16 ve Şekil 7.18’ de verilen analiz sonuçlarına göre her iki tekerlek setinde dingil sıcaklığındaki değişim önemsenmeyecek miktardadır. Tekerleklerin gövdesi ortalama 170°C, tekerleğin ispit bölümü ortalama 310°C, tekerlek yuvarlanma yüzeyi ortalama 420 °C sıcaklıklara ulaşmaktadır. Tekerleğin yuvarlanma yüzeyi ile budenin (flanş) sıcaklık farkı 100°C civarındadır. Bununla birlikte BA 004 tekerlek setindeki bölgelere ait sıcaklıklar M 1111 tekerlek setinin bölgelere ait sıcaklıklarına göre 5°C ile 10°C arası daha düşük olduğu görülmektedir.



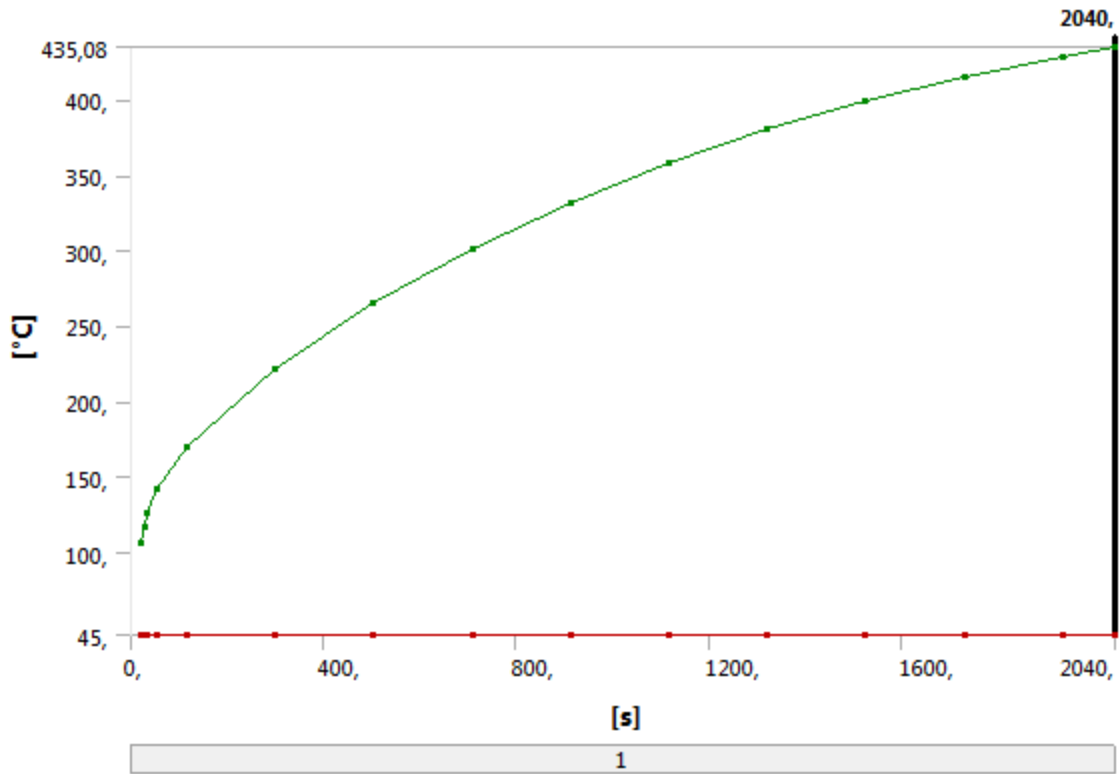
Şekil 7.16 BA 004 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu



Şekil 7.17 BA 004 Yeni Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği



Şekil 7.18 M 1111 Yeni Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu



Şekil 7.19 M 1111 Yeni Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği

7.7 Aşınmış Tekerlek Setinde Zamana Bağlı FEM Isıl Analiz

Analizi Yapılacak olan BA 004 ve M 1111 Tekerlekler BA 002 aksını kullanmaktadır. Kimyasal özellikler aynı olan aşınmış monoblok tekerleklerin fiziksel özellikleri ve analizde kullanılan bazı geometrik değerler Çizelge 7.8 verilmiştir.

Çizelge 7.8 Aşınmış Monoblok Tekerlekler İçin Bazı Fiziksel Değerler

1 Adet Tekerlek	BA 004 Monoblok Tekerlek	M 1111 Monoblok Tekerlek
Ağırlık (kg)	195	219
Hacim (mm ³)	24894679	27844697
Yüzey Alanı (mm ²)	1993319	1873602
İletim içim Yüzey Alanı (mm ²)	110480	110480
Isı Transferi Yapılan Tekerlek Sabo Süpürme Alanı (mm ²)	148950	148950

Çizelge 7.8 göre aşınmış M 1111 tekerlek BA 004 tekerleğe göre %12 daha ağır olmasına rağmen yüzey alanı % 6 daha azdır. Analizde tekerlek-sabo arasında oluşan 45 kW ısının tekerleğe transfer edilen kısmı 31,5 kW'dır. Bu ısı miktarı tekerleğin sabo basma yüzeyinden transfer edilmiştir. Bu yüzey alanları Çizelge 7.8'de görüldüğü gibi aşınmış B 004 ve M 1111 tekerlekleri için aynıdır.

7.7.1 Aşınmış Tekerlek Setinin Zamana Bağlı FEM Isıl Ön Analizi

Sıcaklıklara göre taşınım katsayısının (h) değişmesi sebebiyle yapılacak Zamana Bağlı FEM ısıl ön analizi, hatayı azaltmak için gereklidir. Ön senaryoda çevre sıcaklığı 45°C, ortalama operasyon süresi olan 17 dakika (1020 s) için, ortalama tekerlek sıcaklıkları 1. ve 5. Bölge için 70°C, 2. Bölge için 200°C, 3. Bölge 250°C ve 4. Bölge 300°C alınması bu konuda yapılan deneysel sonuçlara göre uygundur [54]. Ön senaryoda (17 dakika) verilen ortalama bölge sıcaklık değerlerinin bulunan değerlerle çok farklı olmaması durumunda, gerçek senaryoda (34 dakika) ısı taşınım katsayısı bulunan bu ortalama bölge sıcaklıklarına göre alınabilir.

Verilen bölgelerin ön senaryoda verilen ortalama sıcaklıklara göre ısı taşınım katsayısı (zorlanmış), Çizelge 7.9 verilmiştir. Ön analizde ışınım yayma oranı (ϵ) (paslı tekerlek seti) 0,80 alınmıştır [55].

Çizelge 7.9 Ön Analiz İçin Bölgelerin Tahmini Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları

Ortalama Bölge Sıcaklığı	Taşınım Katsayısı (h) W/(m ² .K)			
	1.ve 5. Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
T (°C)				
70	21			
200		27		
300			60	
400				62

Ön analizde 4.Bölgede sabo basma yüzeyinden 31,5 kW ısı verilmiştir. Analizde Çizelge 7.9 ve Çizelge 7.10 verilen değerler kullanılmıştır. Farklı mesh yoğunluklarıyla yapılan denemeler sonucu mesh ölçüsünün 20 mm yerine 15 mm alınmasının, sonucu % 1 den daha az etkilediği ancak çözüm süresini % 30 artırdığı görülmüş bu sebepten dolayı mesh ölçüsü 20 mm alınmıştır.

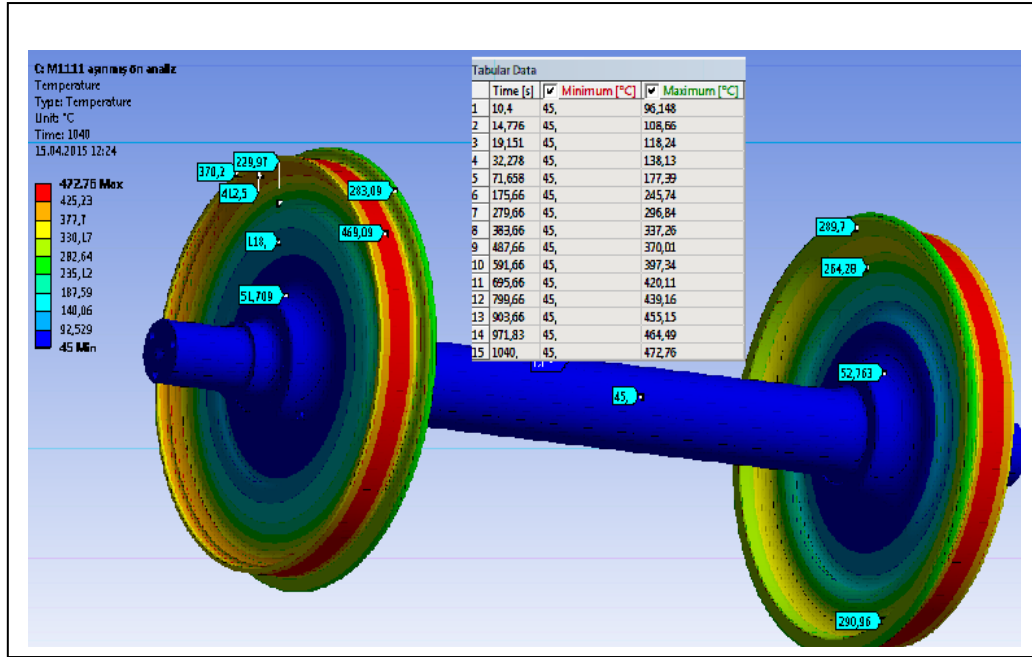
Çizelge 7.10 Zamana Bağlı FEM Isıl Analizinde Kullanılacak Değerler

Sıcaklık (°C)	İletim Katsayısı (k) W/(m.K)	Özgül Isı J/(Kg.°C)	Işınım Yayma Oranı (ϵ) (Paslı Tekerlek Seti)	Yoğunluk Kg/m ³
0	47,3	440	0,80	7850
100	45	480	0,80	7850
200	44,1	510	0,80	7850
300		519	0,80	7850
400		528	0,80	7850
500		537	0,80	7850

Şekil 7.20 verilen ön analiz sonucunda tekerlek setinin bölgelere göre ortalama sıcaklıklar ile ön kabullerde verilen sıcaklıklar çok yakındır. Aşınmış tekerlekler için yapılacak zamana bağlı FEM analizinde, ortalama zaman (17 dakika) için hesaplanan FEM ön analizinde elde edilen ortalama bölge sıcaklıkları kullanılacaktır. Ön analizde kullanılan tahmini ortalama sıcaklık ve analiz sonucunda bulunan ortalama sıcaklık, Çizelge 7.11' de verilmiştir.

Çizelge 7.11 Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık ve Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık

Bölgeler	Ön Analizde Kullanılan Tahmini Ortalama Sıcaklık	Analiz Sonucunda Bulunan Ortalama Sıcaklık
1.Bölge	70	50
2.Bölge	200	200
3.Bölge	300	330
4.Bölge	300	380



Şekil 7.20 Zamana Bağlı FEM Ön Isıl Analiz Sonucu

Bölgelerin ön analizde bulunan ortalama sıcaklıkları kullanılarak interpolasyonla yöntemiyle hesaplanan taşınım katsayıları Çizelge 7.12’de verilmiştir.

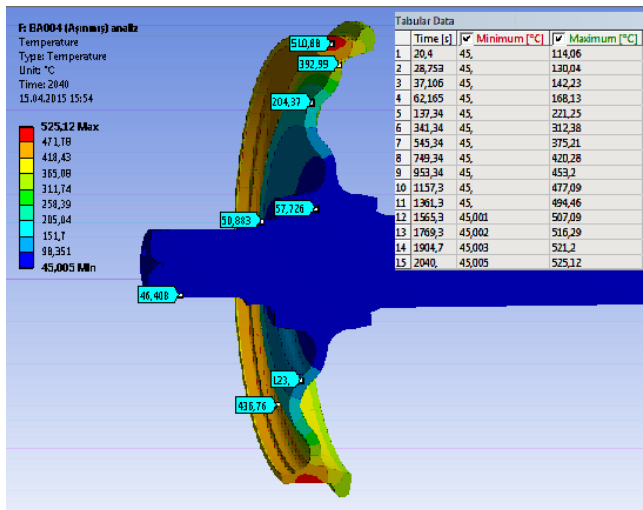
Çizelge 7.12 Bölgelerin Ön Analizde Bulunan Ortalama Sıcaklıklarına Göre İnterpolasyonla Hesaplanan Taşınım Katsayıları

Ortalama Film Sıcaklığı	Taşınım Katsayısı (h) W/(m ² .K)			
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
T (°C)				
50	20			
200		27		
330			63	
380				56

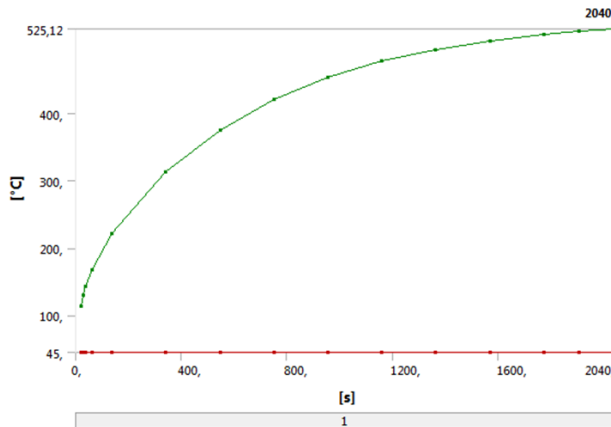
7.7.2 BA 004 ve M 1111 Aşınmış Tekerlek Seti Zamana Bağlı FEM Isıl Analizi

BA 004 ve M 1111 aşınmış tekerlek setinin Zamana Bağlı FEM ısı analizinde Çizelge 7.10 ve Çizelge 7.12’de verilen değerler kullanılmıştır. Analizde her iki tekerlek için malzeme özellikleri, çevre koşulları, bölgelere göre ısı taşınım katsayıları, sıcaklıklara göre ısı iletim katsayıları, yayma oranı, tekerleğe verilen ısı enerji ve verildiği yüzey alanı, kullanılan mesh tipi ve büyüklüğü vb. değerler eşit verilmiştir.

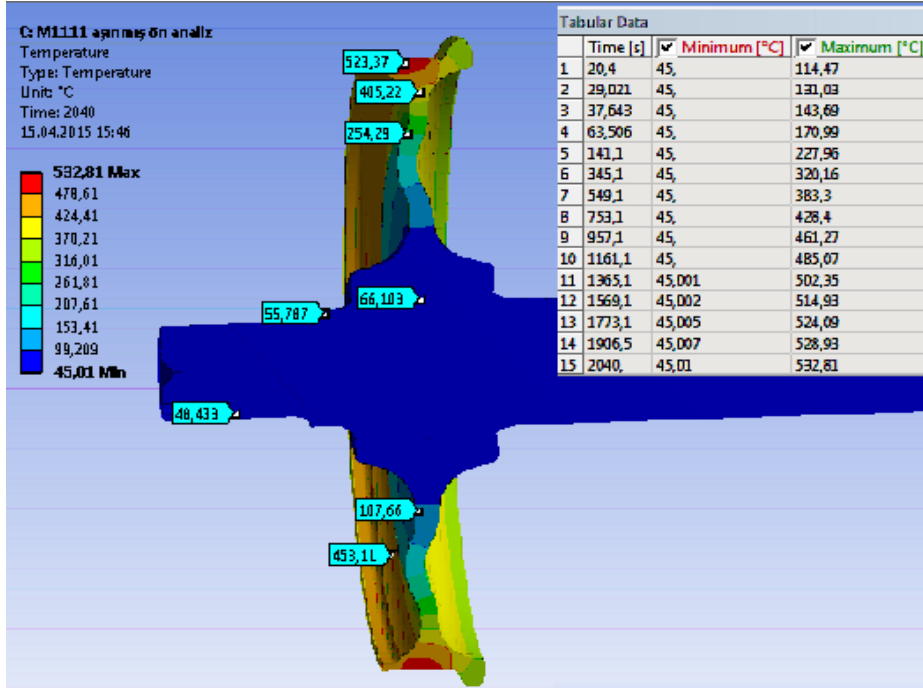
Şekil 7.21 ve Şekil 7.23’ de verilen analiz sonuçlarına göre her iki tekerlek setinde dingil sıcaklığı değişmemiştir. Tekerlek gövdesi ortalama 210°C, tekerlek ispit bölümü ortalama 410°C, yuvarlanma yüzeyi ortalama 500°C sıcaklıklara ulaşmaktadır. Tekerleğin yuvarlanma yüzeyi ile budenin (flanş) sıcaklık farkı 150°C civarındadır. Bununla birlikte aşınmış BA 004 tekerlek setindeki bölgelere ait sıcaklıklar, aşınmış M 1111 tekerlek setinin bölgelere göre sıcaklıklarından 8°C ile 15°C arası daha düşük olduğu görülmektedir.



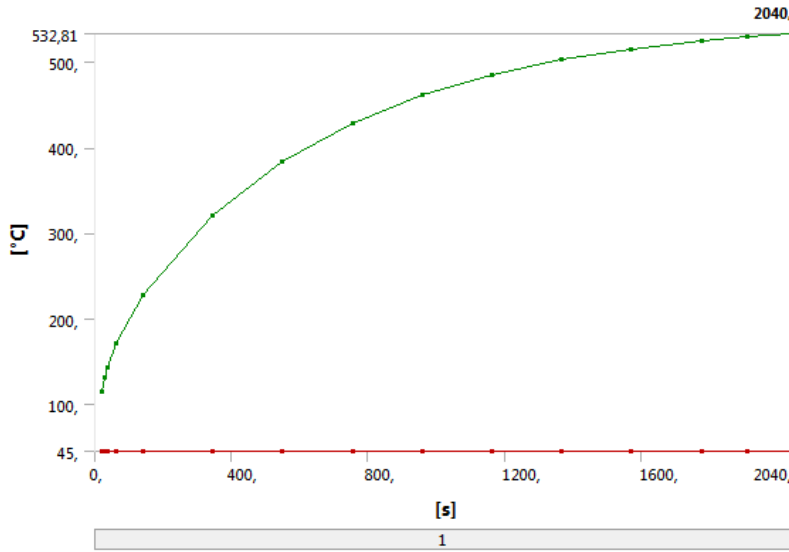
Şekil 7.21 Aşınmış BA 004 Tekerlek Seti Zamana Bağlı Isıl Analiz



Şekil 7.22 BA 004 Aşınmış Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği



Şekil 7.23 Aşınmış M 1111 Tekerlek Setinin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu



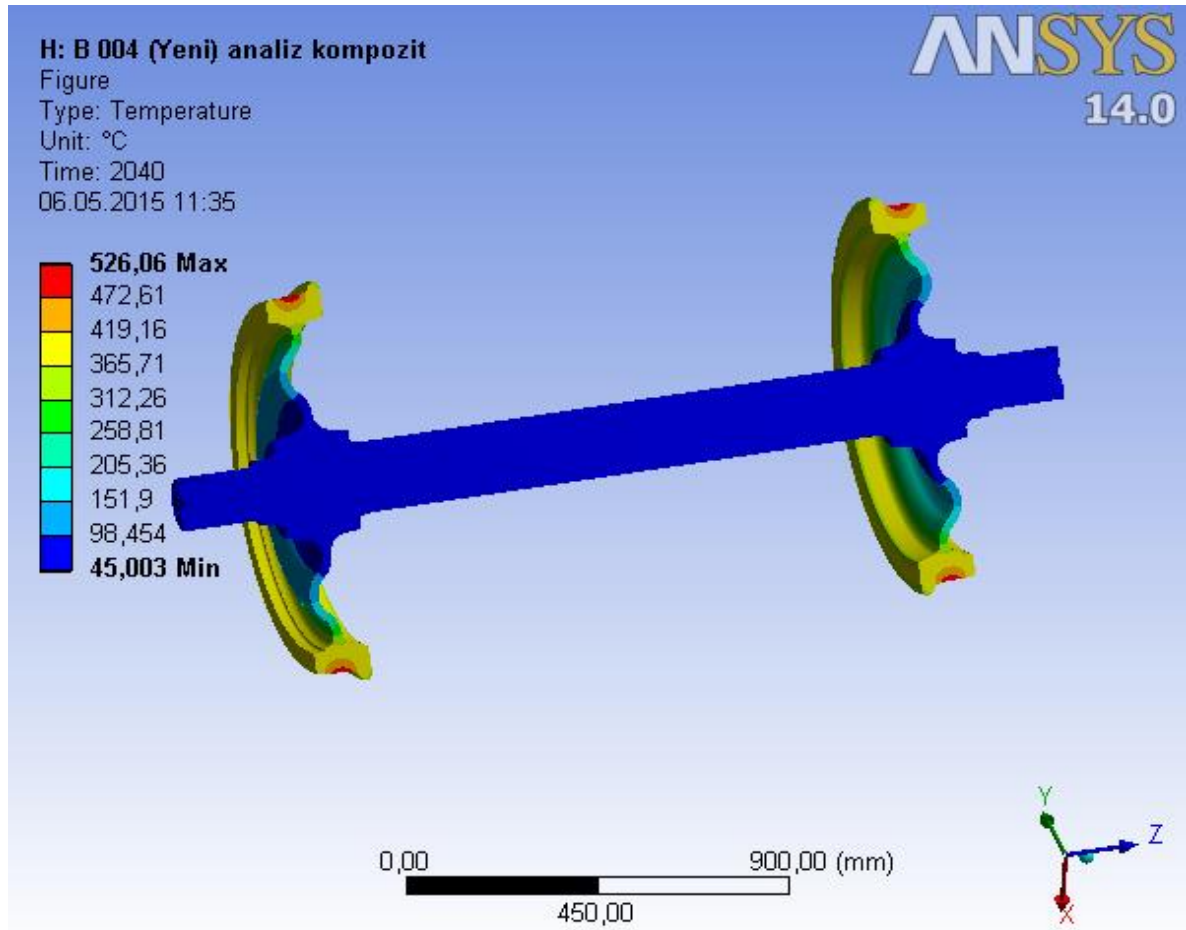
Şekil 7.24 M 1111 Aşınmış Tekerlek Seti İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği

7.8 BA 004 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde Kompozit Sabo Kullanılması

Frenleme esnasında tekerlek sabo arasında oluşan ısıl enerjinin önemli bölümü tekerleğe bir bölümü ise saboya geçmektedir. ERRI datalarına göre döküm sabo kullanılması halinde ısıl enerjinin yaklaşık %70'i tekerleğe geçmektedir [46],[18]. Bu oran sinterli kompozit sabo kullanıldığı takdirde yaklaşık % 90, organik kompozit sabo kullanılması halinde ise yaklaşık %95 olmaktadır[12], [18].

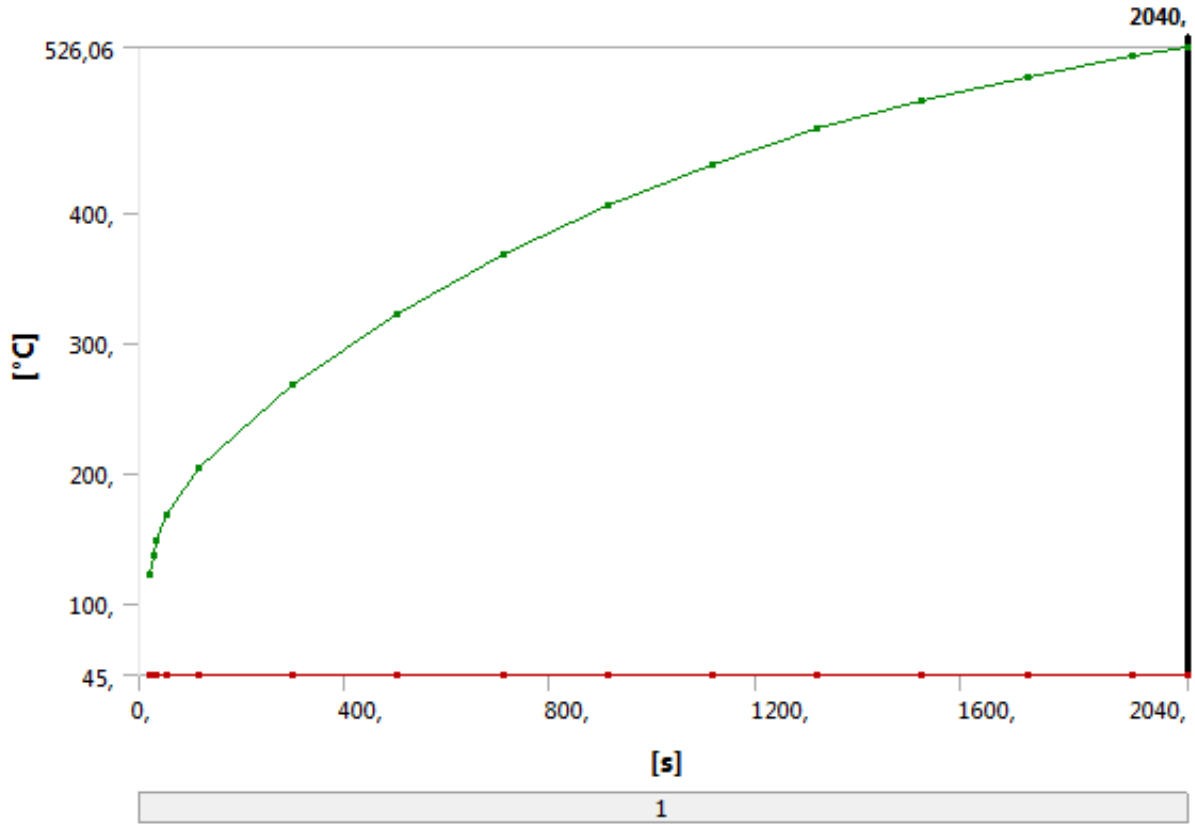
TSI ve UIC de verilen frenleme senaryosunda, sabo ile tekerlek arasında ısıl güç 45 kW olarak alınmıştır. Kompozit sabo kullanıldığı takdirde tekerleğe transfer edilecek toplam ısıl güç, 45 kW 'ın % 90'ı olan 40,5 kW'dır.

BA 004 yeni ve aşınmış tekerlek için kompozit sabo kullanılması durumunda tekerlek setinde oluşan sıcaklık dağılımı sırasıyla Şekil 7.25 ve Şekil 7.27' de verilmiştir



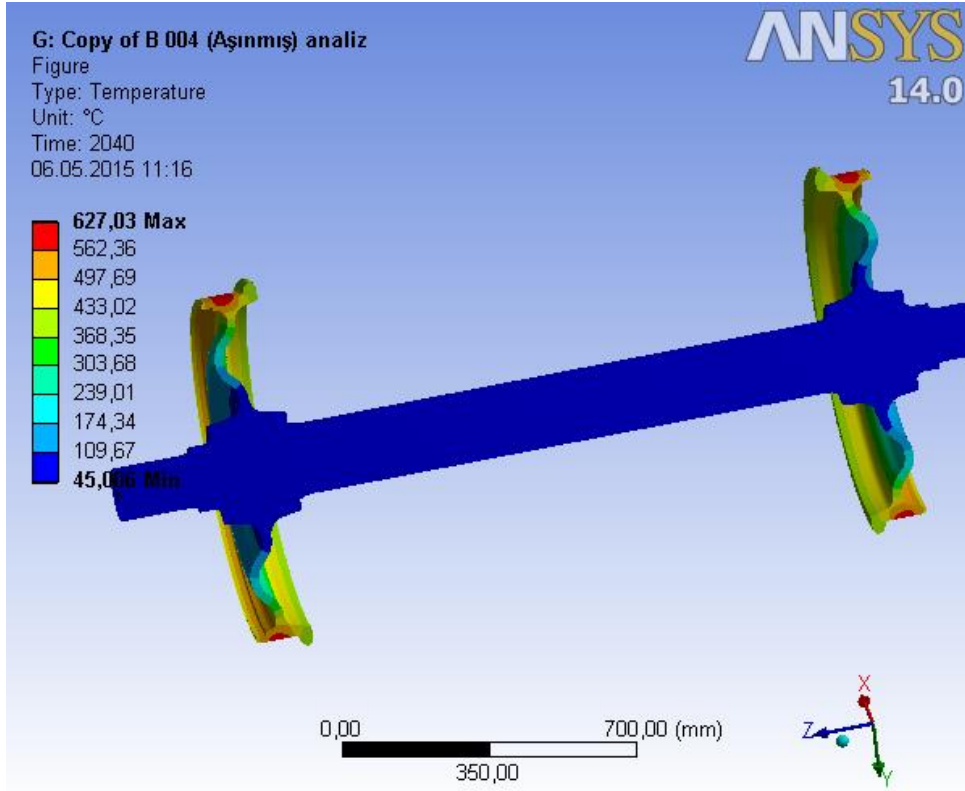
Şekil 7.25 Yeni BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu

Yeni BA 004 tekerlek seti için döküm sabo (P10) kullanılması durumunda 430°C olan maksimum sıcaklık kompozit sabo kullanılması durumunda 96°C artış ile 526°C olmaktadır. Aşınmış BA 004 tekerlek seti için döküm sabo (P10) kullanılması durumunda 525°C olan maksimum sıcaklık kompozit sabo kullanılması durumunda 102°C artış ile 627°C olmaktadır.

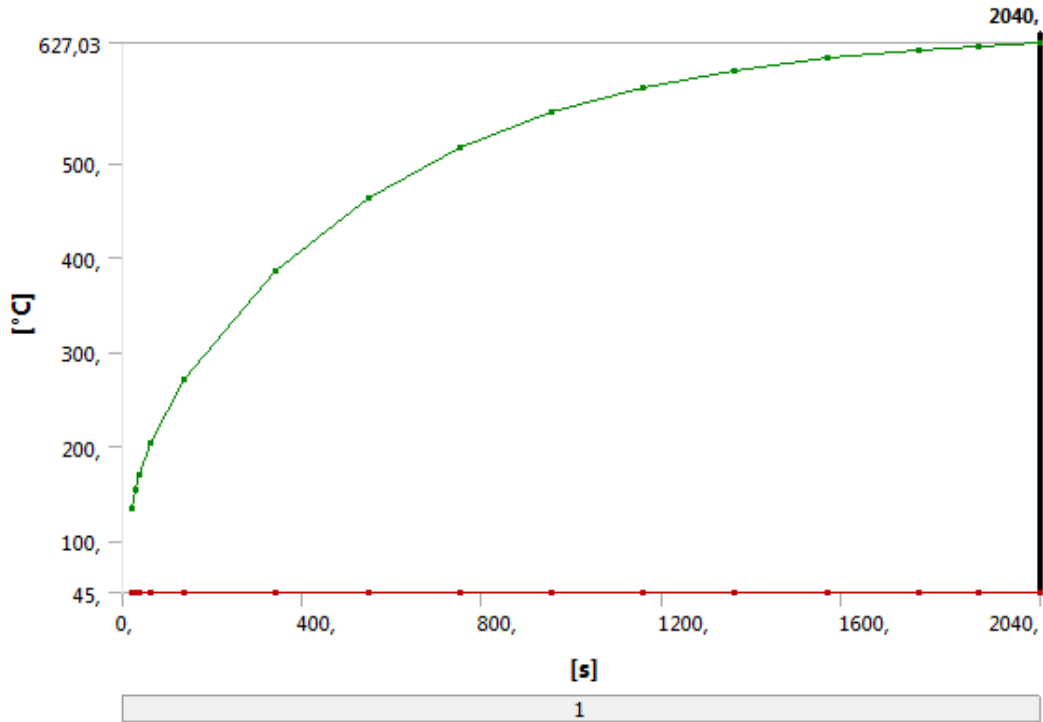


Şekil 7.26 Yeni BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği

Fren balatası olarak P10 döküm sabonun yerine kompozit sabonun kullanılması tekerleklerde oluşan maksimum sıcaklığı yaklaşık 100°C artırmaktadır. Rayların soğutma etkisi ve çevre sıcaklığının 45°C yerine izin verilen daha düşük sıcaklıkların seçilmesi durumunda, UIC tarafından belirlenen yeni tekerlek için 500°C ve aşınmış tekerlekler için 600 °C sınır değerleri sağlanabilir.



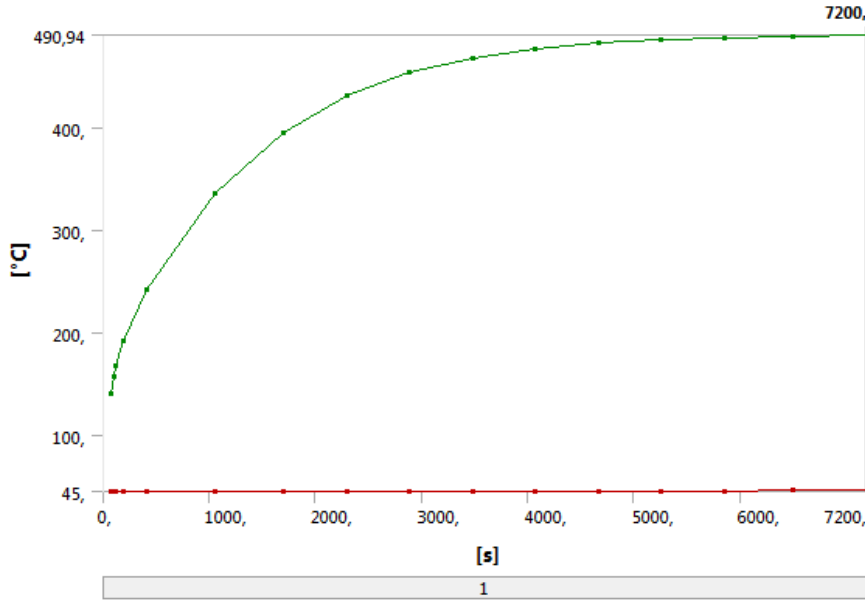
Şekil 7.27 Aşınmış BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Isıl Analiz Sonucu



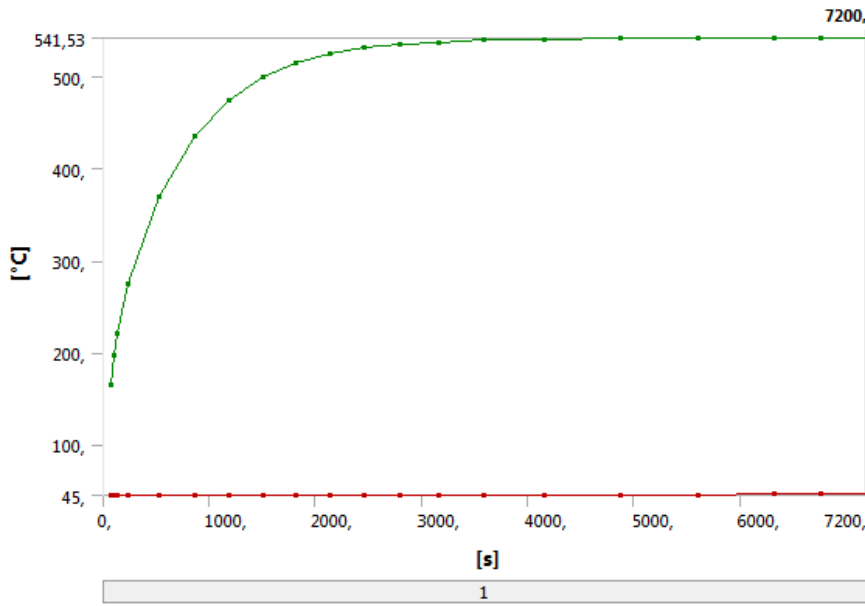
Şekil 7.28 Aşınmış BA 004 Tekerlek Setinin Kompozit Sabo Kullanılma Durumu İçin Zamana Bağlı Maksimum Sıcaklık Grafiği

7.9 BA 004 Yeni ve Aşınmış Tekerlek Setinde 120 dk Frenleme Sonucunda Oluşan Maksimum Sıcaklıklar

Ülkemizde bulunan bazı hatlarda hızı sabit tutmak için daha uzun süreli fren yapılması gerekebilmektedir. Frenlemede döküm sabonun kullanıldığı süre 120 dk alınarak BA 004 tekerlek setinin yeni ve aşınmış durumu için yapılan analiz sonucu sırasıyla Şekil 7.29 ve Şekil 7.30' da verilmiştir.

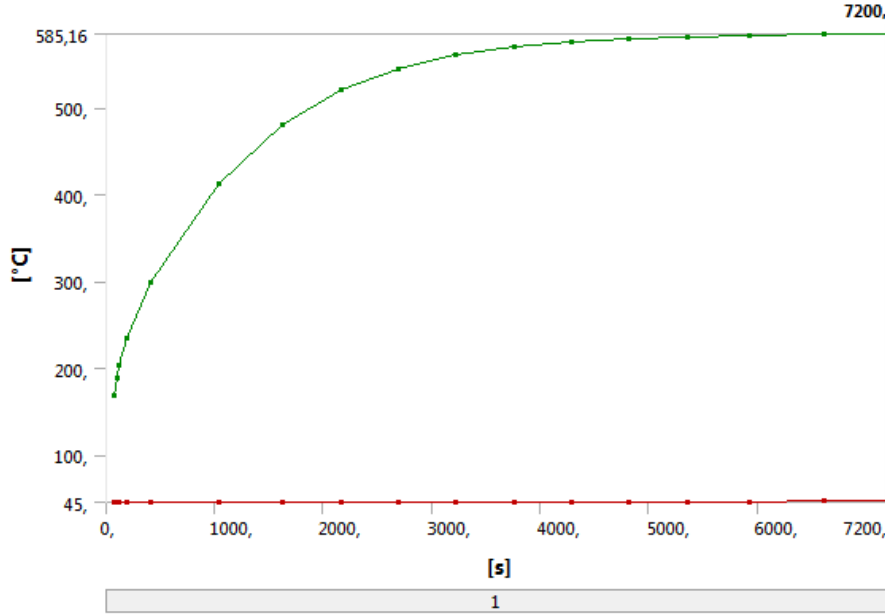


Şekil 7.29 Frenlemede Döküm Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Yeni Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu

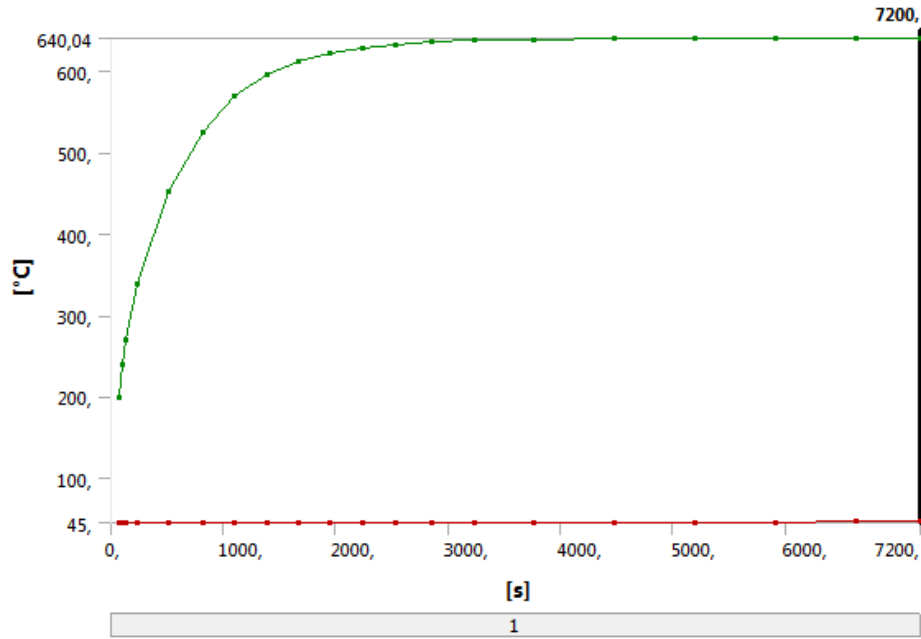


Şekil 7.30 Frenlemede Döküm Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Aşınmış Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu

Frenlemede kompozit sabonun kullanıldığı süre 120 dk alınarak BA 004 tekerlek setinin yeni ve aşınmış durumu için yapılan analiz sonucu sırasıyla Şekil 7.30 ve Şekil 7.31’ de verilmiştir.



Şekil 7.31 Frenlemede Kompozit Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Yeni Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu



Şekil 7.32 Frenlemede Kompozit Sabonun Kullanıldığı Süre 120 dk Alınarak BA 004 Tekerlek Setinin Aşınmış Durumu İçin Yapılan Analiz Sonucu

8. SONUÇ

Yüksek sıcaklığa maruz kalan tekerleklerde, tekerleğin bölgelerine göre değişen sıcaklık farkları tekerlek ispitinin yüzeye yakın bölgelerinde bulunan basma gerilimini çekme gerilimine dönüştürmekte, bu durum ısıl çatlaklara (yorulma çatlakları) ve diğer ısıl kaynaklı tekerlek hasarlarına sebep olmaktadır. Tekerleklerde mekanik ve metalurjik değişikliklere sebep olan yüksek sıcaklıklar çeliğin akma ve çekme mukavemet değerlerini de düşürmekte, bu durum ise seyir güvenliğini azaltmaktadır.

UIC ve TSI dökümanlarına göre tekerleklerin frenleme kapasitesi tespit edilmelidir. Frenleme kapasitesi deneyi sonucunda yeni tekerleklerde maksimum sıcaklık 500°C' yi, eski tekerleklerde ise maksimum sıcaklık 600°C' yi geçmemelidir. ANSYS programında yapılan Zamana Bağlı (Transient) Isıl Analiz sonucuna göre çevre sıcaklığı 45°C alınmasına ve rayların soğutma etkisi hesaba katılmamasına rağmen, döküm sabo kullanılan yeni BA 004 tekerlek setinde maksimum sıcaklık 430°C ve M 1111 yeni tekerlek seti için 435 °C dir. Aşınmış BA 004 tekerlek seti için 525°C olan maksimum sıcaklık, M 1111 yeni tekerlek seti için 533°C bulunmuştur. Kompozit sabo kullanılma durumunda bu sıcaklıklar yaklaşık 100°C artmaktadır.(Çevre sıcaklığının daha düşük değerler alınması ve rayların soğutma etkisinin hesaba katılması tekerleklerde oluşan maksimum sıcaklıkları bir miktar daha düşürecektir.)

Döküm sabo kullanılması durumunda her iki tekerlek seti UIC ve TSI şartlarını rahatlıkla sağlamasına rağmen kompozit sabo kullanılması durumunda standartlarda verilen sınır değerler civarındadır.

Ülkemizde bulunan bazı hatlarda hızı sabit tutmak için daha uzun süreli fren yapılması gerekebilmektedir. Bu amaçla BA 004 tekerlek setinde süre 120 dk alınarak, yeni-aşınmış tekerlek ve döküm sabo-kompozit sabo kullanımı göz önüne alınarak sayısal analiz yapılmıştır.

Döküm sabonun kullanıldığı, analiz sonucuna göre, BA 004 yeni tekerlekte 34 dk sonunda 430°C olan maksimum sıcaklık 60 dk sonunda 474°C ve 120 dk sonunda 491°C olmaktadır. BA 004 aşınmış tekerlekte ise 34 dk sonunda 525°C olan maksimum sıcaklık 60 dk sonunda 539°C ve 120 dk sonunda 541°C olmaktadır. Yeni tekerlek setinde sıcaklık artışının % 98'ine 77 dakika da, aşınmış tekerlek setinde ise sıcaklık artışının % 98'ine 40 dakikada ulaşılmaktadır. Ayrıca 34 dk süren analizde yeni ve aşınmış tekerlek setinde yaklaşık 100°C olan sıcaklık farkı ilerleyen zaman içinde azalmakta ve 120 dk sonunda bu fark 50°C kadar inmektedir.

Kompozit sabonun kullanıldığı, analiz sonucuna göre, BA 004 yeni tekerlek setinde 34 dk sonunda 526°C olan maksimum sıcaklık 60 dk sonunda 567°C ve 120 dk sonunda 585 °C olmaktadır. BA 004 aşınmış tekerleksetinde ise 34 dk sonunda 627°C olan maksimum sıcaklık 60 dk sonunda 639°C ve 120 dk sonunda 640°C olmaktadır. Yeni tekerlek setinde sıcaklık artışının % 98'ine 68 dakika da, aşınmış tekerlek setinde ise sıcaklık artışının % 98'ine 37 dakikada ulaşılmaktadır. Ayrıca 34 dk süren analizde yeni ve aşınmış tekerlek setinde yaklaşık 100°C olan sıcaklık farkı ilerleyen zaman içinde azalmakta ve 120 dk sonunda bu fark 55°C kadar inmektedir.

TSI tarafından verilen senaryoya göre (34 dk) Zamana Bağlı (Transient) Isıl Analiz sonucunda, frenlemede döküm sabonun kullanıldığı yeni ve eski tekerlek seti için BA 004 tekerlek setinin bölgelere göre ısı dağılımı, M 1111 tekerlek seti ile karşılaştırıldığında 5 °C -15 °C daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla da BA 004 tekerlek setinin frenleme kapasitesi daha iyidir denilebilir. Tekerlek ağırlığı % 7 daha hafif olmasına rağmen, BA 004 tekerlek setinin frenleme kapasitesinin daha iyi olmasının sebebi, tekerlek gövde geometrisindeki farklılıktan dolayı tekerlek yüzey alanının % 6 daha fazla olmasıdır.

BA 004 tekerlek setinin kullanımı, ısı sebeplere dayalı tekerlek hasarlarının azaltılması için daha uygundur. Ayrıca daha hafif olan BA 004 tekerlek seti kullanımı halinde, vagonun darası düşeceği için vagonun taşıma kapasitesi artacaktır. Kompozit sabo kullanımı durumu için yapılan analiz göstermektedir ki, çok uzun süre frenleme yapılması gereken demiryolu hatlarında sık çalışan vagonlarda kompozit sabo yerine döküm sabo kullanılması, bu vagonlarda ısı sebeplerden dolayı oluşan tekerlek hasarlarını çok ciddi oranda azaltacaktır. Orman, vagon vb. yangın riskini de ciddi oranda azaltacağı söylenebilir.

Bir tren katarı yeni ve eski, S ve SS hız rejimine sahip, dolu ve boş, sensörlü ve sensörsüz vagonlardan oluşmaktadır. Sahada bu vagonların fren performansında ciddi farklılıklar vardır. Eski vagonlarda fren performansı zamanla düşmektedir. Bu durumlarda yeni vagonlara daha çok fren yükü düşmektedir. Ayrıca makinist tarafından yapılan hatalı frenleme, Dolu-Boş ve Yük-Yolcu kollarının uygun bir şekilde konumlandırılmaması ve el frenlerinin sıkılı unutulması gibi hatalı uygulamalar, bazı vagon tekerleklerinde daha yüksek sıcaklık değerlerinin gözlemlenmesine dolayısıyla daha ciddi tekerlek hasarlarına sebep olmaktadır.

Maksimum sıcaklıkların tekerlek yuvarlanma yüzeyinde görülmesi sebebiyle boji üzerine eklenecek basit aparatlarla, tekerleklerin yuvarlanma yüzeyine hava akımının yönlendirilmesi vb. yöntemler, tekerlek yüzeyinden havaya, taşınımla ısı transferini artırarak sıcaklıkların düşürülmesine faydalı olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Anonim** (2003) Tenlerin Hazırlanması ve Trafikine Ait Yönetmelik *TCDD*.
- [2] **Anonim** (2013) *Official Journal of the European Union L104/46*.
- [3] **GFATTER, G., BERGER P., VOHLA, G., KRAUSE G.,** (2002). Basics of Brake Technology, *KNORR-BREMSE*.
- [4] **SEYREK, M.,** (1965). Demiryolu Taşıtlarının Fren Hesabı ve Fren Donanımı
- [5] **Anonim** (2006). UIC Code 540: Brakes-Air Brakes for Freight Trains and Passenger Trains.
- [6] **GFATTER G., BERGER P., VOHLA G., METZNER O., PIETSCH U., HENNING M., TEIGHBRODT T., RYCHLI W.** (2001). Brake System for Freight Cars, - *KNORR-BREMSE*
- [7] **Anonim** (2004). UIC Leaflet Code 832: Technical Specification for the Supply of Brake-Shoes Made Tractive from Phosphoric Iron for and Trailing Stock,
- [8] **AKBAYIR, Ö.**(2012). Yük Vagonlarında Kullanılan Sabolar ve Karşılaştırması, *1.Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı*. Karabük, Türkiye
- [9] **Anonim** (2013). Synthesis Paper on the Europe Train Operation with LL Brake Blocks. *Final Report UIC International Union of Railways*.
- [10] **Anonim** (2014). UIC 544-1 Leaflet: Braking Power.
- [11] **YEĞİN Mukadder.** (2014). Yük Vagonlarında Kullanılan Fren Sabolarının (Pabuçları) Aşınma Miktarlarının Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi”, 2014
- [12] **TEIMOURIMANESH Shahab, LUNDEN Roger, VERNERSON Tore.** (2010). Braking Capacity of Railway Wheels.*16th International Wheelset Congress*
- [13] **Knorr Bremse Kataloğu.** (2014)
- [14] **BOGACZ Roman.**(2011). Application of Pressure Poured Cast Wheel Technology for European Freight Service.
- [15] **Anonim** (2012). TS EN 13262+A2: Demiryolu Uygulamaları - Tekerlek Takımları ve Bojiler - Tekerlekler - Mamul Özellikleri”,
- [16] **Anonim** (2014). UIC 510-2: Trailing Stock: Wheels and Wheelsets. Conditions Concerning the Use of Wheels of Various Diameters”
- [17] **Anonim** (2006).Railway Investigation Report R06V0136: Runaway /Derailment - Canadian National Freight Train.

- [18] **ZIMA R., JANOS P.** (2012). Dvojkli Wheelsets. *Bonatrans Group*
- [19] **İŞERİ H.** (1969). Demiryolu Vagonları ve Vagon Parçaları Deyimleri Sözlüğü
- [20] **KLW An Interpipe Brand Kataloğu** (2015)
- [21] **Anonim** (2006). TS_EN_13261_A1: Demiryolu Uygulamaları –Tekerlek Takımları ve Bojiler– Dingiller – Mamul Özellikleri
- [22] **Anonim** (2010). EN_1531: Railway Applications - In-Service Wheelset Operation - Requirements–In Service and Off-Vehicle Wheelset Maintenance.
- [23] **Anonim** (1995) Brake Engineering Terms and Data. *Knorr-Bremse*
- [24] **NICOLUSSI, ML.** (2000). A Brief Introduction to Locomotive Application.
- [25] **LINDGREEN,E. SORENSON S.** (2005). Driving Resistance From Railroad Trains.
- [26] **ZHU, Yi.** (2013). Adhesion in the Wheel–Rail Contact.
- [27] **VOLLEBREGT E.A.H.** (2014). User Guide for Contact-Vollebregt & Kalker’s Rolling and Sliding Contact Model.
- [28] **KUMAR K.L** (2003). Engineering Mechanics.
- [29] **OLOFSSON U., LEWIS R.** (2006), Tribology of the Wheel –RailContact
- [30] **GALLO R., BETTINESCHI M., LOMBARDO F., MANCINI G., FATTORI A..** Effects of thermal loads on fatigue verification of wheels with web mounted brake Discs.
- [31] **YELBAY H. İlker.** Tahribatsız Yöntemlerle Kalıntı Gerilim Ölçümünde Gelişmeler.
- [32] **Anonim** (1999) Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels- US Federal Railroad Administration.
- [33] **LONSDALE C., DEMILLY F., DEL FABBRO V.,** Wheel Rim Residual Stress Measurements.
- [34] **Anonim** (1989). European Railroad Research Institute: Document ORE B169/RP2.
- [35] **Anonim** (2008). VPI 04: Yük vagonlarının bakım-onarım Tekerlek takımları.
- [36] **CHANDRA J. HARISH S.** (2011). Hand Book for C&W .
- [37] **KENNEDY T.C, GOZALES S., HARDER R.F.** (2004). Finite Element Analysis of Martensite Formation in Railcar Wheels During Hertzian Sliding Conditions. *6th International Conference on Railway Bogies and Running Gears Budapest*
- [38] **KABO E.** (2013). Image Analysis of Defects of Railway Wheels.
- [39] **WHITE S., UHLIG M.** (2013). Engineering Standard Rolling Stock ESR0330: Wheel Defect Manuel.

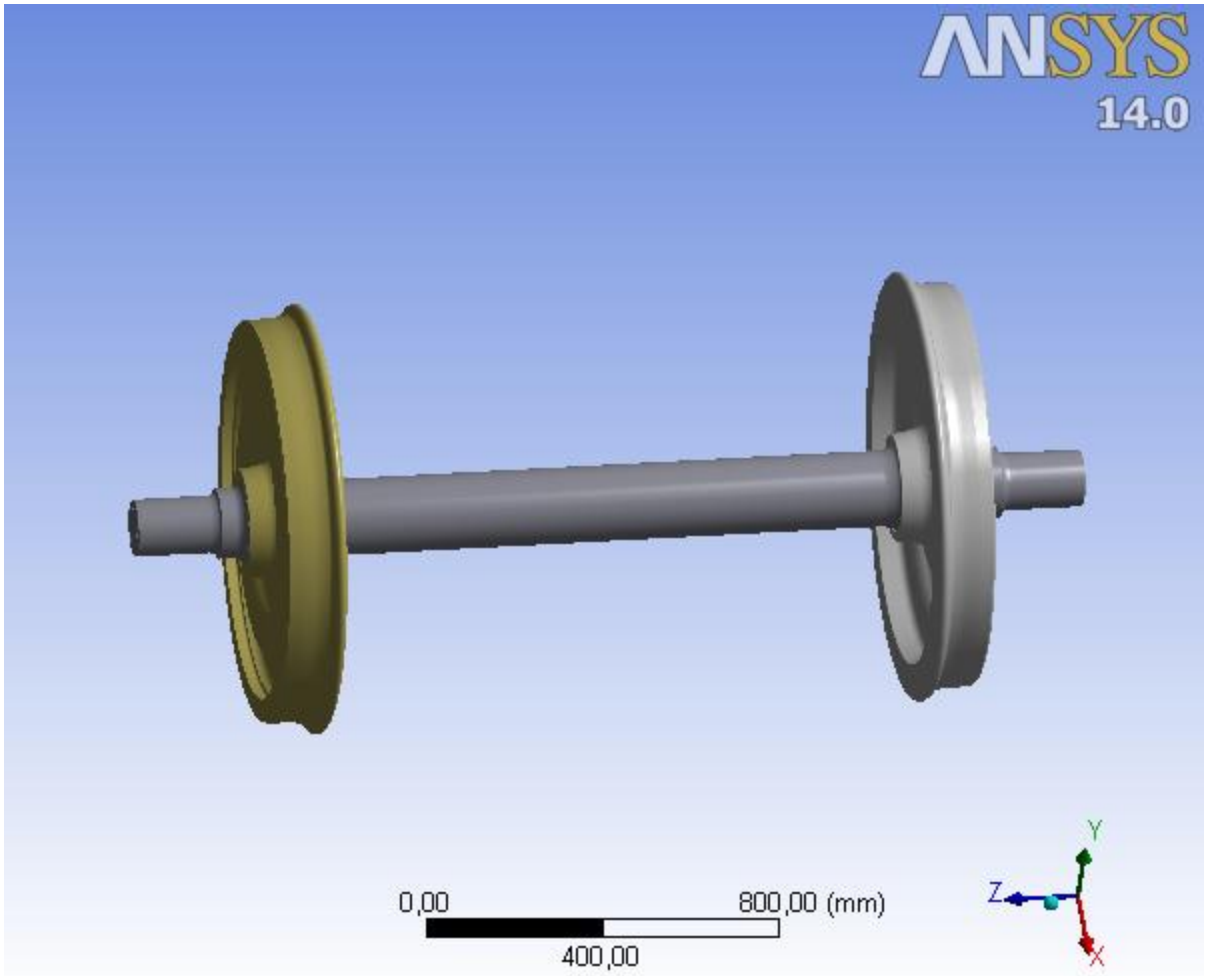
- [40] **VESKOVIĆ, S., ĐORĐEVIĆ, Ž., STOJIĆ, G., TEPIĆ, J., TANACKOV, I.** (2011). Necessity And Effects Of Dynamic Systems For Railway Wheel Defect Detection.
- [41] **Anonim** (2012). TS EN 13979-1+A2 : Demiryolu Uygulamaları - Tekerlek Takımları Ve Bojiler Monoblok Tekerlekler-Teknik Onay Prosedürü - Bölüm 1: Dövme ve Haddelenmiş Tekerlekler.
- [42] **Anonim** (2000). Railway Group Standard GM/RT2045:Braking Principles for Rail Vehicles.
- [43] **Anonim** (2013). OTIF: Intergovernmental Organisation For International Carriage By Rail-Guide for the application of the UTP WAG.
- [44] **KIM, Min-Soo,**(2011). Dynamometer Tests of Brake Shoes under Wet Conditions for the High Speed Trains-International Journal of Systems Applications. *Engineering & Development Issue 2, Volume 5*
- [45] **MARICH, S.** (2014). The Basics of Wheel Rail Interactions. *Wheel Rail Dynamics Module 1-Wheel/Rail Interface Forum- Brisbane.*
- [46] **Anonim** (1987). ORE B 169/RP1 Limites thermiques des roues et des sabots.
- [47] **Anonim** (2007). UIC 541-4: General Conditions for Certification on Composite Brake Blocks
- [48] **MILOŠEVIĆ, Miloš S., STAMENKOVIĆ Dušan S., MILOJEVIĆ Andrija P., TOMIĆ Miša M.** (2012). Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles
- [49] **ARKAN, M., SAHİR, A.** Sonlu Elemanlar Metodu'nun Mühendislikte Uygulamaları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [50] **INCROPERA Frank P. , DEWITT D.P.,** (2010). Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri.
- [51] **YÜNCÜ H., KAKAÇ S.,** (1999). Temel Isı Transferi
- [52] **SITARZ, M., SŁADKOWSKI ,A., BIZON, K., CHRUZIK K..** Designing of railway wheels - Part 1. Finite Element Method.
- [53] **Anonim** (1987). ORE B169 Report: n° 1 Thermal limits of wheels and shoe.
- [54] **MILUTINOVIC, D., RADOSAVLJEVIC A., LUCANIN, V.** (2003). Temperature and Stress State of the Block Braked Solid Wheel in Operation on Yugoslav Railways.
- [55] **MODEST Michael F.** (2013). Radiative Heat Transfer –third edition.

EKLER



Ek-1 B 004 YENİ TEKERLEK SETİNİN ZAMANA BAĞLI (TRANSİENT) ISIL ANALİZ RAPORU

Raporu Hazırlayan	Nail KARAGÖZ
Tez Danışmanı	Prof.Dr. HALİL İBRAHİM ACAR
Product Version	14.0 Release
Analysis Type	Transient Thermal Analysis



Contents

- Units
- **Model (F3)**
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Contacts
 - Contact Regions
 - Mesh
 - Body Sizing
 - **Transient Thermal (F4)**
 - Initial Temperature
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (F5)
 - Solution Information
 - Result Charts
 - Temperature
- **Material Data**
 - Steel

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (F3)

Geometry

TABLE 2
Model (F3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\nail\Desktop\Tekerlek Takımı (Komple)\Teker_analiz_files\dp0\SYS-4\DM\SYS-4.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	1323,9 mm
Length Y	977,06 mm
Length Z	2180, mm
Properties	
Volume	1,3032e+008 mm ³

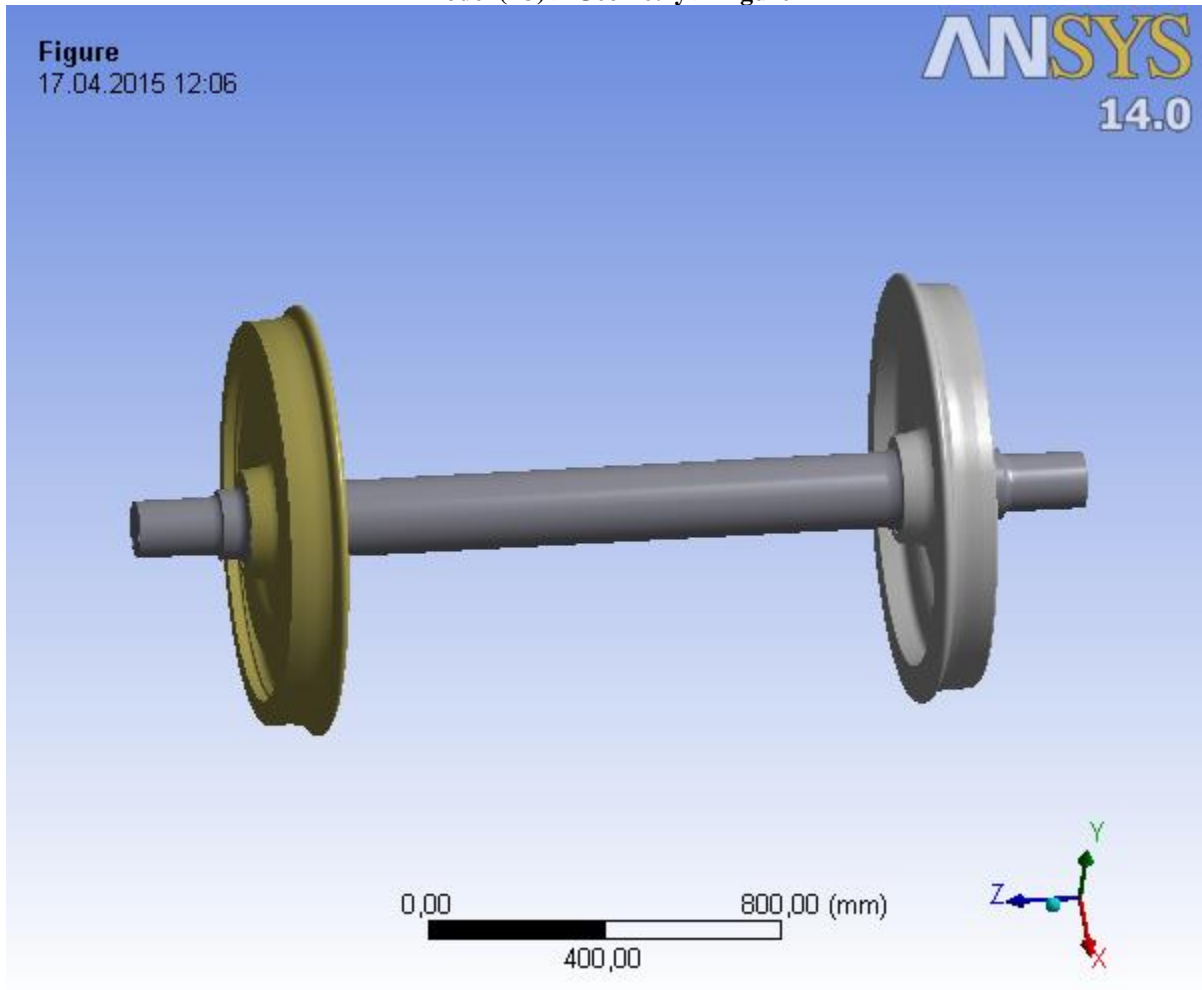
Mass	1,023 t
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	71
Active Bodies	3
Nodes	308218
Elements	193728
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\nail\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Faces	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (F3) > Geometry > Body Groups

Object Name	<i>Part</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Definition	
Suppressed	No
Assignment	Steel
Coordinate System	Default Coordinate System
Bounding Box	
Length X	977,06 mm
Length Y	977,06 mm
Length Z	2180, mm
Properties	
Volume	1,3032e+008 mm ³
Mass	1,023 t
Centroid X	-1,55 mm
Centroid Y	6,7686 mm
Centroid Z	3,2745e-005 mm
Moment of Inertia Ip1	5,3954e+005 t·mm ²
Moment of Inertia Ip2	5,3954e+005 t·mm ²
Moment of Inertia Ip3	91246 t·mm ²
Statistics	

Nodes	308218
Elements	193728
Mesh Metric	None

FIGURE 1
Model (F3) > Geometry > Figure



Coordinate System TABLE 4

Model (F3) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Connections

TABLE 5
Model (F3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

Mesh

TABLE 6
Model (F3) > Mesh

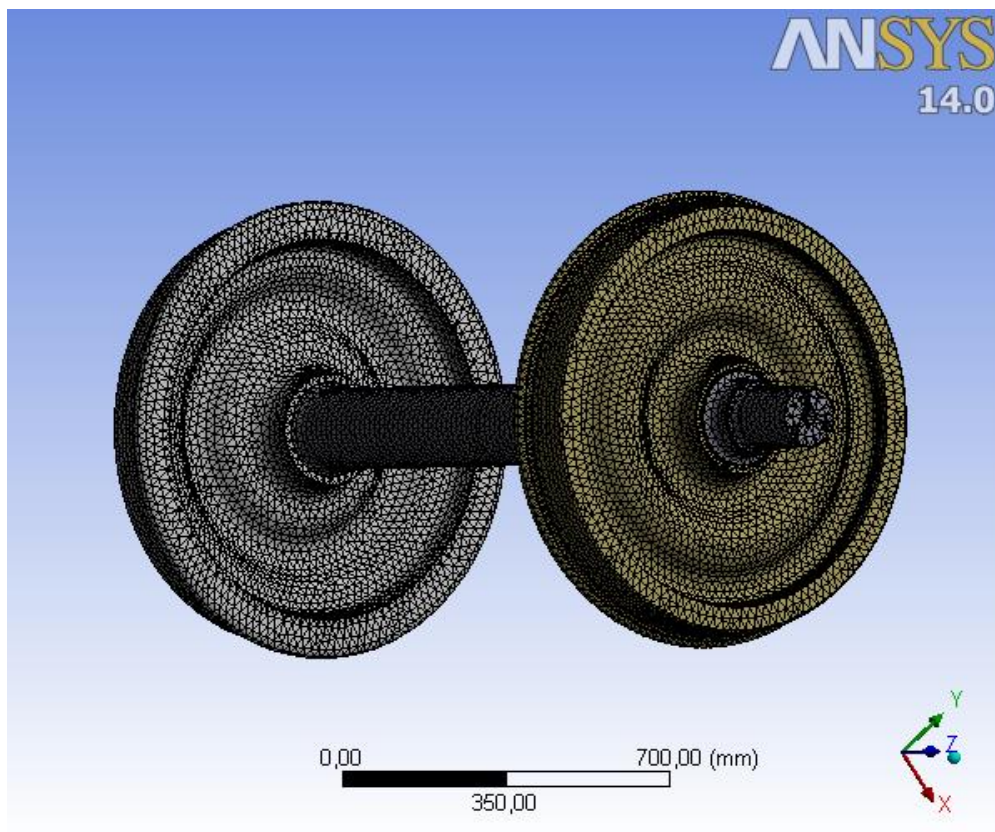
Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	2,85830 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default

Statistics	
Nodes	308218
Elements	193728
Mesh Metric	None

TABLE 7
Model (F3) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	<i>Body Sizing</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	20, mm
Behavior	Soft

FIGURE 2
Model (C3) > Mesh > Figure



Transient Thermal (F4)

TABLE 8
Model (F3) > Analysis

Object Name	<i>Transient Thermal (F4)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Thermal
Analysis Type	Transient
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Generate Input Only	No

TABLE 9
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Initial Condition

Object Name	<i>Initial Temperature</i>
State	Fully Defined
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	45, °C

TABLE 10
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	2040, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	20,4 s
Minimum Time Step	2,04 s
Maximum Time Step	204, s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Radiosity Controls	
Flux Convergence	1,e-004
Maximum Iteration	1000,
Solver Tolerance	0,1
Over Relaxation	0,1
Hemicube Resolution	10,
Nonlinear Controls	
Heat Convergence	Program Controlled
Temperature Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Nonlinear Formulation	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Thermal Flux	Yes
General Miscellaneous	No
Calculate Results At	All Time Points
Max Number of Result Sets	Program Controlled
Analysis Data Management	

Solver Files Directory	C:\Users\nail\Desktop\Tekerlek Takımı (Komple)\Teker_analiz_files\dp0\SYS-6\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mmm

TABLE 11
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Loads

Object Name	<i>Heat Flow</i>	<i>Heat Flow 2</i>	<i>Radiation</i>	<i>Convection 2</i>	<i>Convection 3</i>
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	2 Faces	110 Faces	30 Faces	19 Faces	
Definition					
Type	Heat Flow	Radiation	Convection		
Define As	Heat Flow				
Magnitude	31500 W (step applied)				
Suppressed	No				
Correlation			To Ambient		
Emissivity			0,8 (step applied)		
Ambient Temperature			45, °C (step applied)		
Film Coefficient				2,5e-005 W/mm ² ·°C (step applied)	5,2e-005 W/mm ² ·°C (step applied)

FIGURE 3
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Heat Flow

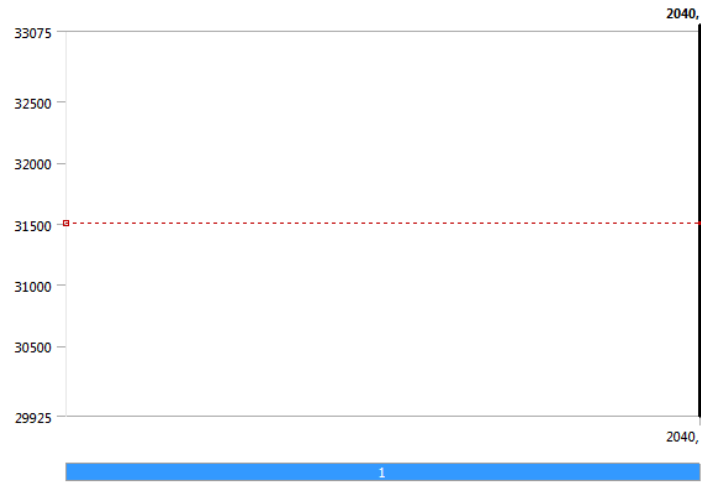


FIGURE 4
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Heat Flow > Figure

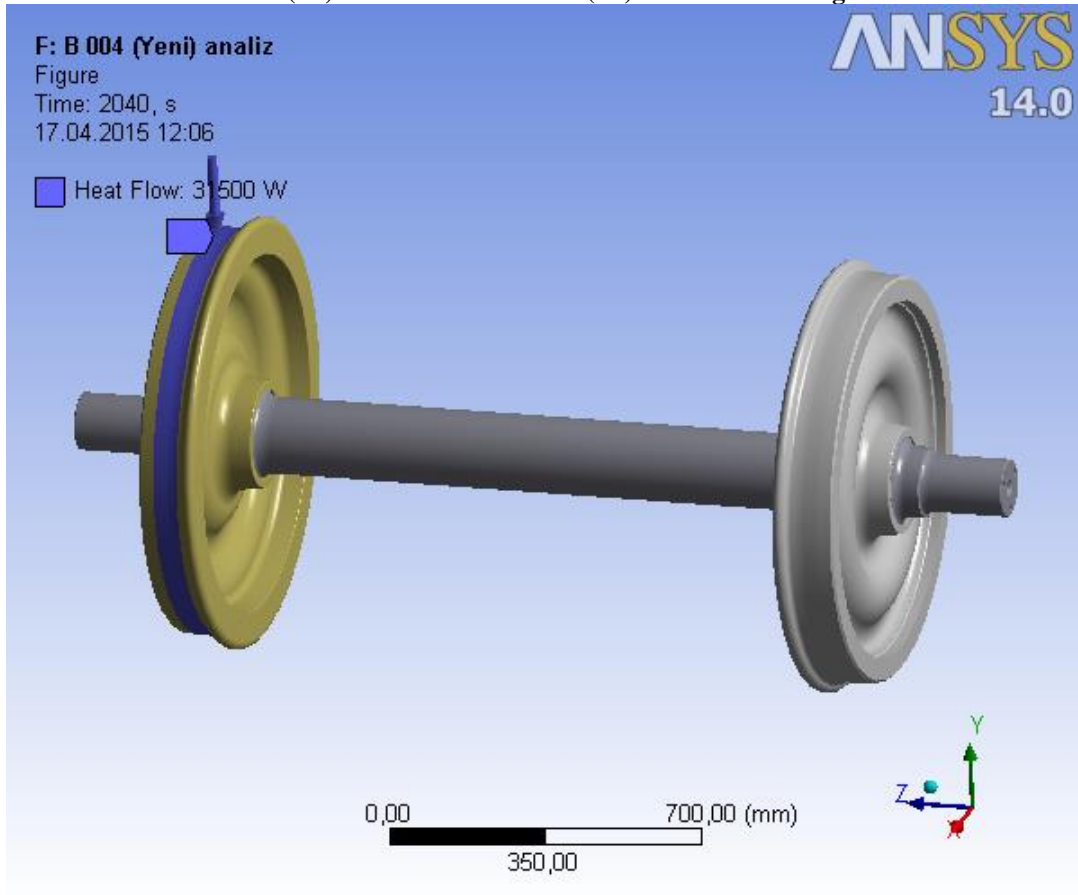


FIGURE 5
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Heat Flow 2

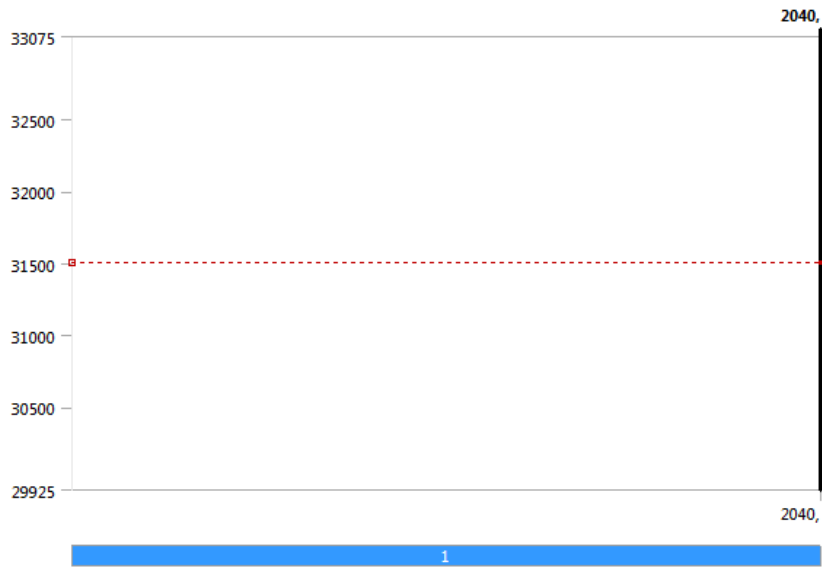


FIGURE 6
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Heat Flow 2 > Figure

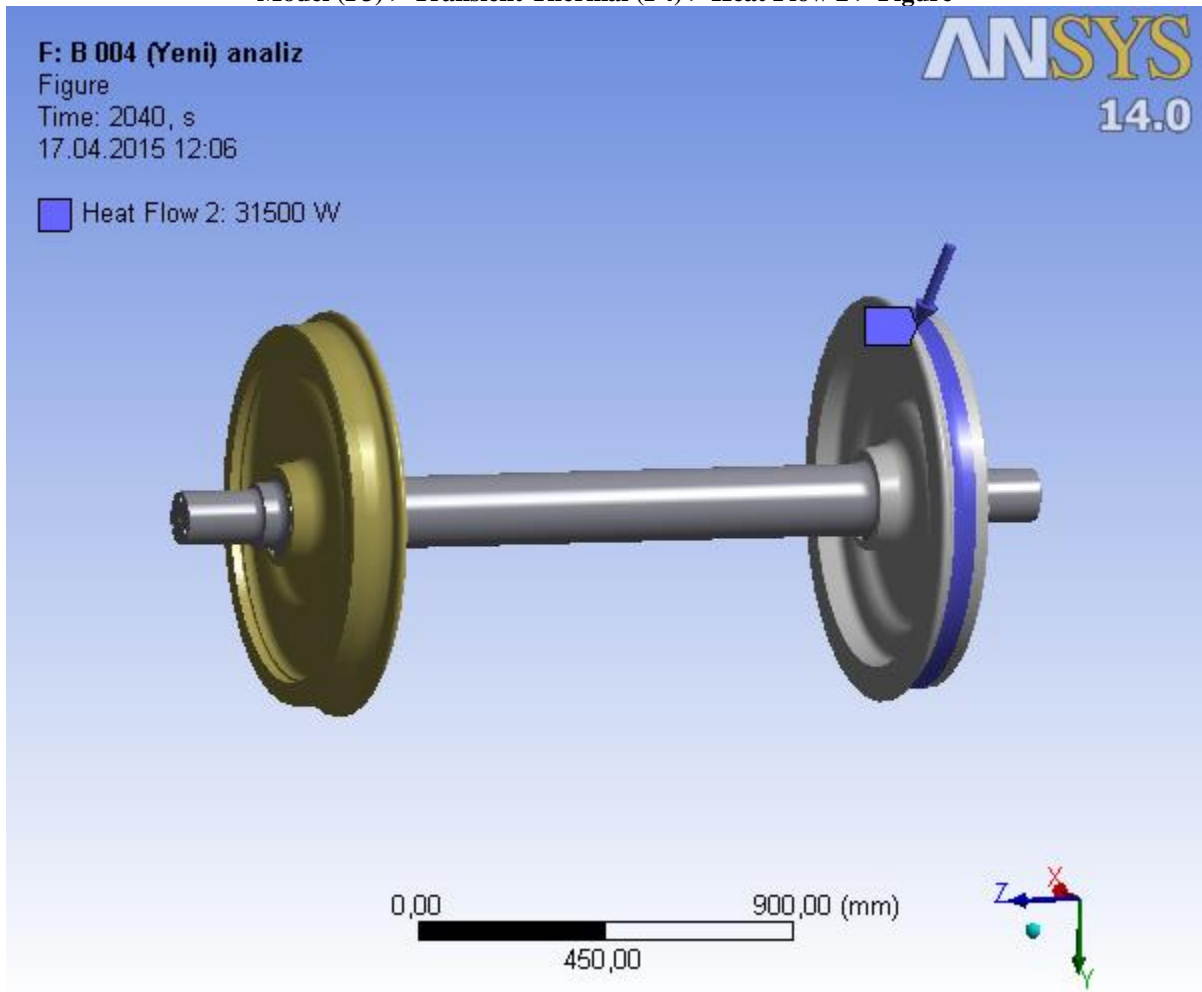


FIGURE 7
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Radiation

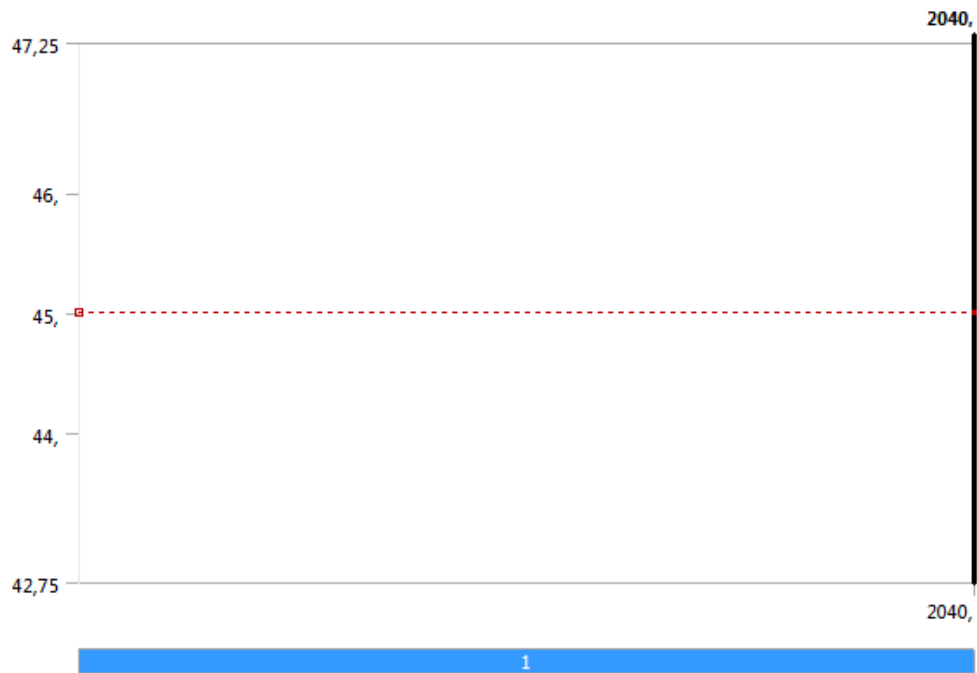


FIGURE 8
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Radiation > Figure

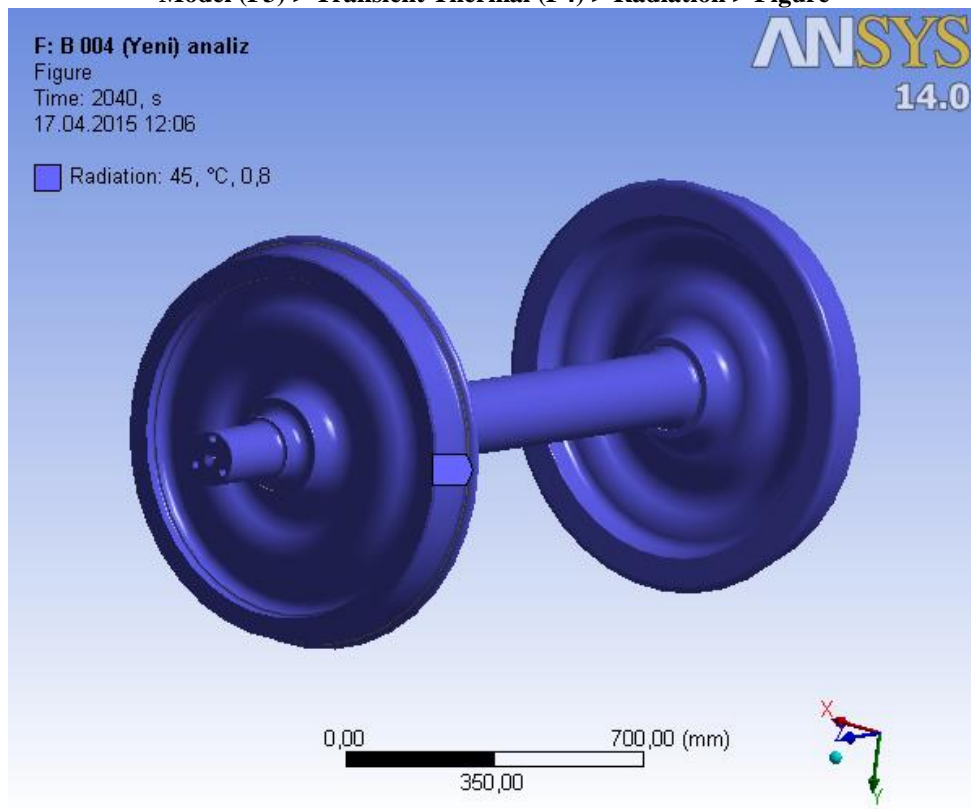


FIGURE 9
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 2

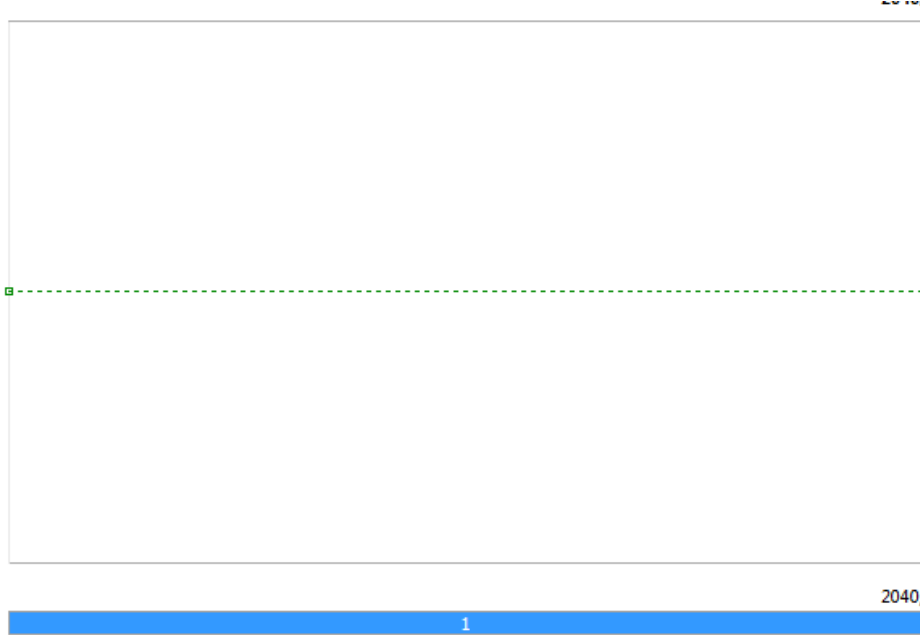


TABLE 12
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 2

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 2,5e-005	= 45,
	2040,	2,5e-005	45,

FIGURE 10
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 2 > Figure

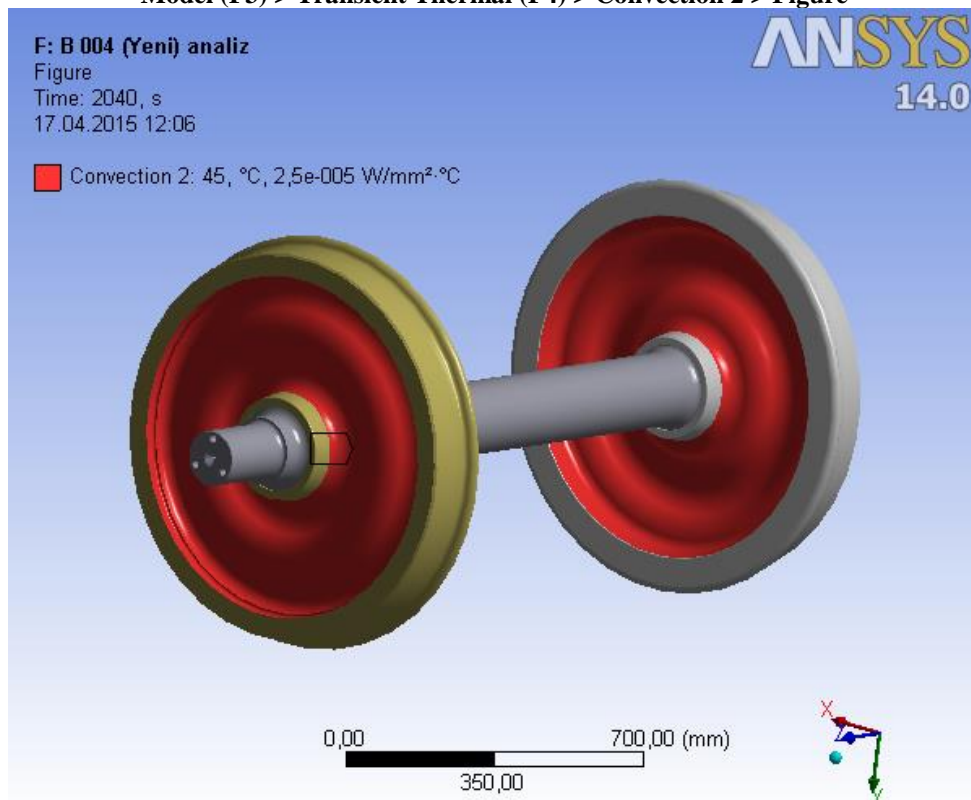


FIGURE 11
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 3

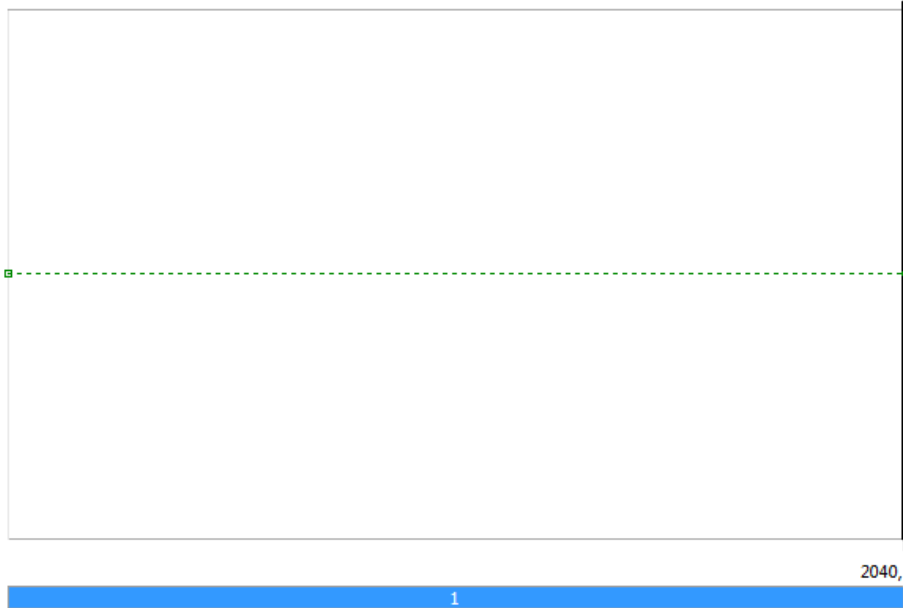


TABLE 13
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 3

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 5,2e-005	= 45,
	2040,	5,2e-005	45,

FIGURE 12
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 3 > Figure

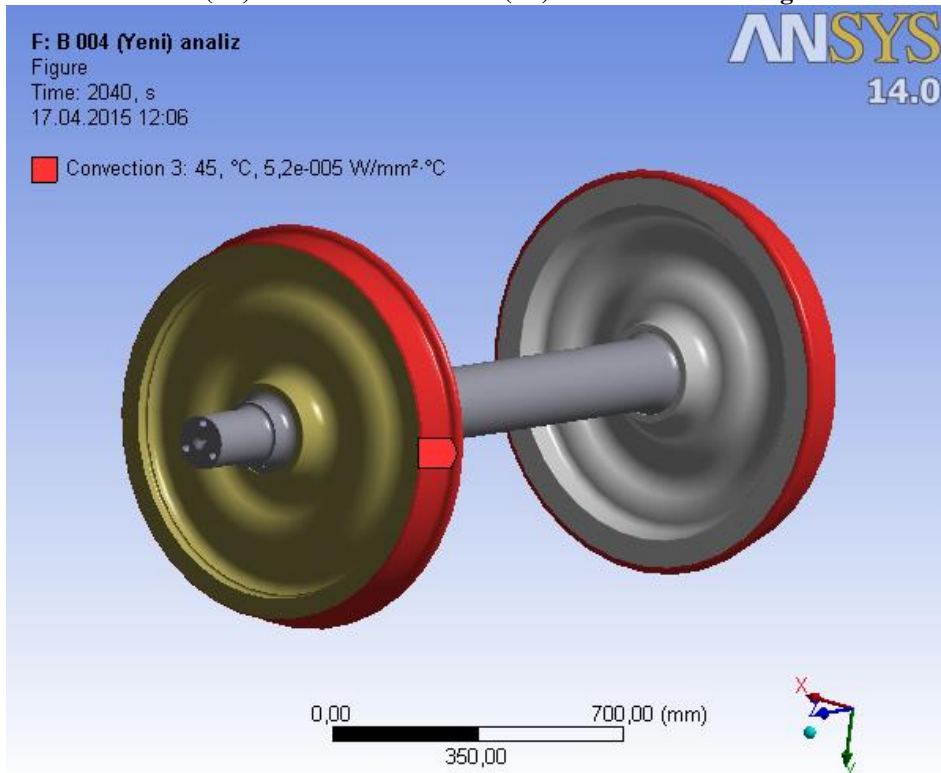


TABLE 14
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Loads

Object Name	<i>Convection 4</i>	<i>Convection</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	4 Faces	63 Faces
Definition		
Type	Convection	
Film Coefficient	5,3e-005 W/mm ² ·°C (step applied)	2,e-005 W/mm ² ·°C (step applied)
Ambient Temperature	45, °C (step applied)	
Suppressed	No	

FIGURE 13
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 4

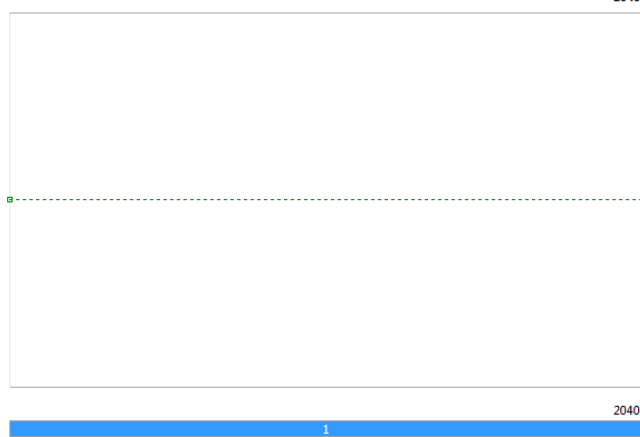


TABLE 15
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 4

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 5,3e-005	= 45,
	2040,	5,3e-005	45,

FIGURE 14
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection 4 > Figure

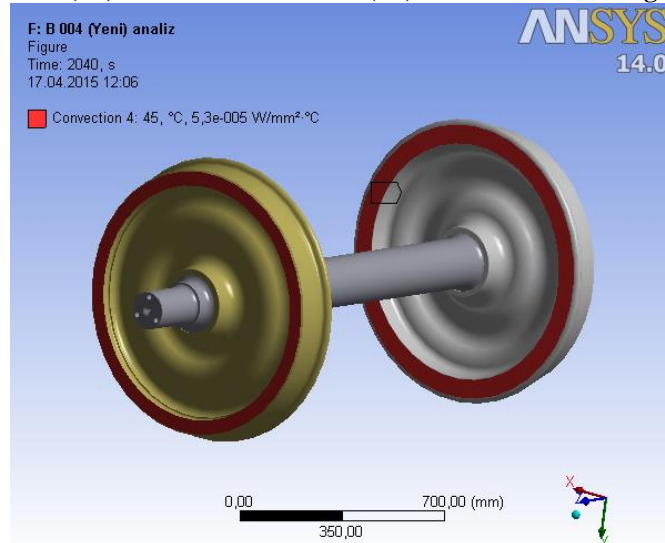


FIGURE 15
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection

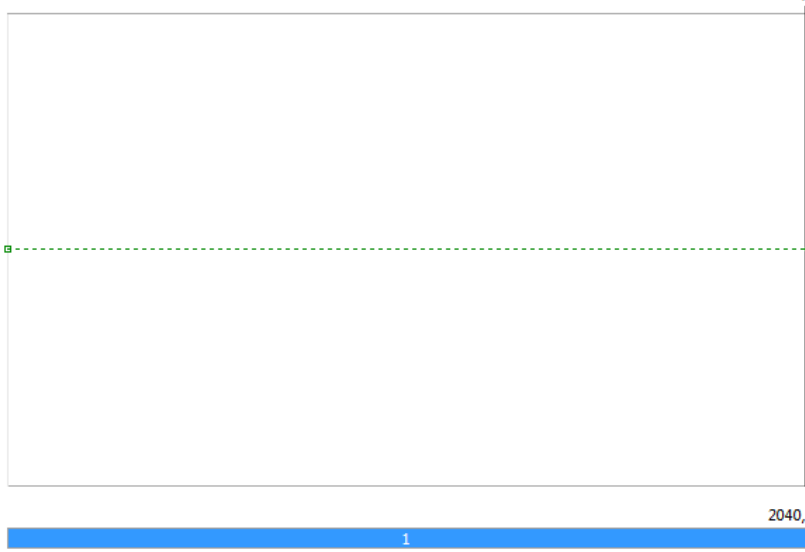
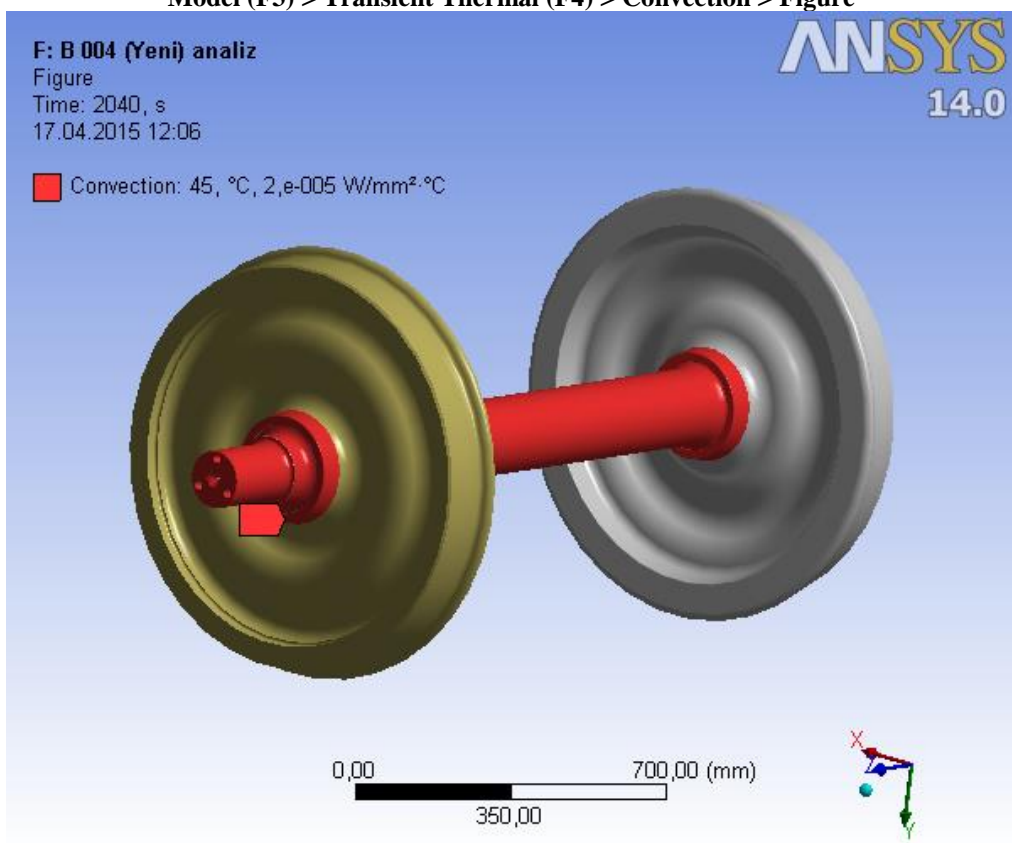


TABLE 16
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 2,e-005	= 45,
	2040,	2,e-005	45,

FIGURE 16
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Convection > Figure



Solution (F5)

TABLE 17
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution

Object Name	<i>Solution (F5)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 18
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 19
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Temperature - Global Maximum</i>	<i>Temperature - Global Minimum</i>
State	Solved	
Definition		
Type	Temperature	
Suppressed	No	
Scope		
Scoping Method	Global Maximum	Global Minimum
Results		
Minimum	105,14 °C	45, °C
Maximum	430,42 °C	45, °C

FIGURE 17
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Solution Information > Temperature - Global Maximum

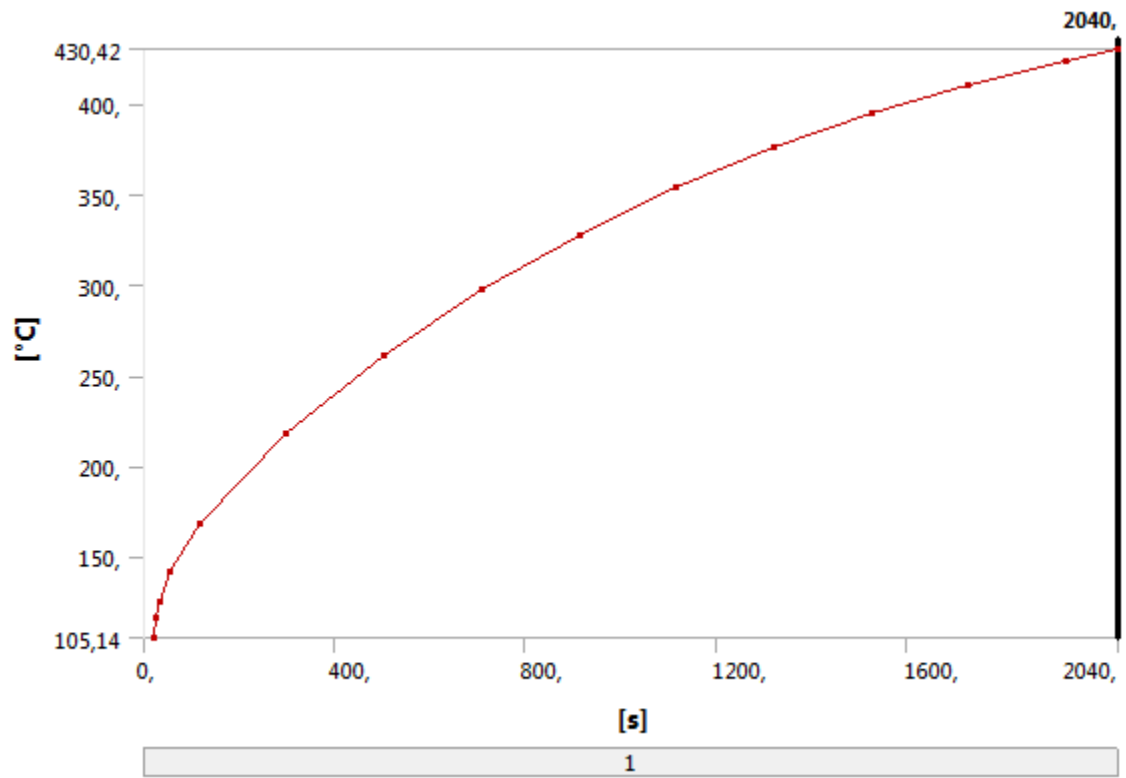


FIGURE 18
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Solution Information > Temperature - Global Minimum

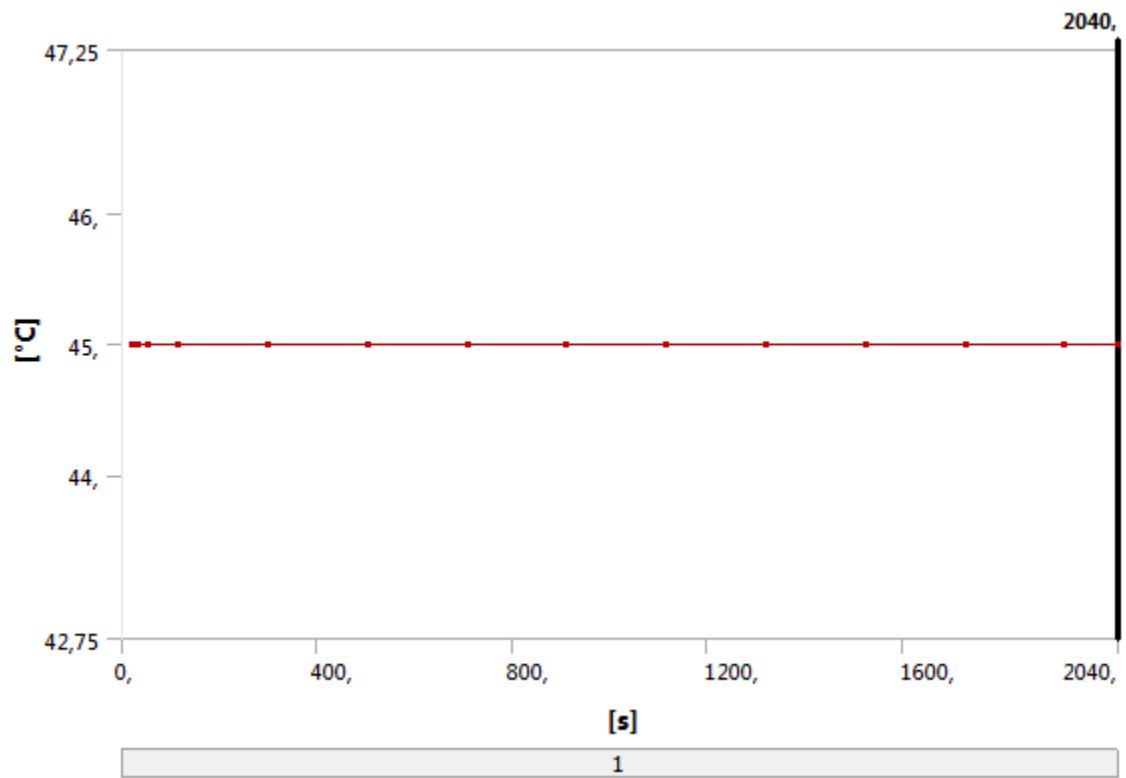


TABLE 20
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Results

Object Name	<i>Temperature</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Temperature
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	45,002 °C
Maximum	430,42 °C
Minimum Occurs On	dingil
Maximum Occurs On	Solid
Minimum Value Over Time	
Minimum	45, °C
Maximum	45,002 °C
Maximum Value Over Time	
Minimum	105,14 °C
Maximum	430,42 °C
Information	
Time	2040, s
Load Step	1
Substep	15
Iteration Number	23

FIGURE 19
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Temperature

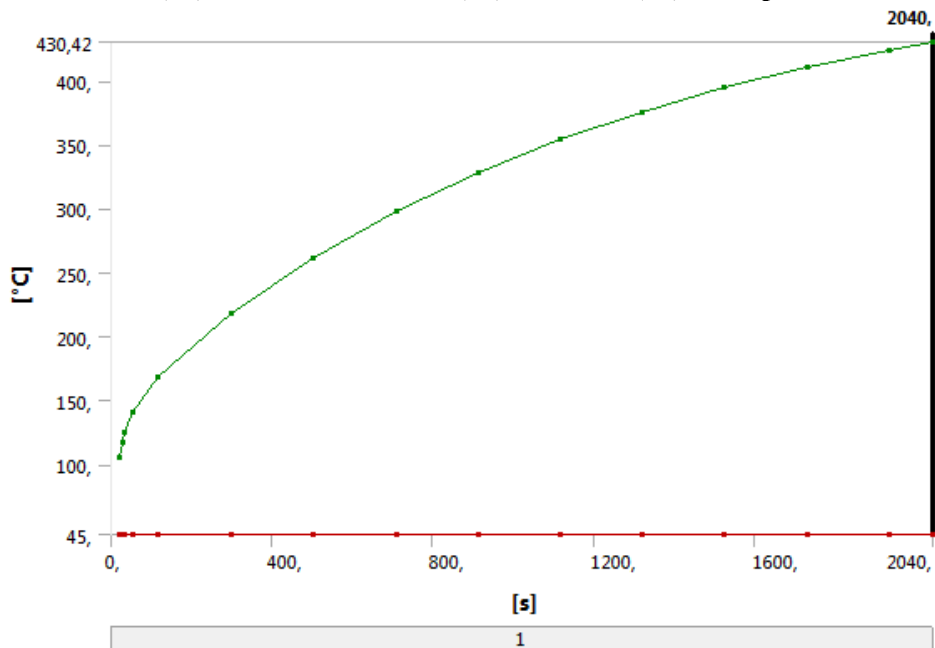
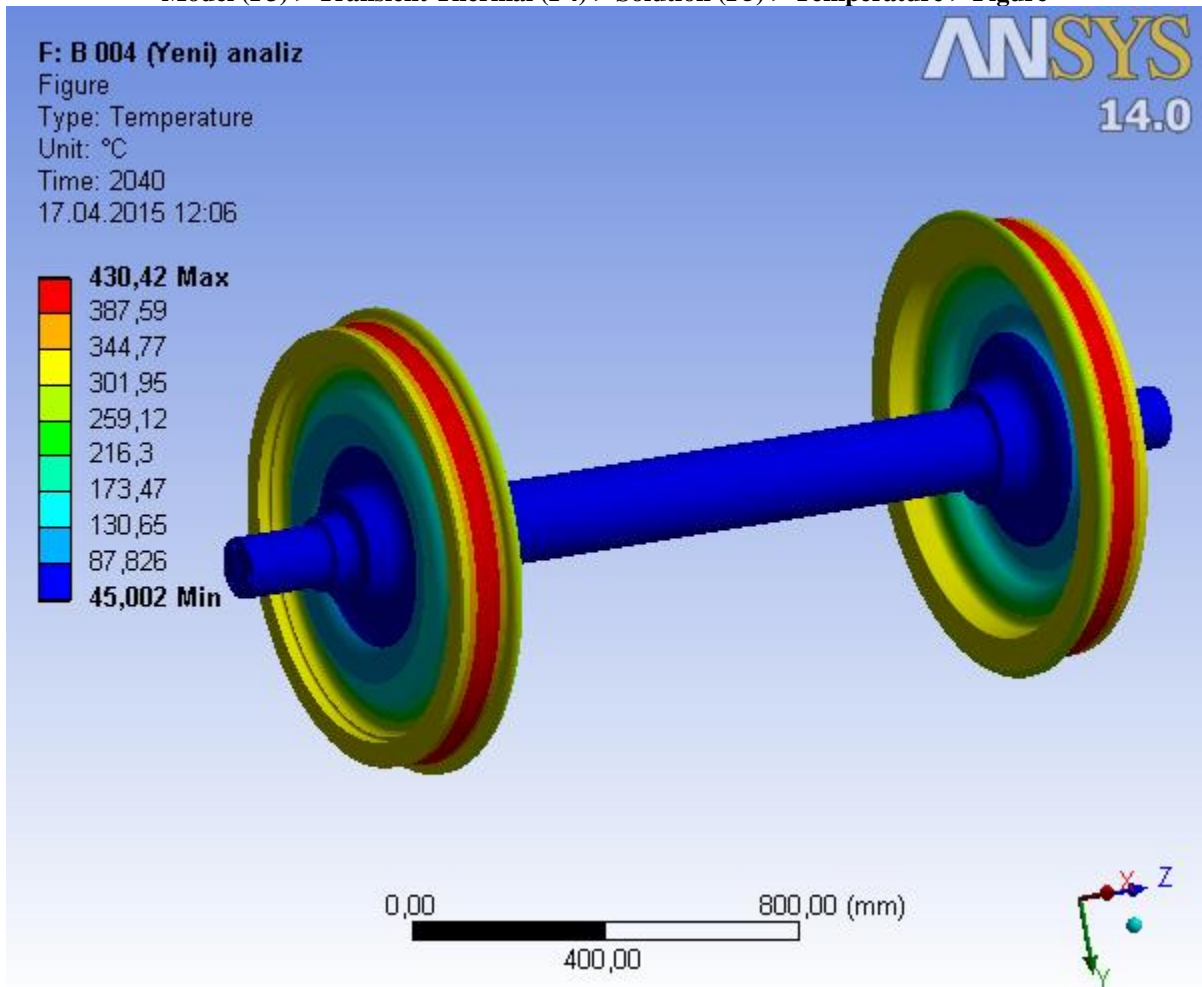


TABLE 21
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Temperature

Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	
20,4	45,	105,14	
27,2		116,47	
34,		124,92	
54,4		141,11	
115,6		168,31	
299,2		218,41	
503,2		261,6	
707,2		297,5	
911,2		327,77	
1115,2		353,83	
1319,2		375,97	
1523,2		394,71	
1727,2		45,001	410,55
1931,2		45,002	423,9
2040,	430,42		

FIGURE 20
Model (F3) > Transient Thermal (F4) > Solution (F5) > Temperature > Figure



Material Data

Steel

TABLE 22
Steel > Constants

Density	7,85e-009 tonne mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 23
Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22,

TABLE 24
Steel > Specific Heat

Specific Heat mJ tonne ⁻¹ C ⁻¹	Temperature C
4,4e+008	0,
4,8e+008	100,
5,1e+008	200,
5,19e+008	300,
5,28e+008	400,
5,37e+008	500,
5,46e+008	600,

TABLE 25
Steel > Isotropic Thermal Conductivity

Thermal Conductivity W mm ⁻¹ C ⁻¹	Temperature C
4,73e-002	0,
4,5e-002	100,
4,41e-002	200,
4,33e-002	300,
4,26e-002	400,
4,2e-002	500,

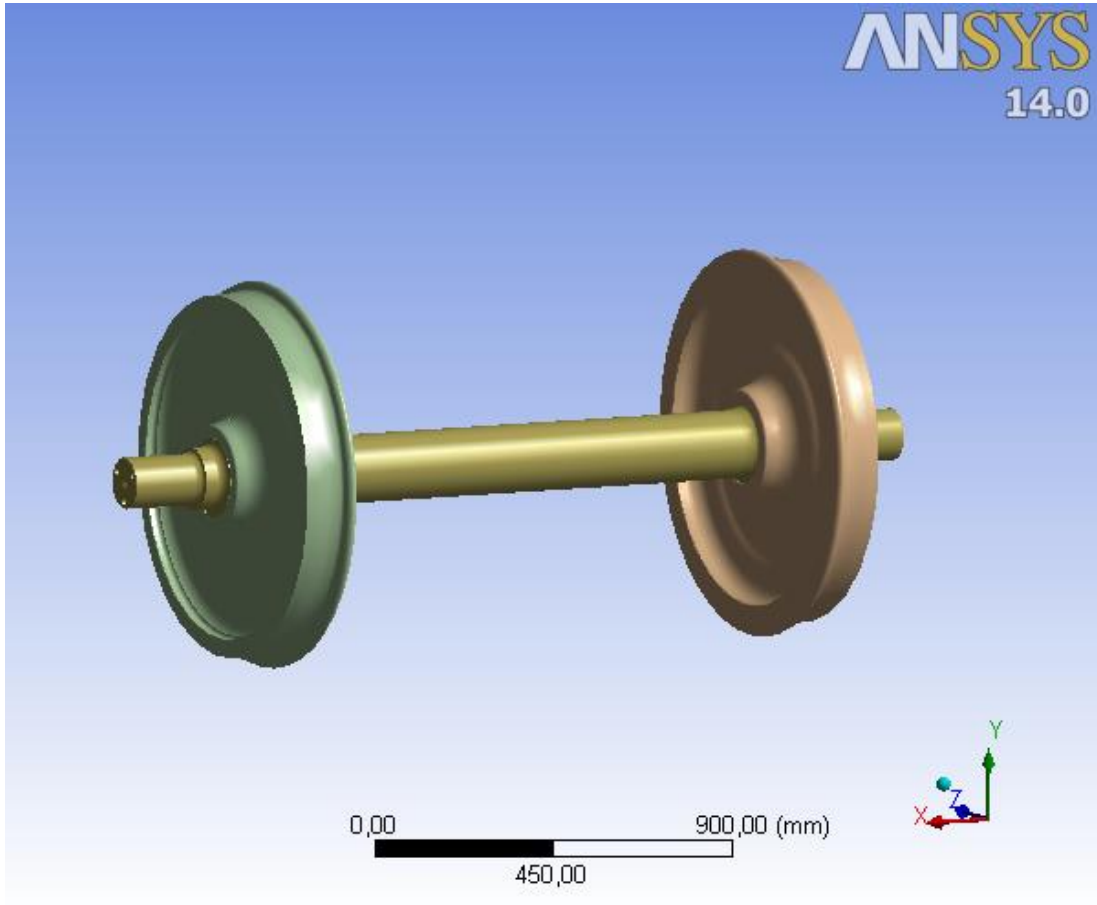
TABLE 26
Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000



Ek-2 M 1111 YENİ TEKERLEK SETİNİN ZAMANA BAĞLI (TRANSİENT) ISIL ANALİZ RAPORU

Raporu Hazırlayan	Nail KARAGÖZ
Tez Danışmanı	Prof.Dr. HALİL İBRAHİM ACAR
Product Version	14.0 Release
Analysis Type	Transient Thermal Analysis



Contents

- Units
- Model (C3)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Contacts
 - Contact Regions
 - Mesh
 - Body Sizing
 - Transient Thermal (C4)
 - Initial Temperature
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (C5)
 - Solution Information
 - Result Charts
 - Temperature
- Material Data
 - Steel

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (C3)

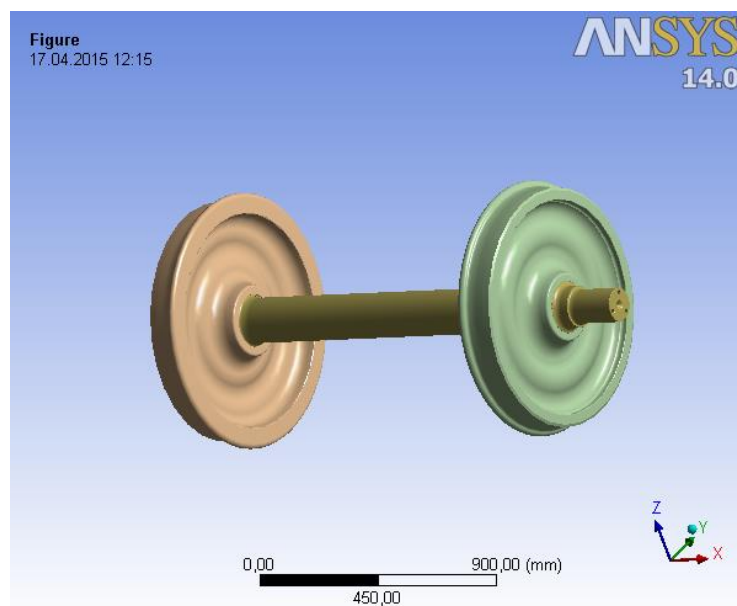
Geometry

TABLE 2
Model (C3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\nail\Desktop\Tekerlek Takımı (Komple)\M1111 Yeni .stp
Type	Step
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	2249, mm
Length Y	976, mm
Length Z	976, mm
Properties	
Volume	1,3593e+008 mm ³
Mass	1,0671 t

Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	17
Active Bodies	5
Nodes	316321
Elements	199535
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Solid Bodies	Yes
Surface Bodies	Yes
Line Bodies	No
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\nail\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Decompose Disjoint Faces	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

FIGURE 1
Model (C3) > Geometry > Figure



Coordinate Systems

TABLE 3
Model (C3) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Connections

TABLE 4
Model (C3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 5
Model (C3) > Connections > Contacts

Object Name	<i>Contacts</i>
State	Fully Defined
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,
Tolerance Value	6,5969 mm
Use Range	No
Face/Face	Yes
Face/Edge	Yes
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies

Mesh

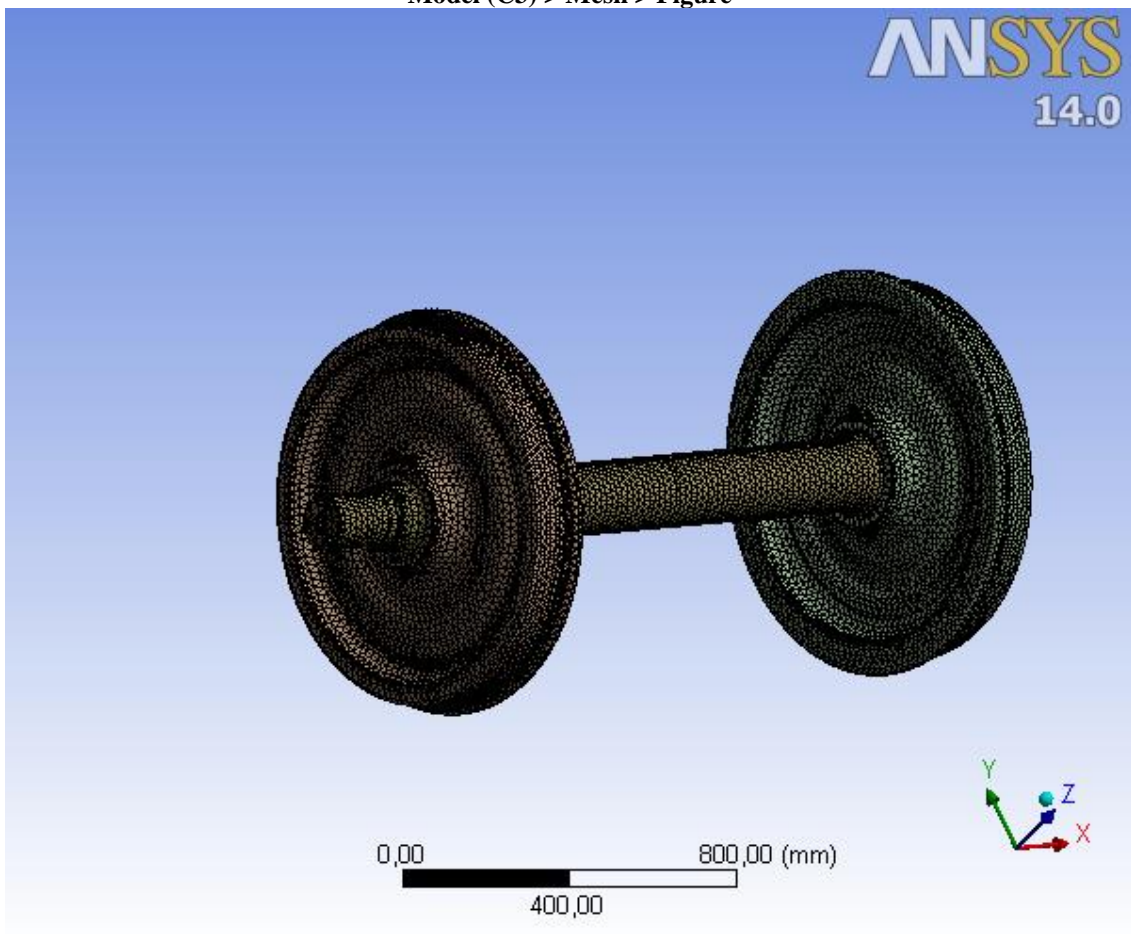
TABLE 6
Model (C3) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	2,0 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	316321
Elements	199535
Mesh Metric	None

TABLE 7
Model (C3) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	<i>Body Sizing</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	20, mm
Behavior	Soft

FIGURE 2
Model (C3) > Mesh > Figure



Transient Thermal (C4)

TABLE 8
Model (C3) > Analysis

Object Name	<i>Transient Thermal (C4)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Thermal
Analysis Type	Transient
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Generate Input Only	No

TABLE 9
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Initial Condition

Object Name	<i>Initial Temperature</i>
State	Fully Defined
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	45, °C

TABLE 10
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	2040, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	20,4 s
Minimum Time Step	2,04 s
Maximum Time Step	204, s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Radiosity Controls	
Flux Convergence	1,e-004
Maximum Iteration	1000,
Solver Tolerance	0,1
Over Relaxation	0,1
Hemicube Resolution	10,
Nonlinear Controls	
Heat Convergence	Program Controlled
Temperature Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Nonlinear Formulation	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Thermal Flux	Yes
General Miscellaneous	No
Calculate Results At	All Time Points
Max Number of Result Sets	Program Controlled
Analysis Data Management	

Solver Files Directory	C:\Users\nail\Desktop\Tekerlek Takımı (Komple)\Teker_analiz_files\dp0\SYS-7\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mmm

TABLE 11
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Loads

Object Name	<i>Heat Flow</i>	<i>Heat Flow 3</i>	<i>Radiation</i>	<i>Convection 2</i>	<i>Convection 3</i>
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	2 Faces	124 Faces	49 Faces	4 Faces	
Definition					
Type	Heat Flow	Radiation	Convection		
Define As	Heat Flow				
Magnitude	31500 W (step applied)				
Suppressed	No				
Correlation			To Ambient		
Emissivity			0,8 (step applied)		
Ambient Temperature			45, °C (step applied)		
Film Coefficient				2,5e-005 W/mm ² ·°C (step applied)	5,3e-005 W/mm ² ·°C (step applied)

FIGURE 3
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Heat Flow

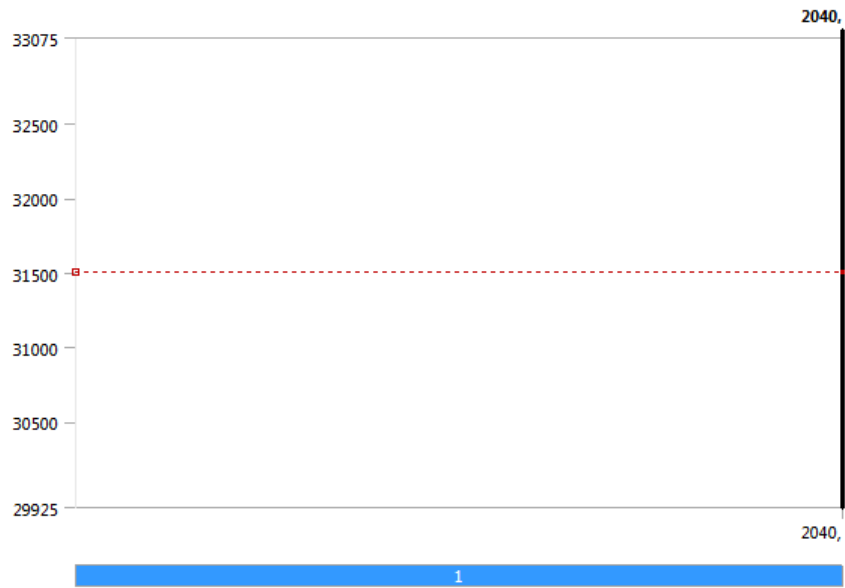


FIGURE 4
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Heat Flow > Figure

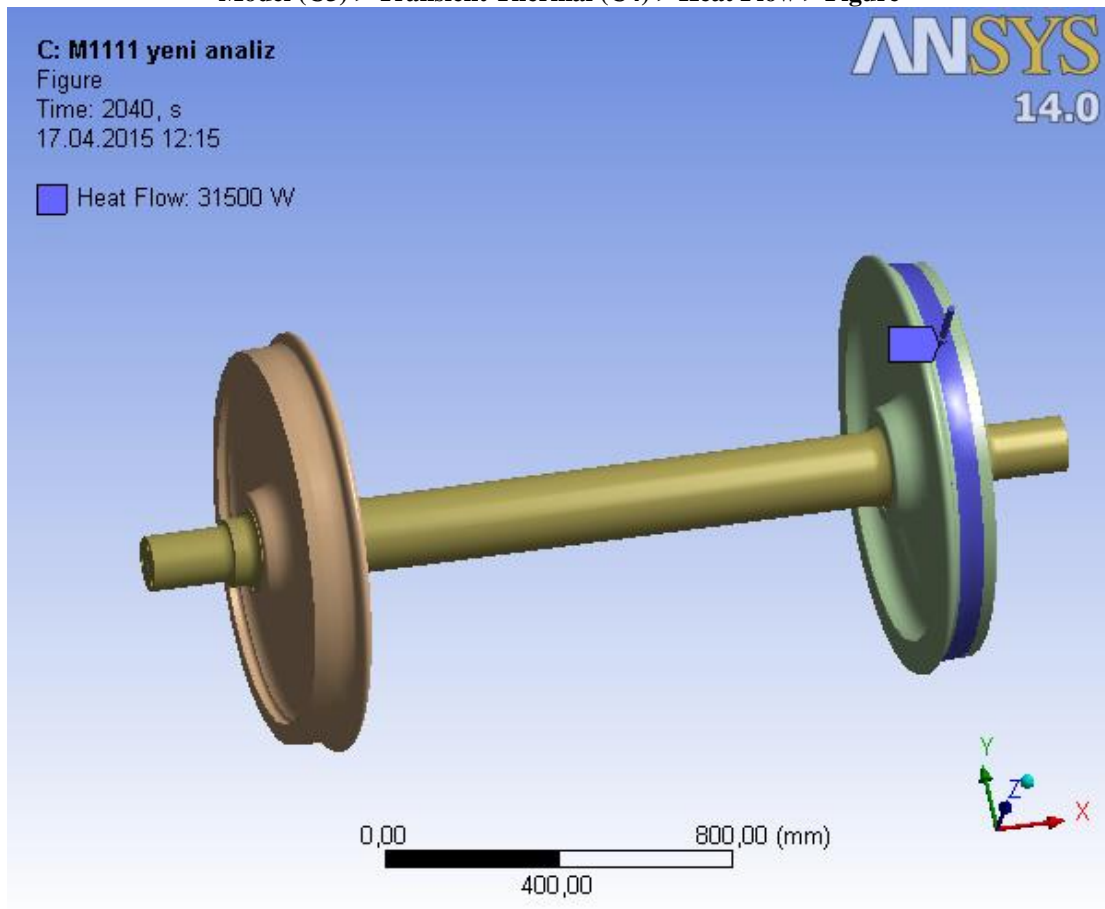


FIGURE 5
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Heat Flow 3

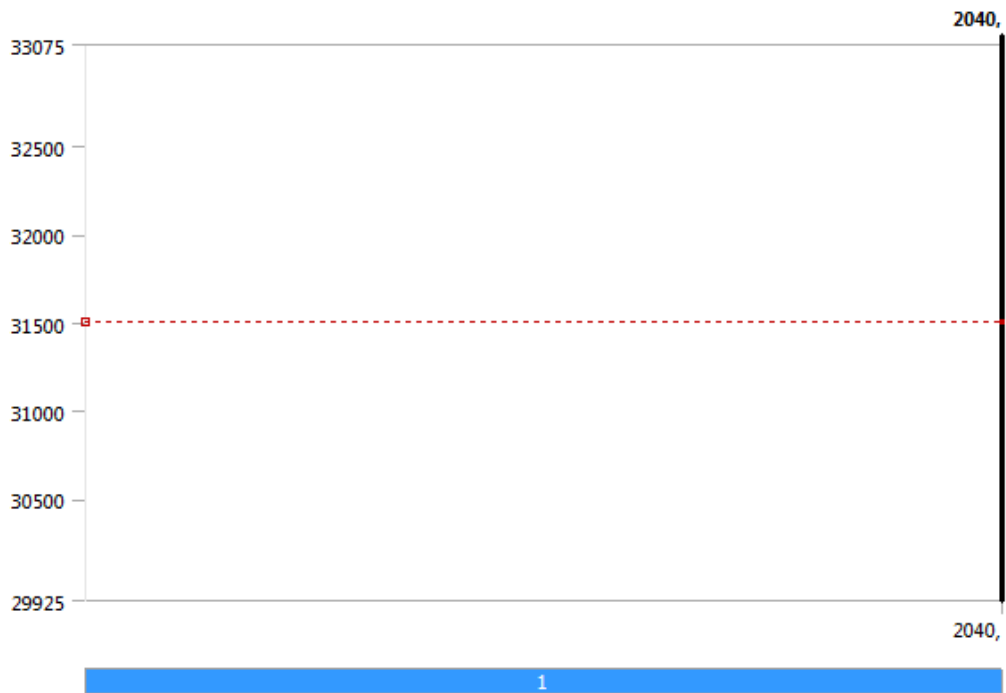


FIGURE 6
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Heat Flow 3 > Figure

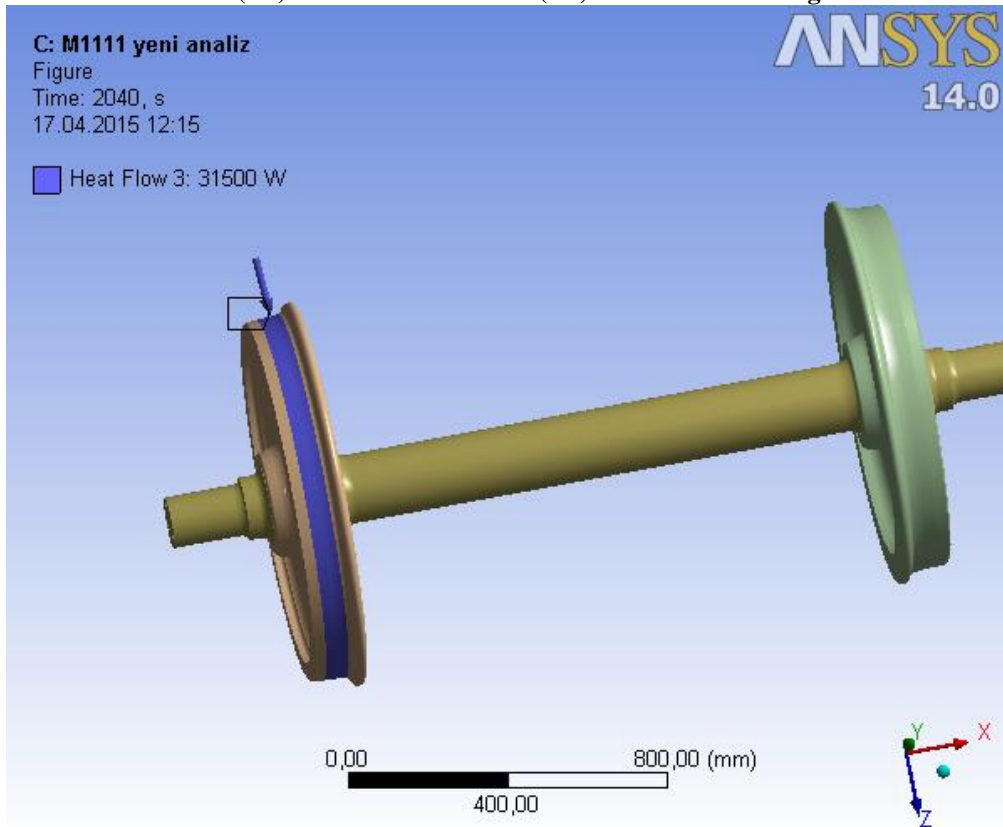


FIGURE 7
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Radiation

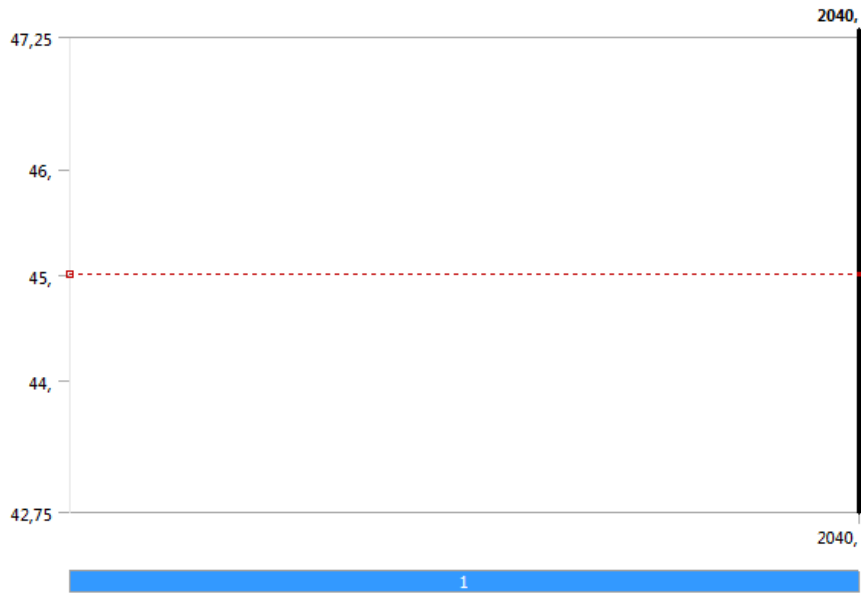


FIGURE 8
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Radiation > Figure

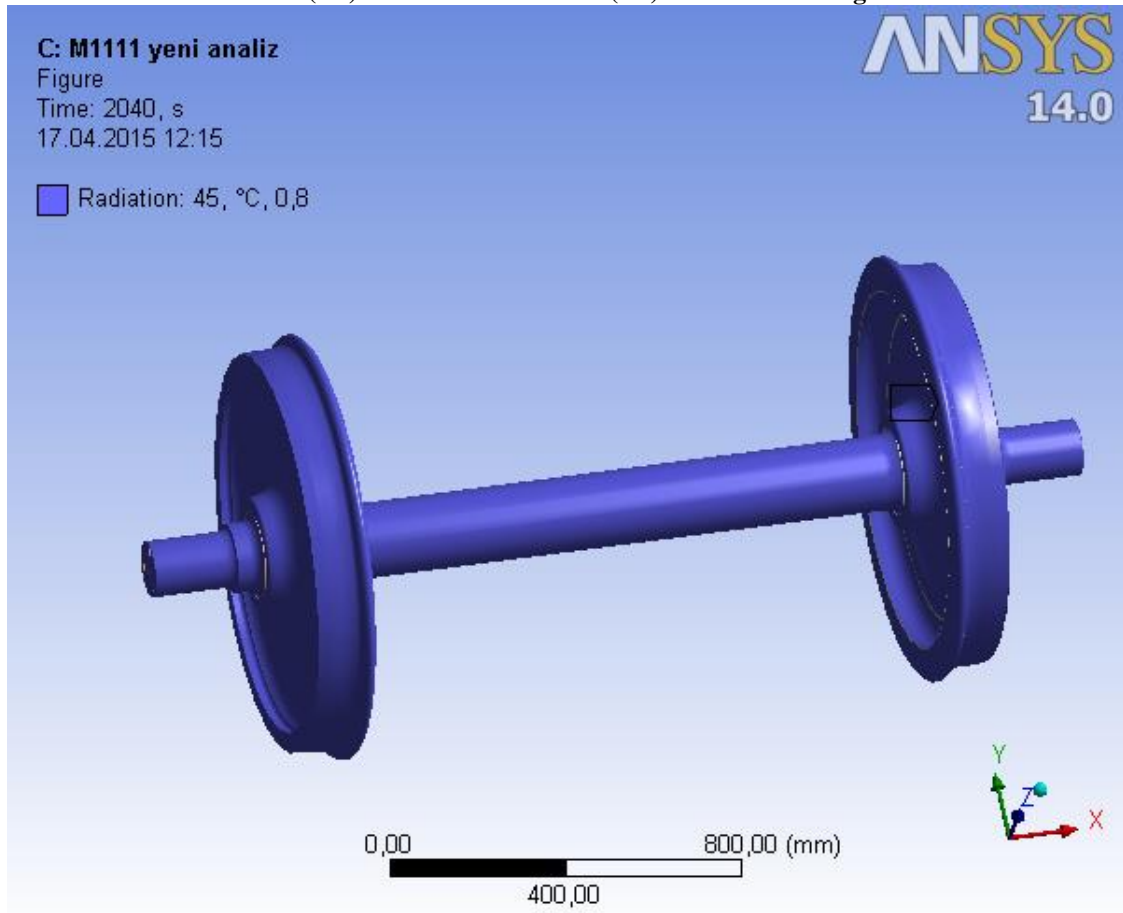


FIGURE 9
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 2

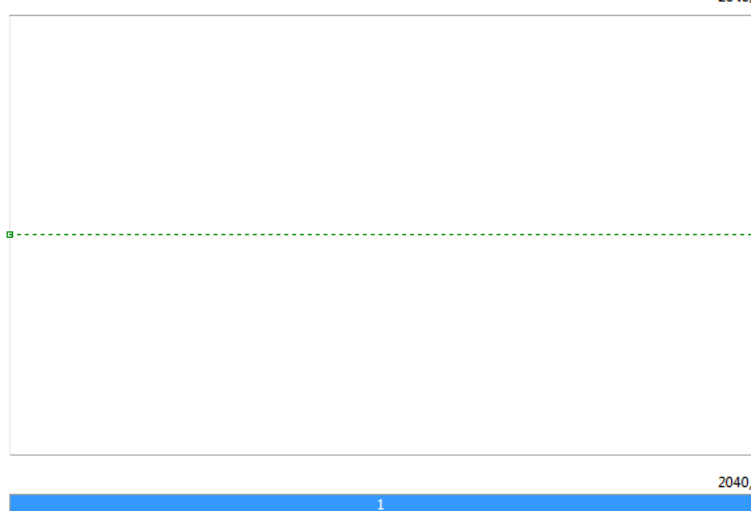


TABLE 12
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 2

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 2,5e-005	= 45,
	2040,	2,5e-005	45,

FIGURE 10
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 2 > Figure

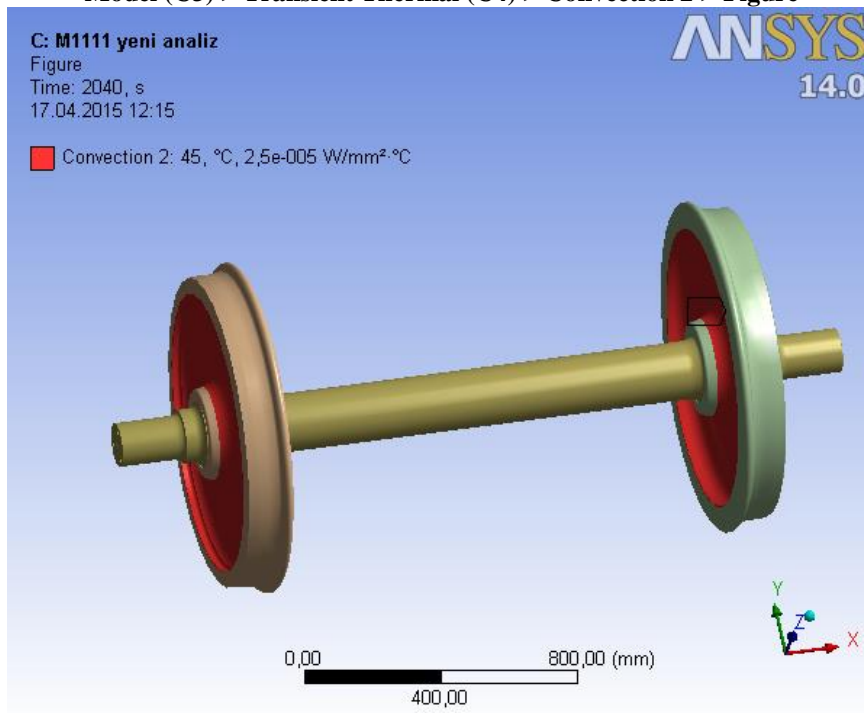


FIGURE 11
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 3

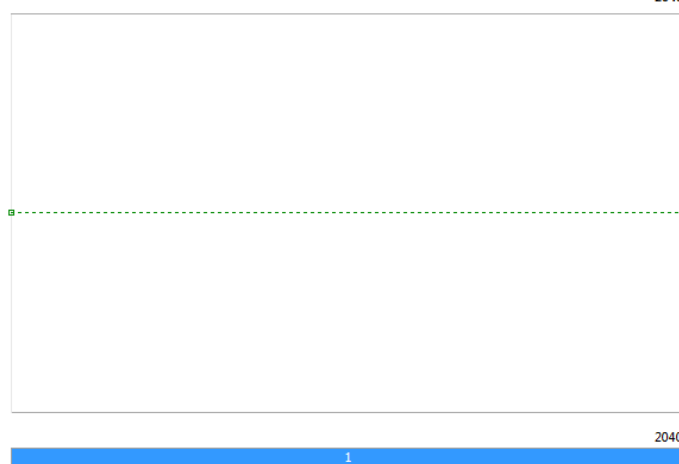


TABLE 13
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 3

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 5,3e-005	= 45,
	2040,	5,3e-005	45,

FIGURE 12
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 3 > Figure

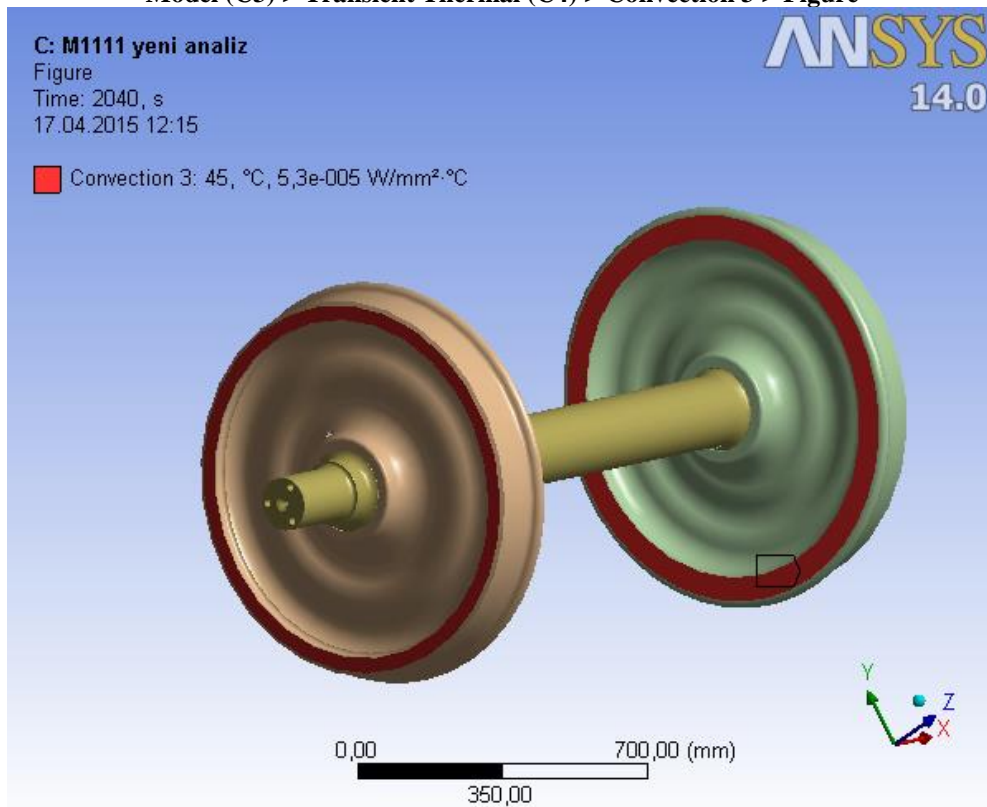


TABLE 14
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Loads

Object Name	<i>Convection 4</i>	<i>Convection 5</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	20 Faces	58 Faces
Definition		
Type	Convection	
Film Coefficient	5,2e-005 W/mm ² ·°C (step applied)	2,e-005 W/mm ² ·°C (step applied)
Ambient Temperature	45, °C (step applied)	
Suppressed	No	

FIGURE 13
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 4

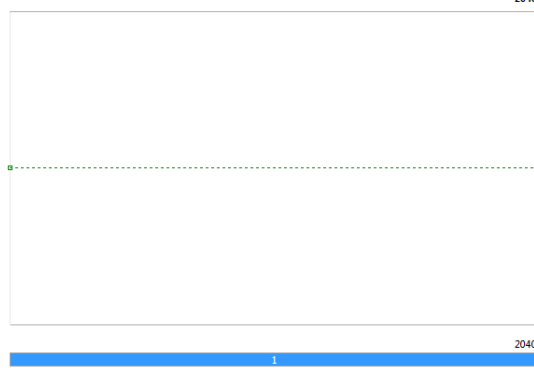


TABLE 15
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 4

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 5,2e-005	= 45,
	2040,	5,2e-005	45,

FIGURE 14
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 4 > Figure

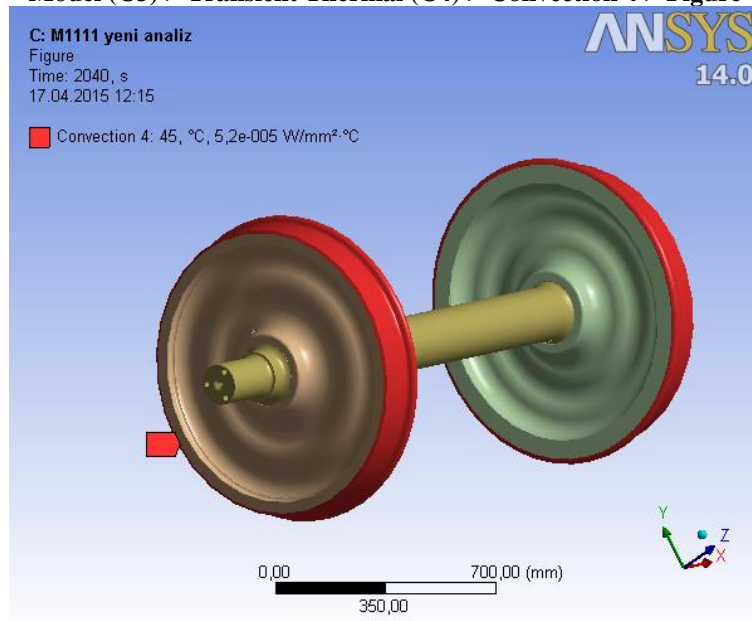


FIGURE 15
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 5

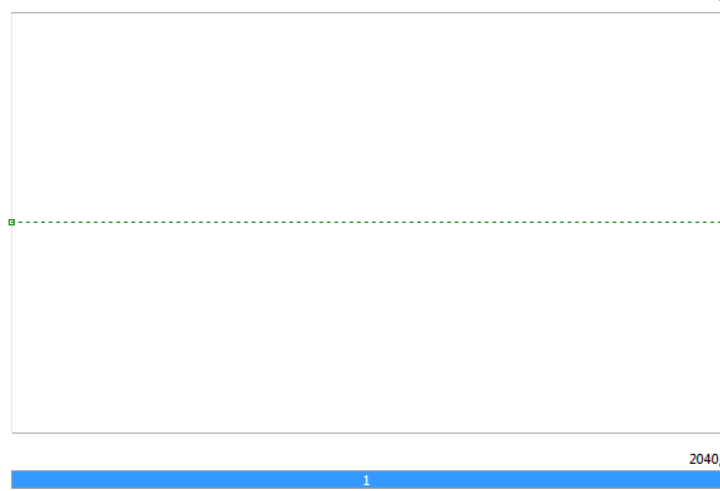
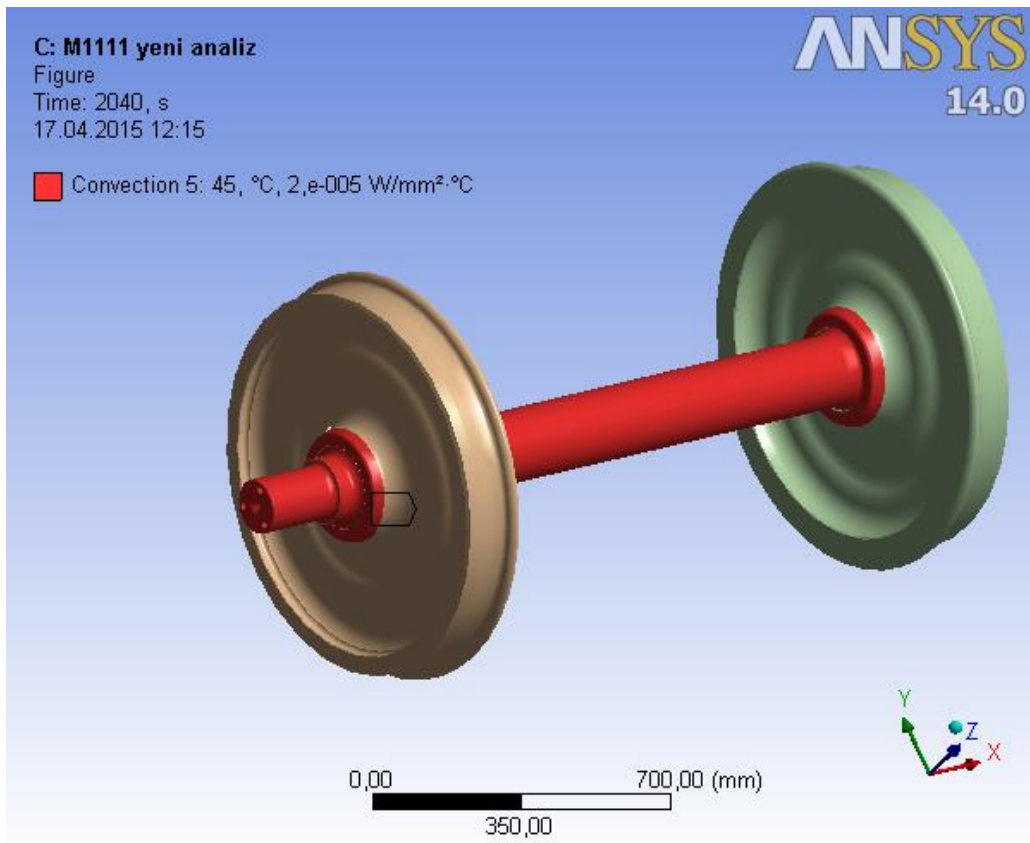


TABLE 16
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 5

Steps	Time [s]	Convection Coefficient [W/mm ² ·°C]	Temperature [°C]
1	0,	= 2,e-005	= 45,
	2040,	2,e-005	45,

FIGURE 16
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Convection 5 > Figure



Solution (C5)

TABLE 17
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution

Object Name	<i>Solution (C5)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 18
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 19
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Temperature - Global Maximum</i>	<i>Temperature - Global Minimum</i>
State	Solved	
Definition		
Type	Temperature	
Suppressed	No	
Scope		
Scoping Method	Global Maximum	Global Minimum
Results		
Minimum	105,45 °C	45, °C
Maximum	435,08 °C	45, °C

FIGURE 17
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Solution Information > Temperature - Global Maximum

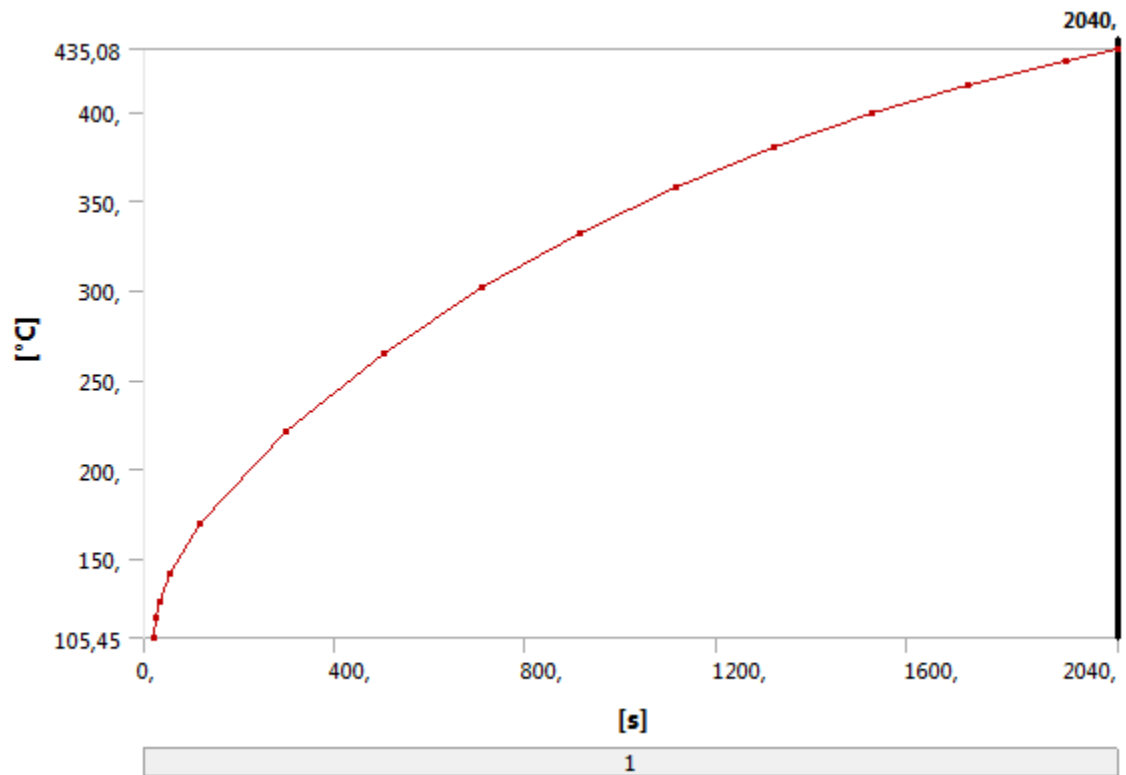


FIGURE 18
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Solution Information > Temperature - Global Minimum

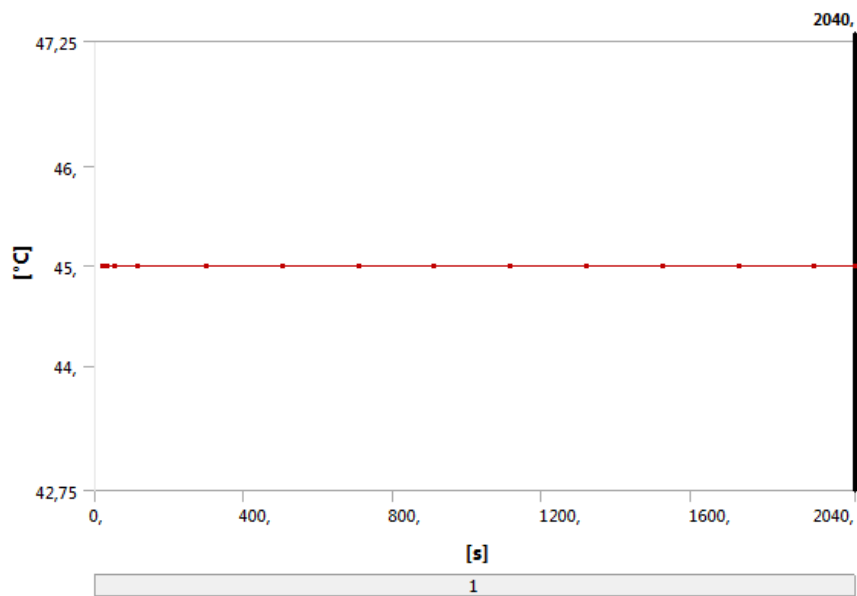


TABLE 20
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Results

Object Name	<i>Temperature</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Temperature
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	45,004 °C
Maximum	435,08 °C
Minimum Occurs On	dingil
Maximum Occurs On	Part 16
Minimum Value Over Time	
Minimum	45, °C
Maximum	45,004 °C
Maximum Value Over Time	
Minimum	105,45 °C
Maximum	435,08 °C
Information	
Time	2040, s
Load Step	1
Substep	15
Iteration Number	23

FIGURE 19
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Temperature

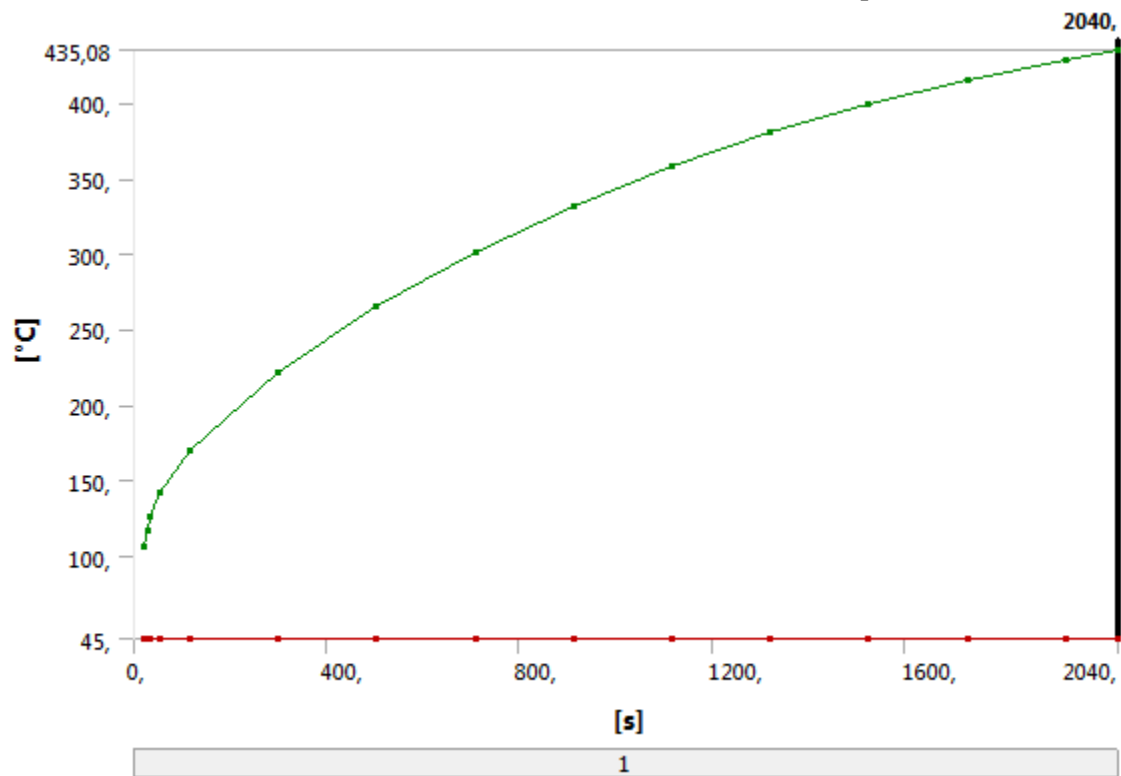
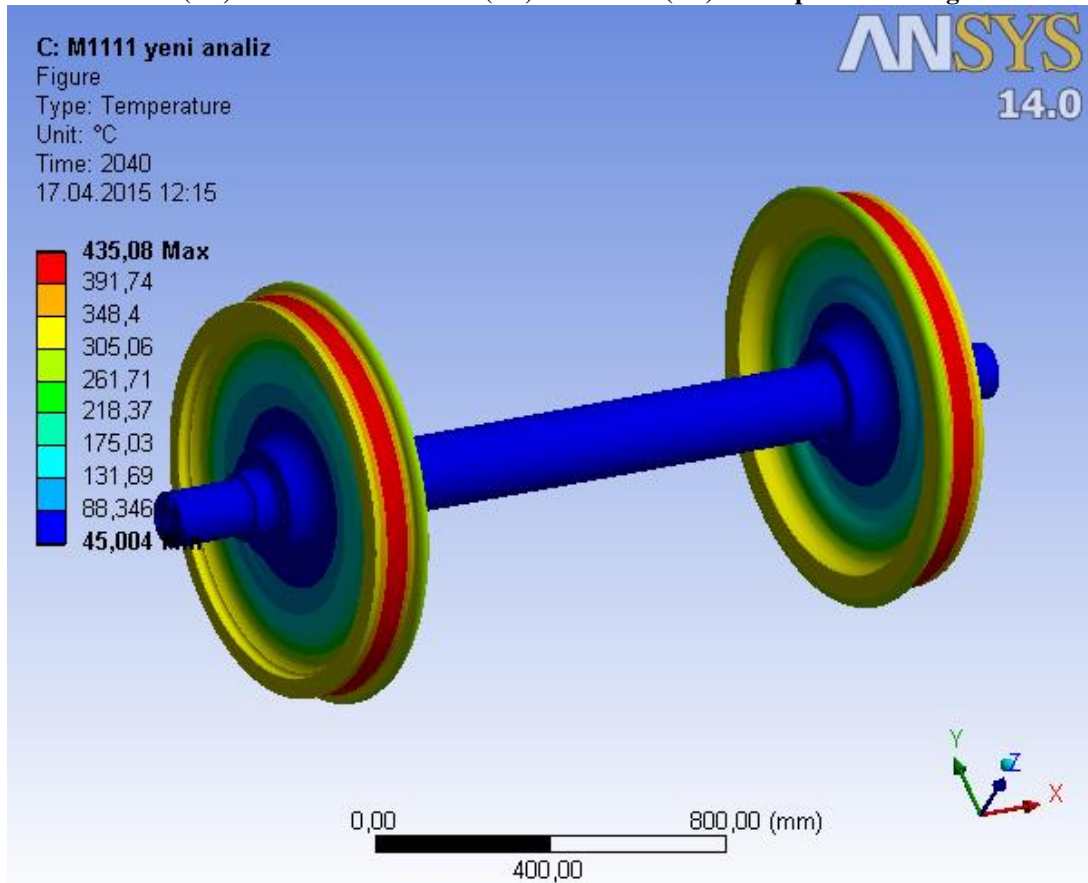


TABLE 21
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Temperature

Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	
20,4	45,	105,45	
27,2		116,9	
34,		125,39	
54,4		141,66	
115,6		169,57	
299,2		220,87	
503,2		264,91	
707,2		301,36	
911,2		331,96	
1115,2		358,24	
1319,2		380,5	
1523,2		45,001	399,32
1727,2		45,002	415,2
1931,2	45,003	428,56	
2040,	45,004	435,08	

FIGURE 20
Model (C3) > Transient Thermal (C4) > Solution (C5) > Temperature > Figure



Material Data

Steel

TABLE 22
Steel > Constants

Density	7,85e-009 tonne mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 23
Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22,

TABLE 24
Steel > Specific Heat

Specific Heat mJ tonne ⁻¹ C ⁻¹	Temperature C
4,4e+008	0,
4,8e+008	100,
5,1e+008	200,
5,19e+008	300,
5,28e+008	400,
5,37e+008	500,
5,46e+008	600,

TABLE 25
Steel > Isotropic Thermal Conductivity

Thermal Conductivity W mm ⁻¹ C ⁻¹	Temperature C
4,73e-002	0,
4,5e-002	100,
4,41e-002	200,
4,33e-002	300,
4,26e-002	400,
4,2e-002	500,

TABLE 26
Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Nail Karagöz
Doğum Yeri ve Tarihi	Berlin /Almanya, 01.12.1972
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	TCDD-TÜDEMSAŞ Ar-Ge Daire Başkanlığı, Sivas
E-posta Adresi	nailkaragoz@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Atatürk Lisesi, 1986-1989
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 1989-1995
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2012 - Halen

İş Tecrübesi

Eğitim sektörü	Eğitmen, 1997-2012
TÜDEMSAŞ	Makine Mühendisi (Ar-Ge Şefi), 2012-Halen
TÜDEMSAŞ	Makine Mühendisi, İş Güvenliği Uzm., 2013-Halen
TÜDEMSAŞ	Milli Yük Vagonu Projesi -Fren gurubu 2013-Halen