



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

**Y25 TİPİ BOJİ GÖVDESİNİN SONLU ELEMANLAR  
YÖNTEMİYLE YAPISAL ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Orhan GÜRBÜZ  
(20169215015)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**SIVAS  
EYLÜL 2022**

**Orhan GÜRBÜZ**'ün hazırladığı ve “**Y25 TİPİ BOJİ GÖVDESİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE YAPISAL ANALİZLERİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**      **Prof. Dr. Burhan SELÇUK**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi .....

**Jüri Üyesi**            **Yrd. Doç. Dr. Ahmet YÜCEL**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi .....

**Jüri Üyesi**            **Yrd. Doç. Dr. Mithat ŞİMŞEK**  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi .....

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas 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.

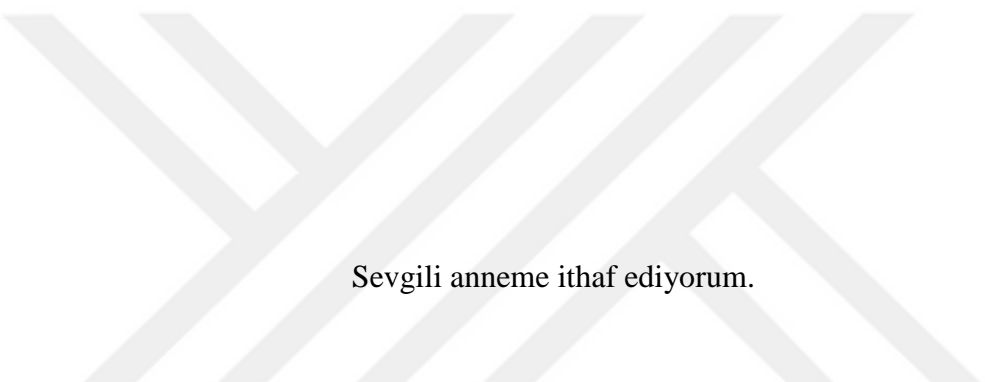




Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Orhan GÜRBÜZ, 2022



Sevgili anneme ithaf ediyorum.

## ETİK

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

- ✓ 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, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

20.09.2022

Orhan GÜRBÜZ

## **KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR**

Daima yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ülkemizde çağdaş, bilimsel ve laik eğitimin önünü açan başöğretmen Mustafa Kemal Atatürk'e teşekkürlerimi sunarım.



## ÖZET

### Y25 TİPİ BOJİ GÖVDESİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE YAPISAL ANALİZLERİ

**Orhan GÜRBÜZ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**2022, 74+xvii sayfa**

Bu tez çalışmasında yük vagonlarında hareket aksamı olarak kullanılan Y25 tipi boji gövdesinin TS EN 13749 standardında tanımlanan yükleme koşulları altındaki dayanım özellikleri Sonlu Elemanlar Yöntemiyle analiz edilmiştir. İstisnai yük analizleri ile von Mises gerilme değerleri, yorulma analizleri ile eşdeğer gerilme genliği değerleri hesaplanmıştır. Tolerans yığılmasının yapı üzerindeki etkisi ayrıca araştırılmıştır. Düşük zeminli bir Y25 tipi boji gövdesi tasarlanmış elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yüksek dayanımlı çeliklerin kullanılmasının ve kaynak sonrası iyileştirme işlemlerinin uygulanmasının daha hafif tasarımlara olanak sağlayacağı anlaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Y25 boji gövdesi, statik yapısal analiz, yorulma, sonlu elemanlar metodu.

## **ABSTRACT**

### **STRUCTURAL ANALYSIS OF Y25 TYPE BOGIE FRAME USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Orhan GÜRBÜZ**

**Master of Science Thesis**

**Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**2022, 74+xvii pages**

In this study, structural strength analysis of Y25 bogie frame which is a type of running gear commonly used in railway vehicles was carried out in accordance with TS EN 13749 using finite element method. Von Mises stress values and effective alternating stress amplitudes were calculated for exceptional load cases and normal load cases. Furthermore, the effect of the tolerance stack-up on structural endurance was investigated. A low-floor bogie frame was designed and analyzed in the same way then compared with Y25 bogie frame in terms of stress values. It can be possible to design lightweight bogie structures with the help of using high strength steels and implementation of HFMI (High Frequency Metal Impact) weld treatment.

**Keywords:** Y25 bogie frame, static structural analysis, fatigue, finite element method.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET .....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xiv</b>
<b>SİMGELER DİZİNİ.....</b>	<b>xv</b>
<b>KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Boji Tanımı .....	1
1.1.1 Y25 tipi boji.....	1
1.2 Boji Tarihçesi .....	2
1.3 Boji Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	4
1.4 Problem Tanımı ve Önemi .....	8
<b>2. TEORİK BİLGİLER .....</b>	<b>10</b>
2.1 Akma Kriterleri .....	10
2.2 Yorulma Kriterleri.....	11
2.3 Yapısal Kritik Nokta Gerilmesi .....	16
2.4 Sonlu Elemanlar Metodu.....	19
2.5 Tolerans Yığılması .....	20
<b>3. MATERYAL ve METOT .....</b>	<b>22</b>
3.1 Yöntem.....	22
3.2 Bojiye Etkiyen Yükler.....	23
3.2.1 İstisnai yük hesaplamaları.....	24
3.2.2 İstisnai yükleme kombinasyonları .....	25
3.2.3 Normal yük hesaplamaları .....	27
3.2.4 Normal yük kombinasyonları .....	28
3.3 Gerilme Analizleri.....	29
3.3.1 Sonlu elemanlar modeli .....	29
3.4 Bulgular.....	31
3.4.1 İstisnai yük analizleri .....	31
3.4.2 Normal yük analizleri .....	32
3.4.3 Tolerans yığılmasının etkisi.....	34
<b>4. TARTIŞMA ve SONUÇ.....</b>	<b>37</b>
4.1 Y25 Tipi Boji Gövdesinin Değerlendirilmesi .....	37
4.2 Alçak Zeminli Boji Gövdesinin Değerlendirilmesi .....	38
4.3 Sonuçlar.....	38
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>41</b>
<b>EK-1 Yükleme Kombinasyonu Tabloları.....</b>	<b>44</b>
<b>EK-2 FEM Analiz Görüntüleri.....</b>	<b>46</b>
<b>EK-3 Yorulma Testi Programı .....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>74</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1 Y25 tipi boji ölçüleri. ....	1
Şekil 1.2 Y25 tipi boji.....	3
Şekil 2.1 Tresca ve von Mises akma kriterleri. ....	10
Şekil 2.2 Çevrimsel gerilme parametreleri. ....	11
Şekil 2.3 Logaritmik S-N diyagramı, $R = -1$ . ....	12
Şekil 2.4 Haigh diyagramında Goodman, Gerber ve ASME-elliptic yaklaşımları. ....	13
Şekil 2.5 Goodman, Gerber ve ASME-elliptic yöntemi ile ortalama gerilme düzeltmesi .....	14
Şekil 2.6 Orantısız olmayan gerilme durumu. ....	16
Şekil 2.7 Kaynaklı yapılarda görülen yorulma çatlakları. ....	17
Şekil 2.8 Yapısal kritik nokta gerilmesi yöntemi için çentik durumları. ....	18
Şekil 2.9 FAT sınıfı tanımı. ....	19
Şekil 2.10 St. Venant prensibine bir örnek olarak normal gerilme dağılımı. ....	20
Şekil 3.1 Kutu ve I formundaki yapıların kıyaslanması. ....	23
Şekil 3.2 Boji üzerinde tanımlı referans koordinat sistemi. ....	24
Şekil 3.3 Bojiye etkiyen yükler ve mesnet noktaları. ....	24
Şekil 3.4 Y25 boji gövdesinin L1 yük durumundaki gerilme-gerinim grafiği. ....	32
Şekil 3.5 Çentik durumları: (a) A çentiği, ana metal; (b) B çentiği, eğimli alın kaynağı; (c) D çentiği, T-kaynağı ve bindirme kaynağı. ....	33
Şekil 3.6 Tekerlek seti – boji montajı gösterimi. ....	34
Şekil 3.7 Tekerlek seti – boji montajı için tolerans yığılma diyagramı. ....	35
Şekil 4.1 Alçak zeminli boji gövdesinin L1 yük durumundaki gerilme dağılımı. ....	39
Şekil 4.2 Kümülatif hasar miktarı hesabında referans alınan nokta. ....	40
Şekil E2.1 L1 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	47
Şekil E2.2 L1 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu. ....	48
Şekil E2.3 L2 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	48
Şekil E2.4 L3 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	48
Şekil E2.5 L4 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	49
Şekil E2.6 L4 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu. ....	49
Şekil E2.7 L5 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	49
Şekil E2.8 L5 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu. ....	50
Şekil E2.9 L6 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	50
Şekil E2.10 L6 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu. ....	50
Şekil E2.11 L7 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	51

<b>Şekil E2.12</b>	L7 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.....	51
<b>Şekil E2.13</b>	L8 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	51
<b>Şekil E2.14</b>	L9 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	52
<b>Şekil E2.15</b>	L10 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	52
<b>Şekil E2.16</b>	L2 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	53
<b>Şekil E2.17</b>	L3 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	53
<b>Şekil E2.18</b>	L4 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	53
<b>Şekil E2.19</b>	L5 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	54
<b>Şekil E2.20</b>	L6 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	54
<b>Şekil E2.21</b>	L7 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	54
<b>Şekil E2.22</b>	L8 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	55
<b>Şekil E2.23</b>	L9 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.....	55
<b>Şekil E2.24</b>	L10 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu. ....	55
<b>Şekil E2.25</b>	Y25 boji gövdesinin LF2-LF3 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	56
<b>Şekil E2.26</b>	Y25 boji gövdesinin LF4-LF6 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	57
<b>Şekil E2.27</b>	Y25 boji gövdesinin LF4-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	57
<b>Şekil E2.28</b>	Y25 boji gövdesinin LF5-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	58
<b>Şekil E2.29</b>	Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF4&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	58
<b>Şekil E2.30</b>	Y25 boji gövdesinin LF6&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	58
<b>Şekil E2.31</b>	Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	59
<b>Şekil E2.32</b>	Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	59
<b>Şekil E2.33</b>	Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	59
<b>Şekil E2.34</b>	Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	60
<b>Şekil E2.35</b>	Y25 boji gövdesinin kayma+Fx – kayma-Fx yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	60
<b>Şekil E2.36</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF2-LF3 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.....	61

<b>Şekil E2.37</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4-LF6 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	61
<b>Şekil E2.38</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	62
<b>Şekil E2.39</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF5-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	62
<b>Şekil E2.40</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF4&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	62
<b>Şekil E2.41</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF6&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	63
<b>Şekil E2.42</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	63
<b>Şekil E2.43</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	63
<b>Şekil E2.44</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	64
<b>Şekil E2.45</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	64
<b>Şekil E2.46</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin kayma+Fx – kayma-Fx yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	64
<b>Şekil E2.47</b>	Y25 boji gövdesi üzerinde ölçüm alınan düğüm noktaları. ....	65
<b>Şekil E2.48</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	65
<b>Şekil E2.49</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	66
<b>Şekil E2.50</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	66
<b>Şekil E2.51</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	66
<b>Şekil E2.52</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:2.4 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	67
<b>Şekil E2.53</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:2.4 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	67
<b>Şekil E2.54</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:1 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	67
<b>Şekil E2.55</b>	Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:1 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	68
<b>Şekil E2.56</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF6, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	68
<b>Şekil E2.57</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF7, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	69
<b>Şekil E2.58</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	69
<b>Şekil E2.59</b>	Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı. ....	69
<b>Şekil E2.60</b>	L2 yükleme durumu için Y25 tipi boji gövdesinin mesnet noktaları. ....	70
<b>Şekil E2.61</b>	L2 yükleme durumu için Y25 tipi boji gövdesine uygulanan kuvvetler. ....	70
<b>Şekil E3.1</b>	Yorulma kuvvetleri ve çevrim sayıları. ....	73
<b>Şekil E3.2</b>	Yorulma yükleri ve uygulama sırası. ....	73

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1</b> Y25 tipi boji özellikleri. ....	2
<b>Çizelge 1.2</b> Y25 tipi boji varyantlarına ait bileşenlerin kütle değerleri.....	4
<b>Çizelge 2.1</b> Kaynaklı yapılara uygulanan yorulma analiz yöntemleri.....	18
<b>Çizelge 3.1</b> Y25 tipi boji için istisnai yükleme kombinasyonları.....	26
<b>Çizelge 3.2</b> Alçak zeminli boji için istisnai yükleme kombinasyonları. ....	27
<b>Çizelge 3.3</b> Y25 tipi boji için normal yük kombinasyonları. ....	28
<b>Çizelge 3.4</b> Alçak zeminli boji için normal yük kombinasyonları. ....	29
<b>Çizelge 3.5</b> Y25 tipi bojide kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri. ....	30
<b>Çizelge 3.6</b> RQT 701 çeliğinin kimyasal bileşim özellikleri.....	30
<b>Çizelge 3.7</b> RQT 701 çeliğinin mekanik özellikleri. ....	30
<b>Çizelge 3.8</b> Y25 tipi boji gövdesinin istisnai yük analizi ile hesaplanan maksimum von Mises gerilme ve plastik uzama değerleri .....	31
<b>Çizelge 3.9</b> Alçak zeminli boji gövdesinin istisnai yük analizi ile hesaplanan maksimum von Mises gerilme değerleri. ....	32
<b>Çizelge 3.10</b> Y25 boji gövdesinin yorulma analizi ile hesaplanan eşdeğer gerilme genlikleri. ....	33
<b>Çizelge 3.11</b> Alçak zeminli boji gövdesinin yorulma analizi ile hesaplanan eşdeğer gerilme genlikleri. ....	34
<b>Çizelge 3.12</b> Tolerans yığılması analiz sonuçları.....	35
<b>Çizelge 3.13</b> Y25 tipi boji için tolerans yığılmasının eşdeğer gerilme genliğine etkisi. ....	36
<b>Çizelge 3.14</b> Alçak zeminli boji için tolerans yığılmasının eşdeğer gerilme genliğine etkisi. ....	36
<b>Çizelge E1.1</b> İstisnai yükleme kombinasyonları için denklem numaraları. ....	45
<b>Çizelge E1.2</b> Normal yük kombinasyonları için denklem numaraları. ....	45

## SİMGELER DİZİNİ

<b>D</b>	Kümülatif hasar miktarı
<b>E</b>	Young modülü, GPa
<b>F<sub>bn</sub></b>	Bir adet bojide normal yöndeki toplam fren baskı kuvveti, kN
<b>F<sub>bt</sub></b>	Bir adet bojide teğet yöndeki toplam fren baskı kuvveti, kN
<b>F<sub>d</sub></b>	Dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>qs</sub></b>	Sözde statik kuvvet, kN
<b>F<sub>s</sub></b>	Statik kuvvet, kN
<b>F<sub>x</sub></b>	Bir adet boji aksına etkiyen boylamasına kuvvet çifti, kN
<b>F<sub>y</sub></b>	Boji pivotuna etkiyen yanıl kuvvet, kN
<b>F<sub>y1</sub></b>	1 numaralı aksa etkiyen yanıl kuvvet, kN
<b>F<sub>y1d</sub></b>	1 numaralı aksa etkiyen yanıl dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>y1qs</sub></b>	1 numaralı aksa etkiyen yanıl sözde statik kuvvet, kN
<b>F<sub>y2</sub></b>	2 numaralı aksa etkiyen yanıl kuvvet, kN
<b>F<sub>y2d</sub></b>	2 numaralı aksa etkiyen yanıl dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>y2qs</sub></b>	2 numaralı aksa etkiyen yanıl sözde statik kuvvet, kN
<b>F<sub>z</sub></b>	Bir adet bojinin yük taşıma kapasitesi, kN
<b>F<sub>z1</sub></b>	1 numaralı elastik alt kızak üzerine etkiyen düşey kuvvet, kN
<b>F<sub>z1d</sub></b>	1 numaralı elastik alt kızığa etkiyen düşey dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>z1qs</sub></b>	1 numaralı elastik alt kızığa etkiyen düşey sözde statik kuvvet, kN
<b>F<sub>z2</sub></b>	2 numaralı elastik alt kızak üzerine etkiyen düşey kuvvet, kN
<b>F<sub>z2d</sub></b>	2 numaralı elastik alt kızığa etkiyen düşey dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>z2qs</sub></b>	2 numaralı elastik alt kızığa etkiyen düşey sözde statik kuvvet, kN
<b>F<sub>zp</sub></b>	Boji pivotuna etkiyen düşey kuvvet, kN
<b>F<sub>zpd</sub></b>	Boji pivotuna etkiyen düşey dinamik kuvvet, kN
<b>F<sub>zps</sub></b>	Boji pivotuna etkiyen düşey statik kuvvet, kN
<b>FAT</b>	Yorulma sınıfı, MPa
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi, m/s <sup>2</sup>
<b>g<sup>+</sup></b>	Yol burulması oranı, %
<b>G</b>	Boji gövdesi - tekerlek seti montajının yanıl boşluk miktarı, mm
<b>m</b>	Logaritmik ölçekli yorulma eğrisinin eğim değeri
<b>m<sup>+</sup></b>	Boji kütlesi, kg
<b>n</b>	Belirli bir S gerilme değeriindeki çevrim sayısı
<b>N</b>	Hasara neden olan çevrim sayısı
<b>R</b>	Gerilme oranı
<b>R<sub>e</sub></b>	Akma sınırı, MPa
<b>R<sub>m</sub></b>	Kopma sınırı, MPa
<b>S</b>	Gerilme, MPa
<b>s<sub>asm</sub></b>	Birikimli tolerans değeri, mm
<b>s<sub>p</sub></b>	Ölçü toleransı, mm
<b>α</b>	Yuvarlanma katsayısı
<b>β</b>	Zıplama katsayısı
<b>v</b>	Poisson oranı
<b>ρ</b>	Özkütle, g/cm <sup>3</sup>
<b>Δσ</b>	Gerilme aralığı, MPa
<b>Δσ<sub>2E6</sub></b>	2x10 <sup>6</sup> çevrim ömrü için gerilme aralığı, Pa
<b>σ<sub>a</sub></b>	Gerilme genliği, MPa
<b>σ<sub>b</sub></b>	Eğilme gerilmesi, MPa
<b>σ<sub>e</sub></b>	Yorulma limiti, MPa

$\sigma_{eff}$	Eşdeğer gerilme genliği, MPa
$\sigma_m$	Ortalama gerilme, MPa
$\sigma_{max}$	Maksimum gerilme, MPa
$\sigma_{mem}$	Membran gerilmesi, MPa
$\sigma_{min}$	Minimum gerilme, MPa
$\sigma_{mp}$	Maksimum asal gerilme, MPa
$\sigma_{nlp}$	Lineer olmayan gerilme bileşeni, MPa
$\sigma_{ns}$	Çentik gerilmesi, MPa
$\sigma_{uts}$	Çekme dayanımı, MPa
$\sigma_y$	Akma dayanımı, MPa



## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AAR</b>	Association of American Railroads
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers
<b>DVS</b>	Deutscher Verband für Schweißen
<b>ERRI</b>	European Railway Research Institute
<b>FEM</b>	Finite Element Method
<b>FKM</b>	Forschungskuratorium Maschinenbau
<b>GFRP</b>	Glass Fiber Reinforced Polymer
<b>HFMI</b>	High Frequency Metal Impact
<b>IIW</b>	International Institute of Welding
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>RSS</b>	Root Sum Square
<b>TS</b>	Türk Standardı
<b>EN</b>	European Standards
<b>UIC</b>	International Union of Railways

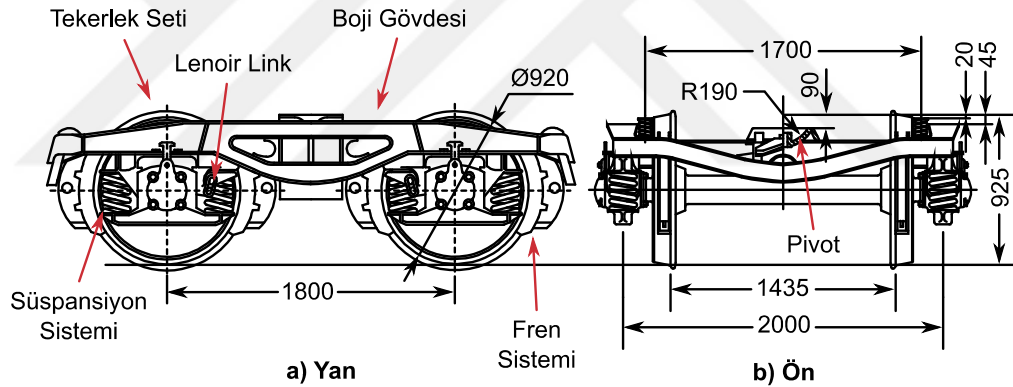
# 1. GİRİŞ

## 1.1 Boji Tanımı

Demiryolu araçlarında hareket aksamı olarak kullanılan bir boji; bir gövde ve gövde üzerine bağlı tekerlek, fren ve süspansiyon sistemlerinden oluşur. Bojiler, iki veya daha fazla sayıda tekerlek setine sahip olabilmekte, bu sayede bojili vagonlar iki akslı vagonlara kıyasla daha fazla yük taşıyabilmekte, hatta daha güvenli bir sürüş sağlayabilmektedir. Bir boji tasarımı, işletme sırasında yeterli yapısal dayanım ve dinamik özellikleri sergilemeli fonksiyonelliğini yitirmemelidir (Bharadwaj, 2017).

### 1.1.1 Y25 tipi boji

Y tipi boji grubunda Y25, Y27, Y31 ve Y33 gibi yük vagonu bojileri bulunmaktadır. Kullanımı en yaygın yük vagonu bojisi Y25 tipidir. Birbirine oldukça benzemekle birlikte çok sayıda Y25 varyantı bulunmaktadır. Birçoğu UIC (International Union of Railways) tarafından resmedilerek standart hale getirilmiştir (Anonim, 2000). Y25 tipi bojinin karakteristik ölçüleri Şekil 1.1 ile verilmiştir.



Şekil 1.1 Y25 tipi boji ölçüleri.

Y25 tipi boji temel olarak aşağıdaki alt bileşenlerden meydana gelmektedir.

#### a) Boji Gövdesi

Boji gövdesi (Şekil 1.1), kaynaklı birleştirme veya döküm yöntemiyle imal edilebilen karmaşık geometriye sahip bir yapıdır. Y25 boji gövdesi ise ağırlıklı olarak çelik saclardan meydana gelmiş, üzerinde döküm ve dövme parçalar da bulundurabilen bir yapıdır.

#### b) Tekerlek Seti

Aks, tekerlek, rulman, rulman kutusu ve gres yağından meydana gelen bir sistemdir (Şekil 1.1). Üzerine etkiyen kuvvetler ile frenleme durumunda ortaya çıkan ısıl yüke

dayanması beklenir. Tekerlekler, ray ile temas kuvvetlerini karşılamak üzere uygun malzeme ve geometrik profillerde tercih edilir.

#### c) Fren Sistemi

Lokomotifin ürettiği basınçlı hava ile çalışan pnömatik bir sistemdir (Şekil 1.1). Fren sisteminin temel işlevi, tekerlek seti üzerine etkiyen frenleme momentini kontrol etmesidir. Fren sistemi aracın belirli bir mesafede durmasını sağlarken tekerlek ve/ya aks sıcaklığı belirli bir değeri aşmamalıdır.

#### d) Süspansiyon Sistemi

Tekerlek seti ile boji gövdesi arasında bulunan süspansiyon sistemi (Şekil 1.1), yol düzensizlikleri sonucunda oluşan düşey yönlü kuvvet ve titreşimi azaltmaya yardımcı olmaktadır. Boji gövdesi ile vagon gövdesi arasındaki elastik kızakların işlevi ise vagonun yaptığı yuvarlanma hareketini yumuşatmaktır.

Bir bojiyi tanımlayan karakteristik özellikler arasında aks yükü, ray açıklığı, tekerlek çapı ve süspansiyon gibi bilgiler yer almaktadır. Y25 tipi bojinin teknik özellikleri Çizelge 1.1 ile verilmiştir (url-1, 2019; url-2, 2019; url-3, 2019).

**Çizelge 1.1** Y25 tipi boji özellikleri.

Boji Varyantı	Y25 Lsd1	Y25 Lsd(f)	Y25 Lsd(f) – H tipi
Aks yükü	22.5 t	22.5 t	22.5 t
Aks mesafesi	1800 mm	1800 mm	1800 mm
Ray açıklığı	1435 mm	1435 mm	1435 mm
Tekerlek çapı	920 mm	920 mm	920 mm
Maksimum hız	120 km/h	120 km/h	120 km/h
Boji kütlesi	~4650 kg	~4300 kg	~3950 kg
Süspansiyon	13.3 tona kadar 2.45 mm/t 13.3 tondan sonra 0.93 mm/t	13.3 tona kadar 2.45 mm/t 13.3 tondan sonra 0.93 mm/t	13.3 tona kadar 2.45 mm/t 13.3 tondan sonra 0.93 mm/t

### 1.2 Boji Tarihiçesi

1950 sonralarında Avrupa’da yeni boji tasarımları geliştirilmiştir. Bunun sonucunda ortaya çıkan Y25 tipi yük vagonu bojileri (Şekil 1.2) merkez Avrupa’da en çok tercih edilen boji olmuş, Türkiye’de de kullanılmasına başlanmıştır. Diğer bojilere kıyasla sade bir yapıda olması ve boji gövdesinin kaynaklı birleştirme yöntemiyle imal

edilebilmesi, Y25'i üreticiler için cazip kılmıştır. Bu sayede zamanla yaygınlaşarak sıklıkla tercih edilen bir boji konumuna gelmiştir (Dižo vd., 2017).



**Şekil 1.2** Y25 tipi boji.

Günümüzde Y25 boji vagon boşken 120 km/h hıza, yüklüken 100 km/h hıza ulaşabilmektedir. İç içe iki adet helezon yayla kurulan süspansiyon yapısında bulunan lenoir link<sup>1</sup> ve sürtünme damperleri yükte orantılı sönümlenme sağlamakla birlikte basit yapıda bir çözüm sunmaktadır. Boji pivotundaki<sup>2</sup> yarı küresel mafsallarla elastik alt kızaklar, kurplardaki<sup>3</sup> yuvarlanma hareketini yumuşatmaktadır. Yüksek hız ihtiyaçları, fren ve süspansiyon sistemlerinde yapılabilecek değişiklikler ile karşılanmaya çalışılmaktadır. Böyle bir senaryoda boji gövdesine etkiyebilecek ilave yükler, boji gövdesinde yapısal bir optimizasyon yapmayı gerektirecektir.

Boji kütlesini azaltmak, işletme giderlerini düşürmekte ve karbon salınımını daha düşük seviyelere indirmektedir. Bu amaçla, öncelerde Y25'te kullanılan eski tipteki fren sistemi modernize edilerek kompakt hale getirilmiş ve darala düşümü sağlanmıştır. Sonralarda Y25 gövdesinin altlarında bulunan ilk zamanlar fren balatalarının asıldığı U profiller fonksiyonlarını yitirdikleri için konstrüksiyondan çıkarılmış ve bazı kısımlar boşaltılarak hafifletme sağlanmıştır (Çizelge 1.1) (url-1, 2019; url-2, 2019; url-3, 2019).

---

<sup>1</sup> Yay tutucusu ile şasi arasındaki bağlantıyı sağlayan parça. Düşey yönlü yükü sürtünme damperlerine aktarır.

<sup>2</sup> Boji merkezindeki destek noktası.

<sup>3</sup> Yatay veya düşey düzlemdeki eğrisel güzergâha verilen isim.

**Çizelge 1.2** Y25 tipi boji varyantlarına ait bileşenlerin kütle değerleri.



	Y25 Lsd1	Y25 Lsd(f)	Y25 Lsd(f) – H tipi
Boji kütlesi	4650 kg	4300 kg	3950 kg
Tekerlek seti kütlesi	1265 kg	1265 kg	1265 kg
Boji gövde kütlesi	1150 kg	1030 kg	860 kg
Süspansiyon kütlesi	225 kg	225 kg	225 kg

### 1.3 Boji Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bang vd. (2006), kaynaklı boji gövdelerinin yorulma analizlerinin otomasyonu üzerine çalışma yapmışlardır. JADE yazılımı üzerine I-DEAS, ANSYS APDL ve BFAP programlarını entegre ederek kurdukları sistem ile parametrik modelleme, sonlu eleman modellerinin oluşturulması, statik gerilme analizleri ve yorulma dayanımı analizleri otomatik hale getirilmiştir. Bu sayede, yorulma analizlerinde manuel olarak yapılmasına ihtiyaç duyulan işler %80 oranında azaltılmıştır.

Kim (2006), Kore’de kullanılan bir boji gövdesini yorulma dayanımı açısından değerlendirmiştir. Yükleme koşullarını saptamak için dinamik analiz çalışması yürütülmüştür. Dayanım analizleri ise sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Bu analizler neticesinde kritik bölgeler belirlenerek toplamda 25 gerilme ölçer bu noktalara yerleştirilmiştir. Ele alınan boji gövdesi, yorulma dayanımı açısından yeterli düzeyde yapısal güvenlik sağlamaktadır.

Mancini ve Cera (2006), EN 13749 ile belirlenen statik ve yorulma yüklerini, sonlu elemanlar modelinde uygulamıştır. Makalelerinde dayanım limiti ile kümülatif yorulma hasarı yöntemleri kıyaslanarak yorulma analizleri ortaya konmuştur. Sonlu eleman analizleri neticesinde elde edilen gerilme değerleri ile testlerden elde edilen gerilme değerleri arasındaki farklar hesaplanmıştır. Sonuçlar farkın %20 civarına kadar ulaşabildiğini göstermiştir. Bu fark için standartta herhangi bir sınır belirlenmediği ayrıca vurgulanmıştır.

Lu vd. (2009), yüksek güvenilirliğe sahip bir boji tasarımı yapabilmek için güvenilirliği en çok etkileyen faktörün bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla parametrik bir boji modeli hazırlanmış ve sonlu eleman analizine tabi tutulmuştur. Plaka kalınlıkları, malzeme özellikleri ve işletme yükleri parametre olarak alınmıştır. Parametrelerin dağılımı istatistiki verilerden elde edilmiştir. Hasar durumu fonksiyonları, yorulma dayanım değerleri ve maksimum asal gerilme değerleri ile kurulmuştur. Rastgele değişkenlerin güvenilirlik ve parametrik hassasiyet değerleri Monte-Carlo yöntemiyle hesaplanmıştır. Sonuçlara göre hangi parametrelerin güvenilirlik üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

Kassner'e (2011) göre, dayanım limiti yaklaşımı ile kümülatif hasar yaklaşımları yük vagonlarının boji gövdelerinin yorulma hasarı hesabında kabul görmüş yöntemlerdir. Bu yöntemler bir demiryolu aracının düşey yükleri için uygulanmıştır. Yüklemeler EN 13749 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ayrıca demiryolu aracının dinamik analizleri ile elde edilen düşey yük spektrumu için de analiz yapılmıştır. Tasarım için şart koşulan yüklerin dinamik analiz ile elde edilen yüklere kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu ortaya çıkmıştır. Sonlu eleman analizi yapıldıktan sonra en çok zorlanan kaynaklı birleşim yerleri belirlenerek bu bölgelerden düğüm noktaları seçilmiştir. Bu noktaların eşdeğer gerilme aralıkları hesaplanmasıyla farklı yükleme durumlarının yorulma üzerindeki etkisi kıyaslanabilmiştir. Şart koşulan yükleme durumuna göre hesaplanan yorulma ömrü daha düşüktür.

Kim ve Yoon (2011), yaygın bir şekilde kullanılan çelik bir boji gövdesinin yerini alabilecek kompozit bir boji gövdesi tasarlamayı amaçlamışlardır. GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) kompozit boji gövdesi tasarlanmış, üretilmiş ve yapısal dayanımının belirlenmesi için düşey yük ve yol burulması etkileri altında test edilmiştir. Gerilme konsantrasyon bölgelerinin orta kiriş ile yan kirişlerin bağlantı kısımlarında yer aldığı gözlenmiştir. Goodman diyagramının kullanılmasıyla tasarımın güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları test sonuçları ile örtüşmektedir.

Esderts vd. (2012), demiryolu araçlarının tasarımında pratikliğe ve güvenilirliğe büyük bir ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Mevcut yapılar, nominal gerilme yöntemine göre boyutlandırılmıştır. Halbuki, sonlu eleman analizleri kritik bölgelerdeki lokal gerilmeler için de yapılabilmektedir. Bu nedenle demiryolu

araçlarında tercih edilen kaynaklı birleştirme tipleri, test ve sonlu eleman analizine tabi tutulmuştur. Sonuçlar efektif çentik gerilmesi yönteminin uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Yaseen ve Wani (2014), döküm bir boji gövdesi ile benzer bir yapıya sahip kaynaklı bir boji gövdesinin gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. EN 13749 standardına uygun olarak her iki boji tipi için statik yük analizi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre her iki boji gövdesi de standart gereklerini sağlamaktadır. Kaynaklı boji tasarımı ile daha hafif bir yapı elde edilmiştir.

Ansari (2015), Hindistan demiryollarında kullanılan yolcu vagonu bojilerinden konvansiyonel tipteki ve Almanya'dan alınan optimize edilmiş Fiat tipi bojinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmıştır. Konvansiyonel tipteki bojinin yan kirişlerindeki I profil benzeri yapıyı kutu profile çevirmiş ve analiz etmiştir. Yeni bojide aynı yük durumları için konvansiyonel bojiye kıyasla daha küçük gerilme ve sehim değerleri ortaya çıkarken Fiat bojiye kıyasla daha yüksek gerilme ve sehim değerleri ortaya çıkmıştır.

Liliana vd. (2015), bir tesiste döküm potasını taşımak için kullanılan boji prototipini işletme koşullarını karşılayacak biçimde yük uygulayarak test etmişler, aynı zamanda sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Ölçülen ve hesaplanan gerilme değerlerinin uyduğu, kritik bölgelerdeki gerilme değerlerinin oldukça isabetli tahmin edilebildiği sonucuna varılmıştır. Kritik bölgeleri bilmenin optimize bir tasarım yapmak için avantaj sağlayacağı düşünülmüştür.

Özsoy vd. (2015), Türkiye Vagon Sanayii Anonim Şirketi tarafından üretilen Y32 tipi boji gövdesini sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Statik yapısal ve yorulma analizi simülasyonları TS EN 13749 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre en küçük güvenlik faktörü 1.46, yorulma analizi sonuçlarına göre ise  $2.5 \times 10^7$  çevrimde en küçük güvenlik faktörü 1.4 olarak tespit edilmiştir. Buna göre Y32 tipi boji gövdesi TS EN 13749 standardındaki gereklilikleri karşılamaktadır.

Shukla vd. (2015), bir bojinin yapısal analizlerini sonlu elemanlar yöntemi ile yapmışlardır. Tasarımı hafifletmek amacıyla AAR-M-202 standardında belirtilen yük durumları ile sınır koşullarını uygulayarak kritik bölgeleri belirlemeye çalışmışlardır. Öncelikle, 22.9 ton taşıma kapasitesine sahip üç parçalı döküm bojinin beşik

kirişinde ağırlığın azaltılacağı bölgeler belirlenmiştir. Tasarım tadil edilerek yük taşıma kapasitesi 25 tona çıkarılmış ve %13.3 oranında hafifletme sağlanmıştır. Saha testi sonuçları ise müsaade edilebilir sınırlar içindedir.

Făinuş vd. (2016), Y25 Cs boji gövdesinin alt kızak bölgesindeki gerilme durumunu belirlemek için kesip çıkardıkları orta kiriş üzerine kuvvet uygulayarak gerinim ölçerler vasıtasıyla ölçümler yapmışlardır. Aynı yükleme durumu için sonlu eleman analizleri de yapılmış, analizin doğruluğu test sonuçları üzerinden irdelenmiştir. Böylece tüm bir boji modelinde kullanılmak üzere alt modelin doğrulanması amaçlanmıştır. Alt kızak bölgesinde meydana gelen çatlamların yatay kurplardaki ilerleme hızının oldukça düşük olması nedeniyle ortaya çıkan ekstra yüklerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Bharadwaj (2017) yaptığı çalışmada Hindistan'da kullanılan yolcu vagonu bojilerini incelemiştir. Fiat tipi bojilerin yetersiz kalması nedeniyle Cosnub tipi bojiler tasarlanmıştır. Bharadwaj, Fiat ve Cosnub tipi boji gövdesinde ortaya çıkan gerilmeleri, Ansys Mechanical APDL yazılımı aracılığıyla elde etmiş ve iki bojideki gerilme değerlerini kıyaslamıştır. Cosnub tipi boji gövdesindeki gerilme değerlerinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu değerlerin müsaade edilebilir gerilme sınırının altında kaldığını da belirtmektedir.

Fartan ve Ulianov (2018), düşük ağırlıklı demiryolu aracı tasarımı için bir araştırma yürütmüşlerdir. Öncelikle, konsept bir tasarım oluşturmak için aday malzemeleri araştırmışlardır. Sonrasında seçilen aday malzemelere uygun olarak tasarım yapılmış ve analiz edilmiştir. Test yöntemiyle doğrulaması yapılmamış, daha sonra yapılacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, Y25 boji, platform vagon ve bunkerli vagon tasarlanmış, birkaç adım boyunca optimize edilmiştir. Muhtemel hafifleme oranları hesaplanmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçlarını başka bir çalışmada sunacaklardır.

Chen'e (2019) göre, standartlarda şart koşulan önemli bazı tasarım yüklerinin nasıl hesaplanacağı standarda dahil edilmemiştir. Bu yükler analiz edilerek hesaplama yöntemleri ortaya konmuştur. Bir boji tasarımı hem sonlu elemanlar yöntemiyle hem de deneysel olarak test edilmiştir. Yorulma analizlerinde dayanım limiti yöntemi ile düzeltilmiş Goodman yorulma limiti diyagramı kullanılmıştır. Sonuçlar boji gövdesinin gereklilikleri karşıladığını göstermiştir.

Konez vd. (2019a), SolidWorks programı üzerinde Y32 boji gövdesinin katı modelini oluşturmuşlardır. Katı modeli ANSYS programına aktarıp sonlu eleman modelini hazırlamışlardır. TS EN 13749 ile şart koşulan yükleme durumları uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. 4 adet plaka üzerinde akma sınırı aşıldığı için kalınlıklarının artırılması gerektiği belirtilmiştir.

Konez vd. (2019b), TS EN 13749 standardında yer alan 3 farklı yükleme durumu için Y32 bojisinin yorulma analizlerini yapmışlardır. Her bir düğüm noktası için ortalama gerilme ile gerilme genliklerinin hesaplanması sonrasında sonuçlar Haigh diyagramı üzerinde değerlendirilmiştir. Sonlu eleman programında Goodman düzeltmesi uygulanarak da çözüm yapılmıştır. Y32 bojisinin TS EN 13749 gereklerini sağladığı sonucuna varmışlardır.

Qi vd. (2019), boji gövdelerinin rastgele yükler altındaki yorulma dayanımını analiz etmek için bir yöntem önermişlerdir. FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau) ve IIW (International Institute of Welding) yöntemlerini kullanarak boji gövdelerinde rastlanan birleştirme tiplerini yorulma dayanımı açısından değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre FKM yöntemi konservatif sonuçlar vermektedir. IIW yöntemi ise düşük ağırlıklı tasarım ile güvenilirlik arasında daha iyi bir denge sağlamaktadır.

Slavchev vd. (2019), Y25Ls-K boji gövdesinin yorulma dayanımı üzerine çalışma yürütmüşlerdir. SolidWorks programını kullanarak EN 12663, ERRI B12/Rp17 ve 60 ile DVS 1612-2014 standartlarına uygun olarak sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Yorulma dayanımı Moore-Kommers-Jasper diyagramına, Goodman-Smith diyagramına ve DVS 1612 ile önerilen metotlara göre değerlendirilmiştir. Teorik sonuçlara göre en kötü gerilme durumunda  $10^7$  çevrim sonrasında hasar meydana gelmektedir. Uygulanan tüm yöntemlerde tespit edilen kritik noktalar aynı konsantrasyon bölgeleri üzerindedir. Standardın şart koştuğu testle doğrulama yönteminde en kötü durumun uygulanmadığını fakat analizlerde en kötü durumun uygulandığını vurgulamışlardır.

#### **1.4 Problem Tanımı ve Önemi**

Y25 tipi boji gövdesinin yapısal dayanım özellikleri bakımından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Anonimde (2011) tanımlanan istisnai ve normal yük durumları ANSYS Workbench programı aracılığı ile uygulanmıştır. Testlerden geçtiği bilinen bir Y25 tipi boji tasarımının analiz sonuçları ile teste tabi tutulmamış bir boji gövdesinin analiz sonuçları kıyaslanmıştır.

Fartan ve Ulianov (2018), RQT701 çeliğine HFMI (High Frequency Metal Impact) işleminin uygulanması sayesinde boji ve vagon tasarımlarının hafifletilebileceğini göstermiştir. Iwnicki vd. (2015), Avrupa Birliği araştırma programı kapsamında finanse edilen çalışmalarında, düşük ağırlıklı demiryolu aracı tasarımı için önerdikleri malzemeler arasında RQT701 yer almaktadır. Düşük ağırlıklı tasarım hedeflendiği için aynı yöntemle başvurulmuştur.



## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1 Akma Kriterleri

Tresca ve von Mises akma kriterleri, çok eksenli gerilme halinde izotropik ve sünek metallerin plastik deformasyona uğrayıp uğramadığını belirlemek için kullanılır. Bu kriterler eşdeğer bir gerilmenin hesaplanması esasına dayanır. Hesaplanan değer tek eksenli akma dayanımı ile kıyaslanır.

Maksimum kayma gerilmesi hipotezine dayanan eşdeğer Tresca gerilmesi denklem [2.1] ile hesaplanır.

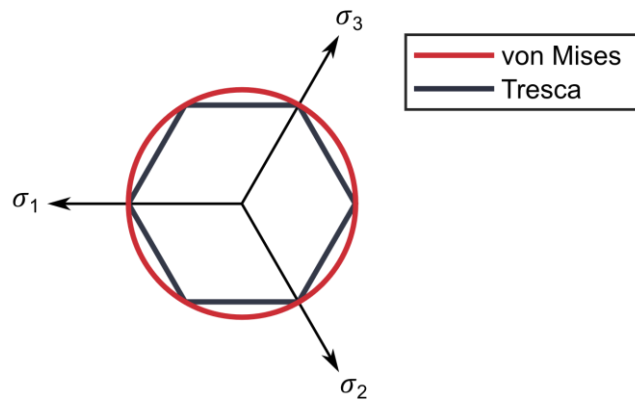
$$\tau_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{2} = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad [2.1]$$

Maksimum distorsiyon enerjisi hipotezine dayanan eşdeğer von Mises gerilmesi denklem [2.2] ile hesaplanır.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad [2.2]$$

von Mises ve Tresca kriterlerinin hidrostatik eksen üzerinden görünüşü, Şekil 2.1 ile verilmiştir. Eğrilerin dışında kalan bölgede akma hasarı görülür.

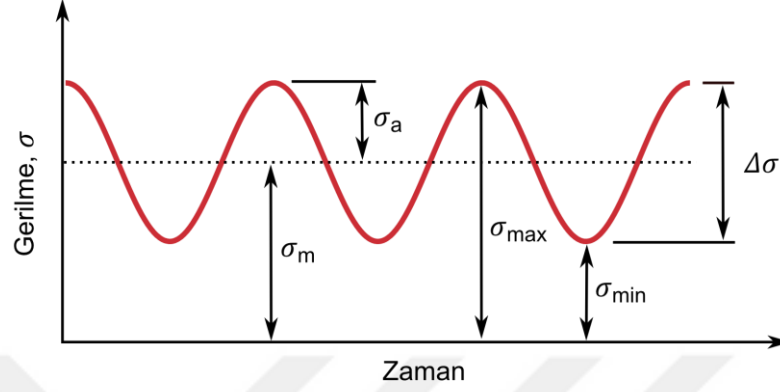
Şekil 2.1'e bakıldığında Tresca kriterinin von Mises kriterine kıyasla daha emniyetli olduğu görülür. Fakat von Mises akma kriteri daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.1 Tresca ve von Mises akma kriterleri.

## 2.2 Yorulma Kriterleri

Malzemeler sabit veya değişken genlikli dinamik yükler etkisiyle yorulularak hasara uğrayabilmektedir. Tek ekseninde etkiyen sabit genlikli bir dinamik gerilme yükü, parametreleri ile birlikte Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Çevrimsel gerilme parametreleri.

Gerilmenin zaman içinde aldığı en yüksek değer  $\sigma_{max}$ , en düşük değer ise  $\sigma_{min}$  ile simgelenmiştir. Diğer parametreler  $\sigma_{max}$  ve  $\sigma_{min}$  parametrelerinden türetilmiştir.

Gerilme aralığı,  $\Delta\sigma$ , maksimum ve minimum gerilmelerin farkını ifade eder.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad [2.3]$$

Gerilme genliği,  $\sigma_a$ , gerilme aralığının yarısıdır.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad [2.4]$$

Ortalama gerilme,  $\sigma_m$ , maksimum ve minimum gerilmenin ortalamasıdır.

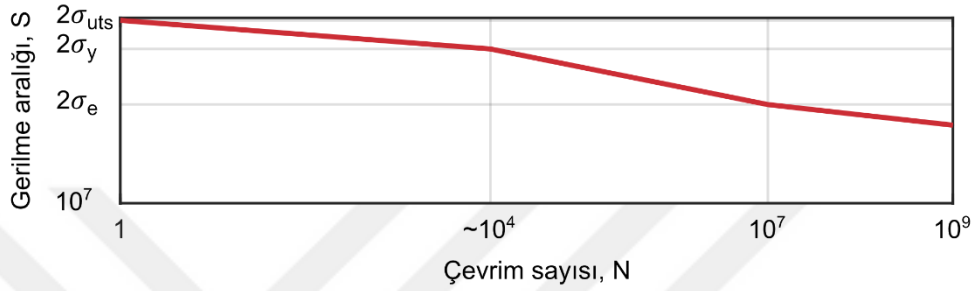
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad [2.5]$$

Gerilme oranı,  $R$ , minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad [2.6]$$

Her bir malzemenin yorulma davranışı yapılan testler aracılığıyla gözlenir. Tek eksenli sabit genlikli yorulma yükünün uygulanmasıyla elde edilen veriler S-N diyagramı üzerinde gösterilir (Şekil 2.3). Logaritmik ölçekte verilen S-N

diyagramında aradaki ilişkinin lineer hale geldiği görülür. Diyagramda S eksenini uygulanan gerilme değerini,  $\sigma_a$  veya  $\Delta\sigma$ ; N eksenini ise hasarın meydana geldiği çevrim sayısını gösterir. Belirli bir gerilme genliği için dayanım ömrü,  $N_f$ , istatistiksel bir dağılım gösterir. Bu nedenle yorulma eğrilerindeki dayanım ömrünün belirli bir olasılık değerine göre verilmesi gerekir. Bu değer genellikle en az %95 olması istenir. Akma sınırı aşıldığında düşük çevrim yorulma özellikleri görülürken akma sınırı altında yüksek çevrim yorulması görülür.

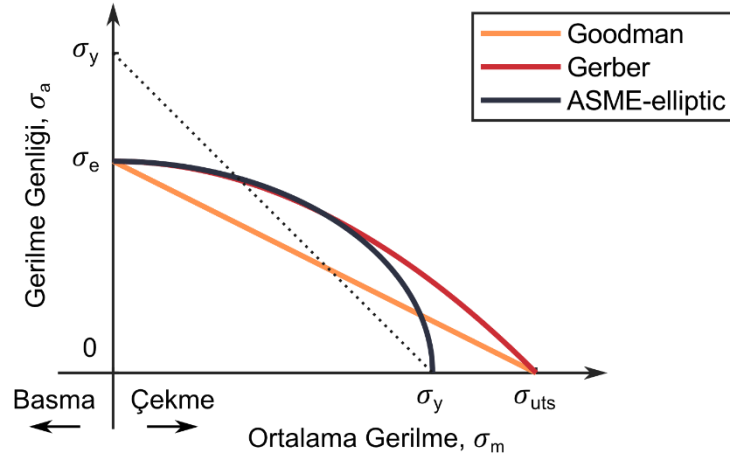


**Şekil 2.3** Logaritmik S-N diyagramı,  $R = -1$ .

Yorulma eğrileri, gerilme oranının ayrıık değerlerine bağılı olarak da elde edilebilir. Gerilme oranının ara değerleri için interpolasyon yöntemiyle tahmin yapılır. Bu sayede herhangi bir  $(\sigma_m, \sigma_a)$  yorulma yüküne karşı gelen  $N_f$  dayanım ömrü hesaplanır.

Dayanım ömrünü tahmin etmek üzere çeşitli teoriler ortaya atılmıştır. Bu teoriler ortalama gerilme, gerilme genliği ve yorulma ömrü arasında bir ilişki kurmaktadır. Goodman, Gerber ve ASME-elliptic yaklaşımları Haigh diyagramı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2.4).

Çelik malzemelerin  $5 \times 10^6$  çevrim ömrüne karşı gelen gerilme genliği,  $\sigma_e$ , yorulma limiti olarak kabul edilir (Şekil 2.4). Yorulma limitinden daha küçük değerli gerilmeler etkidiğinde çatlak ilerlemediği için malzemenin yorulmayacağı düşünülür. Literatürde böyle olmadığını söyleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Kazymyrovych, 2009; Wang vd., 2012). Aslında birçok uygulamanın dayanım ömrü  $10^8$  çevrimi aşmaktadır. Yüksek çevrimlerde çatlak başlangıcı yüzeydedir, çok yüksek çevrimlerde ise çatlak orijini yüzey altındadır (Wang vd., 2012).



**Şekil 2.4** Haigh diyagramında Goodman, Gerber ve ASME-elliptic yaklaşımları.

Diyagramdaki eğrilerin tüm noktaları için yorulma ömrünün aynı olduğu da dikkate alınır, eğrilerin altındaki bölgenin güvenli olduğu düşünülür. Akma noktalarını birleştiren  $\sigma_y$ - $\sigma_y$  doğrusu, Langer doğrusu, plastik deformasyon sınırını gösterir. Langer doğrusunun üstünde kalan bölgede gerilme tabanlı yorulma yaklaşımları uygulanamaz. Bu nedenle grafikte verilen yaklaşımlar Langer doğrusu ile sınırlandırılarak düzeltilir. Goodman yaklaşımı gevrek metal alaşımları için iyi; fakat sünek metal alaşımları için daha emniyetli tahminler yapar. Gerber yaklaşımı ise sünek metal alaşımları için daha isabetli tahminler yaparken ASME-elliptic yaklaşımı deneysel verilere daha çok uyar.

Goodman doğrusu, denklem [2.7] ile ifade edilir.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} = 1 \quad [2.7]$$

Gerber eğrisi, denklem [2.8] ile ifade edilir.

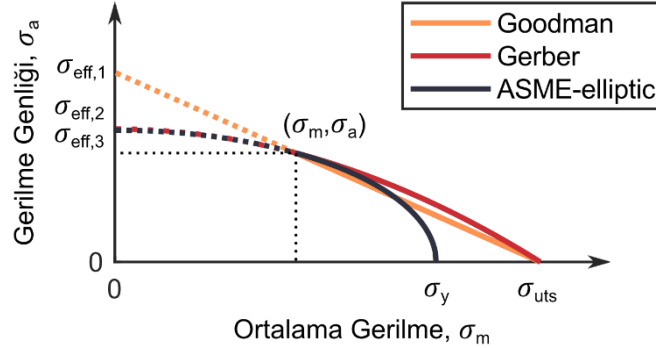
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right)^2 = 1 \quad [2.8]$$

ASME-elliptic eğrisi, denklem [2.9] ile ifade edilir.

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)^2 = 1 \quad [2.9]$$

Diyagramdaki eğrilerin sahip olduğu yorulma ömrünü bilmek diğer noktalardaki çalışma ömrünü tahmin etmek için yeterli olmaz. Neyse ki aynı yaklaşımlar ortalama

gerilmenin etkisini dâhil etmek için de kullanılabilir. [2.7], [2.8] ve [2.9] denklemleri  $\sigma_e$  için çözüldüğünde eşdeğer bir gerilme genliği hesaplanabilir. Bu yöntem ortalama gerilme düzeltmesi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.5).



**Şekil 2.5** Goodman, Gerber ve ASME-elliptic yöntemi ile ortalama gerilme düzeltmesi.

Herhangi bir gerilme durumu için ekstrapolasyon yapılarak eşdeğer bir gerilme genliği,  $\sigma_{eff}$ , hesaplanır. S-N diyagramında (Şekil 2.3),  $\sigma_{eff}$  gerilmesi kullanılarak ortalama gerilmenin yorulma üzerindeki etkisi dahil edilir.

Goodman yaklaşımıyla eşdeğer gerilme genliği denklem [2.10] ile hesaplanır.

$$\sigma_{eff} = \sigma_a \times \frac{1}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}} \quad [2.10]$$

Gerber yaklaşımı kullanılarak eşdeğer gerilme genliği denklem [2.11] ile hesaplanır.

$$\sigma_{eff} = \sigma_a \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right)^2} \quad [2.11]$$

ASME-elliptic yaklaşımı kullanılarak eşdeğer gerilme genliği denklem [2.12] ile hesaplanır.

$$\sigma_{eff} = \sigma_a \times \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)^2}} \quad [2.12]$$

Demiryolu uygulamalarında yorulma hesabı için düzeltilmiş Goodman yaklaşımı tercih edilmektedir (Anonim, 1989; Anonim, 2003). Düzeltilmiş Goodman yaklaşımı

aynı zamanda daha emniyetli tahminler yapmaktadır (Şekil 2.5). Bu nedenle eşdeğer gerilme genliği hesaplanırken Goodman yaklaşımı kullanılacaktır.

Çok eksenli gerilme durumu, orantılı olup olmamasına göre nitelendirilebilir. Orantılı yükleme, asal eksen doğrultularının ve asal gerilme oranlarının yük çevrimi boyunca sabit kalması halidir. Çok eksenli gerilme durumunda yorulma ömrünü değerlendirebilmek için gerilmenin orantılı olup olmamasına bağlı olarak farklı hesap yöntemleri tercih edilir.

Eşdeğer gerilme hesabına dayalı yöntemler, orantılı yükleme koşulları altında basit ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Eşdeğer von Mises gerilmesinin ( $\sigma_{eq}$ ) asal gerilmeler cinsinden ifadesi denklem [2.2] ile verilmişti. Denklemden görüleceği üzere von Mises gerilmesi skaler bir büyüklük olduğundan yorulma analizlerinde doğrudan kullanılamaz. Bu nedenle öncelikle gerilme tensörünün birinci değişmezi, mutlak maksimuma sahip asal gerilme veya maksimum asal gerilme arasından birisi seçilir. Seçilen büyüklük, işaret fonksiyonundan geçirilerek von Mises gerilmesine işaret ataması yapılır.

Çok eksenli orantılı yükleme durumu için eşdeğer von Mises gerilmesi, ortalama gerilme ve gerilme genliği değerleri cinsinden ifade edilebilir (Papuga vd., 2012). Bu değerler, çevrimsel bir yorulma yükü için denklem [2.13] ve [2.14] ile hesaplanır.

$$\sigma_m = \frac{\max_t[\sigma_{eq} \times \text{sign}(I)] + \min_t[\sigma_{eq} \times \text{sign}(I)]}{2} \quad [2.13]$$

$$\sigma_a = \frac{\max_t[\sigma_{eq} \times \text{sign}(I)] - \min_t[\sigma_{eq} \times \text{sign}(I)]}{2} \quad [2.14]$$

Denklem [2.13] ve [2.14]'te işaret ataması için gerilme tensörünün birinci değişmezi kullanılmıştır. Birinci değişmez denklem [2.15] ile hesaplanır.

$$I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad [2.15]$$

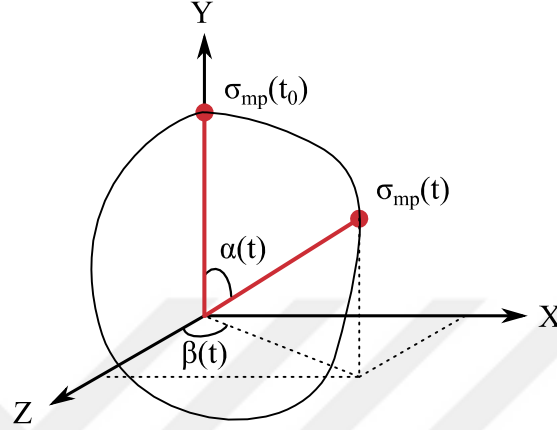
Çok eksenli orantılı olmayan yükleme durumu için eşdeğer gerilme hesabına dayanan bir yöntemin işlem basamakları aşağıda verilmiştir (Itoh vd., 2015).

- 1- Bir çevrim süresince  $[0, t]$  meydana gelebilecek maksimum asal gerilme değeri  $\sigma_{mp}(t_0)$  hesaplanır.
- 2- Gerilme aralığının aldığı maksimum değer bulunur (Şekil 2.6).

$$\Delta\sigma_{mp} = \max[\sigma_{mp}(t_0) - \cos \alpha(t) \sigma_{mp}(t)] \quad [2.16]$$

3- Ortalama gerilme, gerilme aralığı ve maksimum asal gerilme ile hesaplanır.

$$\sigma_{mp_m} = \sigma_{mp}(t_0) - \frac{\Delta\sigma_{mp}}{2} \quad [2.17]$$



**Şekil 2.6** Orantısız olmayan gerilme durumu (Itoh vd., 2015).

Pratikte farklı genlikteki gerilme çevrimleri ardışık olarak etkimektedir. Böylesi bir durumda kümülatif hasar teorisi ile hasar tahmini yapmak mümkündür. Palmgren-Miner kuralı olarak bilinen lineer yaklaşıma göre, aynı genlikteki gerilme çevrimlerinin aynı miktarda hasar bıraktığı ve biriken hasardan etkilenmediği varsayılır. Meydana gelen toplam hasar, denklem [2.18] ile hesaplanır.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad [2.18]$$

Kümülatif hasar değerinin 1'den büyük olması hasar meydana geldiğini gösterir.

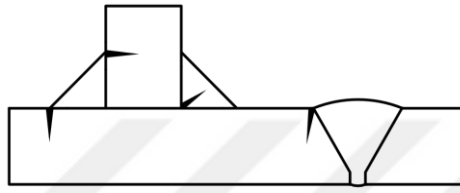
### 2.3 Yapısal Kritik Nokta Gerilmesi

Kaynaklı yapıların yorulma hesabı ile ilgili birçok kılavuz ve tasarım kuralı bulunmaktadır (Anonim 2005; Hobbcher, 2016). Bu kılavuzlarda nominal gerilme, yapısal kritik nokta gerilmesi ve efektif çentik gerilmesi gibi yöntemler ile ihtiyaç duyulan S-N eğrileri yer almaktadır.

Nominal gerilme yönteminde yorulma eğrileri, birleştirmenin ve yüklemenin tipine göre sınıflandırılır. Global gerilmeler referans alınarak değerlendirme yapılır ve elde edilen sonuçlar konservatiftir. Yapısal kritik nokta gerilmesi ve efektif çentik

gerilmesi yönteminde ise lokal gerilmeler dikkate alınır ve daha isabetli sonuçlar elde edilir. Bu nedenlerle tezin devamında nominal gerilme yöntemine yer verilmeyecektir. Ayrıca, efektif çentik gerilmesi yöntemi diğerlerine oranla daha fazla iş yükü gerektirdiğinden, özellikle tasarım aşamasında, tercih edilmemiştir. Hasar tahmini yapılırken yapısal kritik nokta gerilmesi yöntemi kullanılacaktır.

Kaynaklı yapıların kaynak bölgelerinde gerilme yığılmaları ve kalıntı çekme gerilmeleri meydana gelir. Yorulma çatlakları genellikle kaynak kenarında ve kaynak kökünde ortaya çıkar (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7** Kaynaklı yapılarda görülen yorulma çatlakları.

Çentik etkisinin bulunduğu bölgede plaka kalınlığı boyunca lineer olmayan gerilme dağılımı görülür. Bu gerilme dağılımı membran, eğilme ve lineer olmayan gerilme bileşenlerinden meydana gelir. Membran gerilmesi ortalama gerilmeye karşı gelir, eğilme gerilmesi ise kesitteki momenti dengeler. Geriye kalan gerilme bileşeni çentiğin neden olduğu lineer olmayan bileşendir.

$$\sigma_{ns} = \sigma_{mem} + \sigma_b + \sigma_{nlp} \quad [2.19]$$

Yapısal gerilme terimi ince bir plaka kesitindeki membran ve eğilme gerilmesini ifade eder. Kabuk eleman modelinde yer alan bu gerilmeler kesit boyunca lineer dağılım gösterirler. Bu nedenle sonlu eleman analizinde lineer olmayan gerilme bileşenini elimine etmek için kabuk elemanlar kullanılmıştır.

Kaynak kenarındaki yapısal gerilme ise yapısal kritik nokta gerilmesidir. Kaynak kenarındaki lineer olmayan gerilme bileşeni nedeniyle yapısal kritik nokta gerilmesini doğrudan hesaplamak mümkün olmaz. Bu nedenle kaynak kenarındaki yapısal gerilme ekstrapolasyon yapılarak hesaplanır. Bu sayede yalnızca plakaların birleştirilmesinden kaynaklanan gerilme artırıcı geometrik faktörler göz önüne alınır. Kaynak dikişinden kaynaklanan çentik etkisi ise S-N grafiğinin kullanılmasıyla ampirik yoldan hesaba dahil edilir. Bu sayede çentik etkisinin hesaplamada kullanılmasına gerek kalmaz. Nominal gerilme yöntemine kıyasla yapısal kritik

nokta gerilmesi yönteminin temel avantajı daha az sayıda S-N grafiği ile yorulma ömrünün değerlendirilebilmesidir (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1** Kaynaklı yapılara uygulanan yorulma analiz yöntemleri.

	Nominal Gerilme	Yapısal Kritik Nokta Gerilmesi	Efektif Çentik Gerilmesi
Doğruluk*	•	••	•••
Hesaplama Süresi**	•	••	•••

\* Daha fazla “•” sembolü daha yüksek doğruluk anlamına gelir.

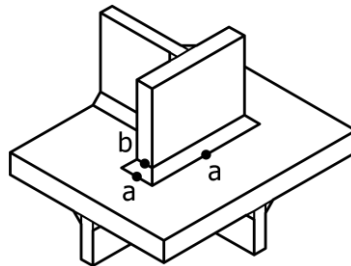
\*\* Daha fazla “•” sembolü daha uzun hesaplama süresi anlamına gelir.

Yapısal kritik nokta gerilmesi yönteminde çentik durumları bulunduğu bölgeye göre ikiye ayrılır (Şekil 2.8). Plaka yüzeyindeki kaynak kenarı “a”, plaka kenarındaki kaynak kenarı ise “b” tipi konsantrasyon noktası olarak sınıflandırılır. Sınıflandırmanın tipine göre farklı şekillerde ekstrapolasyon yapılarak kaynak kenarındaki yapısal gerilme tahmin edilir. “a” noktası için lineer ekstrapolasyon yapılması durumunda, plaka kalınlığı “t” olmak üzere kaynak kenarına dik doğrultuda 0.4t ile 1.0t uzaklıktaki iki nokta seçilerek hesaplama yapılır. “b” noktası için 4, 8 ve 12 mm uzaklıkta bulunan plaka kenarının ortasındaki noktaların gerilme değerleri üzerinden ekstrapolasyon yapılır.

$$\sigma_{hs,a} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad [2.20]$$

$$\sigma_{hs,b} = 3\sigma_{4mm} - 3\sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad [2.21]$$

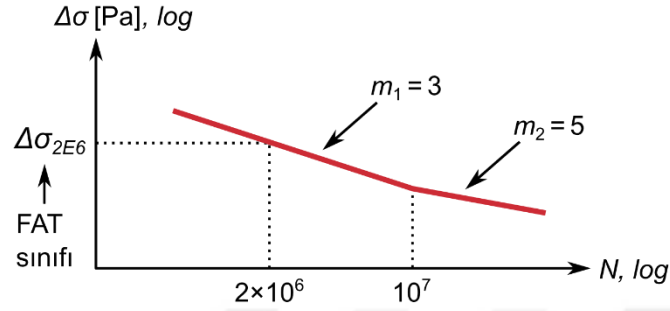
Yapının yükleme durumuna göre her iki çentik durumu için yorulma sınıfları tanımlanmıştır (Niemi vd., 2018).



**Şekil 2.8** Yapısal kritik nokta gerilmesi yöntemi için çentik durumları (Niemi vd., 2018).

Şekil 2.9 ile kaynaklı yapılar için kullanılan bir yorulma eğrisi verilmiştir. N, çevrim sayısını;  $\Delta\sigma$  ise gerilme aralığını göstermektedir.  $N < 10^7$  için eğim  $m_1 = 3$ ;  $N > 10^7$  için eğim  $m_2 = 5$  olmaktadır.  $2 \times 10^6$  çevrime karşı gelen gerilme aralığının da,

$\Delta\sigma_{2E6}$ , verilmesiyle eğri tanımlanmaktadır. IIW tarafından standart hale getirilen FAT sınıfları için bu tanımlama karakteristiktir. Örneğin, FAT100 sınıfı, 100 MPa değerindeki gerilme aralığına sahip,  $\Delta\sigma$ , tam değişken gerilme yükünün %97.7 güvenilirlikle  $2 \times 10^6$  çevrimde meydana getirdiği hasar durumunu ifade eder. Yapıdaki çatlakın kesit boyunca ilerlemiş olması hasar olarak kabul edilir.



Şekil 2.9 FAT sınıfı tanımı (Hobbcher, 2016; Niemi vd., 2018).

#### 2.4 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (FEM), mühendislik problemlerini bilgisayar ortamında nümerik olarak çözümlene fikrine dayanan matematiksel bir yöntemdir. Problem sonlu elemanlara ayrılarak bilgisayar için çözülebilir bir forma indirgenir. Karmaşık geometriye sahip yapıların analitik çözümleri mümkün olmadığından pratikte sıklıkla tercih edilir ve oldukça güvenilir sonuçlar verir. Sonlu elemanlar yönteminin büyük bir teorik alt yapıya dayanması, önemini artırır. Ayrıca, ANSYS, ABAQUS ve COSMOS gibi birçok yazılım, bu yöntemi kullanır.

FEM analiz uygulamasının temel aşamaları; model hazırlama, çözüm yapma ve sonuçların değerlendirilmesidir. Model hazırlama aşamasında ele alınan geometri sonlu elemanlar ağına dönüştürülür. Malzeme özellikleri tanımlanır ve sınır koşulları uygulanır. Çözümleme aşamasına gelindiğinde uygun bir çözücü seçilir ve çeşitli ayarlamalar yapılır. Sonuç aşamasında ise elde edilen gerilme ve gerinim gibi birincil büyüklükler değerlendirilir. Von Mises gerilmesi gibi diğer büyüklükler, birincil büyüklüklerden türetilir.

Alt modelleme tekniği:

Eleman sayısını azaltmak çözüm süresini kısaltır fakat gerilme yığılmasının olduğu bölgelerdeki yüksek gradyanlar kaybolur. Eleman sayısının artmasıyla çözüm süresi uzar, sonuç dosyasının boyutu büyür ve bilgisayarın RAM (Random Access Memory) gereksinimi artar. Tüm bu nedenlerle, eğer büyük ebatlarda bir geometri



analiz yapıldığı varsayımıyla en kötü durum analizine göre birikimli tolerans değeri denklem [2.22] ile hesaplanır.

$$s_{asm} = \sum_{i=1}^n |s_{p,i}| \quad [2.22]$$

RSS analiz yöntemine göre birikimli tolerans değeri denklem [2.23] ile hesaplanır.

$$s_{asm} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_{p,i}^2} \quad [2.23]$$



### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Yöntem

Y25 boji gövdesinin 3D modeli Autodesk Inventor ile hazırlanmıştır. ANSYS Workbench ile yapılan statik ve yorulma analizlerinde TS EN 13749 standardında tanımlanan tasarım yükleri uygulanmıştır (Anonim, 2011).

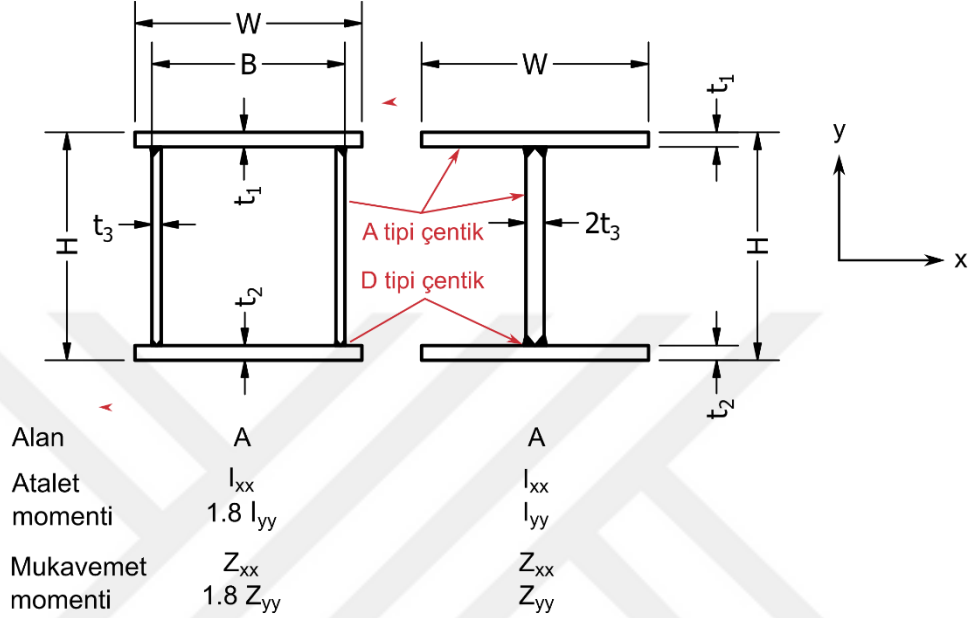
İstisnai yük analizi ile von Mises gerilmeleri hesaplanmış, yapının plastik deformasyona uğrayıp uğramadığı araştırılmıştır. Alt modelleme yapılarak plastik deformasyonların kırılmaya neden olup olmadığı incelenmiştir. Normal yükler nedeniyle ortaya çıkan yorulma hasarı orantısız olmayan yükleme durumuna göre ele alınmıştır. Uygulanan iki farklı yükleme senaryosu sonucunda ortaya çıkan gerilme dağılımları üzerinden ortalama gerilme ve gerilme genliği değerleri hesaplandıktan sonra Goodman yöntemiyle eşdeğer gerilme genliği hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yorulma ilerlemesi için maksimum asal gerilme değerleri baz alınmıştır. Bu sayede yorulmaya maruz kalan bölgeler ile üzerlerine etkiyen gerilme değerleri ortaya çıkarılmıştır.

Öncelikle mevcut bir Y25 tipi boji gövdesi tasarımı irdelenerek eksiklikleri araştırılmış, dayanım özellikleri belirlenmiştir. Y25 tipi bojinin yan kirişleri I profil formundadır. Sonrasında daha yüksek dayanımlı bir malzeme seçilerek kutu profil formundaki yan kirişlere sahip olan alçak zeminli bir boji gövdesi tasarlanmış ve sonlu eleman analizine tabi tutulmuştur (Şekil 3.1).

Şekil 3.1’de yer alan kutu ve I formundaki yapıların aynı kesit alanına sahip olduğu görülür. I formundaki yapı,  $2t_3$  kalınlığındaki plakanın ikiye bölünmesiyle kutu formuna çevrilmiştir. Böylece,  $Z_{yy}$  mukavemet momenti 1.8 katına çıkmıştır. Mukavemetin artması sayesinde yapıdaki gerilmeleri düşürmek ya da gerilmeleri sabit tutarak ağırlığı azaltmak amacıyla kutu formu tercih edilmiştir.

Alçak zeminli bojidaki kritik noktaların belirlenmesinin ardından kaynak kenarlarının yorulma ömrünü değerlendirmek için yapısal kritik nokta yöntemi uygulanmıştır (Denklem [2.20] ve [2.21]). HFMI yöntemiyle iyileştirme yapıldığı durum ve  $550 < \sigma_y \leq 750$  için önerilen FAT180 ( $m_1=5$ ,  $m_2=9$ ) ile FAT200 ( $m_1=5$ ,  $m_2=9$ ) sınıfları ile değerlendirme yapılmıştır (Şekil 2.9) (Marquis, 2013). FAT180 sınıfı ile yük taşıyan kaynak dikişi, FAT200 sınıfı ile yük taşımayan kaynak dikişi,

kritik nokta gerilmesi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bunu yaparken hesaplanan eşdeğer gerilme genlikleri kullanılmıştır. Anonimde (2011) bojiler için yorulma testi prosedürü tanımlanmıştır. Bu prosedürde önerilen çevrim sayıları analiz programında uygulanarak kümülatif hasar miktarı hesaplanmıştır (Denklem [2.18]). Standartta tanımlanan yorulma testi programı EK-3 ile verilmiştir.



Şekil 3.1 Kutu ve I formundaki yapıların kıyaslanması.

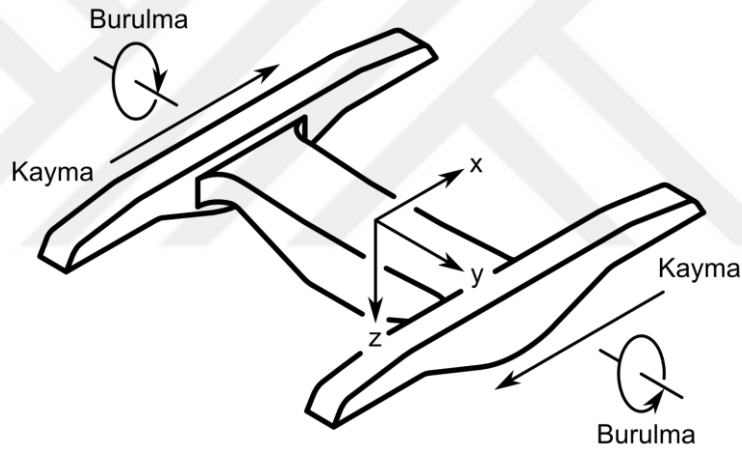
### 3.2 Bojiye Etkiyen Yükler

Bojiye etkiyen yükler araç gövdesindeki yük dağılımına, yol düzensizliklerine, işletme şartlarına ve süspansiyon karakteristiğine bağlıdır (Anonim, 2012). Bu yükler istisnai ve normal işletme yükleri olarak iki guruba ayrılır. İstisnai yükler nadiren gerçekleşen ekstrem yüklerdir. Bu yükler karşısında yapı bütünlüğünün ve fonksiyonelliğinin bozulmaması gerekir. Normal servis yükleri işletme sırasında meydana gelen tekrarlı yüklerdir ve yorulma hasarına neden olurlar (Anonim, 2011).

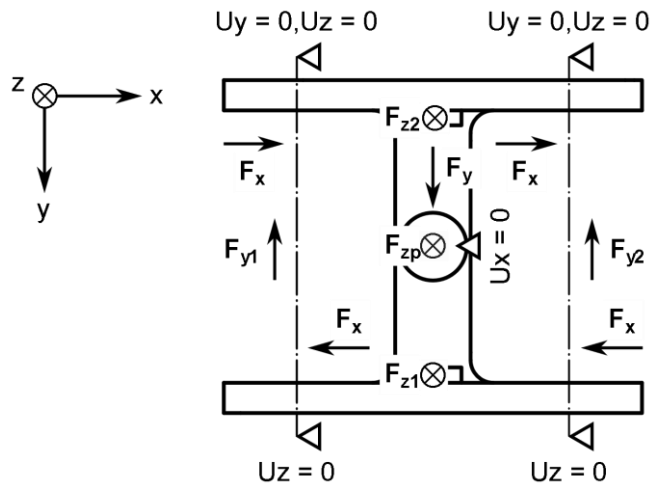
Boji üzerinde tanımlanan referans koordinat sistemi Şekil 3.2 ile gösterilmektedir. Düşey yönlü kuvvetler ile z, boylamasına kuvvetler ile x ve yanal kuvvetler ile y ekseninde etkiyen kuvvetler kastedilir. Burulma kuvvetleri, yol burulmasından kaynaklanır ve burulma açısı y ekseninde tanımlanır. Kayma kuvvetleri ise tekerler üzerine etkiyen boylamasına yöndeki kuvvet çiftidir.

### 3.2.1 İstisnai yük hesaplamaları

Bojiye etkiyen kuvvetler, uygulama noktaları ve mesnet noktaları Şekil 3.3 ile gösterilmiştir. Boji pivotu ve alt kızıklara, sırasıyla, düşey yönlü  $F_{zp}$ ,  $F_{z1}$  ve  $F_{z2}$  kuvvetleri etkir. Boji pivotu üzerine  $F_y$  büyüklüğünde yanal bir kuvvet ayrıca etkir.  $F_y$  kuvveti nedeniyle meydana gelen reaksiyon kuvvetleri,  $F_{y1}$  ve  $F_{y2}$ , 1 ve 2 numaralı akslar üzerine etkir. Boji gövdesini kaymaya zorlayan kuvvetler,  $F_x$ , tekerler üzerinden etkir. Aks kutularının düşey ve yatay hareketleri kısıtlanarak, uygulanan kuvvetlere reaksiyon göstermeleri sağlanır. Hem serbest cisim hareketini önlemek için hem de  $x$  yönündeki atalet kuvvetlerini karşılamak üzere boji pivotunun boylamasına yöndeki hareketi kısıtlanır. Burulma etkisi  $U_z$  serbestliği ile sağlanır. Şekilde yer alan  $U_x$ ,  $U_y$  ve  $U_z$  değişkenleri  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönündeki öteleme serbestliklerini simgelemektedir. Kısıtlanan serbestliklere 0 değeri verilmiştir. Mesnet noktalarının hiçbirinde dönme serbestliği kısıtlanmamıştır.



Şekil 3.2 Boji üzerinde tanımlı referans koordinat sistemi (Anonim, 2011).



Şekil 3.3 Bojiye etkiyen yükler ve mesnet noktaları (Anonim, 2011).

Boji üzerine etkiyen istisnai yük hesaplamalarının tamamında Anonimde (2011) belirtilen denklemler kullanılmıştır (Şekil 3.3).

Anonime (2011) göre düşey yönlü istisnai yük analizinde iki temel yük durumu bulunmaktadır. Bir bojinin yük taşıma kapasitesi,  $F_z$ , maksimum brüt yük ile boji darasının farkı olmak üzere;

Birinci düşey yükleme durumunda, istisnai yükün sadece pivot üzerine etkiği kabul edilir. Bu durumda denklem [3.1] ile hesaplama yapılır.

$$F_{zp} = 2F_z \quad [3.1]$$

İkinci düşey yükleme kabulünde, istisnai yükler alt kızaklardan herhangi birine,  $F_{zi}$ , ve pivota,  $F_{zp}$ , etkiği varsayılır ve denklem [3.2] ve [3.3] ile hesaplanır.

$$F_{zi} = 1.5F_z \cdot \alpha \quad i(1;2) \quad [3.2]$$

$$F_{zp} = 1.5F_z(1 - \alpha) \quad [3.3]$$

Denklem [3.2] ve [3.3]'de yer alan  $\alpha$ , yuvarlanma katsayısıdır. Alt kızakların merkezleri arasındaki mesafe ile işletme şartlarına bağlı bir parametredir.  $\alpha = 0.3$  alınmıştır (Anonim, 2011).

Yanal yönde etkiyen toplam kuvvet  $F_y$  ve boji kütlesi  $m^+$  olmak üzere, her bir aksa yanal yönde etkiyen istisnai yükler denklem [3.4] ile hesaplanır.

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{F_y}{2} = 10^4 + \frac{F_z + m^+g}{6} \quad [3.4]$$

Her bir tekere boylamasına yönde etkiyen kuvvet çifti,  $F_x$ , maksimum brüt yük üzerinden denklem [3.5] ile hesaplanır.

$$F_x = 0.1 \times (F_z + m^+g) \quad [3.5]$$

### 3.2.2 İstisnai yükleme kombinasyonları

Toplam 10 adet yükleme kombinasyonu göz önüne alınmıştır (Çizelge 3.1). L1 durumu yükün sadece pivota etkiği durumdur. L2 ve L3 durumunda yan yatmadan kaynaklanan düşey kuvvetler ile burulma uygulanmıştır. L4 ve L5 durumunda yan yatma ve yanal kuvvet uygulanmıştır. L6 ve L7 durumunda boji gövdesini kaymaya zorlayan kuvvetler ile yük çarpanı 1.5 alınarak düşey yönlü kuvvet uygulanmıştır (Slavchev vd., 2017). L8 ve L9 durumunda çarpışma etkisine (5g) denk düşen eylemsizlik kuvveti ile düşey yönlü kuvvet uygulanmıştır. Tekerlek seti vb. parçalar

noktasal kütle olarak kabul edilmiştir. L10 durumunda düşey yönlü kuvvet için yük çarpanı 1.2 alınmıştır (Slavchev vd., 2017). Frenleme kuvveti tekerlek üzerine uygulanan normal kuvvet,  $F_{bn}$ , ve teğet yöndeki sürtünme kuvveti,  $F_{bt}$ , bileşenlerine ayrılarak ifade edilmiştir.

Analizleri yapılacak Y25 tipi boji kütlesi 3950 kg civarında olup aks yükü 22.5 tondur (Çizelge 1.1 ve 1.2). Buna göre bojinin yük taşıma kapasitesi,  $F_z = (2 \times 22500 - 3950)g$  olarak hesaplanmış ve ilgili bağıntılarda bu değer kullanılmıştır. Frenleme kuvvetleri üreticinin sunduğu test sonuç raporlarından elde edilmiştir ve 45 tonluk toplam yük için bir adet bojiye etki eden toplam kuvveti ifade etmektedir. İstisnai yükler bu parametrelere göre hesaplanmıştır (Çizelge 3.1). Hesaplamaların hangi denklemlere göre yapıldığı EK-1 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Y25 tipi boji için istisnai yükleme kombinasyonları.

	Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]	Yol Burulması	Kayma [kN]	Çarpma [m/s <sup>2</sup> ]	Frenleme [kN]	Frenleme [kN]
	$F_{z2}$	$F_{zp}$	$F_{z1}$	$F_y$	$g^+$	$F_x$		$F_{bn}$	$F_{bt}$
<b>Yükleme Durumu</b>	<b>L1</b>		805.1						
	<b>L2</b>	181.1	422.7		%1				
	<b>L3</b>		422.7	181.1		%1			
	<b>L4</b>	181.1	422.7		167.1				
	<b>L5</b>		422.7	181.1	-167.1				
	<b>L6</b>		603.8				44.1		
	<b>L7</b>		603.8				-44.1		
	<b>L8</b>		402.5					5g	
	<b>L9</b>		402.5					5g	
	<b>L10</b>		483.0						117

Alçak zeminli boji kütlesi 3700 kg civarındadır. Aks yükü 20 ton olup, 840 mm çapında tekerlere sahiptir. Yaylanma özellikleri bir adet boji için 12.6 tona kadar 3 mm/t, 12.6 tonun üzerinde ise 1 mm/t değerindedir. Pivotta yer alan mafsalsın merkez yüksekliği toplamda 115 mm daha alçaktadır. Buna göre bojinin yük taşıma kapasitesi,  $F_z = (2 \times 20000 - 3700)g$  olarak hesaplanmış ve ilgili bağıntılarda bu değer kullanılmıştır. Frenleme kuvvetleri ise tonajla orantılı olduğu kabul edilerek Çizelge 3.1'deki değerlerin referans alınmasıyla yaklaşık olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).

### 3.2.3 Normal yük hesaplamaları

Normal yük hesaplamaları, istisnai yüklere benzer şekilde yapılır. Bu nedenle kuvvetleri ve parametreleri tarif etmek için aynı simgeler kullanılmıştır.

**Çizelge 3.2** Alçak zeminli boji için istisnai yükleme kombinasyonları.

		Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]	Yol Burulması	Kayma [kN]	Çarpma [m/s <sup>2</sup> ]	Frenleme [kN]	Frenleme [kN]
		F <sub>z2</sub>	F <sub>zp</sub>	F <sub>z1</sub>	F <sub>y</sub>	g <sup>+</sup>	F <sub>x</sub>		F <sub>bn</sub>	F <sub>bt</sub>
Yükleme Durumu	L1		711.9							
	L2	160.2	373.8			%1				
	L3		373.8	160.2		%1				
	L4	160.2	373.8		150.7					
	L5		373.8	160.2	-150.7					
	L6		533.9				39.2			
	L7		533.9				-39.2			
	L8		356.0					5g		
	L9		356.0					5g		
	L10		427.1						104	24

Boji üzerine etkileyen normal yük hesaplamalarının tamamında Anonimde (2011) belirtilen denklemler kullanılmıştır (Şekil 3.3).

Anonime (2011) göre düşey yönlü normal yük analizinde 2 temel yük durumu bulunmaktadır. Bir bojinin yük taşıma kapasitesi,  $F_z$ , maksimum brüt yük ile boji darasının farkı olmak üzere;

Birinci düşey yükleme durumunda, normal yükün sadece pivot üzerine etki ettiği kabul edilir ve denklem [3.6] ile hesaplanır.

$$F_{zp} = F_z \quad [3.6]$$

İkinci düşey yükleme durumunda, normal yükler alt kızaklardan herhangi birine,  $F_{zi}$ , ve pivota,  $F_{zp}$ , etki ettiği kabul edilir ve denklem [3.7] ve [3.8] ile hesaplanır.

$$F_{zi} = F_z \cdot \alpha \quad i(1; 2) \quad [3.7]$$

$$F_{zp} = F_z(1 - \alpha) \quad [3.8]$$

Denklem [3.7] ve [3.8]'de yer alan  $\alpha$ , yuvarlanma katsayısıdır. Alt kızakların merkezleri arasındaki mesafe ile işletme şartlarına bağlı bir parametredir.  $\alpha = 0.2$  alınmıştır (Anonim, 2011).

Her bir aksa yanal yönde etkiyen normal yükler, denklem [3.9] ile hesaplanır.

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{F_y}{2} = 0.1 \times (F_z + m^+ g) \quad [3.9]$$

Boylamasına yöndeki kayma kuvvetleri,  $F_x$ , denklem [3.10] ile hesaplanır.

$$F_x = 0.05 \times (F_z + m^+ g) \quad [3.10]$$

### 3.2.4 Normal yük kombinasyonları

Yorulmaya neden olan yükler normal işletme yükleridir. Dinamik bileşenlerin hesabı için zıplama katsayısı  $\beta = 0.3$  alınarak hesap yapılır (Anonim, 2011).

Y25 tipi boji gövdesini yorulmaya zorlayan yükler hesaplanmıştır (Çizelge 3.3). Hesaplamaların hangi denklemlere göre yapıldığı EK-1 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Y25 tipi boji için normal yük kombinasyonları.

		Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]
		$F_{z2}$	$F_{zp}$	$F_{z1}$	$F_y$
Yükleme Durumu	LF1		402.5		
	LF2		523.3		
	LF3		281.8		
	LF4		418.6	104.7	-88.3
	LF5	104.7	418.6		88.3
	LF6		225.4	56.4	-88.3
	LF7	56.4	225.4		88.3

LF4 ile LF7 arasındaki yükler ile %0.5 oranında yol burulması her iki yönde de uygulanarak, yani +y ve -y, ayrıca analiz yapılır. Kayma etkisini ölçmek için LF1 durumuna ilave olarak her bir tekere 22.1 kN değerindeki  $F_x$  kuvveti uygulanmıştır (Şekil 3.3) (Anonim, 2011).

Alçak zeminli bojiye etkiyen kayma kuvvetleri 19.6 kN değerinde olup normal yük değerleri Çizelge 3.4 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.4** Alçak zeminli boji için normal yük kombinasyonları.

		Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]
		$F_{z2}$	$F_{zp}$	$F_{z1}$	$F_y$
Yükleme Durumu	LF1		356.0		
	LF2		462.7		
	LF3		249.2		
	LF4		370.2	92.5	-78.4
	LF5	92.5	370.2		78.4
	LF6		199.3	49.8	-78.4
	LF7	49.8	199.3		78.4

### 3.3 Gerilme Analizleri

Sonlu elemanlar yöntemi ile statik yapısal analiz yapılmıştır. Statik yük analizlerinde akma dayanımının aşılmış aşılmadığı lineer elastik gerilmelerin hesaplanması ile kontrol edilmiştir. Global gerilmeleri hesaplarken kuadratik kabuk elemanlar kullanılmış, eleman büyüklükleri plaka kalınlıkları ile eşit olarak seçilmiştir. Alt modelleme yapılarak plastik deformasyon bölgelerindeki von Mises gerilmeleri ile plastik gerinimler hesaplanmıştır. Plastik deformasyonlar incelenirken 1 mm boyutlarındaki kuadratik katı elemanlar kullanılmıştır.

Yorulma yükleri orantısız olmayan yükleme tipindedir. Bu nedenle iki yükleme durumu seçilerek maksimum asal gerilme değeri üzerinden ortalama gerilme ile gerilme genliği değerleri, sonrasında ise Goodman yaklaşımı ile eşdeğer gerilme genliği hesaplanmıştır.

#### 3.3.1 Sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modeli ANSYS Workbench programı üzerinde hazırlanmıştır (Şekil E2.60 ve E2.61). İstisnai yük analizlerinde lineer elastik malzeme modeli kullanılarak global gerilmeler elde edilmiştir. Akma sınırını aşan bölgeler için alt modelleme tekniği kullanılarak plastik şekil değişimleri incelenmiştir. Plastik değişimler bilineer malzeme modeline göre analiz edilmiştir. S355 çeliği için Young modülü 210 GPa, teğet modülü ise 1450 MPa alınmıştır (Olesen ve Poulsen, 2018).

Yüksek çevrim yorulma hasarı hedeflendiği için yorulma analizlerinde lineer malzeme modeli referans alınmıştır.

Mevcut bir Y25 konstrüksiyonunda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.5 ile sunulmuştur (Anonim, 1988; Anonim, 2006).

**Çizelge 3.5** Y25 tipi bojide kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Fiziksel Özellikler				
Malzeme	Norm	E [GPa]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\nu$
S355J2+N	TS EN 10025-2	210	7.85	0.3
E300-520-MS C1	UIC 840-2	210	7.85	0.3
Mekanik Özellikler				
Malzeme	Norm	Kalınlık [mm]	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]
S355J2+N *	TS EN 10025-2	≤ 16	355	470
S355J2+N	TS EN 10025-2	> 16	345	470
E300-520-MS C1	UIC 840-2	≤ 40	300	520
		Döküm		

\* Boji iskeletinde kullanılan sac malzeme. Diğerleri döküm ve dövme parçalar içindir. Yerçekimi ivmesi,  $g = 9.806 \text{ m/s}^2$  alınmıştır.

Alçak zeminli tasarımın analizlerinde kullanılmak üzere seçilen RQT701 çeliği Tata Steel tarafından üretilmekte ve özelliklerinin EN 10025 S690QL ile benzer olduğu ifade edilmektedir (url-4, 2019). Üreticinin sunduğu bilgilere göre malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.6 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.6** RQT 701 çeliğinin kimyasal bileşim özellikleri.

C	Si	Mn	S	P	Cr
0.20	0.50	1.60	0.010	0.025	1.00
Mo	Nb	V	Ni	Cu	B
0.70	0.060	0.08	1.50	0.40	0.004

RQT701 çeliğinin mekanik özellikleri Çizelge 3.7 ile verilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde sac malzemeler için RQT701 kullanılmıştır. Aks kutusu kılavuzu ile yarı küresel mafsal malzemesi Y25'te kullanılanlar ile aynıdır.

**Çizelge 3.7** RQT 701 çeliğinin mekanik özellikleri.

Kalınlık [mm]	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	% Uzama
≤ 70	690	790-930	18
> 70	630	690-930	18
≤ 130			

### 3.4 Bulgular

Bu bölümde statik analiz ve yorulma analizleri sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerleri ve eşdeğer gerilme genliği gibi bilgiler sunulmuştur.

#### 3.4.1 İstisnai yük analizleri

İstisnai yükleme analizinde yapı bütünlüğü ile fonksiyonelliğinin bozulup bozulmadığı incelenmektedir (Anonim, 2012). Öncelikle lineer elastik malzeme modeli kullanılarak von Mises gerilme değerleri hesaplanmıştır. Akma sınırının aşıldığı kısımlardaki plastik deformasyon alt modelleme tekniği ile incelenmiş, bunu yaparken bilineer malzeme modeli kullanılmıştır.

Boji pivotundaki yarı küresel mafsal ile aks kutusu kılavuzları yetkili otoritelerce onaylanmış mevcutta kullanılan parçalardır. Bu nedenle söz konusu parçaların incelenmesi tez kapsamının dışında tutulmuştur. Analizler yapılırken gerilme dağılımını etkileyeceği düşünülerek, bu parçalar modele dahil edilmiş; fakat değerlendirmeye alınmamıştır.

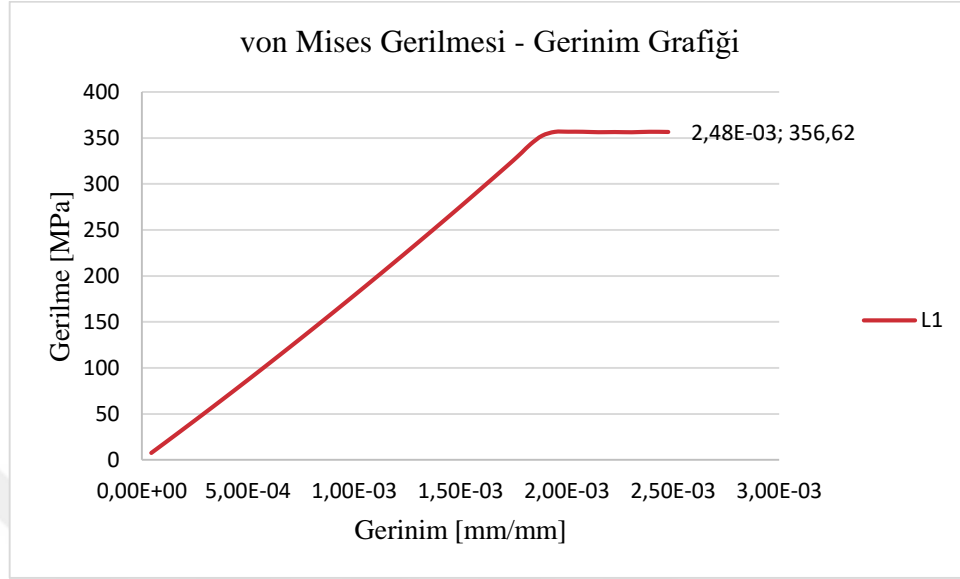
Y25 tipi bojiye uygulanan istisnai yükler neticesinde elde edilen gerilme değerlerinin S355 çeliğine ait akma sınırını aştığı ortaya çıkmıştır (Çizelge 3.8). Gerilmeler lokal etkili olup yapının fonksiyonelliğini bozmamakta, kırılma meydana gelmemektedir (Çizelge 3.5). Fakat yapı üzerinde kalıntı gerilmelere neden olmakta, sonuçlar gerilme konsantrasyon bölgelerinin varlığını göstermektedir. Konsantrasyon bölgeleri genellikle boşaltma yapılan kısımların kenarları üzerine denk düşmektedir (Şekil E2.1– E2.15).

**Çizelge 3.8** Y25 tipi boji gövdesinin istisnai yük analizi ile hesaplanan maksimum von Mises gerilme ve plastik uzama değerleri

Yükleme Durumu	L1	L2	L3	L4	L5
von Mises [MPa]	357	328.7	321.03	357	356
Plastik Uzama [mm/mm]	$7 \times 10^{-4}$	-	-	$4.5 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$
Yükleme Durumu	L6	L7	L8	L9	L10
von Mises [MPa]	357	357	325	326	284
Plastik Uzama [mm/mm]	$5.3 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-4}$	-	-	-

Analizin doğruluğunu irdelemek açısından, L1 yük durumundaki maksimum gerilme noktası üzerinden elde edilen gerilme-gerinim değerleri grafik haline getirilmiştir

(Şekil 3.4). Gerilme gerinim grafiği, sonlu elemanlar modelinde kullanılan bilineer malzeme davranışıyla örtüştüğü için seçilen eleman boyutunun uygun olduğu anlaşılır.



Şekil 3.4 Y25 boji gövdesinin L1 yük durumundaki gerilme-gerinim grafiği.

Alçak zeminli boji tasarımı da istisnai yükleme analizine tabi tutularak sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 3.9)(Şekil E2.16-24).

Çizelge 3.9 Alçak zeminli boji gövdesinin istisnai yük analizi ile hesaplanan maksimum von Mises gerilme değerleri.

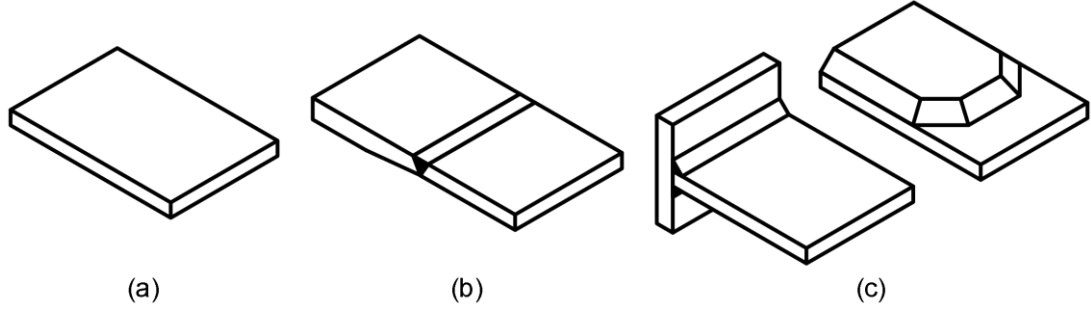
Yükleme Durumu	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
von Mises [MPa]	391	286	291	304	305	319	320	277	276	258

Yapı üzerinde herhangi bir plastik deformasyon gözlenmediği için alt model hazırlanmamıştır (Çizelge 3.7).

### 3.4.2 Normal yük analizleri

Normal yükleme analizleri yapı üzerine etkiyen tekrarlı yüklerin etkisini kapsamaktadır. Yorulma hesabında orantısız olmayan yükleme durumu göz önüne alınmıştır. Maksimum asal gerilmelerdeki değişimin yorulmaya neden olacağı varsayılmış ve ortalama gerilmenin etkisini dahil etmek için Goodman düzeltmesi uygulanmıştır. Buna göre Y25 tipi boji ile alçak zeminli bojinin yorulma dayanım özellikleri eşdeğer gerilme genliklerinin hesaplanmasıyla ortaya konmuştur (Çizelge 3.10 ve 3.11). Gerilme konsantrasyon bölgeleri çentik durumlarına göre

sınıflandırılmıştır. A çentik durumu ana metali, B çentik durumu eğimli alın kaynağını, D çentik durumu ise T-kaynağı ile bindirme kaynağını kapsamaktadır (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5** Çentik durumları: (a) A çentiği, ana metal; (b) B çentiği, eğimli alın kaynağı; (c) D çentiği, T-kaynağı ve bindirme kaynağı (Anonim, 2013).

LF2 ile LF3 durumları düz bir yoldaki yol düzensizliklerinden kaynaklanan zıplama hareketinin neden olduğu yorulma etkisini gösterir. LF4 ile LF6 durumları yatay kurplardaki zıplama hareketinin etkisini gösterir. LF4 ile LF7 ise yatay kurp yönü ile yanal kuvvet yönünün değiştiği, yorulma anlamında yapıyı en çok zorlayan durumlardan birini gösterir. LF5 ile LF7 durumu, LF4 ile LF6 durumundaki yatay kurp yönünün tersi durumuna karşı gelir. Diğer yükleme durumları burulma etkisinin süperpoze edildiği durumlardır. +y ve -y ile burulma yönü tarif edilmektedir (Şekil 3.3).

**Çizelge 3.10** Y25 boji gövdesinin yorulma analizi ile hesaplanan eşdeğer gerilme genlikleri.

Çentik Durumları → Yükleme Durumları ↓	A [MPa]	B [MPa]	D [MPa]
LF2 – LF3	87	21	51
LF4 – LF6	89	25	50
LF4 – LF7	229	85	151
LF5 – LF7	68	25	50
LF4 & burulma+y – LF4 & burulma-y	73	2	30
LF6 & burulma+y – LF6 & burulma-y	61	2	26
LF4 & burulma+y – LF6 & burulma+y	87	25	52
LF4 & burulma+y – LF6 & burulma-y	115	21	63
LF4 & burulma+y – LF7 & burulma+y	229	85	151
LF4 & burulma+y – LF7 & burulma-y	229	84	151
Kayma	117	55	120
<b>Dayanım limiti, <math>\sigma_a</math> (Anonim, 2013)</b>	<b>82</b>	<b>45</b>	<b>33</b>

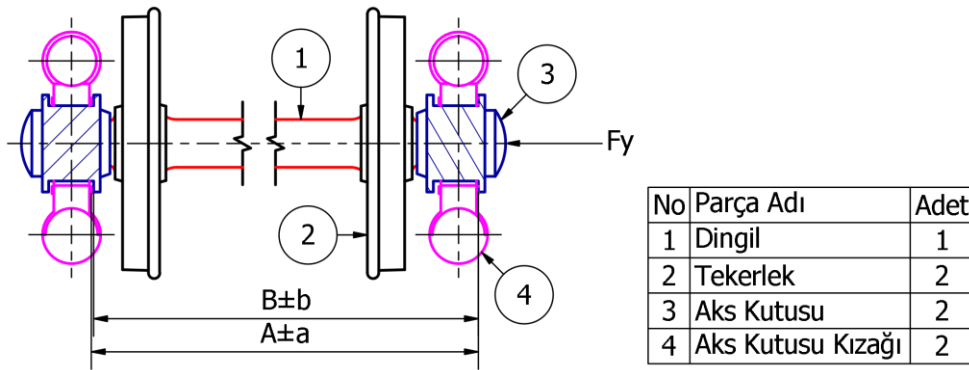
**Çizelge 3.11** Alçak zeminli boji gövdesinin yorulma analizi ile hesaplanan eşdeğer gerilme genlikleri.

Çentik Durumları → Yükleme Durumları ↓	A [MPa]	B [MPa]	D [MPa]
LF2 – LF3	64	26	43
LF4 – LF6	57	22	42
LF4 – LF7	108	32	77
LF5 – LF7	55	22	40
LF4 & burulma+y – LF4 & burulma-y	26	5	21
LF6 & burulma+y – LF6 & burulma-y	34	7	28
LF4 & burulma+y – LF6 & burulma+y	58	22	44
LF4 & burulma+y – LF6 & burulma-y	62	24	50
LF4 & burulma+y – LF7 & burulma+y	107	33	79
LF4 & burulma+y – LF7 & burulma-y	112	34	87
Kayma	45	31	27
<b>Dayanım limiti, <math>\sigma_a</math> (Anonim, 2013)</b>	<b>159</b>	<b>45</b>	<b>33</b>

Çizelge 3.10 ve 3.11’de yer alan yüklem durumlarına ait FEM analiz sonuçlarının görüntüleri EK-2 ile verilmiştir (Şekil E2.25-46).

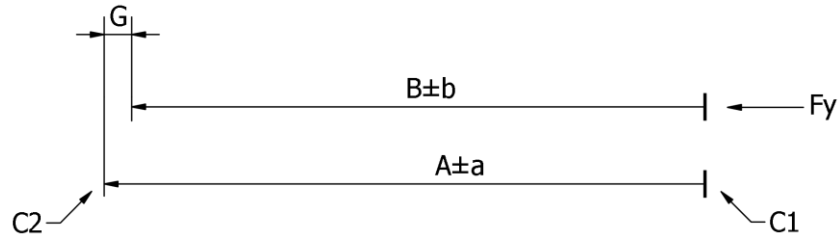
### 3.4.3 Tolerans yığılmasının etkisi

Tekerlek seti ile boji şasisi monte edildiğinde bir miktar yanal boşluk kalması gerekmektedir. Boşluğun değeri ise şasi ile tekerlek setinin ölçü toleransları dahilinde değişkenlik göstermektedir. Tekerlek setine yanal bir kuvvet etkiğinde H-tipi şasinin iki yan kirişine de aynı anda temas durumu sağlanamamakta, bu nedenle temas durumuna ve yapının rijitliğine göre kollardan birine daha fazla kuvvet etkimektedir. Montaj durumu Şekil 3.6 ile verilmiştir.



**Şekil 3.6** Tekerlek seti – boji montajı gösterimi.

Şekil 3.6 incelendiğinde  $A \pm a$  ölçüsünün, aks kutusu kılavuzları arasındaki montaj ölçüsü ile kılavuzun genişlik ölçüsünden türetildiği görülür.  $B \pm b$  ölçüsü ise aks ile aks kutusuna ait parçaların ölçülerinden türetilmiştir. Tolerans diyagramı Şekil 3.7’de yer almaktadır.



**Şekil 3.7** Tekerlek seti – boji montajı için tolerans yığılma diyagramı.

Tolerans diyagramı incelendiğinde, meydana gelen boşluk ölçüsünün  $G$  ile simgelandiği görülür.  $A$  ölçüsü boji gövdesine,  $B$  ölçüsü ise tekerlek setine ait bir ölçüdür.  $F_y$  ise tekerlek setine etkiyen yanal kuvveti temsil etmektedir.  $G$  boşluğunun pozitif durumunda temas,  $C1$  noktasında başlar ve boşluk kapanana kadar  $C2$  noktası temasa geçmez. Yani, boşluk kapandığında  $C2$  noktası temas eder. Negatif durumunda ise öncelikle  $C2$  noktası temas eder, yapı deformasyona uğradıktan sonra  $C1$  noktası temasa geçer.

Nominal ölçülere göre hesaplanan boşluk değeri,  $0.7 \text{ mm}$ 'dir. Birikimli tolerans analizlerine göre hesaplanan tolerans değeri nominal değerine üzerine ilave edilmiştir (Çizelge 3.12).

**Çizelge 3.12** Tolerans yığılması analiz sonuçları.

Yöntem	Boşluk miktarı
En kötü durum analizi	$0.7 \pm 4.3 \text{ mm}$
RSS yöntemi	$0.7 \pm 1.7 \text{ mm}$

Sonlu elemanlar yöntemi ile H-tipi bojinin yan kirişlerinin yanal yöndeki rijitlik değeri hesaplanmıştır. Kuvvet uygulama noktası aks kutusu kılavuzunun aşınma plakasıdır. Yanal rijitlik değeri Y25 tipi boji gövdesi için yaklaşık olarak  $12500 \text{ N/mm}$ 'dir. Aynı şekilde alçak zeminli bojinin yan kirişlerinin yanal yöndeki rijitlik değeri ise yaklaşık olarak  $46300 \text{ N/mm}$ 'dir.

Tolerans yığılmasının yorulma üzerindeki etkisi Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14 ile özetlenmiştir. Çizelge satırları iki farklı yükleme durumunun neden olduğu orantısız olmayan değişken yükleri temsil etmektedir. Temas durumları,  $C1$  ve  $C2$  ile; montaj açıklığı değerleri ise  $G$  ile simgelenmiştir. Sütunlar, çentik durumu ile düğüm numaralarına göre adlandırılmıştır. Karşı gelen değerler, maksimum asal gerilmeye göre hesaplanan eşdeğer gerilme genliğidir. FEM analiz sonuçlarına ait görseller EK-2 ile verilmiştir (Şekil E2.47-59).

**Çizelge 3.13** Y25 tipi boji için tolerans yığılmasının eşdeğer gerilme genliğine etkisi.

	Çentik Durumları							
	A					B	D	
Düğüm Numaraları → Yükleme Durumları ↓	28773 [MPa]	26683 [MPa]	41652 [MPa]	26596 [MPa]	57276 [MPa]	32583 [MPa]	60645 [MPa]	57362 [MPa]
LF4 – LF6, G: 0 mm	49	32	44	50	10	22	3	7
LF4 – LF7, G: 0 mm	229	161	167	163	95	91	125	99
LF4 – LF6, G:5 mm, C1	27	32	68	72	10	27	4	9
LF4 – LF7, G:5 mm, C1	186	128	219	260	119	106	169	100
LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2	291	42	33	39	10	21	3	7
LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2	436	312	150	151	114	82	123	115
LF4 – LF6, G:2.4 mm, C1	31	32	58	63	10	26	3	8
LF4 – LF7, G:2.4 mm, C1	186	128	198	188	110	101	152	95
LF4 – LF6, G:1 mm, C2	65	32	40	46	10	21	3	7
LF4 – LF7, G:1 mm, C2	264	187	162	159	97	88	124	100
<b>Dayanım limiti, <math>\sigma_a</math></b> (Anonim, 2013)	<b>82</b>	<b>82</b>	<b>82</b>	<b>82</b>	<b>82</b>	<b>45</b>	<b>33</b>	<b>33</b>

**Çizelge 3.14** Alçak zeminli boji için tolerans yığılmasının eşdeğer gerilme genliğine etkisi.

Çentik Durumları → Yükleme Durumları ↓	A [MPa]	B [MPa]	D [MPa]
LF4 – LF6, G: 0 mm	57	22	42
LF4 – LF7, G: 0 mm	108	32	77
LF4 – LF6, G:5 mm, C1	58	23	46
LF4 – LF7, G:5 mm, C1	108	33	92
LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2	59	23	46
LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2	108	33	87
<b>Dayanım limiti, <math>\sigma_a</math></b> (Anonim, 2013)	<b>159</b>	<b>45</b>	<b>33</b>

## 4. TARTIŞMA ve SONUÇ

### 4.1 Y25 Tipi Boji Gövdesinin Değerlendirilmesi

İstisnai yükleme durumuna göre aks kutusu kılavuzunun kaynak bölgelerinin bir kısmı, sensör yuvasının kaynak bölgesi ile yan kirişlerin alt kısımlarındaki T birleştirme bölgelerinde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bilineer malzeme modeli kullanılarak yapılan analizlerde, alt modelleme tekniği kullanılmış, malzemenin kopma sınırını aşmadığı görülmüştür (Çizelge 3.5 ve 3.8). Yapının fonksiyonelliğini yitirmesine neden olabilecek düzeyde kalıcı şekil değişimleri oluşmamış, lokal plastik deformasyonlar ortaya çıkmıştır. Aks kutusu kılavuzu ile sensör yuvasının olduğu bölgelere basma kuvvetleri etkimekte, yorulma ömrüne pozitif katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Yan kiriş alt kısmındaki T birleştirme bölgesine iki yönde de yanal kuvvet etkimekte, meydana gelen lokal plastik deformasyonun yol açacağı olası kalıntı gerilmelerin yorulma ömrünü daha düşük seviyelere indireceği düşünülmektedir. Dižo vd.'nin (2017) Y25 tipi boji gövdesinin statik dayanımıyla ilgili yaptıkları çalışmaya göre boji üzerinde 460 MPa değerinde gerilme meydana gelmektedir. Bu gerilme lineer elastik malzeme modelinin kullanılmasıyla elde edilmiş ve kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir. Bu yönüyle elde edilen sonuçlar birbirini desteklemektedir (Şekil E2.1-15).

Normal yükleme analizinde yapının yorulmaya en çok zorlanan kısımları belirlenerek karşı gelen eşdeğer gerilme genlikleri hesaplanmıştır. Buna göre, düz yoldaki zıplama hareketi ile yatay kurplardaki zıplama hareketinin hemen hemen aynı gerilme genliği değerlerine neden olduğu görülmüştür (Çizelge 3.10). En çok zorlanma yatay kurp yönünün değişimine denk düşen LF4 – LF7 durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda en çok zorlanan kısım yan kirişlerin alt saclarıdır. Burulma hareketi ise yapıyı fazladan zorlamakta, en çok orta kirişin yan saclarındaki delik kenarlarını etkilemektedir. Standartlarda her 10 ila 20 zıplama hareketi sonrasında yatay kurp yönünün değiştiği belirtilmektedir (Anonim, 2003). Yola bağlı olan bu özelliğe göre yapının ömrü değişebilmektedir. Bu nedenle ömür hesaplamak yerine öncelikli olarak eşdeğer gerilme genliği hesaplanmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. S355 çeliği için standartlarda yer alan yorulma sınırı “A” çentiği için 82 MPa, “B” çentiği için 45 MPa ve “D” çentiği için 33 MPa değerindeki eşdeğer gerilme genliğidir (Anonim, 2013). Sonuçlara bakıldığında Y25 tipi boji için bu

değerlerin aşıldığı görülmektedir (Çizelge 3.10). Slavchev vd.'nin (2019) Y25 tipi boji üzerine yaptığı çalışmada ise boji üzerindeki bazı noktaların yorulma dayanımı kriterlerini karşılamadığı belirtilmiştir.

Tolerans yığılması temas durumunu olumsuz etkileyerek, yanal kuvvetin yan kirişler üzerinde orantısız paylaşılmasına neden olmuştur. Bu durum nedeniyle özellikle yan kirişlerin fazladan zorlaması beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar bu durumu desteklemektedir (Çizelge 3.13).

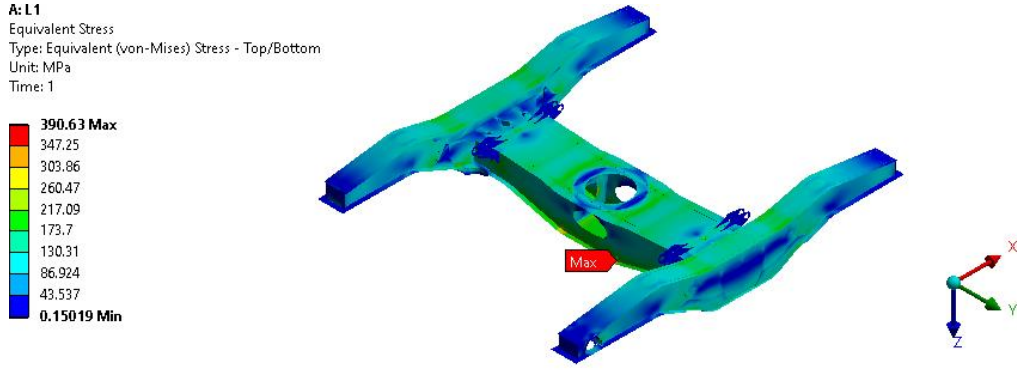
#### **4.2 Alçak Zeminli Boji Gövdesinin Değerlendirilmesi**

Y25 tipi boji şasisindeki plastik deformasyon bölgeleri elimine edildiği için alçak zeminli boji yapısı üzerinde plastik deformasyon meydana gelmemiştir (Çizelge 3.7 ve 3.9). Yüksek dayanımlı RQT701 çeliğinin kullanılması plastik deformasyon riskini düşürmüş, %18 değerindeki kopma uzaması sünek bir yapı sağlamıştır.

Yan kirişlerin kutu profil formunda tasarlanması yanal yöndeki (y) rijitliği artırmıştır (Şekil 3.1 ve 3.2). Tolerans yığılması ve yüksek rijitlik nedeniyle yanal kuvvetin ( $F_y$ ) büyük bir kısmı tek bir yan kiriş üzerine etkiyebilmektedir. Yapı üzerinde artması beklenen gerilme değerleri rijitliğin artması sayesinde düşmüştür. Yorulmaya neden olan gerilme genliği, yanal yöndeki montaj boşluklarına karşı, daha düşük hassasiyetle bağımlı hale gelmiştir (Çizelge 3.14). Ansari'nin (2015) yaptığı çalışmaya göre kutu profil formundaki yapıda I profil formuna kıyasla daha düşük sehim ve gerilme değerleri meydana gelmektedir. Elde edilen sonuçlar birbirini desteklemektedir (Çizelge 3.8 ve 3.9).

#### **4.3 Sonuçlar**

Demiryollarında yaygın olarak kullanılan Y25 tipi bojinin yapısal dayanım özellikleri ortaya konulmuştur. I profil formundaki yan kirişler yorulma dayanımı bakımından yatay kurp yönünün değişimine karşı hassastır (Çizelge 3.13). Yan kirişlerin alt kısımları ile orta kirişin yan saclarındaki delik kenarları diğer kısımlara nazaran daha düşük yorulma dayanımına sahiptir. Tasarımın optimize edilmesi ile bu sorunların üstesinden gelinmesi mümkündür. Örneğin, aks kutusu kılavuzlarının şasi ile birleşim yerlerindeki kaynak metali üzerine düşen plastik deformasyon bölgeleri yan kirişlerin uç kısımlarının değiştirilmesi ile elimine edilebilmektedir (Şekil 4.1) (EK-2).



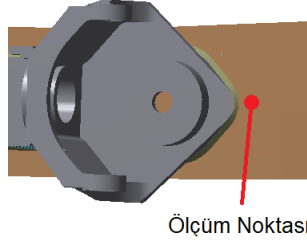
**Şekil 4.1** Alçak zeminli boji gövdesinin L1 yük durumundaki gerilme dağılımı.

Tekerlek seti ile boji gövdesi arasındaki yanıl boşluk toleransları Y25 tipi boji gövdesinin daha fazla zorlanmasına neden olmaktadır (Çizelge 3.13). Üretim ve bakım sırasında rulman burçlarının işlenmesiyle ya da tasarımda çift lenoir link yapısının tercih edilmesiyle bu sorunun üstesinden gelmek mümkün olabilecektir.

Yan kirişleri kutu profil formunda tasarlanmış alçak zeminli boji gövdesi yanıl kuvvetler ile boylamasına kuvvet çiftine karşı daha yüksek dayanım özelliği göstermektedir (Çizelge 3.10 ve 3.11). Aynı sebeplerle yapısal dayanım anlamında montaj boşluklarına karşı hassasiyeti daha düşüktür (Çizelge 3.13 ve 3.14).

Konsept olarak tasarlanan alçak zeminli boji gövdesi için yüksek dayanımlı çelik seçilmiş (Iwnicki vd., 2015; url-4, 2019), HFMI yönteminin uygulandığı varsayılmıştır (Marquis, 2013; Fartan ve Ulianov, 2018). Bahsedilen yöntemin yorulma dayanımını iyileştirmesi, nihayetinde daha hafif bir yapı sağlayacaktır. Deneysel doğrulama ve daha optimize tasarımlar sayesinde daha da hafifletilmiş tasarımların mümkün olabileceği anlaşılmıştır.

FAT180 ile FAT200 sınıflarının kullanılması ve TS EN 13749 ile önerilen çevrim sayılarının uygulanması neticesinde, kümülatif hasar miktarı, 0.72 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle alçak zeminli boji gövdesi tasarımının güvenli olduğu söylenebilmektedir. Hasar miktarının hesaplandığı nokta yan kiriş ile aks kutusu kılavuzunun birleşim bölgesinde yer almaktadır (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2** Kümülatif hasar miktarı hesabında referans alınan nokta.



## KAYNAKLAR

- Anonim** (1988). UIC Leaflet 840-2: Technical specification for the supply of steel castings for tractive and trailing stock (3rd ed.). *International Union of Railways*, Paris.
- Anonim** (1989). UIC Leaflet 510-3: Wagons Strength test on the test rig with 2-axle bogies (1st ed.). *International Union of Railways*, Paris.
- Anonim** (2000). UIC Leaflet 500: Standardisation of transport stock and components - Principles, procedures, results (2nd ed.). *International Union of Railways*, Paris.
- Anonim** (2003). UIC Leaflet 615-4: Motive power units – Bogies and running gears -Bogie frame structure strength tests (2nd ed.). *International Union of Railways*, Paris.
- Anonim** (2005). EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures – Part1-9: Fatigue. *European Committee for standardization (CEN)*.
- Anonim** (2006). TS EN 10025-2: Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri - Bölüm 2: Alaşımız yapı çeliklerinin genel teknik teslim şartları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Anonim** (2011). TS EN 13749: Demiryolu uygulamaları - Tekerlek takımları ve bojiler - Boji şaselerinin yapısal şartları belirleme metotları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Anonim** (2012). TS EN 15827-2011. Demiryolu uygulamaları-Bojiler ve dişliler için gerekler. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Anonim** (2013). TS EN 12663-2: Demiryolu uygulamaları - Demiryolu taşıt gövdelerinin yapısal gerekleri - Bölüm 2: Yük vagonları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Ansari, A. K. S.** (2015). Optimization of bogie frame in Indian railway. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(31).
- Bang, J.S. & Han, S.H. & Lee, J.K. & Park, S.W.** (2006). An automation of fatigue durability analysis for welded bogie frame using system integration techniques. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, pp. 349-354.
- Bharadwaj, C. K. V. B. D.** (2017). Stress analysis of bogie frame structure. *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology* (Master's Degree Thesis), 67p, Karlskrona.
- Chen, D.** (2019). Strength evaluation of a bogie frame by different methods. *Mechanical Engineering Science (2019) 1(1)*, pp. 71-85.
- Dižo, J. & Harušinec, J. & Blatnickýn, M.** (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences 134*, 00010.
- Esderts, A. & Willen, J. & Kassner, M.** (2012) Fatigue strength analysis of welded joints in closed steel sections in rail vehicles. *International Journal of Fatigue*, 34(1), pp. 112-121.
- Fartan, M. & Ulianov, C.** (2018). Innovative monitoring and predictive maintenance solutions on lightweight wagon – Deliverable D3.1: Freight vehicle lightweight concept design (Research Report). *INNOWAG Consortium*, p89.
- Făinuș, L. & Zaharia, N. L. & Tudose, D.I. & Hadar, A.** (2016). Experimental and numerical analyses of the stress state in the bolster of the Y25 Cs bogie around the side bearers. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 78(3). 107-118.

- Hobbcher, A.F.** (2016). Recommendations for fatigue design of welded joints and components (2nd ed.). *Springer*, 143p, Switzerland.
- Itoh, T. & Sakane, M. & Morishita, T.** (2015). Evaluation and visualization of multiaxial stress and strain states under non-proportional loading. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 9. 289-301.
- Iwnicki, S. & Orlova, A. & Keschwari, M. & Cosic, A. & Jönsson, P. A. & Stichel, S. & Hermann T. & Ulianov, C. & Hyde, P. & Bezin, Y. & Shackleton, P. & Bruni, S. & Peroni B. & Cervello, S. & Tumanishvilli, G. & Fughini, C. & Zangani, D. & Wheat, P. & Nellthorp, J. & Beagles, A.** (2015). D3.7 “A design guide for sustainable freight vehicles”. *SUSTRAIL*, p. 56.
- Kassner, M.** (2011). Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods. *International Journal of Fatigue* (2012), 34, pp.103–111.
- Kazymyrovych, V.** (2009). Very high cycle fatigue of engineering materials – A literature review (Research Report). *Karlstad University Studies*, 2009:22, 33p, Karlstad.
- Kim, J. S.** (2006). Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: Analysis and static tests. *Engineering Failure Analysis*, 13(8), pp. 1326-1337.
- Kim, J. S. & Yoon, H. J.** (2011). Structural behaviors of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains under critical load conditions. *Procedia Engineering* (2011), 10, pp. 2375-2380.
- Konez, O. & Metin, M. & Demir, Ö.** (2019a). Y32 bojisinin yapısal analizleri, Bölüm 1: Statik analizler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, s. 366-387.
- Konez, O. & Metin, M. & Demir, Ö.** (2019b). Y32 bojisinin yapısal analizleri, Bölüm 2: Yorulma analizleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, s. 395-411.
- Liliana, R. A. & Florin B. & Nicolae, I. & Costica, A.** (2015). Stresses in a bogie frame of a rail carriage. *Procedia Engineering*, 100, 482-487.
- Lu, Y. & Zeng, J. & Wu, P. & Yang, F. & Guan, Q.** (2009). Reliability and parametric sensitivity analysis of railway vehicle bogie frame based on Monte-Carlo numerical simulation. *High Performance Computing and Applications: Second International Conference, HPCA 2009*, pp. 280-287.
- Mancini, G. & Cera, A.** (2006). Design of railway bogies in compliance with new EN 13749 european standard. *7th World Congress on Railway Research*, T2.2.2.2.
- Marquis, G.B. & Mikkoa, E. & Yildirim, H. C. & Barsoum, Z.** (2013). Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed assesment guidelines. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*, 57(6).
- Niemi, E. & Fricke, W & Maddox, J. M.** (2018). Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components (2nd ed.). *Springer*, 76p, Singapore.
- Olesen, R. K. & Poulsen, M. G.** (2018). Non-linear assessment of non full-strength welded joints. *Aalborg Universitet The Faculty of Engineering and Science, Department of Materials & Production* (Master’s Thesis), p135, Aalborg.
- Özsoy, M. & Pehlivan, K. & Firat, M. & Özsoy, N. & Uçar, V.** (2015). Structural strength and fatigue life calculation of Y32 bogie frame by finite element method. *Acta Physica Polonica A*, 128(2-B), 327-329.

- Papuga, J. & Vargas, M. & and Hronek, M.** (2012). Evaluation of uniaxial fatigue criteria applied to multiaxially loaded unnotched samples. *Engineering Mechanics*, 19(2/3), 99-111.
- Qi, A. & Zhao, H. & Li, P. & Fu, M.** (2019). Fatigue strength analysis of bogie frames under random loads. *Advances in Mechanical Engineering 2019*, 11(9), pp. 1–13.
- Shukla, S. & Kumar, U. & Kumar, S. & Gupta, P. & Kumar, A. & Kumar, S.** (2015). Weight reduction, modal analysis and testing of an indian railway light weight bogie bolster. *IJEDR* 3(2), pp. 737-747.
- Slavchev, S. & Maznichki, V. & Stoilov, V. & Purgic, S.** (2017). Comparative analysis of the results from static strength calculations and strength tests of an Y25Ls-K bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 133, 03004.
- Slavchev, S. & Maznichki, V. & Stoilov, V. & Enev, S. & Purgic, S.** (2019). Comparative analysis of the fatigue strength of an Y25Ls-K bogie frame by methods of UIC and DVS 1612. *Machine Design*, 11, 1-4.
- url-1** <<https://arvintabriz.com>>, alındığı tarih: 01.08.2019
- url-2** <<https://www.greenbrier-europe.com>>, alındığı tarih: 01.08.2019
- url-3** <<http://www.tudem.sas.gov.tr>>, alındığı tarih: 01.08.2019
- url-4** <<https://www.brownmac.com/en/products/quenched-tempered-steel/rqt-701-quenched-tempered-steel-plate>>, alındığı tarih: 15.11.2019.
- Wang, Q. & Khan, M. K. & Bathias, C.** (2012). Current understanding of ultra-high cycle fatigue. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, 2(3), Article 031002.
- Yaseen, S. & Wani, T.** (2014). Design and analysis of a railway bogie truck. *IJIMIINDS (2014)*, 1(6), pp. 13-19.



**EK-1**

**YÜKLEME KOMBİNASYONLARI TABLOLARI**

İstisnai ve normal yükleme kombinasyonlarında hesaplanacak büyüklüklerin denklem numaraları ile eşleştirilebilmesi açısından Çizelge E1.1 ve Çizelge E1.2 ile sunulmuştur.

**Çizelge E1.1** İstisnai yükleme kombinasyonları için denklem numaraları.

	Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]	Yol Burulması	Boylamasına Kuvvet Çifti [kN]	Çarpma [m/s <sup>2</sup> ]	Fren [kN]	Fren [kN]
	<b>F<sub>z2</sub></b>	<b>F<sub>zp</sub></b>	<b>F<sub>z1</sub></b>	<b>F<sub>y</sub></b>	<b>g<sup>+</sup></b>	<b>F<sub>x</sub></b>		<b>F<sub>bn</sub></b>	<b>F<sub>bt</sub></b>
<b>L1</b>		F <sub>zp</sub> [3.1]							
<b>L2</b>	F <sub>z1</sub> [3.3]	F <sub>zp</sub> [3.2]			%1				
<b>L3</b>		F <sub>zp</sub> [3.2]	F <sub>z1</sub> [3.3]		%1				
<b>L4</b>	F <sub>z1</sub> [3.3]	F <sub>zp</sub> [3.2]		F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> [3.4]					
<b>L5</b>		F <sub>zp</sub> [3.2]	F <sub>z1</sub> [3.3]	-(F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> ) [3.4]					
<b>L6</b>		1.5F <sub>z</sub>				F <sub>x</sub> [3.5]			
<b>L7</b>		1.5F <sub>z</sub>				- F <sub>x</sub> [3.5]			
<b>L8</b>		F <sub>z</sub>					5g		
<b>L9</b>		F <sub>z</sub>					5g		
<b>L10</b>		1.2F <sub>z</sub>						117	27

**Çizelge E1.2** Normal yük kombinasyonları için denklem numaraları.

	Düşey Kuvvetler [kN]			Yanal Kuvvet [kN]
	<b>F<sub>z2</sub></b>	<b>F<sub>zp</sub></b>	<b>F<sub>z1</sub></b>	<b>F<sub>y</sub></b>
<b>LF1</b>		F <sub>zp</sub> [3.6]		
<b>LF2</b>		1.3F <sub>zp</sub> [3.6]		
<b>LF3</b>		0.7F <sub>zp</sub> [3.6]		
<b>LF4</b>		1.3F <sub>zp</sub> [3.8]	1.3F <sub>z1</sub> [3.7]	-(F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> ) [3.9]
<b>LF5</b>	1.3F <sub>z1</sub> [3.7]	1.3F <sub>zp</sub> [3.8]		F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> [3.9]
<b>LF6</b>		0.7F <sub>zp</sub> [3.8]	0.7F <sub>z1</sub> [3.7]	-(F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> ) [3.9]
<b>LF7</b>	0.7F <sub>z1</sub> [3.7]	0.7F <sub>zp</sub> [3.8]		F <sub>y1</sub> +F <sub>y2</sub> [3.9]



**EK-2**  
**FEM ANALİZ GÖRÜNTÜLERİ**

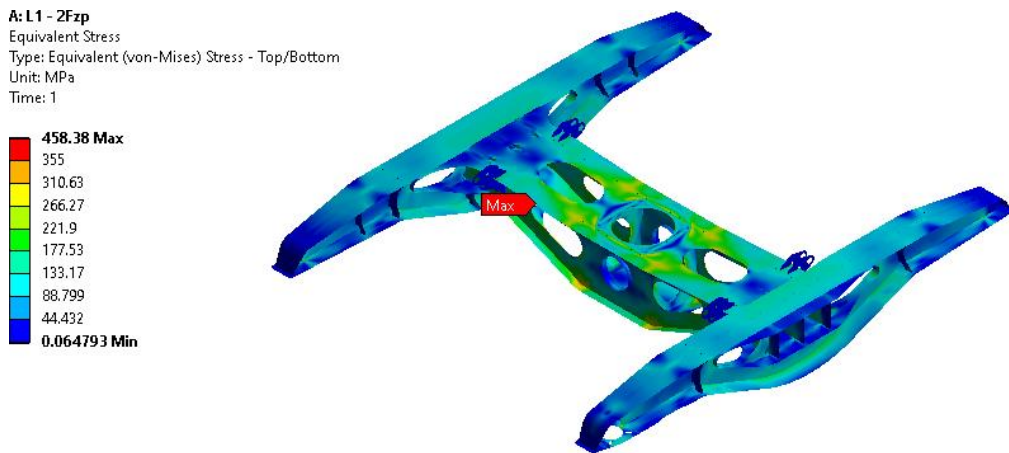
L1 yükleme durumu için Y25 tipi bojinin FEM analiz görüntüsü Şekil E2.1 ve E2.2 ile verilmiştir. Orta kirişteki yan sac üzerinde lokal plastik deformasyon meydana gelmiştir.

L2 ve L3 yükleme durumu için Y25 tipi bojinin FEM analiz görüntüsü, Şekil 2E.3 ve 2E.4 ile verilmiştir. Meydana gelen von Mises gerilmeleri, akma sınırının altında kalmıştır. L2 yükleme durumu uygulandığında maksimum gerilmenin orta kirişteki yan sac üzerinde meydana geldiği görülür. L3 yükleme durumu uygulandığında ise maksimum gerilme değeri orta kirişteki takviye sacının (el freninin bağlandığı) üzerinde ortaya çıkar.

L4 ve L5 yükleme durumu için Y25 tipi bojinin FEM analiz görüntüsü Şekil E2.5, E2.6, E2.7 ve E2.8 ile verilmiştir. von Mises gerilmeleri akma sınırını aşmış ve yan kirişlerdeki alt saclar üzerinde lokal plastik deformasyon meydana gelmiştir.

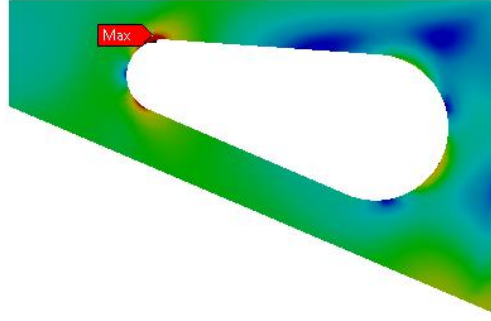
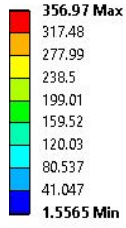
L6 ve L7 yükleme durumu için Y25 tipi bojinin FEM analiz görüntüsü Şekil E2.9, E2.10, E2.11 ve E2.12 ile verilmiştir. von Mises gerilmeleri akma sınırını aşmış ve orta kirişlerdeki yan saclar üzerinde lokal plastik deformasyon meydana gelmiştir.

L8, L9 ve L10 yükleme durumu için Y25 tipi bojinin FEM analiz görüntüsü Şekil 2E.13, 2E.14 ve 2E.15 ile verilmiştir. von Mises gerilmeleri akma sınırının altında kalmıştır. L8 ve L9 yükleme durumu uygulandığında maksimum gerilmenin orta kirişteki üst sac üzerinde meydana geldiği görülür. L10 yükleme durumu uygulandığında ise maksimum gerilme yan kirişteki sensör yuvasında meydana gelmiştir.



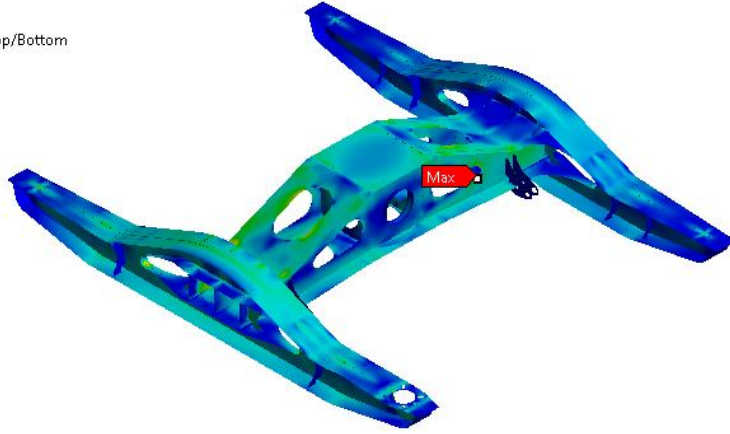
Şekil E2.1 L1 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

Z: L1: Sub  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



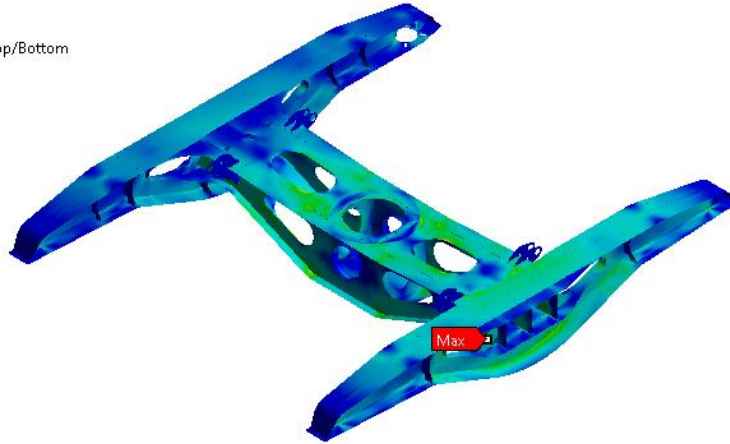
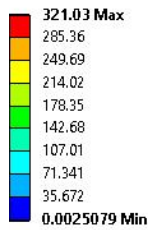
**Şekil E2.2** L1 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.

AA: L2: Fzp + Fz2 + burulma  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



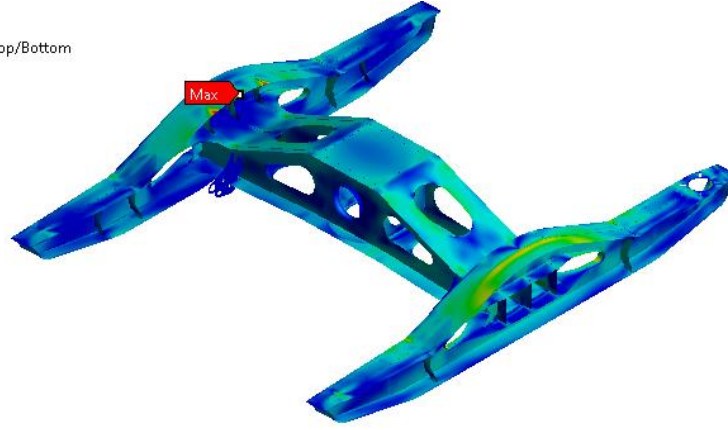
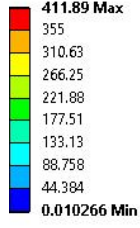
**Şekil E2.3** L2 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

AB: L3: Fzp + Fz1 + burulma  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



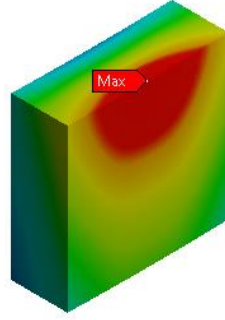
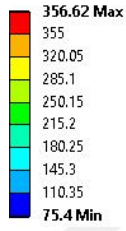
**Şekil E2.4** L3 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

**B: L4: Fzp + Fz2 + Fy**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



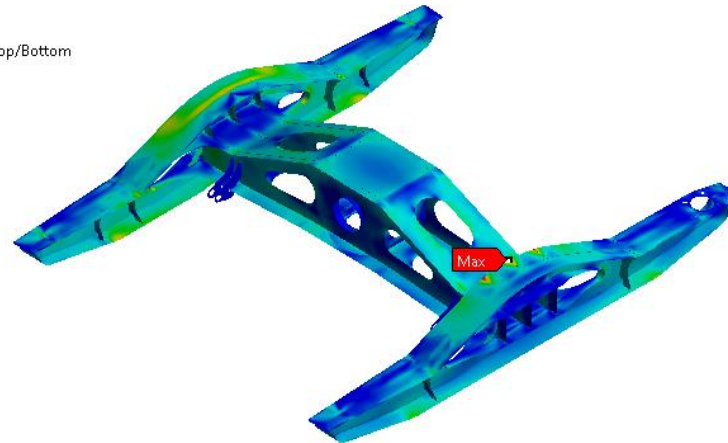
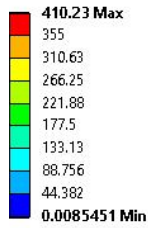
**Şekil E2.5** L4 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

**AL: L4: Sub**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



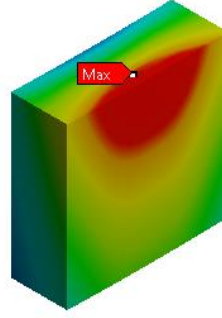
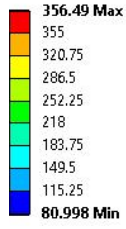
**Şekil E2.6** L4 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.

**C: L5: Fzp + Fz1 + Fy**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



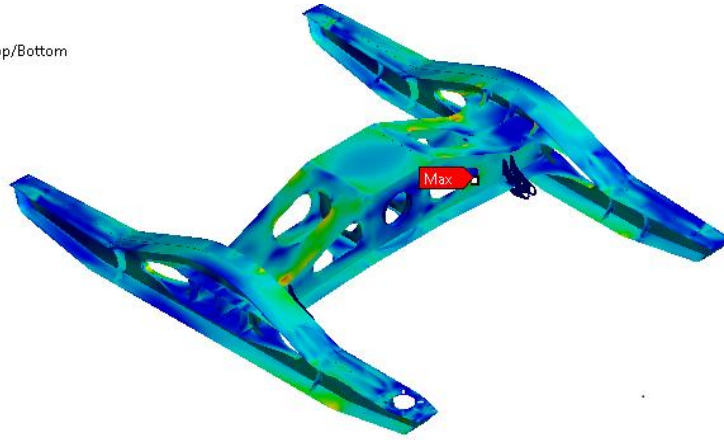
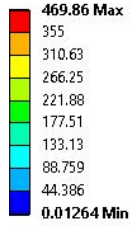
**Şekil E2.7** L5 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

AV: L5: Sub  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



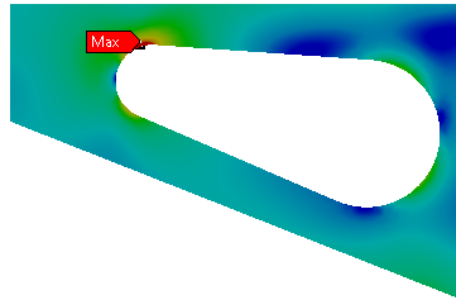
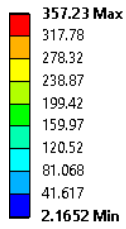
**Şekil E2.8** L5 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.

AV: L6: Fzp + Fx  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



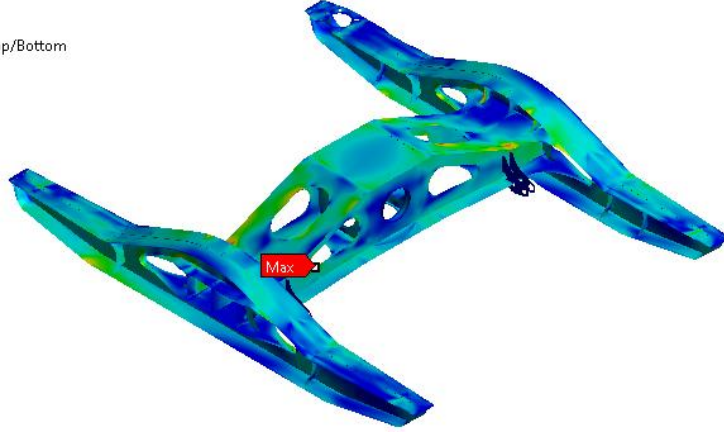
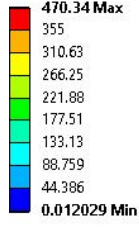
**Şekil E2.9** L6 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

Z: L6: Sub  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



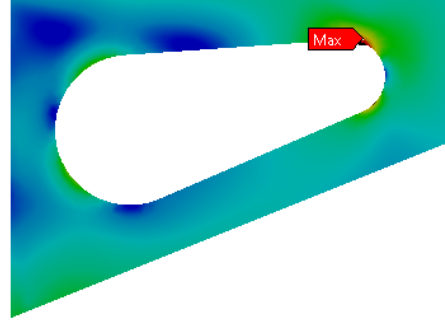
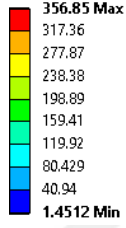
**Şekil E2.10** L6 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.

AZ: L7: Fzp + -Fx  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



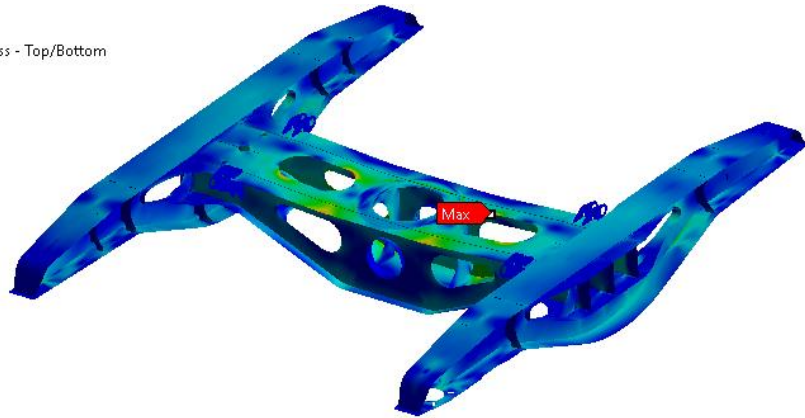
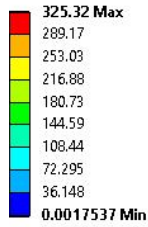
Şekil E2.11 L7 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

AA: L7: Sub  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



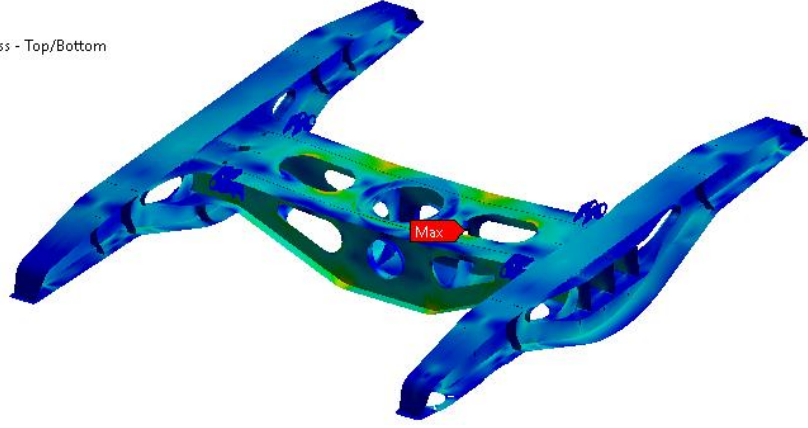
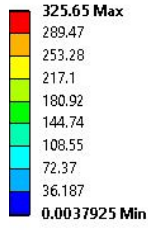
Şekil E2.12 L7 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait lokal modelin bilineer elasto-plastik FEM analiz sonucu.

BC: L8: Fzp + 5g  
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



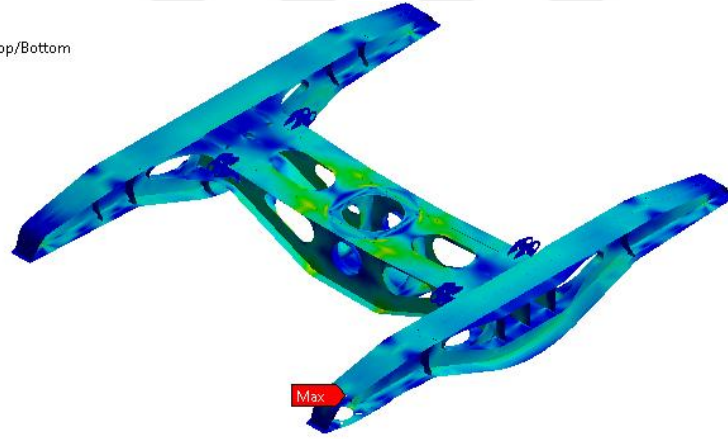
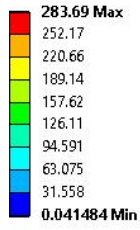
Şekil E2.13 L8 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

BD: L9: Fzp + 5g  
Equivalent Stress 3  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



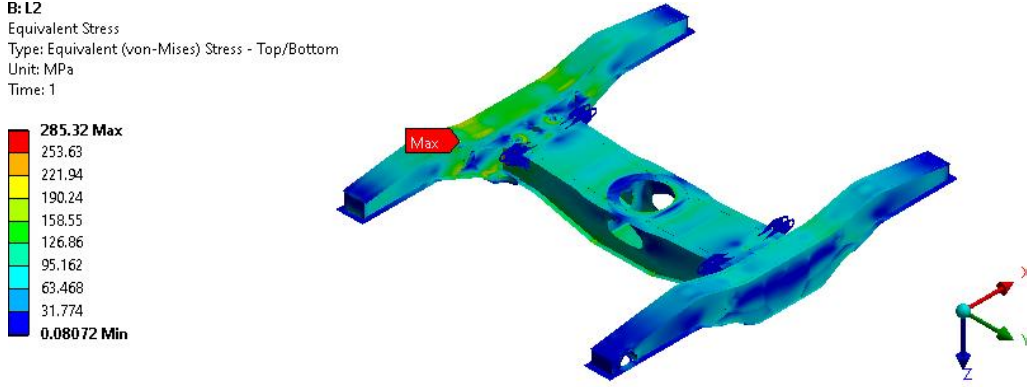
Şekil E2.14 L9 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

BE: L10: Fzp + Fb  
Equivalent Stress 3  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1

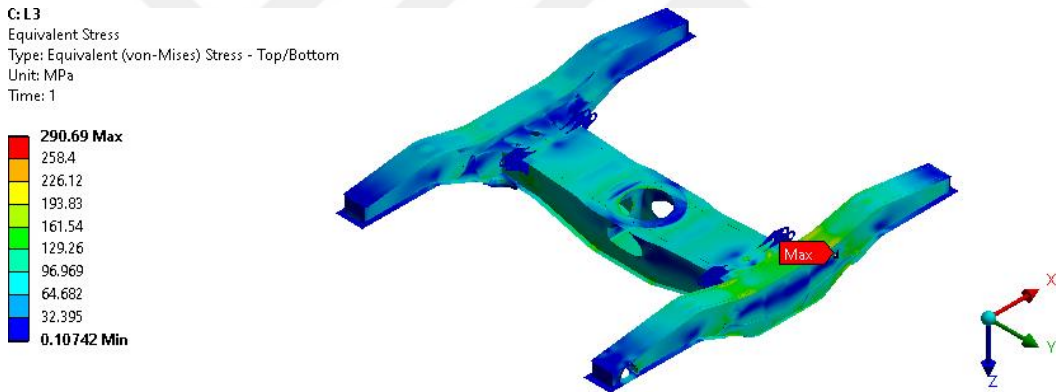


Şekil E2.15 L10 yükleme durumu için Y25 boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

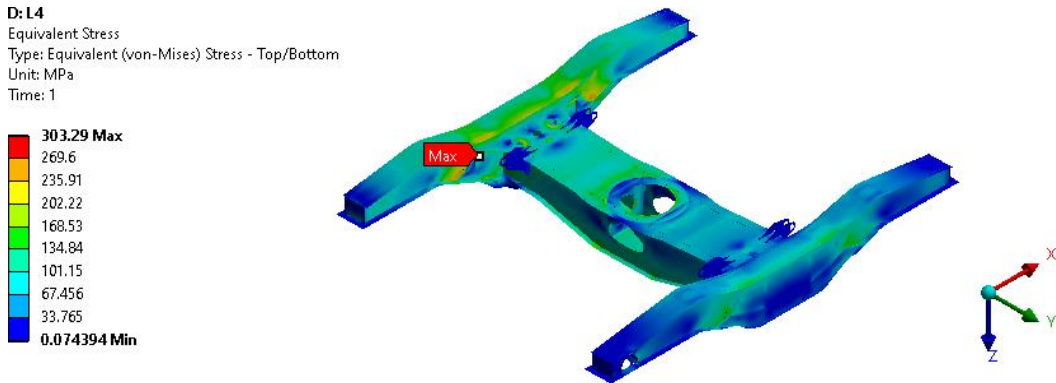
Alçak zeminli boji gövdesinin istisnai yük analiz sonuçları Şekil E2.16-24 ile sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde yapıda plastik deformasyon meydana gelmediği görülür.



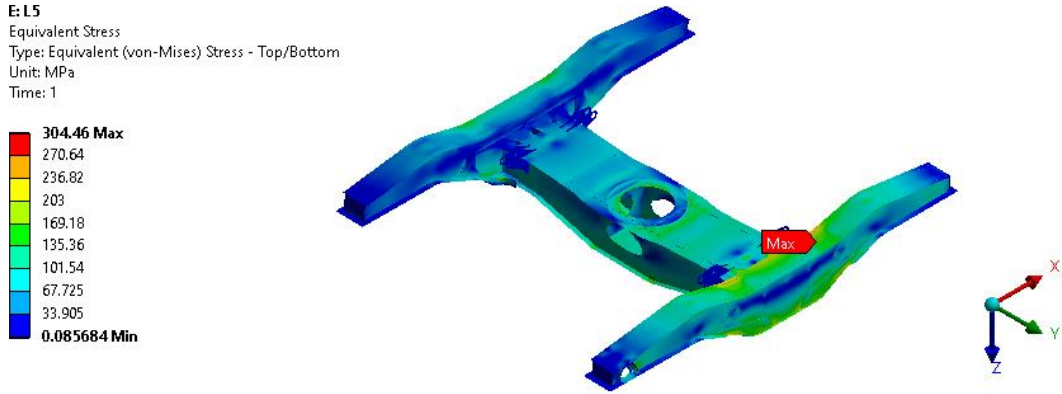
**Şekil E2.16** L2 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.



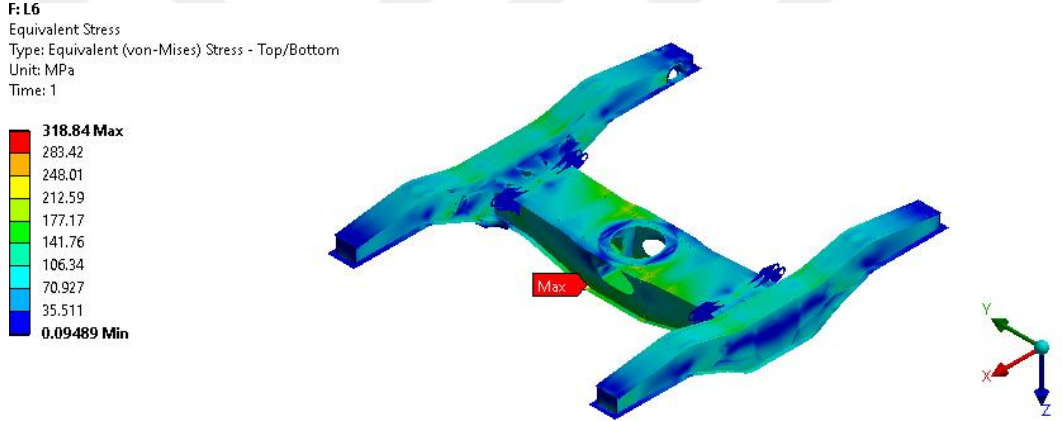
**Şekil E2.17** L3 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.



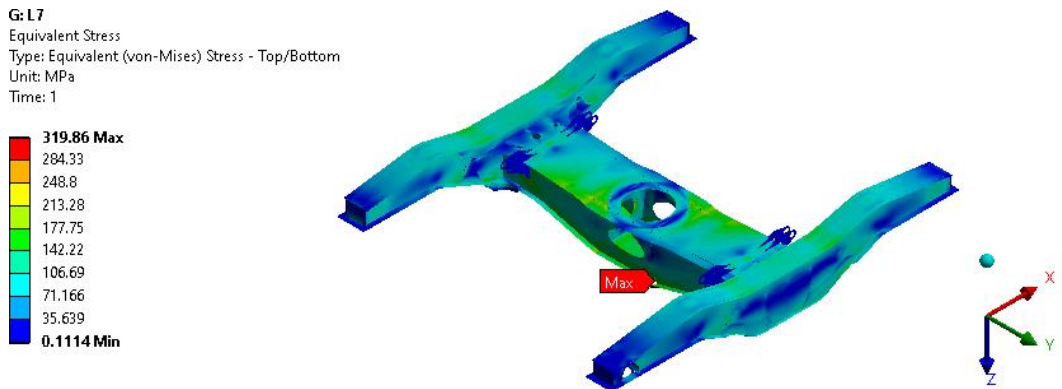
**Şekil E2.18** L4 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.



**Şekil E2.19** L5 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

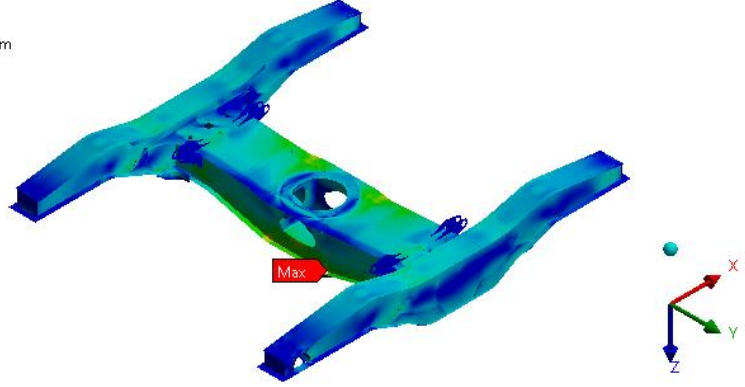
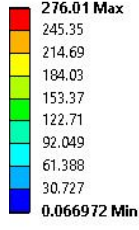


**Şekil E2.20** L6 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.



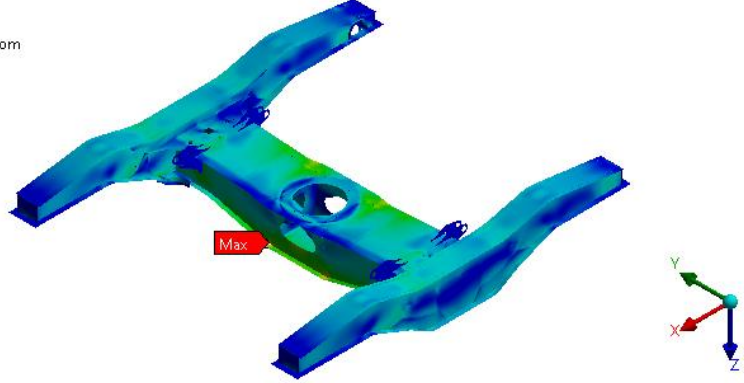
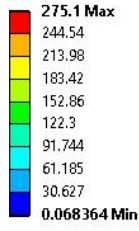
**Şekil E2.21** L7 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

**H: L8**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



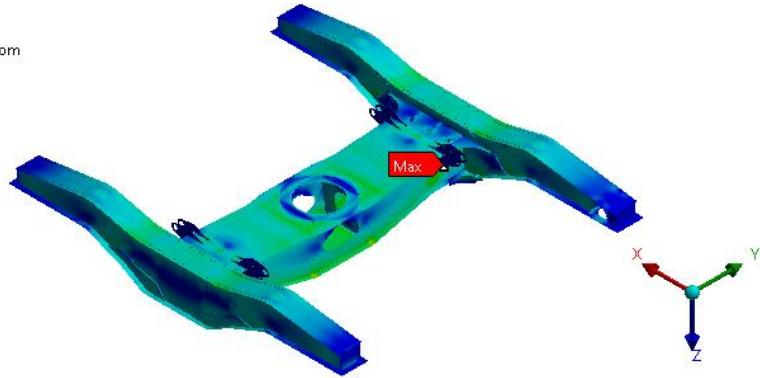
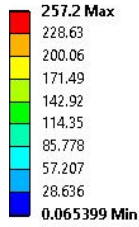
**Şekil E2.22** L8 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

**I: L9**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



**Şekil E2.23** L9 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

**J: L10**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1

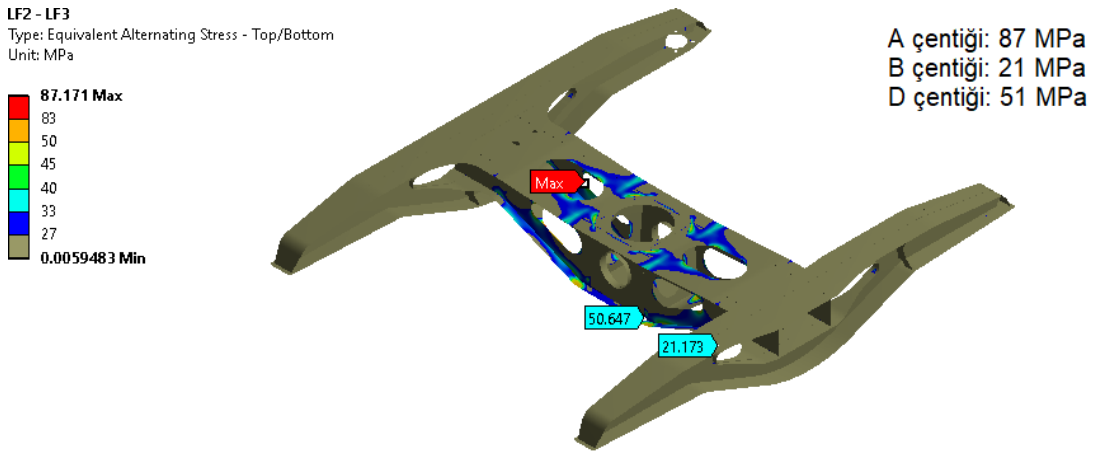


**Şekil E2.24** L10 yükleme durumu için alçak zeminli boji gövdesine ait global modelin lineer elastik FEM analiz sonucu.

Y25 tipi boji gövdesinin analiz ile elde edilen gerilme genliği dağılımlarına bakıldığında en çok zorlanan kısımlar, LF2–LF3 yorulma yükü durumunda (Şekil E2.25) orta kirişin yan saclarındaki delik kenarları, alt sacı ile yan sacının birleşim yerleri ve üst sacı ile yarı küresel mafsalsın birleşim yerleri, LF4–LF6 ve LF5–LF7 yorulma yükü durumlarında (Şekil E2.26 ve E2.28) orta kirişin alt saclarındaki delik kenarları, alt sacı ile yan sacının birleşim yerleri ve yan kirişin orta sacındaki sensör yuvası, LF4–LF7 yorulma yükü durumunda (Şekil E2.26) ise yan kiriş ve özellikle alt sacı üzerinde yer almaktadır.

LF4&burulma+y–LF4&burulma-y ve LF6&burulma+y–LF6&burulma-y yorulma yükü durumları (Şekil E2.29 ve E2.30) yapıyı diğer durumlara nazaran daha az zorlamaktadır.

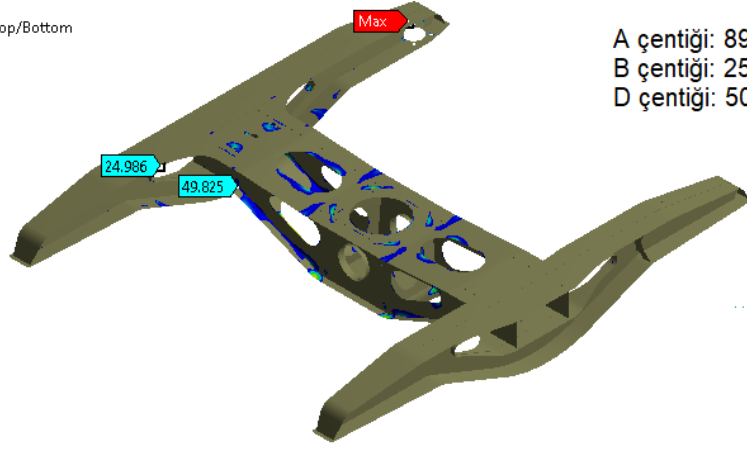
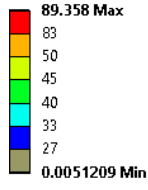
LF4&burulma+y–LF6&burulma+y ve LF4&burulma+y–LF6&burulma-y yorulma yükü durumlarında (Şekil E2.31 ve E2.32) orta kiriş ve özellikle delik kenarları, LF4&burulma+y–LF7&burulma+y ve LF4&burulma+y–LF7&burulma-y yorulma yükü durumlarında (Şekil E2.33 ve E2.34) yan kiriş, özellikle alt sacı ve yan kiriş ile orta kirişin birleşim yerleri, Kayma+Fx–Kayma-Fx yorulma yükü durumunda (Şekil E2.35) ise yan kiriş ve özellikle takviye sacları en çok zorlanan kısımlardır.



**Şekil E2.25** Y25 boji gövdesinin LF2-LF3 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF6

Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa

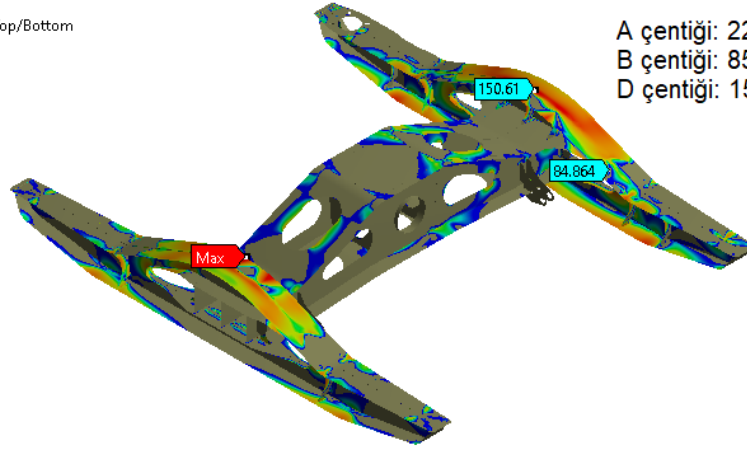
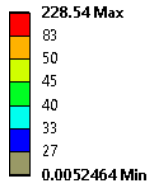


A çentiği: 89 MPa  
B çentiği: 25 MPa  
D çentiği: 50 MPa

Şekil E2.26 Y25 boji gövdesinin LF4-LF6 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7

Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa

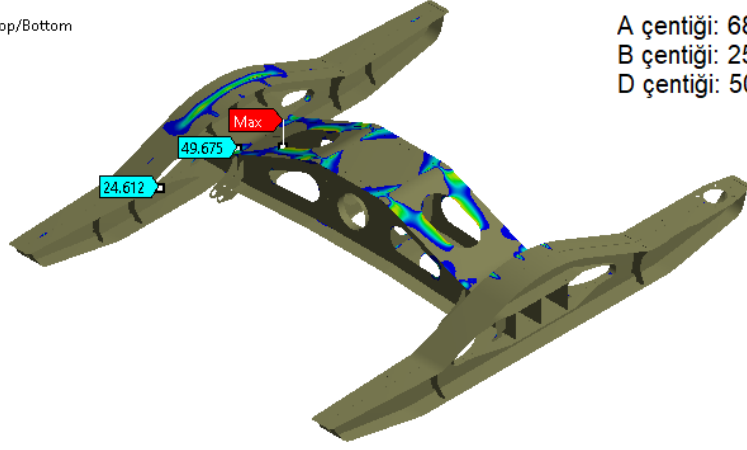
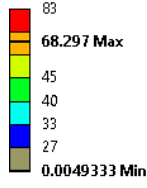


A çentiği: 229 MPa  
B çentiği: 85 MPa  
D çentiği: 151 MPa

Şekil E2.27 Y25 boji gövdesinin LF4-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF5 - LF7

Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa

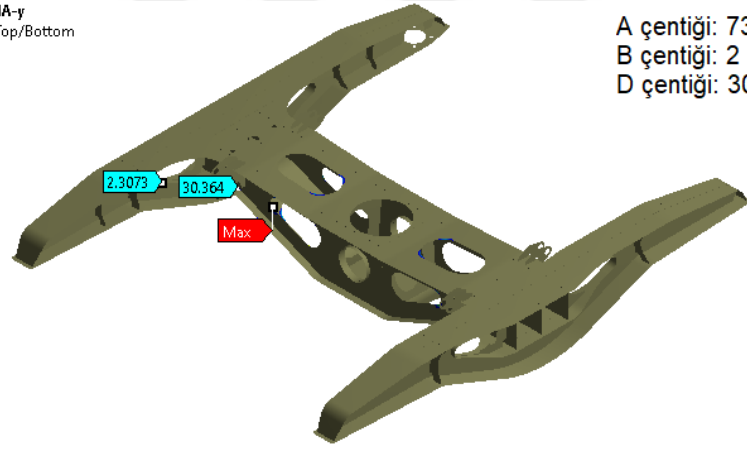
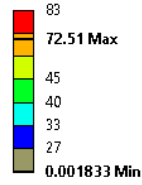


A çentiği: 68 MPa  
B çentiği: 25 MPa  
D çentiği: 50 MPa

**Şekil E2.28** Y25 boji gövdesinin LF5-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4&BURULMA+y - LF4&BURULMA-y

Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa

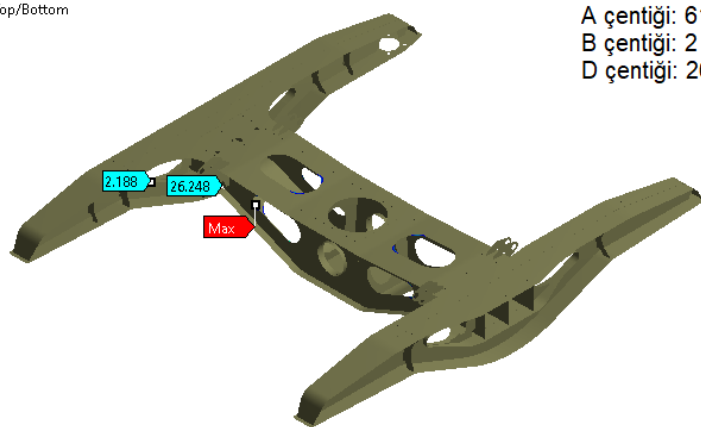
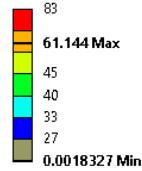


A çentiği: 73 MPa  
B çentiği: 2 MPa  
D çentiği: 30 MPa

**Şekil E2.29** Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF4&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF6&BURULMA+y - LF6&BURULMA-y

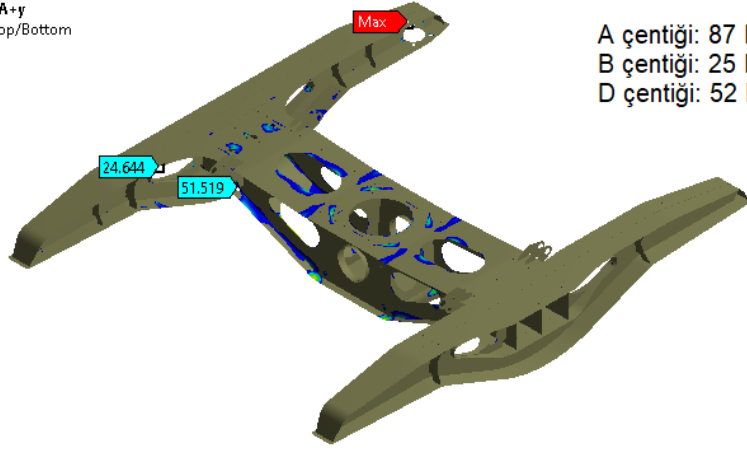
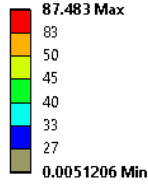
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 61 MPa  
B çentiği: 2 MPa  
D çentiği: 26 MPa

**Şekil E2.30** Y25 boji gövdesinin LF6&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

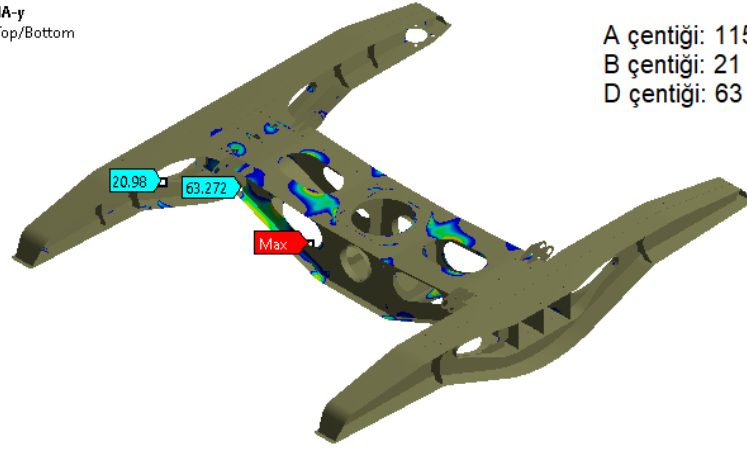
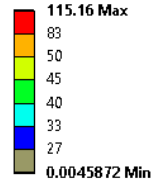
LF4&BURULMA+y - LF6&BURULMA+y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 87 MPa  
B çentiği: 25 MPa  
D çentiği: 52 MPa

Şekil E2.31 Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

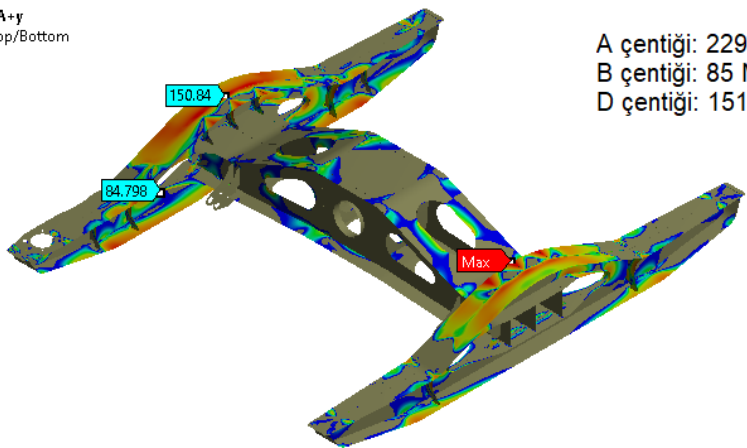
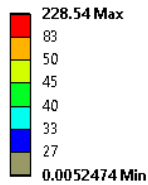
LF4&BURULMA+y - LF6&BURULMA-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 115 MPa  
B çentiği: 21 MPa  
D çentiği: 63 MPa

Şekil E2.32 Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

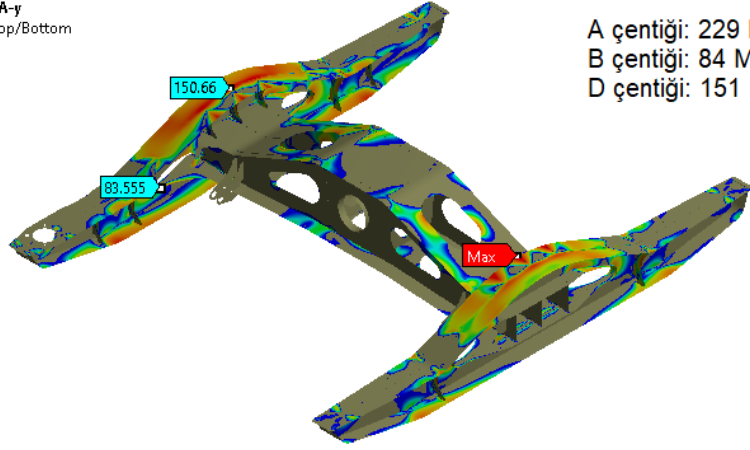
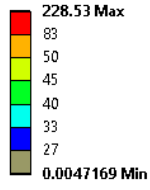
LF4&BURULMA+y - LF7&BURULMA+y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 229 MPa  
B çentiği: 85 MPa  
D çentiği: 151 MPa

Şekil E2.33 Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

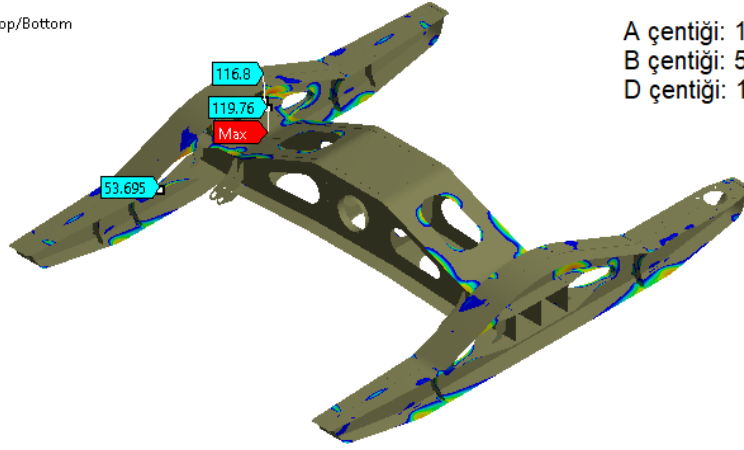
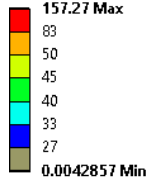
LF4&BURULMA+y - LF7&BURULMA-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 229 MPa  
B çentiği: 84 MPa  
D çentiği: 151 MPa

Şekil E2.34 Y25 boji gövdesinin LF4&burulma+y - LF7&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

KAYMA  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



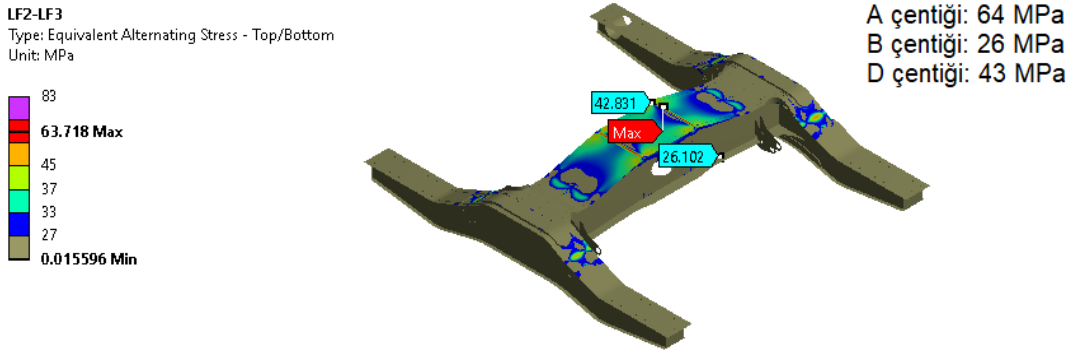
A çentiği: 117 MPa  
B çentiği: 55 MPa  
D çentiği: 120 MPa

Şekil E2.35 Y25 boji gövdesinin kayma+Fx - kayma-Fx yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

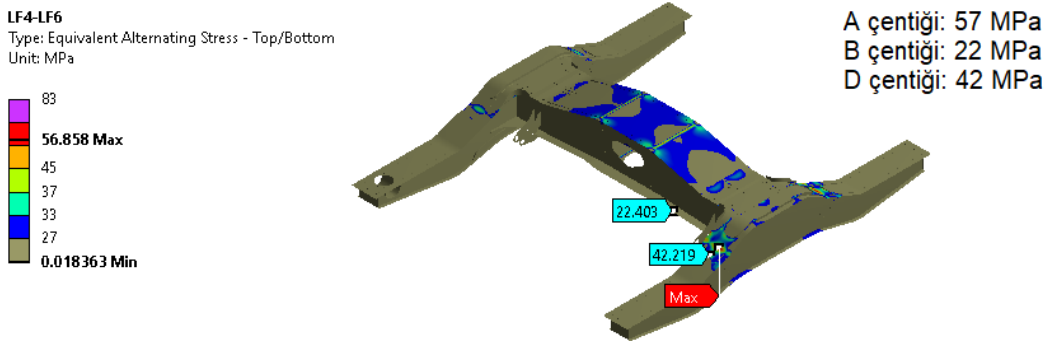
Alçak zeminli bojinin analiz sonuçlarına göre en çok zorlanan kısımlar, LF2–LF3 yorulma yük durumunda (Şekil E2.36) orta kirişin alt sacı, LF4–LF6 ve LF5–LF7 durumlarında (Şekil E2.37 ve E2.39) yan kirişin alt sacı, LF4–LF7 durumunda (Şekil E2.38) yan kiriş ve özellikle alt sacıdır.

LF4&burulma+y–LF4&burulma-y ve LF6&burulma+y–LF6&burulma-y yorulma yük durumları (Şekil E2.40 ve E2.41), yapıyı diğer yüklere nazaran daha az zorlamaktadır

LF4&burulma+y–LF6&burulma+y ve LF4&burulma+y–LF6&burulma-y yorulma yük durumlarında (Şekil E2.42 ve E2.43) yan kirişin alt sacı, LF4&burulma+y–LF7&burulma+y ve LF4&burulma+y–LF7&burulma-y yorulma durumlarında (Şekil E2.44 ve E2.45) orta kirişin alt sacı ve özellikle yan kirişin alt sacı, Kayma+Fx–Kayma-Fx durumunda (Şekil E2.46) ise en çok zorlanan kısımlardır.

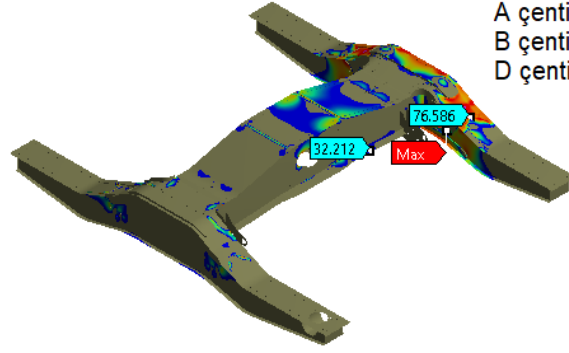
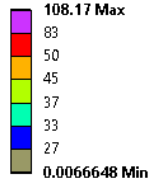


Şekil E2.36 Alçak zeminli boji gövdesinin LF2-LF3 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.



Şekil E2.37 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4-LF6 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

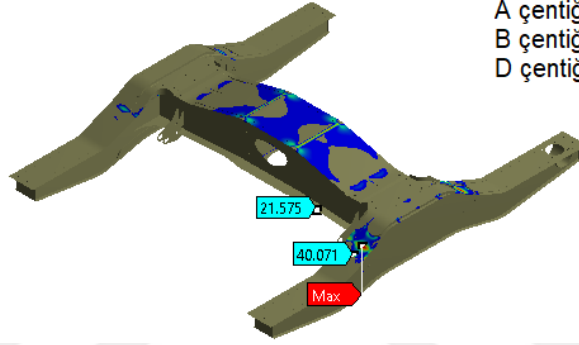
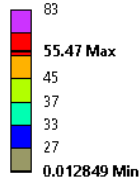
LF4-LF7  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 108 MPa  
B çentiği: 32 MPa  
D çentiği: 77 MPa

Şekil E2.38 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

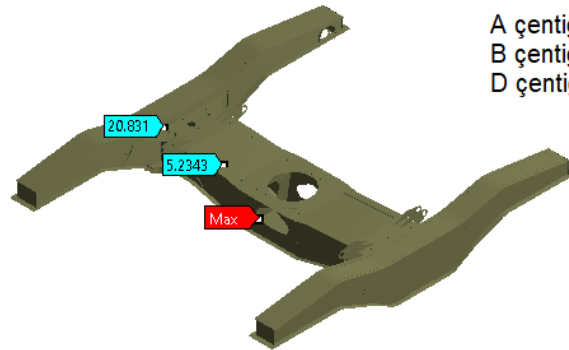
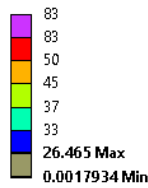
LF5-LF7  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 55 MPa  
B çentiği: 22 MPa  
D çentiği: 40 MPa

Şekil E2.39 Alçak zeminli boji gövdesinin LF5-LF7 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

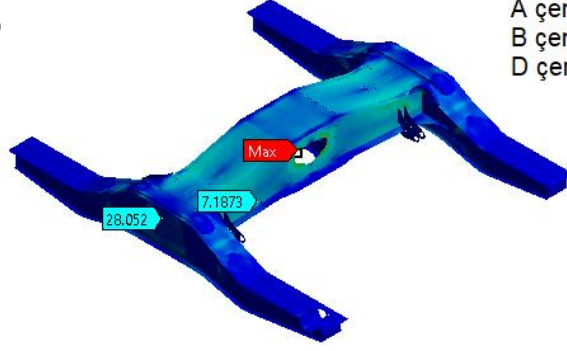
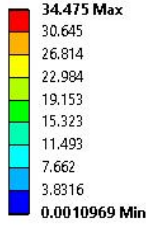
LF4 & burulma+y - LF4 & burulma-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 26 MPa  
B çentiği: 5 MPa  
D çentiği: 21 MPa

Şekil E2.40 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF4&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

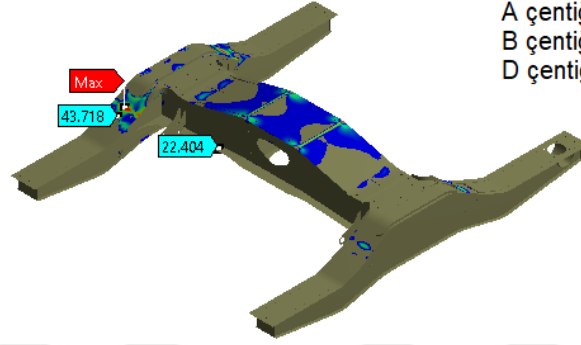
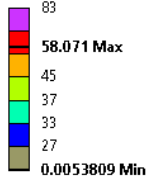
LF6 & burulma+y - LF6 & burulma-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 34 MPa  
B çentiği: 7 MPa  
D çentiği: 28 MPa

**Şekil E2.41** Alçak zeminli boji gövdesinin LF6&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

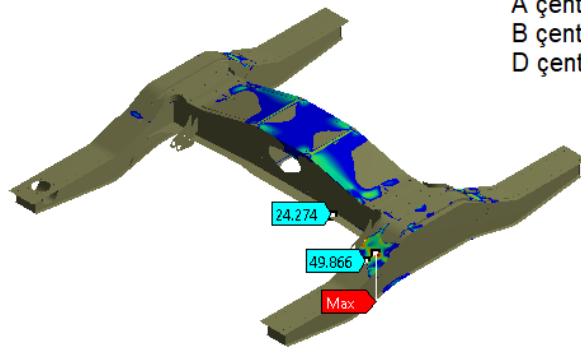
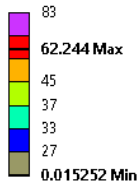
LF4 & burulma+y - LF6 & burulma+y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 58 MPa  
B çentiği: 22 MPa  
D çentiği: 44 MPa

**Şekil E2.42** Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

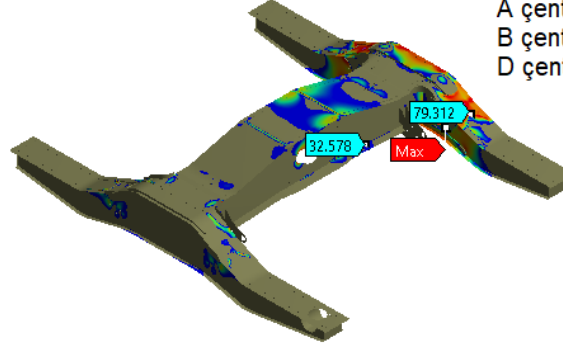
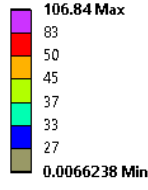
LF4 & burulma+y - LF6 & burulma-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 62 MPa  
B çentiği: 24 MPa  
D çentiği: 50 MPa

**Şekil E2.43** Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF6&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

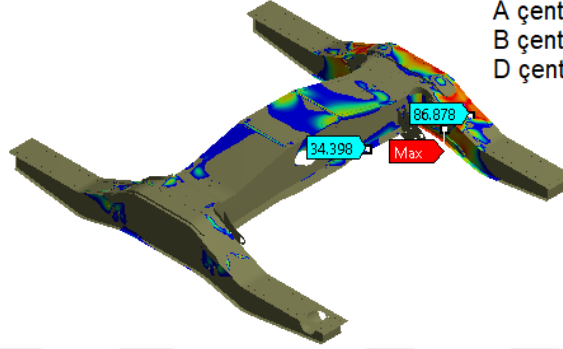
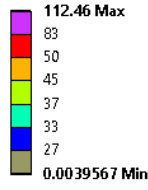
LF4 & burulma+y - LF7 & burulma+y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 107 MPa  
B çentiği: 33 MPa  
D çentiği: 79 MPa

Şekil E2.44 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma+y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

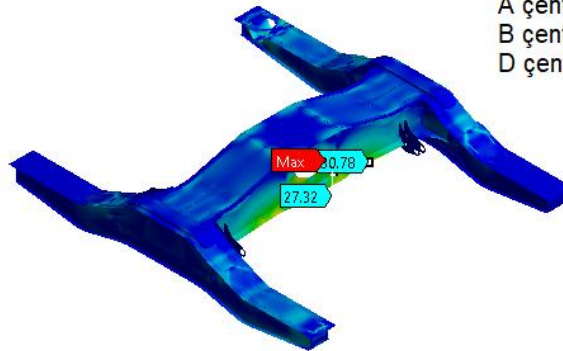
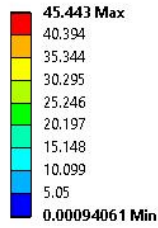
LF4 & burulma+y - LF7 & burulma-y  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



A çentiği: 112 MPa  
B çentiği: 34 MPa  
D çentiği: 87 MPa

Şekil E2.45 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4&burulma+y – LF7&burulma-y yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

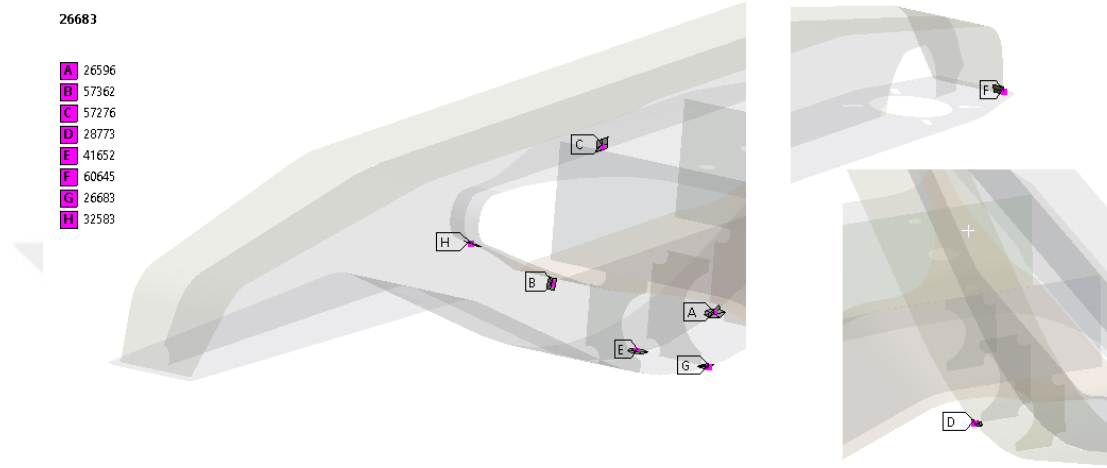
KAYMA  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



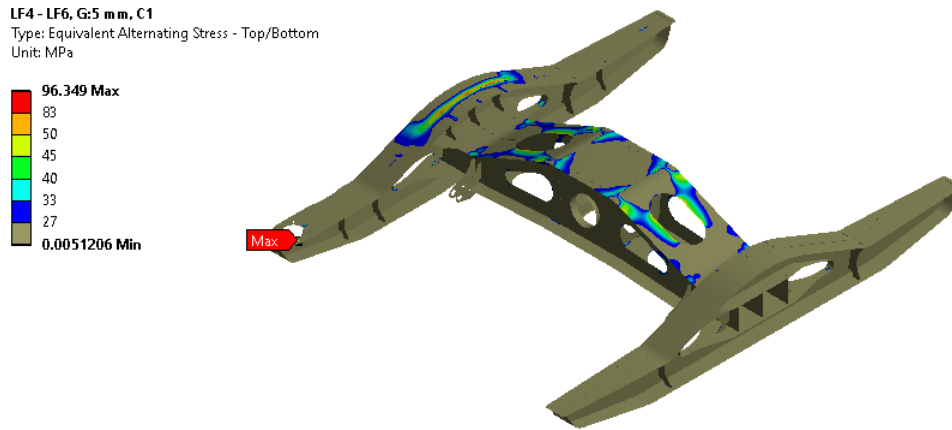
A çentiği: 45 MPa  
B çentiği: 31 MPa  
D çentiği: 27 MPa

Şekil E2.46 Alçak zeminli boji gövdesinin kayma+Fx – kayma-Fx yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

Y25 tipi boji gövdesi üzerinde tolerans yığılmasının etkisi incelenirken Şekil E2.47 ile gösterilen düğüm noktalarındaki gerilme değerleri referans alınmıştır. Şekil E2.48-55 ile temas durumu ve boşluk miktarının çeşitli değerlerine göre hesaplanan gerilme dağılımları verilmiştir. En çok zorlanma yan kiriş üzerinde meydana gelmekte, boşluk miktarının artmasıyla daha yüksek gerilme değerleri ortaya çıkmaktadır.

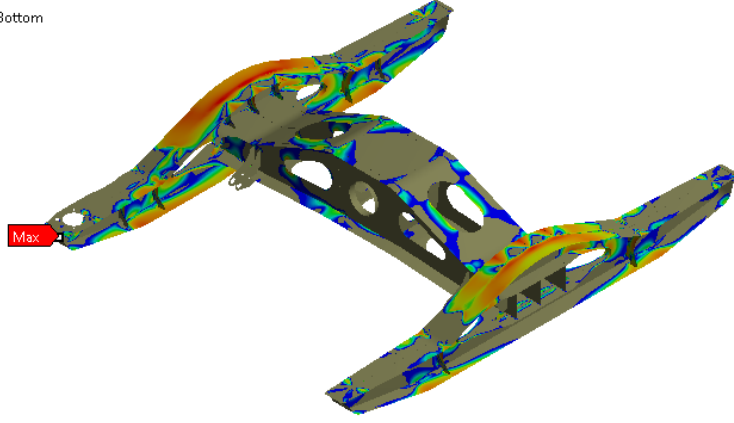
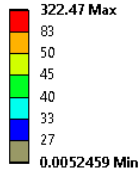


Şekil E2.47 Y25 boji gövdesi üzerinde ölçüm alınan düğüm noktaları.



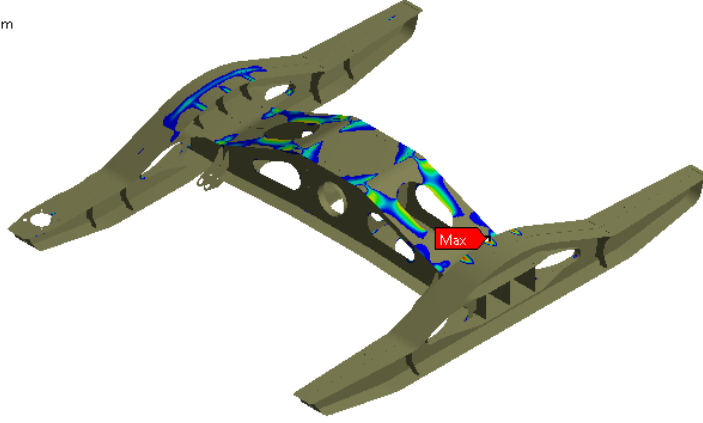
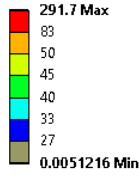
Şekil E2.48 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7, G:5 mm, C1  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



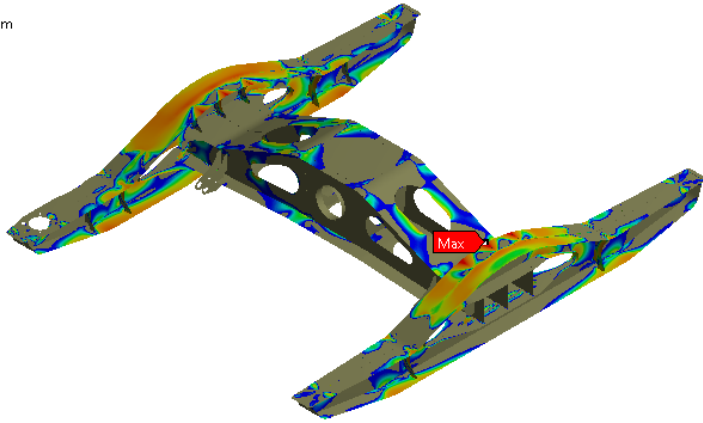
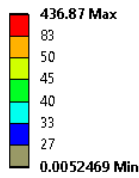
Şekil E2.49 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF6, G:3.6 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



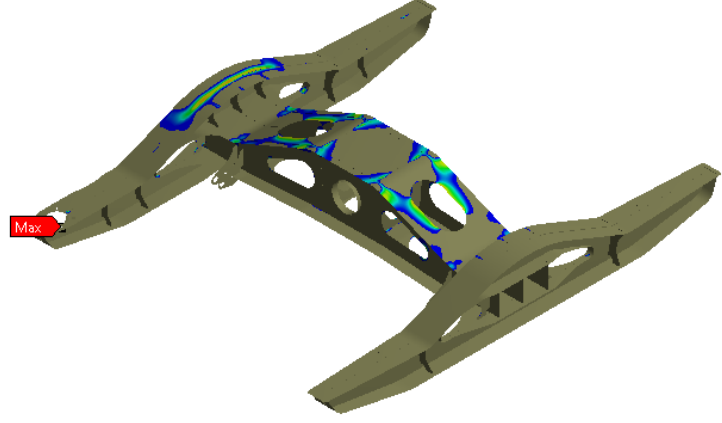
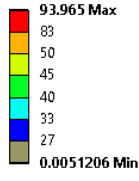
Şekil E2.50 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7, G:3.6 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



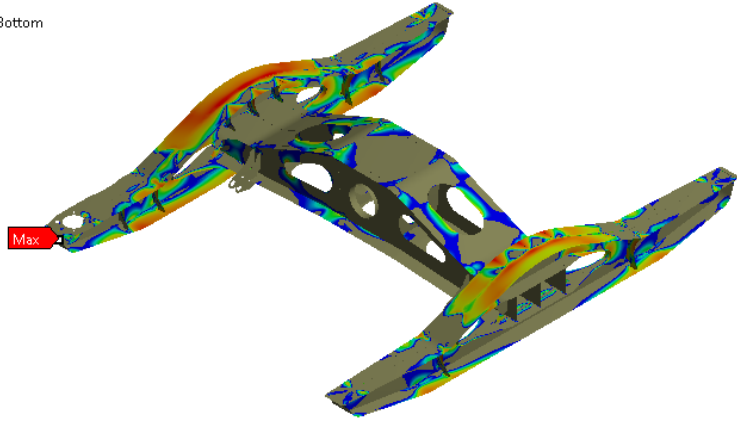
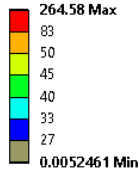
Şekil E2.51 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF6, G:2.4 mm, C1  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



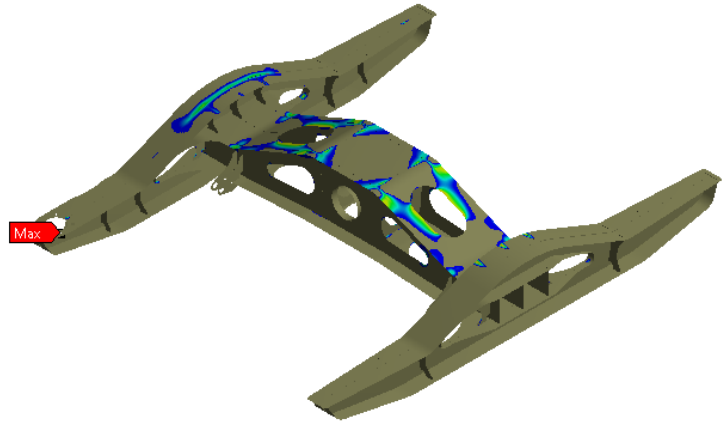
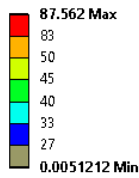
Şekil E2.52 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:2.4 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7, G:2.4 mm, C1  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



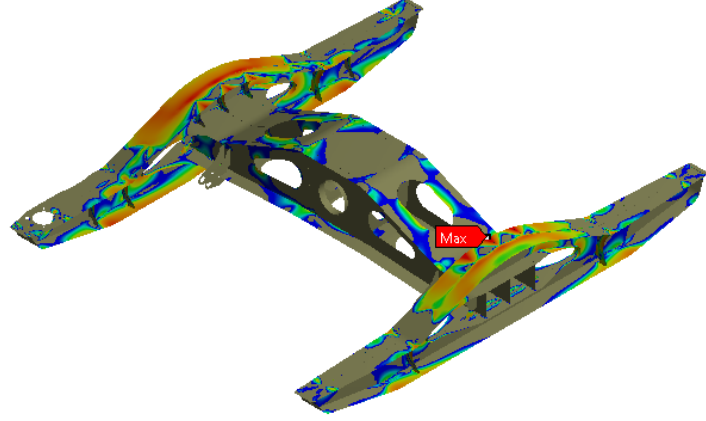
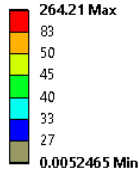
Şekil E2.53 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:2.4 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF6, G:1 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



Şekil E2.54 Y25 boji gövdesinin LF4 – LF6, G:1 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

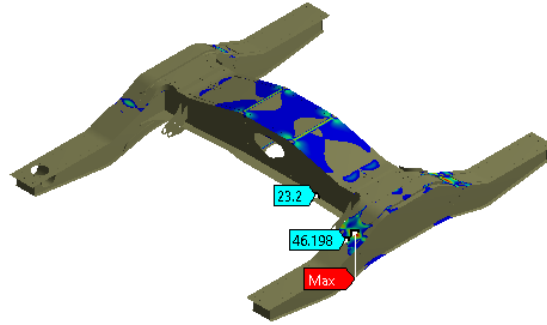
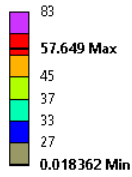
LF4 - LF7, G:1 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



**Şekil E2.55** Y25 boji gövdesinin LF4 – LF7, G:1 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

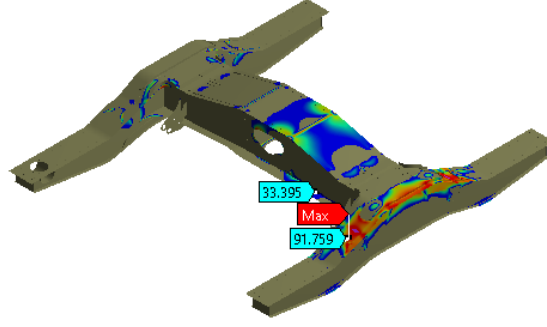
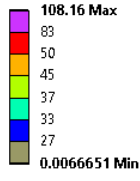
Alçak zeminli boji gövdesi üzerinde tolerans yığılmasının etkisini göstermek amacıyla Şekil E2.56-59 ile temas durumu ve boşluk miktarının çeşitli değerlerine göre hesaplanan gerilme dağılımları verilmiştir. En çok zorlanma yan kiriş üzerinde meydana gelmekte, boşluk miktarının artmasıyla daha yüksek gerilme değerleri ortaya çıkmaktadır.

LF4 - LF6, G:5 mm, C1  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



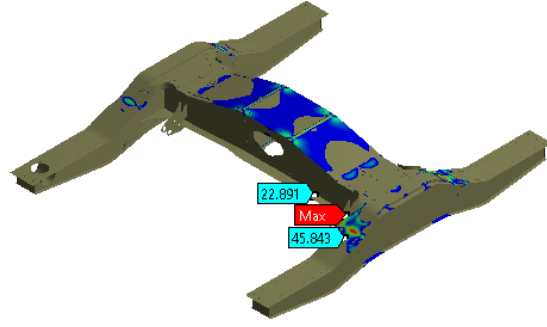
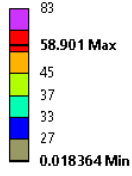
**Şekil E2.56** Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF6, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7, G: 5 mm, C1  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



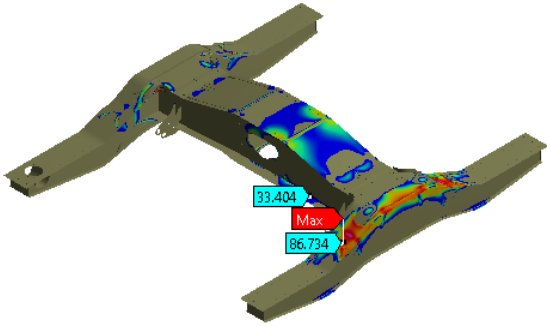
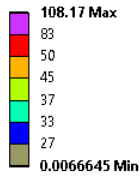
Şekil E2.57 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF7, G:5 mm, C1 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF6, G: 3.6 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



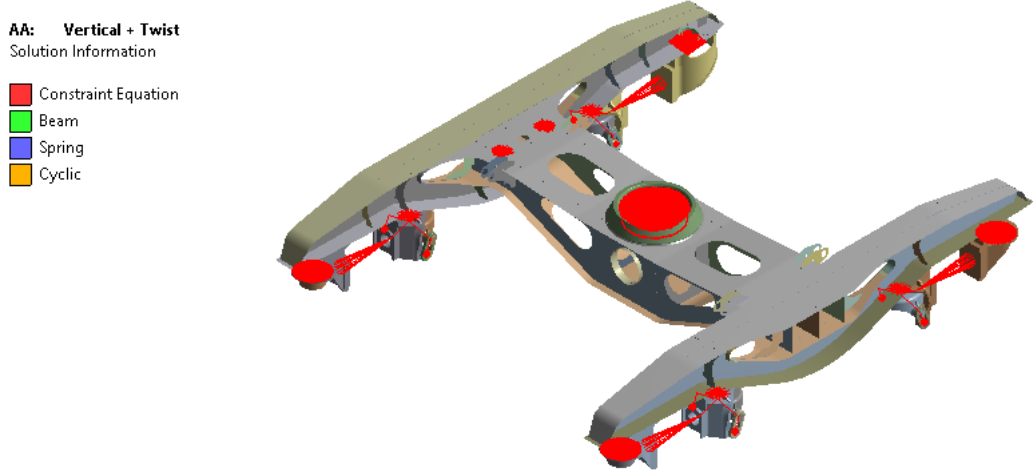
Şekil E2.58 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF6, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

LF4 - LF7, G: 3.6 mm, C2  
Type: Equivalent Alternating Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa



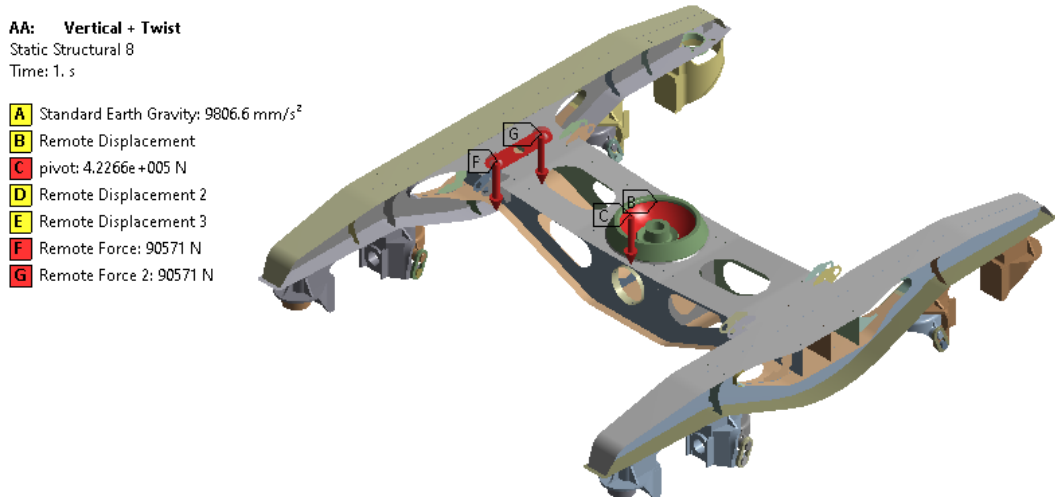
Şekil E2.59 Alçak zeminli boji gövdesinin LF4 – LF7, G:3.6 mm, C2 yük durumundaki eşdeğer gerilme genliği dağılımı.

L2 durumu için Y25 bojisinin mesnet noktaları Şekil E2.60 ile verilmiştir. Boji pivotunda “Remote Displacement” ile yatay düzlemdeki öteleme hareketleri ve düşey eksendeki dönme hareketi kısıtlanmıştır. Aks kutusu kılavuzlarına bir ucu sabitlenmiş düşey doğrultulu “Spring” elemanlar bağlanmıştır (Şekil 3.3).

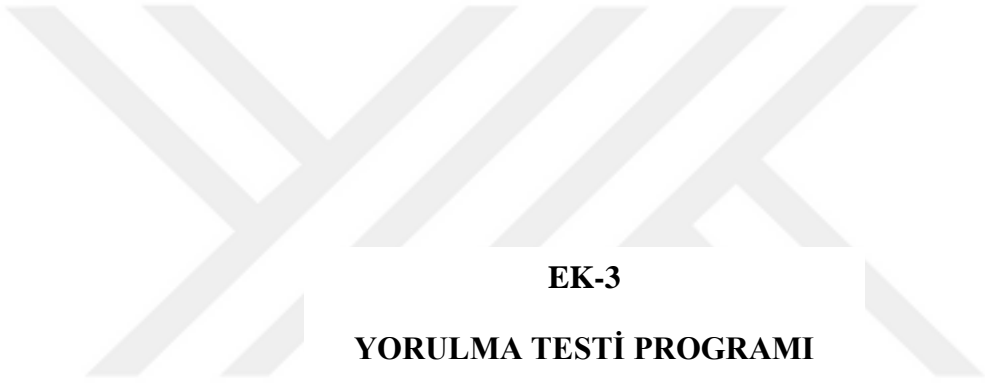


**Şekil E2.60** L2 yükleme durumu için Y25 tipi boji gövdesinin mesnet noktaları.

L2 durumu için Y25 bojisine etkiyen kuvvetler ile uygulama noktaları Şekil E2.61 ile verilmiştir. Boji pivotuna ve alt kızak bölgelerine yayılı yük uygulanmıştır. Bağlantılar için “Deformable” seçeneği tercih edilmiştir. Burulma etkisi “Spring” elemanın diğer ucunun bağlı olduğu elemana “Remote Displacement” uygulanarak sağlanmıştır. Yerçekimi etkisi de uygulanmıştır (Şekil 3.3).



**Şekil E2.61** L2 yükleme durumu için Y25 tipi boji gövdesine uygulanan kuvvetler.



**EK-3**

**YORULMA TESTİ PROGRAMI**

Y25 tipi boji ile alçak zeminli boji, TS EN 13749'a göre B-V kategorisinde yer almaktadır. B-V kategorisi için standartta önerilen test prosedürüne göre normal yükler, statik, sözde statik ve dinamik bileşenlerine ayrılır. Farklı yük faktörleri ile farklı sayıda çevrim uygulanır.

Pivot üzerine etkiyen normal yüklerin statik ve dinamik bileşenleri denklem [E3.1] ve [E3.2] ile hesaplanır.  $F_z$ , bojinin yük taşıma kapasitesidir.  $\alpha = 0.2$  ve  $\beta = 0.3$  değerindedir.

$$F_{zps} = F_z(1 - \alpha) \quad [E3.1]$$

$$F_{zpd} = \pm\beta F_z(1 - \alpha) \quad [E3.2]$$

Alt kızıkların üzerine etkiyen normal yüklerin sözde statik ve dinamik bileşenleri denklem [E3.3] ve [E3.4] ile hesaplanır.

$$F_{z1qs} = F_{z2qs} = \pm\alpha F_z \quad [E3.3]$$

$$F_{z1d} = F_{z2d} = \pm\beta F_z \quad [E3.4]$$

Her bir aks üzerine yanal yönde etkiyen normal yüklerin sözde statik ve dinamik bileşenleri denklem [E3.5] ve [E3.6] ile hesaplanır.

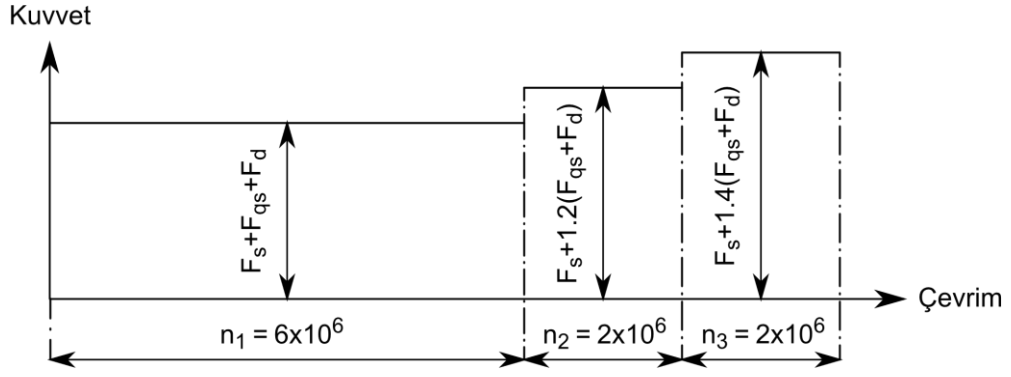
$$F_{y1qs} = F_{y2qs} = \pm 0.05(F_z + m^+g) \quad [E3.5]$$

$$F_{y1d} = F_{y2d} = \pm 0.05(F_z + m^+g) \quad [E3.6]$$

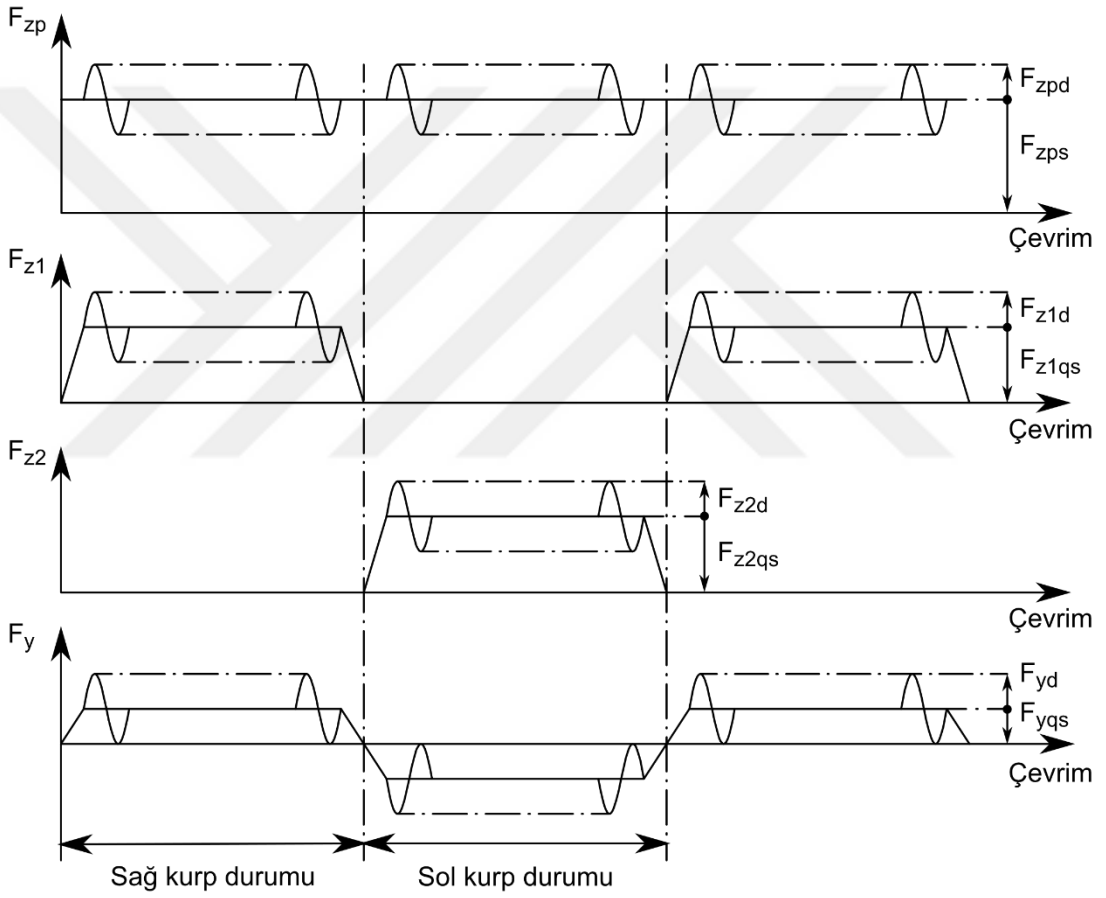
Yorulma testine %0.5 değerindeki yol burulması etkisi de dahil edilir.

Uygulanması istenen kuvvetler, yük faktörleri ve çevrim sayıları Şekil E3.1 ile verilmiştir. Testin ilk aşamasında normal yükler  $6 \times 10^6$  çevrim boyunca uygulanır, yol burulması etkisi ise  $0.6 \times 10^6$  çevrim boyunca uygulanır. İkinci aşamada statik bileşen sabit tutulur, sözde statik ve dinamik yük bileşenleri için yük faktörü 1.2 olarak alınır ve  $2 \times 10^6$  çevrim boyunca uygulanır, yol burulması için de yük faktörü 1.2 alınarak  $0.2 \times 10^6$  çevrim boyunca uygulanır. Üçüncü aşama ise yük faktörü 1.4 alınarak ikinci aşamaya benzer şekilde uygulanır.

Yüklerin uygulama sırası Şekil E3.2 ile verilmiştir. Her bir test aşamasında 10 ile 20 çevrimde bir kurp durumunun değiştirilmesi gerekir. Kurp durumu değiştirilirken burulma yönü de değiştirilir.



Şekil E3.1 Yorulma kuvvetleri ve çevrim sayıları.



Şekil E3.2 Yorulma yükleri ve uygulama sırası.