



**FALNS TİPİ VAGONDA CER TERTİBATINA
UYGULANAN ÇEKME KUVVETİ TESTİNİN
YAPISAL ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Güven TERCAN

Eskişehir 2025

**FALNS TİPİ VAGONDA CER TERTİBATINA UYGULANAN ÇEKME
KUVVETİ TESTİNİN YAPISAL ANALİZİ**

Güven TERCAN

Yüksek Lisans Tezi

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Güven TERCAN'ın FALNS TİPİ VAGONDA CER TERTİBATINA UYGULANAN ÇEKME KUVVETİ TESTİNİN YAPISAL ANALİZİ başlıklı çalışması 17/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Üye

: Doç. Dr. Yasin SARIKAVAK

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Özgün SUNAR

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

17/01/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans đrencisi Güven TERCAN, FALNS TİPİ VAGONDA CER TERTİBATINA UYGULANAN ÇEKME KUVVETİ TESTİNİN YAPISAL ANALİZİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

ÖZET

FALNS TİPİ VAGONDA CER TERTİBATINA UYGULANAN ÇEKME KUVVETİ TESTİNİN YAPISAL ANALİZİ

Güven TERCAN

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2025

Danışman: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Demiryolu taşımacılığı, güvenlik ve dayanıklılığın büyük önem taşıdığı bir sektördür. Bu bağlamda, yük ve yolcu vagonlarının çekme dayanımları, taşıma emniyeti ve işletme maliyetlerini optimize etmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, Falns tipi vagonun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizi gerçekleştirilmiştir.

Yapısal analiz için Ansys Workbench programı kullanılmıştır. Analiz öncesinde mesh çalışması yapılarak modele en uygun mesh boyutu bulunmuş ve yükleme koşulları belirtilerek yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Deneysel test sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmeler ile analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen veriler farklı yönlerdeki eşdeğer gerilmeler, maksimum çekme gerilmeleri ve toplam şekil değiştirmeler olarak bulgular bölümünde detaylandırılmıştır. Ulaşılan bulgular, uygulanan kuvvetin tasarım geometrisi ve vagon parçaları üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bu çalışma, vagon tasarımı ve üretim süreçlerinde yapısal dayanıklılığın artırılması ve demiryolu taşıma emniyetinin sağlanması için katkılar sunmaktadır. Çalışmanın sonuçları, gelecekteki vagon tasarımlarında ve araştırmalarda kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler: Vagon, Yapısal analiz, Sonlu elemanlar yöntemi, Demiryolu emniyeti.

ABSTRACT

STRUCTURAL ANALYSIS ON THE TEST OF TENSILE FORCE APPLIED TO THE DRAW GEAR FOR THE FALNS TYPE WAGON

Güven TERCAN

Department of Rail Systems Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömür AKBAYIR

Railway transportation is a sector where safety and durability are of paramount importance. In this context, the tensile strength of freight and passenger wagons plays a critical role in optimizing transportation safety and operational costs. In this thesis, the structural analysis of a Falns-type wagon was conducted using the finite element method (FEM).

ANSYS Workbench software was used for the structural analysis. Prior to the analysis, a mesh study was performed to determine the most suitable mesh size for the model, and loading conditions were specified to carry out the structural analysis. The finite element method (FEM) was employed for this purpose. The equivalent stress values obtained from experimental testing were compared with those derived from the analysis. The results, detailed in the findings section, include equivalent stresses in different directions, maximum tensile stresses, and total deformations. The findings demonstrate the effects of applied forces on the design geometry and wagon components.

This study, conducted using the finite element method, contributes to enhancing structural durability in wagon design and manufacturing processes while ensuring railway transportation safety. The results of this research can serve as a reference for future wagon designs and related studies.

Keywords: Wagon, Structural analysis, Finite element method, Railway safety.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında sağladığı rehberlik, sabır ve destekleri için tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ömür AKBAYIR'a teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman yanımda olan anneme, babama ve arkadaşlarıma sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma sırasında ve hayatımın her aşamasında bana verdikleri imkân, destek ve cesaret için minnettarım.

Güven TERCAN



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Güven TERCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	2
3. METOT.....	8
3.1. Teorik	8
3.2. Araştırma	10
3.3. Üç Boyutlu Katı Modelin Hazırlanması.....	10
3.4. Analiz Hazırlık Süreci.....	13
3.5. Sınır Şartları.....	18
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz	20
4. SONUÇLARIN DOĞRULANMASI.....	22
5. BULGULAR	34
5.1. Farklı Yönlerdeki Eşdeğer Gerilmeler.....	34
5.1.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan eşdeğer gerilmeler	34
5.1.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan eşdeğer gerilmeler	34
5.1.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan eşdeğer gerilmeler.....	35

5.1.4. Şaside oluşan eşdeğer gerilmeler.....	35
5.1.5. Vagon kompleksinde oluşan eşdeğer gerilmeler	36
5.2. Maksimum Çekme Gerilmeleri	37
5.2.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan çekme gerilmeleri	37
5.2.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan çekme gerilmeleri.....	37
5.2.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan çekme gerilmeleri.....	38
5.2.4. Şaside oluşan çekme gerilmeleri.....	38
5.2.5. Vagon kompleksinde oluşan çekme gerilmeleri.....	39
5.3. Şekil Değiştirme	40
5.3.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan şekil değiştirmeler	40
5.3.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan şekil değiştirmeler	40
5.3.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan şekil değiştirmeler.....	41
5.3.4. Şaside oluşan şekil değiştirmeler.....	41
5.3.5. Vagon kompleksinde oluşan şekil değiştirmeler	42
5.4. Emniyet Katsayısı	42
5.4.1. Vagon-boji birleşim noktasında emniyet katsayısı	43
5.4.2. Tampon ve cer tertibatında emniyet katsayısı.....	43
5.4.3. Vagon kompleksinde emniyet katsayısı	44
6. SONUÇLAR	46
KAYNAKÇA	48
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Mesh boyuna göre oluşan element sayıları	14
Tablo 3.2 1000 kN kuvvet uygulandığında toplam şekil değıştirmeler.....	15
Tablo 3.3. 1000 kN kuvvet altında toplam yer değıştirmeler	15
Tablo 3.4. 1000 kN kuvvet altında maksimum çekme gerilmeleri	15
Tablo 3.5. Mesh bağımsızlık çalışması.....	16
Tablo 3.6. Skewness değerleri ve anlamları (Sunar, 2023)	18
Tablo 3.7. EN 10025 standartlarına göre S355 yapısal çeliğın özellikleri (EN 10025, 2004).....	20
Tablo 4.1. Deneysel test sırasında verilen gerinim ölçer numaraları, analiz düğüm numaraları ve konumlar.....	22
Tablo 4.2. Deneysel test sonuçları ile analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmelerin karşılaştırılması	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Üç boyutlu vagon modeli (izometrik görünüş)	11
Şekil 3.2. Üç boyutlu vagon modeli (ön görünüş)	11
Şekil 3.3. Üç boyutlu vagon modeli (yan görünüş)	12
Şekil 3.4. Üç boyutlu vagon modeli (alt görünüş)	12
Şekil 3.5. Ön görünüş, yükseklik ve genişlik değerleri.....	13
Şekil 3.6. Yan görünüş ve uzunluk değerleri.....	13
Şekil 3.7. Eleman ağı örüntüsü 1	16
Şekil 3.8. Eleman ağı örüntüsü 2	16
Şekil 3.9. Eleman ağı örüntüsü 3	17
Şekil 3.10. Çeyrek vagon modelinin izometrik görünüşü ve yer çekimi ivmesi.....	19
Şekil 3.11. Çeyrek vagon modelinde z-doğrultusu ve kuvvet uygulama noktası.....	19
Şekil 3.12. Temas ve sınır noktaları.....	20
Şekil 3.13. UIC ve EN standartlarında belirtilen 100 ton simetrik çekme kuvveti	21
Şekil 4.1. Vagon üzerindeki gerinim ölçerlerin konumları	23
Şekil 4.2. 2 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	23
Şekil 4.3. 3 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	24
Şekil 4.4. 5 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	24
Şekil 4.5. 8 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	25
Şekil 4.6. 9 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	25
Şekil 4.7. 10 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	26
Şekil 4.8. 11 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	26
Şekil 4.9. 12 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	27
Şekil 4.10. 14 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	27
Şekil 4.11. 20 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009).....	28
Şekil 4.12. 281748 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	28
Şekil 4.13. 103365 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	29
Şekil 4.14. 270791 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	29
Şekil 4.15. 127525 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	30
Şekil 4.16. 129764 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	30
Şekil 4.17. 259784 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	31
Şekil 4.18. 279078 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	31

Şekil 4.19. 102973 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	32
Şekil 4.20. 1776 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	32
Şekil 4.21. 62711 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri	33
Şekil 5.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı	34
Şekil 5.2. Tampon bölgesinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı	35
Şekil 5.3. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı.....	35
Şekil 5.4. Şaside oluşan eşdeğer gerilme dağılımı.....	36
Şekil 5.5. Vagonda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı.....	36
Şekil 5.6. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan çekme gerilmeleri dağılımı.....	37
Şekil 5.7. Tampon bölgesinde oluşan çekme gerilmeleri dağılımı.....	38
Şekil 5.8. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan çekme gerilmeleri dağılımı	38
Şekil 5.9. Şaside oluşan çekme gerilmeleri dağılımı	39
Şekil 5.10. Vagonda oluşan çekme gerilmeleri dağılımı.....	39
Şekil 5.11. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan şekil değiştirme dağılımı	40
Şekil 5.12. Tampon bölgesinde oluşan şekil değiştirme dağılımı	41
Şekil 5.13. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan şekil değiştirme dağılımı.....	41
Şekil 5.14. Şaside oluşan şekil değiştirme dağılımı.....	42
Şekil 5.15. Vagonda oluşan şekil değiştirme dağılımı.....	42
Şekil 5.16. Vagon-boji birleşim yerinde oluşan emniyet katsayısı değerleri	43
Şekil 5.17. Tampon ve cer tertibatı bölgesinde oluşan emniyet katsayısı değerleri	44
Şekil 5.18. Vagon kompleksinde oluşan maksimum ve minimum emniyet katsayısı değerleri.....	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
EN	: Avrupa Normu (Europeane Norm)
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer)
KPa	: Kilo Pascal
mm	: Milimetre
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolu Birliği (Union Internationale des Chemins de fer)

1. GİRİŞ

Demiryolu taşımacılığı, tarihsel süreçte emniyetli ve sürdürülebilir bir ulaşım yöntemi olarak önemli bir yere sahiptir. Hem yük taşımacılığı hem de yolcu taşımacılığında maliyet etkinliği, çevresel sürdürülebilirlik ve yüksek taşıma kapasitesi gibi avantajlar sunan bu sektör, günümüzde de modern ulaşım sistemlerinin temel taşlarından biri olarak varlığını sürdürmektedir. Bununla birlikte, demiryolu sistemlerinde emniyet ve dayanıklılık unsurları hem operasyonel verimliliği artırmak hem de yolcuların ve taşınan yüklerin emniyetini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu bağlamda, demiryolu vagonlarının yapısal tasarımı ve kullanılan malzemelerin dayanım özellikleri, sektördeki emniyet standartlarının karşılanmasında belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle yük vagonlarında sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile yapılan yapısal analizler, tasarımın güvenilirliğini sağlamanın yanı sıra işletme maliyetlerini optimize etmek açısından da incelemesi gereken önemli bir konudur.

Bu tez çalışmasında, Falns tipi bir yük vagonun yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, vagon tasarımında emniyet ve dayanıklılığı artırmayı hedeflemekte; sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan yapısal analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmeler, maksimum çekme gerilmeleri ve toplam şekil değiştirmelerle mevcut tasarımın geliştirilmesine ayrıca yeni tasarımların iyileştirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Tez çalışmasının içeriği aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir;

Tez çalışmasının ilk bölümünde; demiryolu vagonlarına uygulanan yapısal analizlerin önemi ele alınacaktır.

İkinci bölümünde; literatür taramasına yer verilecektir.

Üçüncü bölümünde; model tasarımı, veriler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analiz metotları, mesh çalışması, uluslararası standartlar ve bu standartlarda belirtilen kuvvetlerden bahsedilecektir.

Dördüncü bölümünde; gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme değerleri ve deneysel test sonuçlarından elde edilmiş eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırılacaktır.

Beşinci bölümünde; uygulanan kuvvet sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmeler, çekme gerilmeleri ve toplam şekil değiştirmelerden bahsedilecektir.

Son bölümünde; yapısal analizin genel sonuçlarından bahsedilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Demiryolu taşımacılığı, emniyet ve dayanıklılık açısından önemli bir sektördür. Vagonların yapısal tasarımı ve malzeme seçimi, taşıma güvenliğinin sağlanması ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analizler, demiryolu vagonlarının tasarım ve üretim süreçlerinde emniyetin artırılması amacıyla yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, üç boyutlu karmaşık yapıların analizlerinin gerçekleştirilmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirilen yapısal analizler ülkemizde üretilen veya kullanılan demiryolu vagonları, demiryolu ekipmanları ve komponentlerinde de sıklıkla uygulanmaktadır. Bu yapısal analizlerin amacı tasarlanan malzemelerin veya komponentlerin tasarım, üretim ve kullanım emniyetini anlamak, uygulanan kuvvet altında malzemenin ne tepki verdiğini görmek, beklenen özelliklere uygun olup olmadığını kontrol edebilmek ve uygun olmaması durumunda ne yapılabileceğini önermek amacı ile yapılmaktadır.

Konez ve arkadaşları, demiryollarında kullanılan araçları taşımaya yarayan ve mekanik bir sistem olan boji üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Üzerinde tekerlek setleri, aks kutusu, fren donanımları, bolster, yatay damper, birincil ve ikincil süspansiyonları bulunan Y32 bojisinin yük altında ne tepki vereceğini görebilmek amacıyla Y32 bojisine sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Analiz sırasında, Y32 bojisine TS EN 13749 standardında belirtilen boji şasilerinin yapısal gerekliliklerini dikkate alarak sınır şartlarını belirlemiş ve belirtilen kuvvetleri uygulamışlardır. Bu analizde uygulanan kuvvetler sonucunda elde edilen verileri tasarım değişikliği önerisi başlığı altında sunmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analiz gerçekleştirmek için Ansys Workbench yazılımı kullanmışlardır (Konez, Metin, & Demir, 2019).

Özsoy, demiryolu araçlarının önemli bir parçası olan ve Tüvasaş'da üretilen Y32 bojisini statik ve dinamik açıdan incelendiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanan Özsoy günümüz şartlarına göre Y32 bojisinde yapılabilecek iyileştirmeleri bulmayı amaçlamıştır. Yapısal analiz çalışmasının sonucunda oluşan gerilmelerin malzeme akma sınırının altında kaldığını görmüştür. Bu sonuçların ileride kurulabilecek bir test düzeneğinde deneysel olarak doğrulanmasını hedeflemiştir (Özsoy M. İ., 2008).

Sabırlı, demiryollarında kullanılan bir raylı taşıtın bojisine sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapısal analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmasında araç tasarımında statik ve dinamik analizlerin bazen yeterli olduğunu, bazen de tekrarlı yüklerin görüldüğü kesitlere yorulma analizi gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. TS EN 13749 standartlarına göre uygulanan yorulma yüklerinin toplamda 2,000,000 çevrimlik yüklemeye kırılmadan dayanmasının gerektiğini belirtmiştir. Gerçekleştirdiği analiz sonucunda sisteme verdiği yüklemelerle beraber oluşan gerilmeleri ve yorulmaları hesaplamayı amaçlamıştır. Analizin sonucunda taşıyıcı boji yapısının iki ayrı bölgesinde olmak üzere dört farklı noktada yorulma açısından sonsuz ömür sınırını aştığını ve bu bölgelerde yeterli iyileştirme yapılmaması halinde, belirli bir çevrim sayısından sonra yorulma çatlaklarının meydana gelebileceği sonucuna varmıştır (Sabırlı, 2012).

Demiryolu araçlarında vagon üzerinde oluşan titreşimler, yolcu konforunu ve yük emniyetini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, demiryolu vagonlarında titreşim analizleri de gerçekleştirilmektedir. Bu analizler demiryolu vagonlarının veya diğer komponentlerinin tasarımlarında sönüm ve yay elemanlarının etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Eroğlu ve arkadaşları, bir demiryolu aracının bojisinde oluşabilecek titreşimleri gözlemleyebilmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanarak titreşim analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının amacı ivmelenme değerlerinin ve deplasman değerlerinin raylı sistem aracının dinamik davranışlarını nasıl etkilediğini gözlemlemektir. Çalışmada trenin gerçek parametreleri alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda yolcu taşıyan trenlerin bojilerine eklenen fazladan süspansiyon elemanının ivmelenme ve deplasman değerlerini etkilediğini görmüşlerdir (Eroğlu, Esen, & Koç, 2018).

Topsakal, hafif raylı bir taşıtın taşıyıcı bojisi üzerinde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak titreşim analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmasında raylı sistemin en çok göze çarpan probleminden titreşim olarak bahsetmiştir. Bu problemin çözümünde gerekli önemlerin alınmaması durumunda tasarımı yapılan boji sisteminin konstrüksiyonunda geri dönüşü mümkün olmayan yapısal deformasyonların meydana gelebileceğini ve bu deformasyonlar sonucunda yolcuların seyir güvenliğine ve çevreye ciddi zararları olabileceğini söylemiştir. Çalışmasının sonucunda deneysel boji analiz değerleri ile kendi çalışmasının sonucunda elde ettiği analiz değerlerini kıyaslamış ve titreşim mod frekansı ortalamasını %9,6 olarak bulmuştur. Hafif raylı taşıt bojisinin titreşim frekansını 27,48

Hz bulmuş ve bu değeri yaptığı literatür taraması sonucu bulduğu değerlerle karşılaştırmıştır (Topsakal, 2015).

Demiryolu sektöründe raylı sistem aracı dışında ray ve balast gibi yol elemanları da bulunmaktadır.

Sarıkavak, ülkemizde ve dünyada işletilen demiryolu hatlarında çoğunlukla kullanılmakta olan perlitik ve beynitik çeliklerin yorulma hasar direnci üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada demiryolu hatlarında işletme sırasında kullanılan perlitik mikroyapıdaki çeliklerle alternatif olarak sunulan gelişmiş mekanik özelliklere sahip beynitik mikroyapıdaki çelikleri karşılaştırmıştır. Çalışmasında konvansiyonel ray sınıfları ve gelişmiş ray sınıflarını, kimyasal kompozisyonları ve malzemelerin temel mekanik özelliklerini dikkate almıştır. Daha sonra tekerlek ray etkileşimi, sürtünme şartları ve temas yüzeylerini dikkate alarak geliştirdiği sonlu elemanlar modelinde rayın yorulma hasar direncini analiz etmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdiği bu çalışmanın sonucunda rayın yorulma hasar direncini ölçmüş ve beynitik mikroyapıdaki çeliğin yorulma hasar direncinin perlitik mikroyapıdaki çeliğe göre üstün olduğu ve 386,69 MPa yük altında on milyon çevrime dayanabildiğini söylemiştir (Sarıkavak, 2021).

Oyan, Taipei hızlı trenlerinin boji çerçevesinin dayanımı ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasının amacı Taipei Hızlı Tren Sistemleri tarafından belirlenen teknik dayanım gereksinimlerine uyum sağlayıp sağlanmadığını doğrulamaktır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirdiği analizde statik ve yorulma dağılımlarını değerlendirmiştir. Değerlendirmesinin sonucunda hızlı tren bojisinin gerekli dayanımı karşıladığını ve operasyonel kullanım için uygun olduğunu söylemiştir (Oyan, 1998).

Kim ve arkadaşları, metro araçlarının bojilerini GFRP tipi kompozit malzemeden üretmiş ve kritik yükleme koşullarında yapısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdikleri bu çalışmada amaçları, statik testlerle GFRP kompozitinden oluşan bojinin gerilme ve yorulma açısından incelenmesi olmuştur. Analiz sonucunda görülen gerilmelerin malzeme açısından güvenli olduğu sonucuna varmışlardır (Kim & Yoon, 2011).

Ersoy, şehir içi toplu taşımada kullanılmak için tasarlanmış bir hafif raylı sistem aracı olan tramvayın gövdesinin EN 12663 standartlarına göre sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Tramvay gövdesine kuplaj bölgesinden basma ve çekme yükü, en büyük işletme yükü, araç boş haldeyken kaldırma yükü ve

yorulma dayanımı için analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonucunda tanımladığı tüm yükleme senaryolarını gövde üzerinde oluşan yer değiştirme ve eşdeğer gerilme dağılımlarını ele almıştır. Elde ettiği veriler sonucunda, gerilme değerlerinin emniyet gerilmesinin altında kaldığı ve işletme performansını etkileyecek seviyede bir deformasyon oluşmadığı sonucuna varmıştır (Ersoy, 2014).

Kim ve arkadaşı, gerçekleştirdikleri çalışmada; Kore’de bulunan trenlerin eğik bojisini statik ve dinamik açıdan incelemişlerdir. Çalışmalarının amacı bojiyi yorulma değerleri açısından incelemektir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada elde ettikleri gerilme değerlerini, bojinin hesaplanan değerleriyle karşılaştırdıklarında da benzer bir gerilme dağılımı bulmuşlardır. Hesaplanan gerilmeler ve çalışma sonucunda bulunan gerilmeler, kullanılacak malzeme için Goodman diyagramı oluşturmuş ve elde ettikleri sonuçların bu diyagramda bulunan güvenli alan içerisinde kaldığını görmüşlerdir. Bojiyi yorulma açısından emniyetli bulmuşlardır (Kim & Kim, 2005).

Sunar ve arkadaşı, bir çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak tek katlı yaprak yaylarda yorulma analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında yeni yaprak yay tasarımları için mümkün olan en az sayıda prototipin üretilmesi ve seri üretime en kısa sürede geçebilmesini sağlayacak bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yorulma ömrünü belirlemeden önce parabolik yaprak yay tasarımına ve yorulma ömrüne etki eden faktörleri incelemişlerdir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanarak tek katlı parabolik yaprak yay üzerinde gerilme ve yorulma analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri verileri, fiziksel test değerleri ile karşılaştırmış ve yorumlamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda yaptıkları yorulma ömrü çalışması ağır ve hafif ticari araçlarda kullanılan yaprak yayların tasarımında, prototip üretim sonrasında parça üzerinde uzun denemeler yapmadan, yorulma ömürlerine sonlu elemanlar analizi ile ulaşmanın mümkün olduğu sonucuna varmışlardır (Sunar & Çevik, 2015).

Sunar, Avrupa’da kullanılan Series1, Sicat S1.0, Sicat H1.0 gibi bir dizi havai hat tasarımında temas kuvveti ve seyir teli gerilim ilişkisini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Çalışmasında pantograf ve seyir teli etkileşiminin, havai hat dinamiklerinin incelenmesinde önemli bir rol oynadığından bahsetmiştir. Ayrıca havai hat bileşenlerinin yüksek hızda seyreden trenler nedeniyle dalgalı temas kuvvetlerine maruz kaldığını ve bu sebeple de pantograf ve kontak tellerinin etkileşiminin pantograf üzerinde bulunan karbon çubukların ömrünün tahmin edilmesinde önemli rol oynadığından söz etmiştir. Sonlu

elemanlar analizinde elde ettiği verilerle ön gerilim, hat uzunluğu, temas teli malzemesinin çeşidi ve gerilim-temas kuvveti arasında bir ilişki kurmuştur. Pantograf temas kuvvetinin seyir telinde oluşturduğu eğilme etkisini anlamak, ana hatlardaki potansiyel arızaların önceden tahmin edilmesine katkıda bulunacağı ve çeşitli havai hat tasarım parametrelerinin güvenilirliğinin belirlenmesinde önemli rol oynayacağı sonucuna varmıştır (Sunar, 2023).

Kütük, lowbed treyler araçları için rampa tasarımı yapmış ve bu tasarımın sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmasının amacı, tasarımının yaptığı lowbed treylerinin kritik gerilme altında kaynaklı bağlantı bölgelerini tespit etmek olmuştur. Gerçekleştirdiği analizden elde ettiği verilere göre, tasarladığı lowbed treyler üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilme değerleri 300 MPa ile 672 MPa arasında oluşmuştur. Sonuç olarak bu değer malzemenin akma sınırının çok altında olduğunu vurgulamıştır (Kütük, 2019).

Sarıkavak, bir çalışmada raylı sistem araçlarında yüksek hızlı yük taşımacılığı için araç tekerlek bileşenlerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmanın içerisinde artırılmış aks ve tekerlek yükleri, yüke frenleme koşullarına ve hıza bağlı oluşan diğer diğer dinamik etkilerin demiryolu araç tekerleklerinin tasarımında zorluklar oluşturduğundan bahsetmiştir. Bu kapsamda çalışmada dinamik yüklerin yanı sıra, yüksek hızlı yük taşımacılığı koşulları altında oluşan dinamik yük, hız ve frenleme parametreleri altında demiryolu tekerleklerinin gerilme analizini düz yol ve dar kurplu işletme şartları için simüle etmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirdiği çalışmanın sonucunda, tekerleklerde oluşan gerilme değerlerinin malzemenin akma sınırının üzerinde olduğu ve olası yük taşımacılığında, yeni sistemlerde mukavemeti yüksek alternatif malzemelerin kullanılması gerekliliği sonucuna varmıştır (Sarıkavak, 2023).

Şakacı, taşıtlarda meydana gelen kızaklama olayının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasının amacı kızaklama olayını etkileyen faktörleri araştırmak olmuştur. Öncelikle kızaklamayı önleyebilmek için lastik ve yol etkileşimini incelemiştir. Gerçekleştirdiği çalışmanın sonucunda elde ettiği verilere göre, tekerleğe yatayda ve açısız olarak başlangıç hızı tanımlanması durumunda denge durumuna gelmediğini ve dönerek ilerlemek yerine kayarak ilerlediği gözlemlemiştir. Bu problemi düzeltmek amacıyla lastiği daha küçük

zaman aralıklarında durgun pozisyonundan harekete geçirmek gerektiğinden bahsetmiştir (Şakacı, 2020).

Bozdağ ve arkadaşları, TCDD tarafından kullanılmakta olan vagonların verimliliğini artırmak ve iyileştirmeler yapmak amacıyla, demiryolu yolcu ve yük vagonlarında statik-dinamik deneysel gerilme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında demiryolu sektörünün son yıllarda tekrar hak ettiği öneme kavuşturulması gerektiğinden bahsetmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirdikleri analiz sonucunda; mevcut birtakım projelerdeki gerilme dağılımının düzensizliği, probleminin çözümü dahil olmak üzere, vagon daralarında %10'dan daha fazla iyileştirme yapılabileceği sonucuna varmışlardır (Bozdağ, Sünbülüğlu, Baysakaloğlu, Toprak, & Mugan, 2012).

Toprak ve arkadaşı, 2008 yılında TÜLOMSAŞ'da imal edilen konteyner vagonunun sayısal gerilme ve deformasyon analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadaki amaçları konteyner vagonunun işletme emniyetini sağlamak olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirdikleri yapısal analiz sonucunda vagon tasarımında iki ana girişin bojilere yakın bölümünde ve vagonun sağ ve sol kenarlarına yakın bulunan boylamasına girişlerin bazı konumlarında oluşan gerilmelerin yüksek olduğu, bu nedenle vagon tasarımında bu bölgelere takviyeler konularak tasarımın güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır (Toprak & Bozdağ, 2008).

Özsoy, bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışmada vagon üzerinde yapılan deneylerin uzun sürdüğü ve maliyetli olduğunu öne sürerek TVS 2000 yolcu vagonuna sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapısal analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmasının amacı tasarım aşamasındaki TVS 2000 yolcu vagonlarının statik yükleme deneylerini bilgisayar ortamında yaparak yüksek tasarım, imalat ve deney harcamalarını azaltmak olmuştur. Yapısal analiz sırasında üç boyutlu elastik giriş ve üç boyutlu elastik kabuk eleman kullanan Özsoy, yaptığı analiz sonucunda TVS 2000 vagonunun uygulanan deneylerin çoğundan başarıyla geçtiğini ve emniyetli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmıştır (Özsoy M. , 1998).

Bu çalışmalardan anlaşılacağı gibi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan yapısal analizler, demiryolu vagonlarının ve komponentlerinin emniyetini artırmak ve taşıma güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bu yöntemler, vagon tasarımında malzeme seçimi, yapısal optimizasyon ve titreşim analizi gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

3. METOT

Bu tez çalışmasında, Falns tipi vagona sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz gerçekleştirilecektir. Çalışma, yapısal analiz yöntemlerini kullanarak Falns tipi yük vagonunda kapsamlı bir değerlendirme sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın metodolojik adımları aşağıdaki gibidir.

3.1. Teorik

Demiryolu taşımacılığı, ağır yüklerin emniyetli, ekonomik ve çevre dostu bir şekilde taşınması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemlerde kullanılan vagonların dayanıklılığı ve emniyeti, taşıma operasyonlarının kesintisiz bir şekilde sürdürülmesi için önemli bir gerekliliktir. Demiryolu vagonları gibi yüksek yük taşıma kapasitesine sahip araçlarda, çekme kuvvetine maruz kalan yapısal elemanların dayanımları ve davranışları detaylı mühendislik analizleri gerektirmektedir. Bu analizlerde, gerilme türleri (çekme, basma, kayma, şekil değiştirme) gibi mekanik kavramlar, vagonun güvenliğini ve performansını belirlemede temel rol oynamaktadır.

Gerilme ve şekil değiştirme kavramları, bir vagonun karmaşık yükleme koşullarında nasıl bir davranış sergileyeceğini anlamak için mühendislik analizlerinde vazgeçilmez araçlardır. Vagon şasisi, çeki-demir sistemi, tamponlar ve tekerlek-mil bağlantıları gibi bileşenler hem statik hem de dinamik yükler altında bu tür mekanik etkilerle karşılaşır. Çekme kuvveti testleri, vagonların dayanım limitlerini ve akma ya da plastik deformasyon gibi kritik malzeme davranışlarını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu testlerden elde edilen veriler, eşdeğer gerilme, elastisite modülü ve poisson oranı gibi mekanik parametreler kullanılarak analiz edilir. Bu kavramları detaylı olarak açıklarsak;

Eşdeğer gerilme; karmaşık gerilme durumlarını tek bir skaler değer ile ifade etmek için kullanılan bir kriterdir. Von-Mises gerilmesi, malzemenin plastik şekil değişimiyle akma durumunu belirlemek için kullanılır. Aşağıda Von-Mises gerilmesinin matematiksel formülü verilmiştir (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.1)$$

Eşdeğer gerilme formülünde; σ_{vm} eşdeğer gerilmeyi, σ_1 , σ_2 , σ_3 ana gerilme değerlerini ifade etmektedir.

Çekme gerilmesi; malzemeye dışarı doğru etki eden kuvvetlerin oluşturduğu gerilme türüdür. Çekme kuvveti malzemeyi uzatma eğilimindedir. Aşağıda çekme gerilmesinin matematiksel formülü verilmiştir (Burman, Hansbo, & Larson, 2018).

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

Çekme gerilmesi formülünde; σ_t çekme gerilmesini (Pa), F çekme kuvvetini (N), A kesit alanı (m^2) ifade etmektedir.

Basma gerilmesi; malzemeye içeri doğru etki eden kuvvetlerin oluşturduğu gerilme türüdür. Basma kuvveti malzemeyi sıkıştırma eğilimdedir. Aşağıda basma gerilmesinin matematiksel formülü verilmiştir (Burman, Hansbo, & Larson, 2018).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

Basma gerilmesi formülünde; σ_c basma gerilmesini (Pa), F basma kuvvetini (N), A kesit alanı (m^2) ifade etmektedir.

Şekil değiştirme; malzemenin başlangıç boyutuna göre uzama veya kısalma oranıdır. Bir uzunluğun başka bir uzunluğa oranı olduğu için birimsiz bir nicelik olarak tanımlanabilir. Aşağıda şekil değiştirmenin matematiksel formülü verilmiştir (Burman, Hansbo, & Larson, 2018).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4)$$

Şekil değiştirme formülünde; ϵ şekil değiştirmeyi, ΔL uzama veya kısalma miktarını (m), L_0 malzemenin başlangıç uzunluğunu (m) ifade etmektedir.

Kayma gerilmesi; malzemenin paralel düzlemler arasında oluşan kayma kuvvetlerinin etkisiyle oluşan gerilme türüdür. Aşağıda kayma gerilmesinin matematiksel formülü verilmiştir (Burman, Hansbo, & Larson, 2018).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Kayma gerilmesi formülünde; τ kayma gerilmesini (Pa), F kayma kuvvetini (N), A kayma yüzey alanını (m^2) ifade etmektedir.

Elastisite modülü; malzemenin gerilme altında ne kadar şekil değiştirebileceğini belirleyen elastiklik ölçüsüdür. Aşağıda elastisite modülünün matematiksel formülü verilmiştir (Burman, Hansbo, & Larson, 2018).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.6)$$

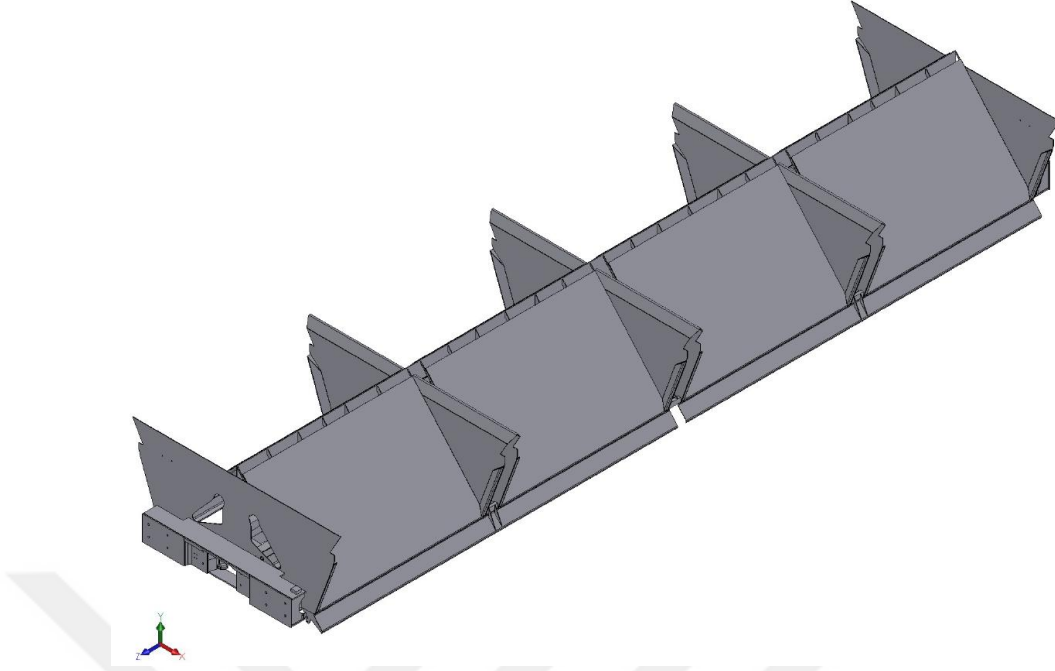
Elastisite modülü formülünde; E elastisite modülünü, σ gerilme değerini, ϵ şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

3.2. Araştırma

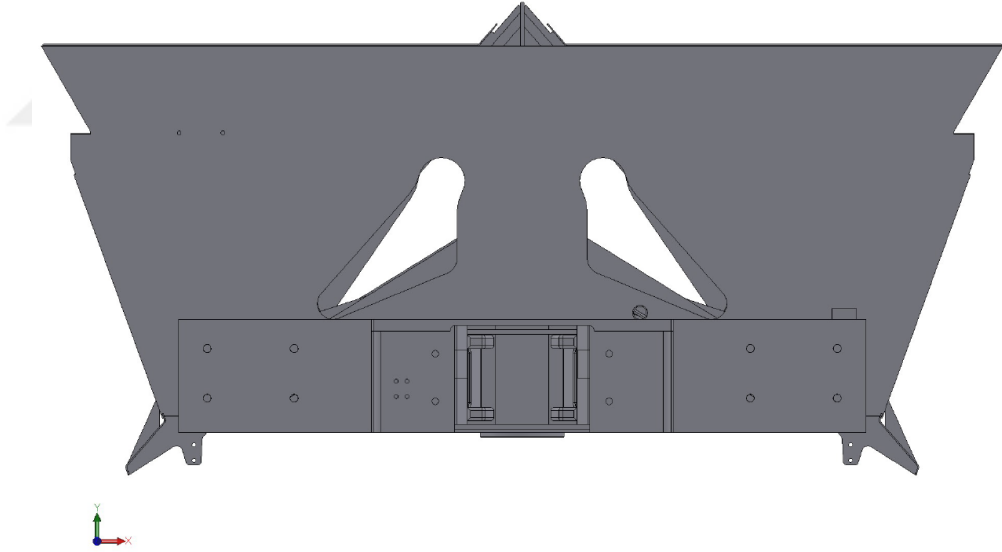
Çalışma, Falns tipi vagonun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çekme kuvveti testine tabi tutulduğunda maruz kaldığı yüklerin değerlendirilmesi için yapılmıştır. Farklı yönlerde oluşan eşdeğer gerilmeler, maksimum çekme gerilmeleri ve toplam şekil değiştirme değerleri çalışmanın bulgular kısmı içerisinde incelenecektir. Demiryolu vagonlarının emniyet ve dayanıklılık standartlarını karşılayıp karşılamadığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilecek bu çalışma öncesinde literatür taramasında içerisinde birçok çalışmada olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve yapısal analizlerin mühendislik uygulamaları üzerindeki çalışmalar incelenmiştir. Analiz için bilgisayar destekli tasarım programında vagonun modeli oluşturulmuş ve bu vagon modeli üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

3.3. Üç Boyutlu Katı Modelin Hazırlanması

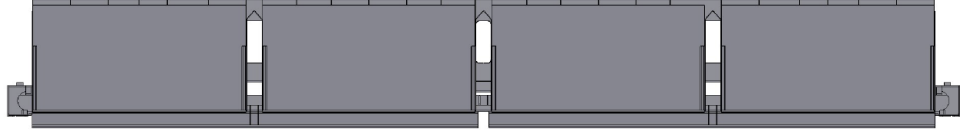
Vagonun ana boyutları ve geometrisi üç boyutlu model olarak TÜRASAŞ'tan temin edilmiştir. Üç boyutlu model içerisindeki parçalar ayrı ayrı incelenmiş, parça geometrileri ve malzeme bilgileri kontrol edilmiştir. Montaj içerisinde, bütün ölçüler orta eksen üzerine taşınarak uygun gelmeyen geometrilerde basitleştirmeler ve düzeltmeler yapılmıştır. Parçaların hepsi tek olarak eklenmiş ve montaj üzerinde 4 ana komponent oluşturulmuştur. Bu komponentler vagon-boji birleşim yeri, tampon ve cer tertibatı, ana taşıyıcı orta sac ve şasi olmak üzere vagon kompleksini oluşturmaktadır. Oluşan vagon modelinin ölçüleri uzunluk 11300 mm, genişlik 3100 mm, yükseklik 1521 mm şeklindedir. Aşağıdaki Şekil 3.1'de sonlu elemanlar yönteminin uygulanacağı üç boyutlu vagon modelinin izometrik görünüşü, Şekil 3.2'de modelin ön görünüşü ve Şekil 3.3'te modelin yan görünüşü, Şekil 3.4'te modelin alt görünüşü verilmiştir.



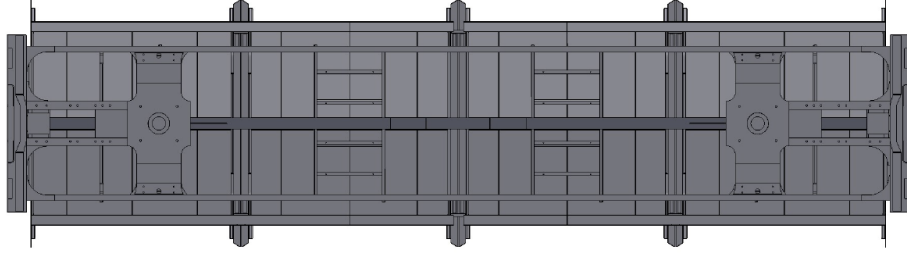
Şekil 3.1. Üç boyutlu vagon modeli (izometrik görünüş)



Şekil 3.2. Üç boyutlu vagon modeli (ön görünüş)

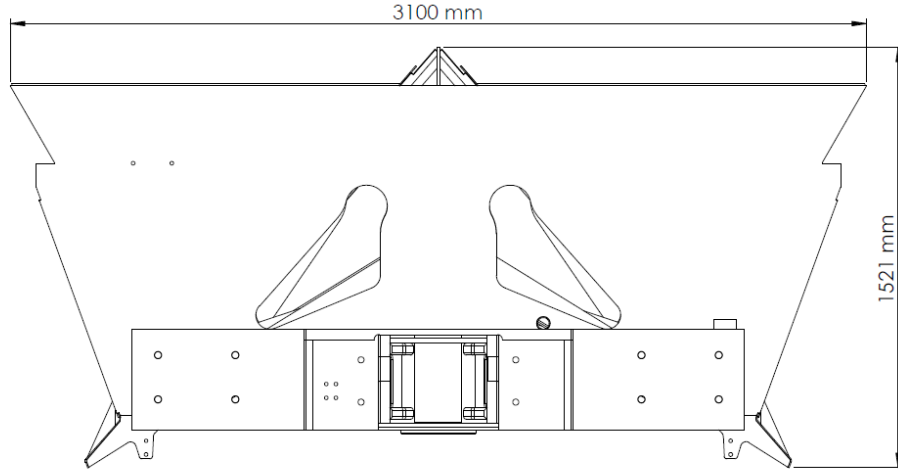


Şekil 3.3. Üç boyutlu vagon modeli (yan görünüş)



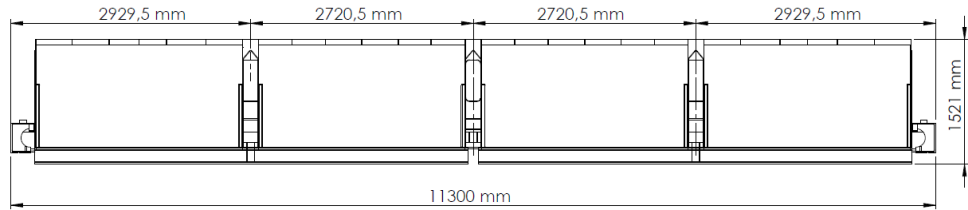
Şekil 3.4. Üç boyutlu vagon modeli (alt görünüş)

Vagona ön görünüşten baktığımızda, yükseklik ve genişlik değerleri sırasıyla 1521 mm ve 3100 mm'dir. Şekil 3.5'te teknik resim ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Ön görünüş, yükseklik ve genişlik değerleri

Vagona yan görünüşten baktığımızda uzunluk 11300 mm'dir. Ayrıca orta eksenenden simetrik ölçüler vagonu iki eşit parçaya ayırmaktadır. Bu sebeple vagon modelinde yapısal analiz gerçekleştirilirken dörtte bir simetriği (çeyrek model) kullanılacaktır. Şekil 3.6'da vagonun uzunluk ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yan görünüş ve uzunluk değerleri

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz uygulanacak vagon modelinin montaj sonrası hali yukarıdaki Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te görülmektedir. Bu vagon modeline eleman ağı (meshing) uygulaması yapılacaktır. Daha sonra çalışma içerisinde bahsedilen ilgili standartlarda belirtilmiş yüklemeler uygulanarak yapısal analiz gerçekleştirilecektir.

3.4. Analiz Hazırlık Süreci

TÜRASAS'tan temin edilen ve Solidworks yazılımı kullanılarak 4 ana komponente ayrılan vagon modelinin, Ansys Workbench yazılımında sonlu elemanlar yöntemi

kullanarak yapısal analiz gerçekleştirebilmek için, öncelikle çeyrek model üzerinde farklı boyutlarda eleman ağları oluşturulacak ve bu eleman ağı boyutları üzerinde yakınsama analizi gerçekleştirilecektir. Yakınsama analizinin yapılmasının sebebi, hangi eleman ağı boyundan sonra model üzerindeki değerlerin değişmediğini bulmaktır. Modele en uygun eleman ağı boyutu bulunduğundan sonra analiz içerisinde kuvvetin farklı noktalardaki etkileri gözlemlenecek ve eşdeğer gerilmeler, maksimum çekme gerilmeleri ve toplam şekil değiştirmeler incelenecektir. Analiz çalışmasında, EN ve UIC standartlarında belirtilen kuvvetler uygulanacaktır.

Mesh (eleman ağı), mühendislik ve bilimsel analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi yapısal simülasyon yöntemlerinde, fiziksel bir sistemin matematiksel olarak modellenmesi için oluşturulan ağ yapısını ifade etmektedir. Mesh yapısal analiz gerçekleştirilecek modelin geometrisini daha küçük ve yönetilebilir elementlere bölünmesidir. Mesh boyutları ne kadar küçük ve yönetilebilir olursa, analiz sonucu gerçek değerlere o kadar yakın olacaktır.

Mesh bağımsızlığı sağlamak için vagon modeli Ansys Workbench analiz programına yüklenmiş ve eleman ağları oluşturulmuştur. Model üzerinde çalışmayı kolaylaştırmak amacıyla çeyrek model hazırlanmış ve çeyrek model üzerinde çalışılmıştır. Mesh boyutları kademeli olarak azaltılarak mesh bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. Mesh boyutları ve çeyrek modelde elde edilen element sayıları Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Mesh boyuna göre oluşan element sayıları

Mesh Boyu	Çeyrek Model Element Sayısı	Tam Model Element Sayısı
16mm	237221	948844
14mm	274318	1097272
12mm	298400	1193600
10mm	403459	1613836
8mm	650760	2603040

Mesh bağımsızlığını bulabilmek için yukarıdaki Tablo 3.1’de gösterilen element sayılarıyla beraber modele kuvvet uygulanması gerekmektedir. Bunun için ilgili standartlarda belirtilen 100 ton (1000 kN) çekme kuvveti uygulanmıştır. Değerleri karşılaştırmak için tüm yönlerdeki eşdeğer gerilmeler, maksimum çekme gerilmeleri ve toplam yer değiştirme gibi değerler incelenmiştir. Mesh bağımsızlık çalışmasından elde edilen verilere göre 12 mm mesh boyu analizi yapılacak vagon modeli için bağımsız mesh

oluşturmaktadır. Modele 1000 kN kuvvet uygulanarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 3.2’de toplam şekil değiştirme, Tablo 3.3’te toplam yer değiştirme ve Tablo 3.4’te maksimum çekme gerilmesi olarak gösterilmektedir.

Tablo 3.2 1000 kN kuvvet uygulandığında toplam şekil değiştirmeler

Mesh Boyu	Toplam Şekil Değiştirme	Yüzde Değişim Oranı
16 mm	265,82 MPa	
14 mm	296,73 MPa	%11,64
12 mm	329,67 MPa	%11,12
10 mm	329,99 MPa	%0,097
8 mm	330,17 MPa	%0,055

Tablo 3.3. 1000 kN kuvvet altında toplam yer değiştirmeler

Mesh Boyu	Toplam Yer Değiştirme
16 mm	1,0364 mm
14 mm	1,1582 mm
12 mm	1,2857 mm
10 mm	1,2863 mm
8 mm	1,2869 mm

Tablo 3.4. 1000 kN kuvvet altında maksimum çekme gerilmeleri

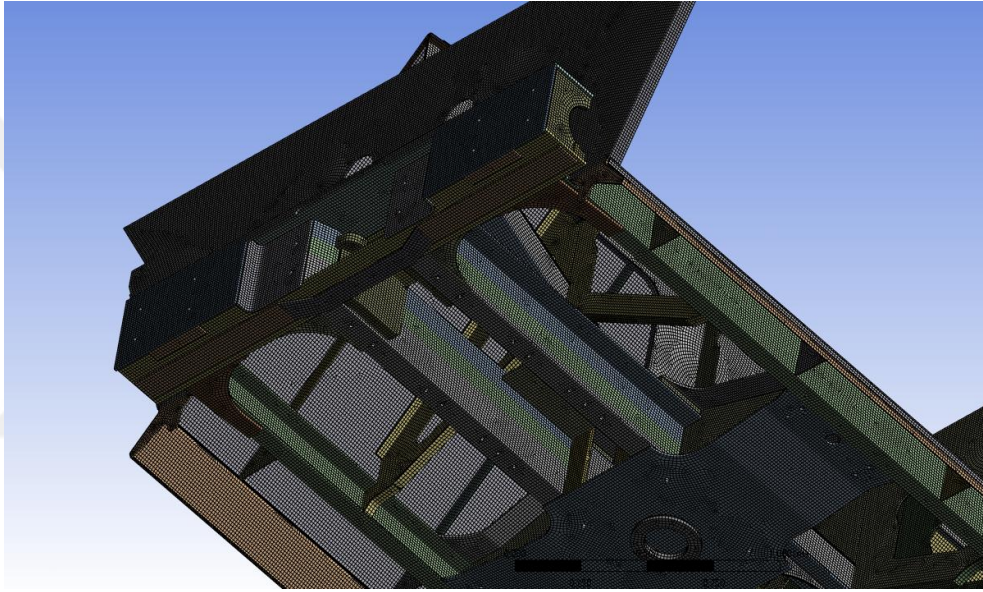
Mesh Boyu	Maksimum Çekme Gerilmeleri
16 mm	428,91 MPa
14 mm	478,99 MPa
12 mm	531,86 MPa
10 mm	532,01 MPa
8 mm	532,29 MPa

Yukarıdaki değerleri incelediğimizde mesh boyutu 16 mm’den 14 mm’ye düşürüldüğünde şekil değiştirme değeri %11,64 oranında, mesh boyu 14 mm’den 12 mm’ye düşürüldüğünde %11,12 oranında, mesh boyu 12 mm’den 10 mm’ye düşürüldüğünde %0,097 oranında, mesh boyu 10 mm’den 8 mm’ye düşürüldüğünde ise değerin %0,055 oranında değiştiği görülmektedir. 12 mm mesh boyutundan sonra değerlerde %5’ten daha büyük bir değişim olmadığı için modelin 12 mm’de meshten bağımsız hale geldiği ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz gerçekleştiriminin uygun olduğu anlaşılmaktadır. Aşağıdaki Tablo 3.5’te tüm değerlerin incelendiği meshten bağımsız hale getirme çalışmasının sonucu gösterilmektedir (Morin, Siebert, & Veaser, 2007).

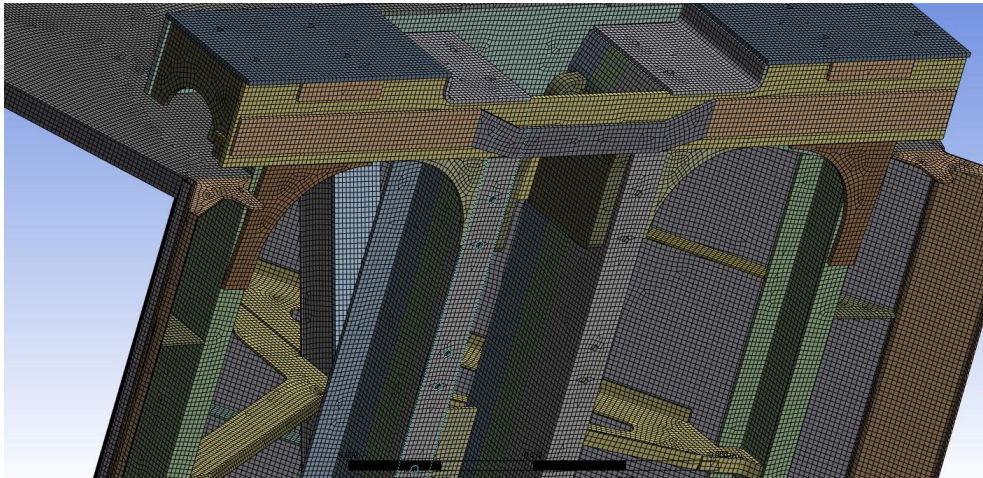
Tablo 3.5. *Mesh bağımsızlık çalışması*

Mesh Boyu	Element Sayısı	Şekil Değiştirme	Yer Değiştirme	Maksimum Çekme
16 mm	237221	265,82 MPa	1,0364 mm	428,91 MPa
14 mm	274318	296,73 MPa	1,1582 mm	478,99 MPa
12 mm	298400	329,67 MPa	1,2857 mm	531,86 MPa
10 mm8 mm	403459	329,99 MPa	1,2863 mm	532,01 MPa
	650760	330,17 MPa	1,2869 mm	532,29 MPa

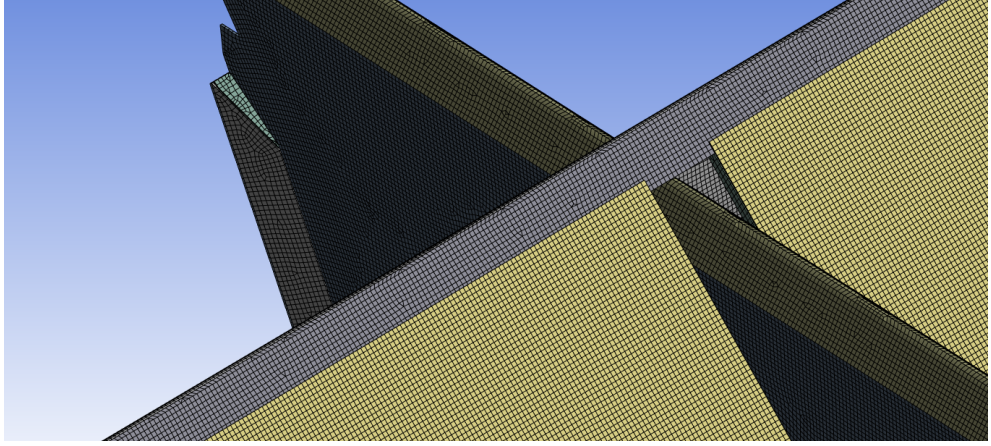
Mesh bağımsızlığı elde edildikten sonra 12 mm mesh uygulanan vagona ait eleman ağı örüntüsü Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.7. *Eleman ağı örüntüsü 1*



Şekil 3.8. *Eleman ağı örüntüsü 2*



Şekil 3.9. Eleman ağı örüntüsü 3

Oluşturulan eleman ağının doğruluğunu ve kalitesini anlayabilmek için aspect ratio (açıklık oranı) ve skewness (çarpıklık katsayısı) değerleri incelenmelidir. Bu değerler analiz sonuçlarının doğruluğu ve güvenilebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Aspect ratio bir diğer adıyla en-boy oranı olarak da tanımlanmaktadır. Dörtgen elemanlar için elemanın eninin boyuna oranıdır. Yüksek aspect ratio değeri oluşturulan elemanların şekil bozukluğu gösterdiğini, düşük aspect ratio ise daha düzgün bir yapı oluştuğunu ifade eder. Aspect ratio için en iyi değer 1'dir. Bu değer 0'a yaklaştıkça kalite azalmaktadır. Aspect ratio'yu matematiksel olarak ifade edersek;

$$Aspect\ Ratio = \frac{W}{H} \quad (3.7)$$

Aspect ratio formülünde; W genişlik değerini, H yükseklik değerini ifade etmektedir.

Ortalama aspect ratio değeri 5'ten küçük olmalıdır. Maksimum değer ise 10'dan küçük olmalıdır. Bu aralıklar dışında bir değer çıkması, eleman deformasyonu yüksek anlamı taşımaktadır. Analiz sonuçlarında sapmalar görülebilir. Yapısal analiz gerçekleştirilecek olan vagona uygulanan eleman ağını incelediğimizde ortalama aspect ratio değeri 4,82'dir. Maksimum aspect ratio değeri ise 8,27'dir. Bu değerler kabul edilebilir sınırların içerisinde ve analiz sonuçlarında büyük bir sapmaya sebep olmayacaktır.

Skewness (çarpıklık katsayısı), oluşturulan eleman ağının simetrik olup olmadığını ve dağılımın hangi yönde eğilim gösterdiğini belirten bir ölçüdür. Bu değer ideal açı

değerlerine göre hesaplanmalıdır. İdeal açı değerlerine örnek verirse eşkenar üçgen için 60° , kare veya dörtgen diğer elemanlar için 90° olmalıdır. Skewness değeri 0 ile 1 arasında bir oran olarak değerlendirilmektedir. Değer 0'a yaklaştıkça kalitesi artmakta, 1'e yaklaştıkça kalitesi düşmektedir. Skewness değerini formül olarak aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz.

$$Skewness = \frac{Maksimum\ Açı - İdeal\ Açı}{İdeal\ Açı} \quad (3.8)$$

Skewness değerlerinin eleman kalitesine göre anlamları aşağıdaki Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

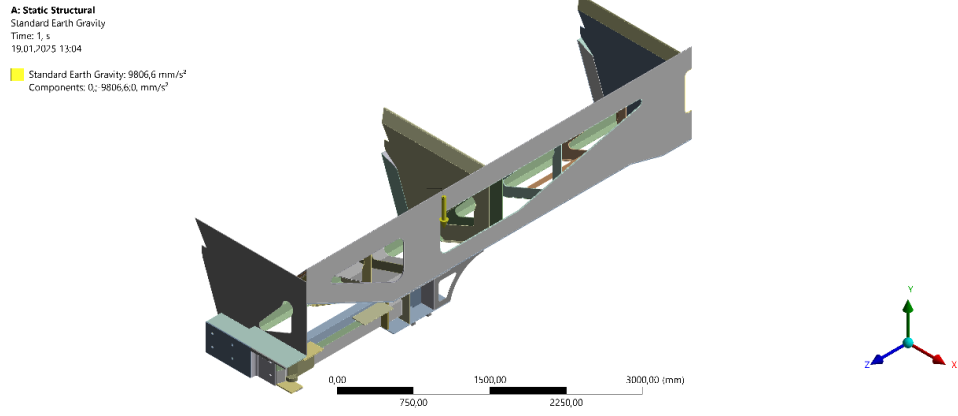
Tablo 3.6. Skewness değerleri ve anlamları (Sunar, 2023)

Skewness Değeri	Eleman Kalitesi	Açıklama
0,0 – 0,25	Mükemmel	Yüksek kaliteli mesh, analiz sonuçları oldukça güvenilir.
0,25 – 0,5	İyi	İyi kaliteli mesh, doğruluk oranı oldukça yüksek
0,5 – 0,75	Orta	Analiz için kabul edilebilir, sonuçlarda büyük sapmalar olmaz
0,75 - 1	Kötü	Kötü kaliteli mesh, düzeltilmesi önerilir

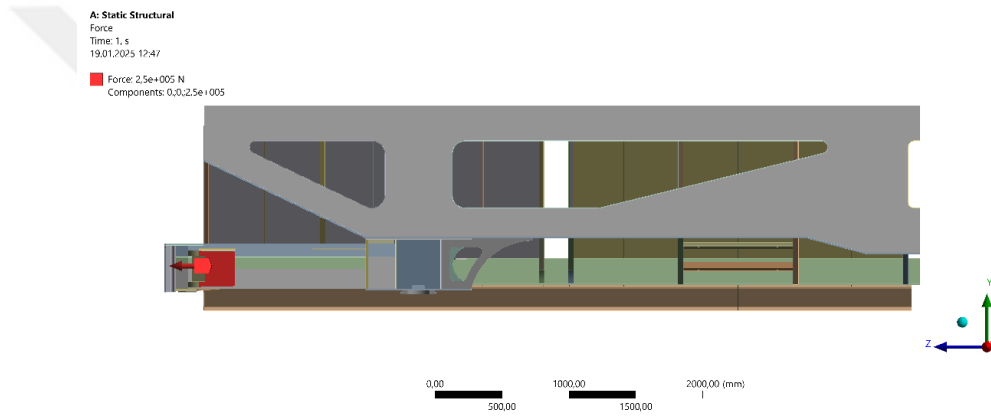
Analiz gerçekleştirilecek olan vagona uygulanan eleman ağının skewness değerleri incelendiğinde ortalama değer 0,27'dir. Bu oran iyi kaliteli olduğu ve doğruluk oranının oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

3.5. Sınır Şartları

Analize başlamadan önce sınır şartları belirlenmiştir. Vagonun x-doğrultusundaki hareket serbestliği kısıtlanmış, z-doğrultusundaki hareketi serbest bırakılmıştır. Vagona uygulanan simetrik çekme kuvveti z-doğrultusunda +z yönünde 500 kN, -z yönünde 500 kN, toplamda 1000 kN olarak uygulanmıştır. -y yönünde standart yer çekimi ivmesi uygulanmıştır. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de çeyrek vagon modeli üzerinde eksenler, doğrultular ve ilgili noktalar gösterilmektedir.

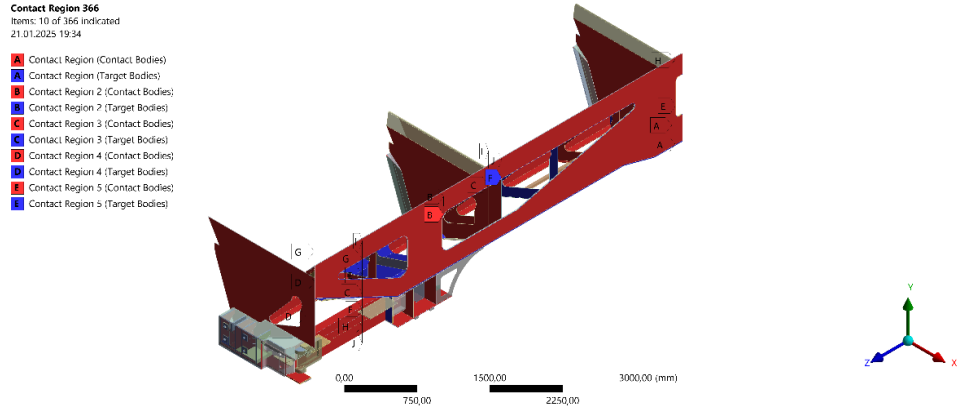


Şekil 3.10. Çeyrek vagon modelinin izometrik görünüşü ve yer çekimi ivmesi



Şekil 3.11. Çeyrek vagon modelinde z-doğrultusu ve kuvvet uygulama noktası

Vagon parçaları arasında, çeyrek modelde 366 adet olmak üzere toplamda 1464 adet contact/bounded (temas/sınır) noktası belirlenmiştir. Bu noktalar parçaların ve yüzeylerin birbirine bağlı olduğunu ifade etmektedir. Analiz sırasında bu noktalar bir aradaymış gibi tepki verecektir. Aşağıda Şekil 3.12’de çeyrek model üzerindeki bazı temas ve sınır noktaları gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Temas ve sınır noktaları

Vagon modelinde bulunan parçaların malzemeleri, yapısal çelik S355 olarak tanımlanmıştır. S355 çeliği, yüksek mukavemetli bir çelik sınıfıdır ve genellikle ağır yük taşıyan yapılarda kullanılmaktadır. EN 10025-2 standartlarında belirtilen S355 yapısal çeliğin özellikleri aşağıdaki Tablo 3.7’de gösterilmiştir. Bu standart haddelenmiş yapısal çeliklerin özelliklerini kapsar.

Tablo 3.7. EN 10025 standartlarına göre S355 yapısal çeliğin özellikleri (EN 10025, 2004)

Özellik	Değer
Akma Dayanımı	355 MPa
Çekme Dayanımı	460 MPa
Yoğunluk	7850 kg/m ³
Elastisite Modülü	210 GPa (2x10 ¹¹ N/m ²)
Poisson Oranı	0.3

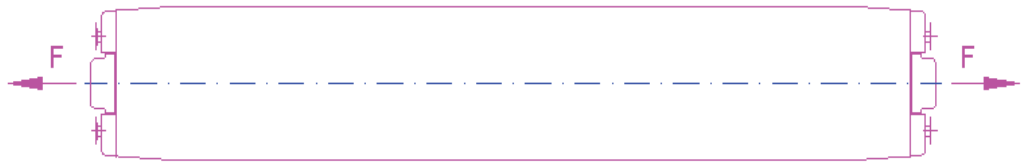
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz

Vagonun sonlu elemanlar yöntemiyle analizini gerçekleştirmek için ilgili uluslararası standartlarda tanımlanan statik yüklemeler uygulanmıştır. Standartların tanımladığı bu yük değerleri, vagonun normal işletme şartlarında karşılaştığı statik ve seyir sırasında oluşan dinamik kuvvetlerin simülasyonudur. Aşağıdaki EN ve UIC standartlarında belirtildiği gibi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz gerçekleştirilecek vagon modeline, ilgili uluslararası standartlara uygun olarak vagon boş iken ön ve arka cer tertibatından uygulanan 100 ton (1000 kN) çekme kuvveti uygulanmıştır.

EN standartları içerisinde EN 12663-1 demiryolu taşıt gövdelerinin yapısı ile ilgili kurallar metninde 6.1 maddesi ve EN 12663-2 standartları demiryolu taşıt gövdeleri ve

yük vagonları için başlıca geçerlilik yöntemlerini kapsar. Yüklemelerin tanımları, testlerin uygulanma şartları, elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Demiryolu taşıt gövdelerinin yapısal gereklilikleri metnin 5.2 maddesi demiryolu uygulamaları için yapısal gereksinimleri düzenler. Çekme ve sıkıştırma kuvvetleri bu standart altında tanımlanır. Yolcu ve yük vagonları için statik çekme kuvveti 1000 kN olarak uygulanabilir (EN 12663-1, 2012) (EN 12663-2, 2013).

UIC standartları (Union Internationale des Chemins de fer) uluslararası demiryolları birliği, demiryolu taşımacılığında uluslararası teknik standartlar kümesidir. Bu standartlar, demiryolu ürünlerinin ve hizmetlerin güvenliğini, performansını ve çevre dostluğunu ortak bir demiryolu adı altında birleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. UIC 577, vagonların mekanik dayanıklılığını düzenleyen teknik şartnamedir. Bu teknik şartname demiryolu taşıt gövdeleri için asgari yapı ilgili kuralları kapsar. Yüklemelerin tanımları, testlerin uygulanma şartları, elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler ile ilgili bilgiler bu şartnamede yer almaktadır. UIC 577 metninin 4.5 maddesinde yük vagonlarına genellikle 850 kN ile 1000 kN arasında bir çekme kuvveti uygulandığı tanımlanmıştır. Bu şartname, vagonların uluslararası taşımacılıkta kullanılabilmesi için gerekli mekanik dayanıklılığı garanti eder. UIC ve EN standartlarında belirtilen cer tertibatından uygulanan 100 ton (1000 kN) simetrik çekme kuvveti yükleme senaryosu aşağıdaki Şekil 3.7’de verilmiştir (UIC 577, 2012).



Şekil 3.13. UIC ve EN standartlarında belirtilen 100 ton simetrik çekme kuvveti

Yukarıda tanımlanan yükleme durumu vagonun katı modeline uygulanmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz sonucunda eşdeğer gerilmeler, çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Elde edilen veriler bulgular kısmında detaylandırılmıştır.

Analizler için 14 çekirdekli, 12th Gen Intel® Core™ i7-12700H işlemcili 16 GB RAM özelliklerine sahip NVIDIA GeForce RTX 3060 bilgisayar kullanılmıştır. Bu bilgisayar kullanılarak yapılan tek bir analiz yaklaşık olarak 7 saat sürmüştür.

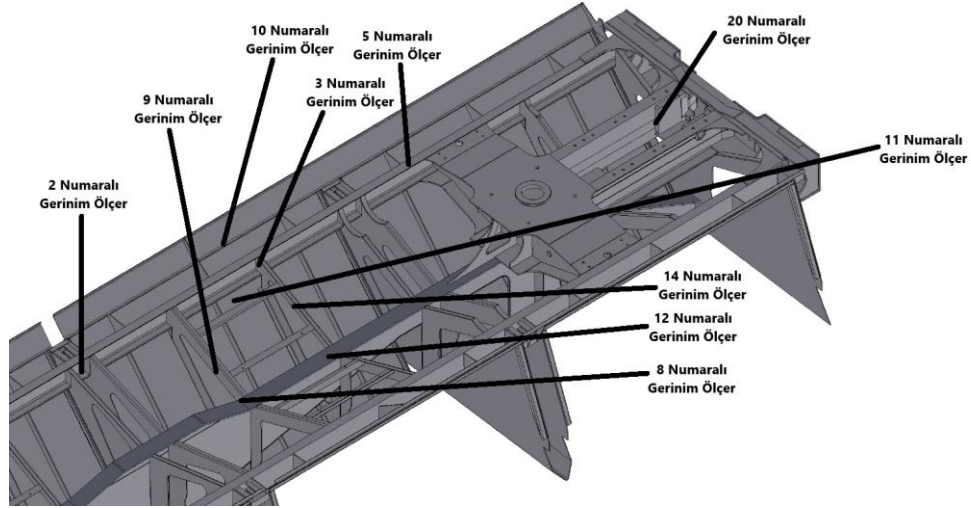
4. SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

TÜDEMSAŞ A.Ş. 'nin Sivas tesisinde prototipi üretilen Falns tipi yük vagonuna, TÜRASAŞ Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş.'nin talebi üzerine Eskişehir'de bulunan TÜRASAŞ tesislerinde deneysel statik ve gerilme-titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel test sonucu, gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarının doğrulanması amacı ile kullanılmıştır. Test sırasında yükleme koşulu olarak ilgili standartlarda belirtilen, vagon boş iken hidrolik yükleme sistemi ile 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu çekme kuvveti uygulanırken prototip test vagonunun şasisi ve gövdesi üzerinde oluşan gerilme değerlerini gözlemleyebilmek için değişik konumlara gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Statik testlerde gerilme ve deformasyon analizlerini yapmak için ölçüm sistemi olarak, 128 kanallı ve her tip algılayıcının bağlanabildiği bir veri toplama sistemi kullanılmıştır. Yerleştirilen bu gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri konumları tanımlamak için belirli bir kodlama sistemi kullanmışlardır. Bu kodlama sisteminde verilen numaralar ile bilgisayar ortamında yapısal analizi gerçekleştirilmiş olan vagon modelinde denk gelen yerlerin node (düğüm noktası) numaraları eşleştirilmiştir. Sonuçların doğrulanması bölümünde deneysel test sonuçları ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki Tablo 4.1'de vagon şasisinin üzerine yapıştırılan gerinim ölçerlerin numaraları ve analiz ortamında bu gerinim ölçer numaralarına denk gelen düğüm noktası numaralarının konumları hakkında bilgi verilmiştir (Toprak & Bozdağ, 2009).

Tablo 4.1. Deneysel test sırasında verilen gerinim ölçer numaraları, analiz düğüm numaraları ve konumlar

Gerinim Ölçer	Düğüm Noktası	Konum
2	281748	Ana boy kiriş ortası
3	103365	Ana taşıyıcı destek sacı
5	270791	Ana taşıyıcı sac
8	127525	Ana destek sacı
9	129764	Ana destek sacı
10	259784	Ana taşıyıcı kiriş
11	279078	Ana taşıyıcı kiriş
12	102973	Ana destek sacı
14	1776	Destek sacı
20	62711	Tampon profili

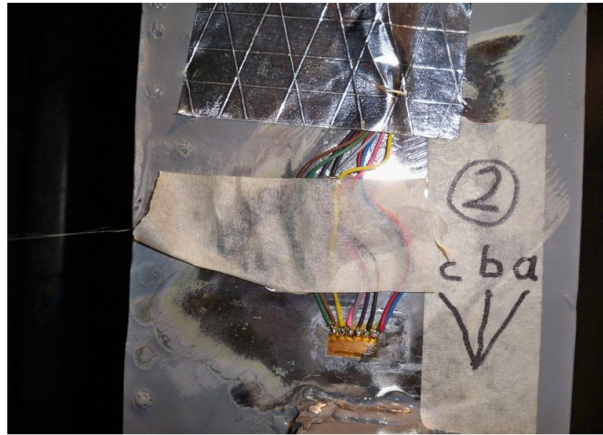
Vagon üzerindeki gerinim ölçerlerin bulunduğu yaklaşık konumlar aşağıdaki Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Vagon üzerindeki gerinim ölçerlerin konumları

Ölçüm konumları için verilen gerinim ölçer numaralarının deneysel test sırasındaki durumları görselleştirilmiştir. Aşağıda, gerinim ölçerlerin deneysel test sırasındaki durumları ve bu noktalarda ölçülen eşdeğer gerilme değerlerinden bahsedilmiştir.

Vagon boş iken ön ve arka taraflarında bulunan cer tertibatı konumlarından 100 ton simetrik çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu çekme kuvveti uygulanırken, 2 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 58,1 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.2’de 2 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



Şekil 4.2. 2 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 3 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 10,9 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.3’te 3 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



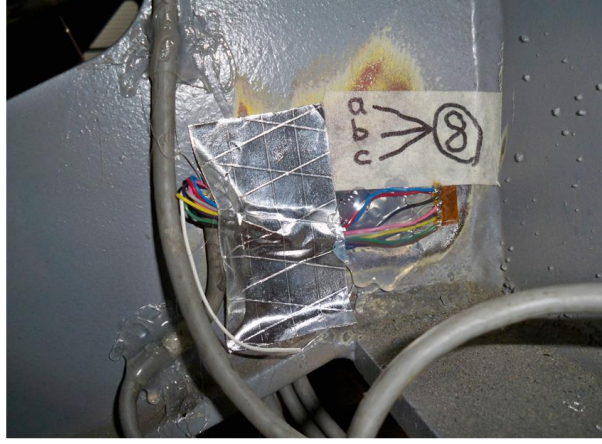
Şekil 4.3. 3 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 5 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 47,4 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.4'te 5 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



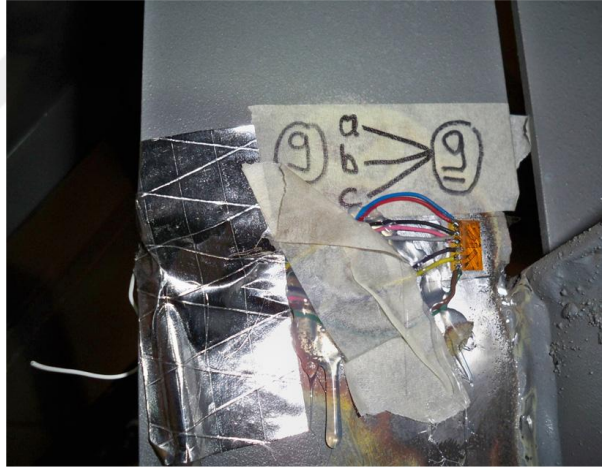
Şekil 4.4. 5 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 8 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 6,7 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.5'te 8 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



Şekil 4.5. 8 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 9 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 17 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.6’da 9 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



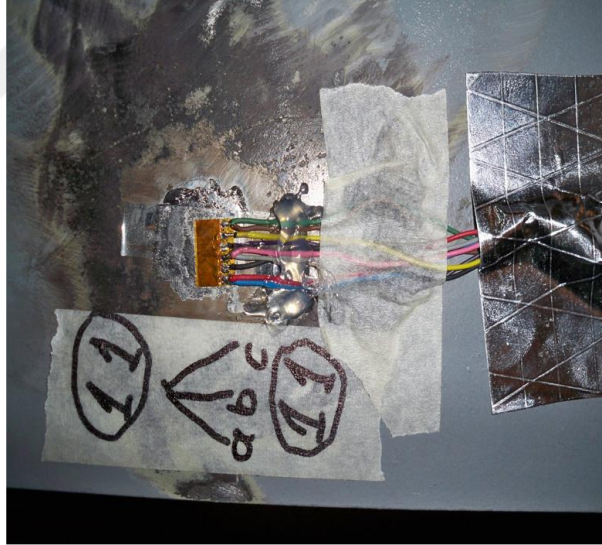
Şekil 4.6. 9 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 10 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 43,9 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.7’de 10 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



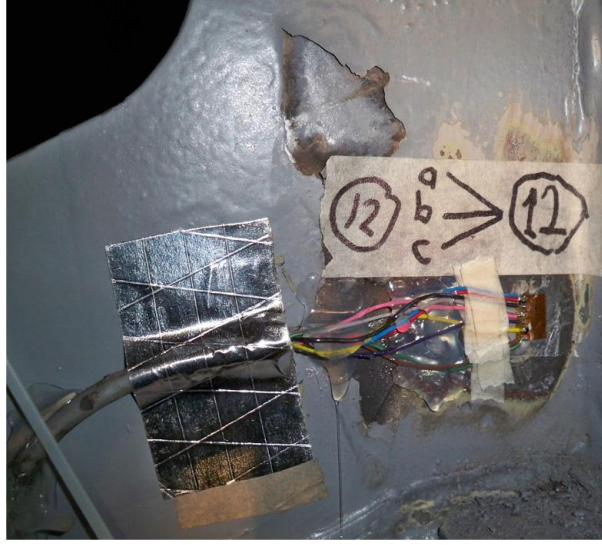
Şekil 4.7. 10 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 11 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 55 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.8’de 11 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



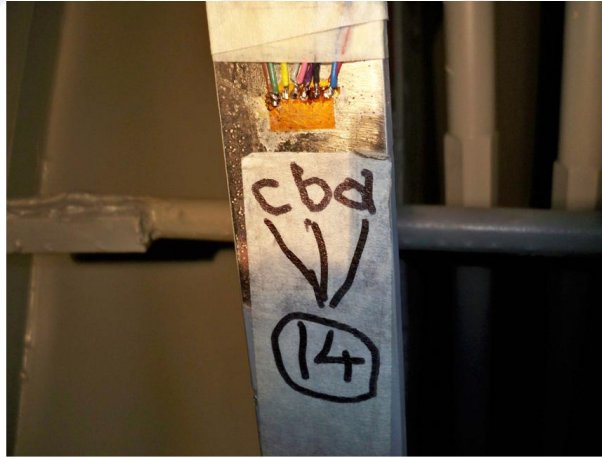
Şekil 4.8. 11 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 12 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 5,7 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.9’da 12 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



Şekil 4.9. 12 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 14 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 4,7 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.10'da 14 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



Şekil 4.10. 14 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

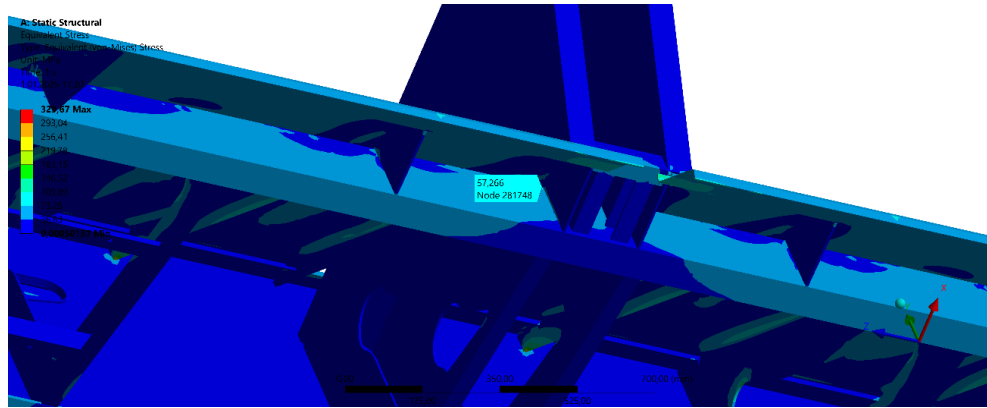
100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 20 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konumda eşdeğer gerilme değeri maksimum 70,6 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.11'de 20 numaralı gerinim ölçer görülmektedir.



Şekil 4.11. 20 numaralı gerinim ölçer (Toprak & Bozdağ, 2009)

Deneyisel test çalışmasında verilen her bir gerinim ölçer numarası, analiz gerçekleştirilen vagon modeli üzerinde yaklaşık olarak bir konuma denk gelmektedir ve bu konumlar, düğüm noktası (node) numaraları ile belirtilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme değerleri deneysel test verileri ile karşılaştırılacaktır.

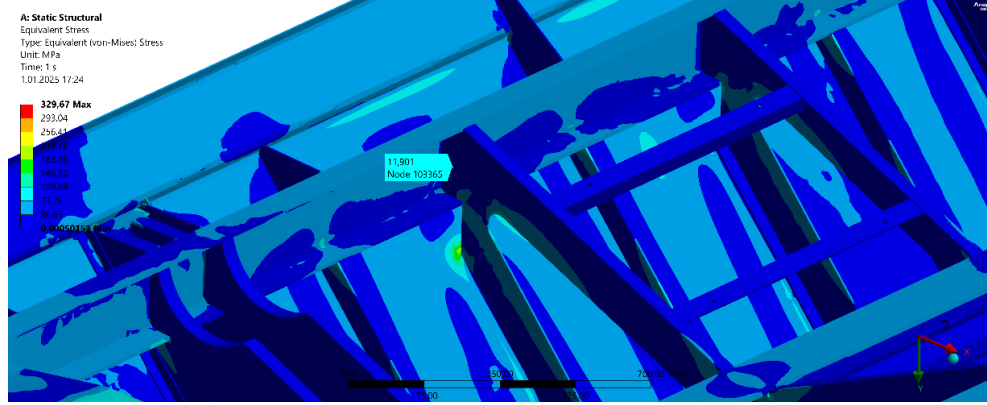
Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 2 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 281748 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 57,2 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.12’de 281748 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



Şekil 4.12. 281748 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

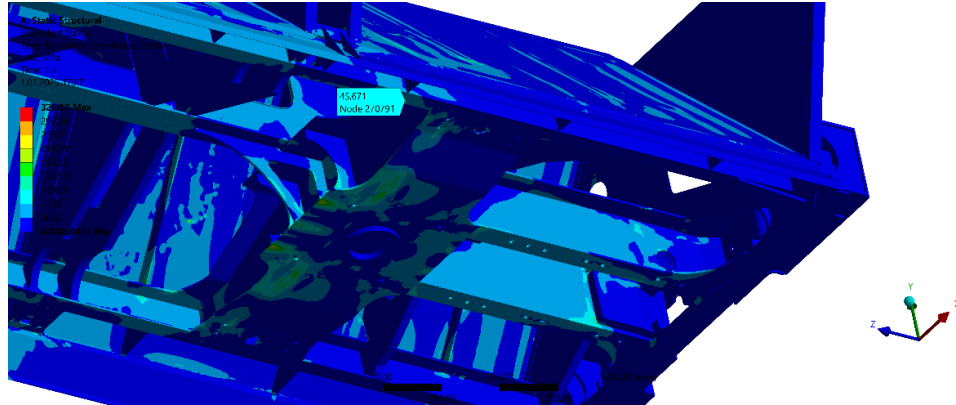
Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 3 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 103365 numaralı düğüm noktasında

eşdeğer gerilme değeri maksimum 11,9 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.13'te 103365 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



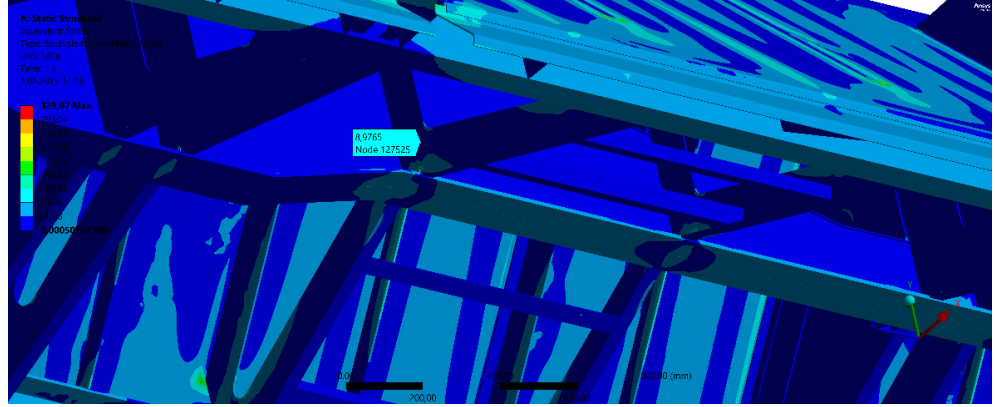
Şekil 4.13. 103365 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 5 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 270791 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 45,6 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.14'te 270791 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



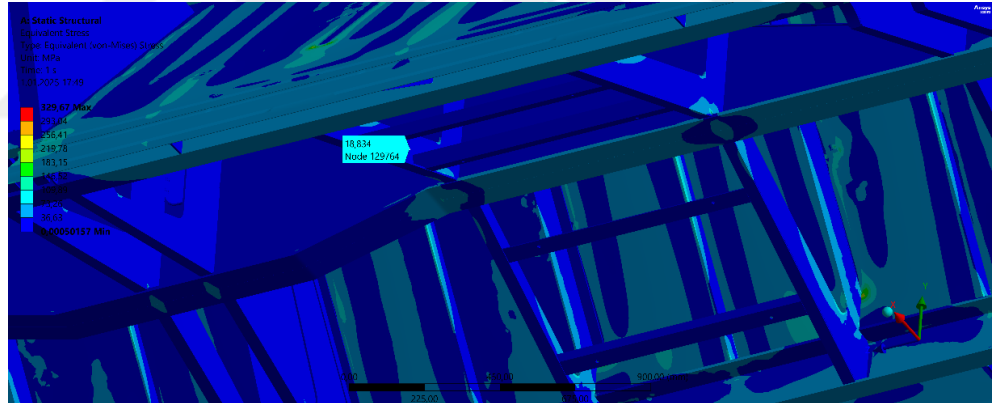
Şekil 4.14. 270791 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 8 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 127525 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 8,9 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.15'te 127525 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



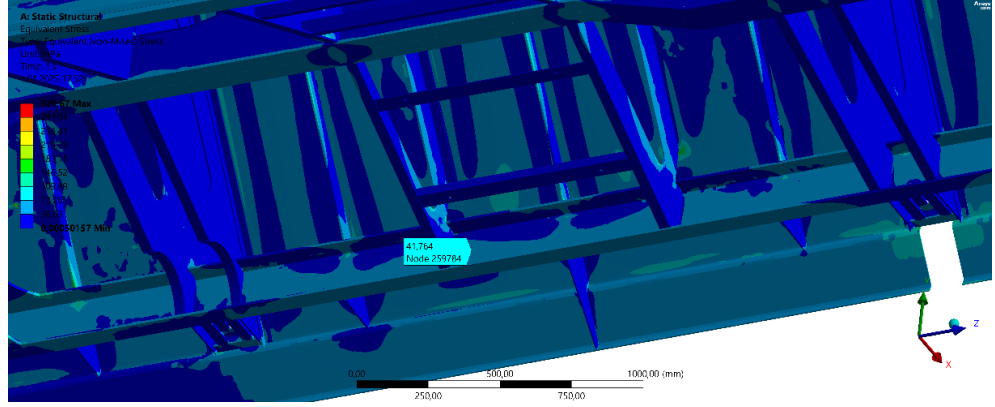
Şekil 4.15. 127525 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 9 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 129764 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 18,8 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.16’da 129764 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



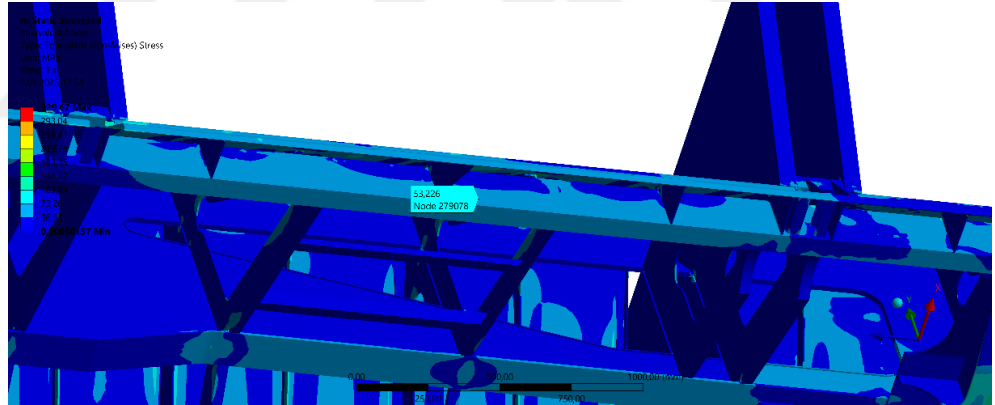
Şekil 4.16. 129764 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 10 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 259784 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 41,7 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.17’de 259784 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



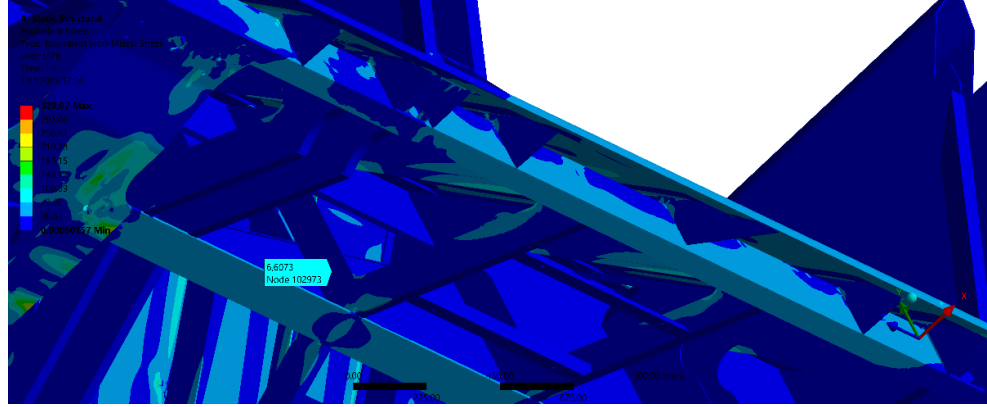
Şekil 4.17. 259784 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 11 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 279078 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 53,2 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.18’de 279078 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



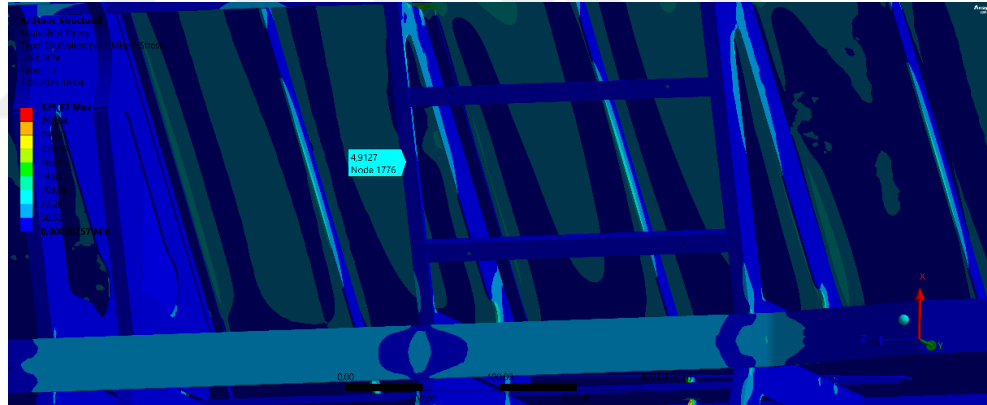
Şekil 4.18. 279078 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 12 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 102973 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 6,6 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.19’da 102973 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



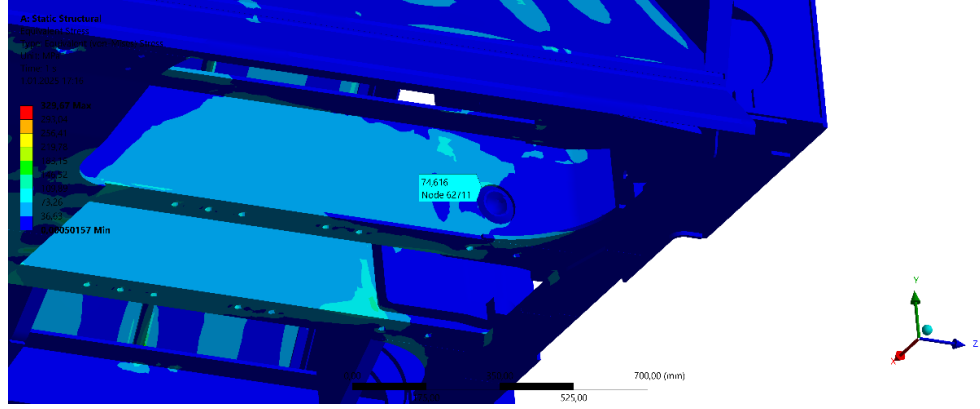
Şekil 4.19. 102973 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 14 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 1776 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 4,9 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.20’de 1776 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



Şekil 4.20. 1776 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

Analiz ortamında 100 tonluk simetrik çekme kuvveti uygulanırken, 20 numaralı gerinim ölçerin bulunduğu konuma denk gelen 62711 numaralı düğüm noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 74,6 MPa olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.21’de 62711 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri görülmektedir.



Şekil 4.21. 62711 numaralı düğüm noktası ve ölçülen eşdeğer gerilme değeri

DeneySEL test sonuçları ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarını karşılaştırıldığında eşdeğer gerilme değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu sonucuna ortaya çıkmıştır. Karşılaştırılan noktalar ve eşdeğer gerilme değerleri arasındaki fark aşağıdaki Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. DeneySEL test sonuçları ile analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmelerin karşılaştırılması

DeneySEL Gerinim Ölçer Numaraları	DeneySEL Eşdeğer Gerilme	Analiz Düğüm Numaraları	Analiz Eşdeğer Gerilme	Fark (%)
2	58,1 MPa	281748	57,2 MPa	%1,57
3	10,9 MPa	103365	11,9 MPa	%9,17
5	47,4 MPa	270791	45,6 MPa	%3,95
8	6,7 MPa	127525	8,9 MPa	%32,84
9	17 MPa	129764	18,8 MPa	%10,59
10	43,9 MPa	259784	41,7 MPa	%5,27
11	55 MPa	279078	53,2 MPa	%3,38
12	5,7 MPa	102973	6,6 MPa	%15,79
14	4,7 MPa	1776	4,9 MPa	%4,26
20	70,6 MPa	62711	74,6 MPa	%5,66

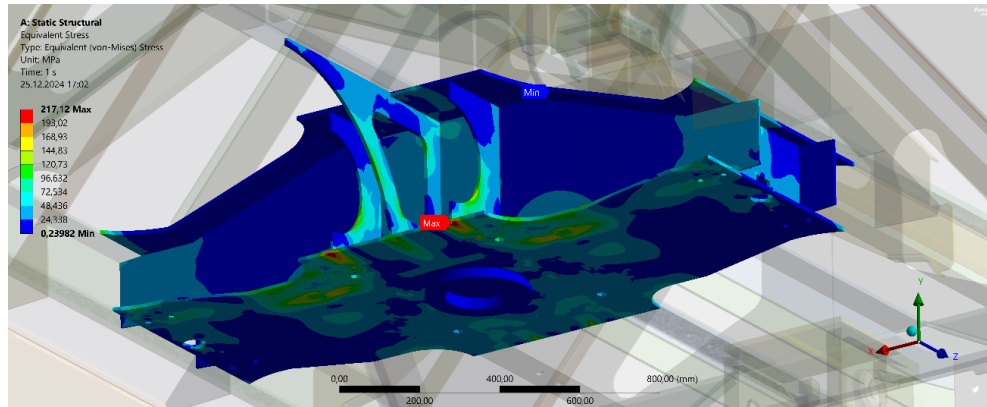
5. BULGULAR

Katı modeli 4 ana komponente ayrılmış ve eleman ağı oluşturulmuş olan vagon modeline ön ve arka cer tertibatı konumlarından 100 ton (1000kN) simetrik çekme kuvveti uygulanmıştır. Vagonun katı modeli kalın kabuk elemanlardan oluşturulduğundan, analizlerde tabakalar ve parçalar üzerindeki eşdeğer gerilmeler, çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeler gözlemlenebilmektedir. Genel olarak vagonun üst, orta ve alt tabakalarındaki sonuçlar değerlendirilmiştir. Aşağıdaki bulgular bölümünde, ilgili yükleme durumunda değişik tabakalardaki eşdeğer gerilmeler, çekme gerilmeleri ve şekil değiştirme durumları gösterilmektedir.

5.1. Farklı Yönlerdeki Eşdeğer Gerilmeler

5.1.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan eşdeğer gerilmeler

Eleman ağı oluşturulmuş olan vagona ön ve arka cer tertibatı konumlarından 100 ton (1000 kN) çekme kuvveti uygulandıktan sonra vagon-boji birleşim yerinde oluşan eşdeğer gerilme değeri vagon-boji birleşim noktası alt sacı ve bu sacın üzerinde bulunan destek sacı birleşim noktasında maksimum 217 MPa, minimum eşdeğer gerilme değeri ise vagon-boji birleşim yerinin üst sacında 0,2398 MPa olarak ölçülmüştür. Vagon-boji birleşim yerinde oluşan maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı aşağıdaki Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

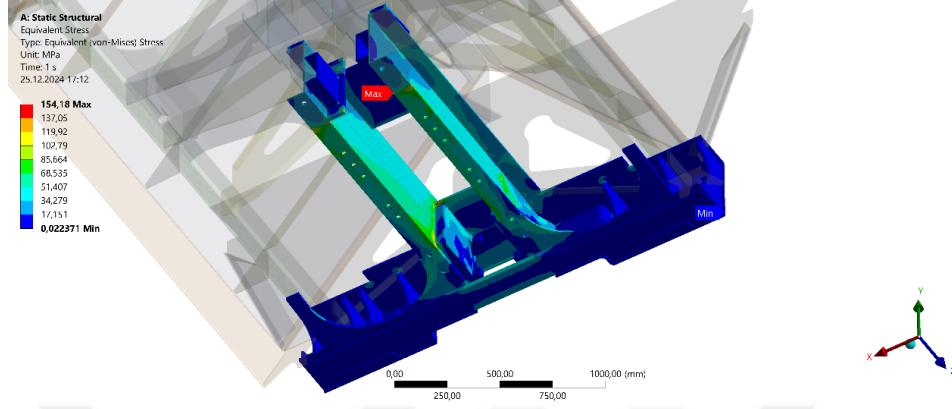


Şekil 5.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

5.1.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan eşdeğer gerilmeler

Vagonun tampon ve cer tertibatı konumunda oluşan eşdeğer gerilme değeri tamponu oluşturan profilin vagon-boji birleşim noktasına yakın bir noktada maksimum 154 MPa, minimum eşdeğer gerilme değeri ise tamponun uç kısmında 0,0223 MPa olarak

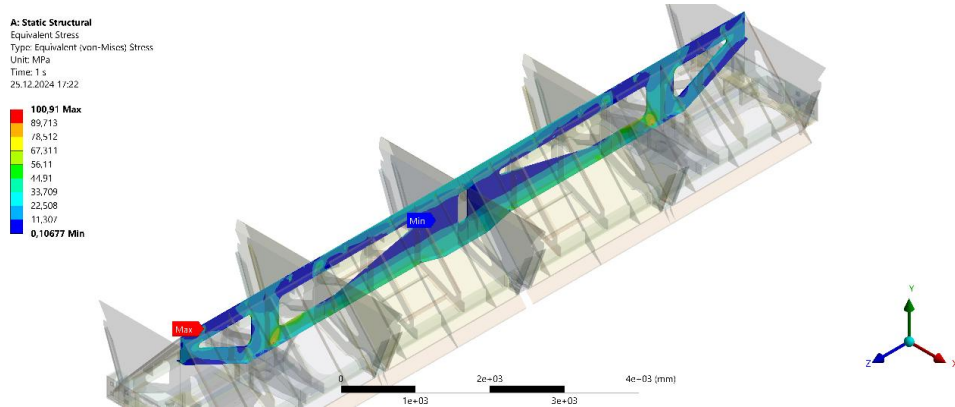
ölçülmüştür. Tampon bölgesinde oluşan maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Tampon bölgesinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

5.1.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan eşdeğer gerilmeler

Vagonun ana taşıyıcı sacında oluşan eşdeğer gerilme değeri ana taşıyıcı orta sacın, vagon-boji birleşim noktasına yakın bir konumunda maksimum 101 MPa, minimum eşdeğer gerilme değeri ise ana taşıyıcı orta sacın orta noktasında 0,1067 MPa olarak ölçülmüştür. Ana taşıyıcı sacda oluşan maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.3’te gösterilmektedir.

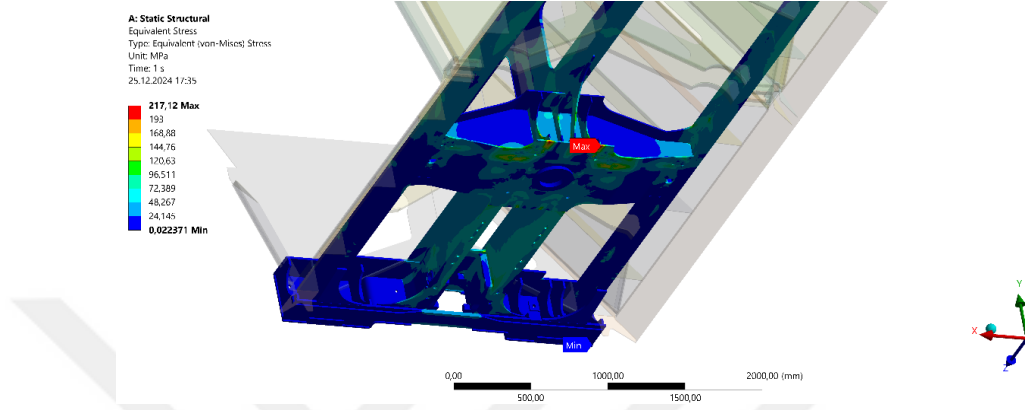


Şekil 5.3. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

5.1.4. Şaside oluşan eşdeğer gerilmeler

Vagonun, vagon-boji birleşim noktası, tampon ve cer tertibatı, ana taşıyıcı sac bölümlerinden oluşan şasi bütününe baktığımızda eşdeğer gerilme değeri vagon-boji

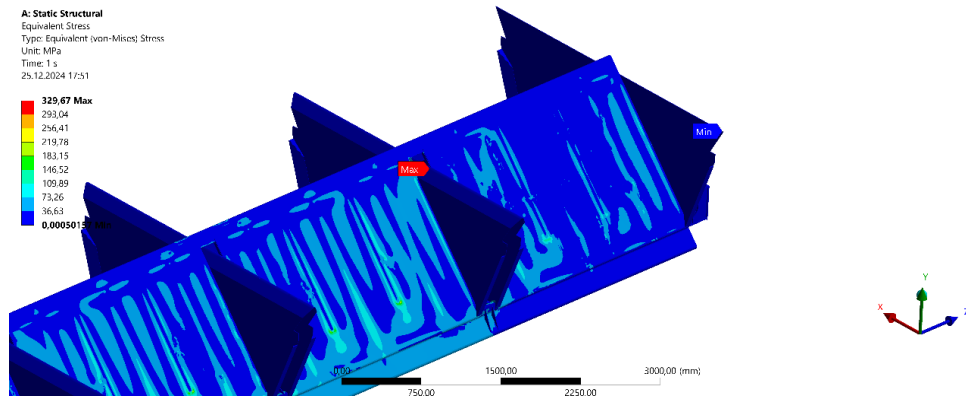
birleşim noktasının alt sacı ve destek sacı birleşim noktasında maksimum 217 MPa, minimum eşdeğer gerilme değeri ise tampon uç noktasında 0,0223 MPa olarak ölçülmüştür. Şaside oluşan maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Şaside oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

5.1.5. Vagon kompleksinde oluşan eşdeğer gerilmeler

Vagon kompleksine baktığımızda eşdeğer gerilme değeri ana taşıyıcı sac ve orta dikmelerin birleştiği noktada maksimum 329 MPa, minimum eşdeğer gerilme değeri ise tampon kısmına yakın olan plakanın üst kısmında 0,0050 MPa olarak ölçülmüştür. Vagonda oluşan maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

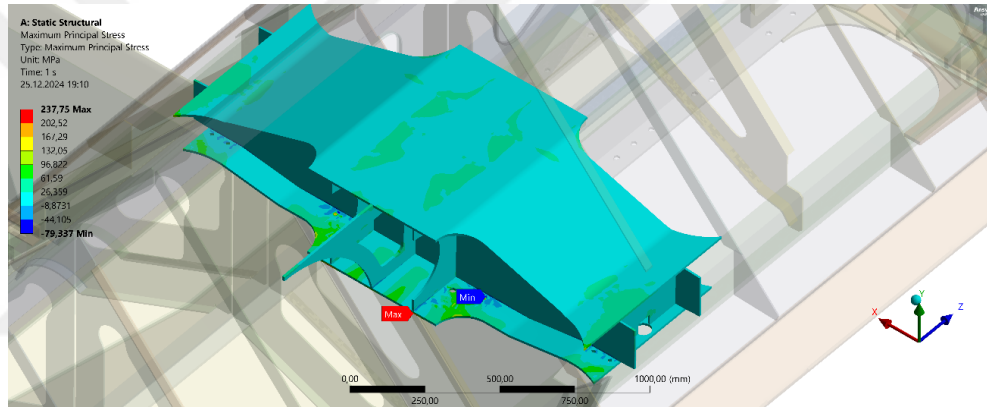


Şekil 5.5. Vagonda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

5.2. Maksimum Çekme Gerilmeleri

5.2.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan çekme gerilmeleri

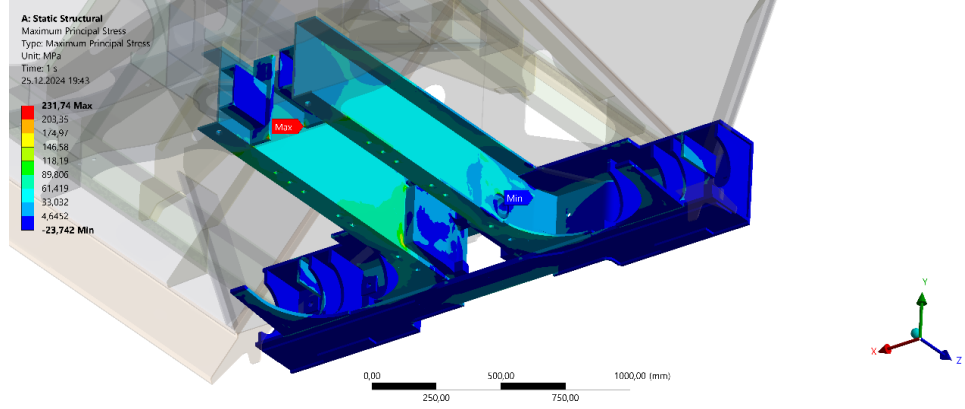
Eleman ağı oluşturulmuş olan vagona ön ve arka cer tertibatı konumlarından 100 ton (1000kN) çekme kuvveti uygulandıktan sonra vagon-boji birleşim yerinde oluşan çekme gerilmesi değeri vagon-boji birleşim noktasının alt sacıyla, bu sac üzerinde bulunan destek sacının birleşim noktasında maksimum 237 MPa, minimum çekme gerilmesi ise değeri vagon-boji birleşim noktasının alt sacında -79 MPa olarak ölçülmüştür. Vagon-boji birleşim yerinde oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmesi değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı aşağıdaki Şekil 5.6’da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan çekme gerilmeleri dağılımı

5.2.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan çekme gerilmeleri

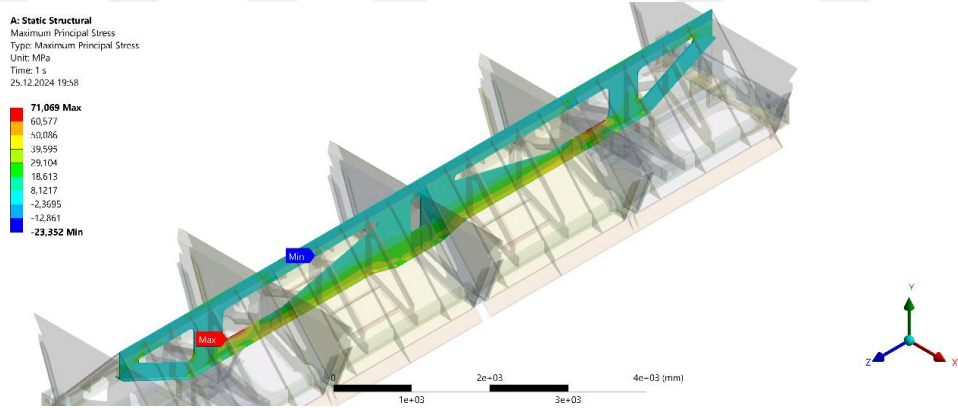
Vagonun tampon ve cer tertibatı konumunda oluşan çekme gerilmesi değeri tamponu oluşturan profilin vagon-boji birleşim noktasına yakın bir noktada profil uç kısmında maksimum 231 MPa, minimum çekme gerilmesi değeri ise tampon ve profil birleşim yerine yakın bir noktada -23 MPa olarak ölçülmüştür. Tampon bölgesinde oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmesi değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Tampon bölgesinde oluşan çekme gerilmeleri dağılımı

5.2.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan çekme gerilmeleri

Vagonun ana taşıyıcı orta sacında oluşan çekme gerilmesi değeri ana taşıyıcı sacın, vagon-boji birleşim noktasına yakın bir noktada maksimum 71 MPa, minimum çekme gerilmesi değeri ise ana taşıyıcı sacın orta noktasında -23 MPa olarak ölçülmüştür. Ana taşıyıcı sacda oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmesi değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

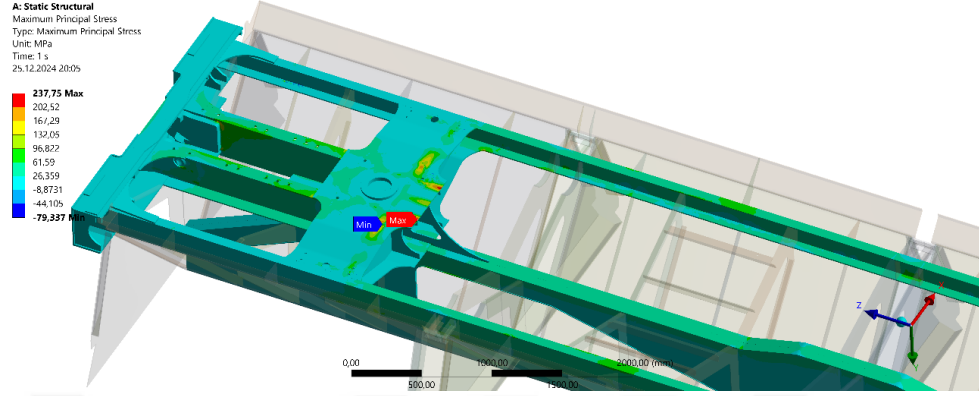


Şekil 5.8. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan çekme gerilmeleri dağılımı

5.2.4. Şaside oluşan çekme gerilmeleri

Vagonun, vagon-boji birleşim noktası tampon ve cer tertibatı, ana taşıyıcı sac bölümlerinden oluşan şasi bütününe baktığımızda çekme gerilmesi vagon-boji birleşim noktasına yakın yerde vagon-boji birleşim yerinin alt sacı ve destek sacının birleşim noktasında maksimum 237 MPa, minimum çekme gerilmesi değeri ise vagon-boji birleşim yerinde alt ve üst sacın birleşim noktasında -79 MPa olarak ölçülmüştür. Şaside

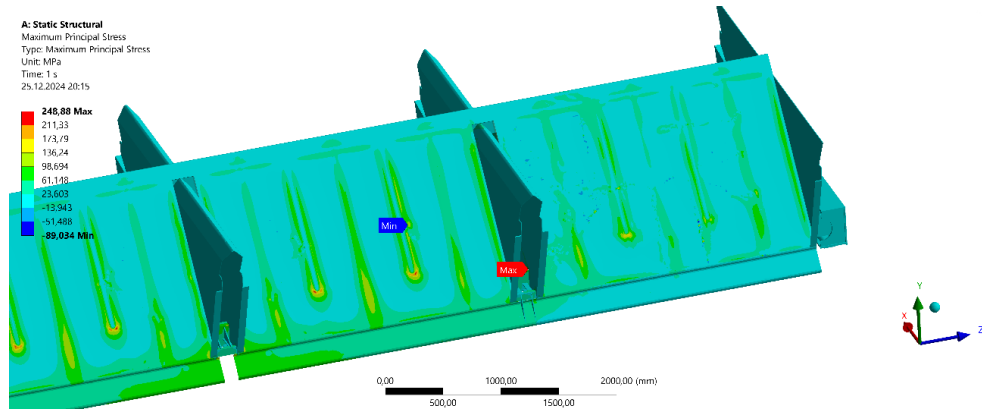
oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmesi değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Şaside oluşan çekme gerilmeleri dağılımı

5.2.5. Vagon kompleksinde oluşan çekme gerilmeleri

Vagon kompleksine baktığımızda çekme gerilmesi değeri şasi yan profili ve orta dikmelerin birleşim noktasında maksimum 248 MPa, minimum çekme gerilmesi değeri ise ana taşıyıcı sac ve üst kapak sacı birleşim noktasında -89 MPa olarak ölçülmüştür. Vagonda oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmesi değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve gerilme dağılımı Şekil 5.10’da gösterilmektedir.

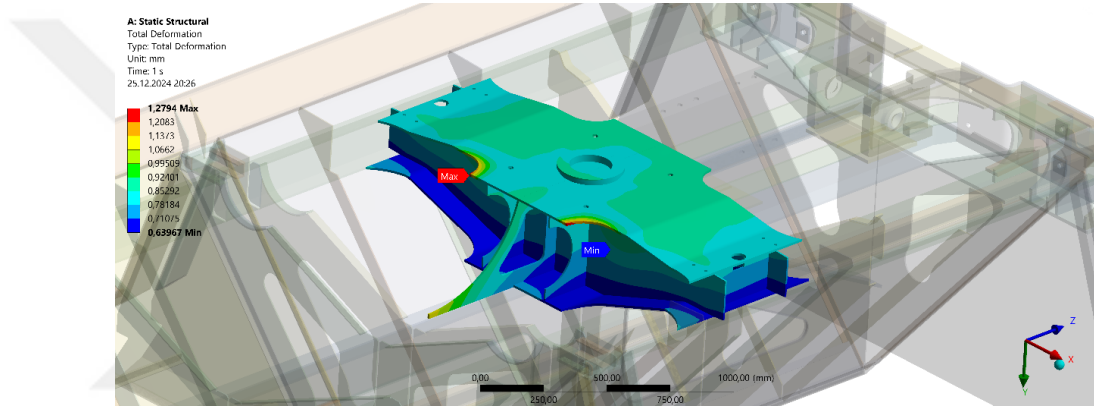


Şekil 5.10. Vagonda oluşan çekme gerilmeleri dağılımı

5.3. Şekil Değiştirme

5.3.1. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan şekil değiştirmeler

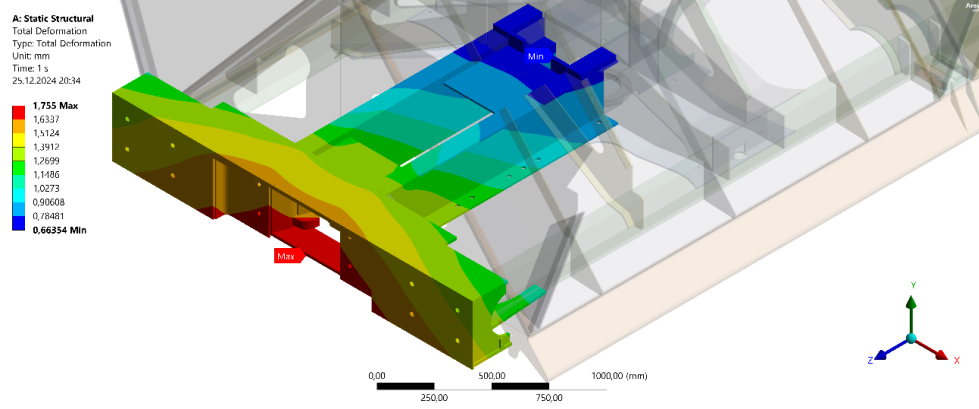
Eleman ağı oluşturulmuş olan vagona ön ve arka cer tertibatı konumlarından 100 ton (1000kN) çekme kuvveti uygulandıktan sonra vagon-boji birleşim yerinde oluşan şekil değiştirme değeri vagon-boji birleşim yerinin alt sacının en uç noktasında maksimum 1,2794 mm, minimum şekil değiştirme değeri ise vagon şasisi ve boji birleşim noktasının üst sacında 0,6396 mm olarak ölçülmüştür. Vagon-boji birleşim yerinde oluşan maksimum ve minimum şekil değiştirme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve şekil değiştirme dağılımı aşağıdaki Şekil 5.11’de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Vagon-boji birleşim noktasında oluşan şekil değiştirme dağılımı

5.3.2. Tampon ve cer tertibatında oluşan şekil değiştirmeler

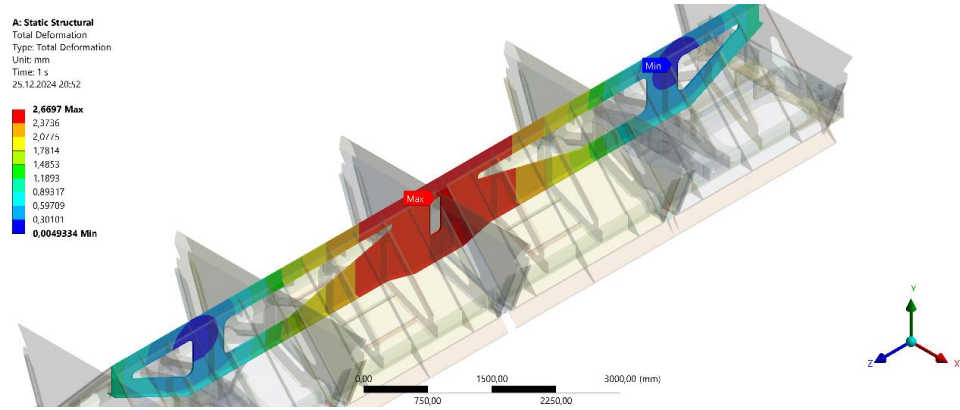
Vagonun tampon ve cer tertibatı konumunda oluşan şekil değiştirme değeri tamponun ortasında, cer tertibatının bulunduğu noktada maksimum 1,755 mm, minimum şekil değiştirme değeri ise tampon profillerinin vagon-boji birleşim yerine yakın bir noktada 0,6635 mm olarak ölçülmüştür. Tampon bölgesinde oluşan maksimum ve minimum şekil değiştirme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve şekil değiştirme dağılımı Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Tampon bölgesinde oluşan şekil değiştirme dağılımı

5.3.3. Ana taşıyıcı sacda oluşan şekil değiştirmeler

Vagonun ana taşıyıcı sacında oluşan şekil değiştirme değeri, ana taşıyıcı orta sacın simetrik ekseninde tam orta noktasında maksimum 2,6697 mm, minimum şekil değiştirme değeri ise ana taşıyıcı orta sacın boji bağlantı noktasının üst kısmında 0,0049 mm olarak ölçülmüştür. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan, maksimum ve minimum şekil değiştirme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve şekil değiştirme dağılımı Şekil 5.13'te gösterilmektedir.

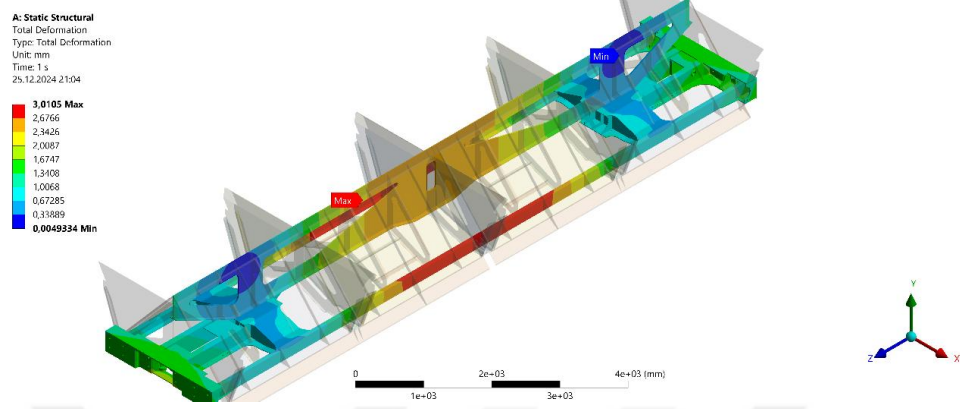


Şekil 5.13. Ana taşıyıcı orta sacda oluşan şekil değiştirme dağılımı

5.3.4. Şaside oluşan şekil değiştirmeler

Vagonun, vagon-boji birleşim noktası, tamponlar ve cer tertibatı, ana taşıyıcı sac bölümlerinden oluşan şasi bütününe baktığımızda şekil değiştirme değeri yan kiriş profillerinin orta noktasında maksimum 3,0105 mm, minimum şekil değiştirme değeri ise ana taşıyıcı orta sacın boji bağlantı noktasının üst kısmında 0,0049 mm olarak

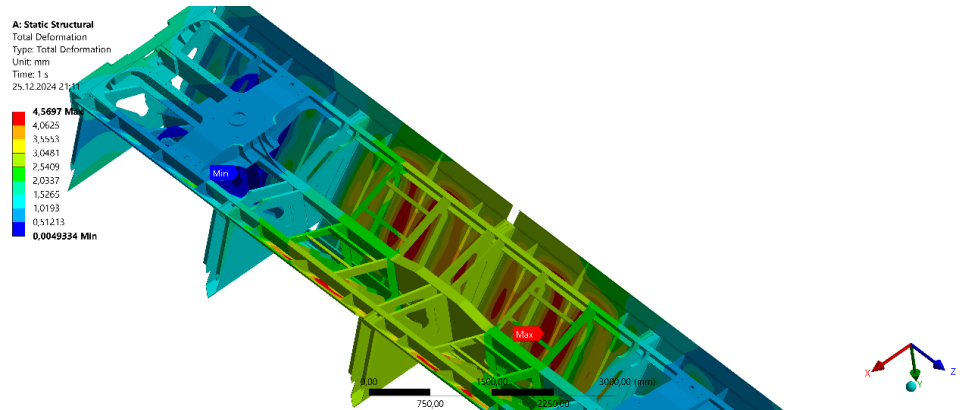
ölçülmüştür. Şaside oluşan maksimum ve minimum şekil değiştirme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve şekil değiştirme dağılımı Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Şaside oluşan şekil değiştirme dağılımı

5.3.5. Vagon kompleksinde oluşan şekil değiştirmeler

Vagon kompleksine baktığımızda şekil değiştirme değeri vagon üst kapaklarında maksimum 4,5697 mm, minimum şekil değiştirme değeri ise ana taşıyıcı sacın boji bağlantı birleşim noktasında 0,0049 mm olarak ölçülmüştür. Vagonda oluşan maksimum ve minimum şekil değiştirme değerlerinin gözlemlendiği noktalar ve şekil değiştirme dağılımı Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Vagonda oluşan şekil değiştirme dağılımı

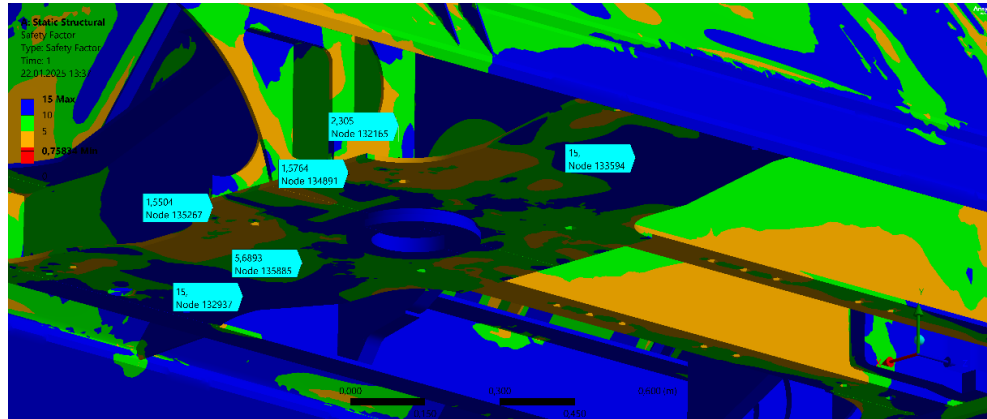
5.4. Emniyet Katsayısı

Emniyet katsayısı (safety factor), analizi gerçekleştirilen yapının, sistemin veya malzemenin tasarım yüklerine güvenli bir şekilde dayanabilmesi için kullanılan bir katsayıdır. Malzeme dayanımının, tasarımda belirtilen maksimum yüke oranı şeklinde de

gösterilebilir. Sınır şartları içerisinde belirtilen malzeme özelliklerine göre analiz sonucunda elde edilen değerler emniyet katsayısını ortaya koymaktadır. EN 12663-2 demiryolu taşıtlarının yapısal gereksinimlerini tanımlayan standart içerisinde 5.3 maddesi statik dayanım testlerinden bahsetmektedir. Bu maddede statik testler sırasında kullanılacak yük katsayıları ve emniyet katsayısı detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Çekme ve basma testlerinde emniyet katsayısı 1,5 olarak uygulanmaktadır. Ansys Workbench yazılımında gerçekleştirilen emniyet katsayısı analizi 0 ile 15 arasında değişen değerleri göstermektedir. Bu değer 15'e yaklaştıkça emniyetli, 0'a yaklaştıkça emniyetsiz olarak tanımlanabilir. Yapısal analiz sonucunda vagonun bazı kritik noktalarında emniyet katsayısı değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

5.4.1. Vagon-boji birleşim noktasında emniyet katsayısı

Vagon-boji birleşim noktasında eşdeğer gerilme değeri maksimum 217 MPa olarak bulunmuştur. Eşdeğer gerilme değerinin maksimum çıktığı noktada emniyet katsayısı değeri yaklaşık olarak 1,63 ölçülmüştür. Değerler 1,63 ile 15 arasında değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 5.16'da vagon-boji birleşim noktasındaki farklı emniyet katsayısı değerleri gösterilmektedir.

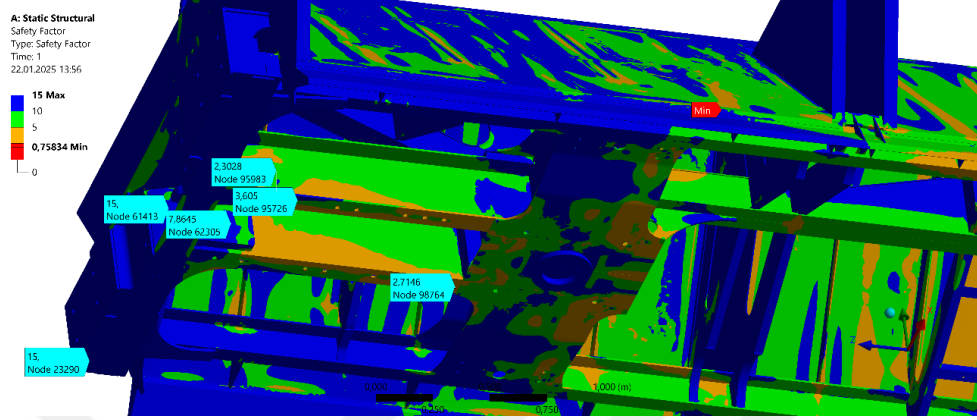


Şekil 5.16. Vagon-boji birleşim yerinde oluşan emniyet katsayısı değerleri

5.4.2. Tampon ve cer tertibatında emniyet katsayısı

Tampon ve cer tertibatında eşdeğer gerilme değeri maksimum 154 MPa olarak bulunmuştur. Eşdeğer gerilme değerinin maksimum çıktığı noktada emniyet katsayısı değeri yaklaşık olarak 2,30 ölçülmüştür. Değerler 2,30 ile 15 arasında değişiklik

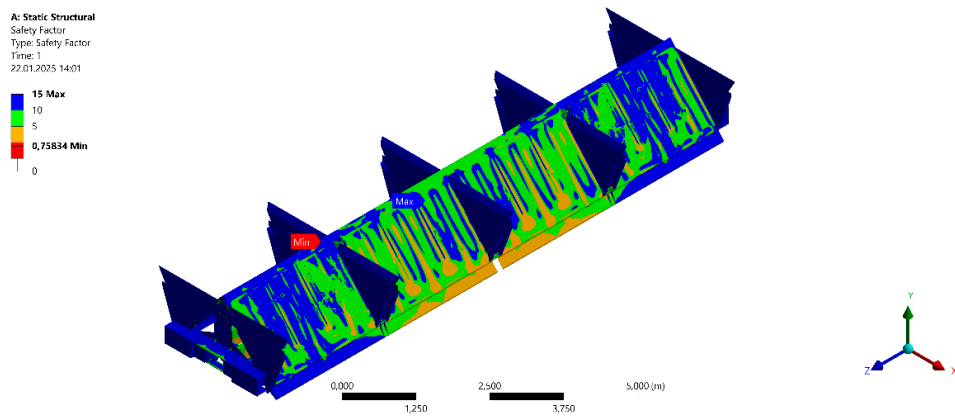
göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 5.17’de vagon-boji birleşim noktasındaki farklı emniyet katsayısı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Tampon ve cer tertibatı bölgesinde oluşan emniyet katsayısı değerleri

5.4.3. Vagon kompleksinde emniyet katsayısı

Vagon kompleksinde eşdeğer gerilme değeri maksimum 329 MPa olarak bulunmuştur. Eşdeğer gerilme değerinin maksimum çıktığı noktada emniyet katsayısı değeri yaklaşık olarak 0,75 ölçülmüştür. Değerler 0,75 ile 15 arasında değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 5.18’de vagon kompleksindeki maksimum ve minimum emniyet katsayısı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.18. Vagon kompleksinde oluşan maksimum ve minimum emniyet katsayısı değerleri

Genel olarak vagonu incelediğimizde eşdeğer gerilme değerlerinin akma dayanımı olan 355 MPa'ın altında kaldığı görülmektedir. Vagonda emniyet katsayısı 1,5 değerinin altında kalan noktada iyileştirme yapılması önerilebilir.



6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Falns tipi vagona sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz gerçekleştirilecek vagonun katı modeli TÜRASAŞ'dan temin edilmiştir. Montaj sırasında, bütün ölçüler orta eksen üzerine taşınarak uygun gelmeyen geometrilerde basitleştirmeler ve düzeltmeler yapılmıştır. Bütün parçaların geometrileri ve malzeme bilgileri kontrol edilmiş ve model 4 ana komponente bölünmüştür. Bu komponentler vagon-boji birleşim yeri, tampon ve cer tertibatı, ana taşıyıcı orta sac ve şasi olmak üzere vagon kompleksini oluşturmaktadır. Katı model oluşturulduktan sonra analizi yapılmak üzere sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analiz yapan Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Uygulanan kuvvetlerle beraber testler EN 12663-1 standartları ve UIC 577 teknik şartnamesine göre yapılmıştır. Bu standart ve teknik şartname demiryolu taşıt gövdeleri için asgari yapı ilgili kuralları kapsar. Yüklemelerin tanımları, testlerin uygulanma şartları, elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Yapısal testlere başlamadan önce model üzerinde mesh çalışması yapılmıştır. Mesh boyutları kademeli olarak azaltılarak mesh bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. Mesh boyutları ve elde edilen element sayılarına göre uygun mesh boyutu çalışma içerisinde verilmiştir. Element ağı oluşturulan vagona ilgili standartlarda belirtilen statik yüklemeler yapılmıştır. Yüklemeler vagon-boji birleşim yeri, tampon ve cer tertibatı, ana taşıyıcı orta sac, şasi ve vagon kompleksi olmak üzere beş ana yapıda incelenmiştir.

Eşdeğer gerilme değeri, vagon-boji birleşim noktasının alt sacında maksimum 217 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer tampon ve cer tertibatını oluşturan profilin uç kısmında 154 MPa olarak ölçülmüştür. Vagonun ana taşıyıcı orta sacının tampona yakın kısmında 101 MPa olarak ölçülmüştür. Şasiye baktığımızda eşdeğer gerilme değeri 217 MPa ile vagon boji birleşim noktasının alt sacında meydana gelmiştir. Vagonun tamamını gözlemlediğimizde eşdeğer gerilme değeri maksimum 329 MPa ile ana taşıyıcı orta sac ve orta dikmelerin birleşim noktasında gözlemlenmiştir.

Çekme gerilmesi değeri, vagon-boji birleşim noktasında maksimum 237 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer tampon ve cer tertibatını oluşturan profilin uç kısmında 231 MPa olarak ölçülmüştür. Vagonun ana taşıyıcı orta sacının boji-vagon birleşim noktasına yakın yerinde 71 MPa olarak ölçülmüştür. Şasiye baktığımızda çekme gerilmesi 237 MPa olarak boji-vagon birleşim kısmında gözlemlenmiştir. Vagonun tamamına baktığımızda

çekme gerilmesi değeri maksimum 248 MPa olarak şasi yan profili ve orta dikmelerin birleşim noktasında gözlemlenmiştir.

Şekil değiştirme değeri, vagon-boji birleşim noktasının alt sacında maksimum 1,2794 mm olarak gerçekleşmiştir. Aynı değer tampon ve cer tertibatında, cer tertibatının bulunduğu noktada 1,755 mm ölçülmüştür. Vagonun ana taşıyıcı orta sacında oluşan şekil değiştirme değeri simetrik ekseninde sacın tam orta noktasında 2,6697 mm ölçülmüştür. Şasiye baktığımızda toplam şekil değiştirme yan kiriş profillerinin orta noktasında 3,0105 mm olarak ölçülmüştür. Vagonun tamamının simülasyonu incelendiğinde en yüksek şekil değiştirme değeri maksimum 4,5697 mm olarak vagon üst kapaklarında ölçülmüştür.

Yapısal analiz sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme değerleri, deneysel test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada analiz sonucu elde edilen değerlerin, deneysel test sonuçları ile yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

EN 10025-2 standartlarına göre üretilmiş yapısal çeliğin akma dayanımı 355 MPa'dır. Analizde elde edilen sonuçlara göre vagon üzerinde oluşan en yüksek gerilme değeri 329 MPa'dır. Analiz sonucunda elde edilen değer, akma dayanımını aşmamaktadır.

KAYNAKÇA

- Baykasoğlu, C., Sünbuloğlu, E., Bozdağ, S. E., Toprak, T., & Muğan, A. (2012). Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger and Freight Car Models. *International Iron & Steel Symposium*, 579-586.
- Bozdağ, S. E., Sünbuloğlu, E., Baysakaloğlu, C., Toprak, T., & Mugan, A. (2012). Demiryolu Yolcu ve Yük Vagonlarında Statik-Dinamik Deneysel Gerilme Analizi. *International Iron & Steel Symposium*, 470-483.
- Burman, E., Hansbo, P., & Larson, M. (2018). *Finite Element in Analysis and Design*. Science Direct.
- Çetin, M. H., & Alvalı, G. T. (2020). Yük Vagonu Bojisi Tasarımında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Malzeme Seçimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 91-104.
- (2004). *EN 10025*. European Committee for Standardization: Hot Rolled Products of Structural Steels.
- (2012). *EN 12663-1*. European Committee for Standardization: Railway Applications, Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies.
- (2013). *EN 12663-2*. European Committee for Standardization: Railway Applications, Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies.
- Ergin, S., & Kaya, B. (2020). Finite Element Analysis in Railway Vehicle Design; Safety and Durability Applications. *International Journal of Rail Transportation Research*, 220-235.
- Eroğlu, M., Esen, İ., & Koç, M. A. (2018). Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Dermiyolu Bojilerinin Titreşim Analizi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 60-67.
- Ersoy, O. (2014). *Bir Raylı Taşıt Gövdesinin Standartlara Göre Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapısal Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Harak, S. S., Sharma, S. C., & Harsha, S. P. (2014). Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. *Procedia Materials Science* 6, 1891-1898.
- Kim, J. S., & Kim, N. P. (2005). *Structural Assessment for Bogie Frame of 180km/h Korean Tilting Train*. KyungGi: Korea Railroad Research Institute.
- Kim, J. S., & Yoon, H. J. (2011). *Structural Behaviors of a GFRP Composite Bogie Frame for Urban Subway Trains under Critical Load Conditions*. Korea: Railway Structure Department, Korea Railroad Research Institute.
- Kınacı, B. F., Botsalı, H., Özarpa, C., Esen, İ., & Ahlatçı, H. (2022). *Raylı Sistemlerde Kullanılan Cer Kancası Ekipmanlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Karabük: Karabük Üniversitesi.
- Konez, O., Metin, M., & Demir, Ö. (2019). Y32 Bojisinin Yapısal Analizleri, Bölüm 1: Statik Analizler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 366-387.
- Kutlak, H., Cihan, M., & Özkan, A. (2013). Polietilen Rotil Yatağının Çekme Kuvveti Altında ANSYS ile Mukavemet Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 39-46.

- Kütük, Y. (2019). *Lowbed Treyler Araçları İçin Rampa Tasarımı ve Yapısal Analizi*. Sakarya: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- Morin, P., Siebert, K., & Veaser, A. (2007). *A Basic Convergence Result for Conforming Adaptive Finite Elements*. World Scientific.
- Oyan, C. (1998). Structural Strength Analysis of the Bogie Frame in Taipei Rapid Transit Systems. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 253-262.
- Özsoy, M. (1998). *TVS 2000 Yolcu Vagonlarının Bilgisayar Yardımıyla Yapısal Analizi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özsoy, M. İ. (2008). *Y32 Bojisinin Bilgisayar Destekli Statik ve Dinamik Analizi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Sabırlı, S. (2012). *Bir Raylı Taşıt Bojisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yorulma Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Sarıkavak, Y. (2021). Tekerlek Ray Etkileşimi; Perlitik ve Beynitik Çeliklerin Yorulma Hasar Direnci Üzerine Bir Sonlu Elemanlar Analizi. *Demiryolu Mühendisliği*, 65-76.
- Sarıkavak, Y. (2023). Raylı Sistem Araçlarında Yüksek Hızlı Yük Taşımacılığı İçin Düz Yol ve Kurp Şartları İçin Araç Tekerlek Bileşeninin Gerilme Analizi. *Demiryolu Mühendisliği*, 109-120.
- Sladkowski, A., & Krotov, S. (2011). *Finite Element Method for Transport Applications*. Gliwice: Silesian University of Technology.
- Sunar, Ö. (2023, Aralık 15). *Ansys Mesh Metrics Explained*. Mechead: <https://www.mechead.com> adresinden alındı
- Sunar, Ö. (2023). Investigation of Contact Force an Stress Relationship in Overhead Line Contact Wires with Finite Element Method. *Demiryolu Mühendisliği*, 98-108.
- Sunar, Ö., & Çevik, M. (2015). Tek Katlı Yaprak Yaylarda Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yorulma Analizi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 1-6.
- Şakacı, M. (2020). *Taşıtlarda Meydana Gelen Kızaklama Olayının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Toprak, T., & Bozdağ, E. (2008). *Konteyner Vagonunun Sayısal Gerilme ve Deformasyon Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Mukavemet Birimi.
- Toprak, T., & Bozdağ, E. (2008). *Tüdemsaş SS Tipi 20 Ton Dingil Basınçlı Yük Vagonunda Gerilme ve Titreşim Analizi*. İstanbul: İ.T.Ü. Makina Fakültesi Mukavemet Birimi.
- Toprak, T., & Bozdağ, E. (2009). *TÜDEMSAŞ A.Ş. 100 Km/h Hız ve 22.5 Ton Dingil Basınçlı Cevher Vagonunda Gerilme ve Titreşim Analizi Raporu*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Mukavemet Birimi.

- Topsakal, F. Z. (2015). *Hafif Raylı Bir Taşıtın Taşıyıcı Bojisinin Titreşim Analizi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Türk, M., & Yılmaz, F. (2018). Demiryolu Taşımacılığında Malzeme Seçimi ve Yapısal Optimizasyon: Çekme Testlerinin Rolü. *Journal of Transportation Engineering*, 123-137.
- (2012). *UIC 577*. European Committee for Standardization: Stranght Requirements for All Types of Wagons.
- Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı*. (2024, Aralık 20). Tez Merkezi Web Sitesi: <https://tez.yok.gov.tr/> adresinden alındı
- Zienkiewicz, C. O., & Taylor, L. R. (2005). The Finite Element Method Volume:1 Basis. C. O. Zienkiewicz, & R. L. Taylor içinde, *The Finite Element Method Volume:1 Basis* (s. 468-491). California: Butterworth Heinemann.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0004-8871-1153

Ad Soyad : Güven TERCAN

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı :

E-Posta :

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016-2021, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği
- 2011-2015, Eskişehir Hoca Ahmed Yesevi Anadolu Lisesi, Sayısal

İş Deneyim Bilgileri:

- Epsilon-NDT A.Ş., Tasarım Mühendisi, Tasarım Merkezi, Şubat 2022 – Aralık 2023
- Epsilon-NDT A.Ş., ARGE Mühendisi, ARGE, Şubat 2021 – Şubat 2022

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2017, Raylı Sistemler Derneği, Karabük.