

## M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi

Ahmet ÖZCAN<sup>1</sup> ORCID 0009-0004-4323-2079

Celalettin YÜCE\*<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-1387-907X

<sup>1</sup>Ulaşım İç ve Dış Ticaret Anonim Şirketi, Ar-Ge Merkezi, Bursa

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

Geliş tarihi: 01.01.2024

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ÖZCAN, A., YÜCE, C., (2024). M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 9-22.

### Öz

Dünya çapında ve ülkemizde yürütülen çalışmalar, taşıtların yaşam döngüsü boyunca enerji verimliliği konusunu, sera gazı salınımındaki artış ve enerji kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak, hammadde aşamasından geri dönüştürülme süreçlerine kadar önemli bir öncelik haline getirmiştir. Özellikle uzun mesafeli yolculuklara hizmet eden toplu taşıma araçları için taşıt ağırlığını azaltmak, yakıt tasarrufunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu taşıtların prototip imalata geçmeden önce sonlu elemanlar analizleri ile doğrulama süreçlerinin gerçekleştirilmesi maliyet ve zaman avantajı sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer toplu taşıma araçlarının sonlu elemanlar modeli kurularak farklı yöntemler ile incelenmiştir. Ancak sonlu elemanlar modelinin sadece gövde üzerinde oluşturulduğu modellerde gövde karkasına etkileyen kuvvetlerin tam anlamıyla temsil edilemediği görülmüştür. Tüm bunlarla beraber literatürde yapılan çalışmalar genel olarak ticari bir tasarımı içermemekte ve yerleşim planı ve teknik özelliklerin detaylı incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için otobüs gövdesi, akslar dahil olmak üzere tamamını içerecek şekilde modellendi ve hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme ve ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirildi. Yapılan analizler sonucunda gövde karkasında bazı yapısal değişikliklere gidilmiş ve araç ağırlığı azaltılmıştır. Yeni tasarım tekrar aynı sınır şartlarında analiz edilerek doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım değişiklikleri sonrasında gövde karkasında sol duvar bölgesinde 19,694 kg, sağ yan duvar bölgesinde 17,346 kg, tavan bölgesinde 72,43, şasi ve diğer bölgelerde ise 122,53 kg'lık bir kütle tasarrufu sağlanarak toplamda %7,41 oranında bir hafifletme sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli otobüs, Yapısal analiz, İvmelenme, Hafifletme

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Celalettin YÜCE, [cyuice@uludag.edu.tr](mailto:cyuice@uludag.edu.tr)

## Lightweighting of an M3 Class Electric Bus Under Different Scenarios with Finite Element Analysis

### Abstract

Studies carried out worldwide and in our country have made the issue of energy efficiency throughout the life cycle of vehicles an important priority, from the raw material stage to the recycling processes, due to the increase in greenhouse gas emissions and the decrease in energy resources. Reducing vehicle weight significantly increases fuel economy, especially for public transportation vehicles that serve long-distance journeys. Carrying out verification processes with finite element analyzes of these vehicles before proceeding with prototype manufacturing provides cost and time advantages. When the studies in the literature are examined, finite element models of similar public transportation vehicles have been established and examined with different methods. However, it has been observed that the forces acting on the body frame cannot be fully represented in models where the finite element model is created only on the body. In addition to all this, the studies in the literature generally do not include a commercial design and it seems that the layout plan and technical features are not examined in detail. In this study, to examine the behavior of an M3 class electric bus under operating conditions, the bus was modeled including the entire body, including the axles, and structural analyzes were carried out in the three scenarios to which it is most exposed in motion: 1G acceleration at full load, lateral acceleration and sudden braking and acceleration scenarios. As a result of the analysis, some design changes were made to the body frame and the vehicle weight was reduced. The new design was analyzed again under the same boundary conditions and a verification study was carried out. After the design changes, a mass saving of 19.694 kg in the left wall region of the body frame, 17.346 kg in the right side wall region, 72.43 kg in the ceiling region, and 122.53 kg in the chassis and other regions was achieved, resulting in a weight reduction of 7.41%.

**Keywords:** Electric bus, Structural Analysis, Acceleration, Lightweighting

### 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji kaynaklarındaki daralma ve küresel ısınma gibi faktörler tüm endüstriyel alanlarda enerji verimliliğini arttırmayı öncelikli hedef haline getirmiştir. Günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan ulaşım faaliyeti de sürdürülebilir çevre kavramını doğrudan etkilemektedir. Özellikle karayolu taşımacılığı ulaştırma sektörü içerisinde önemli bir yere sahiptir. Avrupa Birliği'nde (AB) 2020 yılında kişi başına yaklaşık 10.000 km yol motorlu ulaşım araçları ile kat edilmiş ve bu hareketliliğin %80,6'lık kısmı binek otomobiller ile %6,6'lık kısmı yolcu otobüsleri ve %5'ü ise demiryolu ile gerçekleşmiştir [1].

Ülkemizde ve dünya genelinde yapılan araştırmalar, sera gazı salımındaki artışı ve enerji kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak taşıtların yaşam döngüsü boyunca hammadde aşamasından

geri dönüştürülmesine kadar olan süreçlerde enerji verimliliği önemli bir öncelik haline gelmiştir [2]. Taşıtlarda enerji verimliliğini artıran teknolojiler arasında, araç ağırlığını hafifletme yöntemi önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, yakıt tüketiminde düşüş sağlamanın yanı sıra aracın ömrü boyunca salgılanan emisyon oranlarında da azalmaya neden olur [3]. Yapılan araştırmalar değişik taşıtlarda, farklı kullanım çeşitlerine ve kullanım miktarlarına bağlı olarak taşıtlarda her 100 kg'lık hafifletmenin 100 km mesafede ortalama 0,3-0,4 L yakıt tasarrufu sağlayacağını ortaya koymuştur. Farklı bir açıdan bakıldığında taşıtın %10 hafifletilmesi ile yakıt ekonomisinde %2-9 oranında iyileşme sağlayacaktır [4]. Taşıt ağırlığında elde edilecek hafifletmeler hibrit ve elektrikli araçların menzilleri açısından da önemlidir [5]. Özellikle uzun seyahat mesafelerine hizmet eden toplu taşıma araçları için taşıt ağırlığının azaltılması, önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Emisyonları azaltmanın yanı sıra kat edilen her kilometre başına düşen yakıt

tüketimini azaltmak, bu sektörde karlılığın kilit bir unsuru olup, maliyetleri de düşürmektedir [6].

Aracın güvenlik beklentilerinden ödün vermeden ağırlığını azaltmak için yeni malzemelerin kullanılmasının yanı sıra parçaların optimizasyon teknikleri ile yeniden tasarlanıp yeni üretim teknikleri ile üretilmesi gerekmektedir. Bu süreçte sonlu elemanlar analizleri önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle toplu taşıma araçlarında prototip imalatların gerçekleştirilmesinden önce sonlu elemanlar analizleri yeni tasarımların doğrulama süreçleri oldukça hızlı ve düşük maliyetli gerçekleştirilebilir. Literatürde birçok araştırmacı sonlu elemanlar analizleri ile özellikle otobüslerin yapısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Arslan ve Solmaz (2018) 12 metre uzunluğundaki bir yolcu otobüsünün yapısal analizlerini gerçekleştirmiş ve karkas yapısındaki maksimum gerilme değerinin profillerin birbirine bağlandığı noktalarda oluştuğunu belirtmişlerdir [7]. Karamert ve Demir (2022) bir otobüs gövde yapısında topoloji optimizasyonu uygulayarak profil örgü yapısını bu optimizasyon sonuçlarına uygun olarak revize etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar analizlerinde gövde katılık değerleri optimizasyon çalışmasında korunması gereken kriter olarak kabul belirlenmiştir. Gövde karkasının rijitlik değerleri ölçülmüş ve yeni tasarımda yaklaşık %9 oranında bir hafifletme elde etmişlerdir [8]. Jung ve arkadaşları (2020) bir elektrikli otobüsün tavan yapısının hafifletilmesi için çok malzemeli topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [9]. Kongwat ve arkadaşları (2020) ECE-R66 standardı ile uyumlu olarak gerilme, rijitlik ve devrilme performansı açısından otobüs karkasını incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri topoloji optimizasyonu ile yaklaşık %2,5 oranında bir hafifletmenin mümkün olduğunu açıklamışlardır [10]. Raj ve arkadaşları (2020) otobüs gövdesini dört farklı senaryo altında (yerçekimi ivmesinin etkisi, frenleme etkisi, 2g ivme etkisi ve darbe yükünün etkisi) statik ve dinamik olarak analiz etmişlerdir [11]. Fu ve arkadaşları (2019) bir elektrikli otobüs gövde yapısında optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon hedefi olarak toplam kütleyle en aza

indirmeyi belirlemişler ve buna karşılık eğilme, burulma rijitliğini, eğilme ve burulma frekansı kısıt olarak belirlenmiştir [12]. Croccolo ve arkadaşları (2011) bir şehir içi otobüsün şasi sistemini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişler ve çalışma şartlarında şasinin maruz kaldığı yüklenme koşullarında gerilme, gerinim ve yer değiştirme miktarlarını araştırmışlardır [13]. Tam ve arkadaşları (2023) gri ilişkisel analize dayalı Taguchi yöntemini kullanarak 29/34 koltuklu otobüsün şasi yapısını optimize etmişlerdir. Bu çalışmada, şasi dayanımı sağlanırken araç ağırlığını azaltmak amacıyla tasarım değişkenleri olarak tavandaki çapraz profillerin sayısına ve kalınlığında revizyon gerçekleştirmişlerdir [14]. Ko ve arkadaşları (2009), kompozit malzemeden üretilmiş parçaların kullanıldığı bir otobüsün darbe dayanımını sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Hazırladıkları modeli ECE R66 regülasyonuna uygun olarak devrilme analizine ve önden çarpma analizine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlarda sürücü ve yolcuların hayatta kalmalarını sağlayacak alanların, devrilmeye karşı korunduğunu tespit etmişlerdir [15].

Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme ve ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda gövde karkasında bazı tasarımsal değişikliklere gidilmiş ve araç ağırlığı azaltılmıştır. Yeni tasarım tekrar aynı sınır şartlarında analiz edilerek doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

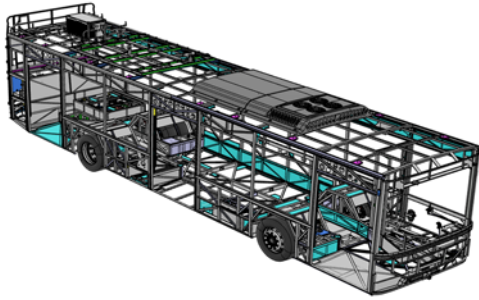
Yapılan literatür araştırmalarından da görüleceği üzere benzer toplu taşıma araçları sonlu elemanlar modeli kullanılarak farklı yönlerden incelenmektedirler. Ancak sonlu elemanlar modelinin sadece gövde üzerinde oluşturulduğu modellerde gövde karkasını etkileyen kuvvetlerde farklılık yaşanmakta ve sonuçların doğruluğu azalmaktadır. Tüm bunlarla birlikte literatürde yapılan çalışmaların genel olarak ticari bir tasarımı içermemesi sebebi ile yerleşim planı ve teknik özelliklerin detaylı incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmanın en önemli özgülüğü, modelleme

aşamasında aksların gövde ile tüm bağlantı parçalarının modellenerek yolcu yerleşim planı gibi önemli etkilerin gerçek hayattaki ile birebir olarak uygulanması sayesinde daha doğru sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada örme şasi tipine sahip, M3 sınıfı, 92 yolcu kapasiteli ve çift aksa sahip 12 metre elektrikli bir otobüs gövdesinin yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Otobüs gövdesine ait üç boyutlu katı model Catia V6 programı kullanılarak tasarlanmıştır. Gövde karkasının genişliği 2500 mm uzunluğu 12000 mm ve yüksekliği 3000 mm'dir. 1185 adet profil ve 187 farklı sac levha kullanılan gövde karkasının toplam ağırlığı 3130 kg olarak ölçülmüştür (Şekil 1).

Çalışmadaki sonuçların gerçeğe en yakın olarak elde edilmesi açısından gövde karkasının yanı sıra, aracın aksları ve camları da modellenmiştir. Araç üzerinde altı tanesi tavan bölgesinde, dört tanesi arka bölgede olmak üzere 10 adet batarya kullanılmaktadır. Bataryalar da dahil olmak üzere araca etki edecek tüm kütleler, kendi ağırlık merkezlerinden ilgili bölgelere tanımlanmıştır. Tüm kütleler dahil edildikten sonra aracın tam kapasitede ağırlığının 19500 kg olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. 12 Metre otobüs gövde karkası modeli

Standart üretim yöntemlerine uygun olarak tasarlanan otobüs gövdesinde, profiller için otomotiv sektöründe sıkça kullanılan ve korozyon gibi istenmeyen durumlara karşı galvaniz kaplamalı S350GD+Z malzemesi kullanılmıştır. Otobüsün sac kaplamaları ve diğer tüm destek sacları için ise St37

yapı çeliği tercih edilmiştir. Otobüs gövde karkasında kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

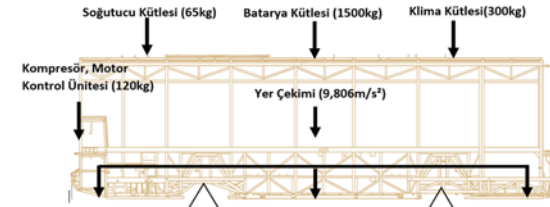
Çizelge 1. Gövde karkasında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Profiller (S350GD+Z)	Sac levha (St37)
Elastisite modülü (GPa)	210Gpa	210Gpa
Poisson oranı	0.3	0.3
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	7.8
Akma sınırı (MPa)	350	250

Yolcu kütlesi ve araç üzerinde etkili olan diğer tüm kütleler aracın ilgili bölümlerine noktasal kütle şeklinde kendi ağırlık merkezlerinden tanımlanmıştır. Analiz senaryolarında uygulanacak sınır şartları otobüsün gerçekteki tüm çalışma koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda gövde ile etkileşimi olan tüm komponentler modellenmiş, körük ve süspansiyon kuvvetleri olarak aracın ilgili bölümlerine yaylar tanımlanmış süspansiyonları temsilen tepki kuvvetleri belirlenmiştir. Mesnet noktaları aracın tekerlek bölgeleri olup, diğer aks parçaları ise uygun serbestlik dereceleri tanımlanmıştır. Aracın işletme koşullarındaki çalışmasının gözlemlenmesi için aracın hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo seçilmiş ve yapısal analizler bu senaryolara göre yapılmıştır.

### 2.1. 1G Senaryosu

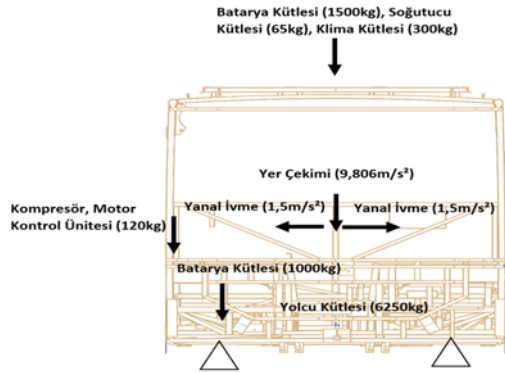
Birinci senaryo aracın en çok maruz kaldığı durumlardan biri olup bu senaryoda taşıt gövdesi tam yüklü durumda iken yerçekimi ivmesinin meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Aracın 1G senaryosuna ait yükleme durumu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 1G yükleme durumu şematik görüntüsü

## 2.2. Yanal İvmelenme Senaryosu

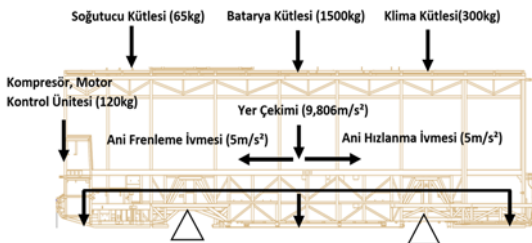
Araç sağ veya sol yönde virajlı yollarda seyahat halinde iken virajın yarıçapına bağlı olarak aracın ağırlık merkezinde viraja ters yönde bir ivmelenme oluşacaktır. Bahsi geçen bu ivmelenme yanal eksenin iki yönü için  $1,5 \text{ m/s}^2$  olarak kabul edilip gövde karkası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu durum incelenirken 1G durumunda Şekil 2'de görülen tüm sınır şartları aynı kalmış ek olarak sadece ağırlık merkezinden sağ ve sol yönde  $1,5 \text{ m/s}^2$  ivme eklenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Yanal ivmelenme senaryosu şematik görüntüsü

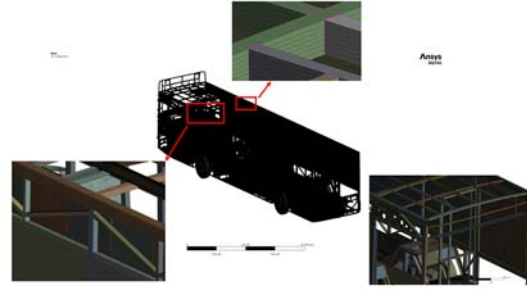
## 2.3. Ani Hızlanma ve Frenleme Senaryosu

Tüm taşıtlarda hızlanma ve frenleme anları, diğer senaryolarda olduğu gibi ağırlık merkezlerinden ivmelenerek gerçekleşmektedir. Araç hızlandığı anda gövdenin ağırlık merkezinden gidiş yönünün tersine bir ivme oluşacaktır. Bu ivme,  $5 \text{ m/s}^2$  olarak kabul edilmiş olup bunlara ek olarak 1G senaryosunda uygulanan tüm sınır şartları uygulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Ani hızlanma ve frenleme senaryosu şematik görüntüsü

Sonlu elemanlar ağında gövde yapısını içeren yüzey elemanlar için quadrilateral elemanlar katı elemanlar için ise hexahedron elemanlar kullanılmıştır. Tüm gövde konstrüksiyonunu oluşturan profiller için 10 mm boyutlandırma yapılmıştır. Çarpık elemanların oluşmaması için model üzerinde yer alan radyus gibi detaylar temizlenmiştir. Tüm bunlara ek olarak gövde yapısını oluşturan tüm profiller gerilme geçişlerinin daha hassas gözlenmesi adına Space Claim ortamında aynı düğüm noktasını paylaşıp olacak şekilde modellenmiş ve mesh geçişlerinde aynı düğüm noktasının kullanılması sağlanmıştır. Kurulan sonlu elemanlar modeli 4006856 düğüm noktası ve 3794000 eleman sayısından oluşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Gövde karkası sonlu elemanlar modeli

Ortalama eleman kalite değeri 0.9491 olarak elde edilmiştir (Şekil 6).

Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Element Q...	Default (5, e-002)
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
Min	5,2628e-004
Max	1,
Average	0,9491
Standard Deviat...	0,1055
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
- Statistics	
Nodes	4006856
Elements	3794000

Şekil 6. Ağ yapısına ait eleman kalite bilgileri

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

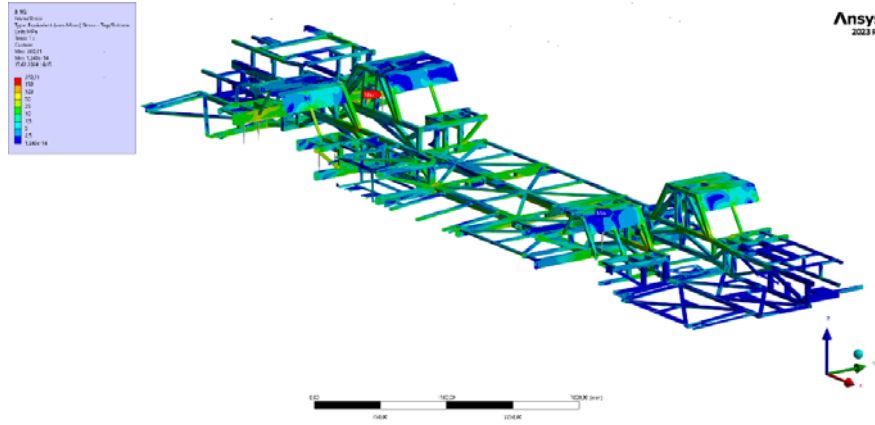
### 3.1. 1G Senaryosu Analiz Sonuçları

Belirtilen sınır şartları için, 1G senaryosuna ait analiz sonuçları incelendiğinde, aracın en kritik

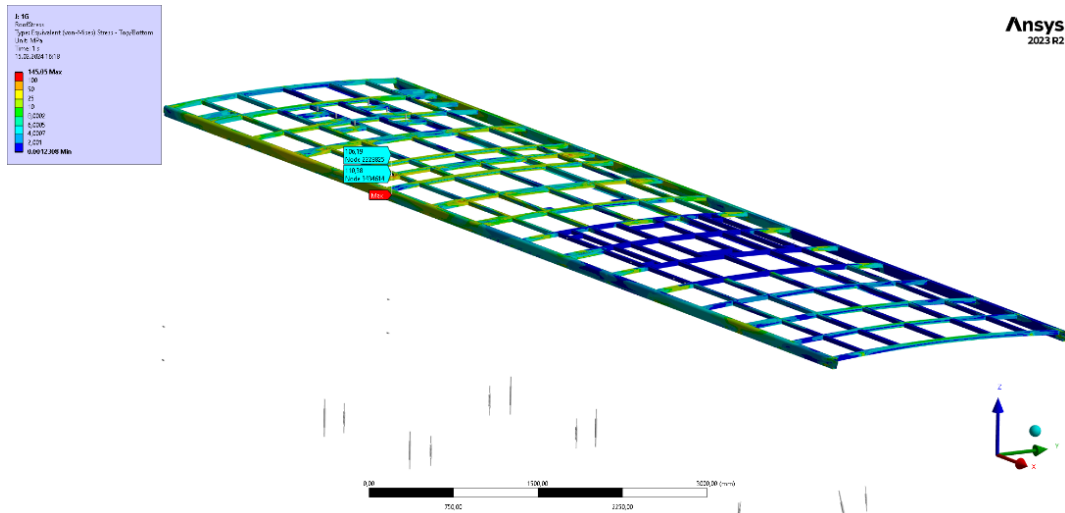
bölgeleri yükleme koşullarına bağlı olarak şasi ve tavan bölgelerinde tespit edilmiştir. Gövdenin sonlu elemanlar modeli kurulurken karkasta yer alan tüm profillerin radyuslu kısımlarının temizlenmesi sonlu elemanlar hesaplarında bazı çentik etkilerinin oluşmasına sebep olmuştur. Çentik etkilerinin yarattığı “singularity” sebebiyle maksimum gerilmeler düğüm noktalarının ikincisinden okunmuş ve çentik etkileri ihmal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde şasi bölgesinde maksimum 177 MPa gerilme görülmüştür. Kullanılan malzemenin S350 yapı çeliği olduğu bilindiğinden en kritik sayılabilecek noktada bile

şasi bölgesi yaklaşık olarak 2 kat emniyetlidir (Şekil 7).

Bir diğer kritik nokta olan tavan bölgesindeki gerilme dağılımı incelendiğinde ise, bataryanın taşıyıcı takozlarının bulunduğu braketlerde yaklaşık olarak 130 MPa gerilme değeri okunmuştur. Asıl tehlike yaratabilecek kesme gerilmelerinin meydana geldiği bağlantı kenarlarında ise maksimum 60 MPa bir gerilme değeri görülmektedir. Bu bulgulardan yola çıkarak tavan bölgesinin gerilme yığılmalarının en çok görüldüğü noktalarda dahi 2,5 kat emniyetli olduğu söylenebilir (Şekil 8).



Şekil 7. 1G yükleme koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



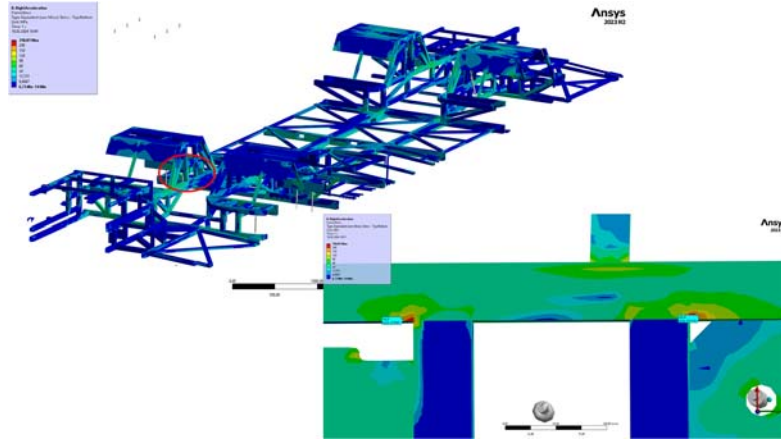
Şekil 8. 1G yükleme koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Sağ ve sol duvar profilleri ise 1G senaryosunda ekseriyetle basma ve burkulma gerilmelerine maruz kalacaklardır. Bu tür karkas yapılarında basma ve burkulma gerilmeleri büyük tehlikeler yaratmadığı görülmektedir.

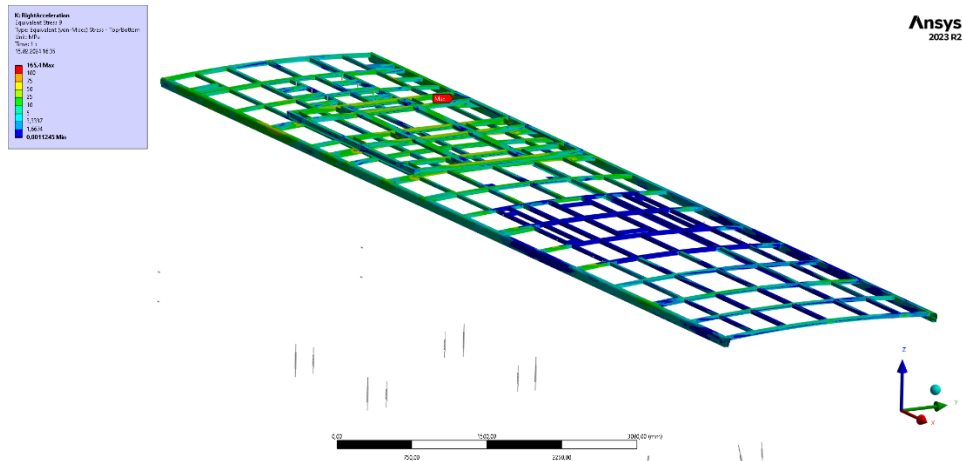
### 3.2. Yanal İvmelenmesi Senaryosu Analiz Sonuçları

Bu senaryo kapsamında tüm sınır şartları aynı bırakılıp ağırlık merkezine yer çekimine ek yanal bir ivme ekleyip yapısal analiz tekrarlanmıştır. Gerilme yığılmaları 1G senaryosunda olduğu gibi aks ve tavan bölgelerinde gözlemlenmiş fakat büyük bir artış meydana gelmediği görülmüştür.

Otobüs viraj anında iken özellikle şasi üzerinde yanal ivmenin meydana getirdiği eğilme ve burulma momentlerine bağlı olarak, aks mesnet bölgelerinde gerilme artışları gözlemlenmiştir. Aracın tam yüklü durumunda ağırlık merkezinin arka aks bölgesine yakın olması sebebi ile 1G Senaryosunda olduğu gibi en büyük gerilme miktarı arka aksın mesnetlendiği kirişte 205 MPa olarak okunmaktadır. Okunan bu değer kullanılan yapı çeliğine göre emniyetli bölgede kaldığından herhangi bir tehlike teşkil etmemektedir. Tespit edilen bu gerilme değerleri yapı üzerinde süreklilik yaratmayıp ağ yapısının anlık olarak bir miktar bozulması ve keskin köşelerin çentik etkisi yaratması sonucu meydana gelmiştir (Şekil 9).



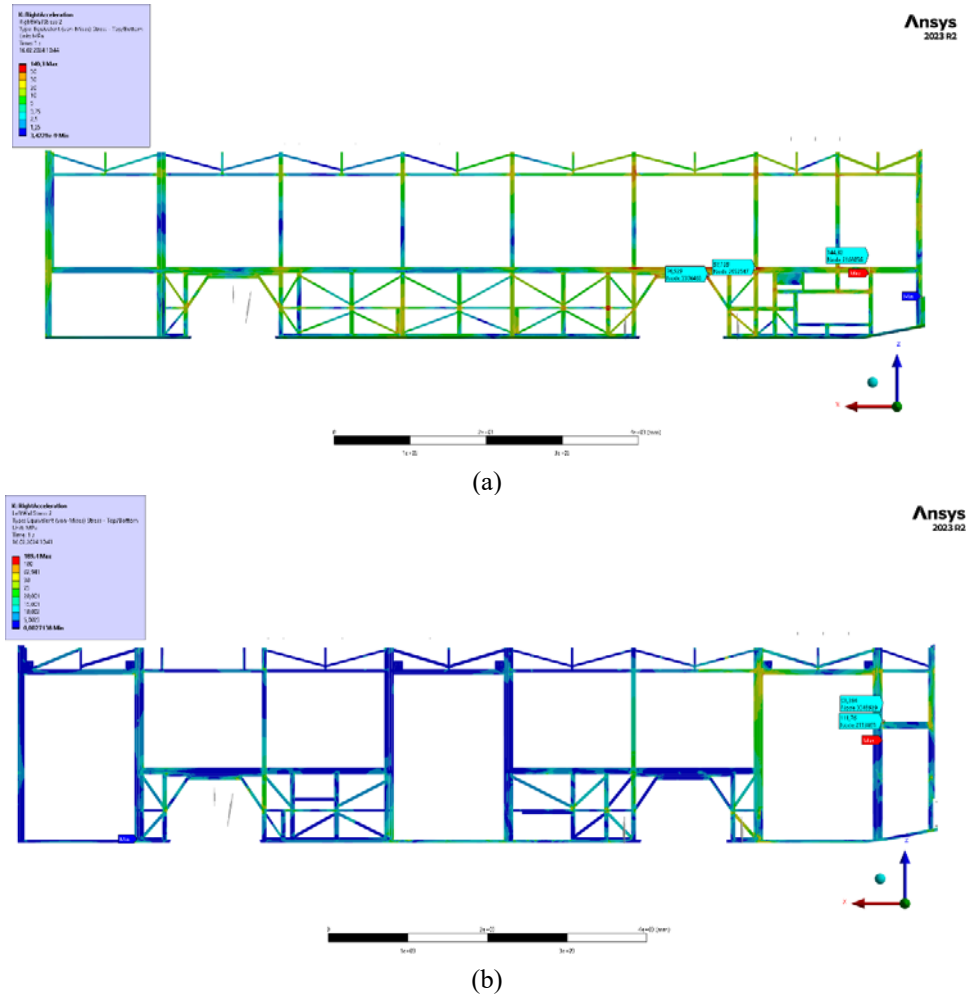
Şekil 9. Yanal ivmelenme koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



Şekil 10. Yanal ivmelenme koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Tavan bölgesi üzerinde yaklaşık olarak 1800 kg statik yük bulunmaktadır. Viraj anında batarya bağlantı noktalarının araca paralel eksen etrafında dönmeye çalışmasından dolayı zorlanmalar meydana gelmiş ve tavan batarya bağlantı bölgelerinde 165 MPa civarlarında gerilme değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen gerilme değerinin ekseriyetle standart yer çekiminden kaynaklandığı ve basma yönünde olduğu görülmüştür. Bölgede kullanılan malzeme açısından değerlendirildiğinde ise yaklaşık 2,2 kat emniyetli olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple tavan profilleri ve sacları üzerinde yapısal açıdan herhangi bir tehlike olmadığı görülmüştür (Şekil 10).

Viraj senaryosunda dikkat edilen diğer bölgelerden birisi de sağ ve sol duvar bölgeleridir. Bu bölgeler ağırlıklı olarak basma gerilmelerine maruz kalmakta ve bu bölgelerde yapının nispeten sık profillerden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple yapı rijit davranmakta ve yüksek gerilmelerin oluşmasını engellemektedir. Sağ ve sol duvar bölgelerinde, ana taşıyıcı olarak uzun kirişler bulunmaktadır. Bu kirişler bahsedildiği gibi basma ve burkulma gerilmelerine maruz kaldığından kesitlerine bağlı olarak atalet momentleri önem arz etmektedir. Yapısal analiz çıktılarından görüldüğü üzere ana kirişler, sistemi viraj senaryosunda dahi rijit ve emniyetli bölgede tutmaktadır (Şekil 11).



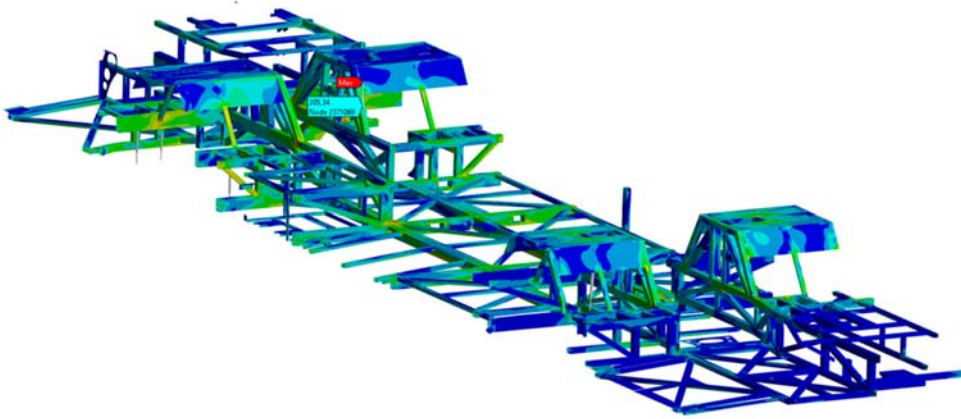
Şekil 11. Yanal ivmelenme koşulunda a) sağ duvar, b) sol duvar yapısal analiz sonuçları



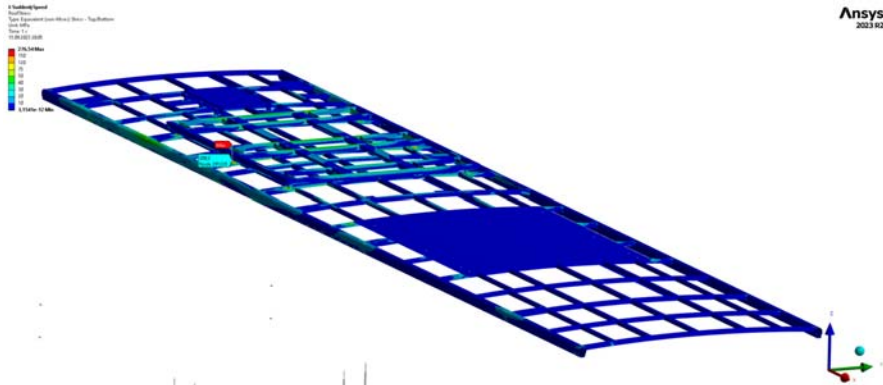
### 3.3. Ani Hızlanma ve Frenleme Senaryoları Analiz Sonuçları

Ani hızlanma durumu için Şekil 4'te açıklanan sınır şartları uygulanmıştır. Sonuçlar incelenip diğer senaryolar ile kıyaslandığında büyük farklılıklara rastlanmamıştır. Maksimum gerilme değeri arka aks mesnet bölgesinde görülmüştür. Ani hızlanma senaryosu için şasi ve tavan bölgeleri detaylıca

incelenmiş, yapılan inceleme sonucunda şasinin paralel eksenine göre ivmelenmesi, aracın yanal ekseninde dönmeye çalışarak burulma momentine maruz kalmasına sebep verdiği görülmüştür. Fakat araç paralel eksende yanal eksene kıyasla daha rijit bir yapı oluşturduğundan dolayı gerilme değerlerinde herhangi bir artışa rastlanmamıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Ani hızlanma koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



Şekil 13. Ani hızlanma koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Tavan bölgesi incelendiğinde maksimum gerilme değerlerinin diğer analiz senaryoları ile benzer bölgelerde olduğu ve bir miktar artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 13). Bahsi geçen bu artışın nedeni aracın paralel eksen yönünde ivmesinin artması sonucunda batarya bağlantı takozlarında meydana gelen kayma gerilmesidir. Bu bölgedeki batarya bağlantı takozlarından alınan noktasal

ölçümlerde 208 MPa değerinde bir gerilme okunmuş ve bu değer 350 MPa olan akma sınırından düşük olduğu için bu bölge emniyetli kabul edilmiştir.

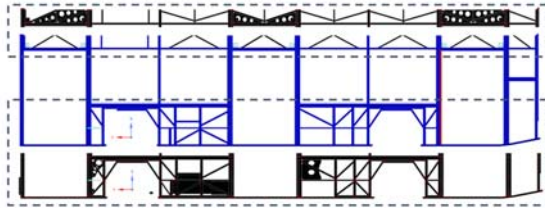
Ani frenleme durumu da araç üzerinde ivmelenme bakımından ani hızlanma durumu ile aynı etkiyi oluşturduğu görülmektedir. İncelenen tüm

senaryolarda, şasi bölgesinin mesnet noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelmiş ancak bu değerler maksimum olarak 200-250 MPa arasında yer almıştır. Ani frenleme durumunda maksimum gerilme oluşan bölge değişmemiş fakat bu senaryoda araç öne doğru burulmaya çalıştığından dolayı ön akslarda oluşan gerilme miktarlarında artış meydana gelmiştir.

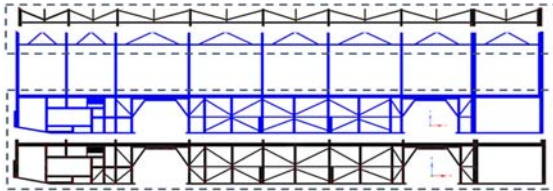
Tavan bölgesinde batarya yükleri simetrik bir biçimde dağıldığından dolayı, bataryanın geldiği taşıyıcı karkasta herhangi bir gerilme değişimine rastlanmamıştır.

### 3.4. Gövde Hafifletme Çalışmaları

Çalışma kapsamında üç farklı senaryo altında gerçekleştirilen yapısal analizler sonucunda gövde karkasında düşük gerilme oluşan bölgelerde tasarım değişiklikleri ile hafifletmenin mümkün olacağı görülmüştür. Yapısal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk olarak sağ ve sol duvar profil yapılarının bazı bölgelerinde düşük gerilme bölgeleri ve sık bir profil yapısına rastlanmıştır. Bu bağlamda bazı tasarımsal değişikliklere gidilmiştir (Şekil 14). Sağ ve sol duvar bölgelerinin yanı sıra bu tür değişiklikler tavan batarya taşıyıcıları ve araç içi sac metal parçalarda da yapılmış olup, iptal edilen ve değiştirilen parçaları gösteren tasarım Şekil 15’de verilmiştir.

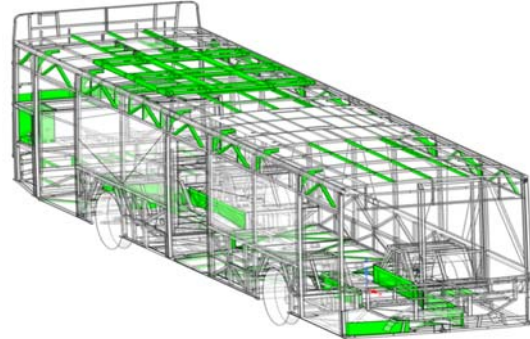


(a)



(b)

Şekil 14. a) Sol duvar profilinin, b) sağ duvar profilinin eski ve yeni hallerinin kıyaslanması



(a)



(b)

Şekil 15. a) Yapısal optimizasyona tabi tutulan bölgeler, b) iptal edilen parçalar

Optimizasyon işlemi gövde üzerinde 289 adet komponent üzerinde uygulanmıştır. Bunlardan 45’i iptal edilirken 244 parça üzerinde yapısal optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemler sonucunda 232 kg kütleli bir azalma meydana gelmiştir. Bu kısımdan sonraki aşamalarda, yeni tasarım için ilk gövde karkasına uygulanan analiz senaryoları aynı sınır şartları ile tekrar edilmiştir.

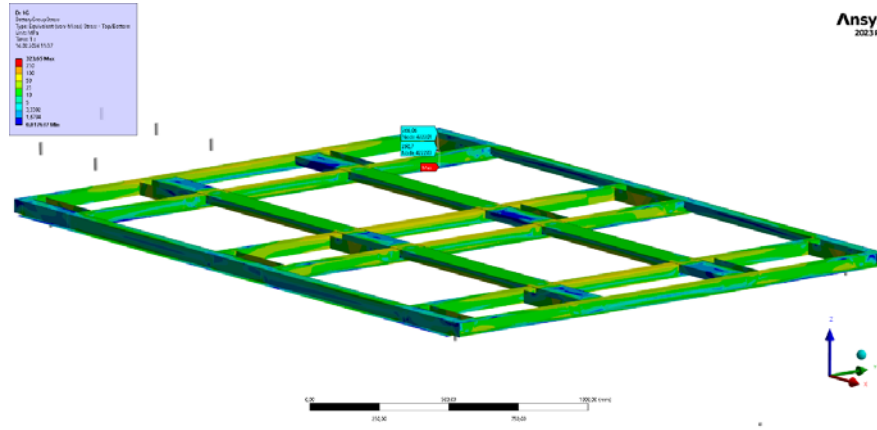
Yeni tasarım gövde karkası üzerinde yapılan yapısal analiz sonuçları incelendiğinde, şasi bölgesinde yapıyı etkileyecek büyüklükte bir optimizasyon işlemi yapılmadığından gözle görülür bir gerilme artışı meydana gelmemiştir. Ancak tavan bölgesi ve özellikle tavanda bulunan batarya karkas bölgesinde birçok komponent optimizasyona uğradığından dolayı, bu bölgedeki gerilme seviyeleri 140 MPa değerlerinden 267 MPa değerlerine kadar yükselmiş fakat bu değer,

kullanılan S350GD+Z yapı çeliğinin akma sınırına uzak olduğundan dolayı 1,3 kat emniyetli olduğu görülmüştür.

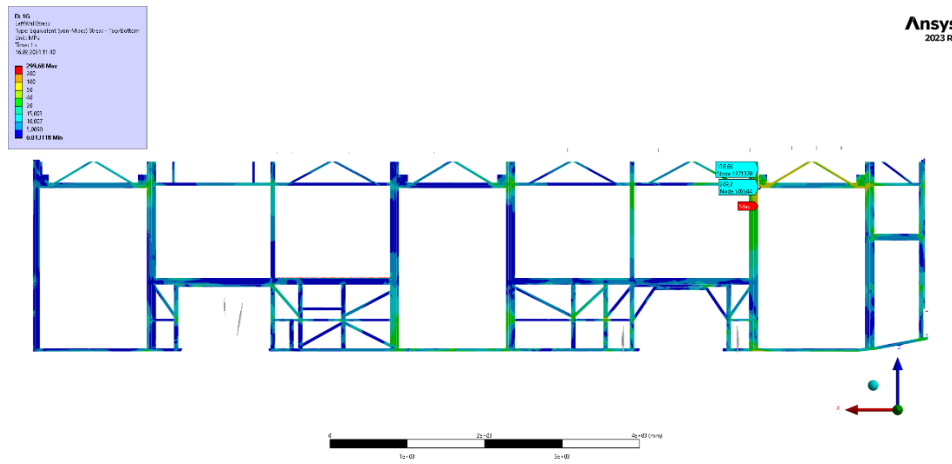
Çalışmaya konu M3 sınıfı yolcu taşıma otobüsü ticari olarak üretilmekte ve sonlu elemanlar analizleri sonrasında çeşitli test aşamalarından geçmekle birlikte sahada aktif çalışan otobüslerin yapısal durumları geri bildirimler ile takip edilmektedir. Metinde bahsi geçen emniyet katsayısının bu durumlar göze alındığında yeterli olduğu görülmektedir. Literatür tarandığında, Kabakçı ve Solmaz (2019) Statik yükleme analizinde otobüs gövdesinin azami yüklü haldeyken meydana gelen deformasyon ve gerilmeleri incelenmiştir. Maksimum gerilme

değeri 1245,7 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte emniyet katsayıları da sırasıyla alt şasi yapısında 0,285 ve karkas yapıda da 0,369 olarak bulunmuştur. Buradan hareketle bazı optimizasyon ve ağırlık azaltma çalışmaları da yapılabilir şeklinde ifade etmişlerdir [7,16] (Şekil 16). Batarya bölgesinin dışında kalan tavanın diğer bölgelerinde herhangi bir yükleme olmadığından dolayı bir gerilme artışı gözlenmemiştir.

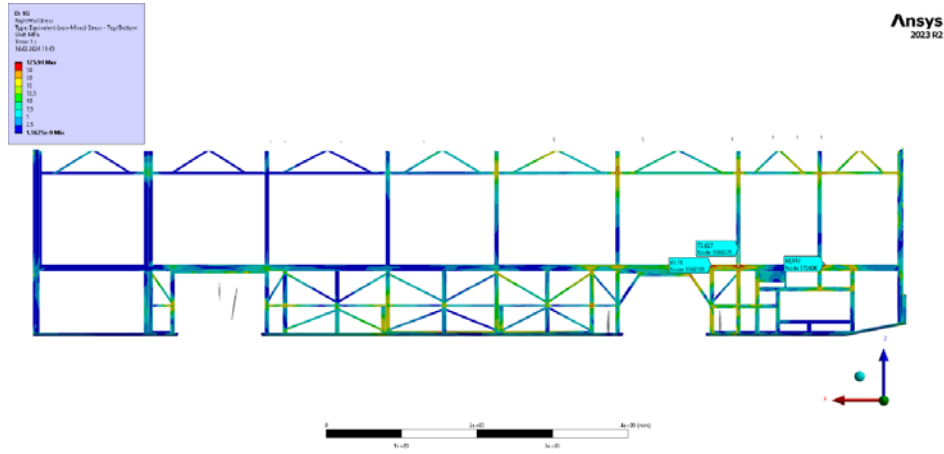
Optimizasyon yapılmış diğer bölümler olan sağ ve sol duvar profillerinde gözle görülür bir gerilme artışı olmuş fakat profil yapısının yeterince rijit seviyede olduğu göz önüne alındığında tehlike yaratacak bir soruna rastlanmamıştır (Şekil 17).



Şekil 16. 1G ivmelenme senaryosu altında yeni tasarımda batarya taşıyıcıları üzerindeki gerilme dağılımı



(a)



(b)

Şekil 17. Ani hızlanma koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Şekil 17’te 1G durumunda sağ ve sol duvar profilleri üzerindeki gerilme dağılımı verilmektedir. Özellikle sol duvar üst profil bölgesinin bataryaları taşıyan bölümlerine bakıldığında, bu bölgelerde profil yapısının tasarımının değişmesinden dolayı kayma ve kesme gerilmelerinin arttığı açıkça görülmektedir. Fakat tüm bu gerilmelerin 60 MPa değerini geçmediği görülmüştür. Arka kapının olduğu bölgedeki sacların kaldırılmasından dolayı yatay taşıyıcı profiller üzerinde bir miktar gerilme artışı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgede kapı yer alması ve bataryaların bir bölümünün de aracın arkasında yer almasından dolayı okunan gerilme değeri ikinci tasarım için 132 MPa değerinden 250 MPa seviyelerine yükselmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yolcu taşımacılığında kullanılan bu tarz taşıtlar için çeşitli yapısal optimizasyon tekniklerinin kullanılarak benzer hafifletme oranlarının elde edildiği gözlenmiştir [8,17].

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme, ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda otobüsün tam yüklü

durumunda, en çok zorlanma yaşayacağı senaryoda (1G ivmelenme) emniyetli olduğu görülmüştür. Ayrıca yeni tasarım sonucunda ortaya çıkan yapıda da gerilme değerleri, kullanılan malzemenin akma sınırlarını aşmamış ve karkas yapısının statik ve tam yüklü durumda güvenli bölgede olduğu görülmüştür. Yenilenmiş tasarımda yanal ivmelenme sırasında batarya taşıyıcıları üzerindeki maksimum gerilme %10 oranında bir artış göstererek 290 MPa seviyesine ulaşmıştır. Bu bölge taşıyıcı takozların olduğu bölgede olduğundan 1G senaryosunda olduğu gibi tehlike yaratmayacak ve araca ağırlık merkezinden viraj anında ivme uygulandığında rijit bir davranış sergileyecektir. Yeni tasarlanmış sağ ve sol duvar profilleri üzerinde yanal ivmelenmenin yarattığı etki incelendiğinde, eğilme momentinin artışı sebebiyle köşe bağlantı noktalarında çok küçük gerilme artışları meydana gelmiş fakat bu artış yapıyı olumsuz yönde etkilememiştir. Son olarak ani hızlanma ve frenleme senaryoları yeni tasarım için incelendiğinde, değişiklik yapılan bölgelerde ve genel yapıda akma sınırının dışında bir gerilmeye rastlanmamıştır. Ani hızlanma ve frenlemenin ağırlık merkezinde yarattığı  $5\text{m/s}^2$ ’lik ivme değeri özellikle aracın aks ve tavan bölgelerinde yer alan batarya karkasının kaynak noktalarında etkili olmuştur. İlk tasarım ile kıyaslandığında ana yapısal parçaların formundan büyük değişiklikler yapılmadığından gerilme değerlerinde kayda değer bir artış yaşanmamıştır. Yapılan tasarım

değişiklikleri ile M3 sınıfı otobüs gövde karkasında, sol duvarda 19,694 kg, sağ duvarda 17,346 kg, tavan bölgesinde 72,43 kg, şasi ve diğer bölgelerde ise 122,53 kg kazanç sağlanarak toplamda 232 kg'lık bir hafifletme sağlanmıştır. Toplam araç gövdesi göz önüne alındığında yaklaşık %7,41 oranında bir ağırlık düşüşü elde edilmiştir. Yeni tasarım mevcut analiz senaryoları ile doğrulanmıştır.

## 5. KAYNAKLAR

1. European Union, 2022. Directorate-General for Mobility and Transport European Commission, EU transport in Figures-MIAA22001ENN.
2. Tzeiranaki, S.T., Economidou, M., Bertoldi, P., Thiel, C., Fontaras, G., Clementi, E.L., De Los Rios, C.F., 2023. The Impact of Energy Efficiency and Decarbonisation Policies on the European Road Transport Sector. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 170, 103623.
3. Koffler, C., Rohde-Brandenburger, K., 2010. On the Calculation of Fuel Savings Through Lightweight Design in Automotive Life Cycle Assessments. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15, 128-135.
4. Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N., Sendeniz, G., 2014. A Case Study: Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure. Sustainability, 6(7), 4608-4631.
5. Cimprich, A., Sadayappan, K., Young, S.B., 2023. Lightweighting Electric Vehicles: Scoping Review of Life Cycle Assessments. Journal of Cleaner Production, 139692.
6. European Union, 2015. Light Weighting as a Means of Improving Heavy Duty Vehicles' Energy Efficiency and Overall CO2 Emissions, Rep. DG Clim. Action, 1, 199.
7. Arslan, T.A., Solmaz, H. 2018. M3 Kategorisi Bir Otobüs Tasarımı ve Yapısal Analizleri. In Proceedings on International Conference on Technology and Science, Antalya, 343-351.
8. Karamert, S., Demir, A., 2022. Ticari Otobüs Gövde Yapısında Topoloji Optimizasyonu Çalışması. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 34(2), 229-234.
9. Jung, Y., Lim, S., Kim, J., Min, S., 2020. Lightweight Design of Electric Bus Roof Structure Using Multi-Material Topology Optimisation. Structural and Multidisciplinary Optimization, 61, 1273-1285.
10. Kongwat, S., Jongpradist, P., Hasegawa, H., 2020. Lightweight Bus Body Design and Optimization for Rollover Crashworthiness. International Journal of Automotive Technology, 21, 981-991.
11. Raj, A., Ahamed, S., Rajath, H.G., Byregowda, H.V., 2020. Structural Analysis of Bus Body Frame Using Fea for Static and Dynamic Analysis. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 7(8), pp. 2975-2979.
12. Fu, C.L., Bai, Y.C., Lin, C., Wang, W.W., 2019. Design Optimization of a Newly Developed Aluminum-Steel Multi-Material Electric Bus Body Structure. Structural and Multidisciplinary Optimization, 60, 2177-2187.
13. Croccolo, D., De Agostinis, M., Vincenzi, N., 2011. Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis Via FEM: A Methodology Applied to a Case Study. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57(11), 799-809.
14. Tam, N.T., Le, T.P., Huynh, N.T., Nguyen, Q.M., 2023. Optimization of Frame Structure Coach 29/34 Seats in Static Durability State. Engineering Science and Technology, an International Journal, 47, 101523.
15. Ko, H.Y., Shin, K.B., Jeon, K.W., Cho, S.H., 2009. A Study on the Crashworthiness and Rollover Characteristics of Low-Floor Bus Made of Sandwich Composites. Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2686-2693.
16. Kabakçı, H., Solmaz, H., 2019. M3 Kategorisinde Bir Körüklü Otobüs Tasarımı ve Yapısal Analizleri. International Symposium on Automotive Science and Technology, 5-6 September 2019 Ankara, Turkey.
17. Haryanto, I., Raharjo, F., Kurdi, O., Haryadi, G., Santosa, S., Gunawan, L., 2018. Optimization of Bus Body Frame Structure for Weight Minimizing with Constraint of Natural

*M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi*

Frequency Using Adaptive Single-Objective Method. International Journal of Sustainable Transportation Technology, 1, 9-14.