

## Ticari Yarı Römork Tanker Aracının Gerçek Yol Sinyalleri İle Bilgisayar Ortamında Yorulma Hasarının İncelenmesi

Ali Mentese<sup>1,2\*</sup>, Cihan Demir<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul/Türkiye.

<sup>1\*</sup>ORCID: 0000-0002-2224-5987

<sup>1\*</sup>(ali.mentese@std.yildiz.edu.tr)

<sup>2</sup>Tirsan Treyler San., Sakarya/Türkiye. <sup>2</sup>(ali.mentese@tirsan.com)

<sup>3</sup>Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul/Türkiye.

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0001-8412-0787

<sup>3</sup>(c.demir@yildiz.edu.tr)

(Received: 15 January 2025, Accepted: 21 January 2025)

**ATIF/REFERENCE:** Mentese, A. & Demir, C. (2025). Ticari Yarı Römork Tanker Aracının Gerçek Yol Sinyalleri İle Bilgisayar Ortamında Yorulma Hasarının İncelenmesi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(1), 19-28.

**Özet** – Bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinin hızla gelişmesi, taşıt doğrulama süreçlerinde önemli bir ivme kazandırmış ve bu süreçlerin daha hızlı, daha verimli ve daha güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Ancak, günümüzde bazı firmalar, taşıt modellerini doğrulama süreçlerinde kapsamlı yorulma hasar analizleri gerçekleştirmek yerine, yalnızca statik analiz yöntemlerini kullanarak bu doğrulama işlemlerini tamamlamaktadır. Bu yaklaşım, taşıtın gerçek yol koşullarındaki dayanıklılığı ve yorulma ömrü konusunda eksik değerlendirmelere yol açabilmektedir.

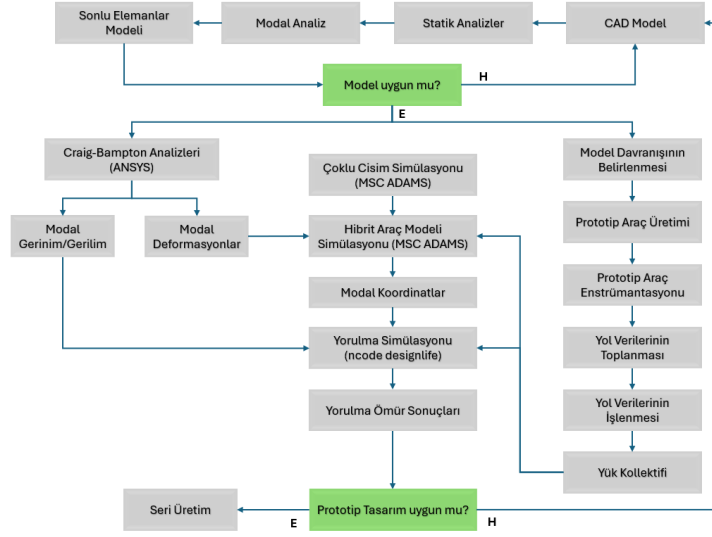
Bu çalışmada, 304 kalite paslanmaz çelikten üretilen ticari bir yarı römork tanker aracının 1.000.000 km hedeflenen yorulma ömrüne uygun bir simülasyon oluşturulmuştur. Simülasyon için, farklı yol koşullarından toplanan gerçek yol sinyalleri kullanılmış ve bu sinyaller üzerinde çeşitli filtreleme işlemleri yapılarak analizlerde uygulanabilecek hale getirilmiştir. Yapılan filtreleme işlemleri sonrasında, elde edilen bu gerçek yol sinyalleri aracılığıyla model üzerinde dinamik analizler ve yorulma hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile tanker modelinin tasarımını doğrulamak ve yorulma hasar analiz sonuçlarını, yol testlerinden elde edilen ekstrem koşullar belirlenerek yapılan statik analizlerle karşılaştırarak, taşıt modeli doğrulama süreçlerinde yorulma hasar analizlerinin etkilerini incelemek, bu doğrulama süreçlerinde yorulma hasar analizlerinin ihmal edilmesinin potansiyel risklerini ortaya koymak amaçlanmaktadır.

*Anahtar Kelimeler* – Yorulma Hasar Analizi, Çoklu Cisim Simülasyonu, Tanker Aracı Hızlandırılmış Yorulma Ömür Testi.

### I. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri ile taşıt doğrulama süreçler inanılmaz düzeyde hız kazanmıştır. Bu gelişme ile çoğu firma her yıl yeni model çıkarmakta ve mevcut modeli geliştirmektedir. Geliştirilen bu modeller üzerinde performans, ağırlık, maliyet ve imalat konu başlıkları altında tasarım iyileştirmeleri yapılmaktadır. Geçmişte bu konu başlıkları altında geliştirilen taşıt modelleri tasarım doğrulama ve prototip üretim süreçlerinin uzun olması sebebi ile piyasaya sürülemediği. Bu ve

bunun gibi nedenlerden dolayı taşıt tasarım doğrulama ve prototip üretim süreçlerinde bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1. Taşıt Tasarım ve Validasyon Süreçleri

Taşıt dayanım validasyonu, taşıt tasarım süreçlerinin en kritik aşamalarından biridir. Şekil 1’de bu aşamalar şematik olarak verilmiştir. Taşıtlar, kullanım ömürleri boyunca farklı yol profillerinde çeşitli dinamik ve titreşim etkilerine maruz kalırlar. Bu etkiler nedeniyle günümüzde, taşıtların statik analizlerinin yanı sıra dinamik analizler ve bu analizlere dayalı yorulma ömür analizlerinin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

Prototip modeller üzerinde yorulma etkilerinin incelenmesi hem uzun zaman almakta hem de yüksek maliyetlere yol açmaktadır [1]. Bu durum, bilgisayar destekli mühendislik çalışmalarının önemini giderek artırmıştır. Günümüzde mühendisler, yorulma analizlerini çeşitli yöntemlerle gerçekleştirebilmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalara baktığımızda, bu alanda birçok yöntemin geliştirildiği ve uygulandığı görülmektedir.

Yorulma analiziyle ilgili bilinen ilk bilimsel kayıt, 1837 yılında Wilhelm Albert tarafından yazılan bir makaledir. Alman maden mühendisi Wilhelm Albert, metal yorulması üzerine incelemeler yapan ilk araştırmacıdır ve demir maden zincirlerinin tekrarlayan küçük yükler altında yorulup kopması üzerine çalışmalar yapmıştır [2-3].

İlerleyen yıllarda, tren ulaşımı dünya genelinde önem kazanmaya başlamış ancak yorulma konusundaki bilgi eksiklikleri nedeniyle tren akslarında kırılmalar meydana gelmiştir. Bu aks kırılmaları, kazalara yol açmış ve mühendislerin bu alanda araştırma yapmasına neden olmuştur. Bu dönemde, inşaat mühendisi W. J. Rankine, akslarda oluşan kırılmaları incelemiş ve malzemelerdeki çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerine makaleler yayımlamıştır [4].

Metallerin yorulması üzerine yapılan ilk sistematik araştırmalar ise, Alman mühendis August Wöhler tarafından gerçekleştirilmiştir. Wöhler, yaptığı çalışmalarla S-N eğrileri (Wöhler eğrileri) olarak bilinen eğrilerin temelini atmıştır. Bu eğriler, malzemelerin yorulma davranış karakteristiklerini anlamada önemli bir adım olmuştur. [4-5]

1945 yılında, M.A. Miner, daha önce 1924’te A. Palmgren tarafından önerilen bir kuralı yeniden gündeme getirmiş ve bu kural "Palmgren-Miner Kuralı" olarak anılmaya başlanmıştır. Bu kural, lineer hasar hipotezi olarak bilinir ve yorulma hesaplamalarında önemli bir yöntemdir [6-7].

2010 yılında yapılan bir çalışmada, Wang X. ve diğ. [8], geleneksel yöntemlere alternatif olarak frekans tabanlı PSD (Power Spectrum Density) yorulma metodunu kullanmışlardır. Bu yöntemde, MBS (Çoklu Cisim Simülasyonu) simülasyonlarına ihtiyaç duyulmaksızın, aracın uygulanan frekans tabanlı ivmelere verdiği tepki fonksiyonları kullanılarak yorulma ömürleri hesaplanmıştır.

Daha sonraki yıllarda, yorulma analizlerinde saydırma yöntemlerinin kullanılması ve bilgisayar destekli analiz tekniklerinin gelişmesi, yorulma konusunun otomotiv endüstrisinde geniş bir yer bulmasını sağlamıştır. Günümüzde, ömür analizi birçok otomotiv firması tarafından tasarım süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası olarak kullanılmaktadır.

Yorulma analizleri neticesinde bir ürünün, alt sistemin veya komponentin kullanım ömrü boyunca maruz kalacağı yükler sebebi ile oluşacak hasarlar belirlenerek tasarım iyileştirilmesine gidilebilir. Şekil 1’de bir taşıt modeline ait yorulma analiz süreci gösterilmiştir. Bu süreçte prototip model üzerinden alınacak gerçek yol sinyallerinin ve çoklu cisim simülasyonunda kullanılacak olan modelin doğruluğu oldukça önemlidir. Çoklu cisim simülasyonunda taşıt alt sistemleri prototip model ile uygun olacak şekilde modellenmelidir. Aksi durumda yoldan gelen etkiler model üzerine doğru bir şekilde verilmez ve istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada, ticari bir yarı römork tanker şasisinin gerçek yol sinyalleri kullanılarak yorulma ömür analizinin gerçekleştirilmesi, elde edilen analiz sonuçlarının, yol testlerinde elde edilen ekstrem koşullar belirlenerek yapılan statik analizlerle karşılaştırılması ve bu doğrultuda taşıt doğrulama süreçlerinde yorulma hasar analizlerinin ihmal edilmesinin potansiyel risklerini ortaya koymak amaçlanmaktadır.

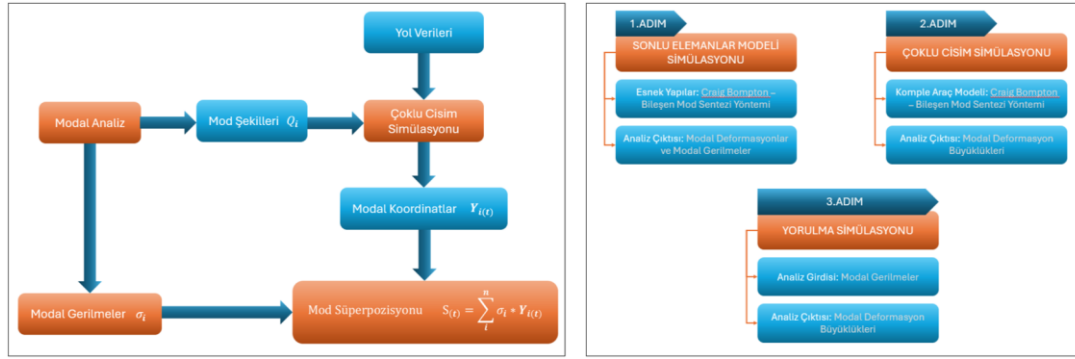
## II. MATERYAL ve METHOD

Tanker aracı yorulma ömür hasar birikimine bakmadan önce araç üzerinde statik analizlerin yapılması gereklidir. Statik analizlerde sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS kullanılmıştır. ANSYS üzerinde yapılan simülasyonda araç üzerinde yol testleri ile elde edilen ekstrem durumlar belirlenerek statik analiz koşulları tanımlanmıştır. Bu statik analizler yer çekimi ivmesi etkisinde analiz, çukura düşme analizi ve tümsek geçme analizi olarak belirlenmiştir. Burada belirlenen yer çekimi ivmesi etkisi altında analiz aracın durur pozisyonda maksimum yüklü durumda dayanımını belirlemek içindir. Çukura düşme ve tümsekten geçme analizleri ise yol testlerinde görülen araç üzerine etkiyen maksimum koşullardır. Bu işlemler sonrası tanker aracı yorulma ömür analizi yapılmıştır. Tanker aracı yorulma analizlerinin yapılabilmesi için önceki bölümlerde anlatıldığı üzere birden fazla yöntem mevcuttur. Mevcut bu yöntemler içinden Craig-Bampton metodu bu çalışmada kullanılmıştır. Craig-Bampton metodu yorulma analizlerinde karmaşık ve büyük yapısal sistemlerin basitleştirilerek simüle edilebilmesine ve aynı zamanda hesaplama sürelerinin kısa olması sebebi ile bu çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir [9]. Craig-Bampton yöntemi kullanılarak yapılan yorulma ömür analizinde öncelikle tanker modeli üzerinde modal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu modal analizlerde tanker modeli için belli sınır şartları ve kabul kriterleri tanımlanmıştır. Bunlar şu şekildedir;

- Tanker modeli maksimum yüklü olduğu kabul edilerek analiz edilmiş ve faydalı yük 27 ton olarak belirlenmiştir.
- Tanker modelinin yakıt taşınması sebebi ile statik analizlerde hidrostatik basınç verilerek faydalı yük tanımlaması yapılmıştır.
- Çoklu cisim simülasyonunda tanker modeli içerisine tanımlanan bu faydalı yük tank içerisine tam dolu olacak şekilde tanımlanmış sıvı çalkalanmaları ihmal edilmiştir. Bu tam dolu yük tank içerisine üçe bölünerek noktasal yük elemanı olarak tanımlanmıştır.

Modal analizler sonrasında çoklu cisim simülasyonuna girdi olarak verilecek olan gerçek yol sinyalleri toplanmış ve bu sinyaller nCODE, Matlab programları ile filtrelenerek tanker modelinin çoklu cisim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar “MSC Software Corporation” firmasına ait “MSC

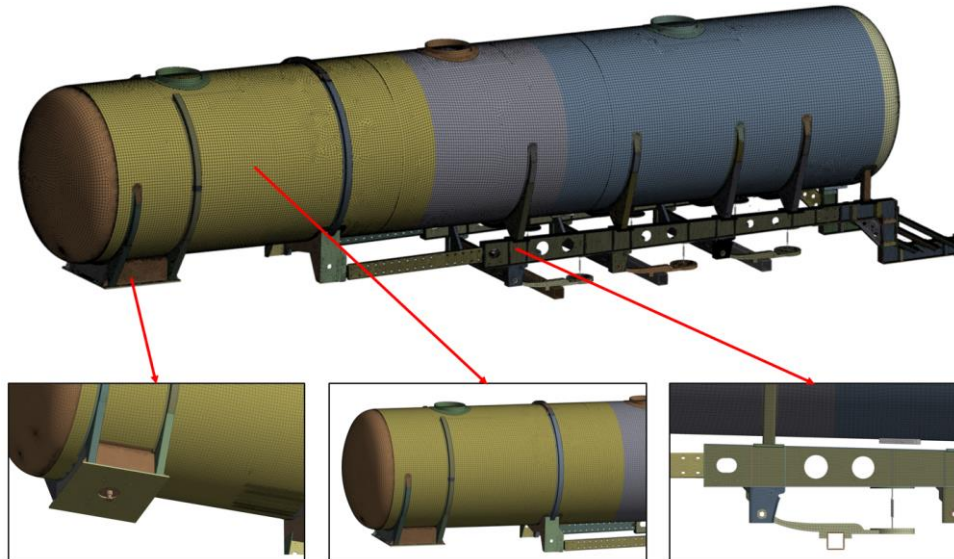
Adams'' yazılımı kullanılmıştır. Adams yazılımında yapılan çoklu cisim simülasyonunda modelin esnek yapı haline gelebilmesi için modal analizlerden alınan yapının mod şekilleri içe aktarılmıştır. Böylelikle yol sinyalleri etkisi altında yapının dinamik davranışı incelenmiş ve bu dinamik davranışların sonucunda modal koordinatlar elde edilmiştir. Son olarak ANSYS programında yapılan modal analiz sonuçları ile ADAMS programından alınan modal koordinatların süperpozisyonu ile yorulma ömür analizleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma ömür analizlerinde HBM firmasına ait ''nCODE Designlife'' yazılımı kullanılmıştır. Bu işlemler sonucunda iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Şekil 2'de araç yorulma analizine ait yöntem akış şeması verilmiştir.



Şekil 2. (a) Araç yorulma analizi akış şeması, (b) Uygulanılan analiz adımları

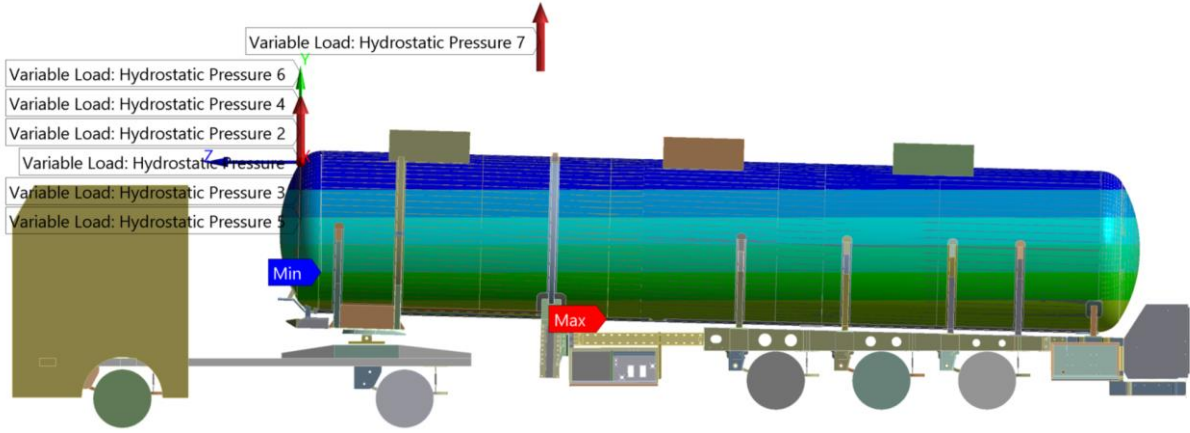
#### A. Tanker Modeli Sonlu Elemanlar Metodu İle Statik Analizi

Tanker modeli sonlu elemanlar analizinde modelin birden fazla küçük parçalardan oluşması sebebi ile ağ yapısı kalitesi bu parçalara ve analiz denemelerine göre her parça için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan denemeler ile analiz sonuçlarının stabilize olduğu ağ yapısı eleman boyutu, şasi için 10 mm, tank için 30 mm ve şasi tank bağlantı braketleri için 5 mm olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar metodunda en doğru sonuçları alabilmek için kaliteli ağ yapısı uygulamak gerekmektedir [10]. Şekil 3'te bu ağ yapısına ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 3. Tanker aracı için uygulanılan ağ yapısı modeli

Tanker modeli yer çekimi ivmesi etkisinde durur pozisyonda yapılan analizlerinde belirlenen ağ yapısı ile model üzerinde bulunan tanka hidrostatik basınç verilerek 27 ton sıvı faydalı yük taşıma senaryosu uygulanmıştır. Bu analiz senaryosunda uygulanan kuvvet Şekil 4'te verilmiştir.

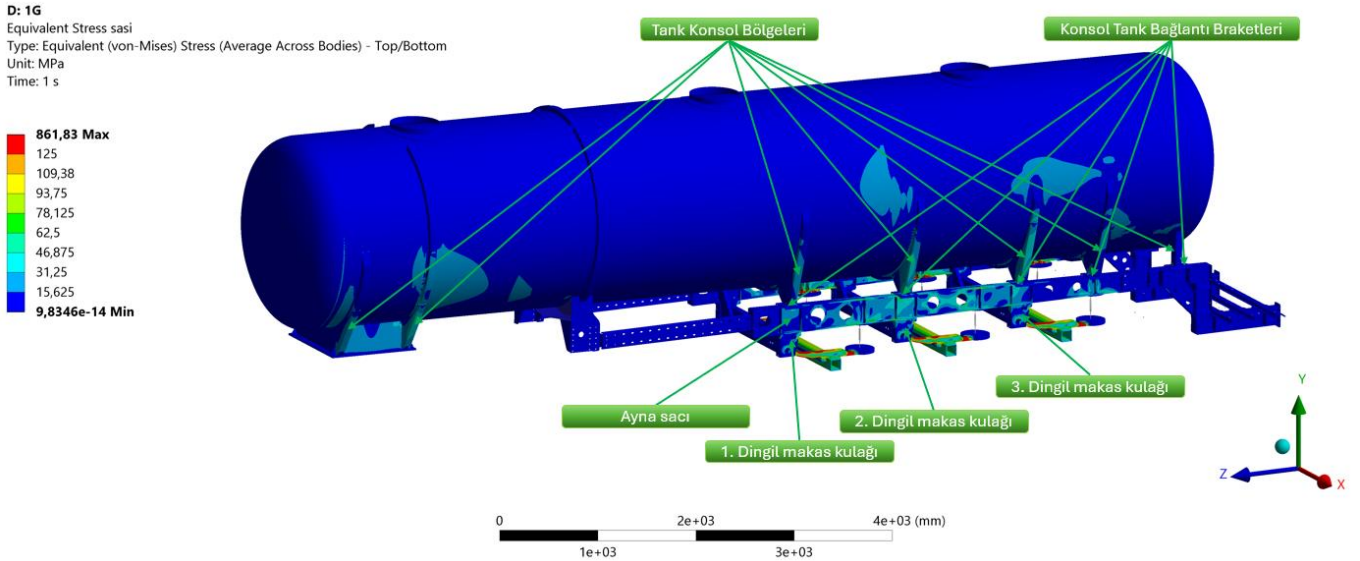


Şekil 4. Yer çekimi ivmesi etkisinde yapılan analiz yüklemeleri

Model için yapılan çukura düşme analizlerinde yüklemeler yer çekimi ivmesi etkisinde yapılan analizler de olduğu gibi uygulanmıştır. Sol 3 dingilinde teker kısımlarının 50 mm çukura düştüğü ve tankerin çekici ile king-pim bölgesinde bağlı olduğu kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Tanker için yapılan çukura düşme ve tümsekten geçme analizleri yol testlerinden elde edilen ve araç üzerine etki eden maksimum anlık koşullar göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Model için yapılan tümsekten geçme analizleri çukura düşme analizleri ile benzerlik göstermektedir. Tümsekten geçme analizlerinde çukura düşmede olduğu gibi yüklemeleri aynı fakat 50 mm deplasman değeri tersi yöndedir. Bu deplasman 3 dingilin sol tekerleri için uygulanmakta ve yönü yukarıdır. Çukura düşmede ise verilen deplasmanın yönü aşağıdır.

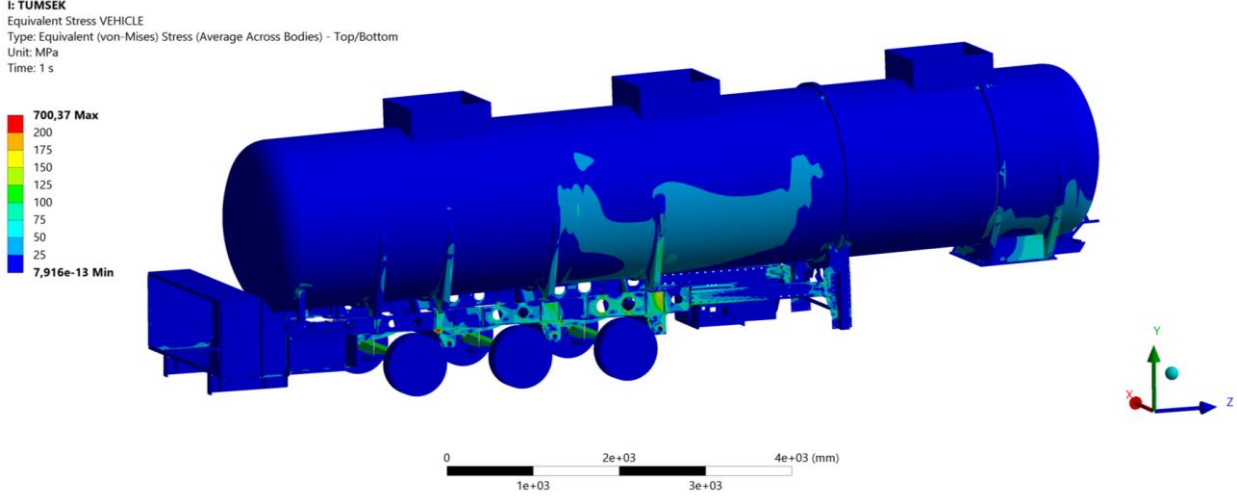
Model için belirlenen sınır şartlarında yer çekimi ivmesi etkisinde yapılan analiz sonucunda şasi üzerinde hava körüğü bağlantı bölgesi dışında akma sınırı geçen nokta yoktur. Bu analiz sonucunda tank konsolu, konsol şasi bağlantılarında ve makas kulağı bölgesinde gerilmeler ortalama 50 MPa maksimum ise 100 MPa gelmektedir. Şekil 5'te yer çekimi ivmesi etkisinde yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Hava körüğü bağlantı sacında yüksek gerilme çıkmasının sebebi dingil bağlantısının statik analizler ile en doğru şekilde modellenmemesidir. Gerçek model üzerinde dingil makas kolları şasiye burçlar ile bağlanmaktadır. Bu da yükün belli kısmının sönmülmesini sağlamaktadır.



Şekil 5. Yer çekimi ivmesi etkisinde yapılan analiz sonuçları

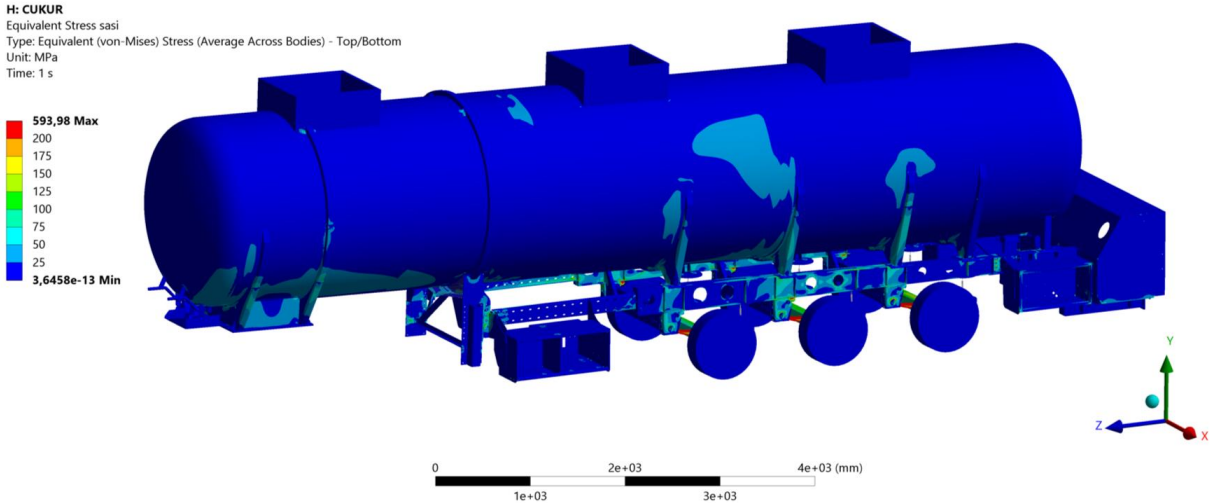


Çukur, Tümsek analizlerinin, gerçekleştirilen yer çekimi ivmesi etkisi altındaki analizlere oranla gerilme değerleri daha yüksektir. Tümsekten geçme analizinde 1.dingil sağ tank konsolundaki gerilme değerinde artış gözlemlenmiş ve gerilme değeri lokal bir bölgede maksimum 110 MPa olarak okunmuştur. Diğer tank konsollarındaki gerilmelerde artış görülmemiştir. Tümsekten geçme analizinde konsollar dışında makas kulağı üstü ayna sacı üzerinde gerilmeler yoğunlaşmış fakat akma sınırı altındadır. Buradaki gerilme lokal olarak 1 ve 2. dingil ayna sacı üzerinde ve değeri maksimum 187 MPa'dır. Diğer dingilde bu bölgede yüksek gerilme gözlemlenmemektedir. Şekil 6'da bu analize ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 6. 50 mm tümsekten geçme analiz sonucu

Yapılan çukura düşme analizlerinde ise yer çekimi ivmesi etkisi altında yapılan analiz sonuçlarından farklı olarak ayna sacı üzerinde bulunan delik bölgelerindeki gerilmelerde azalma, makas kulağı üstü ayna sacı bölgesindeki gerilmelerde 20 MPa artış gözlemlenmiştir. Fakat bu değerler paslanmaz tankerin akma değerlerinin oldukça altındadır. Şekil 7'de yapılan bu analize ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 7. 50 mm çukura düşme analiz sonucu

Yapılan bu statik analizler sonrasında yol sinyalleri toplanarak yapının çoklu cisim simülasyonu yapılmıştır.

## B. Yol Testi Ve Gerçek Yol Sinyallerinin Toplanması

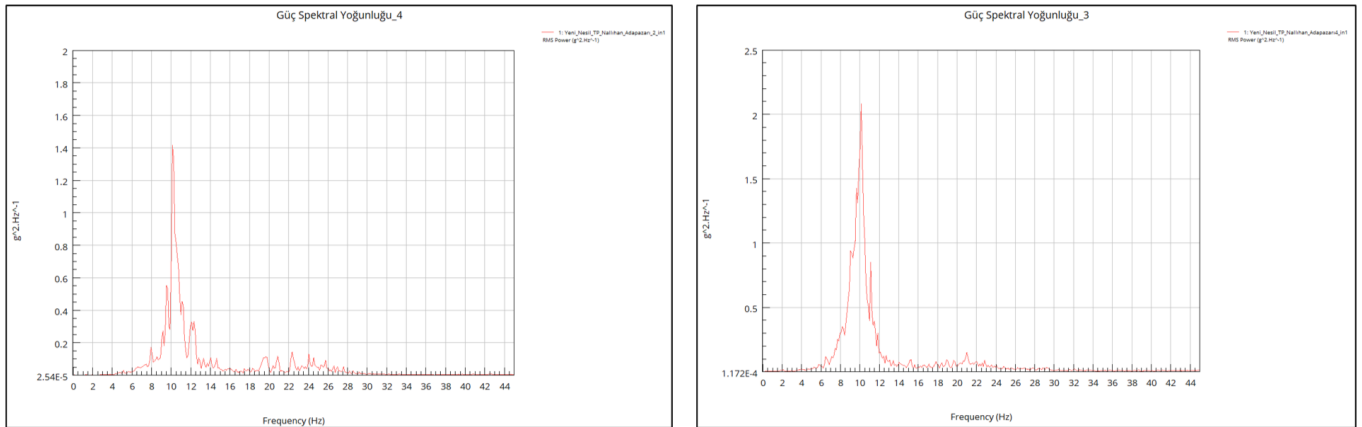
Yol testlerinde aracın hangi yollardan gideceği ve bu yollarda kaç km yapacağı bilinmelidir. Tanker aracının gerçek hayatta kullanım ömrü 1.000.000 km ön görülerek belirlenmiştir. Belirlenen bu ömür tanker aracının şasisi için belirlenmiştir. Tanker aracının ömrü boyunca farklı yol tiplerinde yapacağı km yüzdeleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı yol tiplerinin kullanım yüzdeleri

Yol Profilleri	Kullanım Yüzdeleri
Şehirler Arası Asfalt Yollar	78%
Şehirler Arası Bozuk Yollar	15%
Stabilize Köy Yolları	5%
Offroad Dağ Yolları	2%

Yol testinde sinyal toplanacak noktalar hibrit araç modeli üzerinde yapılacak olan simülasyon çalışmalarında tahrik edilecek noktalara göre belirlenmiştir. Yol testinde prototip araç üzerine her bir dingil için ikişer adet olacak şekilde ve dingil sağ sol lastik merkezlerine bağlanacak şekilde ivme ölçerler yerleştirilmiştir. Tüm dingillere toplamda 6 adet ivme ölçer takılmıştır. Bunların yanı sıra king-pim hareket sinyallerini alabilmek için prototip araç üzerinde king-pime yakın olacak şekilde 1 adet ivme ölçer bağlanmıştır. Sinyal toplama işlemlerinde 7 adet ivme ölçer 1 adet GPS kullanılmıştır. Bu GPS yardımı ve ivme ölçer yardımı ile prototip aracın farklı yol koşullarında dingil ve king-pim noktalarına etki eden kuvvet değerleri, prototip aracın geçtiği güzergahlar ve aracın hızı tespit edilmiştir.

Enstrümantasyon işlemleri sonrasında prototip araç için seçilen yol profillerinde toplamda 275 km test sürüşü yapılmış ve lastik merkezlerinden düşey eksende ivme zaman sinyalleri toplanmıştır. Toplanan bu zaman sinyallerine frekans analizi yapılmıştır. Bu analiz ile hangi frekanslarda yapının daha yüksek kuvvetlere maruz kaldığı belirlenmiştir. Bu işlem ile tanker modeli için yapılacak olan modal analizde hangi modların alınması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 8’de belirtilen grafik incelendiğinde yapıyı tahrik eden kuvvetlerin frekans aralığı yaklaşık olarak 4-30 Hz aralığında olduğu görülmüş ve sinyallerin 7-13 Hz aralığındaki tahrik kuvvetlerinin en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Yol testinden toplanan sinyallerin frekans analizi

Farklı yol profillerinden toplanan ivme zaman sinyalleri Tablo 1’de verilen kullanım yüzdelerine göre nCODE Designlife programı üzerinden “Concatenation” modülü kullanılarak birleştirilmiş ve karma yol profili oluşturulmuştur. Oluşturulan bu karma yol profili yaklaşık olarak 100 km’lik yola karşılık gelmektedir.

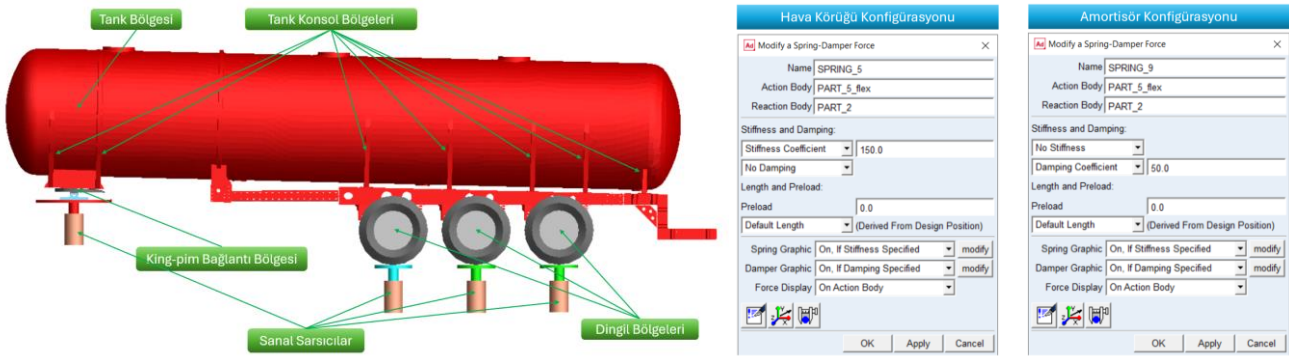
Bu işlemler ile ivme zaman sinyalleri deplasman zaman sinyallerine çift integral alınarak çevrilmiş, sonrasında yol sinyallerine Hysteresis Filtresi, Peak-Valley Filtresi ve Dört nokta çevrim sayma metodu uygulanarak sinyaller filtrelenmiştir. Bu işlemler sonrasında sinyaller çoklu cisim simülasyonuna girdi olarak verilmiştir.

Bir taşıt gövdesinin yapısal doğal frekans değeri genellikle yolun araca en fazla etki ettiği frekans aralığında bulunur. Bu nedenle, hareket halindeki bir taşıtın gövde dayanım analizi yapılırken, bağlantı noktalarından aktarılan dinamik yüklerin gövdenin frekans tepkisiyle olan ilişkisi mutlaka dikkate alınmalıdır.

### C. Çoklu Cisim Simülasyonu

Bu bölümde simülasyon sistemi oluşturma işlemi dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tanker aracına ait CAD model Adams içerisine aktarılmıştır. Uzun süren simülasyon sürelerinin kısaltılması için aktarılan CAD modele şasi ve tank harici komponentler dahil edilmemiştir. İkinci aşamada simülasyon sistemine dingil üzerinde bulunan lastik ve diğer bağlantı elemanları eklenmiştir. Üçüncü aşamada ise modele gerçek yol sinyallerinin verilebilmesi için sanal sarsıcı elemanlar eklenmiştir. Son olarak CAD modele sonlu elemanlar modeli entegre edilerek esnek hale getirilmiş ve sisteme girdi olarak gerçek yol sinyalleri verilmiştir.

Simülasyon modeli oluşturulurken gerçek model üzerinde bulunan dingil alt sistem elemanları tanımlanmıştır. Bu alt sistem elemanları amortisör, hava körüğü, lastik ve dingil şasi bağlantısı arasında bulunan kauçuk burçlardır. Dingil alt sistemlerinden olan hava körüğü ve amortisör elemanları Adams da Forces sekmesi içerisinde bulunan Spring – Damper modülü yardımı ile tanımlanmıştır. Bu modül içeriğindeki Sertlik ve Sönüm değerleri dingil üreticisi tarafından belirlenen katalog verileri girilerek konfigürasyon ayarları yapılmıştır. Bu ayarlar ve çoklu cisim simülasyon modeli Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Çoklu cisim simülasyon modeli ve hava körüğü-amortisör konfigürasyonu

Yapılan çoklu cisim simülasyonları sonucunda tanker modeline ait modal koordinatlar hesaplanmıştır. Bu modal koordinatlar yorulma ömür analizlerinde girdi olarak kullanılacaktır.

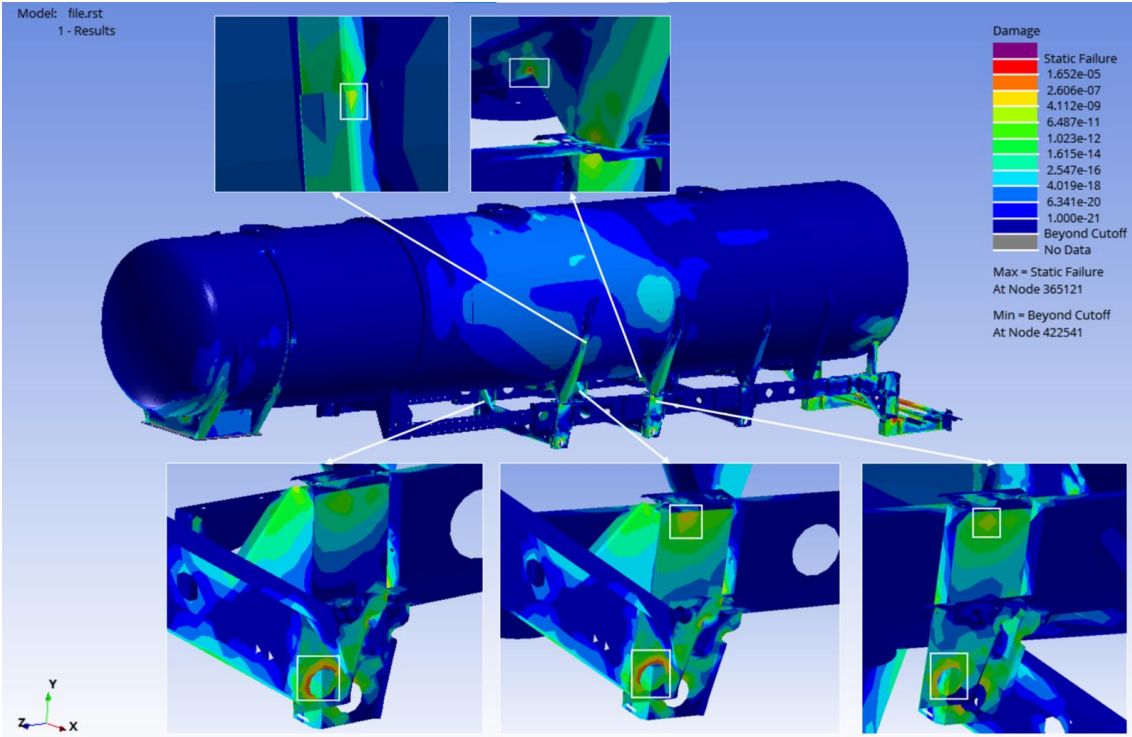
### D. Yorulma Ömür Analizi

Çoklu cisim simülasyonları sonucunda modal koordinatların elde edildiğini önceki bölümde belirtmiştik. Bu koordinatlar, yol benzetimi süresince yapının tüm deformasyonlarını, doğal frekans modları ile ilişkilendirilerek, genel bir gerilme verisi oluşturmaktadır.



Yorulma ömür analizlerinin gerçekleştirildiği nCODE Designlife programında, sonlu elemanlar programında yapılan modal analiz (frekans analizi) sonuçlarında elde edilen modal gerilmeler ile çoklu cisim simülasyonundan elde edilen modal koordinatlar bir araya getirilmektedir. Sonlu elemanlar programında yapılan frekans tabanlı analizler elde edilen gerilme-gerinim değerleri, çoklu cisim simülasyonundan elde edilen modal koordinatlar ile birleşerek yapının gerilme-gerinim değerleri tekrar hesaplanmaktadır. Bu işlemler sonrasında model üzerinde bulunan malzemelerin S-N Eğrilerinde (Wöhler Eğrileri) belirtilen dayanıklılık verileri kullanılarak her bir döngünün malzeme üzerindeki etkisi hesaplanır. Böylelikle yol testlerinde elde edilen sinyallerin kaç çevrim sonrasında model üzerinde hasara yol açacağı hesaplanır.

Tüm bu işlemler sonucunda, tanker modeli için seçilen güzergâh boyunca toplanan yol sinyallerine dayalı olarak bir sürüş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon ile hedeflenen yol mesafesi boyunca aracın maruz kaldığı yüklerin gövde üzerindeki dağılımları hızlandırılmış bir yorulma analizi ile belirlenmiştir. Yorulma analizi sonuçlarında hasar ve düşük ömür görülen bölgeler Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Gerçek yol sinyalleri etkisi ile oluşan yorulma ömür analizi sonuçları

Yorulma analiz sonuçlarına bakıldığında tank konsolları, dingil bağlantı braketleri, konsol bağlantı braketleri, dingil üstü ayna sacı bölgelerinde yorulma hasarının olduğu görülmektedir. Aynı şekilde king-pim bağlantı bölgesinde de yorulma hasarların olduğu görülmektedir. Bunların yorulma ömür analizi sonuçlarında beklenildiği üzere kuyruk bölgesinde yüksek hasar oluşmuştur. Bunun sebebi gerçek modelde bulunan arka dolabın kaldırılmasıdır. Bu dolap simülasyon çözümlerinin hızlandırılması ve modelin basitleştirilmesi sebebi ile kaldırılmıştır. Arkada bulunan bu dolap kuyruk bölgesine civata ile bağlı olması sebebi ile o bölgedeki hasarları minimuma indirgeyecektir. Bu sebeple sonuçlarda bu bölgedeki hasar göz önüne alınmamalıdır.

### III. SONUÇLAR

SEM ile yapılan, yer çekimi ivmesi, tümsekten geçme ve çukura düşme gibi farklı senaryoları kapsayan analizler yapılmış ve sonuçları ikinci bölümde verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde model üzerinde akma sınırını aşan noktaların bulunmadığı görülmüş ve böylelikle modelin ön doğrulama statik şartlar için tamamlanmıştır. Statik analizler sonrasında yapılan modal analizleri (doğal frekans analizi) ile yapının titreşim etkisi altındaki davranışı incelenmiş ve yapının ilk 20 modunun 9-60 Hz aralığında olduğu görülmüştür. Otomotiv üreticileri ve birçok test firması tarafından yapılan çalışmalar ile yol etkisi ile oluşan sinyallerin 0-50 Hz aralığında olduğu düşünüldüğünde, tanker modelinin dinamik etkilere maruz kalacağı ve bu etkilerin aracın yorulma dayanımı üzerinde etkili olacağı sonucuna varılmıştır. Bu durum sonucunda yalnızca yol testlerinde belirlenen ekstrem koşulların statik analizleri ile taşıt doğrulamasının yapılmaması gerektiği, dinamik analizlerinde gerekli olduğu ortaya konmuştur.

Dinamik analizler öncesinde prototip taşıt modeli üzerinde gerçek yol verileri toplanmış ve bu yol verilerinin frekans analizi yapıldığında 4-30 Hz aralığında olduğu görülmüş ve sinyallerin 7-13 Hz aralığındaki tahrik kuvvetlerinin en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Aracın SEM üzerinde yapılan doğal frekans analizleri ile yoldan toplanan sinyallerin frekans aralığının çakıştığı görülmüştür. Bu durum üzerine dinamik analizlerin gerekliliği tekrar ortaya konulmuştur. Bu adımlar sonrasında dinamik analizler ile tanker modeline ait modal koordinatlar elde edilmiştir. Elde edilen bu modal koordinat ve frekans analizi sonuçlarının süperpozisyonu ile yorulma ömür analizleri yapılmıştır. Yorulma hasar analizleri incelendiğinde statik analizlerden farklı olarak tanker modelinin dingil bağlantı, tank konsolları, makas kulakları ve ayna sacının kritik hasar bölgelerinde olduğu görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, yol testinden alınmış anlık maksimum koşulların statik analizleri ile elde edilen malzemenin akma değerinin altındaki gerilme bölgelerinin, gerçek yol koşullarında dinamik etkilerle tanker modeli üzerinde yorulma hasarına neden olduğu tespit edilmiştir. Tanker modeli için yapılan statik analizlerde gerilme görülmeyen tank konsolu, tank konsol bağlantı braketleri, ayna sacı ve dingil-şasi bağlantı bölgelerinin, yorulma hasar analizi sonucunda, gerçek yol sinyalleriyle belirli çevrimler sonrasında hasara uğrayacağı ortaya konmuştur.

### REFERANSLAR

- [1] Yılmaz, A. S., Çifci, E., Demir, K., Çakmak, A. A., vd. (2022). Ticari Yolcu Otobüsünün Yorulma Ömürlerinin Sanal Analizler ile Belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*, 63(707), 389-414.
- [2] Gümüş M. S., Tekerlekli Askeri Araç Bileşenlerinin Titreşim Kaynaklı Yorulma Analizleri, Yüksel Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, 2020.
- [3] MSC. Fatigue User's Guide, Fatigue Theory, Chapter 14.
- [4] Demirel G. İ., Vibration Fatigue Analysis And Testing Of Notched Beams, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Middle East Technical University, 2019.
- [5] Konez O., Metin M., Demir Ö., Y32 Bojisinin Yapısal Analizleri, Bölüm 2: Yorulma Analizleri, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 17, syf. 395-411, Aralık 2019.
- [6] Demirkaya, Ö. F., & Tüfekçi, K. (2020). Zaman ve Frekans Düzleminde Yorulma Ömrü Hesaplama Yöntemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 467-478.
- [7] Çakıcı, U. G., Başlamışlı, S. Ç., Solmaz, S., Yılmaz, K. B., vd. (2019). Jant İçi Elektrik Motorunun Kritik Parçalarının Yorulma Analizi. *Mühendis ve Makina*, 60(695), 132-147.
- [8] Wang X., Zhao G., Tang C., 2010, "Analysis of Frequency Response and Fatigue of Car Body by Random Loading", 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, China, July 9-11.
- [9] Simpson T., Dertimanis V., Papadimitriou C., Chatzi E., On the Potential of Dynamic Substructuring Methods for Model Updating, ETH Zürich, University of Thessaly, Jun 2020, Greece.
- [10] Özgür T., Karataş S. B., Daraltılmış Treyler Şasi Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Yapısal Analizi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), syf. 175-186, Mart 2021, Adana.