



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



TEST EDİLMİŞ BİR TİCARİ YOLCU OTOBÜSÜNÜN SANAL ARAÇ DİNAMİĞİ MODELLERİNİN OP- TİMİZASYON İLE DOĞRULANMASI

*Ahmet Salih YILMAZ¹, Erol ÇİFCİ², Berkan Canpolat³, Umut Can Salman⁴, Önder Türkan⁵

1 Ahmet Salih YILMAZ (Anadolu ISUZU, Kocaeli)

e-posta : salih.yilmaz@isuzu.com.tr, ORCID No 0000-0002-1234-3815

2 Erol ÇİFCİ (Anadolu ISUZU, Kocaeli)

e-posta : erol.cifci@isuzu.com.tr, ORCID No 0000-0002-2906-1283

3 Berkan CANPOLAT (Anadolu ISUZU, Kocaeli)

e-posta : berkancanpolat83@gmail.com, ORCID No 0000-0002-2501-9539

4 Umut Can Salman (BIAS, İstanbul)

e-posta : ucsalman@bias.com.tr, ORCID No 0009-0006-0314-4669

5 Önder Türkan (BIAS, İstanbul)

e-posta : ondrtn@gmail.com, ORCID No 0000-0002-6572-9113

Keywords

Araç Dinamiği Analizi,
Adams/Car, Araç Dinamiği
Testleri, Optimizasyon, pSe-
ven

Abstract

Anadolu Isuzu firması tarafından üretilecek olan Class-III ticari araç projesinde, prototip araç ile gerçekleştirilen şerit değiştirme ve tümsek geçiş testlerinden elde edilen veriler, Ar-Ge çalışmaları kapsamında oluşturulan sanal araç modeli ile sanal araç modeli doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Prototip araç üzerinde gerçekleştirilen fiziksel testlerin sanal ortamda da gerçekleştirilebilmesi için aynı yol modelleri sanal koşullarda da oluşturulmuş ve MSC Adams/Car programı kullanılarak sanal testler gerçekleştirilmiştir. Test aracında kullanılan tekerleğin bazı özellikleri henüz tam olarak belirlenmediğinden, sanal modelde kullanılan teker özelliklerinde farklılıklar oluşabilecektir. Özellikle şerit değiştirme testinde tekerleklerin tepkisi ve sürücünün davranışı test verilerini etkileyecektir. Verilerin kararlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için manevralar arasındaki tepe noktalarının doğrulanması hedeflenmektedir. Ayrıca pSeven optimizasyon yazılımı yardımıyla tekerleklerin yanıl kayma açısına en çok etki eden tekerlek parametre değerlerinin değiştirilerek test verilerine uygun değerlerin elde edilmesi yöntemi izlenmiştir. Test sonuçlarında elde edilen minimum ve maksimum yanıl kayma açısı değerleri hedef olarak belirlenmiş ve optimizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Şasinin düşey deplasman değerleri 4-poster sanal analizleri ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Sanal analizler sonucunda tekerlek merkez hareketi, damper deplasmanı, şasi dikey deplasman değişimleri ve yanıl kayma açısı değerlerinde belirli hızlarda yeterlilikler sağlanarak sanal araç modeli test verileri ile doğrulanmıştır.

* salih.yilmaz@isuzu.com.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1619597

VERIFICATION OF VIRTUAL VEHICLE DYNAMICS MODELS OF COMMERCIAL PASSENGER BUS BY TESTS

Anahtar Kelimeler

Öz

*Vehicle Dynamics
Analysis, Adams/Car,
Vehicle Dynamics Tests,
Optimization, pSeven*

In a Class-III commercial vehicle project to be produced by Anadolu Isuzu company, data obtained from lane change and bump pass tests performed with a prototype vehicle, virtual vehicle model verification studies were carried out with a virtual vehicle model created as part of R& D studies. In order to be able to perform the physical tests performed on the prototype vehicle in a virtual environment, the same road models were also created in virtual conditions, and virtual tests were performed using the MSC Adams/Car program. As some of the characteristics of the wheel used in the test vehicle have not yet been fully determined, there may be differences in the wheel characteristics used in the virtual model. Especially in the lane change test, the reaction of the wheels and the driver's behavior will affect the test data. In order to evaluate the data decisively, it is aimed to verify the peaks between the maneuvers. In addition, the method of obtaining values appropriate to the test data by changing the wheel parameter values that most affect the lateral sliding angle of the wheels with the help of pSeven optimization software was followed. The minimum and maximum lateral slip angle values obtained in the test results were determined as the target, and optimization analyses were performed. Vertical displacement values of the chassis were compared and verified with 4-poster virtual analyzes. As a result of virtual analyses, the virtual vehicle model was verified with test data by providing competencies at certain speeds in wheel center movement, damper displacement, chassis vertical displacement changes, and lateral slip angle values.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 14.01.2025

Submission Date : 14.01.2025

Kabul Tarihi : 14.07.2025

Accepted Date : 14.07.2025

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In modern research and development practices, virtual validation methods and software are essential tools for reducing costs and enhancing product development by eliminating the need for physical prototypes. Vehicle dynamics and modeling studies have evolved since the 1940s, with researchers like Olley and Segel contributing to the definition of key parameters such as understeer and frequency domain analyses. Advances in simulation tools, such as Adams/Car and MapleSim, have become critical for vehicle modeling and optimization, reducing reliance on physical testing and increasing the efficiency of the design and testing processes.

OBJECTIVE

This study focuses on validating a flexible vehicle model through correlation with real-world test data for a Class-3 bus model. The model was developed using Adams/Car software, and validation was achieved by comparing real-world test results with the simulation outcomes.

METHODOLOGY

Test Setup and Vehicle Dynamics Analysis

Several tests were conducted to gather real-road data for model validation. Lane-change tests and speed bump crossing tests were performed under different conditions, including varying speeds and lane-change maneuvers.

Lane-Change Tests: The lane-change tests were carried out at speeds of 30, 40, and 50 km/h. Two scenarios were tested: right-to-left lane changes and left-to-right lane changes. A 59 m lateral displacement was targeted during each maneuver, with a lane width of 3 meters.

Speed Bump Tests: Speed bump crossing tests were performed at 10, 20, and 30 km/h. Parameters such as vertical accelerations at the center of gravity, pitch angle, and damper displacements were recorded.

Modeling and Simulation

The bump model was created using relevant equations and integrated into Adams/Car software. In the simulation model, the vehicle's longitudinal and vertical motions were represented as "x" and "y," respectively. Flexible chassis integration was performed, and the Modal Neutral File (MNF) technique was applied to convert rigid components into flexible ones for more accurate simulations.

Additionally, the lumped mass approach was used to define the vehicle's weight and inertia properties at the center of gravity, streamlining the simulation process.

VALIDATION PROCESS

Real-World Test Data Collection

Test data was collected from a test track, including bump test data at speeds of 20, 30, 40, and 50 km/h. Lane-change tests were also conducted at 30 and 32 km/h. A 4-poster test rig was used to simulate the effects encountered on the road, and processed wheel displacement data was applied as input at the wheel centers.

Virtual Model Validation

The test scenarios were replicated in Adams/Car under the same conditions, ensuring the simulation results were consistent with the real-world data. The vertical stiffness values and damper displacement values were determined iteratively through virtual bump tests. Lane-change analysis was validated using the pSeven software, which allowed for multi-analysis and optimization to ensure alignment with the real data.

RESULTS

The Class-3 vehicle model was validated using three distinct methods:

Bump Crossing Analyses: Vertical tire stiffness, damper forces, and suspension component stiffness values were adjusted and validated through comparison with real-world test data.

Lane-Change Analyses: Lateral tire properties were assessed using pSeven software. An optimization study was conducted, especially for the 30 km/h scenario, to match the simulation results with the measured data.

Virtual Poster Analyses: Real road data from the test track was applied as input in the model, and the vertical chassis displacement was compared with the measurement data for validation.

The model passed validation for wheel center motion, damper displacement, vertical chassis displacement, and lateral slip angle values at the specified speeds. Errors caused by differences in test and analysis durations, as well as post-scenario driver maneuvers, were excluded from the final results.

DISCUSSION

The integration of pSeven software into the analysis and optimization processes enhanced the accuracy and efficiency of the study. By optimizing the design space and reducing analysis time, the pSeven platform facilitated a faster and more precise validation process. However, careful planning of measurement scenarios is crucial, as factors such as driver-induced errors, road roughness, and measurement tool accuracy can significantly affect the results.

CONCLUSION

This study demonstrates the significant potential of virtual validation methods and advanced modeling tools in vehicle dynamics research. By validating a flexible vehicle model using real-world test data, the study highlights the importance of simulation and optimization in reducing costs and improving vehicle design processes. The findings underscore the value of virtual validation in enhancing the accuracy, efficiency, and reliability of commercial vehicle development.

1. Giriş

Günümüzde sanal doğrulama yöntemleri ve yazılımları Ar-Ge alanında faaliyet gösteren firmalar tarafından sıklıkla kullanılan araçlardır. Sanal doğrulama çalışmaları ürün geliştirmeyi etkilemekte, fiziksel prototip ve test koşullarının maliyetini düşürmektedir. Zaman ve maliyet parametreleri üzerinde bu verimliliği artıracak parametreler olarak sanal doğrulama yazılımları birçok firma tarafından ürün geliştirme süreçlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Arslan, Kaptanoğlu & Şenocak, 2012).

Araç dinamiği ve modelleme çalışmaları, kökleri 1940'lı yıllara dayanan uzun bir gelişim süreci göstermiştir. Bu dönemde Olley ve Segel gibi araştırmacılar, modern araç dinamiğinin temel kavramlarını tanımlamışlardır. Bu model tek yolludur ve günümüzde hala kullanılmaktadır. Modern araç dinamiğinin temeli, understeer gibi birçok önemli parametrenin tanımı Olley tarafından ortaya konmuştur. Segel ilk araç modellerinden birini ortaya koymuş ve zaman domeyni analizi ve frekans domeyni yanıtları yapılmıştır. Segel'in bu çalışmalarına 1970 yılında McRuer ve Klein tarafından ulaşılmıştır (Kutluay & Winner, 2014)

Orgul ve arkadaşları, 2010 yılında yaptıkları çalışmalarda, dinamik modelin ticari araç geliştirme projesi kapsamındaki testlerle doğrulanmasını amaçlamışlardır. Test sonuçlarına göre Adams/Car modeli oluşturulmuş ve modele optimizasyon çalışmaları uygulanmıştır. Araştırma sonucunda aracın doğrulanmış bir dinamik modeli elde edilmiştir. Doğrulanmış dinamik model sayesinde gövde ve şasi yükleri hesaplanmış, gövde ve şasi parçaları bu yükler ile analiz edilmiştir (Orgül, Koyuncu, Dileroglu & Gökçe, 2010).

Gennip, 2018 yılındaki çalışmasında MapleSim yazılımı aracılığıyla bir bütün araç modeli oluşturdu. Model optimizasyonu için çeşitli parametreler belirledi ve bunları prototip araç üzerinde ölçtü. Daha sonra bu verileri parametre filtrelemesi için kullandı. Modelin doğruluğu da birçok doğrulama testi ile geliştirildi. Çalışmaların sonunda gerçek test verileri ile test sonuçları arasındaki fark giderek azalmış ve modelin validasyon çalışmaları tamamlanmıştır (van Gennip, 2018).

Bilgisayar yazılımlarının gelişmesi ile farklı araç tasarımlarına ve fiziksel prototip üretimine gerek kalmadan araç modeli analizi ve yol davranışı optimizasyonu yapılabilmektedir. Bu çalışmada esnek araç modeli üzerinde yapılan analiz sonuçlarının testler sonucunda araçtan toplanan verilere yakınsaması sağlanarak esnek modelin doğrulanması amaçlanmıştır. Deney Tasarımı (DoE) çalışmaları pSeven programı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, gelecekte bu araştırma kullanılarak testlerin ve araç dinamik analiz sonuçlarının doğrulanması planlanmaktadır.

pSeven, DATADVANCE tarafından geliştirilen, tasarım, simülasyon ve analiz yeteneklerini genişleten ve daha akıllı ve daha hızlı tasarım kararlarına yardımcı olan bir tasarım alanı keşif yazılımı platformudur. Üçüncü taraf CAD ve CAE yazılım araçları güçlü, çok amaçlı ve sağlam optimizasyon algoritmaları, veri analizi ve belirsizlik ölçme araçları ile sorunsuz entegrasyon sağlar (Trade Delegation of the Russian Federation in the United Kingdom. 2016).

pSeven ile Tasarım Alanı Keşfi, tahmine dayalı modellerin oluşturulmasına, CAD/CAE araçlarının entegrasyonuna, verilerin ve modellerin analiz edilmesine, tasarım alternatiflerinin keşfedilmesine ve akıllı kararlar alınmasına olanak tanır. pSeven’da uygulanan Akıllı Seçim teknolojisi, belirli bir veri veya optimizasyon problemi için en verimli yöntemi otomatik olarak seçer ve gelişmiş matematiği çok çeşitli uzmanlar için kullanımı kolay hale getirir.

Deney Tasarımı (DoE), çıktı yanıtları üzerindeki etkilerini araştırmak ve bir tasarım probleminin küresel davranışını anlamak için girdi değişkenlerinde amaca yönelik değişikliklerin yapıldığı bir dizi test olarak tanımlanabilir. Spesifik olarak şu unsurları ile gerçekleştirilir:

- ◆ Faktörler ve yanıtlar arasındaki korelasyona bakarak değişkenleri taramak için, genellikle her biri için birkaç seviye (2 kadar düşük) ile çok sayıda faktör için faktöriyel / indirgenmiş bir deney çalıştırarak.
- ◆ Optimizasyon veya stokastik bir çalışma için bir uyum oluşturmak (hesaplama açısından daha etkili olması için, tam çözücü yerine bir uyum kullanılır).

Genel olarak, DoE çalışma koşulları bağımsızdır, bu nedenle büyük ölçekli DoE çalışmaları paralel işleme teknikleri veya yük paylaşımli kümelerle dağıtılmış işleme teknikleri kullanılarak paralel olarak çalıştırılabilir (Altair. (t.y.). Introduction into design of experiments DoE with HyperStudy eBook).

“Tekerlek Dinamiğinin İncelenmesi” başlıklı ders notlarında, tekerlek dinamiğinin temel kavramları aktarılmakta ve hareket denklemleri çıkarılmaktadır. Yuvarlanma direnci, ayırıcı kuvvet katsayısı ve kayma açısı arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Aracın hareket denklemleri ayrıntılı olarak çıkarılmış ve araca etki eden kuvvetler incelenmiştir (Demir, 2013).

Ayçiçek, Msc Adams/Car kullanarak BMW 750 marka bir aracın çok gövdeli dinamik modelini kurmuştur. Model kullanılarak aracın seyir dinamiğini etkileyen parametreler değerlendirilmiştir. Ayrıca kurulan çoklu gövde dinamiği sonuçlarının test sonuçları ile korelasyonu sağlanmaya çalışılmıştır (Ayçiçek, 2002).

Kumar, “Hafif Ticari Bir Aracın Süspansiyon Tasarımının Adams/Car’da Fizibilite Çalışması” başlıklı tezi kapsamında araç modelleme konusunda uzmanlaşmış bir paket program olan Adams/Car ortamında dinamik çok gövdeli bir araç modeli oluşturmuştur. MSC Adams/Car, aracın süspansiyon sistemini farklı manevra tipleri ile incelemiştir. Ayrıca, Adams’ta bulunan ‘Event Builder’ seçeneği kullanılarak direksiyon açısının değiştirilebileceğini göstermiştir (Kumar, 2015).

Albinsson ve Routledge, “Damper Seviyelerinin Binek Aracın Yalpa, Eğim Sıçraması ve Viraj Alma Davranışına Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezinde önce aracın matematiksel modelini kurmuş, ardından matematiksel model sonuçlarını test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Matematiksel modeller aracılığıyla, aracın süspansiyon sisteminin damper sönümleme karakteristiği ve aracın yalpalama, yunuslama açısı ve sıçra-

ma koşullarını optimize etmek için çalışılmıştır (Albinsson & Routledge, 2013).

Bu çalışma, mevcut literatürde genellikle birbirinden bağımsız ele alınan esnek gövde modelleme, çoklu optimizasyon tabanlı sanal test kurgusu ve fiziksel yol testine dayalı doğrulama adımlarını bütüncül bir yaklaşımla birleştirmektedir. Özellikle pSeven yazılımının HyperWorks ve ADAMS ortamlarıyla entegre kullanılması yoluyla, sanal ortamda elde edilen analiz sonuçlarının gerçek araç testlerinden elde edilen verilerle korelasyonu sağlanmıştır. Bu yönüyle çalışma, araç doğrulama süreçlerinde simülasyon temelli test tasarımını, deneysel veriye dayalı optimizasyonla destekleyen ilk kapsamlı uygulamalardan biri olarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

2. Otobüs Sınıfları

Sürücüye ek olarak 22 yolcu aşan kapasiteye sahip araçlar için toplamda 3 farklı sınıfta araçlar bulunmaktadır. Şekil 1’de Sınıf I ve Sınıf III araçlarından örnek gösterilmiştir.

- ◆ Sınıf I; sık yolcu hareketine izin vermek için ayakta duran yolcular için alanlar ile inşa edilmiş araçlar.
- ◆ Sınıf II; esas olarak oturan yolcuların taşınması için inşa edilen ve geçitte ve/veya iki çift kişilik koltuk için sağlanan alanı aşmayan bir alanda ayakta yolcuların taşınmasına izin verecek şekilde tasarlanan araçlar.
- ◆ Sınıf III; sadece oturan yolcuların taşınması için inşa edilmiş araçlar (United Nations Economic Commission for Europe, 2018)



Şekil 1: Sınıf I ve III Isuzu Araçları

3. Araç Yol Testleri

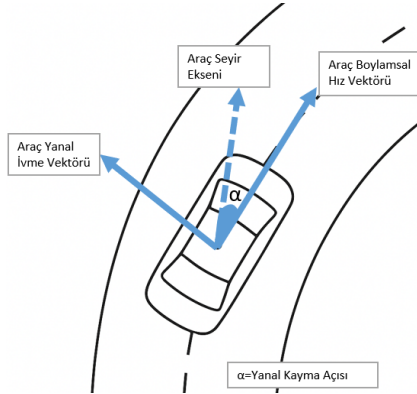
Fiziki testler kapsamında inceleme yapılırken hız, ivme, açısız ivme, yuvarlanma açısı, kayma açısı, yükselme açısı gibi önemli parametreler göz önüne alınmıştır. Bu parametreleri ölçmek amacıyla otobüsün kütle merkezine OXTS ataletsel ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. Yapılan ilk testlerde 30, 40, 50 km/h mertebelerinde hızlarla, sırasıyla sağ şeritten sol şeride geçiş ve sol şeritten sağ şeride geçiş icra edilmiştir.

Taşıt dinamiği testlerinde parametreleri ölçmek için RT2502 OXTS IMU cihazı kullanılmıştır. Örneklendirme frekansı 1000 Hz olarak ayarlanmıştır. Toplanan test dataları, gerçek zamanlı veri NAVsuite yazılım takımı kullanılarak görüntülenmiş ve sonrasında da yine bu yazılım kullanılarak incelenmiştir.

3.1 Şerit Değiştirme Testleri

Optimizasyon çalışmalarına başlamak için önce aracın yol üzerindeki dinamik davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle araca, şerit değiştirme testleri yapılmıştır.

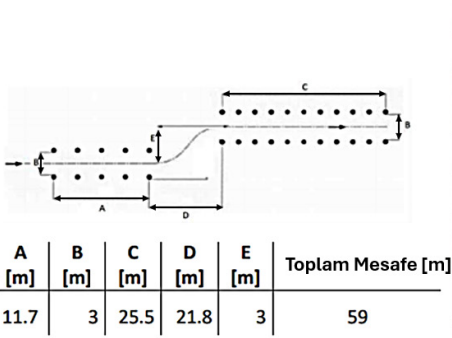
Yapılan çalışmalar kapsamında sınıf-3 tipi otobüsünün gerçek yol ortamında testleri gerçekleştirilmiştir. Şerit değiştirme testleri yapılarak otobüsün, taşıt dinamiği davranışı incelenmiştir. Yapılan testlerde hız, ivme, açısal ivme, yuvarlanma açısı, kayma açısı ve yükselme açısı parametreleri incelenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Şekil 2’de kayma açısını açıklayan görsel bulunmaktadır.



Şekil 2: Yanal Kayma Açısı Gösterimi

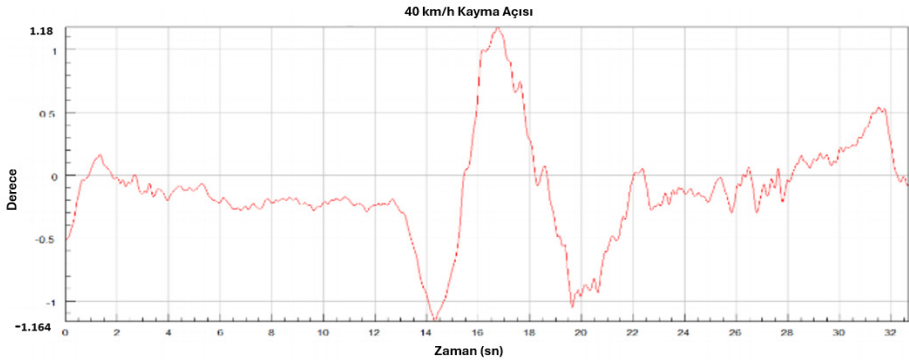
Testler 30,40 ve 50 km/h olmak üzere farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir. Test sırasında, sırasıyla sağ şeritten sol şeride, sonra sol şeritten sağ şeride geçiş olarak uygulanmıştır.

Çalışmada, sağdan sola ve soldan sağa olmak üzere iki ana şerit değiştirme senaryosu tasarlanmış ve her biri 30, 40 ve 50 km/h gibi farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir. İlk başta sağ şeritten sol şeride olan şerit değiştirme; 30, 40, 50 km/h hızlarda, daha sonra sol şeritten sağ şeride olan şerit değiştirme uygulaması ise; 32, 42, 50 km/h hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bir şerit değiştirme sırasında 59 m yer değiştirmenin olması hedeflenmiştir. Aracın iz genişliği 3 m olmak üzere, şerit orta çizgileri arası uzaklık 3 m olmaktadır.



Şekil 3: Şerit Değişirme Diyagramı (International Organization for Standardization, 2018) ve Fiziki Testi

Şekil 3'te, aracın şerit değiştirme şeması gösterilmiştir. Soldan sağa olan şerit değiştirme de bunun tam tersi olarak gerçekleştirilmektedir. Bu şerit değiştirme uzunlukları, aracın boyutlarına göre iki yönlü şerit değiştirme ISO standardı baz alınarak belirlenmiştir. Yapılan şerit değiştirme testleri sonucunda, her bir senaryo için hız, ivme, açısal ivme, yuvarlanma açısı, kayma açısı ve yükselme açısı parametreleri grafikler halinde çıktısı elde edilmiştir. 40 km/h hızda gerçekleştirilen yanal kayma açısı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Sağdan Sola Geçiş 40 km/h-Yanal Kayma Açısı (derece)

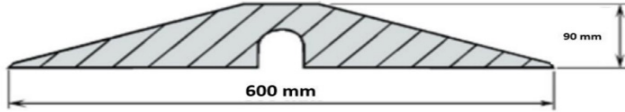
Şekil 4'te sunulan yanal kayma açısı zaman serisi, şerit değiştirme manevrası süresince aracın yanal dinamik tepkisini temsil etmektedir. Ölçüm verilerine göre, araç maksimum 1.18°'lik bir yanal kayma açısına ulaşmış, bu tepe noktasına kısa sürede erişip yeniden denge konumuna dönmüştür. Bu durum, aracın yönelme kararlılığını büyük ölçüde koruduğunu ve kontrol kaybına yol açabilecek bir aşırı sapma meydana gelmediğini göstermektedir.

Ayrıca, kayma açısındaki ani artış ve sonrasında gözlemlenen hızlı toparlanma, aracın tepkisel davranışının modellenmesi açısından anlamlı bir sinyal içeriği sağlamaktadır. Bu bağlamda, şerit değiştirme manevrasının hem fiziksel gerçekliği hem de matematiksel modelin kalibrasyonu için uygunluk taşıdığı değerlendirilmiştir.

Bu açıklama ile Şekil 4 test verisinin yalnızca görsel destek değil, aynı zamanda model doğrulaması açısından temel teşkil eden bir veri çıktısı olduğu açık biçimde ortaya konmuştur.

3.2 Tümsek Testleri

Tümsek geçiş testlerinde araç, Şekil 5'te gösterilen 90 mm yükseklikteki kauçuk tümsekten 10, 20 ve 30 km/h hızlarda geçirilerek ve her hız için 3 tekrar yapılmıştır. Aracın ağırlık merkezinin dikey ivmeleri, yunuslama açısı ve amortisör yer değiştirmeleri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri aracın dinamik parametrelerini belirlemek için kaydedilmiştir.



Şekil 5: Tümsek

$$y=0.09\sin(6.28x)\text{mm} \quad (1)$$

Denklem 1 kullanılarak bir çarpma modeli oluşturulur ve Adams Car programına entegre edilir. İlgili formülasyonda “x” aracın boylamasına yolunu, “y” ise aracın dikey eksenini temsil etmektedir. Tümseğin entegrasyonu tamamlandıktan sonra araç analizinde kullanılmıştır.

Kullanılan tümsek modeli kauçuk/plastik esaslı olup belirli bir elastik deformasyon kabiliyetine sahiptir. Adams Car modelinde yol verisi tanımlanırken rijit olarak kabul edilecek şekilde hesaplama dahil edilmiştir.



Şekil 6: Tümsek Testi

4. Sanal Analiz Çalışmaları

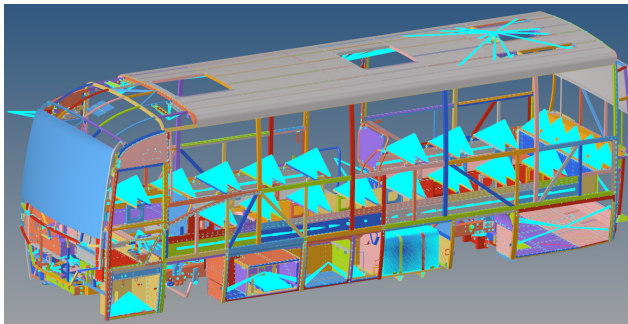
Sanal model (virtual model), fiziksel bir sistemin bilgisayar ortamında matematiksel ve fiziksel kurallara dayalı olarak temsil edilmesi işlemidir. Araç mühendisliğinde sanal modeller, mekanik bileşenlerin, süspansiyon sistemlerinin ve gövde yapılarının dinamik davranışlarını analiz etmek amacıyla çok gövdeli dinamik sistemler (MBD) ve sonlu elemanlar yöntemleri (FEM) kullanılarak oluşturulmaktadır. Sanal modeller, fiziksel prototip üretimi öncesinde tasarım doğrulaması sağlamak ve test maliyetlerini azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (ISO, 2018).

4.1 Rijit Modelin Esnekleştirilmesi ve MNF Yönteminin Kullanımı

Aracın montaj modeli Adams/Car yazılımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modele, esnek şasi entegrasyonu yapılarak aracın yapılacak olan analizlere hazır olması sağlanmıştır.

Rijit model yapısının esnekleştirme çalışmaları kapsamında, temel esnekleştirme yöntemi olarak Modal Neutral File (MNF) tabanlı bir yaklaşım tercih edilmiştir. Bu yöntemin uygulanması, parçanın sonlu elemanlar (FEA) ortamında hazırlanan ağ yapısı üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonucu elde edilen MNF dosyasının kullanılmasıyla sağlanmaktadır.

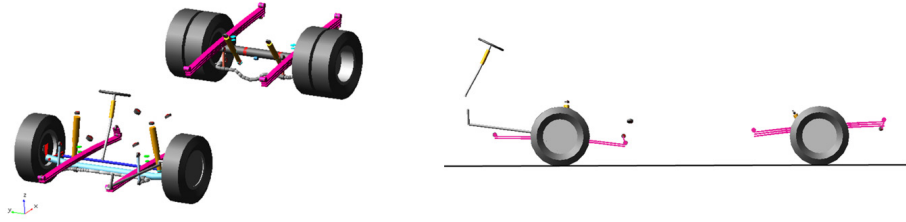
Şekil 7’de gösterilen meshli modelin modal analizinin koşturulması neticesinde, MNF dosyası oluşturulmaktadır. Bu dosya, parçanın modal özelliklerini içermesinin yanı sıra, ADAMS ortamında rijit bir parçanın esnekleştirilmesi amacıyla kullanılan temel veriyi de kapsamaktadır. Böylece, yapının üzerine gelen yüklere göre ADAMS yapı modlarının süperpozisyonu ile şekil değiştirmesini hesapladığı için rijit modelin dinamik davranışını daha doğru bir şekilde temsil eden esnek bir model elde edilmektedir.



Şekil 7: Sonlu Elemanlar Modeli

Lumped mass yaklaşımında, gövdenin tüm ağırlık ve kütle atalet bilgileri aracın ağırlık merkezi olarak tanımlanır. “MSC Adams running full-vehicle analysis and adjustment mass” yöntemi kullanılarak ağırlık bilgisi hızlı bir şekilde ideal konu-

muna getirilmiştir (MSC Software, 2017). Adams/Car modelinin jenerik görüntüsü Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Adams Car Modeli

4.2 Dinamik Model Doğrulama Çalışmaları

Ticari aracın, yol üzerinde karşılaştığı etkiler için yol verilerinin toplanması gerekmektedir. Yapılan dinamik model doğrulama çalışması için gerçek yol verileri ile sanal analiz sonuç verilerinin karşılaştırması gerekmektedir. Sanal analiz çalışmalarında Adams/Car yazılımı kullanılarak oluşturulan Isuzu Sınıf-III otobüs modeli üzerinden araç dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir.

Dinamik model doğrulama çalışmaları kapsamında araç modelinin, ilk başta; 20, 30, 40 ve 50 km/h hızlardaki tümsek ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra 30 ve 32 km/h hızlarındaki birden fazla şerit değiştirme ölçümü yapılmıştır. Ayrıca, araç gerçek bir pist üzerinden toplanılan yol datasının belirlenen bir bölümü kesilmiş, kesilen yol datası işlenmiştir ve araç 4-poster üzerine çıkartılarak, işlenen teker deplasman verileri, teker merkezlerinden tahrik olarak verilmiştir. Çıktı olarak şasi deplasman değişimi gözlemlenmiş ve ölçüm verileri ile tepe noktaları kıyaslanarak belirli bir hata oranı (%10) çevresinde sonuçlar yaklaştırılmaya çalışmıştır.

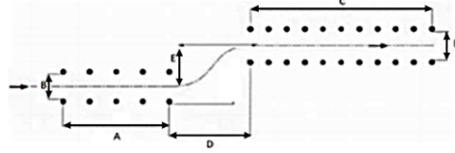
Ölçüm senaryoları Adams/Car içerisinde aynı hızlarda ve aynı şartlarda gerçekleştirilerek model doğrulaması yapılmıştır. Tümsek sanal analizlerinden elde edilen teker dikey katılık değeri ve damper deplasman değerleri iterasyon yapılarak elde edilmiştir.

Şerit değiştirme analizlerinde yanal kayma açısı değeri, pSeven programı içerisinde çoklu analizler ve analitik metot oluşturulması ile doğrulama çalışması yapılmıştır.

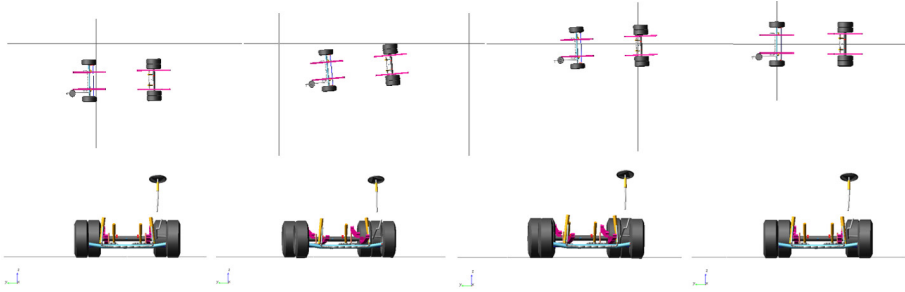
4.2.1 Şerit Değiştirme Analizleri

Ticari araç validasyon süreçlerinde, şerit değiştirme testleri araç modelinin alt yürür sisteminin doğrulama çalışmalarında temel bir yöntem olarak kullanılmaktadır. 3D Enveloping Yol-Teker temas modelinin etkin kullanılabilmesi için, istenilen formatta jenerik bir üç boyutlu yol profili oluşturulmuştur. 2 yönlü şerit değiştirme sanal analizi için belirlenmiş mesafeler, Şekil 9’da gösterilmiştir.

Test No	Senaryo	Hız [km/h]	Yön	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]	E [m]	Toplam Mesafe [m]
1	Lane Change	30	Sağ => Sol	16.6	3	25.5	21.8	3	63.9
2	Lane Change	32	Sol => Sağ	11.5	3	25.5	21.8	3	58.8



Şekil 9: Şerit Değiştirme Senaryosu



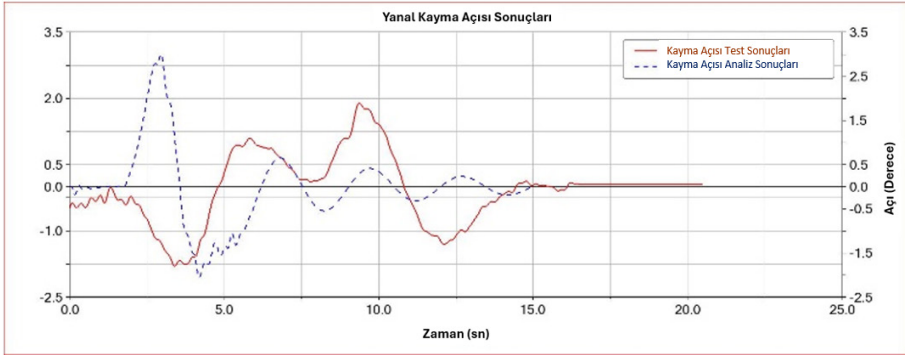
Şekil 10: Şerit Değiştirme Analizi

Şekil 9'de tanımlanan test koşullarının uygulanması sonucunda, Şekil 10'da gösterilen sanal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde şasiye ait yanal ivmelenme, tekerleklerin yanal kayma açıları ve gövdenin roll (yanal eğim) açısı gibi temel dinamik parametreler değerlendirilmiştir. Elde edilen çıktılar, aracın dinamik davranışlarının analizi ve model doğrulaması açısından kritik önem taşımaktadır. Şerit değiştirme ölçümlerinde sürücü etkisinden kaynaklanan sapmalar göz önünde bulundurularak, doğrulama sürecinde yalnızca manevralar arasındaki tepe noktalarının karşılaştırılması esas alınmıştır.

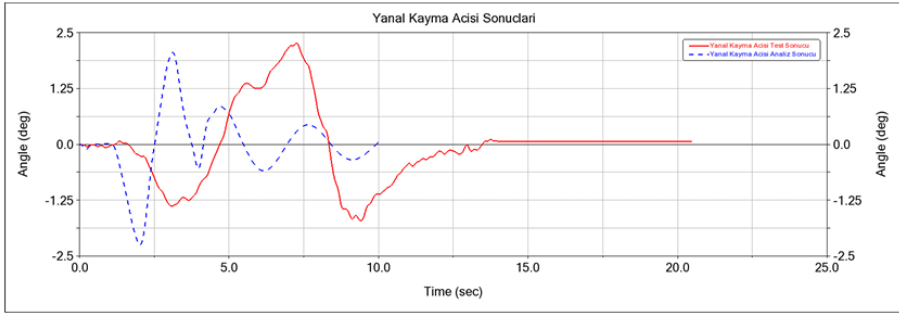
Şerit değiştirme analizlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla, araç dinamik yanıtlarını etkileyen kritik parametreler üzerinde çoklu optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu parametreler arasında lastiklerin yanal kayma katsayıları, süspansiyon burç rijitlikleri ve direksiyon sisteminin hassasiyet katsayısı bulunmaktadır. Optimizasyon sürecinin hedef çıktıları, maksimum yanal sapmanın minimize edilmesi ve şerit değiştirme manevrasının tamamlanma süresinin fiziksel test verileri ile uyumlu hale getirilmesidir. Başarı ölçütü olarak, simülasyon ile fiziksel test arasındaki yanal sapma farkının %5'in altında tutulması hedeflenmiş ve yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda bu kriter başarıyla sağlanmıştır.

Şekil 11 ve Şekil 12 'de sunulan araç şerit değiştirme testlerine ait analiz ve ölçüm verileri gösterilmiştir. Farklı hızlardaki sonuçlar incelendiğinde, sonuçların

sürücü tepkilerine bağlı olarak önemli değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, model doğrulama sürecinde 30 km/h hızındaki senaryo referans alınarak çalışma yürütülmüştür. Bu hızda (30km/h) ölçülen tekerlek yanal kayma açısı değerine en yakın sonuçları elde edebilmek amacıyla, *pSeven* yazılımı üzerinde çoklu analiz koşturma ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11: 30 km/h Şerit Değiştirme Analizi Tekerlek Kayma Açısı



Şekil 12: 40 km/h Şerit Değiştirme Analizi Tekerlek Kayma Açısı

Yürütülen optimizasyon süreci, maksimum 1 derece ve minimum 0.7 derece farklılık aralığında başarıyla tamamlanmıştır. Ölçüm süreçlerinde oluşabilecek olası hata payları da dikkate alınarak, bu sapma değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

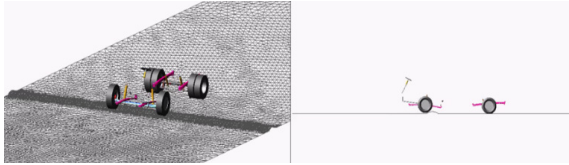
Sanal ortam modelinin gerçek araç ile korelasyonu sonucunda elde edilen nihai Adams modelinin yeterli doğruluk seviyesine ulaşp ulaşmadığını kontrol etmek amacıyla fiziksel test dataları kullanılarak 4-poster üzerinde ağırlık merkezi üzerinden ivme verileri fiziksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır."

4.2.2 Tümsek Analizleri

Araç tümsek test çıktıları ile araç tümsek analiz sonuçları karşılaştırılacak ve sanal modelin doğrulanmasında kullanılmıştır.

Sanal araç tümsek analizlerinde kullanmak amacıyla belirli uzunlukta ve üzerinde tümsek ölçüleri belirlenmiş sanal yol çizimi MSC Apex yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, yolun ağ yapısı yine aynı programda oluşturulan eleman ve nod bilgileri Adams/Car tarafına aktararak test tarafında kullanılan yolun sanal karşılığı oluşturulmuştur.

Sanal analizlerde, tekerlek ve yol etkileşimini daha gerçekçi modellemek amacıyla Adams/Car yazılımında '3D Enveloping Road-Wheel Contact' yöntemi tercih edilmiştir (MSC Software, 2019). Yol engelinin dalga boylarının teker çevresinden daha kısa olduğu durumlarda teker çerçevesinin davranışını yansıtmak önem kazanmaktadır, 3D Enveloping Contact yaklaşımı bu durumları kapsadığı için kullanılmıştır.



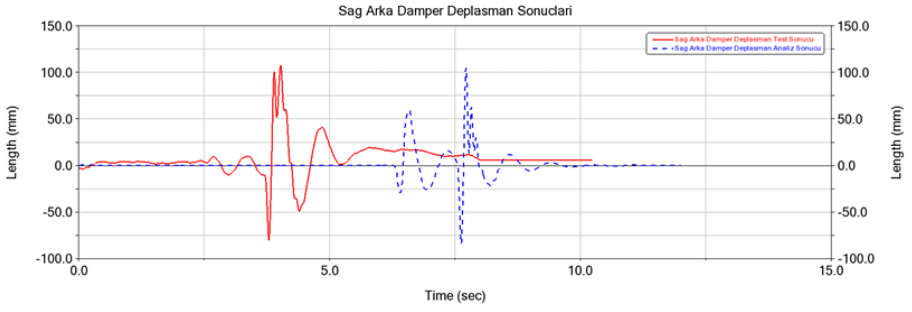
Şekil 13: Tümsek Analizi Araç – Yol Modeli Adams/Car Görünümü

Belirlenen hızlarda Şekil 13'te gösterilen sanal analiz senaryoları gerçekleştirilmiştir. Sanal analiz sonuçları doğrultusunda damper deplasman miktarı ve teker dikey hareketlilik miktarı parametreleri doğrulanmıştır. Farklı hızlara ait doğrulamalar teyit edilmiş ve araç dinamiğine uygun sınırlarda kalması için optimizasyon yapılmıştır.

Tekerlek ivme verilerinin doğrulanmasında, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla; gerçekçi olmayan ani pikler ile 50 Hz ve katlarında oluşan gürültü kaynaklı hatalar filtreleme yöntemiyle giderilmiştir. Bu işlemle birlikte, ölçümlerdeki gürültülerin ve hataların etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda, ivme verileri içerisinde yalnızca kararlı karakteristik sergileyen veri aralıkları analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Böylece, hem sinyalin yapay bozulmalardan arındırılması sağlanmış hem de analizlerin doğruluk seviyesi artırılmıştır.

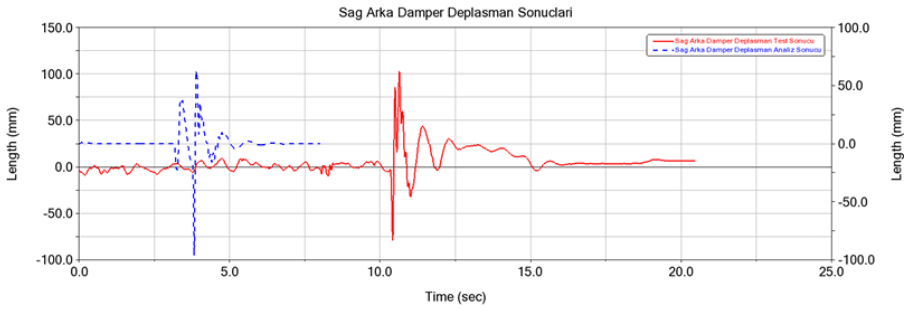
Analiz sonuçlarında, arka damper deplasman doğrulaması sırasında tutarsızlık görülmüştür. Analiz modelindeki deplasman ölçümü, damper elemanının süspansiyona bağlandığı nokta ile şasiye bağlandığı nokta arasındaki mesafeyi sürekli ölçerek başlangıçtan ne kadar değiştiğini göstermektedir. Buradaki genişleme hareketi, ölçüm verilerinde beklenenin çok üstünde ve arka sağ ile arka sol teker arasındaki ölçüm sonuçlarında farklılık olmasından dolayı tüm hızları kapsayan en uygun aralık belirlenmeye çalışılmıştır.



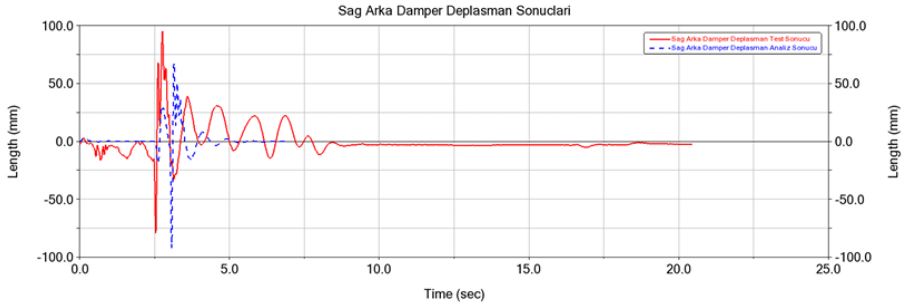
Şekil 14: 20 km/h Tümsek Analizi Sağ Arka Damper Dikey Deplasman Değişimi



Şekil 15: 30 km/h Tümsek Analizi Sağ Arka Damper Dikey Deplasman Değişimi



Şekil 16: 40 km/h Tümsek Analizi Sağ Arka Damper Dikey Deplasman Değişimi



Şekil 17: 50 km/h Tümsek Analizi Sağ Arka Damper Dikey Deplasman Değişimi

Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17’ de sunulan grafik üzerinde, kırmızı renkle gösterilen sürekli çizgiler fiziksel araç testlerinden elde edilen farklı hızlardaki sonuçları temsil etmektedir. Buna karşılık, mavi renkle gösterilen kesikli eğriler ise bilgisayar destekli analiz çalışmaları sonucunda bu hızlara karşılık elde edilen simülasyon verilerini ifade etmektedir.

İlgili grafiklerde 20, 30, 40 ve 50 km/h hızlarında gerçekleştirilen araç testleri ve bu hız senaryosuna karşılık gelen sanal analiz sonuçları paylaşılmıştır. Böylece, test verileri ile model tahminlerinin doğruluk düzeyi görsel olarak karşılaştırılmış ve modelin geçerliliği değerlendirilmiştir.

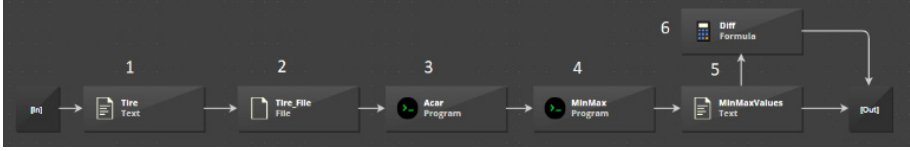
Tümsek analizlerinde hataları indirmek için 4 farklı (20, 30, 40, 50 km/h) hızdaki değerlerin hepsi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yol testleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde, sanal analiz sonuçlarında elde edilen, damper deplasmanının maksimum ve minimum değerleri, %10 hata değerinin altında kalacak şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Teker dikey ivme değerlerinde ise ölçüm karakteri %10 hata altında kalacak şekilde tutturulmaya çalışılmıştır.

Tümsek geçme sanal analizlerinde teker dikey katılık değeri, damperlerin sıkışma ve genişleme sırasında uyguladığı kuvvet değerleri ve hareketli süspansiyon elemanlarının burç bağlantılarındaki katılık değerleri değiştirilerek, istenilen değerler doğrulanmıştır.

4.3 pSeven-Adams/Araç Entegrasyonu ve Çoklu Analiz Çalışması

Çalışmada sanal araç modelinde Pacejka teker modeli kullanılmıştır. Pacejka teker modelinin yanal katsayıları (örneğin pcy1, pdy1, pey1, pky1) lastiğin yanal karakteristiğini tanımlar. Teker modelindeki bu katsayılar, kayma açısı, dikey yük, kamber gibi parametrelerle ilişkili olarak lastiğin yanal tepkisini hesaplamak için kullanılır. Bu parametrelerdeki değişiklikler, özellikle viraj alma sırasında aracın yönelme tepkisi ve yanal tutunma limitlerini doğrudan etkiler. Örneğin, pky1 değerinin değiştirilmesi, yanal sertliğin artmasına veya azalmasına yol açar ve gövde salınımının değişmesi ile sonuçlanabilir. Yanal tekerlek katsayısının yanal kayma açısı değerini nasıl etkilediğini görmek için pSeven programı ile Deney Tasarımı (DoE) ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler

değiştirilirken Adams/Car programında baz değerler nominal değer olarak alınmış, alt üst limitleri ise %20 marj ile belirlenmiştir.

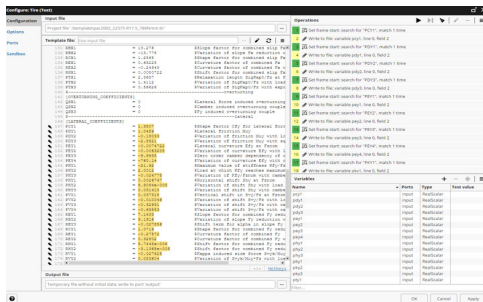


Şekil 18: Pseven Akış Şeması

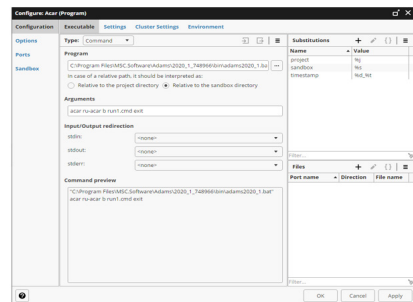
Şekil 18’ de, iş akışında teker dosyası içerisindeki yanal katsayıların otomatik bir şekilde değiştirilerek araç simülasyonunun koşturulması ve sonuçların gözlemlenmesi modellenmiştir. Şekil 18 pSeven programı içerisinde oluşturulan bir iş akışını temsil etmektedir. Bu iş akışı görselde numaralandırılan bloklardan oluşmaktadır. Her bir blok bir süreci temsil etmektedir ve işini tamamlayan blok işi bir sonraki bloğa taşıyarak manuel gerçekleştirilen bir sürecin otomasyonu bu şekilde sağlanmaktadır. Bu blokların iş tanımları sırasıyla Adams Car teker parametrelerinin güncellenmesi, güncellenen teker dosyasının modele dahil edilmesi, Adams/Car analizinin koşturulması, hedeflenen çıktıların oluşturulması, çıktıların raporlanması, çıktıların matematiksel operasyonlar ile test sonuçlarıyla kıyaslanmasıdır. Bu süreç bir kere tanımlandıktan sonra pSeven ile bu süreç otomatik bir şekilde sürekli tekrar edilebilir.

Şekil 18’de gösterilen 1 numaralı blok ile teker yapılandırma kısmında teker dosyası içerisinde yanal katsayılar parselleme (parsing) metodu ile belirtilmiş ve bu alanlar değiştirilebilir duruma getirilerek teker parametreleri oluşturulmuştur. Şekil 19.a’ da değiştirilen teker dosyası veri tabanı (database) içerisinde ilgili klasöre yazdırılarak modele dahil edilmektedir. Böylece Şekil 18’de belirtilen 2 numaralı blok modele eklenmiştir.

Şekil 19.b’de ise güncellenen veri tabanı kullanılarak araç dinamiği simülasyonu batch moduyla koşturulmaktadır. Şekil 19.b’de gerekli komutların programa girilmiş hali gösterilmektedir. Şekil 18 üzerinden gösterilen 3 numaralı blokta bu işlem gerçekleştirilmektedir.



Şekil 14: Pseven lastik yapılandırması



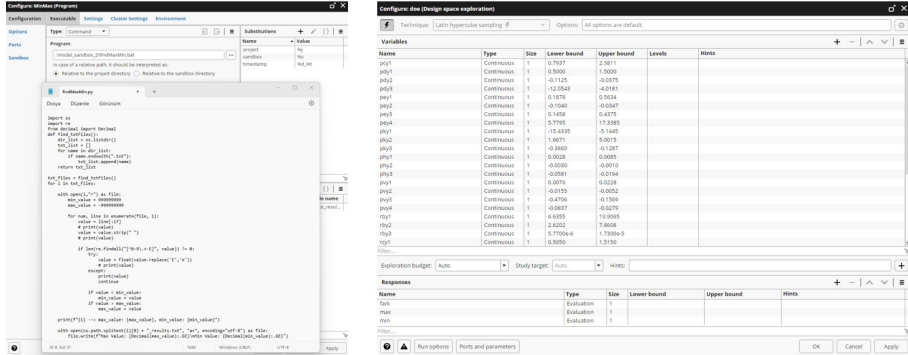
Şekil 15: Pseven farklı program entegrasyonu

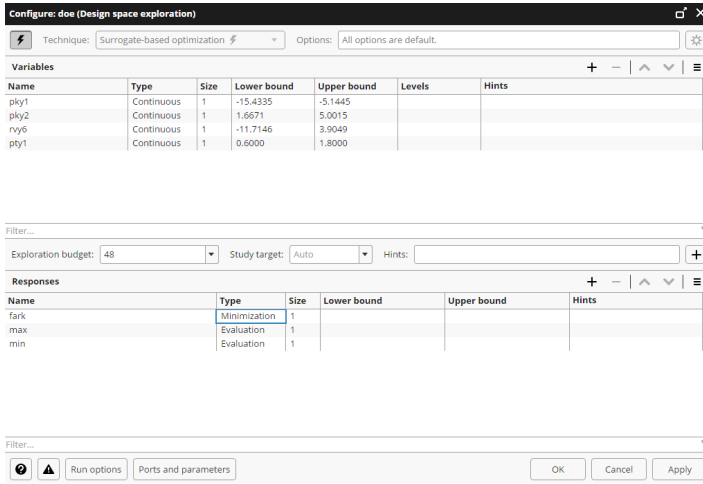
Şekil 19: a.) pSeven Lastik Yapılandırması

Şekil 19: b.) pSeven Farklı Program Entegrasyonu

Şekil 19.c’de ise Adams’tan standart alınan sonuç dosyası içerisindeki veriler python kodu yardımıyla karşılaştırılarak minimum ve maksimum değerler oluşturulmaktadır. Şekil 18’de belirtilen 4 numaralı blok bu işlemi yürütmektedir.

Bulunan maksimum ve minimum değerler, Şekil 18’de belirtilen 5 numaralı blok yardımıyla her döngüde not edilmekte olup, 6 numaralı blok yardımıyla maksimum ile minimum arasındaki fark bulunmaktadır

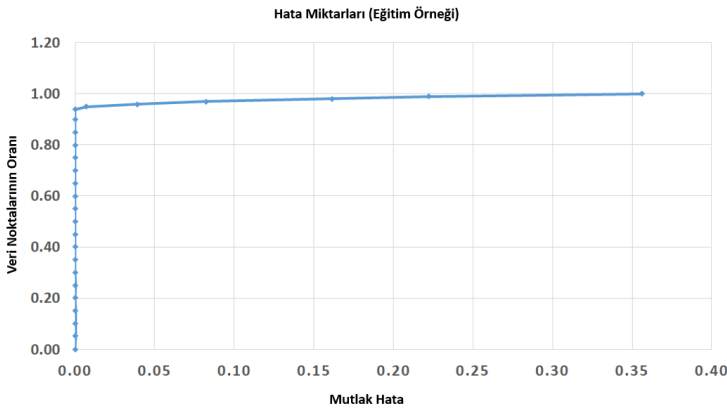




Şekil 19: e.) pSeven Optimizasyon Sonuçları

Sınıf-3 otobüsün belirli sayıda teker yanal katsayı değeri bulunmaktadır. Şekil 22’de bulunan görselin sol tarafında bulunan tabloda belirtilen bu katsayı değerleri pSeven programı içerisinde parametre olarak tanımlanarak, analizler yapılmıştır. pSeven programı bu 34 katsayı için değerlerini değiştirerek her bir katsayı değerleri için analizleri gerçekleştirmiştir. Şekil 21’de bu parametrelerin başlangıç değerleri yer almaktadır. Parametreler değiştirilirken görselde görülen değerler baz alınmış, alt üst limitleri ise %20 marj ile belirlenmiştir. Her analiz sonucu, pSeven programı tarafından değerlendirilip yeni parametreler oluşturulmuştur. Bu değerler neticesinde her bir analiz sonucuna göre Adams Car modeli otomatik olarak güncellenmiş ve araç dinamiği analizleri bütün sonuçlara göre tekrarlanmıştır.

Bu çalışma sonucu teker yanal katsayılarının, aracın yanal kayma açısına olan etkisi gözlenmiştir. Toplam 680 analiz gerçekleşmiş, pSeven programı ile tahmini model oluşturulmuştur.

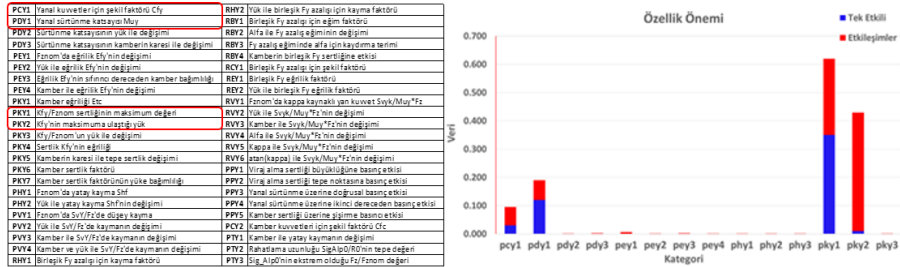


Şekil 20: Tahmini Model-Model Hata İncelemesi

Şekil 20'de görüldüğü gibi modelin hata oranı incelenmiştir. Grafikte oluşturulan tahmini modelin doğrulama karşılaştırmalarında maksimum yaklaşık 0.35 mutlak hata ile çalıştığı gözlemlenmiş, tahmini model ile oluşturulan verilerin kullanılabilirliği görülmüştür. Tahmini model yardımıyla, parametre değişimlerinin yanıl kayma açısına etkisi Şekil 22'deki gibi hesaplanmıştır. Şekil 22'de teker yanıl parametrelerinden yanıl kayma açısı üzerindeki tekil ve bileşke etkilerine göre sonucu en fazla değiştiren ve en az değiştiren parametreler tahmini model ile gözlemlenmiştir. Tahmini modelin sağladığı öngörü ile modelin mertebesinin küçültülmesi hedeflenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki: pky1, pky2, pcy1 ve pdy1 parametreleri kayma açısını en çok etkileyen parametreler olarak belirlenmiştir.

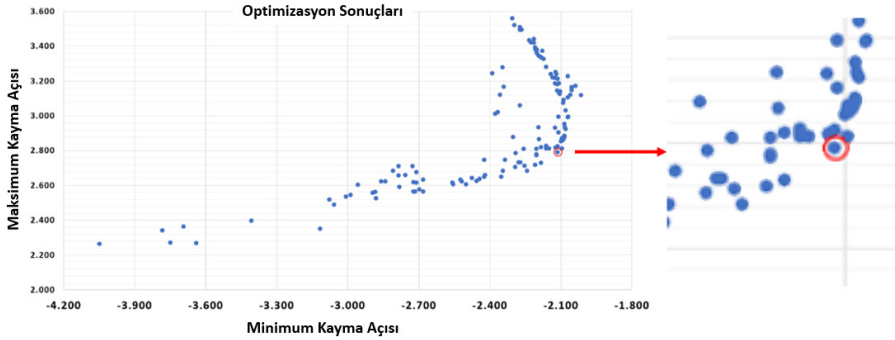
TEKER YANAL KATSAYILARI ve BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ									
PCY1	1.5874	PEY4	11.559	PVY1	0.015216	RCY1	1.01	RVY3	-0.1623
PDY1	1	PKY1	-10.289	PVY2	-0.010365	REY1	0.010513	RVY4	-0.0198
PDY2	-0.075004	PKY2	3.3343	PVY3	-0.31373	REY2	5.98E-05	RVY5	1.9
PDY3	-8.0362	PKY3	-0.25732	PVY4	-0.055766	RHY1	0.028005	RVY6	-7.8097
PEY1	0.37562	PHY1	0.0056509	RBY1	13.271	RHY2	-4.88E-05	PTY1	1.2
PEY2	-0.069325	PHY2	-0.0020257	RBY2	5.2405	RVY1	0.0066878	PTY2	2.5
PEY3	0.29168	PHY3	-0.038716	RBY3	1.15E-05	RVY2	-0.042813		

Şekil 21: Teker Yanıl Katsayıları ve Başlangıç Değerleri



Şekil 22: Tahmini Model-Model Hata İncelemesi

Yanal kayma açısını en çok etkileyen teker yanıl katsayı parametreleri belirlendikten sonra bu değerler değiştirilerek, test verisine uygun değerleri bulmak için pSeven programı kullanılmıştır. Gerçek yol test sonuçlarından elde edilen yanıl kayma açısının minimum ve maksimum değerleri optimizasyon çalışmasının hedef değerleri olarak belirlenmiş ve pSeven programı üzerinden bu değerleri elde edecek parametre değerlerini bulmak amaçlanmıştır.



Şekil 23: Yanal Kayma Açısı Optimizasyonu Sonuçları Dağılımı

pSeven programı ile yapılan optimizasyon parametreleri, yaklaşık 153 analiz sonucunda elde edilmiştir ve Şekil 23'te görüldüğü gibi belirlenen optimizasyon verilerinden elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Sadece minimum ve maksimum olarak değil, aynı zamanda bu değerlerin mutlak farkı olan genlik değeri de incelenmiştir, testte elde edilen genlik değeriyle kıyaslanmıştır. İşaretli nokta incelemeler doğrultusunda uygun olarak görülmüştür.

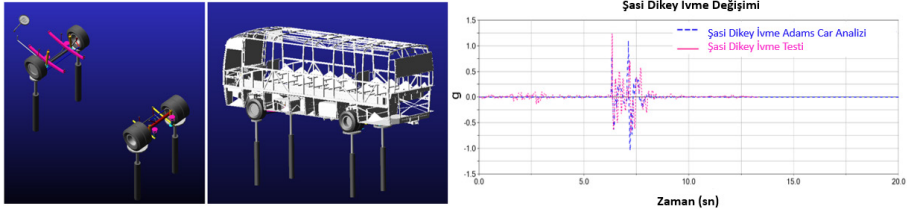
Doğrulama çalışmalarında pSeven programı kullanımı ile analiz sürecinin otomasyonu sağlanmış, optimizasyon süreci de otomasyon ile yürütülmüştür. Bu sayede manuel operasyonlardan oluşabilecek hatalar elimine edilmiştir. Elde edilen veriler ile oluşturulan tahmini model sayesinde model mertebesi azaltılarak daha az parametre ile optimizasyon çalışması tasarlanmıştır. Ayrıca optimizasyon çalışması için otomasyonun yardımıyla sürecin tamamı pSeven ile yürütülmüş, bu sayede optimizasyon çalışması sistematik bir şekilde analizler gerçekleştirilmiştir ve hedefe ulaşılmıştır. Bütün parametrelerin dahil olduğu ve iterasyonların elle yapıldığı süreçte tüm analiz modelleri kullanıcı tarafından oluşturulduğu için daha fazla emek, kullanıcıya bağımlı hata hem de sistematik ilerlenmediği taktirde 34 parametrelili bir optimizasyon problemi oldukça zorlayıcı gözükmemektedir. Optimizasyon çalışması daha az parametreyle ve sistematik bir şekilde yürütüldüğü için bütün parametrelerin dahil edildiği deneme yanılma operasyonlarının olduğu süreçten daha kısa sürede ve daha az çabayla tamamlandığı düşünülmektedir. Kullanıcı bütün iterasyonları manuel olarak değiştirdiğinde bu analiz başına ortalama 3 dk, her bir sonucun inceleyip yeni iterasyona karar verilmesi yaklaşık 2 dk süre almaktadır. Süreç toplamında 833 analizin yapıldığında yaklaşık olarak en az 4165 dk zamandan tasarruf edilmiştir. pSeven ile tasarlanan süreçte herhangi bir kullanıcı müdahalesi olmadan süreç tamamlanmış için daha az süre, maliyet ve hatasız bir şekilde tamamlanmıştır.

4.4 4-Poster Analizi

4-poster test sistemi, araç şasisinin ve süspansiyon sisteminin dikey dinamik davranışlarını değerlendirmek için kullanılan bir test platformudur. Dört bağımsız hidrolik platform üzerine yerleştirilen araç, yol profiline göre programlanan

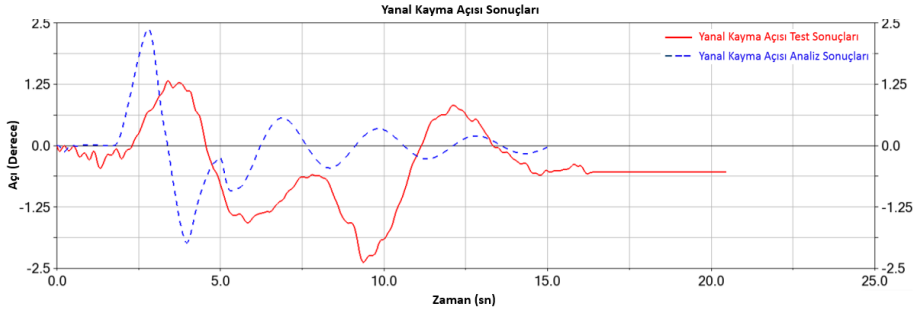
dikey hareketlere maruz bırakılarak süspansiyon hareketleri ve şasi deformasyonları ölçülmektedir. Bu yöntem, NVH (Noise, Vibration, Harshness) analizleri, süspansiyon dayanım testleri ve yol dayanıklılığı simülasyonları için uluslararası standartlarca önerilmektedir (ISO, 2016; ASTM, 2015).

Sanal model, 37.9 saniyelik test parkuru üzerinden toplanan yol verisi girdi olarak kullanılarak 4-poster analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak şasinin dikey ivme değerleri ve deplasmanları incelenmiştir.



Şekil 24: Adams Car Modeli ve 4-Poster Analizi Dikey Sonucu

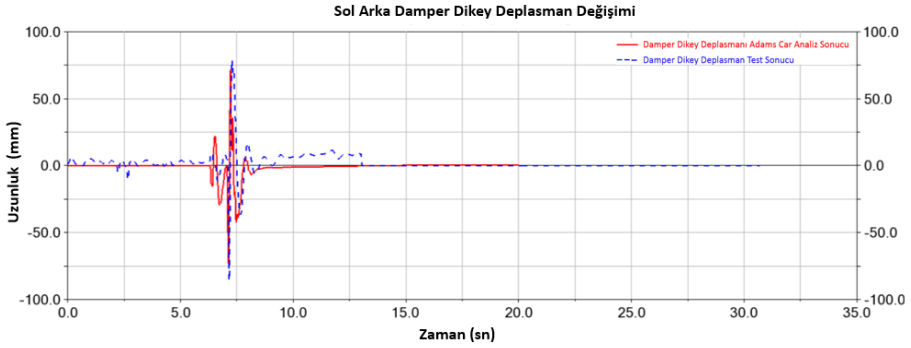
Sonuçlar neticesinde sanal alt yapı modelinin yakınsadığı görülmekte olup şasi üzerinde test esnasında toplanan veriler ile doğrulanan sanal model çıktısı Şekil 24'te gösterilmektedir. Tepe noktalarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 25: Optimizasyon Analizi Sonuçları Şerit Değiştirme Analizi
Tekerlek Kayma Açısı

pSeven optimizasyon analizleri sonucunda tümsek ve şerit değiştirme analizleri tekrarlanmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 25 'te gösterilen şerit değiştirme test ve analiz sonuçları incelendiğinde maksimum açı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 26'da gösterilen tümsek analizi sonuçları incelendiğinde, tepe değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 26: Optimizasyon Analizi Sonucu Tümsek Analizi Sol Arka Damper Dikey Deplasman Değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Class-III segmentinde yer alan bir yolcu otobüsünün dinamik davranışları sanal modelleme ve fiziksel test doğrulama yöntemleri birleştirilerek kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Esnek gövde modelleme teknikleri kullanılarak oluşturulan araç modeli üzerinde, çoklu optimizasyon senaryoları pSeven yazılımı aracılığıyla yürütülmüş; modelin gerçek test verileriyle korelasyon sağlaması hedeflenmiştir. Özellikle süspansiyon sistemi, tekerlek dikey katlıkları ve burç sertliklerinin hassas ayarlanması sonucunda, tümsek geçme ve şerit değiştirme gibi temel manevralarda, model doğruluğu yüksek seviyede elde edilmiştir. Sanal analiz sonuçları ile fiziksel ölçüm verileri arasındaki hata oranı hem tümsek testlerinde hem de şerit değiştirme manevralarında %10'un altında tutulmuş; bu durum sanal modelin güvenilirliğini ve mühendislik doğrulama süreçlerinde kullanılabilirliğini desteklemiştir.

Gerçek yol verileri kullanılarak gerçekleştirilen 4-poster analizleri sonucunda, aracın şasi dikey hareketleri sanal ortamda başarıyla taklit edilmiş ve pSeven ile yapılan parametrik optimizasyonlar sonucunda analiz süresi en az yaklaşık olarak 4165 dk zamandan ve maliyetlerden tasarruf edilmiştir. Ayrıca, manuel iterasyon parametrelerinin girilmesi durumunda oluşabilecek hatalarında önüne geçilmiştir. pSeven kullanılarak bu çalışmaya özgün en etkin parametreler belirlenerek mertebe azaltımı yapılmıştır, bu sayede 34 parametrelili bir optimizasyon problemi daha az parametre kullanılarak istenilen çalışmalar tamamlanmıştır.

Şerit değiştirme manevralarında farklı hız senaryoları için yürütülen doğrulama çalışmaları, sanal ve fiziksel veriler arasındaki sapmanın oldukça düşük düzeyde olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ivme ve deplasman verilerinin korelasyonu sayesinde modelin dinamik tepkileri doğru şekilde yakalanmış ve optimizasyon süreci iteratif olarak iyileştirilmiştir. Çalışmada, optimizasyon algoritmalarının aktif kullanımı ve sanal test verilerinin sistematik analizi sayesinde, fiziksel prototip üretimi ve çoklu test senaryosu yürütme ihtiyacı minimize edilmiştir.

Bununla birlikte, elde edilen bulgular çalışmanın mevcut literatüre önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Özellikle sanal test, optimizasyon ve fiziksel doğrulama adımlarının tümünün aynı doğrulama süreci içerisinde entegre şekilde uygulanması, mevcut literatürde sıklıkla ayrı ayrı ele alınan yöntemlere kıyasla daha bütüncül ve pratik bir yaklaşım ortaya koymuştur. HyperWorks, ADAMS ve pSeven yazılımlarının birlikte kullanıldığı bu çok yönlü metodoloji, mühendislik tasarım süreçlerinde veri odaklı karar verme mekanizmalarının etkinliğini artırmakta ve ürün geliştirme süresini ciddi ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, benzer doğrulama çalışmalarında nadiren birlikte kullanılan MBD-CAE-DOE araçlarının pSeven entegrasyonu yoluyla tek bir doğrulama sürecinde birleştirilmesi yönüyle de özgünlük taşımaktadır.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar kapsamında, sanal doğrulama sürecinin daha da genişletilmesi önerilmektedir. Özellikle viraj alma, ani frenleme ve aquaplaning gibi farklı sürüş senaryolarının modele entegre edilmesiyle, araç dinamik davranışlarının kritik limit koşulları altında da değerlendirilebilmesi sağlanabilir. Ayrıca, elastik zemin modellemelerinin geliştirilmesi ve deformasyon karakteristiklerinin simülasyon ortamına dahil edilmesiyle, yumuşak yüzeylerdeki araç tepkileri daha doğru biçimde modellenenebilir. Makine öğrenmesi tabanlı adaptif optimizasyon algoritmalarının pSeven gibi platformlara entegre edilmesi, çoklu senaryo yönetiminde çözüm sürelerini daha da kısaltarak sanal prototipleme sürecine yeni bir boyut kazandırabilir. Son olarak, sürücü modellerinin parametrik şekilde entegre edilmesi ve gerçek zamanlı Hardware-in-the-Loop (HIL) test platformlarıyla desteklenmesi, modelin gerçek sürüş koşullarıyla dinamik uyumluluğunu daha da güçlendirecektir.

Bu bağlamda, çalışma hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalarda sanal test ve optimizasyon temelli araç doğrulama süreçlerine yönelik önemli bir referans oluşturmakta, aynı zamanda ileri mühendislik çalışmalarına ışık tutacak yeni araştırma konularına da zemin hazırlamaktadır.

Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

6. Refereanslar

Albinsson, A., & Routledge, C. (2013). The damper levels influence on vehicle roll, pitch, bounce, and cornering behaviour of passenger vehicle. Master's Thesis in Automotive Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden. Erişim Adresi: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/da15e2f9-a56b-4a24-8901-edacbcdea924/content>.

Altair. (t.y.). Introduction into design of experiments DOE with HyperStudy eBook. Erişim Adresi: https://advanced-eng.cz/wp-content/uploads/2021/06/2021_ebook-HyperStudy.pdf

Arslan, A., Kaptanoğlu, M., & Şenocak, E. (2012). Kuzey Amerika pazarı için geliştirilen bir aracın FMVSS 208 regülasyonuna uygunluğunun sanal olarak doğrulanması. 6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON 2012), Bursa, Türkiye. Erişim Adresi: <https://otekon.org/dokuman/books/6thOtekonBook.pdf>

ASTM. (2015). Standard Guide for Conducting Friction Tests for Pavement Surfaces Using the Two-Wheel Brake-Force Trailer (ASTM E1926-15). ASTM International.

Ayçiçek, T. (2002). (*Bir taşıt seyir dinamiği modeli.*) Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Erişim Adresi: <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/6023e3e9-59ad-4419-bdbb-0479a831e444/content>

Demir, A. (2013). Taşıt teknolojisi: Teker dinamiğinin incelenmesi. Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İstanbul. Erişim Adresi: <https://www.abdullahdemir.net/dersnotlari/tasit-teknolojisi/tasit-teknolojisi-tekerlek-dinamiginin-incelenmesi/>

Orgül, B. O., Koyuncu, M. L., Dileroglu, S., & Gökçe, H., (2010). Ticari Araç Geliştirme Projesi Kapsamında Dinamik Modelin Testler İle Doğrulanması. Otekon 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Turkey. Erişim Adresi: <https://www.otekon.org/dokuman/books/2thOtekonBook.pdf>

International Organization for Standardization. (2018). ISO 3888-1:2018: Passenger cars—Test track for a severe lane-change manoeuvre—Part 1: Double-lane change. Erişim Adresi: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/67973/daa839ed4aca420788d-9b4a51cd6cc95/ISO-3888-1-2018.pdf>

ISO. (2016). Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data (ISO 8608:2016). International Organization for Standardization.

ISO. (2018). Road vehicles – Functional safety – Part 1: Vocabulary (ISO 26262-1:2018). International Organization for Standardization.

Kumar, S. (2015). (*Suspension design feasibility study of light commercial vehicle in Adams/Car.*) Yüksek Lisans Tezi, Politecnico di Milano, School of Industrial and Information Engineering, İtalya. Erişim Adresi: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/112888>

Kutluay, E., & Winner, H. (2014). Validation of vehicle dynamics simulation models - A review. *Vehicle System Dynamics*, 52(2), 186–217. Doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.868500>

MSC Software. (2017). Vehicle modeling and simulation using Adams/Car: Workbook. Erişim Adresi: <https://www.scribd.com/document/729784209/Adams-2017-2-Training-740-Workbook>

MSC Software. (2019). Adams Tire Help (for Adams 2019.2): Documentation. Erişim Adresi: <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/adams-configure-help-for-adams-2019-2--doc12082>

Trade Delegation of the Russian Federation in the United Kingdom. (2016). Software development company DATADVANCE. Rustrade. Erişim adresi: <https://rustrade.org.uk>

United Nations Economic Commission for Europe. (2018). Regulation No. 107: Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction. *Official Journal of the European Union*, L 42, 1–295. Erişim Adresi: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d8730fbc-157e-11e5-8817-01aa75ed71a1>

Van Gennip, M. (2018). Vehicle dynamic modelling and parameter identification for an autonomous vehicle. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Hollanda Scholtz, R. A. (1993). The spread spectrum concept. In N. Abramson (Ed.), Multiple access (pp. 121–123). *IEEE Press*. Erişim Adresi: <https://uwspace.uwaterloo.ca/items/c2aa65f7-1747-4fdb-bdda-3d94acef5935>