

Otonom Sürüş Sistemlerinin Simülasyon Ortamında Güvenlik ve Performans Analizlerinin Doğrulanması ve Onaylanması

Validation and Verification of Safety and Performance Analysis of Autonomous Driving Systems in Simulation Environment

Sarp Kaya Yetkin¹, Batuhan Günaydın¹, Buse Yakın Gökdemir¹, Mert Eren¹, Mert Tomruk¹

¹AVL Research and Engineering
Istanbul, Türkiye

{sarp.yetkin}@avl.com

Özetçe

İleri Seviye Sürücü Destek Sistemleri (ADAS) fonksiyonlarının karşılaşılabileceği her senaryonun gerçek dünyada testinin yapılması zaman, güvenlik ve maliyet düşünüldüğünde olası değildir. Bu çalışmada Otomatik Şerit Takibi Sistemi'ndeki (ALKS) cut-in ve cut-out senaryolarının simülasyonu yapılarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. ALKS'nin seçilen senaryolarında manevraların gerçekleştirilebileceği rotalar simülasyon ortamında oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları, Senaryo Tespit Sistemi (MDF) içerisine beslenerek simülasyon içerisindeki manevraların Ana Performans Belirleyicileri (KPI) ve Kritik Metrikleri (CM) hesaplanmıştır. MDF algoritmasının çıktısı olan KPI ve CM'lerin Birleşmiş Milletler Regülasyonu (UNR) 157'nin dikte ettiği tolerans aralıklarında kalıp kalmadıkları analiz edilmiştir. MDF tarafından tespit edilemeyen manevraların senaryolarında test aracı (Ego) ve ön hedef aracın (TOF) kaza yapıp yapmadığı belirlenip sistemin güvenlik açısından uygunluğu hakkında bilgi vermektedir.

Abstract

Every scenario that may be encountered in the scope of Automated Lane Keeping System (ALKS), which are Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) functions, are unlike to be possible to test with real-world testing considering the time, safety and cost. In this study, performance analysis was carried out by simulating the cut-in and cut-out scenarios of ALKS. Routes where maneuvers can be performed in selected scenarios of ALKS are created in the simulation environment. Key Performance Indicators (KPIs) and Criticality Metrics (CM) of maneuvers were calculated by Maneuver Detection Framework (MDF). Output of MDF, which are KPIs and CMs, analyzed whether stay within the tolerance ranges dictated of United Nations Regulation 157. Maneuvers that cannot be detected by the MDF also analyzed to get suitable information in terms of safety by considering main vehicle (Ego) and target object front (TOF) crash evaluation.

1. Giriş

uluslararasıOtomotiv Mühendisleri Birliği'nin (SAE) belirlemiş olduğu otonomi seviyesine göre Otonom Sürüş Sistemleri (ADS) seviye 3, 4 ve 5'e karşılık gelmektedir [1]. ADS'nin günden güne artması sürücü hatalarından kaynaklanan kaza sayısının azalması, ulaşım sisteminin etkinliğinin artması ve sürüş sırasındaki konforun artması gibi faydalar sağlamaktadır [2]. Otonom Araçlar (AV) açık bağlamda çalışan, yani yapılandırılmamış gerçek dünya ortamlarıyla ilgilenen karmaşık otonom sistemler haline geldiğinden dolayı AV'lerin doğrulanması ve onaylanması çok büyük bir zorluk teşkil etmektedir [3], [4]. ADS'nin doğrulanmasının ve güvenliğinin onaylanmasının fiziksel testlerle gerçekleştirilmesi zor olduğundan dolayı, yeni yöntem arayışları günümüzün araştırma konusu olmuştur. Bu arayışlara PEGASUS projesi tarafından önerilen senaryo tabanlı yaklaşım ile senaryolar için gerekli olan Operasyonel Tasarım Alanı (ODD) oluşturulmuş ve bu yöntem ile sistem doğrulama ve onaylama süreçlerinin hızlanacağı öne sürülmüştür [5], [6]. PEGASUS çalışmasının takipçisi olarak seviye 4 ve seviye 5 araçlar için Verifikasyon ve Validasyon Metotları (VVM) projesi yüksek seviyeli otonomluğa sahip ve çok karışık çevrelerde çalışan araçlar için senaryo tabanlı yaklaşım geliştirmiş ve PEGASUS projesinin tezini desteklemiştir [7].

ADS'nin doğrulanması ve onaylanması bağlamında senaryo teriminin standartlaştırılmış bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir [8]. ISO/PAS 21448 [9] senaryoyu sahnelerin zaman içerisindeki değişimi, test senaryosunu ise test değerlendirmesi için uygun başarılı/başarısız kriterler ile zenginleştirilmiş bir senaryo olarak tanımlamaktadır. Menzel yaptığı çalışmaların neticesinde senaryo tabanlı analiz için senaryoların fonksiyonel, mantıksal ve somut olarak nitelendirilmesi gerektiğini önermiştir [10]. Fonksiyonel senaryo, yapının doğal dil kullanılarak anlamsal olması olarak tanımlanırken, mantıksal senaryolar durumlar ile parametreler arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Somut senaryolar ise mantıksal senaryoların bir alt aşaması olarak mantıksal senaryolardaki örneklerin kullanılmasına gelmektedir. Bir diğer ifade ile somut senaryo, mantıksal senaryo sonucu tarifi yapılan parametre aralığındaki her bir parametreye tek bir değer atanmasının gerektirir [11].

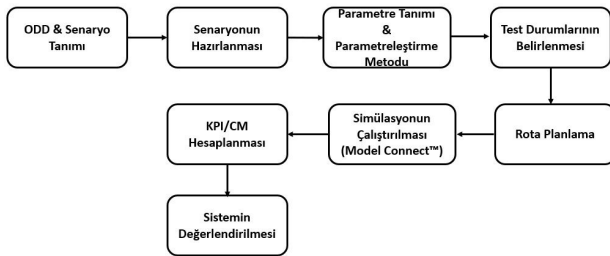
ADS'lerin doğrulanma ve onaylanma sürecinde senaryo çıktılarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda KPI ve CM'ler sistemin güvenli çalışmasını değerlendirmek adına önemli yere sahiptirler. VVM projesi kapsamında kritiklik analizi isimlendirilmiş ve bu analiz sırasıyla kritik fenomen tanımlama, nedensel ilişki tanımlama ve nedensel ilişkilerin sınıflandırılması sonucunda gerçekleşmektedir [7]. Çalışma esnasında, zamana bağlı CM'ler olan çarpışmaya kalan zaman (TTC), frenleme ile kazadan kaçınmaya kalan zaman (TTB) ve direksiyon manevrası ile kazadan kaçınmaya kalan zaman (TTS) dikkate alınmıştır [12]. Bunlara ek olarak ise boylamsal hızlanma, boylamsal ivmelenme, hedef araç ile aradaki mesafe, hedef araç ile hız farkı gibi KPI'lar değerlendirilerek manevranın doğrulanma süreci gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı ADS seviye 4 ve üzeri ile tasarlanmış araçların çalışma bölgelerindeki performanslarının güvenlik analizi çerçevesinde doğrulanması ve onaylanmasıdır. Bu bağlamda, seçilen operasyon bölgelerine uygun senaryolar mevcut standartlara uygun olarak hazırlanır. Ardından simülasyon ortamında, kontrolcü, dinamik araç modeli ve sanal çevre ortamı tasarlanır. Bunun sonucunda çıkan simülasyon verileri işlenerek her senaryoya ait ilgili KPI ve CM'ler hesaplandı. Makalenin içeriği belirtilen şekilde yapılanmıştır. Problem tanımı Bölüm 2'de, simülasyon çalışmaları ve detayları Bölüm 3'te ve KPI ve CM hesaplamaları Bölüm 4'te açıklanmıştır. Son bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir.

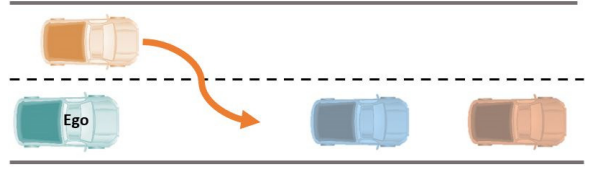
2. Problem Tanımı

Problemin genel işleyiş düzeni Şekil 1'de gösterilmiştir. UNR 157-ALKS'ye [13] göre sırasıyla Şekil 2'de ve Şekil 3'te gösterilen cut-in ve cut-out senaryoları kritik senaryolar olarak ifade edilmiştir. Bu bilgi ışığında senaryolar belirlenmiş ve çalışma içerisinde incelenmiştir. Kontrolcü ve sensörün bulunduğu Ego aracı, öndeki TOF aracının hız ve konum profilini takip ettiği durumda Ego ile TOF arasına başka bir aracın girmesiyle beraber Ego aracın hız ve konum profili takibini yeni araca göre uyarlaması cut-in senaryosu olarak ifade edilmiştir [13]. Benzer şekilde Ego aracı TOF aracını takip ederken TOF aracının şerit değiştirmesiyle beraber Ego aracının daha ilerideki başka bir aracı TOF olarak belirleyip onun hız ve konum profilini takip etmesi durumu ise cut-out senaryosu olarak ifade edilmiştir [13].

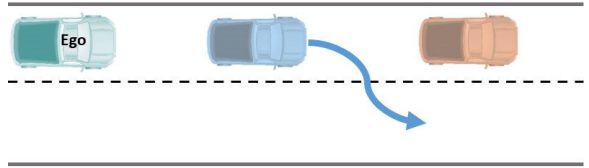


Şekil 1: Genel İş Akışı.

Şekil 4'te sunulan PEGASUS senaryo katmanları incelenmiş ve ilk 4 katman cut-in ve cut-out senaryoları için dikkate alınmıştır. Belirlenmiş olan senaryoların tasarımı ve simülasyonu AVL Scenario Designer™ [14] ortamında gerçekleştirilmiştir. Otonom sürüş seviyesi yükseldikçe senaryoyu etkile-

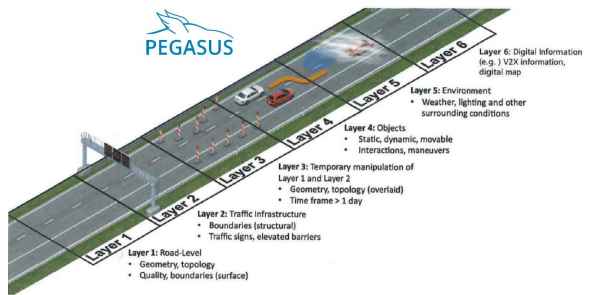


Şekil 2: Cut-in Senaryosu.



Şekil 3: Cut-out Senaryosu.

yen parametre sayısı arttığından dolayı test eforu da artmaktadır. Örneğin, cut-in manevrasının fonksiyonel senaryosu $S_N = 8.10^{23}$ olası parametre kombinasyonuna sahiptir [8]. Tüm parametre uzayını ve kritik senaryoları kapsayacak şekilde test edilmesi gereken en az senaryo sayısını elde etmek için kombinatorial optimizasyon yöntemi kullanılmış ve gerekli olan test durumları elde edilmiştir. Otonom sürüş testlerinin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için Ego ve TOF araçlarının gerekli aksiyonları yapabileceği bir yol planlaması yapılması gerekmektedir [15]. Yapılan bu çalışmada veritabanında bulunan ASAM OpenDrive® (XODR) dosyaları içerisinde, simülasyon çalışmaları için gereken yol profil özellikleri göz önünde bulundurulmuş olarak rota planlanması için bir algoritma Python ile tasarlanmıştır. Simülasyon ortamının kurulumu ve çalıştırılması sırasında VTD, AVL VSM™ ve MATLAB/Simulink'in aynı anda çalıştırılması gerektiğinden ortak simülasyon programı olarak Model.Connect™ kullanılmıştır. Simülasyon ortamında yapılan testler sonucunda elde edilen veriler ile belirlenmiş KPI ve CM'ler hesaplanmıştır. Çıktılar ilgili regülasyon limitleriyle karşılaştırılarak manevranın güvenli/güvensiz olduğuna karar verilmiştir.

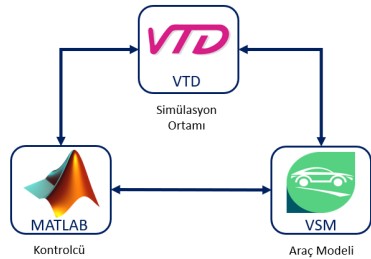


Şekil 4: PEGASUS Senaryo Katmanları.

3. Simülasyon Çalışmaları

3.1. Simülasyonların Yürütülmesi

Simülasyonun icra edilebilmesi için birçok programın aynı anda birbirleri ile haberleşerek çalışması gerektiğinden Model.Connect™ bu duruma çözüm için kullanılmıştır. Senaryoların görselleştirilmesi, çevre ve yol bilgileri için VTD, araç dinamikleri için AVL VSM™, araç kontrolü için de MATLAB/Simulink kullanılmıştır. Cut-in ve cut-out senaryolarında, yol ve Ego aracının etrafındaki araçlardan gelen pozisyon ve hız bilgileri kontrolcüde işlendikten sonra gerekli gaz ve fren pedalı, direksiyon açısı değerleri AVL VSM™'e iletilmiştir. Çevreki araçların uzaydaki boylamsal ve yanal pozisyonlarına göre Ego aracı hızını koruyarak mevcut şeridindeki hareketine devam etmiş ya da frenleme yaparak kazayı önlemeye çalışmıştır. Simülasyon ortamının şeması Şekil 5'te gösterilmiştir. Sistemdeki kontrolcü, Ego aracı ile aynı şeritte olan ya da aynı şeride geçmeye başlayan öndeki aracın boylamsal ve yanal eksenindeki konum, hız ve ivme bilgilerini kullanarak Ego aracının sahip olması gereken ivme değerlerini hesaplamaktadır. Hesaplanan ivme değerinden, araca özel olan motor devri-pedal haritalarından gaz/fren pedalı yüzdesi ve vites bilgisi hesaplanmaktadır. Bu esnada yolun viraj açısını takip etme ve şerit içindeki yanal sınımları asgari koşullara indirgemek adına kontrolcü düzenli olarak direksiyon açısını AVL VSM™'e göndermektedir.



Şekil 5: Simülasyon Akışı.

Çalışmada belirlenen tüm parametre değerleri ve onların olası kombinasyonları hesaplanarak toplamda cut-in için 2076, cut-out için 780 senaryo test edilerek manevra algılama ve KPI, CM hesaplaması için kullanılmıştır.

3.2. Rota Planlama

Optimum rota oluşturulması, simüle edilmek istenen hamlelerin istikrarlı bir şekilde yapılmasını sağlayıp minimum gereksinimlerini içeren yollar tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Tespit sırasında simülasyon mühendisinden gerekli yol profil özellikleri alınarak, yapılmak istenen manevranın dijital ortamda tasarlanmış yol verilerinin hangi bölgelerinde yapılabileceği bilgisini kullanıcıya sunan bir algoritma yazılmıştır.

Simülasyon için kullanıcıdan alınan parametreler, yol uzunluğu, yolun viraj yarıçapı, yolun üzerindeki sürüşe uygun şerit sayısı, kavşak bulunması ve yol üzerinde hız sınırının bulunması olarak belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak XODR dosyasında yol karakteristikleri seçim kriterleri ile eşleştirilmiş

ve tolerans payları içerisinde kalan olası yol setlerinden seçim yapılarak rota belirlenmiştir. Kullanıcıya ise çıktı olarak yapılacak istenen hamle için kullanabileceği XODR dosyası, Ego aracının başlangıç konumu, Ego aracının yön açısı verilerek simülasyon için hazır bir ortam oluşturulmaktadır.

4. KPI ve CM Hesaplaması

UNR 157 dikkate alınarak cut-in ve cut-out senaryolarının değerlendirilmesi için gerekli boylamsal ve yanal doğrultudaki KPI ve CM'ler belirlenmiş ve her bir test için hesaplanmıştır. Hesaplanan KPI ve CM'ler güvenlik, konfor ve performans olmak üzere 3 kategoride incelenmiştir. Tablo 1'de cut-in senaryosu için belirlenen KPI ve CM'ler ile kategoriler arasındaki ilişki örneklendirilmiştir.

Tablo 1: Cut-in Manevrasının KPI/CM Değerlendirme Tablosu.

Güvenlik	TTC	
	TTB	
	TTS	
	Öndeki araç ile mesafe	
...		
Konfor	Maksimum boylamsal hız	
	Maksimum boylamsal ivme	
	Boylamsal ivmenin türevi	
	Maksimum direksiyon açısı	
...		
Performans	Manevra süresi	
	Tepki süresi	
	Maksimum direksiyon titreşimi	
	Öndeki araç ile hız farkı	
...		

İncelenmiş CM'lerden olan TTC ve TTS Şekil 6'da gösterilmiştir. TTC denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. x_{ego} ve x_{tof} sırasıyla ego ve TOF aracının konumunu v_{ego} ve v_{tof} sırasıyla ego ve TOF aracının hız değerlerini ifade etmektedir.

$$TTC = \frac{x_{tof} - x_{ego}}{v_{tof} - v_{ego}} \quad (1)$$

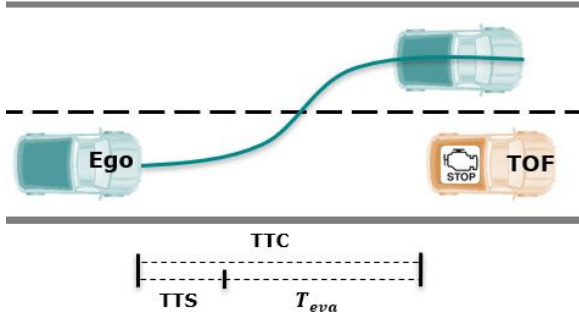
TTS değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle kaçış manevrasının süresini (T_{eva}) bilmek gerekmektedir. (T_{eva})'nın hesaplanabilmesi için yanal mesafe değişimi (y_{eva}), yanal ivme (a_{eva}) ve direksiyondaki gecikme süresi (τ_s) dikkate alınmış ve denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sırasında τ_s 0.1s seçilmiştir [16].

$$T_{eva} = \sqrt{\frac{2y_{eva}}{a_{eva}}} + \tau_s \quad (2)$$

TTS değeri, TTC ve T_{eva} arasındaki farkı ifade eder ve denklem (3) yardımıyla hesaplanır.

$$TTS = TTC - T_{eva} \quad (3)$$

TTS, çarpışmayı önlemek için kaçma manevrasının başlatılması gereken süreyi verir. TTC değerinin 0'ın altına düşmesi kazadan kaçınmanın mümkün olmadığı anlamına gelmektedir.



Şekil 6: TTC ve TTS Gösterimi.

5. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan cut-in ve cut-out senaryolarının güvenlik açısından doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için senaryoların simülasyon sürecindeki tespitinin yapılması gerekmektedir. Senaryonun başlangıç ve bitiş anlarının tespiti, senaryo ile ilgili KPI'ların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için kritik önem arz etmektedir. Senaryoların tespiti için, Python tabanlı otomatik senaryo tespit sistemi (MDF) kullanılmıştır. Senaryoların tespiti için MDF üzerinde senaryo spesifik başlangıç ve bitiş tetikleyici koşullar yazılmıştır. Bu koşullar, araçların ne zaman şerit değiştirdiği, şerit değişiminin ne zaman tamamlandığı, sabit hıza ulaşıp ulaşılmadığı gibi çeşitli dinamiklerle ilgilidir. Tasarlanan senaryoların, test edileceği simülasyon ortamını gerçek dünya testlerine yakınlaştırmak için simülasyon ortamında detaylı araç dinamikleri içeren bir araç modeli ve öndeki aracı tespit edecek şekilde yerleştirilen bir radar sensörü kullanılmıştır. Sırasıyla cut-in ve cut-out için icra edilen 2076 ve 780 senaryodan tespit edilen senaryo sayıları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: Senaryoların MDF'de Tespit Edilme Sayıları.

	Cut-In	Cut-Out
Tespit Edilen	194	142
Tespit Edilemeyen	1882	638

Tespit edilen senaryo sayısının toplam senaryo sayısından görece az olmasının temel sebebi, tasarlanmış olan senaryonun tespit sisteminin kapsamı dışında kalmasıdır. Yapının manevra tayini basit olarak, Ego aracının TOF aracını geçmediği ve TOF aracının aksiyonunu tamamlayabildiği senaryoları içermektedir.

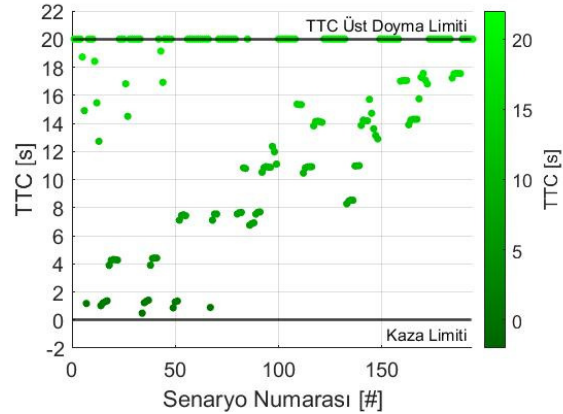
Simülasyon ortamında yaratılan senaryoların büyük çoğunluğu MDF'de tespit edilememiştir. Bunun en büyük sebebi, çoğu test senaryosunda, araçların şerit değişikliklerinin zamanlamasının istenilenden erken veya geç olmasıdır. Deneyler dizisi tasarımı (DoE) parametrik olarak tasarlanmıştır (şerit değişikliği tetiklenme mesafesi, şerit değişimi süresi, Ego ve TOF

başlangıç hızları). Bu parametreler DoE yaratımında belirli aralıklarda DoE'nin tamamını kapsayacak şekilde değiştirildiğinden ötürü, her iki senaryoda da fazla sayıda kaza senaryoları meydana gelmiştir. Kaza senaryoları haricinde, cut-in senaryosu özelinde, TOF aracının Ego aracının arkasına kıldığı ve aracın ön kısmına yerleştirilmiş olan sensör tarafından tespit edilemeyecek güvenli senaryolarla da karşılaşmıştır. Geliştirilen kaza tespit algoritması sayesinde, tespit edilemeyen senaryolardan kaç tanesinde kaza olduğu bilgisi elde edilmiş ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3: Tespit Edilemeyen Senaryolardaki Kaza Sayısı.

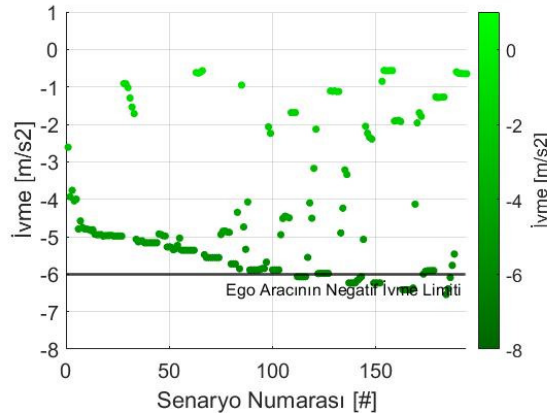
	Cut-In	Cut-Out
Kaza Olan	812	365
Kaza Olmayan	1070	273

Tespit edilemeyen senaryolardan kaza olmayanlar, senaryonun istenilen kritiklik seviyesi olan minimum çarpışma süresine kalan zamanın aşılmadığı ve global koordinatlar referans alınıp matematiksel denklemler ile hazırlanan kaza algoritmasının çıktısı olan güvenli senaryolardır. Tespit edilen senaryolarda ise güvenlik analizi manevra spesifik KPI ve CM hesaplamaları ile yapılmıştır. Tespit edilen cut-in senaryolarının TTC, maksimum yavaşlama ivmesi ve maksimum yavaşlama ivmesinin değişimi sırası ile Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.

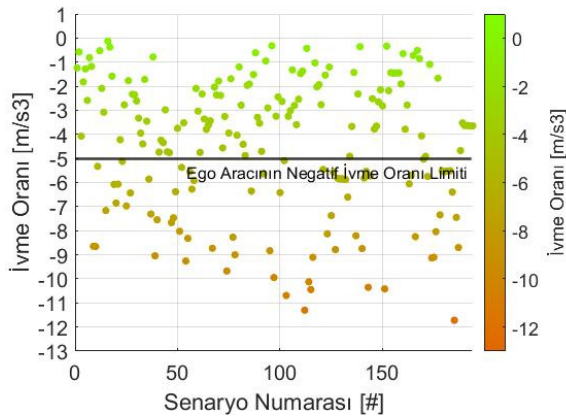


Şekil 7: Kaza Olmayan Cut-in Senaryolarındaki TTC Değerleri.

Kaza olmayan cut-in senaryolarında beklenildiği üzere TTC değerleri Şekil 7'de 0'ın üzerinde olup hesaplama limiti güvenli bölgenin uç limiti olarak belirlenen 20 s ile sınırlandırılmıştır. UNR 157'deki metriklerin limitine bakıldığında, cut-in senaryolarında Ego için minimum ivmesi -6 m/s^2 ve minimum ivme değişimi -5 m/s^3 ile sınırlandırılmıştır. Şekil 8 ve 9'da kaza olmayan senaryolar için performans metriklerinin büyük oranla UNR-157'de belirtilen limit aralığında kaldığı görülmektedir. Limit altında kalan değerler ise kontrolcüdeki ve araç dinamiklerindeki parametrelerin kalibrasyonu ile güvenli bölgelere taşınabilir. Yavaşlama ivmesindeki ani değişiklikler yavaşlama oranında büyük değişimlere yol açtığından ivme oranlarının limitin bir miktar altında olduğu senaryolar gözlenmiştir.



Şekil 8: Kaza Olmayan Cut-in Senaryolarındaki Negatif İvme Değerleri.



Şekil 9: Kaza Olmayan Cut-in Senaryolarındaki Negatif İvme Değişim Değerleri.

Bu çalışmada otonom sürüş sistemlerinin simülasyon ortamında cut-in ve cut-out senaryoları özelinde güvenlik ve performans analizi yapılmıştır. Geliştirilen yapı ile gerçek hayatta karşılaşılabilecek olası trafik senaryoları, gerçek araç ve kontrolcü modelleri kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyonu gerçekleştirilen senaryo çeşitliliğinin artırılması, otonom sürüş sisteminin güvenilirliği ve performansı hakkında daha detaylı bilgi verecektir. Bunlara ek olarak, mevcut simülasyon ve analiz yapısı ALKS dışında seçilen ADS fonksiyonu için de verimli bir değerlendirme imkanı sunmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen safhalarında yapı, acil durum şerit takip, yaya algılama gibi farklı gelişmiş sürücü destek sistemlerinin doğrulanma ve onaylanması için kullanılabilir. MDF'nin algılayabildiği mevcut senaryolar dışında seçilen destek sistemlerinin, ilgili KPI ve CM'lerin eklenmesi ile genişletilebilir.

6. Kaynakça

- [1] S. International. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/. Online; accessed: 01.07.2023.
- [2] T. D. Son, J. Hubrechts, L. Awatsu, A. Bhave, and H. Van der Auweraer, "A simulation-based testing and validation framework for adas development," *7th Transport Research Arena (TRA)*, 2018.
- [3] A. Poddey, T. Brade, J. E. Stellet, and W. Branz, "On the validation of complex systems operating in open contexts," *arXiv preprint arXiv:1902.10517*, 2019.
- [4] T. D. Son, A. Bhave, and H. Van der Auweraer, "Simulation-based testing framework for autonomous driving development," in *2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, vol. 1. IEEE, 2019, pp. 576–583.
- [5] A. Audi and A. Volkswagen. The pegasus method. <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method/>. Online; accessed: 14.04.2023.
- [6] H. Singh, S. Midlam-Mohler, and P. Tulpule, "Simulation based virtual testing for safety of adas algorithms-case studies," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2021.
- [7] C. Neurohr, L. Westhofen, M. Butz, M. H. Bollmann, U. Eberle, and R. Galbas, "Criticality analysis for the verification and validation of automated vehicles," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18 016–18 041, 2021.
- [8] M. Steimle, T. Menzel, and M. Maurer, "Toward a consistent taxonomy for scenario-based development and test approaches for automated vehicles: A proposal for a structuring framework, a basic vocabulary, and its application," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147 828–147 854, 2021.
- [9] P. ISO/PAS 21448: 2019, "Road vehicles safety of the intended functionality," *Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH*, 2019.
- [10] T. Menzel, G. Bagschik, and M. Maurer, "Scenarios for development, test and validation of automated vehicles," in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2018, pp. 1821–1827.
- [11] X. Zhang, J. Tao, K. Tan, M. Törngren, J. M. G. Sánchez, M. R. Ramli, X. Tao, M. Gyllenhammar, F. Wotawa, N. Mohan *et al.*, "Finding critical scenarios for automated driving systems: A systematic literature review," *arXiv preprint arXiv:2110.08664*, 2021.
- [12] L. Westhofen, C. Neurohr, T. Koopmann, M. Butz, B. Schütt, F. Utesch, B. Neurohr, C. Gutenkunst, and E. Böde, "Criticality metrics for automated driving: A review and suitability analysis of the state of the art," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 1–35, 2023.
- [13] UNECE. Un regulation no. 157 automated lane keeping systems (alks). <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks/>. Online; accessed: 15.05.2023.

- [14] L. AVL. Avl scenario designer. <https://www.avl.com/en/testing-solutions/automated-and-connected-mobility-testing/avl-scenius/>. Online; accessed: 08.07.2023.
- [15] A.-E. Taha and N. AbuAli, "Route planning considerations for autonomous vehicles," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 78–84, 2018.
- [16] C. Ackermann, R. Isermann, S. Min, and C. Kim, "Design of a decision maker for an evasive or braking maneuver for collision avoidance," in *14. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil-und Motorentechnik*. Springer, 2014, pp. 401–415.