

Arama Metotları Kullanılarak AEB Senaryolarına Yönelik Parametrizasyon Tabanlı Senaryo Üretimi ve Analizi

Parameterization Based Scenario Generation and Analysis for AEB Scenarios by using Search Methods

Namik Zengin¹, Oğuzhan Derebaşı¹, Bekir Öztürk¹, Harun Kutucu¹, Serdar Kinay¹

¹AVL Research and Engineering
Istanbul, Turkey

{namik.zengin,oguzhan.derebasi,bekir.ozturk,harun.kutucu,serdar.kinay}@avl.com

Özetçe

Otomatikleştirilmiş Sürüş Sistemleri (ADS), güvenlik ve konfor açısından otomobil sürücülerine sundukları avantajlar sayesinde hızla gelişmektedir. Bununla birlikte araçların otomoni seviyesi artmakta ve buna bağlı olarak da ADS'lerin emniyetli bir şekilde piyasaya sürülmesi ve kullanılması için gerekli olan sistem tasarımı ve test eforu hızla büyümektedir. Bu fonksiyonların test edilmesi, senaryo tabanlı bir yaklaşım ile daha efektif ve maliyeti düşük bir şekilde gerçekleştirilebilir. Mümkün olan tüm parametre kombinasyonlarının senaryo havuzuna dahil edilmesi yerine, bir takım parametrizasyon metotları kullanılarak sistemin çalışacağı kritik bölgeler belirlenebilir. Bu çalışmada, Otomatik Acil Fren (AEB) fonksiyonu için bazı senaryolar seçilip minimum boylamsal mesafe (MBM) metriği kullanılarak somut senaryolar aracın güvenliği bazında değerlendirilmiştir. Somut senaryo havuzu farklı parametrizasyon metotları ile oluşturulup, tüm kombinasyonları içeren senaryo havuzu ile senaryolara ait farklı parametrelerin olasılıksal yoğunluk dağılımının yakınlığı ve tüm ikili kombinasyonları içermeye oranı bazında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, uygulanan metotların çarpışmaya yakınlık açısından tüm senaryo havuzuna göre daha kritik senaryoların türetilmesini sağladığını ve böylece koşulması gereken senaryo sayısında başarılı bir düşüşe ulaştığını göstermektedir.

Abstract

Automated Driving Systems (ADS), have been rapidly advancing owing to the benefits they offer to drivers in terms of safety and comfort. Alongside this development, the autonomy level of such functions also increase, leading to a much bigger required system design, testing and validation effort for ADS homologation processes. This process can be done in a more cost-effective way by utilizing a scenario-based testing approach. Instead of validating a scenario pool which consists of the entire parameter combination space, one can utilize parametrization methods and discover the critical regions more effectively. In this work, the minimum longitudinal distance metric is utilized in order to evaluate concrete scenarios in terms

of vehicle safety for selected Autonomous Emergency Braking (AEB) scenarios. Concrete scenario pools are created with different parametrization methods and compared with the full factorial concrete scenario pool while investigating the difference between probability density function of numerous scenario parameters for each method as well as the coverage of all two-way combinations. The results show that the applied methods are more inclined to create critical scenarios compared to the full factorial method in terms of being close to a crash scenario while successfully reducing the necessary amount of concrete scenarios to test for validation.

1. Giriş

ADS, tüm dinamik sürüş görevlerinin sürdürülebilir şekilde yapılabildiği donanım ve yazılım yeteneklerine sahip sistemlere verilen isimdir. Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin (SAE) sürüş otomasyon sistemleri (DAS) taksonomisinde bu sistemler seviye 3, 4 ve 5'i temsil etmektedir [1]. ADS her ne kadar seviye 3 ve üzeri sınıfları temsil etse de, bu sistemler limitli operasyon tasarım alanlarında (ODD) çalışıyor olabilirler. Örneğin, seviye 4 bir sürüş sistemi sadece tasarlandığı ODD bölgesinde çalışabilir. ADS teknolojilerinin hızla gelişmesi, ileri seviye sürüş sistemlerinin araç kullanıcılarına daha güvenli ve konforlu sürüş sağlaması ile birlikte, bu sistemlerin tasarım ve validasyon sürecinde gereken efor da günden güne artmakta [2], ve özellikle daha yetenekli ve kapsamlı simülasyon araçları ile sanal validasyon platformlarına ihtiyaç duyulmaktadır [3]. İleri Sürüş Destek Sistemleri (ADAS) alanında, validasyon ve test aşamaları daha çok mesafe odaklı yaklaşımlarla yapılırken, seviye 3 ve üzeri sistemlerde, ADS'in tasarlanan tüm ODD koşullarında çalışması beklendiği için bu yaklaşım yüksek oranda zaman ve iş yükü gerektirmektedir. Örneğin, ODD olarak sadece otoyol için tasarlanan bir ADS fonksiyonunun yaklaşık 6.2 milyar kilometre test edilmesi gerekmektedir [4]. Bu alanda karşılaşılan zorluklara yönelik gelişmiş bir yaklaşımın bulunmamasına PEGASUS çalışma grubu cevap vermiş ve senaryo tabanlı test yaklaşımının ADS sistemlerinin test, verifikasyon ve validasyon süreçlerini iş yükü yönünden azaltacağı düşünülerek çalışmalar yapmıştır [5].

Senaryo tabanlı test yaklaşımlarının kullanılabilmesi için

ortak bir senaryo tanımı ve yapısına ihtiyaç duyulmaktadır [6]. ISO 21448 [7] standartında senaryo ve ilgili terimlerin tanımlamaları yapılmıştır. Buna ek olarak, senaryo ifadesi, sistemin konsept aşamasındaki üst seviye, soyut ile geliştirme aşamasındaki detaylı ve somut tanımlamaları içermelidir [8]. Buna bağlı olarak fonksiyonel, mantıksal ve somut olmak üzere üç ana soyutlama seviyesi, senaryoların temsilinde kullanılmaktadır [5]. Fonksiyonel senaryolar, genel taslakların doğal dilde ifadesi olarak belirlenirken, mantıksal senaryolar, durumların parametre alanlarıyla temsili için kullanılmaktadır. Öte yandan, somut senaryolar, testlerde ve değerlendirmelerde mantıksal senaryoların belirli örneklerinin kullanılması için sunulmaktadır. Mantıksal senaryolarda parametre uzayının tarifi gerçekleştirilirken, somut senaryolarda bu parametre uzayından belirli bir değer seçilmektedir. Fonksiyonel senaryolardan somut senaryolara geçilirken soyutlama seviyesi düşmektedir ve senaryoların sayısı artmaktadır [9].

Validasyon sürecinin senaryo mühendisliği ile yönetilmeye başlanmasıyla birlikte ortak bir senaryo standartına ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. ASAM OpenSCENARIO [10] formatı (OSC), mantıksal ve somut senaryoların tanımlanmasında kullanılmaktadır. Bu senaryolar, OSC sayesinde standart bir biçimde yazılmaktadır. Oluşturulan OSC dosyaları, farklı platformlar arasında senaryoların paylaşımını kolaylaştırmaktadır ve bu şekilde, sürüş simülasyonları ve otonom araç teknolojilerinde kullanılan senaryolar için ortak bir dil oluşturulmuş olmaktadır.

Her ne kadar senaryo mühendisliği yaklaşımıyla daha verimli test süreçlerine ulaşmak hedeflense de, senaryo sayısı arttıkça yine test süreçleri için önemli bir iş gücü ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı sistemin çalışacağı kritik bölgelerin belirlenmesi, test süreçlerinde bu bölgelerin önceliklendirilmesi ve buna bağlı olarak da test senaryolarının otomatik olarak oluşturulması daha yönetilebilir bir süreç sağlamaktadır [11]. Senaryo parametrisasyonu yöntemi, ADAS için gerçek dünya sürüş durumlarını kapsayan çeşitli parametreleri belirleyerek senaryoların tanımlanmasını içerir. Bu parametreler ODD katmanlarında [12] bulunan, yol geometrisi, trafik unsurları, hava koşulları, araç hızları ve diğer yol kullanıcılarının davranışı gibi faktörleri içerebilir. Dolayısıyla aracın ve çevre elemanlarının ilgili senaryodaki olası hareketleri belirlenerek, bu davranışları etkileyecek parametreler tanımlanır ve buna bağlı olarak test senaryo uzayı oluşturulur. Senaryo parametrisasyonu kullanılarak ADAS sistemlerinin farklı koşullar altında nasıl davrandığı sistematik bir şekilde keşfedilebilir ve daha az sayıda test senaryosu ile test edilebilir. Bu yaklaşım, ADAS fonksiyonlarının performansını ve güvenilirliğini değerlendirmeye, potansiyel sınır durumlarını ve uç senaryolarını belirlemeye ve nihayetinde sistemlerin güvenliğini ve güvenilirliğini artırmaya yardımcı olur. ADAS alanında senaryo parametrisasyonu konusunda çeşitli yöntemler ve teknikler üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Otonom araçlar için oluşturulan test senaryolarının temelinde kaynağı devlet veya bağımsız kuruluşlar tarafından yayımlanan regülasyonlar [13], pilot çalışmalar [14], gerçek yol testlerinden alınan veriler [15], senaryo katalogları [16] veya uzman bilgisi olabilir. Bunun yanı sıra, test senaryoları oluşturulurken yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları olasılıksal örnekleme, makine öğrenmesi tabanlı parametrisasyon, kombinatorial test [17] ve genetik algoritmalarıdır.

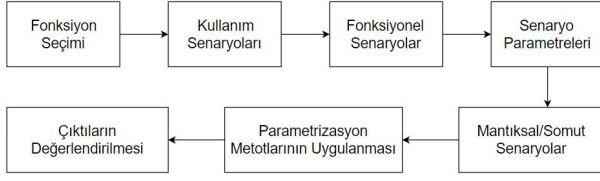
Senaryo tabanlı ADS tasarımı sürecinin bir sonraki aşaması olan validasyon süreci, bahsedilen yöntemler dahilinde senaryo parametrisasyonu sonucu elde edilen somut senaryo havuzu ile başlar. Senaryolara ait simülasyon çıktılarının doğru yorumlanması ve mümkün olduğunca objektif değerlendirilmesi AEB gibi hayati değere sahip olabilen bir ADAS fonksiyonunun etkinliğinin ve güvenilirliğinin göstergesi olacaktır. Bu bağlamda, kritiklik metrikleri (CM) ve baş performans göstergeleri (KPI), fonksiyonun ODD dahilinde gerçek trafik durumlarında güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için büyük öneme sahiptir. Kritiklik, bir trafik durumuna dahil olan aktörlerin toplam riski olarak tanımlanabilir [18]. CM'ler ise kritikliğin belirli yanlarının nicel olarak incelenmesidir ve uzaysal, zamansal, dinamik, çevresel gibi etkileyici faktörler ile ilişkilendirilebilirler [19]. KPI metriklere, zamansal CM'ler (örn., çarpışmaya kalan zaman (TTC), frenlemeye kalan zaman (TTB), reaksiyona kalan zaman (TTR)), uzaysal CM'ler (örn., minimum boylamsal mesafe, minimum yanal mesafe) ve dinamik CM'ler (örn., maksimum ivme talebi) şeklinde örnekler verilebilir. Bunlar içinden ivme talebi yolcu konforu ile alakalı olup, güvenlik açısından kritik olmayabilir. Fakat TTC veya minimum boylamsal mesafe (MBM) KPI'ları aracın kullanım anında bir kazaya ne kadar yaklaştığını belirttiği için AEB fonksiyonu özelinde güvenlik değerlendirmesi amacı için elverişlidir. Benzer bir şekilde, bir senaryo boyunca ADAS aracının başka bir obje ile çarpışıp çarpışmadığı bilgisi de basitçe senaryonun kritikliği hakkında fikir sahibi edebilir. Bu metrikler fonksiyonun validasyonu sırasında ağırlaştırma katsayıları ile çarpılıp birleştirilerek daha farklı trafik senaryoları ve ADAS fonksiyonları için kullanışlı hale getirilebilir [20].

Tüm bu bilgiler ışığında, bu çalışmada AEB fonksiyonu için kullanım senaryoları oluşturulmuş ve senaryo parametrisasyonu ile örnekleme yaklaşımları oluşturulan senaryo uzayında uygulanarak metotların tüm senaryo uzayındaki davranışı ne seviyede koruduğu MBM metriği kullanılarak incelenmiştir. Aynı zamanda senaryoları oluşturan giriş parametre değerlerinin de ne seviyede kapsandığı olasılık dağılım fonksiyonları (PDF) kullanılarak analiz edilmiştir.

Sonraki kısımlarda öncelikle problemin tanımlanması ile fonksiyon seçimi ve senaryoların üretilmesi süreçleri bölüm 2'de açıklanmıştır. Daha sonra bölüm 3'te parametrisasyon yaklaşımından bahsedilmiş ve detaylandırılmıştır. Son olarak bölüm 4'te çıktılar analiz edilip, yorumlanmış ve çalışma sonuçlarının ifade edildiği bölüm 5 ile sonlandırılmıştır.

2. Problemin Tanımlanması

Bu çalışmanın temel amacı seçilen fonksiyon için arama yöntemlerinin test senaryolarını otomatik oluşturma aşamasındaki davranışını incelemek ve buna bağlı olarak hangi koşullarda hangi yöntemi kullanmanın daha uygun olacağını analiz etmektir. Bu bölümde, çalışma sürecinde izlenen adımlar Şekil 1'de gösterilmiş ve ilgili kısımlarda neler yapıldığı anlatılmıştır. İlk olarak kritik senaryo havuzunun geniş olması da dikkate alınarak AEB fonksiyonu seçilmiş ve kullanım senaryoları oluşturulmuştur. Sonraki adımda kullanım senaryolarından fonksiyonel senaryolar türetilmiş ve belirlenen fonksiyonel senaryolar için parametre tanımlamaları yapılmıştır. Devamında AEB regülasyonu [21] referans alınarak parametre sınırları belirlen-

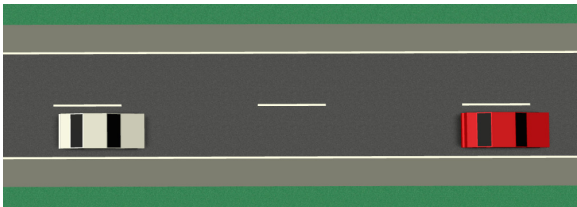


Şekil 1: Problemin blok diyagramı

miştir. Fonksiyonel senaryoların parametrelerinin tanımlanması ve sınırlarının belirlenmesi mantıksal senaryolara geçişi, aynı zamanda hangi örnekleme aralığı ile test senaryolarının oluşturulacağı da somut senaryolara dönüştürülme aşamasını oluşturmaktadır. Son aşamada, farklı parametrisasyon ve örnekleme algoritmaları uygulanmış ve tüm ve azaltılmış senaryo uzayındaki davranış kapsama seviyeleri MBM kullanılarak incelenmiştir. Bunun yanında önceki kısımda da belirtildiği gibi giriş parametrelerinin de hangi bölgelerde daha fazla kapsandığı da PDF ile analiz edilmiştir.

2.1. Fonksiyon Seçimi ve Senaryoların Üretilmesi

ADAS sistemlerinin temel amacı sürücü ve yolcuların konforunu arttırmak, bununla beraber sürücülerin trafik koşullarına daha iyi uyum sağlaması ve potansiyel tehlikelere karşı hızlı reaksiyon verebilmesini kolaylaştırmaktır [22]. Dolayısıyla bu çalışmada AEB, gerek ADAS'ın kritik bir ögesi olması gerek de aracın önündeki engelleri algılayarak çarpışma riskini azaltması gibi özelliklerinden dolayı metodun uygulanacağı fonksiyon olarak seçilmiş ve simülasyon çalışmalarında esmini yazılımı kullanılmıştır. esmini, OSC formatındaki senaryoları kinematik olarak çalıştırma yeteneğine sahip bir yapıya sahiptir [23]. Her ne kadar araçlardaki frenleme mekanizması kinematik bir modelle ifade edilemeyecek kadar karmaşık olsa da, çalışmada kullanılacak aracın frenleme profili esmini ortamına eklenerek ilgili frenleme karakteristiğine yaklaşımları amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan örnek bir senaryoda, iki araç aralarında belirli bir mesafe bulunacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra, öndeki araç hızını azaltmaya başlar ve buna bağlı olarak ego aracın tepkisi gözlemlenir. Test senaryoları oluşturulduktan sonra, senaryo parametreleri ve parametre sınırları üst fonksiyon olan Otomatik Şerit Takip Sistemleri (ALKS)'nin regülasyonuna [24] göre belirlenmiştir. Simülasyon için seçilen parametreler ve limitleri araç başlangıç hızı için $10 - 90 \text{ km/sa}$, hedef aracın yavaşlama ivmesi için $2 - 10 \text{ m/s}^2$ ve TTC için $0.6 - 1.6 \text{ s}$ aralığındadır. Örnek senaryo görseli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: AEB takip senaryosu

3. Parametrizasyon Metodunun Uygulanması

Parametrizasyon metodları mantıksal senaryolardaki parametrelerin alabileceği değer aralıkları kapsamında somut senaryolar oluşturmada kullanılmaktadır. Uygun olan parametrizasyon metodu temelde mantıksal senaryolar incelenerek kullanılan parametre tipine göre belirlenir ve bu parametreler zamana göre değişen ya da sabit olabilir. Ayrıca, bir aracın hareket modeli önceden tanımlanarak zamana bağlı değişken parametreleri sabit olarak kullanılabilir (örn. sabit hız modeli tanımlanan aracın başlangıç hızı). Bu şekilde, senaryodaki aktörlerin olası davranışları kısıtlanır. Diğer yandan, aktörlerin davranışları pozisyon yörüngesi ve hızlanma yörüngesi belirlenerek de tanımlanabilir. Aktörün sahip olduğu parametreleri yörünge ile ifade etmek keşif uzayını önemli ölçüde arttıracaktır ve optimizasyon algoritmaları veya pekiştirmeli öğrenme modellerinin kullanılması gibi farklı metotlara başvurulmasını zorunlu kılacaktır. Bu çalışmada AEB fonksiyonu için oluşturulan senaryolarda, önceden tanımlanmış sabit parametre modeli kullanılmıştır. Bu parametreler ana aracın başlangıç hızı (VIS), takip edilen aracın yavaşlama ivmesi (TDR) ve TTC olarak belirlenmiştir. Mantıksal senaryo içerisinde bu parametrelerin değer aralıkları daha önceden belirlenmiş ve parametre uzayından somut senaryolar oluşturmak için arama metodları kullanılmıştır. Bu arama metodları naif arama (naive search) ve kılavuzlu arama (guided search) olarak ikiye ayrılabilir. Naif arama için örnekleme (sampling) ve kombinatoriyal test (combinatorial testing) metodları, kılavuzlu arama için ise optimizasyon ve öğrenme tabanlı test metodları (learning-based testing) örnek verilebilir. Bu çalışmada naif arama sınıfında bulunan kombinatoriyal test metodu kullanılmıştır. Kombinatoriyal test metodu temelinde örtücü dizi (CA) mantığına dayanır. Bu mantığa göre tam sayı olan ve toplam parametre sayısını geçmeyecek bir kuvvet katsayısı belirlenir. Kuvvet katsayısına göre parametrelerin aralarındaki kombinasyonlar kapsanacak şekilde minimum sayıda test senaryosu oluşturulur. Örneğin kuvvet katsayısı 2 seçilirse parametrelerin kombinasyonları ikişerli olarak, 3 seçilirse her seferinde üçerli olarak değerlendirilir. Bir örtücü diziyi tanımlayacak olursak aşağıdaki gösterimde N üretilen toplam test senaryosu sayısını, t kuvvet katsayısını, k parametre sayısını ve v parametrelerin alabileceği değeri ifade etmektedir. Eğer parametreler aralarında farklı türden ve sayıda değerler içeriyorsa buna karışık seviyeli örtücü dizi (MCA) denir.

$$MCA(N; t, k, (v_1, \dots, v_k)) \quad (1)$$

Örtücü dizileri kullanarak optimal test senaryolar oluşturmak için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalarından bazıları AETG [25], deterministik yoğunluk algoritması (DDA) [26], çift kapsamlı bağımsız kombinatoriyal test (PICT) ve parametre içi sıralama (IPO) [27] gibi ağırlıklı algoritmalar (greedy algorithm). Ağırlıklı algoritmalar bir problemin çözümünde ileride doğacak sonuçları göz ardı ederek mevcut şartlar altında en iyi olan durumu seçer. Bu algoritmalar arasında AETG, rastgele, ağırlıklı ve her seferinde bir satır test üretme stratejisi kullanılır; DDA, örtücü dizileri her seferinde bir satırı ağırlıklı şekilde oluşturmak için parametrelere çiftlerinin üretilme yoğunluğunu kullanır; PICT, microsoft tarafından geliştirilen ağırlıklı, sezgisel ve AETG'den farklı olarak her seferinde deterministik

yaklaşım ile teker satır test üretir; IPO, parametreleri ikiyeşerli veya t-kapsamlı ($t = 1, 2, 3, \dots$) olacak şekilde tam kapsayabilmek için gerektiğinde satırlar ekleyerek örtücü diziyi sütun sütun üretir. IPO algoritması t-kapsamlı senaryolar üretmek için kullanılıyorsa IPOG (In-Parameter-Order-General) olarak isimlendirilir. Bu çalışmada IPOG'un farklı türden algoritmaları, PICT ve Monte Carlo algoritması kullanılarak test senaryoları üretilmiş ve parametrisasyon çıktıları ile kıyaslanmıştır.

Kombinatorial test yöntemi uygulayan metotlar, içerdikleri algoritmaya göre farklı sayılarda test üretebilirler. Gereken minimum test sayısını MCA stratejisinden yola çıkarak ve olasılıksal yöntem uygulayarak bir örnekle gösterilebilir. Denklem (1)'de gösterildiği üzere tüm senaryo uzayı $N * k$ kadardır. Parametreler aralarında t-kapsamlı olarak değerlendirildiğinde eğer aralarındaki eksik kombinasyon sayısı 1'in altındaysa o parametreler arası oluşabilecek kombinasyon çeşitleri kapsanmış olur. Üretilen testlerde eksik olan kombinasyonları ifade eden denklem, (2)'deki gibidir. EK , eksik kombinasyon sayısını; TK , tüm kombinasyonları ve EO ise bir testin eksik olma olasılığını ifade etmektedir.

$$EK = \{TK\} \{P(EO)\} \quad (2)$$

$$EK = \sum_{i=1}^k \binom{k}{t} v_i^t \left(1 - \frac{1}{v_i^t}\right)^N < 1 \quad (3)$$

Eğer denklem (3)'teki eşitsizlik N için çözülecek olursa elde edilen eşitsizlik (4)'teki gibi olacaktır. (4)'teki eşitsizlikte görüldüğü üzere k ne kadar büyük bir değer olursa olsun logaritması alındığı için tüm senaryo uzayına kıyasla daha az test üretilmesi yeterli olacaktır.

$$\log_k \leq N \leq v^t \log_k + \dots \quad (4)$$

Bu çalışmada uygulanan FIPOG algoritmaları parametreleri iki kapsamlı değerlendirerek testler oluşturmaktadır. Bu sebeple sonraki aşamalarda FIPOG-t2 olarak adlandırılmaktadır. FIPOG-F algoritması genelde minimum sayıda test sayısı üretmeye odaklanır fakat testleri oluşturması daha fazla zaman alır. FIPOG-F2 algoritması ise sonuçları daha hızlı vermeye odaklanır fakat minimum sayıda test üretme konusunda taviz verir. $\lambda 2$ uzantısı ise minimum test sayısının iki katı kadar test üretilmesi anlamına gelir.

4. Çıktıların Analiz Edilmesi

Kombinatorial test metotları belirlenen parametreler ve değerleri için uygulandıktan sonra bu aşamada çıktılar analiz edilmiştir. Şekil 3'te parametre değerlerinin algoritmalara göre üretilme karakteristiği yoğunluk grafiği üzerinden görülmektedir. Algoritmaların çıktılarını değerlendirirken Tablo 1'de görüleceği üzere üretilen test sayısı, tüm ikili kombinasyonları içerme oranı ve parametrelerin üretilen değerlerinin çekirdek yoğunluk tahminleri (KDE) hata metrikleri olarak kullanılmıştır. Grafikte $P1$ ile ifade edilen değer, TDR parametresinin ilgili algoritmadan elde edilen yoğunluk fonksiyonunun integrali ile tüm kombinasyonlardan elde edilen yoğunluk fonksiyonunun integralinden çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Aynı hesap $P2$ değerinde VIS parametresi için ve $P3$ değerinde TTC parametresi

için yapılmıştır. Alanların farkının düşük olması parametre değerlerinin tüm test uzayındaki orana yakın üretilmiş olduğu anlamına gelir. Ayrıca yoğunluk fonksiyonunda değişkenlik gösteren TTC değerinin üretilme karakteristiği ile kıyaslama yapabilmek için üretilen test uzayındaki değerlerin minimum ve maksimum yoğunluk oranları tabloda gösterilmiştir. Analiz yapılırken testlerdeki parametre değerlerinin üretilme karakteristiğine ve tüm kombinasyon uzayında bulunan değerlerin yoğunluğuna ne kadar yakınsadığı değerlendirilmiştir. Arama metotları uygulamaları her ne kadar hedef çıkış işaretlerinin ne ölçüde kapsandığına odaklansa da, bu sonuçlarla giriş işaretlerindeki benzer kapsama oranlarının çıkış işaretlerine aynı ölçüde yansımadığının gösterilmesi hedeflenmiştir.

Sonuçlar karşılaştırıldığında belirlenen başlangıç parametre sayısının üç olması ve fazla sayıda değer içermemesi dolayısıyla FIPOG algoritmalarının benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 1'e göre algoritmaları değerlendirirken üretilen test sayısı, $P1$ integral, $P2$ integral, $P3$ integral, TTC minimum yoğunluk ve TTC maksimum yoğunluk değerlerinin minimum düzeyde; tüm ikili kombinasyonları içerme oranının maksimum düzeyde olması beklenmektedir. Buna göre FIPOG-F-t2 algoritmasının daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

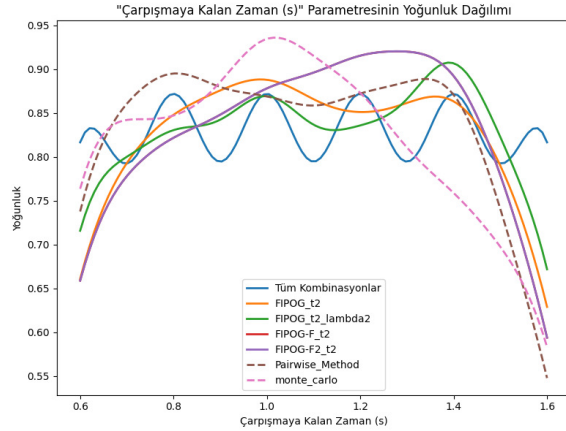
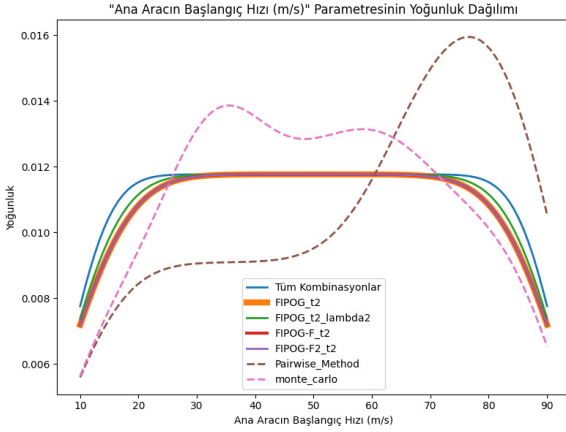
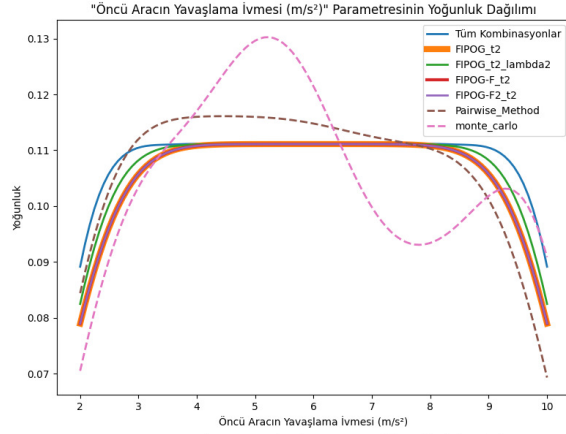
Diğer yandan Tablo 2'de test senaryoları simüle edildikten sonra oluşan MBM parametresine göre değerlendirme yapılmıştır. Bu tabloda MBM değerleri birer metre aralıklarla sütunlara yerleştirilmiştir. Bu skalaya göre araç teslerindeki kritik senaryolar MBM değerinin sıfıra yakınsadığı, dolayısıyla çarpışma olan senaryolardır. Tablonun sütunlarında ise tüm senaryo uzayının ve algoritmalarda üretilen uzayın MBM skalasına göre içerdiği test sayıları yüzdesel olarak ifade edilmiştir. Algoritmalara herhangi bir kısıtlama veya bilinçli arama dürtüsü verilmeden kritik senaryoları kapsamaya yönelik testler ürettikleri görülmektedir. Yine de kritik olarak tanımlanabilecek $0 - 2m$ bölgesi incelendiğinde yüzde 53.19 kapsama oranı ile tüm senaryo uzayına (yüzde 53.13) en yakın davranışı FIPOG-t2 yaklaşımı gösterirken yüzde 63.26 ile en iraksayan davranışı ise Pairwise yaklaşımı göstermiştir. Uygulanan arama metotlarının çıktıları tekrar giriş olarak algoritmaya beslenip, yöntemlerin performansı artırılabilir, bunun yanında tüm senaryo uzayındaki kritik bölgelere yoğunlaşan, diğer bölgeleri daha az seviyelerde kapsayan algoritma davranışı da elde edilebilir.

5. Sonuçlar

ADS teknolojilerinin genel amacı, araç kullanma sırasında meydana gelen çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak yolcuların sürüş boyunca güvenliğini sağlamaktır. Bu bağlamda aracın yolculara sağlaması gereken temel güvenlik ögesi, AEB fonksiyonunu kullanarak kritik durumlarda aracın frenlenmesinin sağlanması ve olası çarpışmaların önlenmesidir. AEB'nin beklenen performansı göstererek işlevini yerine getirmesi için sistemin çalışacağı ODD'nin sınırlarının net bir şekilde belirlenmesi ve senaryo tabanlı yaklaşım ile ODD'ye ait gerekli senaryo havuzunun oluşturulması gerekir. Senaryoların standartlarca belirlenmiş tanımlara uygun olarak üretilmesi ve endüstri genelinde geçerli formatlarda depolanması validasyon/verifikasyon sürecini şüphesiz hızlandıracaktır. Bu çalışmada AEB'ye ait senaryo havuzları regülasyonlar, standartlar ve endüstriyel bilgiler ışığında, gerçek bir AEB fonksiyonunun

Tablo 1: Metotların Hata Metriklerinin Değerlendirilmesi

	Üretilen Test Sayısı	Tüm İkili Kombinasyonları İçerme Oranı [%]	P1 integral	P2 integral	P3 integral	TTC Min. Yoğunluk	TTC Maks. Yoğunluk
FIPOG-t2	153	82.97	8.89e-06	1.30e-05	7.22e-06	-0.040	0.058
FIPOG-t2-λ2	306	82.97	6.32e-07	1.17e-06	3.56e-07	-0.027	0.046
FIPOG-F-t2	153	82.97	6.32e-07	1.17e-06	3.56e-07	-0.044	0.067
FIPOG-F2-t2	153	82.97	8.89e-06	1.30e-05	8.83e-06	-0.044	0.067
Pairwise-Method	198	82.97	5.65e-06	2.94e-05	4.29e-06	-0.43	0.068
Monte-Carlo	200	69.94	3.81e-06	1.65e-05	4.09e-06	-0.052	0.064



Şekil 3: Parametrelerin Uygulanan Metotlara göre Yoğunluk Dağılım Grafikleri

Tablo 2: MBM'ye göre Senaryoların Kapsanma Oranı

	0m-1m	1m-2m	2m-3m	3m-4m	4m-5m
Tüm Senaryo Uzayı	%25.74	%27.39	%31.02	%13.86	%1.98
FIPOG-t2	%29.79	%23.4	%31.91	%14.89	%0.0
FIPOG-t2-lambda2	%28.28	%26.26	%33.33	%12.12	%0.0
FIPOG-F-t2	%33.96	%24.53	%32.08	%9.43	%0.0
FIPOG-F2-t2	%31.25	%29.17	%29.17	%8.33	%2.08
Pairwise-Method	%26.53	%36.73	%22.45	%12.24	%2.04
Monte-Carlo	%27.59	%32.76	%34.48	%5.17	%0.0

homologasyon sürecinde kullanılabilecek bir biçimde oluşturulmuştur. Bunun devamında, fonksiyonel senaryolardan başlayıp somut senaryolara giden adımlarda FIPOG, Pairwise ve Monte-Carlo parametrisasyon metotları aracılığıyla, oluşturulan somut senaryo havuzu tüm parametre kombinasyonuna göre daha az sayıda ve test süreci daha az maliyetli olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda MBM gibi metriklerin ADS fonksiyonu değerlendirilmesi için kullanımı konusunda bir ön çalışma yapılmıştır.

Sonraki çalışmalarda, AEB fonksiyonunu da kapsayan, aracı şeridin içinde tutarken belirli bir hızı veya öndeki takip etmesini sağlayan, daha ileri otonomluk seviyesine sahip ALKS sistemine ait senaryolar incelenecektir. Senaryolar değerlendirilirken daha fazla sayıda KPI ve CM göz önünde bulundurulması ve bu çalışmada incelenen metotların yanı sıra, senaryoların kritiklik seviyesine göre geri beslemeli olarak optimize edilebilen makine öğrenme metotlarının uygulanması da planlanmaktadır.

6. Kaynakça

- [1] S. O.-R. A. V. S. Committee *et al.*, "Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles," *SAE International: Warrendale, PA, USA*, 2018.
- [2] S. Wagner, A. Knoll, K. Groh, T. Kühbeck, D. Watzenig, and L. Eckstein, "Virtual assessment of automated driving: Methodology, challenges, and lessons learned," *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, vol. 2, no. 12-02-04-0020, pp. 263–277, 2019.
- [3] D. Kibalama, P. Tulpule, and B.-S. Chen, "Av/adas safety-critical testing scenario generation from vehicle crash data," *SAE Technical Paper, Tech. Rep.*, 2022.
- [4] W. Wachenfeld and H. Winner, "Die freigabe des autonomen fahrens," *Autonomes Fahren: technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, pp. 439–464, 2015.

- [5] A. Audi and A. Volkswagen, "The pegasus method."
- [6] 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.
- [7] I. . 2019, "Road vehicles-safety of the intended functionality," *Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH*, 2019.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ASAM. Asam openscenario. <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>. Online; accessed: 01.10.2022.
- [11] H. Felbinger, F. Klück, Y. Li, M. Nica, J. Tao, F. Wotawa, and M. Zimmermann, "Comparing two systematic approaches for testing automated driving functions," in *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [12] M. Scholtes, L. Westhofen, L. R. Turner, K. Lotto, M. Schuldes, H. Weber, N. Wagener, C. Neurohr, M. H. Bollmann, F. Körte *et al.*, "6-layer model for a structured description and categorization of urban traffic and environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59 131–59 147, 2021.
- [13] A. Zlocki, A. König, J. Bock, H. Weber, H. Muslim, H. Nakamura, S. Watanabe, J. Antona-Makoshi, and S. Taniguchi, "Logical scenarios parameterization for automated vehicle safety assessment: Comparison of deceleration and cut-in scenarios from japanese and german highways," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26 817–26 829, 2022.
- [14] J. Hiller, S. Koskinen, R. Berta, N. Osman, B. Nagy, F. Bellotti, A. Rahman, E. Svanberg, H. Weber, E. H. Arnold *et al.*, "The l3pilot data management toolchain for a level 3 vehicle automation pilot," *Electronics*, vol. 9, no. 5, p. 809, 2020.
- [15] T. A. Dingus, S. G. Klauer, V. L. Neale, A. Petersen, S. E. Lee, J. Sudweeks, M. A. Perez, J. Hankey, D. Ramsey, S. Gupta *et al.*, "The 100-car naturalistic driving study, phase ii-results of the 100-car field experiment," United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety, Tech. Rep., 2006.
- [16] Y. Barnard, S. Innamaa, S. Koskinen, H. Gellerman, E. Svanberg, and H. Chen, "Methodology for field operational tests of automated vehicles," *Transportation research procedia*, vol. 14, pp. 2188–2196, 2016.
- [17] J. Tao, Y. Li, F. Wotawa, H. Felbinger, and M. Nica, "On the industrial application of combinatorial testing for autonomous driving functions," in *2019 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*. IEEE, 2019, pp. 234–240.
- [18] 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.
- [19] L. González, E. Martí, I. Calvo, A. Ruiz, and J. Pérez, "Towards risk estimation in automated vehicles using fuzzy logic," in *Computer Safety, Reliability, and Security: SAFECOMP 2018 Workshops, ASSURE, DECSoS, SASSUR, STRIVE, and WAISE, Västerås, Sweden, September 18, 2018, Proceedings 37*. Springer, 2018, pp. 278–289.
- [20] B. Huber, S. Herzog, C. Sippl, R. German, and A. Djanatliev, "Evaluation of virtual traffic situations for testing automated driving functions based on multidimensional criticality analysis," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, pp. 1–7.
- [21] U. R. No, "152 uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the advanced emergency braking system (aebs) for m1 and n1 vehicles," *Adendum 151*, 2020.
- [22] M. Lu, K. Wevers, and R. Van Der Heijden, "Technical feasibility of advanced driver assistance systems (adas) for road traffic safety," *Transportation Planning and Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 167–187, 2005.
- [23] E. Knabe *et al.*, "Environment simulator minimalistic (esmini)," *Accessed on*, vol. 20, 2021.
- [24] U. R. . No, "Automated lane keeping systems (alks)," *Nations Economic Commission for Europe: Geneva, Switzerland*, pp. 75–137, 2021.
- [25] D. M. Cohen, S. R. Dalal, M. L. Fredman, and G. C. Patton, "The aetg system: An approach to testing based on combinatorial design," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 437–444, 1997.
- [26] R. C. Bryce and C. J. Colbourn, "The density algorithm for pairwise interaction testing," *Software Testing, Verification and Reliability*, vol. 17, no. 3, pp. 159–182, 2007.
- [27] Y. Lei and K.-C. Tai, "In-parameter-order: A test generation strategy for pairwise testing," in *Proceedings Third IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium (Cat. No. 98EX231)*. IEEE, 1998, pp. 254–261.