



Seviye 3 ve Seviye 4 Otonom Araçlarda FMEA Yöntemi Kullanılarak Risk Öncelik Değerlendirmesi Yapılması

Elif Tuğba GÜNGÖR^{1*} Mustafa KURT²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 11/05/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Autonomous Vehicles,
Risk Analysis, Failure
Mode and Effects
Analysis (FMEA),
Autonomy Levels,
NHTSA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltilme: 11/05/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Araçlar, Risk
Analizi, Hata Türü ve
Etkileri Analizi
(FMEA), Otonomi
Seviyeleri,
NHTSA

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, Seviye 3 ve Seviye 4 otonom araçlara ilişkin kaza verilerini FMEA yöntemiyle analiz ederek risk önceliklerini belirlemektedir. NHTSA'ya ait 614 kaza raporu nitel analizle değerlendirilmiş; insan, çevre ve araç kaynaklı riskler sistematik olarak sınıflandırılmıştır. / This study analyzes accident data related to Level 3 and Level 4 autonomous vehicles using FMEA method to determine risk priorities. 614 accident reports belonging to NHTSA were evaluated with qualitative analysis; human, environmental and vehicle-related risks were systematically classified.

	L0	L1	L2	L3	L4	L5
	Otomasyon Yok	Sürücü Yardımı	Kısmi Otomasyon	Koşullu Otomasyon	Yüksek Otomasyon	Tam Otomasyon
SÜRÜCÜ	Tüm sürüşlerden sorumlu	Tüm sürüşleri yapmalı, ancak bazı durumlarda temel yardıma	Araç bazı temel sürüş görevlerini üstlenirse bile tamamen uyanık kalmalı	Kendi kendine sürüş sistemi devam etmediğinde belirli bir süre içinde devralmaya hazır olmalı	Kendi kendine sürüş sistemleri devam etmediğinde, önceden haber vermek şartıyla sürüşü devralabilecek bir yolcu olabilir	İnsan sürücüyü ihtiyaç duyduğunda L5 araçta herkes yolu olabilir
ARAÇ	Yalnızca sürücü girdilerine yanıt verir, ancak çevre hakkında uyarılar sağlayabilir	Otomatik acil frenleme veya şerh izleme desteği gibi temel yardımları sağlayabilir	Sınırlı durumlarda otomatik olarak yönlendirebilir, hızlandırabilir ve fren yapabilir	Belli koşullarda direksiyon, hızlanma ve frenleme üzerinde tam kontrol sahibi olabilir	Neredeyse her koşulda tüm sürüş görevlerini sürücünün dikkatine gerek duymadan üstlenebilir	Tüm sürüşlerden sorumlu olup, insan müdahalesine gerek kalmadan tüm ortamlarda çalışabilir

Şekil A:SAE otonomluk seviyeleri / Figure A: SAE autonomy levels

Önemli noktalar (Highlights)

- 614 NHTSA kaza raporunun analiz edilmesi. / Analysis of 614 NHTSA accident reports.
- FMEA yöntemiyle risk önceliklerinin hesaplanması. / Calculating risk priorities with the FMEA method.
- Açık, eksensel ve seçici kodlama yöntemlerinin uygulanması. / Application of open, axial and selective coding methods.
- Risklerin insan, çevre ve teknoloji boyutlarında sınıflandırılması. / Classification of risks in terms of human, environmental and technological dimensions.
- En yüksek riskin karşı sürücülerden kaynaklanması. / The highest risk comes from opposite drivers.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, Seviye 3 ve 4 otonom araç kazalarındaki risk faktörlerini FMEA yöntemiyle analiz ederek önceliklendirmektir. / The aim of this study is to prioritize the risk factors in Level 3 and 4 autonomous vehicle accidents by analyzing them using the FMEA method.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, ileri seviye otonom araçlara ait kaza verilerinin FMEA ile analiz edilerek çok katmanlı risk değerlendirme sunması yönüyle özgünlük taşımaktadır. / This study is original in that it presents a multi-layered risk assessment by analyzing accident data of advanced autonomous vehicles with FMEA.

Bulgular (Results): Çalışmada, en yüksek riskin karşı sürücülerden kaynaklandığı, en sık karşılaşılan sorunların insan faktörlü olduğu ve tespit edilebilirliğin genel olarak düşük seviyede kaldığı belirlenmiştir. / The study determined that the highest risk was caused by opposing drivers, the most common problems were human-related, and detectability remained generally low.

Sonuç (Conclusion): Çalışma sonucunda, otonom araçların güvenliğini artırmak için öncelikle tespit edilebilirliğin iyileştirilmesi ve insan faktörüne yönelik önlemlerin güçlendirilmesi gerektiği ortaya konmuştur. / As a result of the study, it was revealed that in order to increase the safety of autonomous vehicles, detectability should be improved and measures against human factors should be strengthened.



Seviye 3 ve Seviye 4 Otonom Araçlarda FMEA Yöntemi Kullanılarak Risk Öncelik Değerlendirmesi Yapılması

Elif Tuğba GÜNGÖR^{1*} ID Mustafa KURT² ID

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltilme: 11/05/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Araçlar, Risk Analizi, Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), Otonomi Seviyeleri, NHTSA

Öz

Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), gözlemlenen bir sistemde meydana gelme olasılığı bulunan hataların öngörülmesi, bu hataların potansiyel etkilerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak spesifik önleyici tedbirlerin geliştirilmesi amacıyla kullanılan sistematik bir analiz yöntemidir. FMEA sürecinde, olasılık (İ), şiddet düzeyi (Ş) ve tespit edilebilirlik (T) parametrelerine göre farklı değerlendirme kriterlerine sahip ölçekler oluşturulmakta; incelenmesi hedeflenen hata faktörlerinin her biri bu parametrik ölçeklere uygun değerlerle derecelendirilmektedir. Bu değerlerin çarpılması sonucunda, her bir hata faktörü için Risk Öncelik Değeri (RÖD) hesaplanmakta ve elde edilen RÖD değerlerine göre hata faktörleri, öncelik ve önem sıralamasına tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, Seviye 3 ve Seviye 4 otonom sürüş sistemlerine (ADS) sahip araçlara ilişkin A.B.D.'ye bağlı Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) tarafından kayıt altına alınmış toplam 614 kaza raporu dosyası kullanılmıştır. Bu rapor dosyalarındaki vakalar, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak incelenmiş ve risk analizi açısından anlamlı olan açık kodlama bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen açık kodlar, eksensel kodlama ve seçici kodlama yaklaşımlarıyla tekrar gözden geçirilmiş; bu süreçte FMEA analiz yöntemi kapsamında temel parametreler olan İhtimal (İ), Şiddet düzeyi (Ş) ve Tespit edilebilirlik (T) tahmini kodlamaları oluşturulmuştur. Son olarak, her bir vaka için elde edilen kodların istatistiksel dağılımları hesaplanmıştır. Yapılan nitel analiz sonucunda, kaza raporlarında yer alan risk faktörlerinin üç ana boyutta toplandığı belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, söz konusu üç ana boyut ve bu boyutlara ait alt boyutlardaki risk faktörlerinin ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir.

Risk Priority Assessment Using the FMEA Method in Level 3 and Level 4 Autonomous Vehicles

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 11/05/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Autonomous Vehicles, Risk Analysis, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Autonomy Levels, NHTSA

Abstract

The Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a systematic analysis method used to predict potential failures that may occur within an observed system, identify the potential effects of these failures, and develop specific preventive measures accordingly. During the FMEA process, scales with different evaluation criteria are created based on the parameters of probability (P), severity (S), and detectability (D). Each failure factor targeted for examination is rated according to these parametric scales with appropriate values. By multiplying these values, the Risk Priority Number (RPN) for each failure factor is calculated, and the failure factors are prioritized based on the obtained RPN values. In this study, a total of 614 accident report files recorded by the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) of the United States, involving vehicles equipped with Level 3 and Level 4 autonomous driving systems (ADS), were utilized. The cases in these report files were examined using a qualitative analysis approach, and open coding information deemed meaningful in terms of risk analysis was obtained. The obtained open codes were re-examined through axial coding and selective coding approaches; during this process, the basic parameters within the scope of the FMEA analysis method, namely Probability (P), Severity (S), and Detectability (D), were estimated and coded. Finally, the statistical distributions of the codes obtained for each case were calculated. As a result of the qualitative analysis, it was determined that the risk factors presented in the accident reports were grouped into three main dimensions. Within the scope of this study, a detailed analysis of these three main dimensions and the sub-dimensions of risk factors associated with them was conducted.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otonom araçlar, diğer bir deyişle sürücüsüz araçlar, insan müdahalesinin farklı seviyelerde (çok, orta, az, çok az, tamamen insansız) gerçekleştiği hareket kabiliyetine sahip sistemlerdir. Bu araçlar; radar, LİDAR, sonar, küresel konumlama sistemi (GPS), odyometre ve ataletsel ölçüm birimlerinden elde edilen verileri kullanarak çalışmaktadır. Sinyalizasyon verilerini işleyen bu sistem, çeşitli sensörlerden gelen verileri bir araya getirerek analiz eden ve aracı yönlendiren akıllı yazılımlara komuta eden bir elektronik bilgisayar ünitesine dayanmaktadır.

Otonom araçlar, ulaşım ve nakliye alanında yeni ufuklar açmakla birlikte, özellikle ulaşım altyapısında meydana gelecek yeniliklerle lojistik faaliyetlere önemli katkılar sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Modern şehirleşmenin vazgeçilmez bir unsuru olan akıllı taşımacılık ve ulaşım alanında güçlü bir kuvvet çarpanı olarak kabul edilen otonom araçların, yeterli altyapı ve yasal düzenlemeler yapılmaksızın kullanıma geçirilmesi durumunda ciddi güvenlik riskleri oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Bu bağlamda, otonom araçların sürüş sistemlerine ilişkin standartların belirlenmesinde, havacılık sektöründe uygulanan kurallara benzer, kapsamlı ve bağlayıcı düzenlemelerin yapılması gerektiği savunulmaktadır [1].

Otonom araçların seviyeleri, normal sürüş esnasında sürücünün müdahaleleri ile aracın bilgisayar destekli karar verme mekanizmasının gerçekleştirdiği otonom manevraların oranına göre belirlenmektedir. Sürücü müdahalesinin tamamen ortadan kaldırıldığı bir sürüş ortamında, aracın kontrolü tamamen bilgisayar sistemine bırakıldığında, bu sürüşe "tam otonom sürüş" denmektedir.

Yeterli ulaşım altyapısının oluşturulması, etkili yasal düzenlemelerin hayata geçirilmesi ve en önemlisi toplumsal algı ile bilinç düzeyinde farkındalık yaratılması sayesinde, otonom araçların ulaşım güvenliğini ve konforunu artıracakları öngörülmektedir. Bu bağlamda, çevre kirliliğini azaltarak ve trafik kazası riskini düşürerek daha sürdürülebilir ve yeşil bir toplumun oluşumuna katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir [2].

Bu makalede, ikinci bölümde otonom araçlar ve çalışmada kullanılan FMEA yöntemine ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmanın metodolojik yaklaşımı şematik olarak sunulmuş; dördüncü bölümde ise

FMEA yöntemi kullanılarak belirlenen kaza risk faktörleri ve bu analizlerden elde edilen bulgular ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Son olarak, beşinci bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçların analizi özetlenerek değerlendirmeler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Bu bölümde çalışmada kullanılan FMEA yöntemi ve otonom araç sürüş seviyeleri ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) (FMEA (Failure Mode and Effects Analysis))

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), ilk kez 9 Kasım 1949 tarihinde Amerikan ordusu tarafından, silah sistemlerinde meydana gelebilecek hataların nedenlerini ve bu hataların teçhizat, malzeme ve insan üzerindeki olası etkilerini incelemek amacıyla bilimsel bir karar destek mekanizması olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, potansiyel kaza veya kırımları öngörerek önleyici tedbirlerin alınmasına katkı sağlamıştır. Askerî uygulamalarda sağladığı etkinlik ile dikkat çeken FMEA, 1960-1965 yılları arasında NASA tarafından yürütülen Ay yolculuğu projelerinde de kullanılarak uzay araştırmalarında önemli bir rol oynamıştır.

Savunma, güvenlik ve uzay araştırmaları alanlarında yüksek verimliliği kanıtlanan FMEA, zamanla endüstriyel süreçlerde de uygulanmaya başlanmıştır. Özellikle 1970-1975 yılları arasında ABD uçak sanayinde, 1972 yılında Ford Motor üretim hattında ve 1975 yılında ABD'li bilgisayar üreticileri ile Japon NEC teknoloji firmasında etkin bir şekilde kullanılmıştır. 1988 yılında ise Chrysler, Ford ve General Motors tarafından genel bir standart olarak benimsenmiş ve günümüzde QS 9000, ISO/TS 16949, ISO 9001:2000 ve diğer kalite yönetim sistemlerinde zorunlu bir uygulama haline gelmiştir [3].

Günümüzde FMEA, otomotiv sektörü başta olmak üzere gıda, metal, deniz taşıtları imalatı, yazılım geliştirme ve nükleer tasarımlar gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu geniş uygulama yelpazesi, FMEA'nın süreç güvenliği ve risk yönetimi açısından sağladığı önemli katkılardan kaynaklanmaktadır.

2.2. Otonom Araç Sürüş Seviyeleri (Autonomous Vehicle Driving Levels)

Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE - Society of Automotive Engineers) tarafından tanımlanan ve dünya genelinde kabul gören altı otomasyon

seviyesi bulunmaktadır (L0'dan L5'e kadar). J3016 Araç Otomasyonu Esasları doğrultusunda yapılan bu sınıflandırma, sürüş esnasında araç ile sürücü arasındaki sorumluluk dağılımına göre belirlenmiştir [4].

Şekil 1'de gösterilen Seviye 0 (L0), herhangi bir otomasyon teknolojisine sahip olmayan araçları tanımlamaktadır. Bu seviyede, hızlanma, vites değiştirme ve direksiyon kontrolü gibi temel sürüş dinamikleri tamamen sürücü tarafından yönetilmektedir.

Seviye 1 (L1) araçlar ise otonom araç sistemlerine geçişte teknolojik serüvenin ilk adımını temsil etmektedir. Bu seviyedeki araçlar, şerit takip sistemi, fren asistanı ve hız sabitleyici gibi temel sürücü destek sistemlerini içermekte olup, sürücünün aktif kontrolünü kısmen desteklemektedir.

Seviye 2 (L2) araçlar, hızlanma, yavaşlama ve direksiyon kontrolü gibi temel sürüş fonksiyonlarını sürücü müdahalesi olmadan gerçekleştirebilen araçları ifade etmektedir. Ancak bu seviyedeki araçlarda, çevresel koşulların takibi hala sürücü tarafından yapılmaktadır.

Seviye 3 (L3) araçlar ise çevresel koşulları kısmen kontrol altına alabilmekte ve engeller karşısında

frenleme yapabilme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, yol engelleri veya olumsuz hava koşulları gibi durumlarda araç tepki veremediğinde sürücünün müdahalesi zorunlu hale gelmektedir.

Seviye 4 (L4) araçlar, otonom araç endüstrisinin ulaştığı en gelişmiş seviyelerden birini temsil etmektedir. Bu seviyede, sürüşün tüm aşamaları otonom sistem tarafından kontrol edilmektedir. Ancak, dış faktörlerden kaynaklanan (çevresel koşullar, diğer araçların hareketleri vb.) beklenmedik durumlarda sistemin tepki verme yeteneği henüz tam anlamıyla güvenilir değildir.

Seviye 5 (L5) araçlar ise otonom araç teknolojisinin nihai hedefi olarak kabul edilmektedir. Bu seviyedeki araçların, sürücü müdahalesi olmaksızın her türlü arazi, hava ve engel koşuluna uyum sağlayabilmesi amaçlanmakta ve bu doğrultuda geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Günümüzde, Seviye 5 otonom araçların henüz trafikte aktif olarak kullanılmaması ve Seviye 0-2 arası otonom araçların yaygın kullanımı nedeniyle bu seviyelere ilişkin literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu makale, daha yüksek otomasyon seviyelerini temsil eden Seviye 3 ve Seviye 4 otonom araç kazalarının risk değerlendirmesine odaklanmaktadır.

	L0	L1	L2	L3	L4	L5
	Otomasyon Yok	Sürücü Yardımı	Kısmi Otomasyon	Koşullu Otomasyon	Yüksek Otomasyon	Tam Otomasyon
SÜRÜCÜ	 Tüm sürüşlerden sorumlu	 Tüm sürüşleri yapmalı, ancak bazı durumlarda temel yardımla	 Araç bazı temel sürüş görevlerini üstlenebileceği, tamamen uyanık kalmalı	 Kendi kendine sürüş sistemi devam edemediğinde belirli bir süre içinde devralmaya hazır olmalı	 Kendi kendine sürüş sistemleri devam edemediğinde, önceden haber vermek şartıyla, sürüşü devralabilecek bir yolcu olabilir	 İnsan sürücüyü ihtiyaç yok-isteğe bağlı, direksiyon-L5 araçta herkes yolcu olabilir
ARAÇ	Yalnızca sürücü girdilerine yanıt verir, ancak çevre hakkında uyarılar sağlayabilir	Otomatik acil frenleme veya şerit izleme desteği gibi temel yardımları sağlayabilir	Sınırlı durumlarda otomatik olarak yönlendirebilir, hızlandırabilir ve fren yapabilir	Belli koşullarda direksiyon, hızlanma ve frenleme üzerinde tam kontrol sahibi olabilir	Neredeyse her koşulda tüm sürüş görevlerini sürücünün dikkatinde gerek duymadan üstlenebilir	Tüm sürüşlerden sorumlu olup, insan müdahalesine gerek kalmadan tüm ortamlarda çalışabilir

Şekil 1. SAE otonomluk seviyeleri [4] (SAE autonomy levels [4])

3. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

3.1. Materyal (Material)

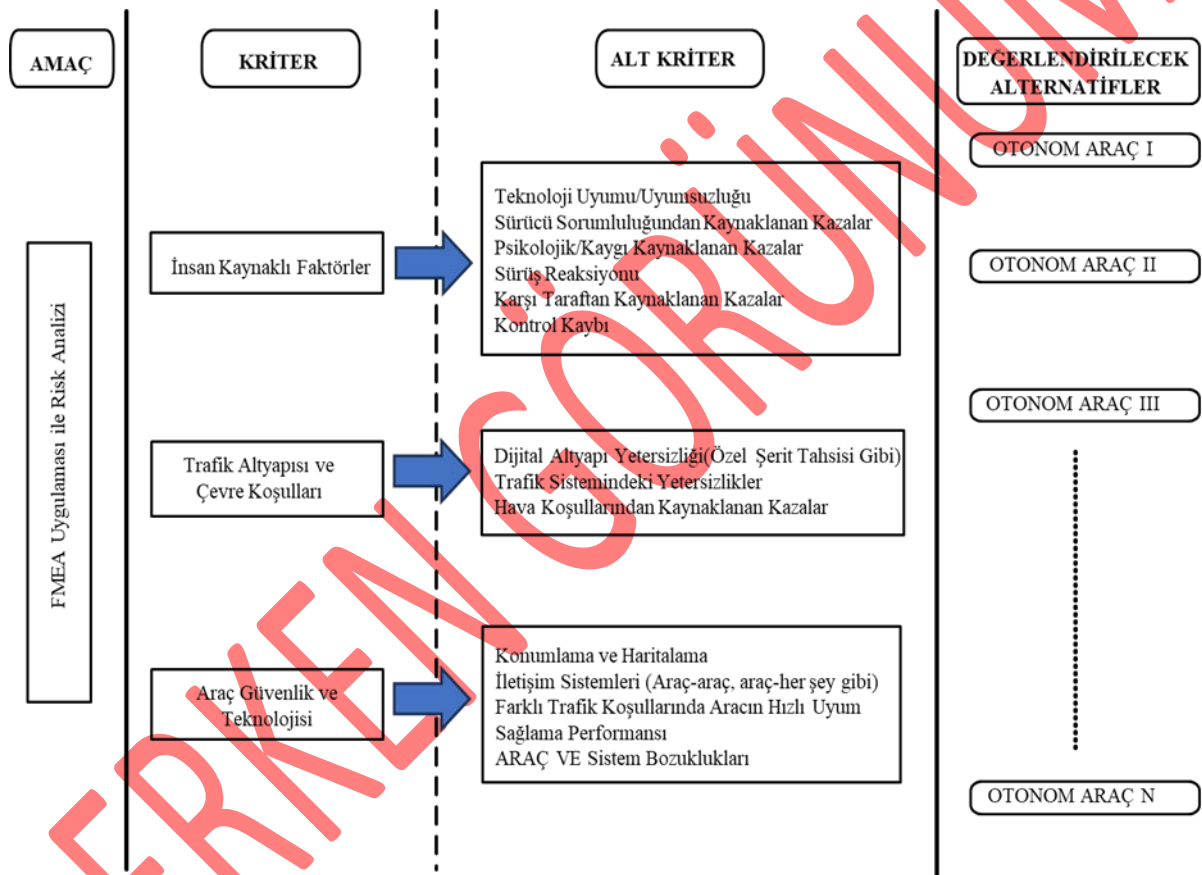
Bu çalışmada, A.B.D. Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi'ne (NHTSA) ait resmi web sitesi olan NHTSA adresinden (erişim tarihi: Şubat 2024) elde edilen ADS sistemi araçlarına ilişkin kaza raporu dosyası, FMEA analizinde kullanılmıştır.

Söz konusu dosyada kayıtlı bulunan 614 vaka, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak incelenmiş ve risk analizi açısından anlamlı olan açık kodlama bilgileri (risk faktörlerini ifade eden kavram ve kelime öbekleri) elde edilmiştir.

Bu açık kodlar daha sonra tekrar gözden geçirilerek sırasıyla eksensel kodlama ve seçici kodlama [5, 6] yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Bu süreçte, FMEA analiz yönteminin temel parametreleri olan İhtimal (İ), Şiddet düzeyi (Ş) ve Tespit edilebilirlik (T) tahmini kodlamaları oluşturulmuştur. Kodlama bilgileri elde edildikten sonra, her bir vaka için bu kodların istatistiksel dağılımları hesaplanmıştır.

3.2. Metod (Method)

Bu çalışma ile Seviye 3 ve Seviye 4 otonom sürüş sistemlerine etki eden risk faktörlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, risk faktörü olarak değerlendirilen kriterler ve alt kriterler tanımlanarak, kaza ve yaralanmalara yol açabilecek düzeydeki hataların tespit edilmesi amacıyla risk değerlendirmesi yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılacak metodolojiye ilişkin akış diyagramı ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. FMEA Uygulaması Akış Diyagramı (FMEA Application Flow Diagram)

4. FMEA ANALİZİ (FMEA ANALYSIS)

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), bir sistem, süreç veya ürün için olası hata durumlarını ve bu hataların potansiyel etkilerini tanımlayan bir risk yönetimi yöntemidir. Bu yöntemin temel amacı, olası hata durumlarını önceden belirlemek, bu hataların muhtemel etkilerini değerlendirmek ve gerçekleştirmelerini önlemeye yönelik gerekli önlemler için bilgi sağlamaktır.

FMEA, bir sistemin donanım ve bileşenlerinde meydana gelebilecek bir hatanın tüm sisteme etkilerini ve potansiyel tehlikelerini, risk öncelik sırasına göre derecelendiren bir yaklaşımdır. Diğer bir deyişle, bu yöntem, bir sistemin ana ve alt bileşenlerinin birbiriyle uyumunu ve bu bileşenlerde meydana gelebilecek arıza durumlarının sistem üzerindeki etkilerini analiz eder [7].

FMEA, meydana gelebilecek hatalara karşı önleyici tedbirlerin alınmasına olanak tanıyan etkili bir

yöntemdir. Benzer şekilde, sistem bileşen hatalarının son kullanıcıya olan etkilerini tüketici perspektifinden ele alarak değerlendirme yapar [8]. FMEA'nın temel adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Sistem veya Sürecin Tanımlanması:

Analiz edilecek sistemin, ürünün veya sürecin kapsamı belirlenmekte ve bu kapsam detaylı bir şekilde tanımlanmaktadır. Bu adımda, analiz sürecine yönelik sınırların ve ana bileşenlerin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Hata Olaylarının Belirlenmesi ve Etkilerin Değerlendirilmesi:

Bu aşamada, sistemde veya süreçte meydana gelebilecek potansiyel hata olayları tanımlanmakta ve bu hataların nasıl gerçekleşeceği detaylandırılmaktadır. Belirlenen her hata olayının olası etkileri sistematik bir biçimde değerlendirilmekte; bu değerlendirme kapsamında, etki düzeyi performans, güvenlik ve maliyet gibi ölçütler dikkate alınarak analiz edilmektedir.

Risk değerlendirme süreçlerinde kullanılan derecelendirme ölçekleri, genellikle risk faktörlerinin nitel ve nicel olarak sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla oluşturulmaktadır. Bu ölçeklerin hesaplanmasında, risk olasılığı, risk

şiddeti ve tespit edilebilirlik gibi temel bileşenler dikkate alınmaktadır. Derecelendirme ölçekleri çoğunlukla sayısal değerlerle ifade edilmekte olup, her bir bileşen için ayrı ayrı belirlenmektedir.

Özellikle FMEA yönteminde, risk olasılığı, risk şiddeti ve tespit edilebilirlik genellikle 1 ile 10 arasında derecelendirilmektedir [9]. Bu sayısal değerler; bir olayın meydana gelme olasılığı, gerçekleşmesi durumunda yaratacağı etkinin büyüklüğü ve hatanın tespit edilme olasılığına göre belirlenmektedir. Derecelendirme sürecinde, her bir kriterin tanımlayıcı özellikleri önceden belirlenmiş kategorilere ayrılmakta ve bu kategoriler saha deneyimleri, uzman görüşleri ve literatürde yer alan standartlar temel alınarak oluşturulmaktadır.

Sonuç olarak, derecelendirme ölçeklerinin hesaplanması, risk bileşenlerinin sayısal olarak ifade edilmesiyle sistematik bir yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, risklerin objektif olarak karşılaştırılması ve önceliklendirilmesi mümkün hale gelmektedir [9,10].

Risk olasılığı, risk şiddeti ve tespit edilebilirlik hesaplama ve değerlendirme işlemleri için kullanılan kriter değerleri, sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Bu tablolar, her bir kriterin değerlendirme ölçeklerini ve derecelendirme aralıklarını detaylı bir şekilde göstermektedir.

Tablo 1. FMEA analizi etki sınıflandırması (FMEA analysis impact classification)

Etki	Şiddetin Etkisi	Derece
Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata	8
Yüksek	Ekipmanı tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata	5

Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok Küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

Tablo 2. Hata olasılığı ve değerlendirme dereceleri (Error probability and evaluation levels)

Hata Olasılığı	Hata Kümülatif Sayısı	Derece
Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	1/2 ‘den fazla	10
	1/3	9
Yüksek: Tekrar Tekrar Hata	1/8	8
	1/20	7
Orta: Ara Sıra Olan Hata	1/80	6
	1/400	5
	1/2.000	4
Düşük: Nispeten Az Olan Hata	1/15.000	3
	1/150.000	2
Pek Az: Olası Olmayan Hata	1/1.500.000’den düşük	1

Tablo 3. Olası hatanın tespit edilebilirlik düzeyleri (Possible error detection levels)

Tespit Edilebilirlik	Potansiyel ve Takip Eden Hatanın Nedeninin Keşfedilebilirliği	Derece
Tespit Edilemez	Mümkün değil	10
Çok Az	Çok uzak	9
Az	Uzak	8
Çok Düşük	Düşük	7
Düşük	Çok düşük	6
Orta	Orta	5
Yüksek Ortalama	Yüksek ortalama	4
Yüksek	Yüksek	3

Çok Yüksek	Çok yüksek	2
Hemen Hemen Kesin	Kesinlikle tespit edilebilir	1

Risk Önceliklendirme:

Her bir hata olayının risk seviyesi değerlendirilerek, olası risklerin sıralanması yapılmaktadır. Risk seviyesi, üç ana faktöre dayanmaktadır: hata olayının gerçekleşme olasılığı (frekansı), bu hatanın etkisinin şiddeti (ciddiyeti) ve hata olayının tespit edilme zorluğu. Bu üç temel faktörün çarpımı, Risk Öncelik Değeri'ni (R.Ö.D.) oluşturmaktadır.

Matematiksel olarak, Risk Öncelik Değeri aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

$$R.Ö.D. = \text{İhtimal} \times \text{Şiddet} \times \text{Tespit Edilebilirlik}$$

Yukarıda, Tablo 1-3'te verilen kriter değerlerine göre hesaplanan risk önceliklendirme puanı, 1 ile 1000 arasında bir değer alabilmektedir. Bu puan aralığı, hata olayının olasılığı, şiddeti ve tespit edilebilirlik düzeylerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Risk önceliklendirme puanına bağlı olarak tanımlanan risk öncelik kategorileri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Risk öncelik değeri için kriter kararları (Criteria decisions for risk priority value)

Sıra	Risk Öncelik Değeri	Karar
1	01 -50 arası	Düşük Riskli
2	50 -100 arası	Orta Riskli
3	100 -200 arası	Yüksek Riskli
4	200 -1000 arası	Çok Yüksek Riskli

Önlemler ve İyileştirmeler:

Bu aşamada, risk öncelik puanı dikkate alınarak, her bir hata olayı için uygulanabilecek iyileştirme önerileri geliştirilir. Bu süreçte, uzman görüşleri ve süreç bilgisi kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, risk seviyesini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacıyla alınacak önlemler belirlenir.

Takip ve İzleme:

Alınan önlemlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla uygulama sonuçları düzenli olarak izlenir ve takip edilir. Bu izleme sürecinde, FMEA analizinin güncel verilerle yeniden yapılması, önerilen değişikliklerin etkisini görmek ve süreç iyileştirmelerini doğrulamak açısından önemli katkı sağlar. Bu sayede, risk yönetimi sürecinde sürekli iyileştirme sağlanmış olur.

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), özellikle üretim endüstrisi başta olmak üzere, hata olaylarının gerçekleşme olasılığı bulunan tüm süreçlerde uygulanabilir bir yöntemdir [10]. Literatürde,

otomotiv, havacılık, elektronik ve üretim sektörleri gibi birçok farklı endüstride FMEA uygulamalarına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu yöntemin temel amacı, olası hataların önceden belirlenmesi ve bu hataların etkilerinin en aza indirilmesiyle daha güvenilir ve verimli sistemler, süreçler veya ürünler oluşturmaktır.

FMEA analiz sürecinde, genellikle çalışma sistemindeki muhtemel hatalar tespit edilmekte; bu hataların nedenleri, risk düzeyleri ve potansiyel etkileri analiz edilerek ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, FMEA çalışmalarının ne zaman başlatılması gerektiğidir. FMEA'nın temel amacı, bilinen ve potansiyel sorunları müşteriye ulaşmadan önce belirlemek ve gerekli önlemleri almaktır. Bu nedenle, FMEA çalışmalarının mümkün olan en erken aşamada başlatılması büyük önem taşımaktadır.

FMEA analizinin başlatılabileceği bazı durumlar ve analizin sonlandırılma koşulları, Stamatis (2003) tarafından aşağıda belirtilmiştir [10,11]:

Çalışmanın başlatılabileceği durumlar:

- Yeni sistemler, tasarımlar, süreçler veya hizmetler oluşturulurken: Sistem, ürün veya süreç tasarımında yenilikçi yaklaşımlar geliştirildiğinde, olası hata türlerini ve etkilerini önceden belirlemek için FMEA çalışması yapılması gereklidir.

- Mevcut sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmet değiştirilirken: Halihazırda var olan bir yapıda yapılacak değişiklikler, risk profillerini etkileyebileceği için, bu değişikliklerin potansiyel hatalar açısından analiz edilmesi önemlidir.

- Mevcut koşullardaki sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmet için yeni uygulamalar geliştirildiğinde: Sistemin mevcut işleyişine eklenen yeni uygulamalar, olası risklerin yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

- Mevcut koşullardaki sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmetlerin iyileştirilmesine karar verildiğinde: İyileştirme çalışmaları kapsamında, mevcut yapıların risklerinin analiz edilmesi ve yeni düzenlemelerin potansiyel etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

FMEA analizinin sonlandırılabilceği belirli durumlar bulunmaktadır. Stamatis (2003) tarafından belirtilen bu koşullar aşağıdaki gibi sıralanmıştır [11]:

- Sistem FMEA: Tüm donanım ve tasarım unsurlarının kesin olarak belirlendiği ve karar verildiği noktada çalışma sonlandırılabilir.

- Tasarım FMEA: Üretim başlangıcının kesin tarihinin belirlenmiş olduğu durumda, tasarım sürecine yönelik FMEA çalışması tamamlanabilir.

- Süreç FMEA: Tüm süreçlerin kararlaştırıldığı, değerlendirildiği ve kritik ile önemli özelliklerin kontrol planlarına aktarıldığı noktada çalışma sonlandırılabilir.

- Hizmet FMEA: Sistem tasarımı ve kişisel görevlerin tanımlandığı, değerlendirildiği ve önemli özelliklerin kontrol planlarına aktarıldığı noktada hizmet FMEA süreci tamamlanabilir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

FMEA yöntemi ile gerçekleştirilen nitel analiz sonucunda, kaza raporlarına göre risk faktörlerinin üç ana boyutta (seçici kodlama) toplandığı belirlenmiştir. Bu kodlama kapsamında belirlenen ana boyutlar; insan kaynaklı faktörler, trafik altyapısı ve çevre koşullarına ilişkin faktörler ile araçların güvenlik ve teknolojik özelliklerinden kaynaklanan faktörlerdir.

Araştırmada, FMEA analiz metodolojisine geçilmeden önce, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak belirlenen risk faktörlerinin betimleyici analiz çerçevesinde genel istatistikleri sunulmuştur. FMEA analizine hazırlık niteliğinde değerlendirilen bu aşamada, özellikle otonom araçların kaza riski açısından genel bir durum değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 5. Otonom araçlarda kaza risk faktörleri (Accident risk factors in autonomous vehicles)

Kaza/Risk Faktörleri	Sayı	Yüzde
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar		
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	9	1,5
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	118	19,2
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	4	0,7
Sürüş reaksiyonu	42	6,8
<i>Karşı taraftan kaynaklanan kazalar</i>	<i>513</i>	<i>83,6</i>
Kontrol kaybı	13	2,1
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar		

Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsisi gibi)	1	0,2
Trafik sistemindeki yetersizlikler	5	0,8
<i>Hava koşullarından kaynaklanan kazalar</i>	<i>84</i>	<i>13,7</i>
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar		
Konumlama ve haritalama	0	0,0
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	13	2,1
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	10	1,6
<i>Araç ve sistem bozuklukları</i>	<i>63</i>	<i>10,3</i>
Toplam	614	*100,0

* 614 olayın tümü incelenmiştir.

Kaza tutanaklarında yapılan nitel analiz sonucunda, fiili olarak raporlanan risk faktörlerinin sıklık dağılımları Tablo 5'te sunulmuştur. Trafik kazalarının doğası gereği, her bir kaza için birden fazla risk faktörü etkili olabilmektedir. Bu durum, risk faktörlerinin ayrı ayrı yüzde frekanslarının toplamının %100'ün üzerinde olmasını doğal bir sonuç haline getirmektedir.

Risk faktör boyutlarından bağımsız olarak, karşı taraftan kaynaklanan risk faktörlerinin yüksek bir frekansa (%83,6) sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçların otomasyon sistemlerinin genel anlamda "güvenilebilir" olduğunu ve gelecekte bu sistemlerin daha da geliştirilerek yaygınlaşma potansiyeline sahip bulunduğunu göstermektedir.

Boyutlar ayrı ayrı incelendiğinde, en önemli risk faktörünün insan kaynaklı faktörler olduğu tespit edilmiştir. Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar ile araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar ise birbirine oldukça yakın bir frekans dağılımına sahiptir (%14-15). Bu sonuç, mevcut durumda otonom araçlarda güvenlik düzeyini artırmak için öncelikli olarak insan faktörü üzerinde çalışılması gerektiğini göstermektedir.

İnsan faktörü ele alınırken, otonom araçları "kullanan" sürücülerle birlikte, trafik sistemine

dahil olan diğer araç sürücülerini ve trafik alanını kullanan yayaların da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, güvenlik seviyesini artırmaya yönelik kapsamlı bir stratejinin temelini oluşturmaktadır.

Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar boyutunda, hava koşullarının en önemli risk faktörü olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, otonom araçların teknolojik olarak geliştirilmesi ve/veya trafik altyapısının otonom araçlara uyumlu hale getirilmesi sürecinde birinci öncelikli konunun, hava koşullarının otonom araçların trafik davranışları üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, yapılacak çalışmaların analiz bulgularına dayalı olarak yönlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar boyutunda ise en önemli risk faktörünün, araç ve sistem bozuklukları olduğu belirlenmiştir. Otonom araçların otomasyon sistemlerinin simülasyon ortamlarında detaylı bir şekilde test edildiği ve gerçek kullanım verilerinin Ar-Ge birimlerinde değerlendirildiği göz önüne alındığında, araç sistemlerinin daha kapsamlı bir yaklaşımla ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, otomasyon sistemlerinin sahadaki koşullarla uyumlu hale getirilmesi ve olası arıza senaryolarının daha geniş bir çerçevede değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6. Otonom araçlarda kazanın şiddet düzeyi (Accident severity level in autonomous vehicles)

Şiddet Düzeyi	Sayı	Yüzde
Araç/Araçlarda/Kazaya Dahil Olan Diğer Unsurlarda Meydana Gelen Sonuçların Şiddeti		
Çok düşük - 1	0	0,0
2	5	0,8
3	314,0	51,1
4	128,0	20,8
5	112,0	18,2
6	42,0	6,8
7	11,0	1,8
8	2,0	0,3
İnsan Sağlığında Meydana Gelen Sonuçların Şiddeti		
Çok düşük - 1	2,0	0,3
2	463,0	75,4
3	103,0	16,8
4	4,0	0,7
5	19,0	3,1
6	6,0	1,0
7	5,0	0,8
8	10,0	1,6
9	2,0	0,3
Toplam	614,0	100,0

FMEA analizinin önemli işlem adımlarından biri, meydana gelen kazaların şiddet düzeyinin değerlendirilmesidir. Bu çalışmada, otonom araçlarda meydana gelen kazaların şiddet düzeyi iki farklı bakış açısıyla ele alınmıştır. Birinci analizde, kazaya karışan araç veya diğer unsurlar açısından risk faktörünün şiddeti incelenmiştir; ikinci analizde ise kaza riskinin insan sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, trafik kazalarının doğasına uygun bir sınıflandırma

yapılması hedeflenmiştir. İlgili analiz sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

Araç ve diğer unsurlarda meydana gelen sonuçların şiddeti incelendiğinde, şiddet frekansının 3 ile 5 arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Tanımlanan şiddet skalasında, 5'in orta düzey şiddeti temsil ettiği dikkate alındığında, araçlarda meydana gelen sonuçların genel olarak düşük ile orta düzey arasında bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu

durum, otonom araç kazalarının çoğunlukla ciddi sonuçlar doğurmadığını ancak yine de belirli bir risk seviyesi taşıdığını göstermektedir.

İnsan sağlığı üzerinde meydana gelen sonuçların şiddeti incelendiğinde, şiddet frekansının 2 ile 3 arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçlarda meydana gelen kazaların insan sağlığı açısından düşük şiddetli bir risk faktörü oluşturduğunu göstermektedir.

Elde edilen veriler, otonom araçların şehir içi trafiğinde karşılaştıkları kazalardan elde edilmiştir. Bu bağlamda, aynı trafik koşullarında otonom olmayan araçlarla meydana gelen kazalar için de şiddet analizi yapılarak, otonom araçların trafik güvenliği ile karşılaştırılması mümkündür. Böylece, otonom araçların kullanım güvenilirliği hakkında veriye dayalı yorum yapma olanağı sağlanacaktır.

Tablo 7. Otonom araçlarda meydana gelen kazaların tespit edilebilirlik tahmini (Detectability estimation of accidents occurring in autonomous vehicles)

Kaza Nedeninin Önceden Tespit Edilebilirlik Düzeyi	Sayı	Yüzde
Kesinlikle tespit edilebilir -1	5	0,8
2	24	3,9
3	38	6,2
4	12	2,0
5	62	10,1
6	13	2,1
7	21	3,4
8	436	71,0
9	3	0,5
Toplam	614	100,0

Otonom araçlarda meydana gelen kazaların tespit edilebilirlik tahmini, Tablo 7'de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre, tespit edilebilirlik tahmini (potansiyel hatanın nedeninin ve sonucunda gerçekleşen kazanın tespiti) 8 olan kazaların oranı %71 olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçların karıştığı kazaların nedenlerinin önceden tespit edilebilme olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.

Kazalarda önceden tespit edilebilirliğin artırılması, hem kazaların önlenmesine yönelik tedbirlerin alınması hem de daha güvenilir bir sürüş ortamının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, otonom araçlarla ilgili kaza risklerinin

daha doğru analiz edilebilmesi için daha fazla ve farklı nitelikte verilerin toplanması gerekmektedir.

Sadece kaza verileri ile sınırlı kalmamak adına, uzman değerlendirmeleri, kullanıcı deneyimleri ve otonom araç teknik kontrol verilerinin analiz edilmesi, tespit edilebilirlik tahminini güçlendirecek ve daha güvenilir risk değerlendirmeleri yapılmasına olanak tanıyacaktır. Bu kapsamda, multidisipliner yaklaşımların entegrasyonu, tespit edilebilirlik düzeyini artırmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 8. Araç/araçlarda/kazaya dâhil olan diğer unsurlarda meydana gelen sonuçların risk öncelik analizi
(Risk priority analysis of the consequences of the vehicle/vehicles/other elements involved in the accident)

Kaza/Risk Faktörleri	İhtimal (İ)	Şiddet (S)	Tespit (T)	Risk öncelik değeri (RÖD)	Karar
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar					
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	6	4	4	96	Orta
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	8	4	4	128	Yüksek
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	6	4	4	96	Orta
Sürüş reaksiyonu	7	4	4	112	Yüksek
<i>Karşı taraftan kaynaklanan kazalar</i>	<i>10</i>	<i>4</i>	<i>7</i>	<i>280</i>	<i>Çok yüksek</i>
Kontrol kaybı	6	4	5	120	Yüksek
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar					
Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsis gibi)	4	4	8	128	Yüksek
Trafik sistemindeki yetersizlikler	7	4	6	168	Yüksek
Hava koşullarından kaynaklanan kazalar	8	4	6	192	Yüksek
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar					
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	6	4	6	144	Yüksek
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	6	4	4	96	Orta
Araç ve sistem bozuklukları	7	4	5	140	Yüksek

Otonom araçların karıştığı trafik kazalarına ilişkin bulgular analiz edilerek elde edilen FMEA risk öncelik analizi sonuçları, araç veya diğer unsurlar için Tablo 8'de sunulmuştur. Risk faktör boyutlarından bağımsız olarak, en yüksek kaza riskinin karşı taraftan kaynaklanan kazalarda olduğu belirlenmiştir. Bu durum, otonom araçların yaygınlaştırılması sürecinde, bu risk faktörünün kontrol altına alınmasının öncelik taşıdığını göstermektedir. Bu bağlamda, kazalara ilişkin tutanakların nitel araştırma yöntemleriyle analiz edilmesi ve karşı tarafın hangi davranışlarının kaza riskini artırdığına dair bulguların ortaya konması önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen bulguların, otonom araç teknolojileri geliştiren Ar-Ge laboratuvarları için girdi bilgisi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Risk faktörleri detaylı olarak incelendiğinde, insan kaynaklı faktörler boyutunda "teknoloji uyumu/uyumsuzluğu" ile "psikolojik/kaygı kaynaklı" risk faktörlerinin risk önceliğinin diğer faktörlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, günümüz toplumlarında yaygın olarak gözlemlenen teknolojiye hızlı uyum sürecinin, otonom araçlarda da benzer şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, otonom araç kullanıcılarının psikolojik kaygılarının kaza

nedenleri açısından belirgin bir risk taşımadığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, otonom araç kullanıcılarının geleneksel araç kullanıcılarına kıyasla daha fazla kaygı taşımadığı sonucuna varılabilir.

FMEA analizinden elde edilen bir diğer dikkat çekici bulgu, "Farklı trafik koşullarında aracın hızlı

uyum sağlama performansı" faktörünün risk önceliğinin düşük olmasıdır. Bu durum, otonom araçların değişen trafik koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlayarak güvenli sürüş sağlama yeteneği ile geliştirildiğini göstermektedir. Bu bulgu, otonom araçların trafik güvenliği açısından yüksek adaptasyon yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 9. İnsan sağlığında meydana gelen sonuçların risk öncelik değerlendirmesi (Risk priority assessment of human health consequences)

Kaza/Risk Faktörleri	İhtimal (İ)	Şiddet (Ş)	Tespit (T)	Risk öncelik değeri (RÖD)	Karar
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar					
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	6	3	4	72	Orta
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	8	2	4	64	Orta
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	6	2	4	48	Düşük
Sürüş reaksiyonu	7	3	4	84	Orta
<i>Karşı taraftan kaynaklanan kazalar</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>7</i>	<i>140</i>	<i>Yüksek</i>
Kontrol kaybı	6	3	5	90	Orta
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar					
Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsisi gibi)	4	2	8	64	Orta
Trafik sistemindeki yetersizlikler	7	3	6	126	Yüksek
Hava koşullarından kaynaklanan kazalar	8	2	6	96	Orta
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar					
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	6	3	6	108	Yüksek
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	6	3	4	72	Orta
Araç ve sistem bozuklukları	7	3	5	105	Yüksek

Otonom araçların karıştığı trafik kazalarına ilişkin bulgular analiz edilerek elde edilen FMEA risk öncelik analizi sonuçları, insan sağlığı üzerindeki

etkiler açısından Tablo 9'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, insan sağlığı açısından "çok yüksek" risk önceliğine sahip herhangi bir faktörün

bulunmaması, otonom araçların insan sağlığı bakımından "güvenilir" kabul edilebilecek bir sürüş sağladığını göstermektedir.

İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, karşı taraftan kaynaklanan kazalar faktörünün en yüksek FMEA risk öncelik değerine (140) sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, Tablo 4'te sunulan analiz sonuçları ile uyumlu olup, karşı taraftan kaynaklanan kazaların otonom araçlarda önemli bir risk unsuru olarak öne çıktığını doğrulamaktadır.

Ayrıca, trafik sistemindeki yetersizliklerin de insan sağlığı açısından önemli bir risk faktörü olduğu gözlemlenmiş ve bu bulgu, Tablo 4'te yer alan sonuçlarla tutarlılık göstermektedir. Bu durum, trafik altyapısının yetersizliğinin otonom araçların güvenli sürüş performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen bulgular ışığında, önlemler ve iyileştirme çalışmalarının birinci adımının, tespit edilebilirlik alanında atılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Otonom araçların güvenli sürüş performansını artırmak amacıyla, tespit edilebilirlik düzeyinin yükseltilmesi kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bunun yanı sıra, trafik altyapısının ve trafikte yer alan diğer unsurların otonom araçlarla uyumlu hale getirilmesi, kaza risklerinin azaltılması açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu uyumun sağlanması, otonom araçların yaygınlaşması sürecinde trafik güvenliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Takip ve izleme süreci açısından en önemli unsur, otonom araçlara ilişkin kullanım verilerinin elde edilmesidir. Mevcut durumda erişilebilir olan tek açık kaynaklı veri, kaza raporu tutanak bilgileridir. Ancak bu verilerin yetersizliği göz önüne alındığında, otonom araçların kullanımı ve gerçekleştirilen iyileştirme/geliştirme çalışmalarının sonuçları hakkında düzenli veri toplayan veri tabanlarının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Bu tür veri tabanları, hem güvenlik performansının izlenmesine olanak tanıyacak hem de gelecekte yapılacak iyileştirme çalışmalarına bilimsel bir temel oluşturacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Ford OTOSAN Mühendisleri, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Öğretim Görevlileri, Gaziantep Üniversitesi

Otomotiv Teknolojisi Bölümü Öğretim Görevlilerinin katkıları ile tamamlanmıştır. / This study was completed with the contributions of Ford OTOSAN Engineers, Gazi University Automotive Engineering Department Instructors, Gaziantep University Automotive Technology Department Instructors.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Elif Tuğba GÜNGÖR: Çalışma fikrinin oluşturulması, literatür taraması ve metodolojinin belirlenmesi işlemini gerçekleştirmiştir. Veri toplama, analiz süreçleri ve yorumlamalarını yürütmüş, makale taslağı yazımı ve son okuma süreçlerini tamamlamıştır.

She carried out the process of creating the study idea, literature review and determining the methodology. He/she carried out the data collection, analysis processes and interpretations, and completed the article draft writing and final reading processes.

Mustafa KURT: Tüm süreç boyunca bilimsel danışmanlık ve yönlendirmeleri sağlamıştır.

He provided scientific consultancy and guidance throughout the entire process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaur, K., & Rampersad, G. (2018). Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. *Journal of Engineering and Technology Management*, 48, 87-96.
- [2] Mordue, G., Yeung, A., & Wu, F. (2020). The looming challenges of regulating high level autonomous vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 174-187.

- [3] Durhan, D. (2006). Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [4] Akar, F., & Orman, K. (2020). Otonom kara araçlarındaki görüş sistemlerinin incelenmesi.
- [5] Moghaddam, A. (2006). Coding issues in grounded theory. The Qualitative Report, 16(1), 52-66.
- [6] MWilliams, M., & Moser, T. (2019). The art of coding and thematic exploration in qualitative research. International Journal of Qualitative Methods, 18, 1-12.
- [7] Dizdar, E. N., & Kurt, M. (1996). Olası iş kazaları için bir erken uyarı modeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(4), 525-532.
- [8] Baysal, M. E., Canıyılmaz, E., & Eren, T. (2002). Otomotiv yan sanayiinde hata türü ve etkileri analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- [9] McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. (2009). The basics of FMEA. CRC Press.
- [10] Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press.
- [11] Ö. Özkılıç, İş sağlığı ve güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri, Ankara: TİSK Yayınları, 2005.