T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ UNSURLARINDAN OTONOM ARAÇLARDA TRAFİK KAZA FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİNE İLİŞKİN BİR ARAŞTIRMA

Halil ÇEVİK

Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı

Akıllı Ulaşım Sistemleri Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ÖZKAN

Ağustos, 2022

İSTANBUL

Bu çalışma, 10.08.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı, Akıllı Ulaşım Sistemleri Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Erdem ÖZKAN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
İşletme Fakültesi

Doç. Dr. Erkan ÇELİK
İstanbul Üniversitesi
Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi

Doç. Dr. Muhammed Ali AYDIN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamdaki desteklerinden ötürü, çalışmanın planlanması, araştırılması ve yürütülmesinde yol gösterici olan tez danışmanım saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Erdem ÖZKAN'a teşekkür etmek istiyorum. İş disiplini, titizliği, çalışma etiği ile bana ilham olduğu ve akademik değerleri öğrettiği için kendisine ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, sadece bu çalışma sürecinde değil tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, cesaretlendiren çok değerli ve sevgili anneme, babama teşekkür ederim.

İstanbul Üniversitesi Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi öncülüğünde Bilgisayar, Elektrik Elektronik, İnşaat, Deniz Ulaştırma Mühendislikleri gibi birçok farklı bölüm ile ortak yürütülen ve ülkemiz için bir ilk niteliği taşıyan Akıllı Ulaşım Sistemleri Yüksek Lisans Programında okuduğum ve bu alanda bir tez çalışması ortaya koyduğum için sadece heyecanlı değil aynı zamanda da gururluyum. Programın oluşturulmasında emeği geçen herkese ve zengin bir müfredatın oluşturulmasını sağlayan tüm değerli hocalarımıza teşekkür ederim.

Ağustos 2022 Halil ÇEVİK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **6**
2.1 AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ 6
2.1.1 AUS'ye Genel Bakış 6
2.1.2 AUS'nin Tarihsel Gelişimi 7
2.1.3 Dünyada AUS Politikaları 8
2.1.4 Türkiye'de AUS Çalışmaları 11
2.1.5 AUS Uygulamalarında Kullanılan Teknolojiler 12
2.1.6 AUS'ye Duyulan İhtiyaç ve Literatürdeki Boşluk 14
2.2 OTONOM ARAÇLAR VE SÜRÜŞ GÜVENLİĞİ 15
2.2.1 Otonom Araçlar ve Tarihsel Gelişimi 15
2.2.2 Dünyada Otonom Araç Çalışmaları 17
2.2.3 Türkiye'de Otonom Araç Çalışmaları 18
2.2.4 Otonom Araç Teknolojileri 18
2.2.5 Otonom Sürüş Seviyeleri 20
2.2.6 Otonom Sürüş Güvenliği ve Olası Riskler 23
2.3 OTONOM ARAÇLARDA TRAFİK KAZALARI 25
2.3.1 Trafik Kazalarına Genel Bakış 25
2.3.2 İnsan Kontrollü Araçlarda Trafik Kazaları 30
2.3.3 Otonom Araçlarda Trafik Kazaları 31
2.3.4 Trafik Kazalarında Risk Faktörleri 32
2.3.5 Trafik Kaza Simülasyonları 34
2.3.6 Otonom Araç Kazalarının Hukuki ve Etik Boyutu 35

2.4 OTONOM ARAÇ KAZALARININ LİTERATÜRDEKİ MEVCUT DURUMU 36
3. MALZEME VE YÖNTEM.....44
3.1 ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI.....44
3.1.1 Araştırmanın Amacı 44
3.1.2 Araştırmanın Literatüre Katkısı.....44
3.2 ARAŞTIRMANIN TASARIMI.....45
3.2.1 Araştırma Yöntemi 45
3.2.2 Veri Toplama Yöntemi ve Süreci.....45
3.3 ARAŞTIRMANIN DEĞİŞKENLERİ 46
3.3.1 Çevresel Kaza Faktörleri 46
3.3.2 Araç Kaynaklı Kaza Faktörleri.....47
3.4 ARAŞTIRMANIN KISITLARI.....48
3.4.1 Veri Kısıtı 48
3.4.2 Kaynak Kısıtı.....49
3.5 ARAŞTIRMANIN VERİ TOPLAMA SÜRECİ 49
3.5.1 Otonom Araç Kaza Verisi 49
3.5.2 Çalışma Veri Setine İlişkin Tanımlayıcı İstatistikler 52
3.6 ARAŞTIRMADA KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ.....57
3.6.1 Analiz Yöntemlerinin Belirlenmesi.....57
3.6.2 Birliktelik Analizi ve Apriori Algoritması 58
3.6.3 Lojistik Regresyon Analizi.....62
3.6.4 Analiz Süreci 65
4. BULGULAR.....67
4.1 BİRLİKTELİK ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR 67
4.1.1 Apriori Modeli Parametreleri 67
4.1.2 Apriori Modelinden Elde Edilen Birliktelik Kuralları 72
4.1.3 Apriori Modelinin Genel Değerlendirmesi 78
4.2 LOJİSTİK REGRESYON ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR.....79
4.2.1 Lojistik Model Parametreleri.....79
4.2.2 Lojistik Modelin Sonuçları.....82
4.2.3 Lojistik Modelin Genel Değerlendirmesi 90
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 91
5.1 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....91
5.2 GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....94

KAYNAKLAR **96**
EKLER **108**
EK 1. Lojistik Model Parametre Tahminleri (Parameter Estimates) 108
ÖZGEÇMİŞ **117**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Akıllı Şehir Bileşenleri 4

Şekil 2.1: Araçların İnterneti Sınıflandırması 13

Şekil 3.1: Yıllara Göre Otonom Araç Kaza Sayısı 52

Şekil 3.2: Şehirlere Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 53

Şekil 3.3: İdari Bölümlere Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 54

Şekil 3.4: Araç Markasına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 55

Şekil 3.5: Araç Modeline Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 55

Şekil 3.6: Araç Model Yılına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 56

Şekil 3.7: Araç Üreticilerinin Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 56

Şekil 3.8: Kaza Zamanına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları 57

Şekil 3.9: Birliktelik Kuralı Madenciliği Sürecinin Akış Şeması 61

Şekil 3.10: Lojistik Eğri Grafiği (α=0 ve β=1) 64

Şekil 4.1: Önem Seviyelerine Göre Değişkenler 83

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1: AUS Temel Bileşenleri 2

Tablo 2.1: Sürüş Otomasyon Seviyeleri 21

Tablo 2.2: SAE J3016 Sürüş Otomasyon Seviyeleri 22

Tablo 2.3: Düşük Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri 26

Tablo 2.4: Alt-Orta Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri 26

Tablo 2.5: Üst-Orta Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri.....27

Tablo 2.6: Yüksek Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri 28

Tablo 2.7: Ülkelere Göre Trafik Kazası Ölüm Sayısı 29

Tablo 2.8: Haddon Matrisi.....33

Tablo 2.9: Literatürdeki Otonom Araç Çalışmaları.....37

Tablo 2.10: Literatürdeki Otonom Araç Kaza Faktörleri 41

Tablo 3.1: Değişken Olarak Belirlenen Çevresel Kaza Faktörleri 46

Tablo 3.2: Değişken Olarak Belirlenen Araç Kaynaklı Kaza Faktörleri.....47

Tablo 3.3: OL316 Formundaki Kaza Bilgileri 50

Tablo 3.4: İstatiksel Veri Analizinde Kullanılan Değişkenler.....53

Tablo 4.1: Apriori Model Parametrelerine Göre Analiz Senaryoları 68

Tablo 4.2: Analiz Dışı Değişkenler 69

Tablo 4.3: Analizde Kullanılan Değişkenler 70

Tablo 4.4: Analiz Sonucunda Elde Edilen Birliktelik Kuralları.....72

Tablo 4.5: Değişken Kodları, Frekans ve Yüzdelikler 80

Tablo 4.6: Model Uyum Bilgileri (Model Fitting Information) 84

Tablo 4.7: Model Uyum İyiliği (Goodness of Fit) 84

Tablo 4.8: R^2 Değerleri.....85

Tablo 4.9: Olabilirlik Oran Testleri (Likelihood Ratio Tests).....86

Tablo 4.10: İstatiksel Olarak Anlamlı Değişkenler 88

Tablo 4.11: Sınıflandırma Tablosu 89

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

α : Lojistik Kesme Parametresi
β : Eğim (Regresyon Katsayısı)
p : İlgili Sonucun Olasılığı
χ : Tahmin Edici

Kısaltmalar **Açıklama**

AI : Yapay Zeka
AUS : Akıllı Ulaşım Sistemleri
AV : Otonom Araç
BİT : Bilgi ve İletişim Teknojileri
B5G : 5G Ötesi
CA DMV : Kaliforniya Motorlu Araçlar Departmanı
CALTRANS : Kaliforniya Ulaştırma Bakanlığı
CEN : Avrupa Standardizasyon Komitesi
CENELEC : Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CITS : Kooperatif Akıllı Ulaşım Sistemleri
CNN : Evrişimli Sinir Ağları
CV : Bilgisayarla Görü
DDT : Dinamik Sürüş Görevi
DLR : Alman Havacılık ve Uzay Merkezi
DRIVE : Avrupa'da Araç Güvenliği için Özel Yol Altyapısı
DRL : Derin Pekiştirmeli Öğrenme
ERTICO : Avrupa Karayolu Taşımacılığı Telematik Uygulama Koordinasyonu
ESO : Avrupa Standardizasyon Kuruluşu
ETC : Elektrikli Geçiş Ücreti Düzeltmesi
GIS : Coğrafi Bilgi Sistem
GNSS : Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GSYİH : Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
HGS : Hızlı Geçiş Sistemi

IoT : Nesnelerin İnterneti
IoV : Araçların İnterneti
IRTE : Entegre Karayolu Taşımacılığı Ortamı
ISTEA : Verimlilik Üzerine Intermodal Yüzey Taşımacılığı Yasası
IVHS : Amerika Akıllı Araç Otoyol Topluluğu
LIDAR : Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini
MASIM : Çoklu Etmen Simülasyonu
NHTSA : Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
OECD : Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
OGS : Otomatik Geçiş Sistemi
PDA : Kişisel Dijital Asistan
PROMETHEUS: Verimlilik ve Eşi görülmemiş Güvenlik ile Avrupa Trafiği Programı
RNN : Yinelemeli Sinir Ağları
ROS : Robot İşletim Sistemi
RTA : Karayolu Trafik Kazası
RTI : Karayolu Taşımacılığı Telematiği
SAE : Otonomotiv Mühendisleri Topluluğu
SoS : Sistemler Sistemi
SUMO : Kentsel Hareketlilik Simülasyonu
TOPIS : Ulaştırma Operasyonu ve Bilgi Servisi
VICS : Araç Bilgi İletişim Sistemi
V2X : Araçtan Her Şeye
V2V : Araçtan Araca
V2I : Araçtan Altyapıya
V2P : Araçtan Yayaya
V2S : Araçtan Sensöre
WHO : Dünya Sağlık Örgütü
5G : Beşinci Nesil

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ UNSURLARINDAN OTONOM ARAÇLARDA TRAFİK KAZA FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİNE İLİŞKİN BİR ARAŞTIRMA

Halil ÇEVİK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ÖZKAN

Akıllı ulaşım sistemlerinin en kritik konularından biri olan otonom araçlar hızla gerçeğe dönüşmektedir. Otonom araç teknolojileri başta ulaşım profesyonelleri ve otomotiv endüstrisi olmak üzere tüm dünyanın ilgisini çekmektedir. Otomobil üreticileri, otonom araç teknolojileri konusunda büyük yatırımlar yapmakta ve otonom araç pazarı büyümektedir. Otomotiv endüstrisinde yaşanan otonom sürüş devrimi beraberinde kara yolu ulaşımında önemli değişiklikler ortaya çıkaracaktır. Otonom ve otonom olmayan araçların birlikte yer aldığı karma trafik sistemlerinin oluşturulması bir zorunluluk halini almıştır. Bu noktada öncellikle sürüş güvenliğinin sağlanması, sürücüler ve yayalar dahil tüm trafik unsurları için önem arz etmektedir. Trafik güvenliği ve verimliliği üzerinde olumlu bir etkisi olması beklenen otonom araçların, trafiğe entegrasyonunun kapsamlı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda otonom araçların trafikteki muhtemel riskleri değerlendirilmeli, kaza analizi yapılmalı ve otonom araçlar gerçek hayat senaryolarına hazırlanmalıdır. Buradan hareketle otonom araçların karıştığı trafik kazalarını incelemek ve bu konudaki literatür boşluğunu doldurmak çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmuştur. Bu çalışma, otonom araç kazalarına neden olan trafik kaza faktörlerini belirlemiştir ve bu faktörler arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Çalışmanın amacı, otonom araç kazalarının daha iyi anlaşılması için sonuçlar çıkarmak ve otonom araçların trafiğe entegrasyon sürecine katkıda bulunmaktır. Araştırma verisi, 2019'dan 2022'ye kadar otonom araç trafik kaza raporlarından oluşmaktadır. Trafik kaza

faktörlerindeki ana örüntüleri çıkarmak için apriori algoritması kullanılmıştır. Apriori modelinden elde edilen bulgulara göre, bir otonom araç kazasında en fazla birlikte bulunan kaza faktörleri sırasıyla; araç hasarının az olması, yol yüzeyinin kuru olması, havanın açık olması ve kazanın gün ışığında gerçekleşmesi olmuştur. Birliktelik kuralları elde edildikten sonra, araç hasarının değişmesinde etkili trafik kaza faktörlerini önem seviyelerine göre sıralamak için multinominal lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır. Lojistik modelden elde edilen bulgulara göre, kazaya dahil olan yol kullanıcısı, otonom aracın kaza öncesi hareketi ve çarpışma türü araç hasarının artmasını en fazla etkileyen kaza faktörleri olmuştur. Bu iki analiz sonucunda elde edilen bulgular otonom araç kazalarında araç hasarının değişmesinde etkili önemli trafik kaza faktörlerini göstermiştir.

Ağustos 2022, 133 sayfa.

Anahtar kelimeler: otonom araçlar, trafik kaza faktörleri, akıllı ulaşım sistemleri, birliktelik analizi, multinominal lojistik regresyon

SUMMARY

M.Sc. THESIS

A RESEARCH ON THE DETERMINATION OF TRAFFIC ACCIDENT FACTORS IN AUTONOMOUS VEHICLES WITHIN THE SCOPE OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Halil ÇEVİK

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Intelligent Transport Systems

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Erdem ÖZKAN

Autonomous vehicles, one of the most critical subjects of intelligent transportation systems, are rapidly becoming reality. Autonomous vehicle technologies attract the attention of the whole world, especially transport professionals and the automotive industry. Automakers are investing substantially in autonomous vehicle technologies and the autonomous vehicle market is expanding. The autonomous driving revolution in the automotive industry will bring about significant changes in road transportation. The development of mixed traffic systems, in which autonomous and non-autonomous vehicles are included together, has become a necessity. At this point, ensuring driving safety is essential for all traffic elements, including drivers and pedestrians. The integration of autonomous vehicles into traffic, which is expected to have a positive impact on traffic safety and efficiency, needs to be addressed comprehensively. In this context, possible risks of autonomous vehicles in traffic should be evaluated, accident analysis should be performed and autonomous vehicles should be prepared for real-life scenarios. From this point of view, examining traffic accidents involving autonomous vehicles and filling the literature gap on this subject constituted the main motivation of the study. This study determined the traffic accident factors that cause autonomous vehicle accidents and revealed the relationship between these factors. The aim of the study is to draw conclusions for a better understanding of autonomous vehicle accidents and to contribute to the integration process of

autonomous vehicles into traffic. The research data consists of autonomous vehicle traffic accident reports from 2019 to 2022. The apriori algorithm was used to extract the main patterns in traffic accident factors. According to the findings obtained from the Apriori model, the most common accident factors in an autonomous vehicle accident are respectively; minor vehicle damage, dry road surface, clear weather, and daylight. After the association rules were obtained, the multinomial logistic regression method was used to rank the traffic accident factors effective in changing vehicle damage according to their importance levels. According to the findings obtained from the logistic model, the road user involved in the accident, the movement of the autonomous vehicle before the accident and the type of collision were the accident factors that most affected the increase in vehicle damage. The findings obtained as a result of these two analyses indicated the important traffic accident factors that are effective in changing vehicle damage in autonomous vehicle accidents.

August 2022, 133 pages.

Keywords: autonomous vehicles, traffic accident factors, intelligent transportation systems, association analysis, multinomial logistic regression

1. GİRİŞ

Bir şehrin akıllı olabileceği fikri, 20. yüzyılın büyük bir bölümünde dahi bilim kurgudan ibaretti (Batty ve diğ., 2012). Bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla yayılması, daha önce hiç deneyimlenmemiş bir kentsel ortam yaratarak akıllı şehirler kavramını gerçeğe dönüştürmüştür (Batty ve diğ., 2012). Şehirler; insanlara, binalara, ulaşım sistemlerine hizmet etme gibi günlük işlevlerinin yanı sıra şehrin izlenmesi, analiz edilmesi ve planlanması açısından da akıllı hale gelmiştir (Batty ve diğ., 2012). Akıllı bir şehir inşa etmek için öncelikle akıllı şehri oluşturan unsurların tespit edilmesi gerekmektedir. Ardından, bu faktörlere göre stratejik bir plan oluşturulmalıdır. Şekil 1.1, akıllı şehir performans göstergelerini (Giffinger ve diğ., 2007) belirtmektedir. Akıllı şehrin özellikleri ve bu özellikleri etkileyen faktörler detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Bu özellikler; akıllı ekonomi, akıllı insan, akıllı yönetim, akıllı mobilite, akıllı çevre ve akıllı yaşam olmak üzere 6 grupta incelenmektedir (Giffinger ve diğ., 2007).

Akıllı şehir unsurlarından biri olan Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bu yeni kentsel ekosistemin temel bileşenlerinden biridir. Bu akıllı şehir inşa sürecinde ulaşım altyapısının ve ulaşım unsurlarının geliştirilmesi ve akıllı şehir ekosistemine adapte edilmesi gerekmektedir. Temel AUS bileşenleri (Zhang ve diğ., 2011), Tablo 1.1'de gösterilmektedir. Akıllı ulaşım sistemlerine yönelik yatırımlar birçok şehirde akıllı şehir girişiminin bir parçasıdır (Chen ve diğ., 2017). Akıllı şehir etiketinin odak noktası ve tanımı farklıdır, ancak bunun merkezinde yaşam kalitesini iyileştirmek için teknolojinin kullanılması vardır (Chen ve diğ., 2017). Akıllı mobilite kapsamında AUS, doğal olarak ulaşım sektörünün ve akıllı şehirlerin önemli bir parçası haline gelmiştir (Chen ve diğ., 2017). Şehirler, sınırlı kaynaklarla yeterli ulaşım hizmetleri sağlamada zorluklarla karşı karşıyadır (Chen ve diğ., 2017). Gelişmekte olan ülkelerdeki zayıf altyapıya, zayıf finansal kaynaklara ve düşük kurumsal ve teknik yeteneklere sahip şehirler bile tutarlı bir yol ağı ve temel trafik yönetimi gerektirir (Chen ve diğ., 2017). Bu nedenle, dünya çapında AUS'ye yapılan yatırımlar artmaktadır (Chen ve diğ., 2017). AUS, Bilgi ve İletişim Teknolojisinden (BİT) yararlanarak yalnızca ulaşım hizmetlerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda mevcut ulaşım altyapısının daha verimli kullanılmasını sağlayarak sıkışıklığı, kazaları ve hava kirliliğini de azaltır (Chen ve diğ., 2017).

BİT'nin hızlı gelişimi ile akıllı şehirler kavramı popüler hale gelmiştir (Chen ve diğ., 2017). Birçok şehir daha kapsamlı bir yaklaşım benimsemeye başlamış ve bu teknolojileri akıllı şehir girişimleri adına kentsel hizmetleri iyileştirmek için kullanmaktadır (Chen ve diğ., 2017).

Tablo 1.1: AUS Temel Bileşenleri

1. Gelişmiş Ulaşım Yönetim Sistemleri
2. Gelişmiş Gezgin Bilgi Sistemleri
3. Gelişmiş Araç Kontrol Sistemleri
4. İş Aracı Yönetimi
5. Gelişmiş Toplu Taşıma Sistemleri
6. Gelişmiş Kentsel Ulaşım Sistemleri

AUS, dünya çapında ulaşım profesyonellerinin, otomotiv endüstrisinin ve politika yapıcıların dikkatini çeken küresel bir olgudur (Figueiredo ve diğ., 2001). AUS, trafik sıkışıklığı, güvenlik, ulaşım verimliliği ve çevre koruma gibi ulaşım sorunlarını çözmek için ileri teknolojileri uygulamaktadır (Figueiredo ve diğ., 2001). Sürdürülebilir ve akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi, mevcut altyapının daha iyi kullanılmasını ve en son teknolojilerin entegrasyonunu gerektirir (Juan Antonio Guerrero Ibáñez ve Contreras-Castillo, 2015). Bu ileri teknolojiler bilgi yayma, trafik akışı yönetimi ve ulaşım ağı yönetimi için kullanılmaktadır (Juan Antonio Guerrero Ibáñez ve Contreras-Castillo, 2015). Bu sistemlerin birçoğu doğası gereği kapalıdır, ancak trafik hacmindeki son artış, daha iyi bir seyahat deneyimi sağlamak için birbirleriyle iletişim kurmak için birlikte çalışan sistemleri gerektirmektedir (Juan Antonio Guerrero Ibáñez ve Contreras-Castillo, 2015).

AUS, karayolu trafik yönetimi, toplu taşıma sistemi yönetimi ve sürücüsüz arabalar gibi çeşitli hizmet ve uygulamalar içermektedir (Yuan ve diğ., 2022). AUS hizmetleri sayesinde yol ve trafik güvenliği, ulaşım ve toplu taşıma verimliliği artırılmış, enerji verimliliği artırılmış ve çevre kirliliği azaltılmıştır (Yuan ve diğ., 2022). AUS uygulamaları, kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle ivme kazanmakla birlikte, üretilen büyük miktarda veri nedeniyle çeşitli sorunlara da neden olmaktadır (Yuan ve diğ., 2022). Bu bağlamda AUS uygulamalarında makine öğrenmesi teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Büyük veri kümelerinde kalıpları çıkarmak için özellikle derin ve pekiştirmeli öğrenme gibi makine öğrenmesi yaklaşımları tercih edilmektedir (Yuan ve diğ., 2022). Bu yaklaşımlar, araç siber güvenliği, tahmin ve doğru karar verme uygulamalarında kullanılmaktadır. AUS uygulamaları için makine öğrenmesini kullanan çalışmaların sayısı artmaktadır (Yuan ve diğ., 2022).

Akıllı araçlar için otomasyon seviyeleri, insan güdümlü çalışan araçlardan tam otomatik sürüşe sahip yani tam otonom bir araca kadar uzanmaktadır. Otonom araçlar, ulaşım endüstrisindeki en önemli teknolojik gelişmelerden biridir. Gelişiminin başlıca motivasyonlardan biri trafik güvenliğini artırmaktır. Ancak, bu araçlar kazaları ortadan kaldıramaz. Aksine beraberinde yeni riskleri de beraberinde getirmektedir (Liu ve diğ., 2019). Geleneksel yani insan güdümlü araçlardan daha güvenilir olup olmadığını belirlemek için araştırmalar devam etmektedir (Liu ve diğ., 2019). Kendi kendini süren arabaların güvenliği tartışılırken, arabada geçirilen zamanın kaliteyi ve üretkenliği artırabileceği ve ulaşımı herkesin her an erişebileceği bir programa dönüştürme potansiyeline sahip olduğu çok açıktır (Schwarting ve diğ., 2018). Bu araçların tasarımdan kontrole, satın almaya, planlamaya ve insan etkileşimine kadar birçok alanda gelişmesi gerekmektedir (Schwarting ve diğ., 2018).

Araç kullanımındaki artışa bağlı olarak toplam trafik kazası sayısı önemli ölçüde artmıştır. Trafik kazasının dikkat dağınıklığı, güvenli olmayan şerit değişiklikleri, trafik sıkışıklığına bağlı çarpışmalar, hatalı dönüşler, yaya geçişleri gibi birçok nedeni vardır (Balasubramaniam ve diğ., 2017). Karayolu trafik güvenliğini artırmak ve daha çevreci bir yaklaşım sağlamak adına etkin bir akıllı ulaşım planlamasının uygulanması gerekmektedir (Balasubramaniam ve diğ., 2017). Çoğu gelişmiş ülkede, karayolu ölümlerinin sayısı araç teknolojisindeki (örneğin, sürücü destek sistemleri) gelişmeler ve trafik yönetim idarelerinin mücadeleleri sayesinde azalmaktadır (Martínez-Díaz ve Soriguera, 2018). Ancak, gelişmemiş ülkelerde buna zıt yönde eğilimler gerçekleşebilmektedir. Trafikle ilgili ölümlerin sayısı hâlâ önemli küresel bir problemdir (Martínez-Díaz ve Soriguera, 2018).

Akıllı Ekonomi (Rekabet Gücü)

- Yenilikçi ruh ve girişimcilik
- Ekonomik imaj ve ticari markalar
- Üretkenlik
- İş piyasasının esnekliği
- Uluslararası yerleşiklik ve dönüştürme yeteneği

Akıllı İnsan (Sosyal ve Beşeri Sermaye)

- Yeterlilik düzeyi
- Yaşam boyu öğrenmeye yakınlık
- Sosyal ve etnik çoğulculuk
- Esneklik
- Yaratıcılık
- Kozmopolitlik/açık fikirlilik
- Kamusal yaşama katılım

Akıllı Yönetim (Katılım)

- Karar alma sürecine katılım
- Kamu ve sosyal hizmetler
- Şeffaf yönetim
- Siyasi stratejiler ve perspektifler

Akıllı Mobilite (Ulaşım ve Bilişim)

- Yerel erişilebilirlik
- Ulusal/Uluslararası erişilebilirlik
- BİT altyapısının mevcudiyeti
- Sürdürülebilir, yenilikçi ve güvenli ulaşım sistemleri

Akıllı Çevre (Doğal Kaynaklar)

- Doğal koşulların çekiciliği
- Kirlilik
- Çevresel koruma
- Sürdürülebilir kaynak yönetimi

Akıllı Yaşam (Yaşam Kalitesi)

- Sağlık koşulları
- Bireysel güvenlik
- Konut kalitesi
- Eğitim tesisleri
- Kültürel tesisler ve turistik çekicilik
- Sosyal dayanışma

Şekil 1.1: Akıllı Şehir Bileşenleri

Otonom araç teknolojileri hızla gelişmekte ve karayolu taşımacılığında büyük bir etkiye sahip olmaktadır. Sürücüsüz araçlar, insanlarla ve diğer trafik ajanlarıyla etkileşime girmekte ve mevcut trafik ortamını değiştirmektedir. Gerekli incelemeler tamamlandıktan ve yasal düzenlemeler tamamlandıktan sonra ulaşımda yeni bir dönem başlayacaktır. Halihazırda kullanılan konvansiyonel araçlar ile sürücüsüz otomobillerin bir arada olduğu bir geçiş dönemi yaşanacaktır.

Yukarıdaki tüm bilgiler ışığında bu tez çalışmasında, akıllı ulaşım unsurlarından biri olan otonom araçlardaki trafik kazalarının analizi sunulmaktadır. Bu çalışma, otonom araçlardaki trafik kaza faktörlerinin nedenlerini belirlemekte ve bu faktörlerin birlikte ne sıklıkta ortaya çıktığını ve karşılıklı önem düzeylerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bunun için sırasıyla birliktelik analizi ve lojistik regresyon yöntemleri uygulanmıştır. Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde, akıllı ulaşım sistemleri, otonom araçlar ve sürüş güvenliği, otonom araçlarda trafik kazaları ve otonom araç kazalarında mevcut literatür durum olmak üzere dört başlıkta kapsamlı bir literatür taramasına yer verilmektedir. İkinci bölümde, araştırmanın yöntemi, veri toplama süreci ve kullanılan analiz yöntemleri açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde araştırmadan elde edilen bulgular ve bu bulgular ışığında yapılan yorumlar ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde ise analizlerin sonuçları değerlendirilmekte ve gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunulmaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ

2.1.1 AUS'ye Genel Bakış

Akıllı şehirler kavramı, son yirmi yılda akademik literatürde ve uluslararası politikada giderek daha popüler hale gelmiştir. Şehirler dünya çapında önemli sosyal ve ekonomik roller oynamakta ve önemli etkilere sahiptir (Albino ve diğ., 2015). Bu nedenle akıllı şehirler geleceğimiz için kilit unsur olarak öne çıkmaktadır.

Küresel akıllı şehir kavramı dünyada akıllı şehir altyapısı ve hizmetleri sağlamaya odaklanarak tanıtılmıştır (Kim, 2022). Akıllı şehirler bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) aracılığıyla hizmet sunarken kentsel sorunları tanımlamakta ve çözüm sunmaktadır (Kim, 2022). Dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0) ile birlikte büyük veri teknolojisi ve akıllı şehir unsurlarındaki gelişmelere uygun olarak akıllı şehir projeleri geliştirilmektedir (Kim, 2022). Akıllı şehir, kavramsal olarak bakıldığında altında birçok bileşeni barındırmaktadır. Ulaşım başta olmak üzere sağlık, çevre, ekonomi, enerji, altyapı gibi uygulamalara sahiptir. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), akıllı mobilite bileşeni olarak ulaşım sektöründe akıllı şehirlerin temel uygulaması haline gelmiştir (Chen ve diğ., 2017). Bu bağlamda kentsel hizmetlerin iyileştirilmesi noktasında akıllı ulaşım sistemlerine yatırım yapılmaya başlanmıştır. Böylelikle ulaşımda verimliliği artırmak amaçlanmaktadır.

Ulaşımdan kaynaklanan trafik sıkışıklığı; kazalar ve kirlilik sorunları, araç trafiği, toplu taşıma, yük ve yaya trafiği dahil olmak üzere seyahat taleplerindeki artışın bir sonucu olarak hızla artmaktadır (Sumalee ve Ho, 2018). AUS'ler algılama, iletişim, bilgi yayma ve trafik kontrolü dahil olmak üzere çeşitli sistemleri entegre ederek bu sorunları çözmektedir (Sumalee ve Ho, 2018). AUS, seyahat deneyimini teknik, sosyal, ekonomik ve çevresel bir perspektiften geliştirmek ve optimize etmek için tasarlanmış birbirine bağlı çeşitli teknik özellikleri kapsamakta ve çeşitli mühendislik becerilerini içermektedir (Damaj ve diğ., 2021).

2.1.2 AUS'nin Tarihsel Gelişimi

AUS kavramı ilk olarak 20. yüzyılda tanıtılmıştır. 20. yüzyılın sonundan itibaren, gelişmiş ülkeler, AUS'yi; kazaları, trafik sıkışıklığını ve ulaşım maliyetlerini azaltmayı ve mevcut altyapının verimliliğini artırmayı amaçlayan modern toplumun bir ürünü olarak kabul etmişlerdir (Tran ve diğ., 2022). Batı Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya, AUS alanında lider ülkelerdir ve önemli projelere imza atmışlardır.

Ulaştırma telematiği, muhtemelen, çok fazla trafik ölümü ve yaralanmasının yanı sıra yapısal olarak etkisiz trafik süreciyle başa çıkmak için çeşitli teknolojik programların yürütüldüğü Japonya'da 1970'lerin başından itibaren ortaya çıkmıştır (Yan ve diğ., 2012). 1986'da Japonya'da AMTICS ve RACS projesi başlatılmış, gelişmiş kara taşımacılığında kullanılmak üzere yeni teknolojiler geliştirilerek hızla ilerleme kaydedilmiştir (Sussman, 2005). Japonya'da bu gelişmeler yaşanırken, ABD'de kara ulaşım sisteminin geleceği, bir araya gelen resmi olmayan bir grup akademisyen, federal ve eyalet ulaşım yetkilileri ve özel sektör temsilcileri tarafından tartışılmaya başlanmıştır (Sussman, 2005). AUS uygulamalarına Kaliforniya'da başlandığı görülmektedir (Shlaclover, 2007). Çünkü şehrin otoyol ağındaki hızlı büyüme 1950'ler ila 1970'ler arasında gerçekleşmiş ve bunun sonucu olarak Kaliforniya Ulaştırma Bakanlığı (CALTRANS) sürekli artan ulaşım ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına ileriye dönük projeler geliştirmesi gerektiğinin farkına varmıştır (Shlaclover, 2007).

Japonya ve ABD'dekine benzer şekilde Avrupa ülkelerinde de benzer programlar kurulmaya başlanmıştır. Avrupa'nın ilk ulaştırma telematiği programı 1986'da Batı Avrupa'da Prometheus projesi ismiyle başlatılmıştır. Avrupa araştırma programı Prometheus, herhangi bir normal otoyolda insan müdahalesi olmadan araba ve kamyon sürme becerisine sahip bir robot geliştirmeyi amaçlamıştır (Graefe ve Kuhnert, 1992). Otoyol oto pilotu olarak adlandırılan bu robot sayesinde insan sürücüsü sürüş görevinden tamamen veya kısmen kurtulacaktır (Graefe ve Kuhnert, 1992). Sürücü sürüşe kendi devam etmeyi tercih isterse robotun sürücüye yardım etmesi, bir kaza durumunda veya bir tehlike anında uyarması yani yardımcı pilot olarak hareket etmesi beklenmiştir (Graefe ve Kuhnert, 1992). Ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi için hızla adımlar atılırken gerçekleştirilen projeler aynı zamanda otonom araçların da tarihsel anlamda ortaya çıktığını ve literatürde kendine bir yer bulduğunu kanıtlamaktadır. Zira Prometheus, otonom araçlar alanında zamanının en büyük projesi olma niteliği taşımaktadır (Sussman, 2005). Ayrıca 1988'de Avrupa'da Araç Güvenliği için Özel Yol Altyapısı (DRIVE) projesi ile

karayolu güvenliğini artırmak, trafiğin olumsuz ekolojik etkilerini azaltmak ve karayolu taşımacılığı telematiğini (RTI) kullanarak karayolu altyapısını iyileştirerek Entegre Karayolu Taşımacılığı Ortamı (IRTE) oluşturmak hedeflenmiştir (An ve diğ., 2011).

"Akıllı Bir Ulaşım Sistemine Doğru" temasıyla düzenlenen ilk AUS kongresiyle Kasım 1994'te Fransa'da dünyanın birçok yerinden 30'dan fazla ülkenin katılımıyla sonuçlanmış ve AUS'nin potansiyeli ilk kez bu kongrede büyük ölçüde ele alınmıştır. (Tran ve diğ., 2022). AUS Kongresi, akıllı ulaşımın dijitalleştirilmesine odaklanan en büyük etkinlik olma özelliğine sahiptir (Akkaya ve Tektaş, 2022). 100'den fazla ülkeden katılımcıları, şirketleri ve kanaat önderlerini bir araya getirmektedir. ERTICO, her yıl Avrupa'da bir AUS bölgesel ve dünya kongresi düzenlemektedir. Kongreler, AUS'nin öneminin altı çizilmesinde, uzmanların, ulusal ve yerel yönetimlerin ve kamuoyunun akıllı mobilite çözümleri konusunda farkındalığını artırma noktasında önemli kanallar olarak hizmet etmektedir. Bu kongreler, paydaşlara ve patronlara, endüstriyi etkileyen kişilerle tanışmak, fikirleri ve girişimleri tartışmak, yeni bağlantılar kurmak ve faaliyetlere katılarak işlerini tanıtmak için bir platform yaratmaktadır.

2.1.3 Dünyada AUS Politikaları

Dünyanın dört bir yanında, ülkeler politikaları doğrultusunda farklı AUS stratejileri geliştirmektedir. Bu kapsamda farklı araç ağı projeleri, programları, mimarileri ve protokolleri bulunmaktadır. AUS standardizasyonu konusu tartışılan konular içinde yer almaktadır.

ABD'de 1990'da resmi bir organizasyona duyulan ihtiyaç netleşmiş ve ABD Ulaştırma Bakanlığında bir Federal Danışma Komitesi olarak Amerika Akıllı Araç Otoyol Topluluğu (IVHS) kurulmuştur (Sussman, 1993). Aralık 1991'de, Verimlilik Üzerine Intermodal Yüzey Taşımacılığı Yasası (ISTEA) yasalaşmıştır. ISTEA'nın ayrılmaz bir parçası olan IVHS, ABD ulaşımının kritik bir bileşeni olmuştur (Sussman, 1993). Devasa bir girişim olan IVHS, altı uygulama alanından oluşmaktadır. İlk üçü; yolcu bilgisi, trafik yönetimi ve araç kontrolüdür ve geniş bir teknik amaca hizmet etmektedir. Diğer üçü; toplu taşıma, ticari araçlar ve kırsal ulaşımdır ve grup sektörleri hedef almaktadır (Technoloav, 1994). ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) 1999 yılında, DSRC tabanlı AUS uygulamaları için 5,9 GHz bandının 75 MHz'ini tahsis etmiştir. Bant tahsisinin ardından, American Society for Testing and Materials (ASTM), E2213-03 standardı, 2003 yılında ASTM International himayesinde tamamlanmıştır. ASTM E2213-03'ün paydaşları, 2004 yılında standart güncellemeyi IEEE 802.11 standardında

bir değişiklik haline getirmeye karar vermişlerdir. 2010'da IEEE 802.11p araç ortamlarında kablosuz erişim (WAVE) değişikliğini yayınlamışlardır (Chang, 2015). IEEE 802.11p standardı ile, araçlar ve yol kenarındaki altyapılar arasındaki iletişim de dahil, çevrelerindeki araçlar arasında ad hoc iletişim ve doğrudan bilgi alışverişi sağlanmaktadır. Bu yaklaşıma genel olarak araçtan her şeye (V2X) iletişimi denilmektedir (Festag, 2015).

Avrupa'da AUS'nin endüstri ve toplum için önemi kabul edilerek Avrupa Komisyonu'nun önde gelen üyeleri ve ulaştırma bakanlıkları ele ele vermiş ve bir koalisyon meydana getirilmiştir. ERTICO, 1991 yılında bu koalisyonun sonucunda kurulmuştur. Bu organizasyon, Avrupa'da Araç Güvenliği için Adanmış Yol Altyapısı (DRIVE) stratejik danışma komitesinin tavsiyeleri doğrultusunda oluşturulmuştur. Avrupa için AUS standartlarını geliştirmek ERTICO'nun faaliyetleri kapsamındadır. Kısaca ERTICO, AUS veya ulaşım hizmetleri ile ilişkili bir paydaşlar ağı olmakla birlikte sadece Avrupa'da değil, bu kıtanın ötesinde de çalışmalarını sürdürmektedir (Talha ve diğ., 2013). ERTICO, faaliyetlerini bağlantılı kooperatif ve otomatik hareketlilik, temiz ve eko mobilite, taşımacılık ve lojistik, kentsel hareketlilik ve sektörler arası olmak üzere 5 odak alanına ayırıp çalışmalarını yürütmektedir. Üç ana Avrupa Standardizasyon Kuruluşu (ESO), Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN), Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) ve Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI), prensipte farklı konulardan sorumluyken, AUS gibi birçok alanda işbirliği yapmaktadırlar (Camacho ve diğ., 2018). Ancak AUS alanı çoğunlukla ETSI tarafından ve daha az derecede CEN tarafından kapsanmaktadır. IEEE 802.11p'nin Avrupa profili ETSI ITS-G5'dir ve V2V ve V2I iletişimine izin veren tek radyo teknolojisidir. Avrupa'da DSRC terimi CEN tarafından standartlaştırılmış iletişim teknolojisini ifade etmektedir ve elektronik ücret toplama uygulamaları için kullanılır (Strom, 2011).

Japonya'da 1970'lerde dünyadaki ilk dinamik rota yönlendirme sistemi Kapsamlı Otomobil Trafik Kontrol Sistemi (CACS) oluşturulmuştur. Dinamik olduğu için trafik kontrol merkezinden trafik verileri gerçek zamanlı iletilmiştir (Tsugawa ve Kato, 2010). Japonya'da, 1996 yılında dünyanın ilk araç bilgi iletişim sistemi (VICS) kurulmuştur. Gerçek zamanlı trafik bilgilerini toplamakta ve iletmektedir. Sonrasında Smartway geliştirilmiş ve 2007'de devreye alınmıştır (An ve diğ., 2011). Smartway konseptine dayalı olarak, VICS ve elektrikli geçiş ücreti düzeltmesi (ETC) gibi AUS'ların pratik uygulamaları Japonya'nın genelinde uygulanmaktadır. 2011 yılında, VICS ve ETC fonksiyonlarını tek bir araca monteli ünitede

(OBU) birleştiren ve birçok yeni fonksiyon ekleyen ETC 2.0 adlı yeni bir proje başlatılmıştır. ETC 2.0, 5.8 GHz'de DSRC özelliklerini kullanarak yüksek hızlı ve kapasiteli iletişim yoluyla kentteki trafik problemlerini hafifletilmesinde fayda sağlamaktadır (Makino ve diğ., 2018).

Güney Kore, Seul kentinde daha gelişmiş entegre bir trafik yönetimi için Ulaştırma Operasyonu ve Bilgi Servisi (TOPIS) adlı sistemi yaratmıştır. Seul TOPIS, Seul Büyükşehir Yönetimi'nin AUS markasıdır ve Güney Kore'de türünün ilk hizmeti olarak 1998'de tanıtılmıştır. 2005 yılında resmi olarak Seul şehir idaresi tarafından farklı departmanların sağladığı hizmetler bir araya getirilmiş ve dağınık ulaşım bilgilerinin entegrasyonu ile TOPIS hayata geçirilmiştir. Ayrıca kart ödemeleri, ulaşım için radyo yayın sistemini ve polis hizmetini de tek bir idari merkez altında birleştirmektedir. TOPIS sistemi, trafik sıkışıklığını tespit edebilmektedir. Kent genelinde 700'den fazla güvenlik kamerası kullanılarak 450 yol ve 3000 kavşaktaki trafik durumu, 8000 otobüsün işleyişi ve her güzergah izlenmekte ve gerçek zamanlı iletilen bilgiler işlenmektedir. Bu işlevsellik, GPS ve kablosuz iletişim sayesinde gerçekleştirilmektedir (Macheret ve diğ., 2021). 2013 yılında Seul şehir idaresi tarafından ulaşım yönetimi, afet ve ulusal acil durumla ilgilenmek için Seul Entegre Güvenlik Merkezi kurulmuştur. Yine aynı yıl, Kooperatif Akıllı Ulaşım Sistemleri (C-ITS) Ana Planı oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar sıfır trafik kazası hedeflenmektedir (Choosakun ve diğ., 2021).

AUS terminolojileri açısından bakıldığında birçok ülkenin paralel çalışmalar yürüttüğü görülmektedir. Örneğin Amerika AUS terminolojisinde, Gelişmiş Gezgin Bilgi Sistemi (Advanced Traveler Information System) adında bir çalışma ortaya koyulurken, Japonya'da ise Gelişmiş Navigasyon Sistemi (Advances Navigation System) adında bir çalışma ortaya koyulmuştur. Kullanılan teknoloji, Kişisel Dijital Asistana (PDA) benzer bir araçta yerleşik üniteye kurulan Coğrafi Bilgi Sistemine (GIS) dayalı bir dijital haritadır (Rachmat Suryadithia ve diğ., 2021). AB tarafından 2017'de Shift2Rail planı önerilirken, İngiltere tarafından 2018'de akıllı altyapı stratejisi önerilmiştir. Çin'e bakıldığında AUS'nin gelişimini teşvik etmek için, hükümet 2016'dan beri Akıllı Trafik Eylem Planının (2017-2020) geliştirilmesine yönelik bir dizi stratejik düzen yayınlamaktadır (Sun, 2021).

2.1.4 Türkiye'de AUS Çalışmaları

Türkiye'de 1960'lı yıllarda başlayan AUS uygulamaları, 2000'li yıllardan itibaren teknolojik gelişmelerle birlikte hızla gelişmiştir. Türkiye'de ilk ücretli yol uygulaması 1973 yılında Boğaziçi Köprüsü'nün açılmasıyla mümkün olmuştur. Ücret toplama sistemi nakit ödeme esasına göre çalışmaktaydı. AUS ile ilgili hayata geçirilen diğer bir uygulama 1984 yılında İstanbul'un ana arterlerinde bulunan sinyalizasyon sistemlerinin işlevselliğinin artırılması ile ilgili olmuştur. 1990'lı yıllardan itibaren elektronik ücret toplama sistemlerine geçilmiştir. 1995 yılından sonra akıllı bilet uygulaması başlatılmış ama sonradan kartlı sistemlere dönüştürülmüştür. İstanbul akbil ücret toplama sistemi bu kapsamda yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Yine 1995 senesinde İstanbul'da 160 kritik kavşak birbirine entegre edilerek sinyalizasyon kontrolü sağlanmış ve trafik akışı ile ilgili bilgiler son kullanıcılara ulaştırılmıştır (Üneş ve Közkurt, 2021).

AUS'nin Türkiye'deki kilometre taşlarından bazıları şunlardır (AUS Türkiye, 2021): İlk trafik kontrol merkezi 1998'de İstanbul'da trafik akışının gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrol edilmesi için kurulmuştur. Merkezin kurulmasıyla yol ağı kapasitesi daha etkin kullanılmaya başlanmıştır. 1999 yılında İzmir'de kentkart teknolojisi başlatılmış ve bu ulaşım kartı kent içinde otobüs, feribot, metro gibi işletmelerde çalışacak şekilde entegre edilmiştir. Aynı sene Otomatik Geçiş Sistemi (OGS) ve 2012 yılında da Hızlı Geçiş Sistemi (HGS) gibi uygulamaların hayata geçirilmesiyle yol ve köprü geçişleri otomatik hale gelmiştir. OGS, ilk kez Fatih Sultan Mehmet köprüsünde uygulanan bir sistemdir. 2014'te ücret toplama alanında gelinen en üst seviye kabul edilen Serbest Geçiş Sistemi (SGS) ile trafiğin akışı bozulmadan araçlar normal hızları ile seyir halinde iken ücretler toplanabilecektir. Trafik yoğunluk haritası, trafik bilgi sistemi, adaptif trafik yönetim sistemi, cep trafik uygulaması, araç takip ve plaka tanıma sistemi, akıllı durak gibi çeşitli uygulamalar Türkiye genelinde hayata geçirilen projelerden olmuştur.

T.C. Ulaştırma Bakanlığı tarafından AUS için bir yol haritası oluşturmak adına Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı (UAB, 2020) duyurulmuştur. Buna göre akıllı ulaşım sistemleri ülke vizyonu ileri bilişim teknolojileri ile Türkiye'de insan ve çevre odaklı ulaşım sistemi olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda ortaya konulan misyon ise ülkemizde tüm ulaşım modlarına entegre, güncel teknolojileri kullanan, yerli ve milli

kaynaklardan yararlanan, verimli, güvenli, etkin, yenilikçi, dinamik, çevreci, katma değer sağlayan ve sürdürülebilir akıllı bir ulaşım ağı oluşturmak olarak belirlenmiştir.

2.1.5 AUS Uygulamalarında Kullanılan Teknolojiler

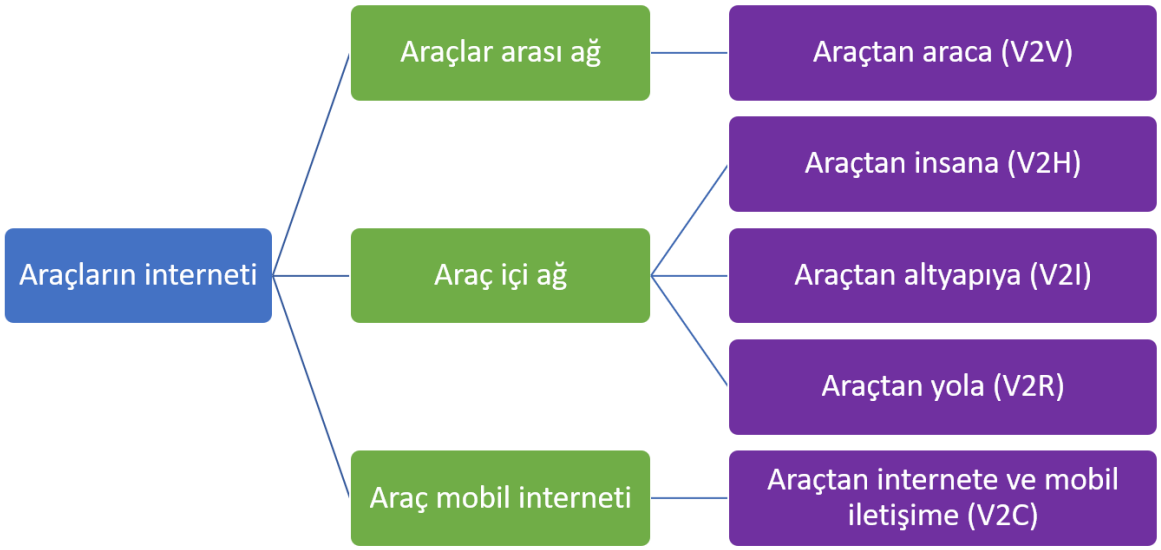
Ulaşım, hızla artan nüfustan ve araç sayısından olumsuz etkilenmektedir. Bu önemli artış, hareketlilik taleplerine cevap veren daha gelişmiş bir yaklaşım gerektirmektedir. AUS, ulaşımdaki gelişmelere ve toplumun bu doğrultudaki taleplerine dayanmaktadır (An ve diğ., 2011). AUS'nin temel amacı ulaşım problemlerini çözüme kavuşturmak ve mevcut durum üzerinde iyileştirme yapmaktır. Bu sektörde yenilikçi hizmetler sunmak için en son teknolojiler kullanılmaktadır. Beşinci nesil (5G)/5G ötesi (B5G) çağında, iletilebilir şeylerin sayısı artmaktadır ve mevcut tüm heterojen ağları içeren ortak bir ağ çerçevesi kavramı yeniden şekillenmektedir (Ji ve diğ., 2020). 5G teknolojileriyle donatılmış AUS, akıllı şehirlerin gelişimine ve otomatikleştirilmiş ulaşım sistemlerinin daha güvenli ve daha verimli olmasına yardımcı olmaktadır ve bununla beraber toplu taşıma sisteminin trafik sıkışıklığı, kirlilik ve çarpışmalar dahil olmak üzere büyük şehirlerdeki ulaşım sorunlarıyla başa çıkmaktadır (Gohar ve Nencioni, 2021). Araç iletişimi, AUS için araçları, yol kenarındaki birimleri ve yayaları birbirine bağlamak için kritik bir teknolojidir.

Şehir altyapılarının modernleşmesiyle "her zaman bağlantılı" olma isteği ortaya çıkmıştır (Datta ve diğ., 2016). Gündelik hayatta çoğu cihazın yavaş yavaş birbirine bağlandığı ve Nesnelerin İnterneti (IoT) çağının geldiği görülmüştür. AUS, IoT ile birlikte çevre üzerindeki etkiyi en aza indirerek daha verimli ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri sağlamaktadır (Abbas ve diğ., 2021). IoT sayesinde veriler herhangi bir düzeyde insan etkileşimine ihtiyaç duymadan bir ağ üzerinden iletilebilmektedir (Yeong ve diğ., 2021). Akıllı ulaşım endüstrisinde büyük değişimler yaratan IoT, filo yönetimi, toplu taşıma yönetimi, akıllı envanter yönetimi, optimum varlık yönetimi gibi uygulamalarıyla öne çıkmaktadır (Garg ve diğ., 2021). Arkasından Araçların İnterneti (IoV) kavramı oluşmuştur ve ulaşım sistemi küresel çeşitlilik gösteren bir ağa dönüştürülmüştür (Garg ve diğ., 2021). IoV'nin gelişimi, VANET teknolojisinden türetilmiştir. VANET, önceden tanımlanmış rotalara (yollara) sahip özel bir mobil geçici ağ sınıfıdır (Hasrouny ve diğ., 2017). Bu teknolojide, Adanmış Kısa Menzilli İletişim (DSRC) kullanılmıştır (Hasrouny ve diğ., 2017). Sonraki yıllarda araçların çoğu Yerleşik Kablosuz Cihaz (OBU), Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), Olay Yeri Kaydedici (EDR) ve

sensörler (radar ve lidar) ile donatılarak çevreyi algılama kapasitelerinde artış sağlanmıştır (Hasrouny ve diğ., 2017).

IoV kapsamında sınıflandırılan teknolojiler (Garg ve diğ., 2021), Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Araçların her şeyle iletişim kurması (V2X) olarak da bilinen IoV, kazaları ve trafik sıkışıklığını azaltmak ve diğer bilgi hizmetlerini sağlamak amacıyla araç ile aracı etkileyebilecek tüm varlıklar arasında bilgi etkileşimi gerçekleştirmeyi hedeflemektedir (Ji ve diğ., 2020). Tüm bu teknolojik gelişmeler, araçların diğer araçlarla bağlantı kurmasını (V2V), araçların yol kenarı altyapısıyla iletişim kurmasını (V2I), araçların yayalarla iletişim kurmasını (V2P) ve son zamanlarda araçların her şeyle iletişim kurmasına (V2X) olanak sağlamıştır (Ji ve diğ., 2020). IoV uygulama ortamlarının geleceğin 6G ağını geliştirmek için araçtan her şeye (V2X), büyük veri ve yapay zekayı (AI) birleştirmesi hedeflenmektedir (Ji ve diğ., 2020).

Son yıllarda verilerin birincil aktör olarak yer aldığı derin öğrenme ve AUS arasındaki bağlantı araştırmacıların yöneldiği araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Geçmişi daha eskiye dayansa da günümüzde bahsedilen derin öğrenme nispeten yeni bir gelişmedir. Derin öğrenme teknikleri, çok çeşitli gereksinimleri (ölçeklenebilirlik, çeşitli hizmet kalitesi ihtiyaçları ve büyük miktarda üretilen veri gibi) gerçekleştirmede kullanılmıştır.



Şekil 2.1: Araçların İnterneti Sınıflandırması

Her gün AUS bileşenleri tarafından muazzam miktarda veri üretilmekte ve bu AUS kapsamında bir büyük veri oluşmaktadır. Konvansiyonel AUS'nin yıllar geçtikçe birçok kaynaktan toplanan verilerin AUS için kritik rol oynamasıyla veriye dayalı bir AUS oluştuğu görülmektedir (Zhang ve diğ., 2011). Birçok modern ulaşım sistemi bu verilerden öğrenmekte ve daha doğru karar verme ve tahminler için özellikle derin öğrenme yöntemlerine de başvurarak bu büyük veri kümelerindeki kalıpları ve yapıları ortaya koymaktadır (Veres ve Moussa, 2020). Bu yaklaşımla farklı derin öğrenme modelleri ve öğrenme stratejileri oluşturulmaktadır. Araç ortamında şerit algılama, yol işareti tanıma, trafik ışık algılama, yaya algılama, aracın konumunu belirleme gibi görevler için derin öğrenme yöntemlerine başvurulmaktadır (Guerrero-Ibañez ve diğ., 2021).

2.1.6 AUS'ye Duyulan İhtiyaç ve Literatürdeki Boşluk

Geçmişten günümüze ortaya konan AUS bilimsel çalışmaları değerlendirildiğinde, hâlâ alan içinde araştırılmasına ihtiyaç duyulan ve geliştirilmesi gereken fırsatlar bulunmaktadır. Yeni teknolojilerle birlikte sektörün içinde yeni araştırma alanları doğmakta ve bununla beraber yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır.

AUS çalışmalarında trafik akış tahmini, araştırmacıların en çok ilgisini çeken uygulama alanıdır. Veriye dayalı derin öğrenme modelleri, AUS'nin çeşitli özelliklerini ele almak için en umut verici modellerden biri olarak kabul edilmektedir (Kaffash ve diğ., 2021). Derin öğrenme tekniklerini uygulayan en çok atıf yapılan makaleler genellikle trafik akışı tahmini, işaret algılama ve trafik sıkışıklığının gelişimi ile ilgili sorunlar üzerine çalışmaktadır. Bu makalelerde yapay sinir ağları ve derin öğrenme algoritmaları bilim insanları tarafından en çok kullanılan büyük veri algoritmalarıdır (Kaffash ve diğ., 2021). Ulaşımda yoğun trafik dönemlerinde rota planlaması, trafik sinyalleri optimizasyonu ve ulaşım hizmetlerinin iyileştirilmesi için algoritmalar geliştirilmektedir. Bu algoritmaları geliştirirken karşılaşılan zorluklardan biri, araştırmacıların yaklaşımlarını doğrudan değerlendirebileceği ve karşılaştırabileceği yeterli standartlaştırılmış ortamların olmamasıdır (Veres ve Moussa, 2020).

Akıllı şehirlerde vatandaşlardan toplanan verilerin depolanması, işlenmesi ve analizi sırasında güvenlik sorunlarıyla karşılaşılmaktadır. Blok zinciri ve IoT teknolojilerinin kullanılmasıyla veri güvenliği sorunu çözülmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda akıllı şehir sakinlerinin gizliliğine önem veren merkezi olmayan bir veri yönetim sistemi araştırmacılar tarafından öne sürülmektedir (Abbas ve diğ., 2021). AUS'deki verilerin doğrudan blok zincirinde

kaydedilmesi çok zor olan daha yüksek boyutla kaydedilmektedir. Veri boyutunun artması blok zincirinde bir sorun yaratmaktadır. Verilerin boyutu, blok zinciri veri tabanına depolanmadan önce küçültülmelidir (Balasubramaniam ve diğ., 2021).

Veri tabanlı modelleme, AUS'ye derin bir dönüşüm getirmiştir ve alanda pek çok araştırmacı bu konu üzerine çalışmaktadır. Veri tabanlı modeller giderek daha karmaşık hale gelmekte ve araştırma ile uygulama arasındaki boşluk artmaktadır. AUS modellerinin eyleme geçirebilmesi için, modellerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve yeni yapay zeka (AI) teknolojilerinin benimsenmesi gerekmektedir (Laña ve diğ., 2021). AUS'nin hayata geçirilmesinin önündeki en büyük engel az gelişmiş altyapıdır. Sistemin uygulanması, ulaşım ağındaki sensörlere, kameralara, IoT ve diğer altyapıların varlığına göre belirlenmektedir (Rudskoy ve diğ., 2021).

Akademik literatürde otonom araç sektöründeki teknolojik gelişmeleri anlatan birçok araştırma makalesi yayınlanmıştır. Buna rağmen, örneğin otonom araçların yıkıcı etkilerini veya politikacıların bu konuyu nasıl ele aldığını özetleyen ve otonom araçların durumunu daha geniş bir perspektiften eleştirel bir şekilde inceleyen akademik literatür oldukça sınırlıdır (Faisal ve diğ., 2019). Bu nedenle akıllı ulaşım sistemleri unsurlarından otonom araçlar, araştırmaya değer bir alan olarak değerlendirilebilir. Bu alanda çalışmalar yapmak literatürdeki boşluğun doldurulması açısından önemlidir.

2.2 OTONOM ARAÇLAR VE SÜRÜŞ GÜVENLİĞİ

2.2.1 Otonom Araçlar ve Tarihsel Gelişimi

AUS'ye yönelik en önemli katkılardan biri, otonom araçların geliştirilmesi olmuştur. Otonom araçlar genellikle, geleneksel bir aracın başlıca ulaşım yeteneklerini yerine getirebilen kendi kendine giden araçları ifade etmektedir (Duarte ve Ratti, 2018). Şehirdeki dinamikleri değiştiren otonom araçlar şehirdeki hareketlilik açısından büyük dönüşümler yaşanmasına vesile olmuştur.

Araçlar icat edildiğinden beri, insanları sürücü koltuğundan çıkarmak konuşulan konulardan biridir. 1920 ila 1980 yılları arasında, çeşitli otomobil şirketleri ve üniversiteler tarafından otonom araçlara öncülük etmek için birçok çaba sarf edilmiştir. İnsansız araç araştırmalarında Japonya, ABD ve AB ülkeleri başta gelmektedir. İlk yapılan çalışmalardan biri 1920'lerde radyo kontrollü sürücüsüz bir araba olmuştur (Davidson ve Spinoulas, 2015). 1970'lerin

sonlarında Japonya'da ve 1980'lerin başında Almanya'da Münih Bundeswehr Üniversitesi'nde çalışmalar başlamıştır (Skrickij ve diğ., 2020). 1985 yılında ABD'de Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından otonom araçlar için sistem geliştirme konusunda Navlab projesi yürütülmüştür (Skrickij ve diğ., 2020). 1990'lardan günümüze otonom araçlar hakkında kapsamlı araştırmalar yapılıp pratik çözümler geliştirilmektedir (Skrickij ve diğ., 2020). 1996'da İtalya'da Parma Üniversitesi tarafından ARGO projesi başlatılmıştır (Skrickij ve diğ., 2020). 2005 yılında Stanford Üniversitesi tarafından Stanley ve Junior projesi başlatılmıştır (Skrickij ve diğ., 2020). BMW, GM, Ford, Nissan gibi dünyanın en büyük otomobil üreticileri bu alanda projeler başlatmıştır (Skrickij ve diğ., 2020). AB Araştırma ve Yenilik Çerçeve programı olan Horizon 2020 tarafından finanse edilen INRAMIX, CoEXist, Interact, Safe Trip gibi birçok proje bulunmaktadır. Bu projeler otonom ve manuel araçların aynı yollarda sürüldüğü geçiş dönemi için altyapı ve ulaşım modellerinin hazırlanmasını kapsamaktadır (Skrickij ve diğ., 2020). Projelerin çoğu devam etmekte olup daha fazla geliştirilmeleri gerekmektedir.

Avrupa Komisyonu 2018'de otonom hareketliliğin uygulanmasına yönelik bir bildiri yayınlamıştır. Bu bildiride otonom araçların kentsel planlamaya katkısından bahsedilmektedir. Bu bağlamda AB, sürdürülebilir kentsel hareketliliği güçlendirmek için otonom araçları desteklemektedir. Ulusal düzeyde Çekya, Almanya, Birleşik Krallık, İsveç, Fransa, Hollanda, Avusturya, Belçika gibi AB ülkeleri bu konuda araştırma projeleri yürütmekte, otonom hareketlilik için strateji ve eylem planları belirlemektedir (Gavanas, 2019).

Ulaşım sisteminin bir unsuru olarak otonom araçların akıllı şehir ekosistemi içinde yer alması için araştırmacılar ve şirketler tarafından birçok çalışma yürütülmektedir. Bu tür araçların, dünyanın dört bir yanındaki insanların yaşadığı trafik sıkışıklığı, kaza ve kirlilik sorunlarını çözeceği düşünülmektedir (Li ve diğ., 2016). Bu amaca ulaşmak için otonom araçların prototipleri tasarlanmış ve test edilmiştir. Otonom araçları sergileyen Google, Volvo, Tesla ve Daimler gibi birçok şirket bulunmaktadır. Test mühendisleri bu otonom araçların güvenlik nedeniyle gelişmelerini yakından takip etmekte ve denetlemektedir. Amaçları otonom araçları halkın kullanımına sunmaktır (Gordon ve Lidberg, 2015). Otonom araçların geliştirilmesi noktasında trafik simülasyon programları kullanılmaktadır (Figueiredo ve diğ., 2009). Gerçek hayat problemlerini görmek ve bu araçların trafikte yerini alabilmesi için ülkeler tarafından düzenlenecek çeşitli regülasyonlara gereksinim vardır. Yasa düzenleyiciler ve otomotiv

üreticileri, SAE tarafından tanımlanan (Tablo 2.2) otonom seviyelerinin sınıflandırmasına uymaktadır.

2.2.2 Dünyada Otonom Araç Çalışmaları

Otonom araçlar içinde en büyük grup otonom otomobiller olsa da bunlara ek olarak otonom kamyonlar, otobüsler, minibüsler, gemiler ve dronlar da yer almaktadır. 2030 yılına kadar otonom işlevlere sahip 60 milyona kadar otomobilin satılması beklenmektedir (Harantová ve diğ., 2021).

Sürüş ve sürücü davranış modeli konusu 1980'lerden beri gündemde olmuştur. Araştırma makaleleri çoğunlukla sürüş alışkanlıklarına, sürücülerin fiziksel koşullarına ve özellikle navigasyon cihazıyla ilgili olarak birçok sürüş durumundaki tepkilere odaklanmıştır. 2015'ten bu yana araştırma temalarının çoğunda otonom araçların yer almasıyla büyük değişiklikler meydana gelmektedir (Putri, 2021). Yapay zeka, büyük veri, matematiksel yöntemler ve diğer teknolojiler giderek daha popüler olmaktadır. Son yıllarda farklı görsel tanıma ve trafik durumu tahmini görevlerinde en iyi sonuçlar derin öğrenme yöntemleriyle elde edilmektedir. Araç ve yaya algılama, trafik işareti tanıma gibi görsel tanıma çalışmalarının çoğu, otonom sürüşe odaklanmaktadır (Haghighat ve diğ., 2020).

Dünyada ise otonom araçlar ana otomotiv üreticilerinin bu konudaki yenilikçi girişimleri ve yatırımları neticesinde tedarik aşamasına evrilmiştir. Tüm otomotiv üreticileri arasında birbirine paralel şekilde ilerleyen çalışmalar mevcut olup rekabet halinde olduklarından bu alanda hızla gelişme görülmektedir. AB, ABD ve Japonya otonom sürüşü araştıran öncü ülkeler arasında yer almaktadır (Skrickij ve diğ., 2020).

Trafik kazalarının nedenlerinin %85-90'ı insan faktörü olup, otonom araçların insan kaynaklı trafik kazalarının önüne geçmek için bir alternatif olacağı düşünülmektedir (Kim ve diğ., 2021). Otonom araçların gerçek yola benzer bir ortamda tekrarlanan test çalışmalarıyla düzgün çalışıp çalışmadığı doğrulanmalıdır (Kim ve diğ., 2021). Kore Otomobil Test ve Araştırma Enstitüsünde (KATRI) otonom sürüş test şehri olan K-City, otonom sürüş sistemlerini tasarlamak ve doğrulamak için geliştirilmiştir (Kim, Jo ve Son, 2021).

ABD'nin Nevada ve Kaliforniya eyaletleri, otonom araçların otoyollarında test edilmesine izin veren yasalar çıkarmıştır ve sonrasında İngiltere ve Almanya hükümeti de benzer girişimlerde

bulunmuştur. Bu sayede otonom araç teknolojileri hızla gerçeğe dönüşmektedir (Gordon ve Lidberg, 2015; Li ve diğ., 2016).

2.2.3 Türkiye'de Otonom Araç Çalışmaları

2011'de İstanbul Okan Üniversitesinde bir otonom araç geliştirme projesi (OKANOM, 2011) başlatılarak bu araç kendi kendine yolda gidecek şekilde tasarlanmaktadır. Önünde bulunan LIDAR cihazı ile önündeki cisimlerin mesafelerini tespit edebilmekte ve buna göre kendini sürmektedir. Bununla beraber özel şirketlerin çalışmaları ve üniversite-sanayi iş birliği kapsamında İstanbul'da ilk sürücüsüz otomobil test sürüşlerine de başlanmıştır.

2017'de hizmete açılan İstanbul metrosundaki M5 Üsküdar-Çekmeköy hattı, Türkiye'nin ilk sürücüsüz metrosu (Metro İstanbul, 2017) olma özelliğine sahiptir. 20 km uzunluğuna sahip 16 istasyonlu olan hat, bütün istasyonlarında engelli erişimine uygun tasarlanmıştır. Tüm peronlarda Peron Ayırıcı Kapı Sistemi bulunmaktadır.

Geçmişten günümüz literatüre bakıldığında Türkiye'de otonom araç çalışmaları araştırma safhasında hâlen devam etmekte olup üretime geçilen araçlar vardır. Sürücüsüz otomobil ve metronun yanında sürücüsüz otobüs üretimine de başlanmıştır. Bunların neticesinde otonom araç endüstrisinin Türkiye'de de hızla ivme kazanarak gelişmeye devam ettiği görülmektedir.

2.2.4 Otonom Araç Teknolojileri

Geçtiğimiz yıllar içinde otomobil endüstrisi önemli değişimler yaşamıştır. Uyarlanabilir hız sabitleyiciler, park yardım sistemleri, kendilerini sürebilen ve neredeyse hiç doğrudan insan girdisi olmadan gidebilen otonom araçlar buna örnek gösterilebilir. Bu teknolojilerin kitlesel pazar için kullanılabilir hale gelmesiyle ulaşım ağındaki gelişmeler hızla artmaktadır (Fagnant ve Kockelman, 2015). Günümüzde otomotiv endüstrisi, araçları çevrelerinden daha fazla haberdar etmek için çevresinden veri ileten ve alan bir sensör platformu haline getirmektedir. Veri bilimi sayesinde bu tür veriler, trafik kazalarını azaltmak ve trafik verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır.

Sensörler, algılanan olayları veya çevredeki değişiklikleri daha sonraki işlemler için nicel bir ölçümle eşleştiren cihazlardır (Yeong ve diğ., 2021). Konumlandırma sensörleri (GNSS alıcıları), kameralar, Radar, LiDAR, ultrasonik sensörler örnek gösterilebilir (Yeong ve diğ.,

2021). Otonom araçlarda sensörler, yol planlama ve karar verme, çevrenin algılanması ve araçların konumlandırılması için kritik öneme sahiptir (Yeong ve diğ., 2021). Sensör teknolojileri, otonom araçların birçok alanda insan algısından daha iyi performans göstermesini sağlamaktadır (Brummelen ve diğ., 2018). Otonom araçlar bu teknolojiler sayesinde verimlilik, mobilite ve güvenlik anlamında istenilen otonom seviyesine daha yakın olmaktadır (Brummelen ve diğ., 2018).

Araç ağları, veri toplamak için çeşitli sensörlerle birlikte V2V sistemlerinden oluşmaktadır. Herhangi bir ağda olduğu gibi araç ağları da, katmanlı bir mimariye sahiptir fakat geleneksel ağ katmanlı yapıdan farklı olarak açık ve esnek katmanlı bir yapıdadır (Nanda ve diğ., 2019).

Bilgisayarlı Görü (Computer Vision-CV) ve ağ teknolojileri, farklı otonom sürüş görevlerine yönelik çözümler sunmaktadır. CV, bilgisayarın insanlar gibi dijital görüntüleri görselleştirmesini ve anlamasını sağlayan yapay zekanın (AI) bir alt alanıdır. Yüz tanıma, artırılmış gerçeklik, otonom araçlar CV'nin kullanıldığı uygulamalardandır (Juyal ve diğ., 2021). Kentsel ortamlarda, trafik ihlallerinin tespiti ve yol kullanıcılarının (araçlar, motosikletler vb.) belirlenmesi CV ve örüntü tanıma tekniklerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir (Buch ve diğ., 2011).

Bir otonom araç, diğer araçlar ile iletişim ihtiyacı nedeniyle farklı iletişim süreçlerinden sorumlu bileşenlere sahiptir. Otonom araçların verimli çalışması için iletişimin kendisi gerekli olmakla birlikte, siber güvenlik açısından sorunları artırmaktadır (Khadka ve diğ., 2021).

Evrişimli Sinir Ağları (CNN), Yinelemeli Sinir Ağları (RNN) ve Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL), otonom sürüşte uygulanan en yaygın derin öğrenme metodolojilerindendir. CNN'ler esas olarak görüntüler gibi mekansal bilgileri işlemek için kullanılmaktadır. RNN'ler özellikle metin veya video işlemede öne çıkmaktadır (Grigorescu ve diğ., 2020). Sahadaki çalışmalar, derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tekniklerinin ise farklı otonom araçların hareket planlama sorunları için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yöntemlerin ana avantajı, radar veya kamera tabanlı görüntülü bilgileri gibi yapılandırılmamış ham verileri işleyebilmeleridir (Aradi, 2020).

2.2.5 Otonom Sürüş Seviyeleri

Araç sürüş otomasyonu seviyelerini tanımlamak için uluslararası bir standart olan SAE J3016 geliştirilmiştir. Bu standart, Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) gibi uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenmiştir (Sabaliauskaite ve diğ., 2018). Bu standart, sürüş otomasyonu olmamasından (Seviye 0) tam sürüş otomasyonuna (Seviye 5) kadar değişen altı sürüş otomasyon düzeyi hakkında ayrıntılı tanımlar içeren bir sınıflandırma yapmaktadır. Sürüş Otomasyon Seviyeleri (Sabaliauskaite ve diğ., 2018), Tablo 2.1'de gösterilmekte olup Tablo 2.2 (SAE International, 2021) ile beraber SAEJ3016 standardını ve bununla beraber dinamik sürüş görevinin (DDT) bir kısmını veya tamamını sürekli olarak gerçekleştiren araç sürüş otomasyon sistemlerini açıklamaktadır.

SAE Otomasyon Seviyeleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Abraham ve Rabin, 2019):

- SAE sıfırıncı seviyede, insan sürücü her şeyi yapmaktadır.
- SAE birinci seviyede, araçtaki otomatik bir sistem, bazen insan sürücüye sürüş görevinin bazı bölümlerini yürütmesinde yardımcı olabilmektedir.
- SAE ikinci seviyede, insan sürüş ortamını izlemeye devam ederken ve sürüş görevinin geri kalanını gerçekleştirirken, araçtaki otomatik bir sistem aslında sürüş görevinin bazı kısımlarını gerçekleştirebilmektedir.
- SAE üçüncü seviyede, otomatikleştirilmiş bir sistem hem sürüş görevinin bazı kısımlarını gerçekten yürütebilir hem de bazı durumlarda sürüş ortamını izleyebilir, ancak otomatik sistem talep ettiğinde insan sürücünün kontrolü geri almaya hazır olması gerekmektedir.
- SAE dördüncü seviyede, otomatik bir sistem sürüş görevini yürütebilir ve sürüş ortamını izleyebilir ve insanın kontrolü geri almasına gerek yoktur, ancak otomatik sistem yalnızca belirli ortamlarda ve belirli koşullar altında çalışabilmektedir.
- SAE beşinci seviyede, otomatik bir sistem, bir insan sürücünün gerçekleştirebileceği tüm koşullar altında tüm sürüş görevlerini gerçekleştirebilmektedir.

Birinci seviyeden üçüncü seviyede kadar, insan sürücüsüne verilen sürüş görevleri nedeniyle "yarı otonom" olarak kabul edilir (Favarò ve diğ., 2018). Dördüncü ve beşinci seviyenin yani tam otonom araçların piyasaya sürülmesine ve satışının yapılmasına henüz izin verilmemektedir (Favarò ve diğ., 2018).

Tablo 2.1: Sürüş Otomasyon Seviyeleri

Otomasyon Seviyesi (SAE J3016)	**Direksiyon, hızlanma ve yavaşlamanın yürütülmesi**	**Sürüş ortamının izlenmesi**	**DDT yedeğinin performansı**	**Sürüş modları (ortam ve koşullar)**
0: Otomasyon Yok	İnsan sürücü	İnsan sürücü	İnsan sürücü	Yok
1: Sürücü Yardımı	İnsan sürücü ve sistem	İnsan sürücü	İnsan sürücü	Bazı sürüş modları
2: Kısmi Otomasyon	Sistem	İnsan sürücü	İnsan sürücü	Bazı sürüş modları
3: Koşullu Otomasyon	Sistem	Sistem	İnsan sürücü	Bazı sürüş modları
4: Yüksek Otomasyon	Sistem	Sistem	Sistem	Bazı sürüş modları
5: Tam Otomasyon	Sistem	Sistem	Sistem	Tüm sürüş modları

Tüm otonom seviyelerinin, insan sürücüsüne izin verecek şekilde güçlendirilmesi şartıyla, halka açık yollarda test edilmesine izin verilmiştir (Favarò ve diğ., 2018). Bu tür bir düzenleme, Kaliforniya Motorlu Araçlar Departmanı (CA DMV) tarafından AV üreticilerinin Seviye 4 ve Seviye 5 araçlarını test etmesine izin vermek için dayatılmıştır (Favarò ve diğ., 2018). Aracın her zaman güvenli çalışmasını izlemekten sorumlu olan ve otonom bir teknoloji arızası veya herhangi bir acil durumda anında kontrolü devralma yeteneğine sahip olması gereken insan sürücünün rolü vurgulanmaktadır. Bu sayede halkın güvenliğini artırmak hedeflenmektedir (Favarò ve diğ., 2018).

Tablo 2.2: SAE J3016 Sürüş Otomasyon Seviyeleri

<table>
<tr><th></th><th>SAE
Seviye 0</th><th>SAE
Seviye 1</th><th>SAE
Seviye 2</th><th>SAE
Seviye 3</th><th>SAE
Seviye 4</th><th>SAE
Seviye 5</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Sürücü koltuğundaki insan ne yapmalı?</td><td colspan="3">Bu sürücü destek özellikleri devreye girdiğinde sürüyorsunuz - ayaklarınız pedallardan çekilse ve direksiyonu kullanmasanız bile</td><td colspan="3">Bu otomatik sürüş özellikleri devreye girdiğinde, "sürücü koltuğunda" otursanız bile araba kullanmıyorsunuz.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Bu destek özelliklerini sürekli olarak denetlemelisiniz; güvenliği sağlamak için gerektiği gibi yönlendirmeli, frenlemeli veya hızlanmalısınız</td><td>Özellik talep ettiğinde, sürmeniz gerekir</td><td colspan="2">Bu otomatik sürüş özellikleri, sürüşü devralmanızı gerektirmez</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="3">Bunlar sürücü destek özellikleridir</td><td colspan="3">Bunlar otomatik sürüş özellikleridir</td></tr>
<tr><td>Bu özellikler ne işe yarar?</td><td>Bu özellikler, uyarılar ve anlık yardım sağlamakla sınırlıdır</td><td>Bu özellikler sürücüye direksiyon VEYA fren/hızlanma desteği sağlar</td><td>Bu özellikler sürücüye direksiyon VE fren/hızlanma desteği sağlar</td><td colspan="2">Bu özellikler aracı sınırlı koşullarda kullanabilir ve gerekli tüm koşullar sağlanmadıkça çalışmayacaktır</td><td>Bu özellik aracı her koşulda kullanabilir</td></tr>
<tr><td>Örnek özellikler nelerdir?</td><td>• otomatik acil frenleme

• kör nokta uyarısı

•şerit kalkış uyarısı</td><td>• şerit merkezleme

VEYA

• uyarlanabilir hız sabitleyici</td><td>• şerit merkezleme

VE

• aynı anda uyarlanabilir hız sabitleyici</td><td>• trafik sıkışıklığı şoförü</td><td>• yerel sürücüsüz taksi

• pedallar/direksiyon simidi takılı olabilir veya olmayabilir</td><td>•seviye 4 ile aynı, ancak özellik sürülebilir

her yerde her koşulda</td></tr>
</table>

Google ve Apple gibi teknoloji şirketleri ve Tesla Motors gibi daha az geleneksel otomobil şirketleri otomasyon yarışında yerini almaktadır. Şirketler bu alana yatırım yaparken ikinci ve üçüncü seviye otomasyona izin veren yazılım ve mekanikleri araştırıp uygulamaktadır (Auer

ve diğ., 2016). Sürücü bu otomasyon seviyelerinde devralması gereken durumlar (yol çalışması, şerit değiştirme, acil durum araçları gibi durumlar dahil) için tetikte kalmalıdır. Bu yaklaşımla beraber sürücü ve araba arasındaki ilişki sürekli kontrol yerine paylaşılan sorumluluklarla iş birliğine dayalı olarak devam etmektedir (Auer ve diğ., 2016).

Waymo olarak bilinen Google'ın sürücüsüz araba projesi, 2009 yılında başlayarak halka açık yollarda mühendisler tarafından denetimli otonom sürüşleri gerçekleştirilerek hayata geçirilmiştir (Teoh ve Kidd, 2017). Üçüncü seviye otomasyona bir örnek olmasına karşın aynı zamanda çıkarılabilir bir direksiyona sahip ve dördüncü seviye otomasyona ulaşması hedeflenmektedir (Teoh ve Kidd, 2017). Toyota Prius arabalarından oluşan bir filo ile başlanan proje, 2012'de Lexus RX450h SUV ile devam etmektedir (Teoh ve Kidd, 2017). Testler çoğunlukla Kaliforniya Mountain View'de yapılmaktadır (Teoh ve Kidd, 2017). Bu testler başta otoyollarla sınırlı olarak başlanmış fakat şimdi kentsel yollara kaydırılmıştır (Teoh ve Kidd, 2017).

2.2.6 Otonom Sürüş Güvenliği ve Olası Riskler

Emniyet (Safety) ve Güvenlik (Security), otonom araçların iki temel özelliğidir. Bir otonom araç, kazara oluşan arızalardan korunduğunda emniyetli (safe), kasıtlı saldırılardan zarar görmediğinde güvenli (secure) kabul edilmektedir. Bu yüzden, risk analizi için emniyet ve güvenliğin ortak analizi gerekmektedir (Cui ve diğ., 2019). Bu konuda iki uluslararası standart seti bulunmaktadır. Bunlar: SAE J3061 ve ISO 26262. SAE J3061 güvenlik (security) konularını ele alırken, ISO 26262 emniyet (safety) konularıyla ilgilenmektedir (Almeaibed ve diğ., 2021). ISO 26262 standardı, karayolu taşıtlarının işlevsel güvenliğini sağlamak için geliştirilmiştir. Standart, altı aşamayı tanımlamaktadır. Bunlar: yönetim, geliştirme, üretim, çalıştırma, servis ve devreden çıkarma (Henriksson ve diğ., 2018). SAE J3061, siber güvenliği konsept aşamasından üretim, operasyon, kullanım ve devreden çıkarmaya kadar siber fiziksel araç sistemlerine dahil etmek için siber güvenlik açısından her kuruluşun geliştirme süreçlerinde kullanılabilen bir yaşam döngüsü süreci çerçevesi tanımlamaktadır (Steger ve diğ., 2016).

Otonom araçlar, araçların yüksek hızla hareket etmeleri ve trafik katılımcılarının ortaya çıkması/kaybolması nedeniyle belirsiz bir ortamda çalışmaktadır (Sharma ve diğ., 2021). Sürüş davranışının planlanması, yalnızca trafik katılımcılarının mevcut konumlarına ve durumlarına

değil aynı zamanda gelecekteki davranışlarına da bağlıdır (Sharma ve diğ., 2021). Yanlış konum algılama ve yanlış karar verme sonucunda sürüş sırasında çarpışmalar meydana gelebilmektedir (Sharma ve diğ., 2021).

Tam otomatik bir dünya, yazılımın sağladığı sınırsız karmaşıklıkla araçlarda sistemlerin birbirine bağlı olmasını gerektirmektedir (Koschuch ve diğ., 2019). Bu bağlamda ortaya çıkan özellikler, Sistemler Sistemi (SoS) olarak adlandırılmaktadır (Koschuch ve diğ., 2019). Otonom bir araç bilgi güvenliği açısından bakıldığında, yazılım, donanım ve farklı bileşenleri birbirine bağlayan ağların bir kombinasyonu olarak tanımlanabilmektedir (Koschuch ve diğ., 2019). SoS perspektifinden bakıldığında araç ve çevresinin (trafik katılımcıları, altyapı, internet bağlantıları) güvenliğinin sağlanması ele alınması gereken araştırma konularından biridir (Koschuch ve diğ., 2019).

Otonom araçların güvenliği, sensör, işletim sistemi, kontrol sistemi, V2X iletişimi ve sürüş sürecindeki güvenliği ifade etmektedir (Gao ve diğ., 2021):

- Sensör güvenliği, esas olarak, yerleşik sensörler gibi gerçek bileşenlerin güvenliğinden sorumludur. Toplanan sensör verileri, aracın güvenli sürüş durumunda olup olmadığını analiz etmek için kullanılmaktadır.
- İşletim sistemi güvenliği, işletim sisteminin bütünlüğünün ve kullanılabilirliğinin sağlanması ve yetkisiz erişimin engellenmesi anlamına gelmektedir. Birçok otonom araç, Robot İşletim Sistemi (ROS) gibi bir robot işletim sistemine dayalı olarak geliştirilmektedir. ROS, temelde güvenlik düşünülmeden tasarlandığı için güvenlik açısından dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Kontrol sistemi güvenliği, araç ve ortamdan toplanan verilere dayanarak, araç üzerindeki karar verme sisteminin, aracın direksiyon, hızlanma, yavaşlama ve park etme ile ilgili doğru talimatları vermesini sağlamaktadır. Aracın artan dış ara yüzleri yüzünden yeni saldırı yüzeyleri doğmakta ve araç daha savunmasız hale gelmektedir.
- V2X iletişim güvenliği, V2V, V2I, V2P ve V2N iletişimin güvenliğini ifade etmektedir. V2X iletişiminden sağlanan bilgiler ile birlikte araç güvenliği artmaktadır.

Nispeten yeni bir otomasyon türü olarak, otonom araçların yerel trafik pazarına tam olarak girmesi on yıllar alacaktır (Ahmed ve diğ., 2022). Şu anda, araştırmacılar, araba üreticileri ve devlet daireleri, otonom araçların fizibilitesi ve araç güvenliği konularını ele almaktadır ve gelecekteki etkilerini değerlendirmektedir (Ahmed ve diğ., 2022). Otonom araçlarda sürüş güvenliğinin sağlanması noktasında trafik kazalarının önlenmesi ve buna yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir.

2.3 OTONOM ARAÇLARDA TRAFİK KAZALARI

2.3.1 Trafik Kazalarına Genel Bakış

Kaza terimi, genellikle kasıtsız yaralanma, ölüm veya mal hasarına neden olan olaylar dizisinde meydana gelen bir olay olarak tanımlanmaktadır (Dhattarwal ve diğ., 2004). Tüm kaza türleri arasında, motorlu taşıtların neden olduğu kazalar en ciddi görülen kazalar olma eğilimindedir ve bu kaza türünde can kaybının en yüksek olduğu iddia edilmektedir (Dhattarwal ve diğ., 2004). Karayolu Trafik Kazası (RTA) ise, biri herhangi bir tür hareketli araç olması gereken iki veya daha fazla nesne arasında meydana gelen kaza olarak tanımlanmaktadır (Jha ve diğ., 2004).

Dünyada ekonominin gelişmesiyle ve insanların satın alma kabiliyetlerinin artmasıyla araç sayısında ciddi bir artış yaşanmaktadır. Bu da karayolu trafik durumunu daha kötü hale getirmekte, trafik sıkışıklığını artırıp kazalara hatta ölümlere sebebiyet vermektedir (Macheret ve diğ., 2021).

Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) Aralık 2020'da yayınladığı rapora (WHO, 2020) göre 2019'da, ilk 10 ölüm nedeni dünya çapındaki 55,4 milyon ölümün %55'ini oluşturuyordu. Dünya Bankası, dünya ekonomilerini gayri safi milli gelire göre düşük, alt-orta, üst-orta ve yüksek olmak üzere dört gelir grubuna ayırmaktadır. Ülkelerdeki ölüm nedenleri bulaşıcı (bulaşıcı ve paraziter hastalıklar ve anne, doğum ve beslenme koşulları), bulaşıcı olmayan (kronik) ve yaralanmalar olmak üzere üç kategoride toplanabilmektedir. Buradan hareketle gelir gruplarına göre ülkelerde önde gelen ölümlerin nedenleri Tablo 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6'da gösterilmektedir. Tablolarda görüldüğü üzere yol yaralanmaları düşük ve orta gelirli ülkelerde hâlâ önde gelen ölüm nedenidir.

Tablo 2.3: Düşük Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri

Sıra	Ölüm Nedeni	Kategori
1	Yenidoğan Koşulları	Bulaşıcı
2	Alt Solunum Yolu Enfeksiyonları	Bulaşıcı
3	İskemik kalp hastalığı	Bulaşıcı olmayan
4	Felç	Bulaşıcı olmayan
5	İshal Hastalıkları	Bulaşıcı
6	Sıtma	Bulaşıcı
7	Yol Yaralanması	Yaralanma
8	Tüberküloz	Bulaşıcı
9	HIV/AIDS	Bulaşıcı
10	Karaciğer Sirozu	Bulaşıcı olmayan

Tablo 2.4: Alt-Orta Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri

Sıra	Ölüm Nedeni	Kategori
1	İskemik Kalp Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
2	Felç	Bulaşıcı olmayan
3	Yenidoğan Koşulları	Bulaşıcı
4	Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH)	Bulaşıcı olmayan
5	Alt Solunum Yolu Enfeksiyonları	Bulaşıcı
6	İshal Hastalıkları	Bulaşıcı

7	Tüberküloz	Bulaşıcı
8	Karaciğer Sirozu	Bulaşıcı olmayan
9	Şeker Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
10	Yol Yaralanması	Yaralanma

Tablo 2.5: Üst-Orta Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri

Sıra	**Ölüm Nedeni**	**Kategori**
1	İskemik Kalp Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
2	Felç	Bulaşıcı olmayan
3	Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH)	Bulaşıcı olmayan
4	Akciğer Kanserleri	Bulaşıcı olmayan
5	Alt Solunum Yolu Enfeksiyonları	Bulaşıcı
6	Şeker Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
7	Hipertansif Kalp Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
8	Alzheimer Hastalığı ve Bunama	Bulaşıcı olmayan
9	Mide Kanseri	Bulaşıcı olmayan
10	Yol Yaralanması	Yaralanma

Tablo 2.6: Yüksek Gelirli Ülkelerde Önde Gelen Ölüm Nedenleri

Sıra	Ölüm Nedeni	Kategori
1	İskemik Kalp Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
2	Alzheimer Hastalığı ve Bunama	Bulaşıcı olmayan
3	Felç	Bulaşıcı olmayan
4	Akciğer Kanserleri	Bulaşıcı olmayan
5	Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
6	Alt Solunum Yolu Enfeksiyonları	Bulaşıcı
7	Kolon ve Rektum Kanserleri	Bulaşıcı olmayan
8	Böbrek Hastalıkları	Bulaşıcı olmayan
9	Hipertansif Kalp Hastalığı	Bulaşıcı olmayan
10	Şeker Hastalığı	Bulaşıcı olmayan

WHO'nun raporuna (WHO, 2022) göre her yıl karayolu trafik kazaları nedeniyle yaklaşık 1.3 milyon insan ölmektedir. 20 ila 50 milyon arasında insan da ölümcül olmayan yaralanmalara maruz kalmakta ve birçoğu yaralanma sonucu engelli olmaktadır. Trafik kazaları, bireylere, ailelerine ve bütün ülke için ciddi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Kayıplar, çoğu ülke için gayri safi yurtiçi hasılalarının (GSYİH) %3'üne karşılık gelmektedir. Tüm karayolu trafik ölümlerinin yarısından fazlası savunmasız yol kullanıcıları (yayalar, bisikletliler, motosikletliler) arasındadır. Ölümlerin %93'ü düşük ve orta gelirli ülkelerde meydana gelmekle beraber bu ülkelerde dünya araçlarının sadece %60'ı bulunmaktadır. Karayolu trafik yaralanmaları, 5-29 yaş arası çocuklar ve genç yetişkinler için önde gelen ölüm nedenidir. WHO'nun 2018'de yayımladığı Karayolu Güvenliğine İlişkin Küresel Durum Raporunda (WHO, 2018) farklı bölgelerde bulunan ve farklı gelir düzeyine sahip ülkelerdeki trafik kazası ölüm sayıları (bknz. Tablo 2.7) gösterilmektedir.

Karayolu trafik sistemi, insanlar, araçlar, yollar ve çevreden oluşan karmaşık bir dinamik sistemdir. Karayolu trafik sistemi elemanları arasındaki denge bozulduğunda kazalar meydana gelmektedir ve bunun başlıca sebebi insandır (Qiao ve Shang, 2011). Trafik kazaları daha iyi analiz etmek için bu trafik sistemi elemanları arasındaki etkileşimler kapsamlı bir şekilde ele alınmalıdır.

Tablo 2.7: Ülkelere Göre Trafik Kazası Ölüm Sayısı

Ülke	**Nüfus**	**Bölge**	**Gelir Düzeyi**	**Trafik Kazası Ölüm Sayısı**
Türkiye	79 512 424	Avrupa	Orta	7 300
Birleşik Krallık	65 788 572	Avrupa	Yüksek	1 804
Almanya	81 914 672	Avrupa	Yüksek	3 206
Fransa	64 720 688	Avrupa	Yüksek	3 477
Kore	50 791 920	Batı Pasifik	Yüksek	4 292
Çin	1 411 415 275	Batı Pasifik	Orta	58 022
Japonya	127 748 512	Batı Pasifik	Yüksek	4 682
Meksika	127 540 424	Amerika	Orta	16 039
Kanada	36 289 824	Amerika	Yüksek	1 858
ABD	322 179 616	Amerika	Yüksek	35 092

Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü'nün (OECD) açıkladığı rapora (OECD, 2021) göre, Covid-19 kentiçi hareketlilikte önemli değişimlere neden olmuştur ve 2017-2019 ortalamasına kıyasla 2020'de trafik hacminin daha da azalmasına yol açmıştır. Hükümetler tarafından alınan önlemler ve sokağa çıkma kısıtlamaları neticesinde, özellikle pandeminin başlarında, 2020 yılında toplu taşıma kullanımlarında ciddi düşüşler gözlenmiştir (OECD, 2021). Bu bağlamda İtalya, Fransa, Britanya, Meksika, Yeni Zelanda ve Lüksemburg en çok zarar gören ülkelerden olmuştur (OECD, 2021). Bununla beraber pandemide ülkeler arası seyahat yasakları sonucunda havayolu trafiğinde de kayda değer düşüşler yaşanmıştır, bu da havayolu şirketlerini zarara uğratmıştır (OECD, 2021).

2.3.2 İnsan Kontrollü Araçlarda Trafik Kazaları

Karayolu taşımacılığı günümüzde kişisel hareketliliğe olan talep arttığından dolayı birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Taşıma güvenliği, karayolu ağını kullanan bir kişinin güvenli ve emniyetli seyahat edebilmesi için kullanılan yöntem ve önlemleri ifade etmektedir. Trafik kazası, bir araç başka bir araç, yaya, hayvan veya ağaç gibi diğer sabit engellerle çarpıştığında meydana gelmektedir. Karayolu trafik kazaları, dünyanın en büyük halk sağlığı sorunlarından biridir. Trafik kazalarının yaralanma, ölüm, araç hasarı, maddi hasar gibi birçok sonucu olabilmektedir. Bu konuda farkındalığı artırmak ve motorlu taşıtları daha güvenli hale getirmek için çok sayıda girişimde bulunulmuştur. Her türlü girişim ve geliştirilen araç teknolojileri sayesinde güvenlik anlamında iyileşmeler görülmektedir (Kapusta ve Kalašová, 2015).

İstatistiklere göre kazaların %80'den fazlası insan faktörlerinden kaynaklanmaktadır (Xu ve Liu, 2013). Bu nedenle trafikteki insan faktörlerinin incelemesi, trafik kazalarının önlenmesi açısından kilit noktalardan biridir. İnsan faktörlerinden kaynaklanan risklerin analizi, tahmin edilmesi ve potansiyel kazaların belirlenmesi için önemlidir (Xu ve Liu, 2013). Sürücünün yorgunluğu, kazaya neden olan faktörlerin başında gelmektedir (Xu ve Liu, 2013). Bu yüzden sürücünün belli bir sürenin üstünde araç sürmemesi, gerektiğinde dinlenmesi gerekmektedir. İşyerlerinde sürüş psikolojisi ve güvenlik bilinci eğitimleri vermek insanların bu konudaki farkındalığını artıracaktır. Trafik güvenliğinin en önemli parçası olan insan, trafik kazalarının hem üreticisi hem de mağduru konumundadır (Shi, 2011). Faaliyetin dinamik bir parçası olduğu için kazaların ana nedenidir (Shi, 2011). İnsan kaynaklı kazaların nedenleri araç sürücülerine, motorsuz sürücülere ve yayalara göre değişebilmektedir (Shi, 2011). Otonom olmayan araçlarda insan, araçların kontrolörü olduğundan araç sürücülerinden kaynaklı kazalara bakmak öncelik olmalıdır (Shi, 2011).

İnsan faktörünün yanında kazayı etkileyen araç faktörü, yol ve çevre faktörü de vardır. Trafik güvenliğini sağlamak için bütün etki faktörleri birlikte değerlendirilmelidir. Araçların sistem güvenliği, sürüş güvenliğini doğrudan etkilediği için araç faktörlerinin etkisi yüksektir. Örneğin direksiyon sisteminin ve fren sisteminin arızalanması araçların kontrolden çıkmasına sebep olacaktır (Zhang ve diğ., 2010). Aydınlatma sistemlerinin arızalanması, sürücünün gece görüşünü etkileyecektir (Zhang ve diğ., 2010). Yol ve çevre faktörlerinin de etkisi yadsınamaz. Örneğin yol ve virajların yarıçapı, eğimi ve sürtünme katsayısı, sürüşü etkilemektedir (Zhang

ve diğ., 2010). Hassas iklim koşullarında (yağmur, kar, sis, rüzgar) yoldan geçen sürücülerin görüşünde azalma olacaktır ve bu da sürücülerin sık sık hatalı karar vermesine sebep olmaktadır (Zhang ve diğ., 2010).

Trafik kazalarının sayısını azaltmak için öncelikle kazaların nedenlerini karakterize etmek gerekmektedir (Sohn ve Shin, 2001). Bu amaç doğrultusunda çeşitli yol koşullarını temsil eden senaryolar altında kontrollü deneyler gerçekleştirilebilmektedir (Sohn ve Shin, 2001). Kaza faktörlerini belirlemeye yönelik başka bir yaklaşım da trafik kazası kayıtları gibi geriye dönük verilere ulaşmaktır (Sohn ve Shin, 2001).

2.3.3 Otonom Araçlarda Trafik Kazaları

Otonom araçlar, azaltılmış sürücü stresi, artırılmış güvenlik ve yakıt verimliliği, azaltılmış kirlilik gibi birçok fayda sağlamaktadır. Aynı zamanda ulaşımdaki üretkenliği de artırması beklenmektedir. Bu bağlamda sektörde otonom araçlar için çok fazla potansiyel vardır fakat bunun için güvenli bir şekilde uygulamalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Rajasekhar ve Jaswal, 2015). Nitekim uygulamaya geçildiğinde bazı zorluklarla karşılaşılmıştır. Örneğin araç kontrolünün manuel olarak çalışması gereken durumlarda ani ayrılmalar yaşanabilecek ve sürücü davranışı etkileneceği için trafik kazası, yaralanma veya ölüm riski söz konusu olacaktır (Dixit ve diğ., 2016).

Otonom araçların aksiyonları, doğası gereği insan güdümlü araçlardan farklılık göstermektedir. Trafik yasalarını çiğnemeyecek şekilde programlanabilmekle beraber, tepki süreleri daha hızlıdır. Trafik akışını kolaylaştırmak, yakıt ekonomisini iyileştirmek ve emisyonları azaltmak için optimize edilebilirler. Otonom bir araç, taşınması gereken bir yükü veya bir yolcuyu istenen varış noktasına ulaştırabilmektedir (Fagnant ve Kockelman, 2015). Bu açılardan bakıldığında trafik kazalarını azaltma potansiyeli olduğu düşünülebilir.

Otonom araçların kaza şiddetini ve sıklığını en etkili şekilde nerede ve nasıl azaltacağını belirlemek için geçmiş araç kaza verilerinin analiz edilmesi gerekmektedir (Rowley ve diğ., 2018). Otomasyon, meydana gelen kazaların sayısını azaltma ve kaza şiddetini düşürme potansiyeline sahip olsa da yadsınamayacak miktarda kaza olmaktadır ve bunun önüne geçmek için veri bilimini kullanmak faydalı olacaktır.

Otonom araçların, insan kontrollü araçların alamadığı birçok bilgiyi alması beklenmektedir ve bu sebeple, aralarında bazı sürüş farklılıkları olacaktır. Bu fark kazalara neden olabilecektir (Furukawa ve Kiyohara, 2019). Aynı ortamı paylaşacak otonom araçlar ve insan kontrollü araçların birlikte kurgulandığı senaryolar yaratıp olası problemler göz önünde bulundurulmalıdır. Otonom araçların, karışık araç ortamında tehlikeli durumlara yol açması özellikle ilk ticarileşmesi ve yayılması esnasında insanların güveni açısından sorun yaratması muhtemeldir.

Trafik akışında fazlaca teorik fırsatlara sahip otonom araçlar, araştırma safhasından uygulamaya geçilmiştir. Kent içi yollarda testleri yapılmaktadır ve çeşitli problemlerle karşılaşılmaktadır. Örneğin bu problemlerden biri otonom araçların etkili ve sağlam bir siber güvenlik çerçevesine ihtiyacı olmasıdır (Khalid Khan ve diğ., 2022). Otonom araçların siber güvenliği, trafik güvenliğinin gelişmekte olan bir alanıdır (Khalid Khan ve diğ., 2022). Ancak siber güvenlik gibi birçok problemin çözüme kavuşması ve ardından otonom araçların ulaşımın bir parçası olmasının bir süre daha zaman alacağı beklenmektedir.

2.3.4 Trafik Kazalarında Risk Faktörleri

Trafik problemi hâlâ günümüzün en büyük problemlerinden biridir. Ayrıca oldukça sık görülen bir ölüm nedenidir. Trafik kazalarının çoğunluğunun insan kaynaklı olduğu düşünüldüğünde otonom araçların varlığı trafik kazalarını önemli ölçüde azaltacak ve güvenli sürüş sağlayacaktır.

Karayolu güvenliğinin iyileştirilmesi, risk faktörlerinin ve riskleri azaltan müdahalelerin belirlenmesini içermektedir (Makarova ve diğ., 2018). Trafik kazalarının faktörlerini belirlemek ve analiz etmek, yol güvenliğini artırmada etkili bir yöntemdir (Makarova ve diğ., 2018). Karayolu kazalarıyla ilgili faktörleri belirlemeye yönelik yöntemlerden biri, faktörleri insan, araç ve çevresel nedenlere – çarpışma öncesi, çarpışma ve çarpışma sonrası – ayıran Haddon Matrisi adı verilen bir modeldir (Makarova ve diğ., 2018). Söz konusu Haddon Matrisi (Peden ve diğ., 2004), Tablo 2.8'de yer almaktadır.

Tablo 2.8: Haddon Matrisi

		KAZA FAKTÖRLERİ		
AŞAMA		**İNSAN**	**ARAÇ**	**ÇEVRE**
Kaza öncesi	Kazanın önlenmesi	Bilgi Tutumlar Bozulma Polis yaptırımı	Yola elverişlilik Aydınlatma Frenleme Taşıma Hız yönetimi	Yol tasarımı ve yol düzeni Hız limitleri Yaya tesisleri
Kaza anı	Kaza sırasında yaralanmanın önlenmesi	Kısıtlamaların kullanımı Bozulma	Yolcu kısıtlamaları Diğer güvenlik cihazları Çarpışmaya karşı koruyucu tasarım	Çarpışmaya karşı koruyucu yol kenarındaki nesneler
Kaza sonrası	Yaşamın sürdürülmesi	İlk yardım becerisi Sağlık görevlilerine erişim	Erişim kolaylığı Yangın riski	Kurtarma tesisleri Tıkanıklık

Haddon Matrisinde çevreyle ilgili faktörler arasında yol durumu, yol türü, kavşak, otoyol türü ve yol düzeni yer almaktadır. Ayrıca hava ve aydınlatma koşullarını da içermektedir. Araçla ilgili faktörler araç durumu ve araç tipini ifade etmektedir. İnsanla ilgili faktörler arasında sürücülerin yaşı, cinsiyeti ve sürüş tarzı bulunmaktadır. Sürücünün uyanıklık durumu veya sürücü sersemliği, yollardaki diğer araçlarla nasıl etkileşime girdiklerini etkilediğinden çarpışma potansiyelini etkilemektedir. Trafik kaza faktörleriyle ilgili mevcut literatürde birçok araştırma mevcuttur. Bu çalışmalardan elde edilen en önemli çıkarım, trafik kazalarının araç faktörleri, yolun özellikleri ve çevre faktörleri gibi çok sayıda faktör arasındaki karmaşık etkileşimlerin bir sonucu olduğudur (Lee ve Wu, 2021).

Karayolu trafik kazalarında çarpışma öncesi, çarpışma anı ve çarpışma sonrasında birbiriyle bağlantılı çoklu faktörler ele alınarak mevcut önlemler konusunda eksikler giderilmeli ve iyileştirme yapılmalı, bunun yanında gerekirse yeni önlemler alınmalıdır. Trafik kazası yükünü

azaltmak için geliştirilmesi gereken temel alanlar belirlenmelidir. Yüksek riskli gruplar arasında davranış değişikliği sağlamaya yönelik toplu noktalarda ve metrolarda yoğun saatlerde kazaların önlenebilmesine uygun politikalar yapılmalıdır (Rustagi ve diğ., 2018).

2.3.5 Trafik Kaza Simülasyonları

Karayolu trafiği, özellikle kentsel alanlarda giderek artmakta ve kentiçi ulaşımda tıkanıklık yaratmaktadır. Bu tip sorunlarla başa çıkmak için ulaşım planlaması yapılırken simülasyon modellerine ihtiyaç duyulmaktadır (Saidallah ve diğ., 2016). Genel olarak simülasyon, gerçek dünyanın bir bölümünün zaman içinde dinamik bir temsili olarak tanımlanmaktadır. Bir eylem planını uygulamadan önce test edip değerlendirmek için kullanılan bir araçtır (Saidallah ve diğ., 2016). Örneğin ulaşım ağlarındaki bağlantılar, seyahat süreleri, kirlilik ve enerji tüketimi, tıkanıklık gibi ölçütler simüle edilmektedir. Trafik modellemesinde bir ulaşım sistemini oluşturan çeşitli bileşenlerin dinamik davranışlarına odaklanılmaktadır. Mikro simülasyon, uygulanan en ayrıntılı trafik simülasyonu olmakla beraber araçlar arasındaki tüm dinamik etkileşimleri yeniden oluşturabilen bir yaklaşımdır (Astarita ve Giofré, 2019). AUS dahil birçok ulaşım simülasyon uygulamasında, her bir yolcunun davranışsal tepkisi önemlidir. Bu bağlamda her yolcuyu simüle etmenin yararlı olacağı görülmektedir. Altyapıda herhangi bir değişikliğin etkisi, kritik olarak insanların davranışlarına bağlıdır. Bu yüzden, modellerde insan davranışları anlamlı bir şekilde ele alınmalıdır. Her yolcuyu mikroskopik bir varlık olarak ele almak ve bu varlığın sisteme tepkisini doğrudan modellemek yaklaşımlardan biridir. Bu yaklaşıma Çoklu Etmen Simülasyonu (MASim) denilmektedir (Balmer ve diğ., 2004).

Otomatik veya otonom araçlar için de simülasyonlar, karar verme modüllerinin geliştirilmesi için önemlidir (Bacchiani ve diğ., 2019). Kavşağa giriş çıkışlarda sistemin eğitilmesi, akıllı sürücü modellerinin oluşturulması, diğer araçlarla çarpışmadan kaçınma, şerit tutma ve şerit değiştirme manevralarının öğrenilmesi bu modüllere örnek olarak gösterilebilir (Bacchiani ve diğ., 2019). Otonom araçların halka açık yollarda yerini alması kademeli olarak gerçekleşeceğinden bu araçların insanlarla birlikte yaşaması ve iletişimde olması gerekmektedir. Bu iletişimin gerçeğe en yakın olması beklenmektedir. Böylelikle insan sürücülerinin aracın otonom olup olmadığı üzerine düşünmesi gerekmez (Bacchiani ve diğ., 2019). Bu duruma yönelik tipik çözümlerden biri Derin Öğrenme teknikleri gibi makine öğrenmesi yaklaşımlarının kullanılmasıdır. Bu tür makine öğrenmesi algoritmalarının eğitilmesi için simülasyon ortamları önemli rol oynamaktadır (Bacchiani ve diğ., 2019).

Vissim ve Sumo, en popüler mikroskobik trafik simülatörlerdendir (Bacchiani ve diğ., 2019). Bunların yanında MATSim, MITSIMlab, AIMSUN gibi birçok simülasyon yazılımı daha bulunmaktadır (Saidallah ve diğ., 2016). Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR), 2001 yılında açık kaynaklı trafik simülasyon paketi Kentsel Hareketlilik Simülasyonu (SUMO)'nun geliştirilmesine başlamıştır (Behrisch ve diğ., 2011). SUMO, çeşitli girdi kaynaklarından farklı kaynak formatlarını okuyabilen, uzaktan kumanda arabirimi dahil olmak üzere tüm şehirlerin yanı sıra tek kavşaklar için de kullanılabilen yüksek performanslı bir simülasyondur (Behrisch ve diğ., 2011). MATSim ise, ETH Zürih tarafından geliştirilen bir simülatördür ve gün boyunca geniş bir bölgenin trafiğini simüle edebilmektedir (Saidallah ve diğ., 2016). Vissim, simülasyon programı da PTV tarafından geliştirilmiş, kullanıcıların binek otomobiller, otobüsler, kamyonlar, raylı araçlar, yayalar, bisikletliler dahil çok çeşitli araç türlerini tanımlamasına fırsat tanıyan çok modlu bir simülatördür (Saidallah ve diğ., 2016). Vissim'i diğer simülasyon modellerinden ayıran en önemli özelliği Bileşen Nesne Modeli (COM) programlama ara yüzü sayesinde kullanıcıların C++, Python gibi programlama dilleriyle kendi uygulamalarını geliştirebilmeleridir (Saidallah ve diğ., 2016).

2.3.6 Otonom Araç Kazalarının Hukuki ve Etik Boyutu

Ulaşım sektöründe otonom araç etiği konusu oldukça yeni çalışma alanlarından biridir ve son yıllarda oldukça fazla ilgi görmektedir. Yapılan etik çalışmaları, geleneksel olarak, ulaşım projelerinde maliyet-fayda analizi veya fiyatlandırmada adalet gibi konular etrafında dönmüştür. Günümüzde otonom sürüşün ortaya çıkışıyla beraber, yeni etik sorunlar tartışılmaya başlanmıştır (Martinho ve diğ., 2021).

Trafik kazaları her gün olmakta ve yine de kaza incelemeleri, kayıtları ve ölçümleri, insan hatası nedeniyle kesinlikten ve veri bütünlüğünden uzaktır. Bu eksiklikler ve yapılan hatalar hukuki ihtilaflara yol açmakta ve zaman ve para kaybına neden olmaktadır. Trafik kazası soruşturmalarında genel hizmet kalitesini iyileştirebilmek ve inceleme süresini kısaltmak adına daha güvenilir ve kesin verilere ihtiyaç duyulmaktadır (Tai ve diğ., 2019).

Bazı kazalarda, otonom araçların zor etik kararlar vermesi gerekecektir. Örneğin, otonom araç yoldan çıkarak ve yoldan geçen bir yayayı feda ederek diğer yayaların zarar görmesini engelleyebilir veya yoldan geçen bisikletlileri kurtarmak için kendi yolcusunu feda etmek zorunda kalabilir. Otonom araçların bu tür varsayımsal durumlarda ne yapılacağına ilişkin karar

kuralları belirlenmelidir. Bu araçları kontrol eden algoritmaların, kaza anında kendisine rehberlik eden ahlaki ilkeleri taşıması gerekmektedir (Bonnefon ve diğ., 2016).

Otonom araç sistemlerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesinde yol testi ve altyapı geliştirme temel direkler olarak algılanır. Bunu gerçekleştirebilmek için yasal düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. ABD'nin Kaliforniya eyaleti, ilgili konuda hukuki düzenlemeler ve zorunluluklar getirerek otonom araç sistemlerinin geliştirilmesinin ön saflarında yerini almıştır. CA DMV, otonom araç üreticilerine halka açık yollarda test için izin vermiştir. Bununla beraber otonom araç üreticilerine maddi hasara, fiziksel yaralanmaya veya ölüme sebep olan herhangi bir çarpışmayı olaydan sonra iki ayrı rapor (devreden çıkma raporu ve kaza raporu) halinde belgelendirilmesini zorunlu tutmuştur. Bu raporları içeren veri setleri yapılan otonom araç çalışmalarına ışık tutmaktadır (Alambeigi ve diğ., 2020).

Başta Kaliforniya olmak üzere dünyanın her yerinde otonom araçlarla ilgili elde edilen veriler, araştırmacılara önemli referanslar olarak hizmet etmektedir ve otonom araç kazalarına ilişkin sahip olunan bilgi seviyesini ilerletmektedir.

2.4 OTONOM ARAÇ KAZALARININ LİTERATÜRDEKİ MEVCUT DURUMU

Otonom araç çalışmalarıyla ilgili mevcut literatür özetine (Bkz: Tablo 2.9) bakıldığında otonom araç kazalarına ilişkin yapılan çalışmalar ve kullanılan yöntemler görülmektedir. Otonom araç kazaları, dünyanın dört bir yerinden araştırmacılar ve bilim insanları tarafından üzerinde çalışılan popüler konulardan biridir. Otonom araç kazalarına farklı açılardan yaklaşarak, çeşitli metodolojiler ile kazaya neden olan sorunlara ışık tutulmaktadır. Bu bağlamda araç kazalarının önüne geçmek için çeşitli bulgular ortaya koyulmuştur. Yapılan çalışmalar, gelecek çalışmalar için yol gösterici olmaktadır.

Tablo 2.9: Literatürdeki Otonom Araç Çalışmaları

Kaynak	**Konu/Kapsam**	**Yöntem**	**Sonuç**
Wang ve Li (2019a)	Otonom araçların devreden çıkarılmasının ve bunu etkileyen faktörlerin, istatiksel modelleme ve sınıflandırma ağacını içeren çoklu istatiksel modelleme yaklaşımları kullanılarak nicel olarak araştırılması	İstatiksel Modelleme Sınıflandırma Ağacı	Devralma süresinin kent içi karayolunda, otobandan önemli ölçüde daha kısa olduğu bulunmuştur. Bir planlama sorunu nedeniyle gerçekleşen devreden çıkarılmanın, algı veya kontrolden kaynaklanan devreden çıkarılmayla kıyaslandığında sürüşü devralmak için daha kısa zamana ihtiyaç duyduğu görülmüştür.
Alambeigi ve diğ. (2020)	Otomasyon ve insan sürücüleri arasındaki önemli güvenlik sorunlarını belirlemek ve ele almak için otonom araç kazalarının, konu modelleme yöntemi ile analiz edilmesi	Olasılıksal Konu Modellemesi (Probabilistic Topic Modeling)	Konu modelleme analizi ile, manuel geçişler, soldan geçilirken yandan gerçekleşen kazalar ve sinyalize kavşaklarda dönerken arkadan gerçekleşen kazalar gibi temalar belirlenmiştir. Bu bulgular sonucunda, gelecekteki ampirik çalışmalarda sürücü tarafından başlatılan kontrol geçişlerinin, sollama senaryolarının, karmaşık trafik durumlarının ve motosikletlerle etkileşimlerin araştırılması gerektiği gösterilmiştir.

Boggs ve diğ. (2020)	Otomatik araçlarda devre dışı bırakma başlatıcısının (insan veya otomatik sürüş sistemi) ve başlatıcının çevre ile ilişkisinin, ayrılma nedenlerinin ve test sisteminin olgunluğunun ikili lojistik regresyon yöntemiyle incelenmesi	İkili Lojistik Regresyon	Rastgele parametreli ikili logit modelinden elde edilen ampirik sonuçlarla, mevcut verilerle otonom sürüş sistemi tarafından başlatılan devre dışı bırakmalara katkıda bulunan faktörlere ilişkin ilk öngörüler sağlanmıştır. Sokakların ve yolların, otoyollara ve eyaletler arası yollara kıyasla otonom sürüş sistemi tarafından devre dışı bırakılma olasılığının daha düşük olduğu bulunmuştur.
Ye ve diğ. (2021)	Otonom araçları içeren karayolu trafik yaralanmalarının modellerinin ve ilişkili faktörlerinin incelenmesi ile birlikte otonom sürüşün halk sağlığı üzerindeki etkileri ve zorluklarının tartışılması	İkili Lojistik Regresyon Wald Testi $\chi 2$ Analizi Fisher'in Kesin Testi	Otonom araçlar, karayolu trafik yaralanmalarını önemli ölçüde azaltma potansiyeli göstermemiştir. Bu yüzden, yol güvenliği için zayıf aydınlatmanın iyileştirilmesi, işe gidip gelme trafiğinin ve savunmasız yol kullanıcılarının, daha akıllı yollar ve mevzuat ile düzenlenmesi güçlendirilmelidir.
Sinha ve diğ. (2021)	Otonom araç teknolojisindeki otomatik ayrılmaların nedenlerinin makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde	Topluluk Öğrenmesi (Ensemble Learning) /	Çalışmada, yalnızca maddi hasar ve maddi dışı hasar kazaları araştırılmıştır. Yol kenarına park etme ve tek yönlü yolların uygulanmasının önemli olduğu bulunmuştur.

	değerlendirilmesi ve otonom araçları içeren kaza yaralanma modelinin oluşturulması	Bagging Algoritması	Ek olarak, sınırlı veri noktaları nedeniyle daha fazla kaza verisinin toplanması gerektiği bulunmuştur.
Zhang (2021)	Otonom araçların devreden çıkma nedenleri ve etkileri arasındaki önemli ilişkilerin ortaya çıkarılması, modellenmesi ve analiz edilmesi için doğal dil işleme ve derin aktarım öğrenimi kullanılarak ölçeklenebilir bir uçtan uca ardışık düzen oluşturulması	Doğal Dil İşleme Derin Transfer Öğrenimi	Aktarım öğrenimine dayalı oluşturulan uçtan uca işlem hattında kullanılan en iyi modelin, transfer öğrenimi uygulamasının ürünü olduğu bulunmuştur. Sebepleri daha iyi anlamak için hem insan operatör güvenini, otonom araç sistem güvenliğini hem de çevresel faktörleri kapsayan bir sınıflandırma tanıtılmıştır.
Ashraf ve diğ. (2021)	Otonom araç kazalarının çarpışma öncesi kurallarının karar ağacı ve birliktelik kuralı yöntemleriyle elde edilmesi ve en sık görülen kaza türlerinin hangi şartlar altında gerçekleştiğinin ortaya koyulması	Karar Ağacı Birliktelik Kuralları Analizi	Oluşturulan en önemli kurallarla, yolları otonom araç olmayanlarla paylaşan otonom araçların zorlukları belirlenmiştir. Kazaların çoğunluğunun arkadan çarpmalar olduğu ve ağırlıklı olarak kavşaklarda meydana geldiği bulunmuştur. Bununla birlikte otonom araç kazalarına dair detaylı bir analiz ortaya konulmuştur.
Kutela ve diğ. (2021)	Savunmasız yol kullanıcılarının otonom araç kazalarına doğrudan	Destek Vektör Makinesi (SVM)	Bu çalışmada savunmasız yol kullanıcıları ile ilgili otonom araç kaza modellerini çıkarmak

	veya dolaylı katılımını araştırmak ve ilgili performans ölçütlerini karşılaştırarak dört sınıflandırıcı arasından en iyi performans gösteren sınıflandırıcının belirlenmesi	Naive Bayes (NB) Rastgele Orman (RF) Sinir Ağları (NN)	için metin madenciliği yaklaşımı ve dört sınıflandırıcı kullanılmıştır. Savunmasız yol kullanıcılarının olduğu ve olmadığı kazaları karşılaştırmak için uygulanmıştır. Savunmasız yol kullanıcılarını içeren kazaların nispeten büyük bir yüzdesinde savunmasız yol kullanıcılarının hatalı olduğu bulunmuştur.

Akademik literatürdeki otonom araç çalışmalarına (bknz: Tablo 2.9) bakıldığında şu çalışmaların yer aldığı görülebilir: otonom araçların devreden çıkarılmasında etkili olan faktörlerin belirlenmesi (Wang ve Li, 2019a), otomasyon ve insan sürücüleri arasındaki önemli güvenlik sorunlarını belirlemek için otonom araç kazalarının analiz edilmesi (Alambeigi ve diğ., 2020), otomatik araçlarda devre dışı bırakma başlatıcısının çevre ile ilişkisinin ve ayrılma nedenlerinin ele alınması (Boggs ve diğ., 2020), otonom araç karayolu trafik yaralanmalarının modellerinin ve ilişkili faktörlerinin incelenmesi (Ye ve diğ., 2021), otonom araç teknolojisindeki otomatik ayrılmaların nedenlerinin ortaya konması (Sinha ve diğ., 2021), otonom araçların devreden çıkma nedenleri arasındaki önemli ilişkilerin ortaya çıkarılması, modellenmesi ve analiz edilmesi (Zhang ve diğ., 2021), otonom araç kazalarının çarpışma öncesi kurallarının elde edilmesi ve en sık görülen kaza türlerinin hangi şartlar altında gerçekleştiğinin ortaya koyulması (Ashraf ve diğ., 2021), savunmasız yol kullanıcılarının otonom araç kazalarına doğrudan veya dolaylı katılımını araştırmak (Kutela ve diğ., 2021). Buradan hareketle, literatürde otonom araç kazalarına dair araç hasarına bağlı olarak ilgili kaza faktörlerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine ilişkin bir boşluk olduğu değerlendirilebilir.

Tablo 2.10: Literatürdeki Otonom Araç Kaza Faktörleri

Kaynak	**Sınıflandırma**	**Değişkenler**
Wang ve Li (2019b)	Performans/Bağımlı Değişkenler	Kaza Şiddeti ▪ Ölümcül ▪ Kalıcı yaralanma ▪ Kalıcı olmayan yaralanma ▪ Olası yaralanma ▪ Yaralanma/maddi hasar yok Çarpışma Türü ▪ Arka uç ▪ Yan ▪ Açısal ▪ Yoldan çıkma
	Açıklayıcı Değişkenler/Potansiyel Katkıda Bulunan Faktörler	Hatalı Taraf ▪ Otonom aracın hatası ▪ Otonom aracın hatası değil Yayaya/bisikletliye yol vermenin kazayla sonuçlanıp sonuçlanmadığı ▪ Yayaya/bisikletçiye yol verme nedeniyle kaza oldu ▪ Yaya/bisikletliye yol vermeksizin kaza oldu Karayolu özellikleri ▪ Otoyol ▪ Sinyalize kavşak ▪ Dur/Yol ver işaretleri veya davranışları ▪ Şerit değiştirme

		▪ Sollama
Sinha ve diğ. (2021)	-	Araç sayısı Kavşak ▪ Kaza kavşakta oldu ▪ Kaza kavşakta olmadı Sinyal ▪ Sinyal var ▪ Sinyal yok Park Etme Hükmü ▪ Park imkanı var ▪ Park imkanı yok/bilinmiyor Mod ▪ Otonom ▪ Geleneksel Arıza ▪ Araç arızası var ▪ Araç arızası yok Otonom aracın durumu ▪ Hareket halinde ▪ Duruyor Diğer aracın durumu ▪ Hareket halinde ▪ Duruyor Araç türü ▪ İki tekerlekli (bisiklet, scooter) ▪ Kompakt araba

		▪ Orta boy araba ▪ Kamyon/otobüs/römork Çarpışma türü ▪ Doğrudan ▪ Yan ▪ Arka uç ▪ Diğer Kavşak türü ▪ Düz yol ▪ Y tipi kavşak ▪ T tipi kavşak ▪ Çapraz kavşak ▪ Karmaşık kavşak

Otonom araçlarda trafik kaza faktörlerinin belirlenmesi açısından akademik literatürdeki trafik kaza faktörleri (bknz. Tablo 2.10) irdelenmiştir. Tablo 2.10'dan hareketle, otonom araç kazalarını çalışan araştırmacılar tarafından kaza yapan araçların ve kazanın meydana geldiği çevrenin özellikleri değişken olarak alınmıştır. Çalışmalar arasında çarpışma türü gibi ortak kaza faktörleri yer alsa da çalışmalar çoğunlukla farklı kaza faktörleri kullanılarak yürütülmüştür. Öte yandan, literatürdeki çalışmalarda (bknz. Tablo 2.9) trafik kaza faktörlerinin ağırlıklı olarak araçsal ve çevresel olarak ele alındığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, bu araştırmada kullanılan değişkenlerin araçsal ve çevresel kaza faktörleri olmasından ötürü literatürdeki kaza faktörlerini kapsadığı değerlendirilebilir. Literatürdeki mevcut boşluk göz önünde bulundurularak bu tez çalışmasında otonom araç kazalarına dair araç hasarına bağlı olarak ilgili kaza faktörlerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine odaklanılmıştır. Buna ilişkin yapılan araştırmanın detayları izleyen bölümde yer almaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI

3.1.1 Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, otonom araçlarda meydana gelen kazaları daha iyi anlayabilmek için kazaların özelliklerini ve buna neden olan kaza faktörlerini ve bu faktörlerin aralarındaki ilişkileri incelemektir. Tüm önemli kaza faktörleri arasındaki gizli ilişkileri belirlemek çalışmanın diğer bir amacıdır. Özellikle otonom araçlardaki kaza hasar seviyesi üzerinde önemli olan kaza faktörlerinin belirlenmesi ve önem seviyelerinin mukayeseli olarak ortaya konması çalışmanın öncelikli amaçları arasında yer almaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara dayalı olarak, otonom araçlarda trafik kazalarının önüne geçilmesi ve oluşacak hasarın azaltılması için alınacak tedbirlere yol gösterici çıktılar sunulması araştırmanın dolaylı bir amacı olarak görülmektedir.

3.1.2 Araştırmanın Literatüre Katkısı

Otonom araçlarla ilgili kaza araştırmaları sınırlı olmakla birlikte kapsamlı analiz sayısı çok azdır. Henüz literatür açısından yeterli olgunluğa erişmemiş bu alanda yapılan her türlü çalışma bu alana büyük katkı sağlayabilecektir. Literatürdeki önemli bir boşluk, otonom araç kazalarının ve bununla ilişkili kaza faktörlerinin detaylı bir biçimde anlaşılmasıdır. Bu çalışmada, bu literatür boşluğu ele alınarak otonom araç kaza raporları incelenmiş ve kaza karakteristikleri ortaya konmuştur. Bu tez çalışmasının hem otonom araç kazalarına dair araç hasarına bağlı olarak en sık görülen kaza faktörlerini ortaya koyması hem de bu faktörleri önem seviyesine göre sıralaması yönünden diğer çalışmalardan farklılık göstermektedir ve daha spesifik bir sonuç ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmanın, otonom araç kazalarını ve etkilerini daha iyi anlamaya yardımcı olacağı düşünülmektedir.

3.2 ARAŞTIRMANIN TASARIMI

3.2.1 Araştırma Yöntemi

Keşifsel araştırma, keşif gibi, ön veya erken aşamalarda olan bir araştırma türüdür. Tipik olarak bir araştırmacı yeni bir ilgi alanını incelediğinde veya çalışmanın konusu nispeten yeni olduğunda ortaya çıkmaktadır. Bir olgunun var olup olmadığını belirlemek için keşif araştırması uygun olmaktadır (Casula ve diğ., 2021).

Bu çalışmanın tasarım sürecinde elde edilmek istenen bilginin türü açısından keşifsel bir yol izlenmiştir. Otonom araçların karıştığı trafik kazaları hakkında daha fazla bilgi sahibi olabilmek, ele alınması gereken sorunları ortaya koyabilmek ve kaza verisini yorumlayabilmek adına keşifsel araştırma yolu seçilmiştir. Aynı şekilde, yapılan keşifsel araştırma sayesinde araştırma problemi detaylı bir şekilde tanımlanmış, gelecek araştırmalar için gerekli ön bilgi sağlanmıştır.

3.2.2 Veri Toplama Yöntemi ve Süreci

İkincil veriler, belirli bir araştırma amacı ile toplanmayan verilerdir (Sørensen ve diğ., 1996). Bu tür veriler genellikle yönetim, talep, idare, planlama, faaliyet değerlendirmesi gibi nedenlerle toplanmaktadır (Sørensen ve diğ., 1996). İkincil veri kaynakları zaten var olduklarından dolayı, çalışmaya harcanan zamanın, birincil veri toplamayı kullanan çalışmalara harcanan zamandan önemli ölçüde daha az olması en temel avantajıdır (Sørensen ve diğ., 1996). Bunun yanında, birincil verilerin toplanmasıyla karşılaştırıldığında, veri israfı gibi maliyetler de önemli ölçüde azalmaktadır (Sørensen ve diğ., 1996).

Bu çalışmada ikincil veriler kullanılmıştır. Araştırma amacına göre literatürdeki geçmiş yıllardan günümüze kadar mevcut otonom araç kaza raporları taranmıştır. CA DMV Kurumu tarafından sağlanan otonom araç kaza raporları (CA DMV, 2022) araştırmanın veri kaynağı olarak belirlenmiştir. İlgili veri bu raporlardan sağlanarak araştırma sürecine başlanmıştır. Bu araştırma konusu düşünüldüğünde birincil veri elde etmek için otonom araca ve çeşitli sensörlere sahip olmak, bunun yanında da trafikte test edip veri toplamak için gerekli yasal izinlere sahip olmak gerekmektedir. Bu bağlamda finansal, zamansal ve bürokratik açıdan birincil veriyi elde etmek oldukça zorlu bir süreçtir. Bu nedenlerden ötürü araştırmada ikincil veri tercih edilmiştir.

3.3 ARAŞTIRMANIN DEĞİŞKENLERİ

Daha önce Tablo 2.5'te belirtildiği üzere, kaza faktörleri çoğunlukla insan, araç ve çevre kaynaklı olmak üzere üç kategoride incelenmektedir. Bu çalışmada kaza faktörleri, araç kaynaklı ve çevresel kaynaklı olarak iki kategoride incelenmiştir. İnsan faktörü bir değişken olarak çalışmaya dahil edilmemiştir. Çünkü çalışma temelde otonom araç teknolojilerinde öncelikle araç ve çevresel kaynaklı problemlerin tespit edilmesi ve iyileştirme yapılması üzerine odaklanmaktadır. Bu bağlamda kazaların araç ve çevresel kaynaklı faktörleri değerlendirilmiş ve kazalardaki en önemli faktörler belirlenmiştir. Her bir kaza faktörü çalışmanın değişkenlerini oluşturmaktadır. İki kategoride incelenen kaza faktörleri, izleyen bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.3.1 Çevresel Kaza Faktörleri

Çevresel kaza faktörleri hava durumu, aydınlatma, yol yüzeyi ve kazaya dahil olan yol kullanıcı olmak üzere dört kategoride incelenmiştir. Bu dört kategori sırasıyla yedi, üç, dört ve üç olmak üzere toplam 17 alt kategoride çalışmanın değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Tablo 3.1: Değişken Olarak Belirlenen Çevresel Kaza Faktörleri

Değişken	**Alt değişken**
Hava durumu	▪ Açık ▪ Bulutlu ▪ Yağmurlu ▪ Karlı ▪ Sisli ▪ Diğer ▪ Rüzgârlı
Aydınlatma	▪ Gün ışığı ▪ Alacakaranlık/şafak ▪ Karanlık
Yol yüzeyi	▪ Kuru

	▪ Islak ▪ Karlı/buzlu ▪ Kaygan (çamurlu, yağlı vb.)
Kazaya dahil olan yol kullanıcı	▪ Yaya ▪ Bisikletli ▪ Diğer

3.3.2 Araç Kaynaklı Kaza Faktörleri

Araç kaynaklı kaza faktörleri sürüş modu, kaza yapan aracın çarpışmadan önceki hareketi, diğer aracın çarpışmadan önceki hareketi olmak üzere üç kategoride incelenmiştir. Bu üç kategori sırasıyla iki, yedi ve yedi olmak üzere toplam 16 alt kategoride çalışmanın değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Tablo 3.2: Değişken Olarak Belirlenen Araç Kaynaklı Kaza Faktörleri

Değişken	**Alt değişken**
Sürüş modu	▪ Otonom mod ▪ Manuel mod
Kaza yapan aracın çarpışmadan önceki hareketi	▪ Durmuş ▪ Düz ilerleme ▪ Dönüş yapma (sağ, sol, U) ▪ Yavaşlama/durma ▪ Şerit değiştirme ▪ Park etmiş ▪ Diğer
Diğer aracın çarpışmadan önceki hareketi	▪ Durmuş ▪ Düz ilerleme ▪ Dönüş yapma (sağ, sol, U)

	▪ Yavaşlama/durma ▪ Şerit değiştirme ▪ Park etmiş ▪ Diğer

3.4 ARAŞTIRMANIN KISITLARI

3.4.1 Veri Kısıtı

Karayolu kaza verileri içinde otonom araçlara ait kaza verisinin nispeten küçük bir örneklem boyutuna sahip olması çalışmanın daha geniş kapsamlı olmasının önündeki en büyük engellerden biridir (Lee ve Wu, 2021). Küçük örneklem derken sadece sayısal değil, veri çeşitliliği anlamında da eksikliklerin olduğu kastedilmektedir. Otonom araç kazalarının örnek boyutu, geleneksel araç kaza verisiyle karşılaştırıldığında küçüktür (Boggs ve diğ., 2020). Küçük bir örnekleme sahip olmasına rağmen, otonom araç kazalarına katkıda bulunan faktörleri anlamak için hâlâ vazgeçilmez bir fırsat sunmaktadır (Boggs ve diğ., 2020).

Otonom araç kazalarına ait düzenli ve uygun formatta bir veri seti bulunmaması, araştırmanın diğer bir kısıtıdır. Mevcut veri setleri, kazaları her açıdan ele almamaktadır. Otonom araç kazaları üzerine çalışma yapılmak istendiğinde, incelenecek çok az kaynak olduğu için bu kaynaklardaki bilgilerle sınırlı bir çalışma ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca bu konuda birincil veri elde etme zorlukları araştırmacıları ikincil verilere yönelme zorunluğunda bırakmaktadır. Mevcut kaynaklardaki veri yetersiz olduğu için de daha az kaza faktörü sağlanabilmektedir. Günümüzde, otonom araç kazalarından kaçınılmasına yardımcı olacak stratejiler geliştirilebilse de, bu araçların rutin hayatın bir parçası olması için yeterince güvenli olduğu söylenememektedir.

Dünyada otonom araç kazalarını düzgün raporlayanlardan ve veriyi halka açık sunanlardan biri CA DMV'dir. CA DMV verileri (CA DMV, 2022), mevcut en iyi açık kaynaklı verilerdir (Sinha ve diğ., 2021). Bu çalışmada kullanılan veri seti, CA DMV'nin paylaştığı açık otonom araç kaza raporlarındaki bilgilere göre hazırlanmıştır. Fakat bazı şirketler, otonom araç kazalarına ait bilgileri OL316 formuna eksik veya yanlış girebilmektedir. Bunun yanında kaza raporunda belirtilen bilgiler bazen kendi içinde birbiriyle çelişebilmektedir. Örneğin bazı

raporlarda kaza sonucunda herhangi bir yaralanma veya ölüm olmadığı söylenmesine rağmen yaralanma kutucuğu işaretlenmiştir. Bu ve bunun gibi formda eksik, boş veya yanlış doldurulan kısımlar çalışmanın çıktısını ve doğruluğunu etkileyebilecektir.

3.4.2 Kaynak Kısıtı

Literatürde yakın geçmişte popülerlik kazanan otonom araçlara yönelik, nispeten yeni çalışılmasından ötürü yeterli kaynak bulunmamaktadır. Bu çalışmada spesifik olarak otonom araç kazalarını etkileyen faktörler incelendiği için, literatür taraması yapılırken bu konuda daha da az çalışma olduğu görülmüştür. Akademik çalışmalarda, gösterilen her kaynak sunulan bilgileri desteklemekte, zenginleştirmekte ve bilimsel bir derinlik kazandırmaktadır. Bu konuda çalışılması durumunda kaynak kısıtı olduğu göz önüne alınarak başlanmıştır. Fakat, mevcut literatüre katkı sağlaması, gelecek çalışmalar için referans olması ve alanın gelişmesi açısından önemlidir.

3.5 ARAŞTIRMANIN VERİ TOPLAMA SÜRECİ

3.5.1 Otonom Araç Kaza Verisi

Amerika Birleşik Devletleri Kaliforniya eyaletinde 2014 yılında Otonom Araç Test Programı kurulmuştur. Otonom araçların halka açık yollarda test edilmesine izin verilerek bu konuda yasal düzenleme yapılmıştır. Kaliforniya eyaletinde geçerli yönetmeliklere göre, bir trafik kazasına karışan otonom araç üreticisi, kazadan sonraki 10 gün içinde CA DMV'ye Otonom Bir Araç İçeren Trafik Çarpışması Raporunu sunmalıdır (Petrovic ve diğ., 2020). Kaliforniya'da her otonom araç kazası ile ilgili OL316 formunun (OL316, 2022) doldurulması gerekmektedir. Bu sayede kazaya dair tüm ayrıntılar eksiksiz olarak saklanabilmektedir. Kazayla ilgili birçok detayı içeren OL316 raporunun bu çalışmada kullanılan özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.3: OL316 Formundaki Kaza Bilgileri

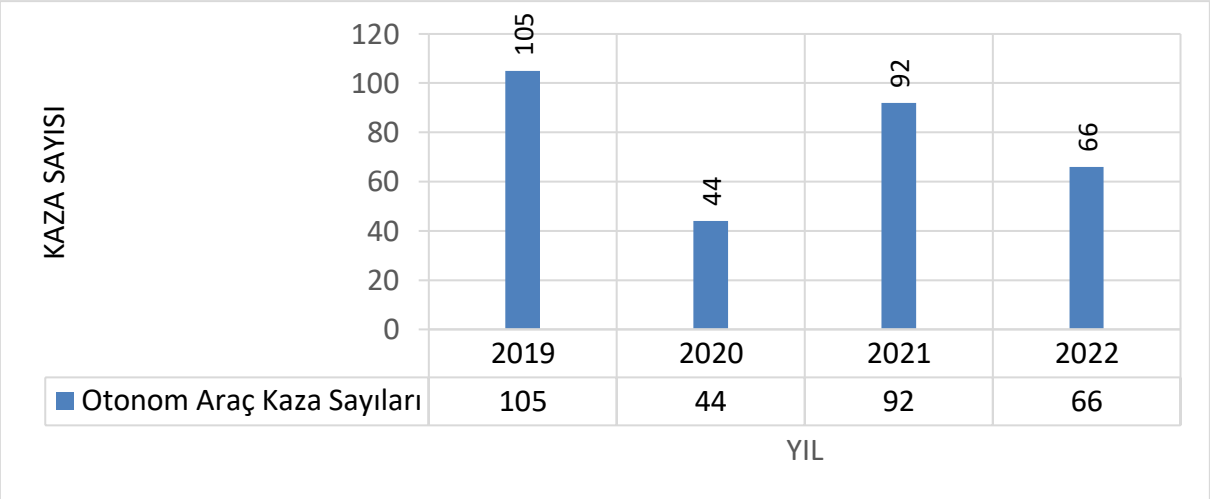
Kaza zamanı	▪ Tarih ▪ Saat
Araç bilgisi	▪ İmalatçı adı ▪ Araç yılı ▪ Araç markası ▪ Araç modeli
Kaza yeri	▪ İlçe, şehir ve eyalet
Sürüş modu	▪ Otonom mod ▪ Manuel mod
Kazaya dahil olan yol kullanıcıları	▪ Yaya ▪ Bisikletli ▪ Diğer
Araç hasarı	▪ Bilinmiyor ▪ Yok ▪ Az ▪ Orta ▪ Çok
Yaralanma, ölüm, maddi hasar	▪ Yaralı ▪ Ölü
Hava durumu	▪ Açık ▪ Bulutlu ▪ Yağmurlu ▪ Karlı ▪ Sisli ▪ Diğer

	▪ Rüzgârlı
Aydınlatma	▪ Gün ışığı ▪ Alacakaranlık/şafak ▪ Karanlık
Yol yüzeyi	▪ Kuru ▪ Islak ▪ Karlı/buzlu ▪ Kaygan (çamurlu, yağlı vb.)
Araçların çarpışmadan önceki hareketi	▪ Durmuş ▪ Düz ilerleme ▪ Dönüş yapma (sağ, sol, U) ▪ Yavaşlama/durma ▪ Şerit değiştirme ▪ Park etmiş ▪ Diğer
Çarpışma türü	▪ Doğrudan ▪ Yandan ▪ Arka uç ▪ Geniş tarafı ▪ Nesneyi vurma ▪ Devrilmiş ▪ Araç/yaya ▪ Diğer

Otonom araç kaza raporları CA DMV tarafından kamuya açık hale getirilmiştir. 2019-2022 yılları arasında toplam 307 otonom araç kazası meydana gelmiştir. Son rapor 29 Nisan 2022 tarihinde gerçekleşen kazaya aittir. Bu çalışmada CA DMV'den elde edilen 307 kaza raporu toplanarak bir veri seti oluşturulmuştur.

3.5.2 Çalışma Veri Setine İlişkin Tanımlayıcı İstatistikler

Çalışma kapsamında oluşturulan veri seti tanımsal açıdan değerlendirilmiş ve aşağıdaki tanımlayıcı istatistikler elde edilmiştir. Otonom araç kazalarının yıl bazında dağılımı Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



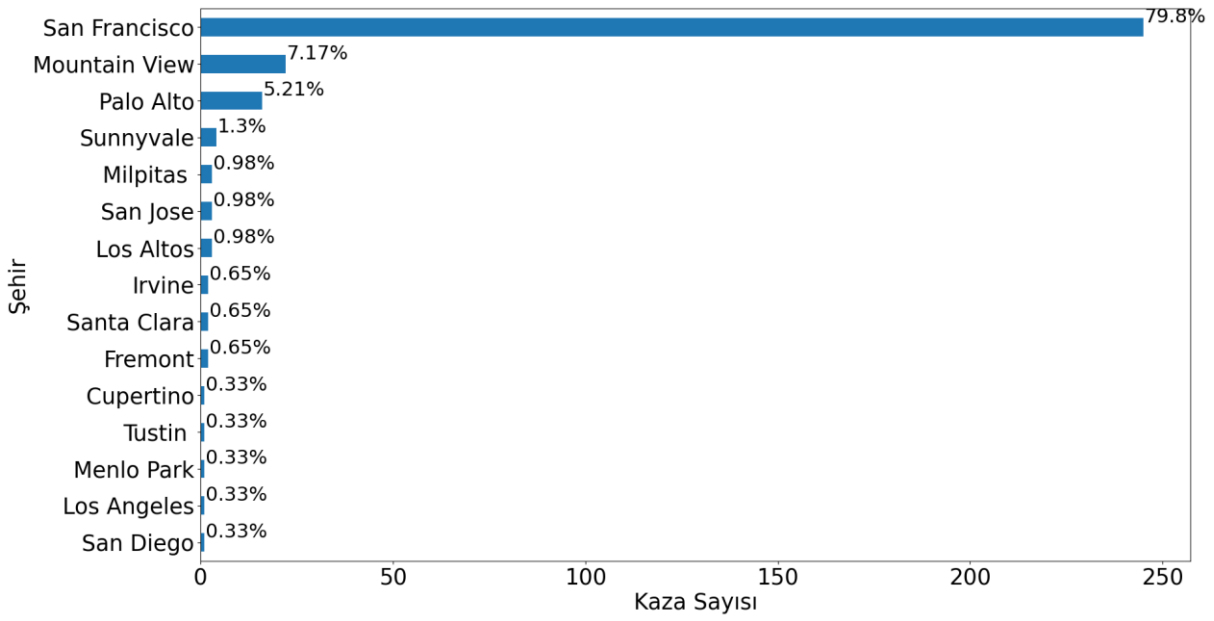
Şekil 3.1: Yıllara Göre Otonom Araç Kaza Sayısı

Kaza analizinde kullanılan ikili değişkenlerin yanı sıra, veri setinde araç üreticisi, araç modeli gibi çoğunlukla kategorik değişkenler bulunmaktadır. Bu çalışmada kaza analizinde yer almayan fakat çalışmaya ön bakış niteliğinde katkı sağlayan değişkenlerin (Bkz: Tablo 3.4) tanımlayıcı istatistiklerine de yer verilmiştir.

Tablo 3.4: İstatiksel Veri Analizinde Kullanılan Değişkenler

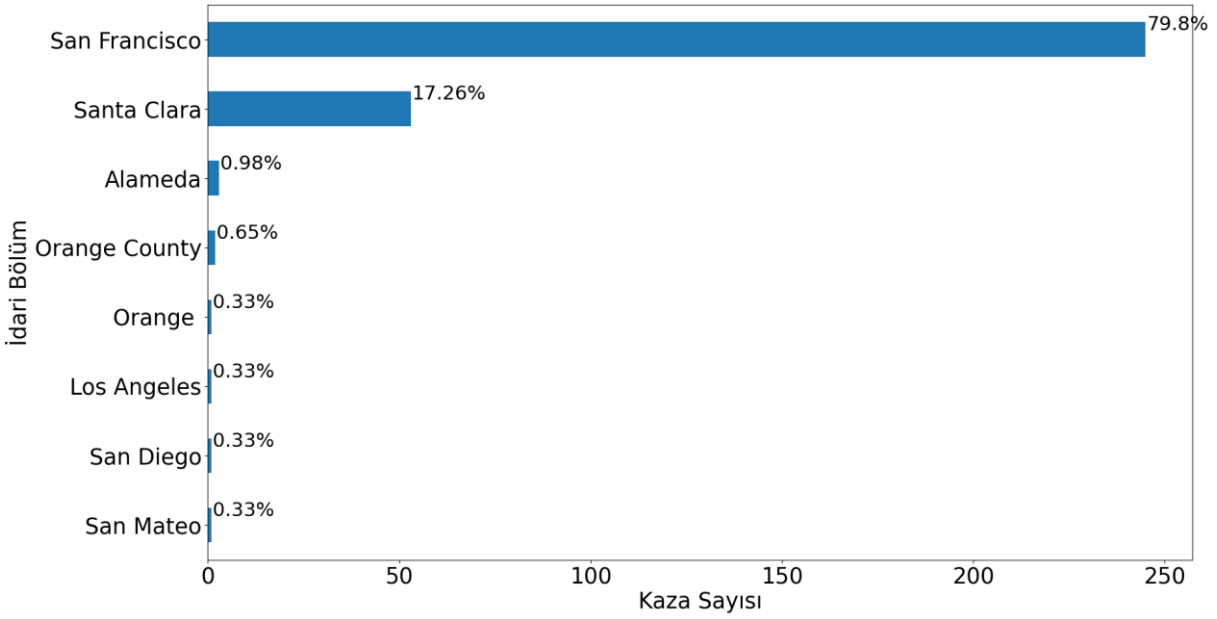
Değişken	**Değişken Tipi**
Şehir	Kategorik
İdari Bölüm	Kategorik
Araç Markası	Kategorik
Araç Modeli	Kategorik
Araç Model Yılı	Nümerik
Araç Üreticisi	Kategorik
Kaza Zamanı (a.m./p.m.)	Kategorik

Otonom araç teknoloji şirketleri Kaliforniya eyaletinde çoğunlukla San Francisco ve Santa Clara'da yoğunlaşmıştır. Lyft, Waymo, Aurora dahil birçok şirket, araçlarını bu bölgelerde çalıştırmaktadır. Otonom araç kaza raporlarında yer alan ABD'deki şehirler ve idari bölümler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

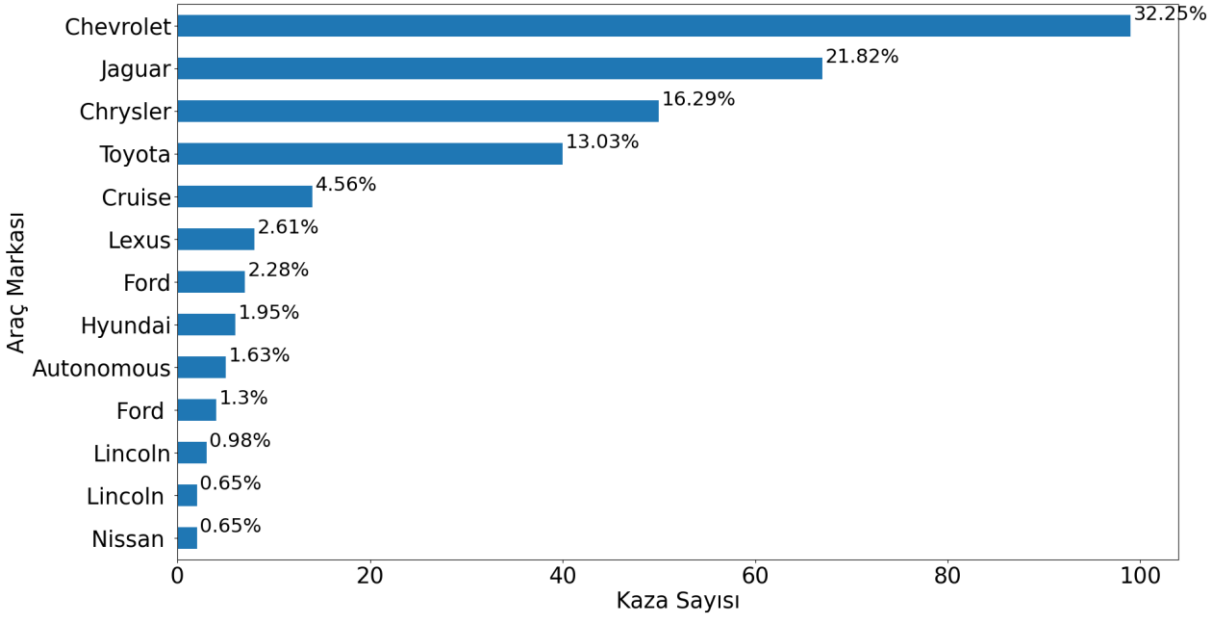


Şekil 3.2: Şehirlere Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları

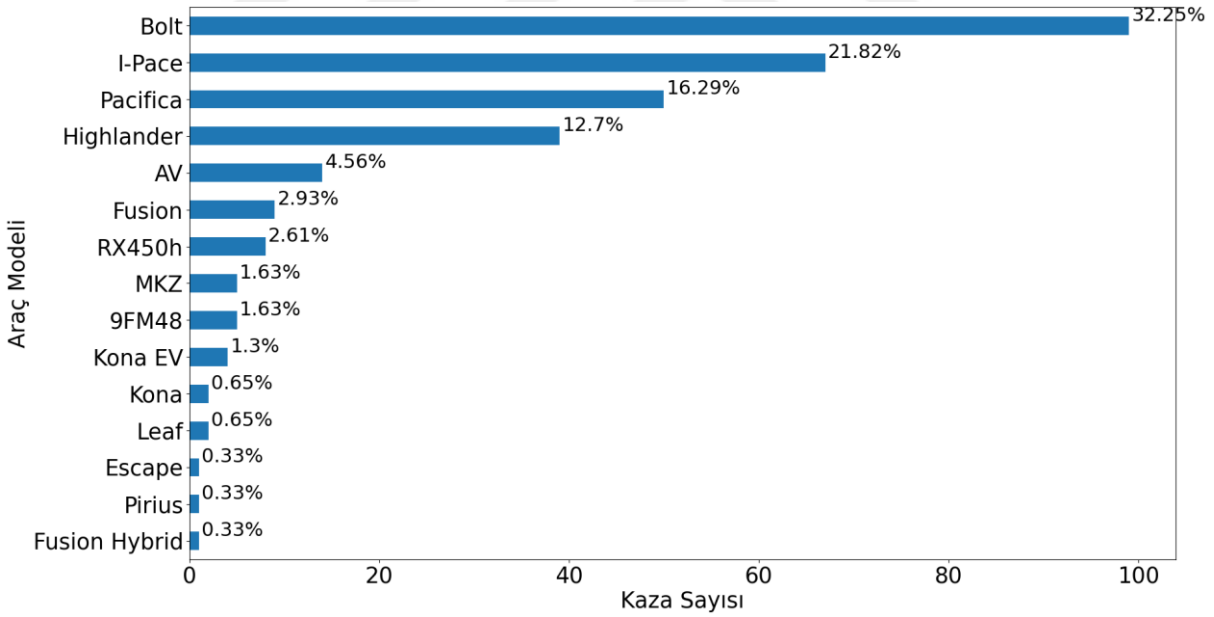
Test sürüşlerinde şirketlerin kullandığı araçların markaları ve modellerine dair bilgiler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te yer almaktadır. Test sürüşleri için Chevrolet veya Jaguar marka araçlar, bu araçların da sırasıyla Bolt ve I-Pace modelleri kullanılmıştır. Kazaların analizi için araç model yılı da göz önünde bulundurulabilir. Araçların model yılları incelendiğinde ise (bknz: Şekil 3.6) şirketlerin yarıdan fazlasının bir veya iki yaşında olan yeni araçları kullanmayı tercih ettiği görülmektedir.



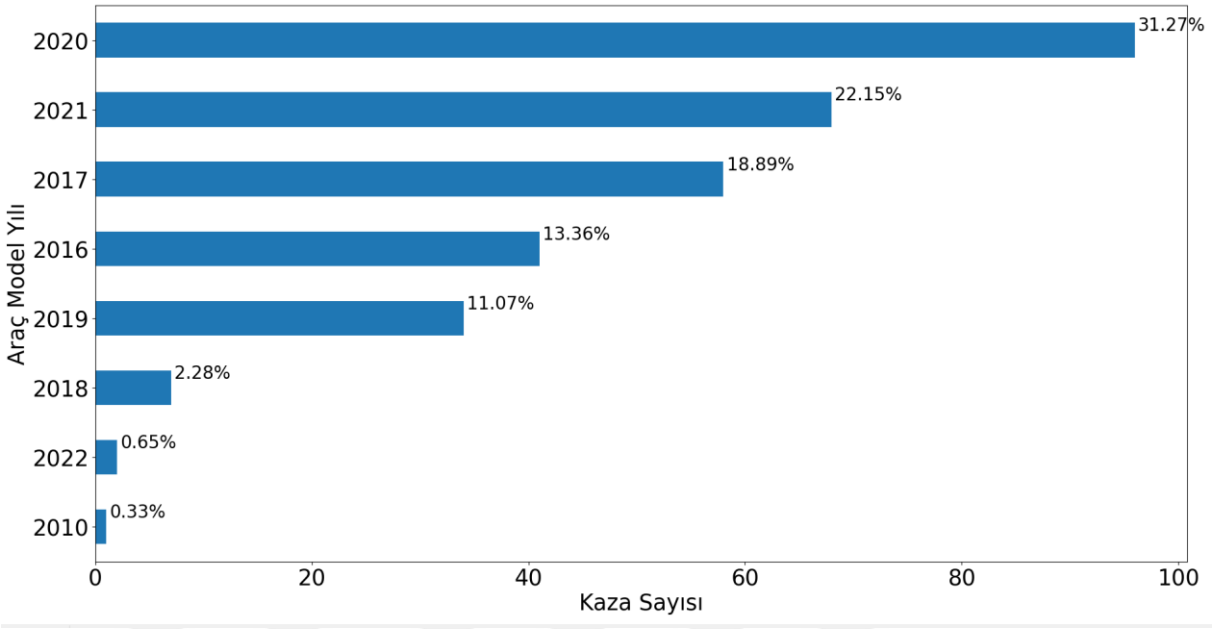
Şekil 3.3: İdari Bölümlere Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları



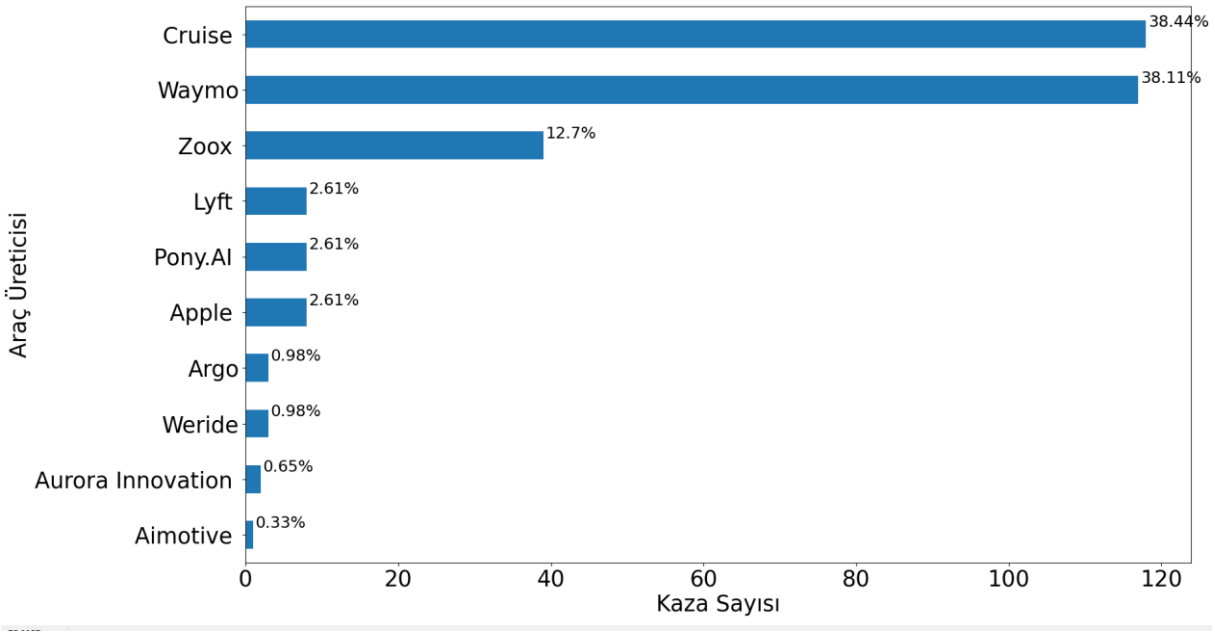
Şekil 3.4: Araç Markasına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları



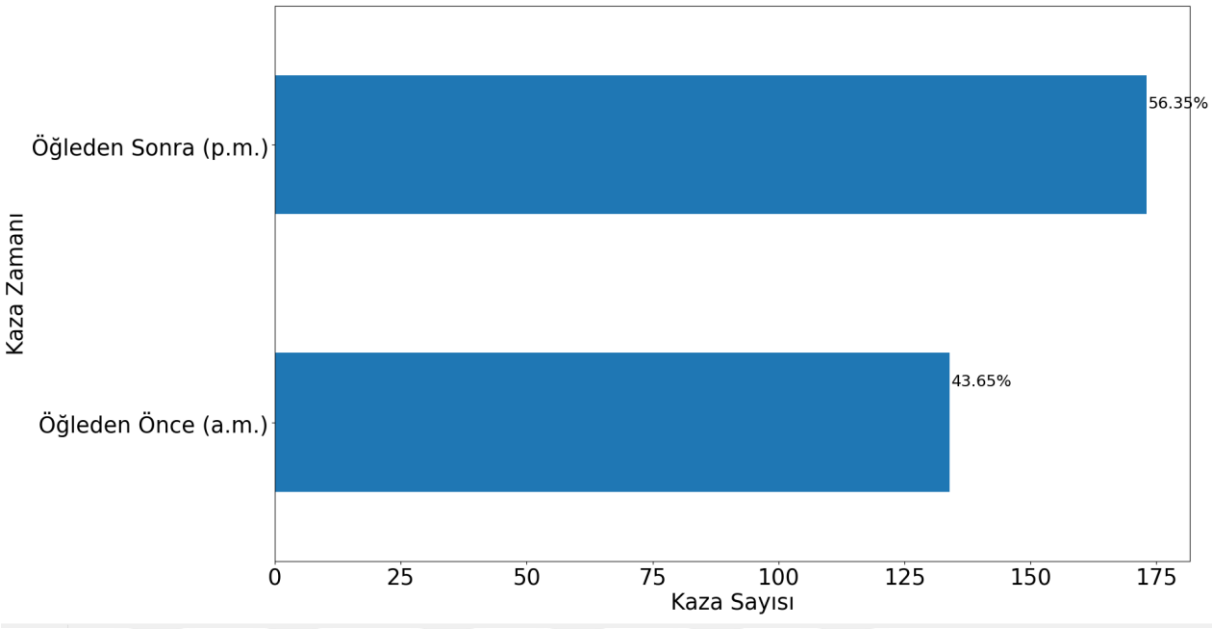
Şekil 3.5: Araç Modeline Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları



Şekil 3.6: Araç Model Yılına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları



Şekil 3.7: Araç Üreticilerinin Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları



Şekil 3.8: Kaza Zamanına Göre Otonom Araç Kaza Sayıları ve Yüzde Oranları

Kazaları bildiren otonom araç şirketleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Cruise, Waymo ve Zoox, en çok test sürüşü yapan şirketler olarak öne çıkmaktadır. Buradan hareketle, bu şirketlerin otonom sürüş konusuna katkıları diğer şirketlerle karşılaştırıldığında epey fazla olduğu söylenebilmektedir. Google'ın ana şirketi Alphabet Inc'in bir yan kuruluşu olan Waymo LLC, otonom sürüş üzerine çalışan bir şirkettir. Zoox ise, Amazon'un bir yan kuruluşu olup aynı şekilde otonom araç geliştirmektedir. Cruise LLC de, merkezi San Francisco'da bulunan bir diğer otonom araç şirketidir.

Kazanın olduğu saatler incelendiğinde (bknz: Şekil 3.8) ise 173 kazanın öğleden sonra (p.m.), 134 kazanın öğleden önce (a.m.) gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum öğleden sonra trafiğin daha fazla ve araç yoğunluğunun yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir.

3.6 ARAŞTIRMADA KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ

3.6.1 Analiz Yöntemlerinin Belirlenmesi

Otonom araçlarla ilgili her kaza, kazaya neden olan faktörlerin bir kombinasyonu olarak ifade edilmektedir (Yu ve diğ., 2019). Daha önceki çalışmalarda, trafik verilerini kullanarak trafik kazalarına neden olan faktörler belirlenmeye çalışılmıştır (Yu ve diğ., 2019). Bu çalışmalarda

yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, Markov modelleri, logit/probit modelleri, log-lineer modeller gibi birçok yaklaşım önerilmiştir (Yu ve diğ., 2019). Son yıllarda ise araştırmacıların birçoğu çeşitli veri madenciliği tekniklerini kullanarak trafik kaza analizi yapmaktadır. Böylelikle trafik kazaları ve buna neden olan faktörler arasındaki ilişki değerlendirilmekte ve tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir (Yu ve diğ., 2019). Veri madenciliği teknikleri arasında, birliktelik kuralları herhangi bir hipoteze dayanmadığı ve büyük veri setlerinde dahi saklı anlamlı bağlantıları ortaya koyabildiği için trafik kaza analizinde geçerli tekniklerden biridir (Yu ve diğ., 2019).

Bu çalışmada trafik kaza faktörleri ve kazaların arasındaki kurallar Birliktelik Kuralı yöntemleri uygulanarak elde edilmiştir. CA DMV verilerinin kazalarla ilgili görece az faktör sağlaması nedeniyle, birliktelik kuralları gibi parametrik olmayan yöntemlerin kullanılmasının daha uygun olduğu değerlendirilmiştir (Ashraf ve diğ., 2021).

Çalışma çıktıları apriori algoritması ile elde edildikten sonra, kaza sonucundaki hasarın artmasında en önemli faktörün hangisi olduğunu belirlemek için lojistik regresyon analizinin bir türü olan multinominal lojistik regresyon analizi uygulanmıştır. Lojistik regresyon ve diğer tüm istatiksel yöntemlerde en temelde en uygun modelin oluşturulması amaçlanmaktadır (Al-Ghamdi, 2002). Lojistik regresyon modeli, bağımlı değişkenin ikili (binary) olduğu karayolu güvenliği çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Tay ve diğ., 2008). Bağımlı değişkenin ikiden fazla grubunun/sınıfının olduğu durumlarda ise multinominal lojistik regresyon modelinin kullanılması uygun olmaktadır (Park, 2013). Bu nedenle bu çalışmada multinominal lojistik regresyon kullanılmıştır.

3.6.2 Birliktelik Analizi ve Apriori Algoritması

Birliktelik kuralı yöntemi, veri tabanlarındaki değişkenlerin ilişkilerini keşfetmek için popüler yöntemlerden biridir. Birliktelik kuralları, veri madenciliğinin önemli dallarından biri olup araştırmacılar tarafından yapay zeka, istatistik, veri bilimi dahil birçok alanda değerli görülmektedir (Yabing, 2013). Mevcut yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, birliktelik kuralları belirli bir fonksiyona ve bağımlı değişkene ihtiyaç duymadığı için esnek uygulama avantajına sahiptir.

Birliktelik analizi, bir öğe ile diğeri arasındaki birlikte orta çıkma gücünü ölçmektedir (Kotu ve Deshpande, 2015). Diğer veri madenciliği algoritmaları sınıflandırma veya regresyon gibi bir

öğenin oluşumunu tahmin etmek ile ilgilenirken, bu veri madenciliği algoritmaları sınıfının amacı öğelerin birlikte oluşumlarında kullanılabilir modeller bulmaktır (Kotu ve Deshpande, 2015). Denetimsiz öğrenme sürecinin dalı olan birliktelik kuralları öğrenimi, kolayca fark edilen kurallar biçiminde verilerdeki gizli kalıpları keşfetmektedir (Kotu ve Deshpande, 2015). Bunun yanında birliktelik analizi, öğeler arasında sahte ilişkiler çıkarabilmesi gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Kotu ve Deshpande, 2015). Milyarlarca işlem içeren veriyle çalışırken anlamsız kombinasyonlarla ve her türlü olasılığa sahip işlemlerle karşılaşılması muhtemeldir (Kotu ve Deshpande, 2015).

Birliktelik kuralları madenciliğinde Apriori ve Eclat algoritmaları gibi birçok algoritma bulunmaktadır (Weng ve diğ., 2016). Apriori algoritması 1993 yılında önerilmiş olup birliktelik analizinde en yaygın kullanılan algoritmadır (Yang ve diğ., 2019). Apriori algoritmasının temel fikri belirli bir boyutta aday öğe seti oluşturmak ve veri tabanını tarayıp bu aday öğe setinde sık görülen öğe setleri olup olmadığını belirlemek için saymaktır (Yang ve diğ., 2019). Karmaşık bir algoritmaya ihtiyaç duymadan bunu yapabilmektedir. Apriori algoritmasının adımları (Hong ve diğ., 2020), Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Apriori algoritmasına dair önemli ölçülere ve hesaplarına geçmeden önce kural kavramının tanımlanması gerekmektedir (Ghafari ve Tjortjis, 2019). Kural, bir öncül ile bir sonuç arasındaki ilişkiyi gösteren koşullu bir yapıdır. Çıkarılan her kural A → B şeklinde gösterilmektedir (Ghafari ve Tjortjis, 2019). Burada A öğesi, kuralın öncülüdür (antecedent) ve B öğesi, kuralın sonucudur (consequent).

A → B kuralı gibi bir dizi kural, birliktelik analizinin model sonucunu temsil etmektedir (Kotu ve Deshpande, 2015). Örneğin bu kural, tüm işlemlerin geçmişine dayanarak, bir işlemde A öğesi bulunursa, aynı işlemde B öğesinin ortaya çıkma olasılığının güçlü olduğunu göstermektedir (Kotu ve Deshpande, 2015). Birliktelik kurallarının öncülü ve sonucu yalnızca tek bir öğeye sahip olmak zorunda değildir, birden fazla öğe içerebilirler (Kotu ve Deshpande, 2015). Bu tip bir kural, örneğin aynı işlemde A ve C öğelerine eriştiyse, geçmiş işlemlere dayalı olarak B öğesine de erişme olasılığının yüksek olduğunu ifade etmektedir (Kotu ve Deshpande, 2015). A ve C öğelerinin birleşimine öğe seti adı verilir (Kotu ve Deshpande, 2015). Bir öğe seti, kuralın öncülünde ve sonraki kısmında ortaya çıkabilir; fakat her iki küme de ayrık olmalıdır, yani kuralların her iki tarafında ortak bir öğe olmamalıdır (Kotu ve Deshpande, 2015).

Apriori algoritmasının gücü, genellikle bir kuralın destek (support) ve güven (confidence) değerleriyle ölçülmektedir. Özel durumlarda kullanılabilecek kaldıraç (lift) ve kanaat (conviction) değerleri gibi birkaç nicelik daha vardır. Algoritma, bu ölçüleri kullanarak öğe kümesinde en sık görünen öğelerden birliktelik kurallarını bulmaktadır. Destek değeri, öğe kümesinin veri kümesinde ne sıklıkta göründüğünü göstermektedir. Bir kuralın destek değeri, dikkate alınmaya değer olup olmadığını göstermektedir. Destek değeri yüksek öğelerin tercih edilmesi, yararlanmaya ve araştırmaya değer kalıpların ortaya çıkarılmasında etkili olmaktadır. Güven değeri, birliktelik kuralının ne sıklıkla doğru olduğunu göstermektedir. Kaldıraç değeri, güvenin, genel veri setinde bir sonucun meydana gelme olasılığına oranıdır.

Kaldıraç değeri 1'den büyükse, kuralın gelecekteki veri kümelerinde sonucu tahmin etmek için potansiyel olarak yararlı olduğu anlamına gelmektedir (Park ve diğ., 2018). Bu ölçüler Denklem 3.1-3.5'te detaylandırılmıştır.

$A \rightarrow B$ kuralı için:

$$\text{Destek}(A) = A\text{'nın bulunma sayısı} / N = P(A) \tag{3.1}$$

$$\text{Destek}(B) = B\text{'nin bulunma sayısı} / N = P(B) \tag{3.2}$$

$$\text{Destek}\ (A \rightarrow B) = A \text{ ve } B\text{'nin birlikte bulunma sayısı} / N = P\ (A \cap B) \tag{3.3}$$

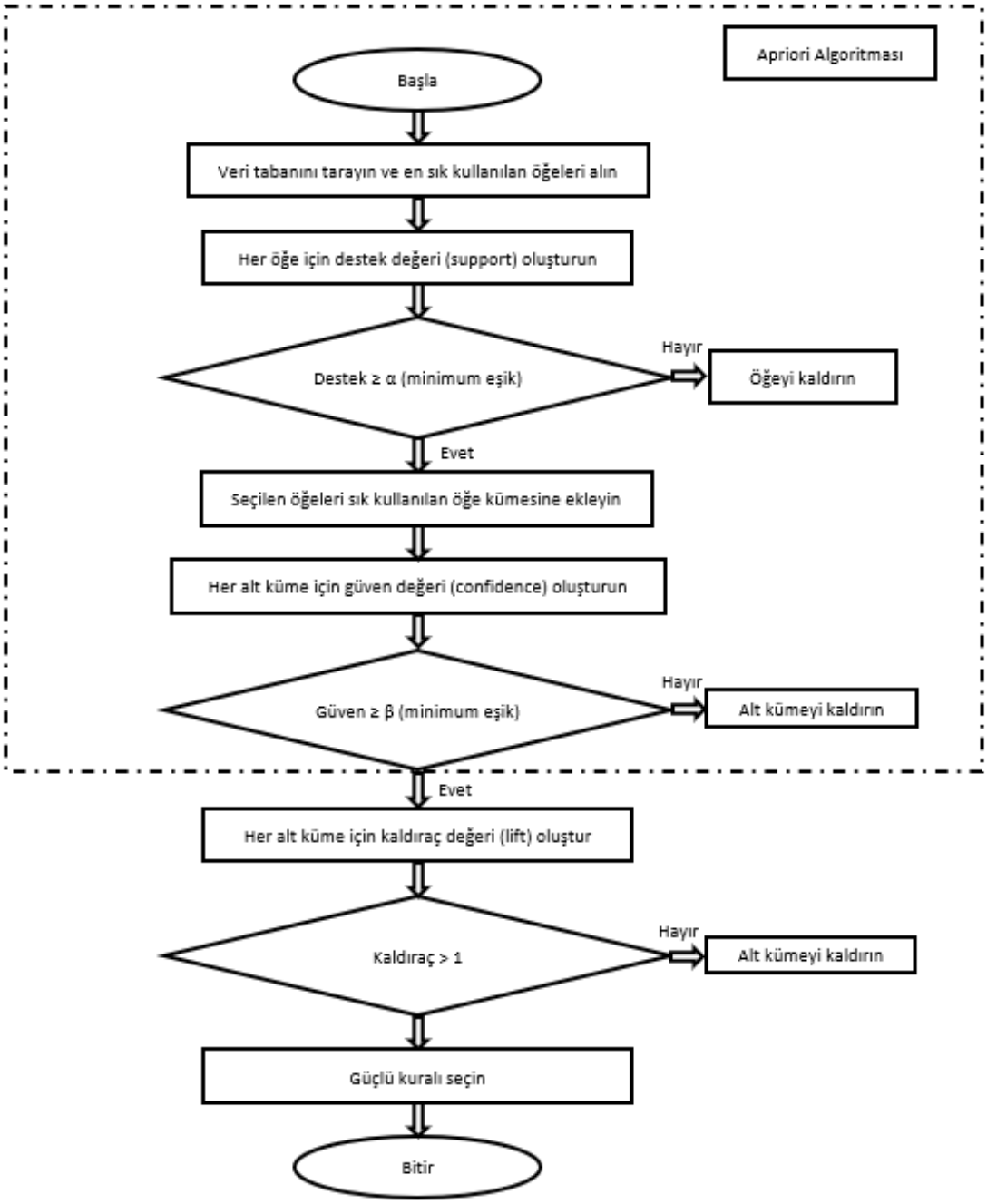
$$\text{Güven}\ (A \rightarrow B) = \text{Destek}\ (A \rightarrow B) / \text{Destek}(A) = P\ (A \cap B) / P(A) = P(B|A) \tag{3.4}$$

$$\text{Kaldıraç}\ (A \rightarrow B) = \text{Güven}\ (A \rightarrow B) / \text{Destek}(B) = P(B|A) / P(B) \tag{3.5}$$

N, toplam öğe sayısını göstermektedir.

Apriori algoritması iki aşamalı bir aramayı benimsemektedir. İlk adım, minimum destek eşiğini geçen öğelerden bir öğe kümesi oluşturmaktır. Denklem 3.6, bir öğe kümesinin (B) destek değerinin, asla alt kümesinin (A) destek değerini geçmemesi ilkesini ortaya koymaktadır. Bu ilke sayesinde, sık kullanılan bir öğe kümesinin verimli bir şekilde aranmasına olanak sağlamaktadır (Park ve diğ., 2018).

$$\forall A, B: (A \subseteq B) \Rightarrow \text{Destek}(A) \geq \text{Destek}(B) \tag{3.6}$$



Şekil 3.9: Birliktelik Kuralı Madenciliği Sürecinin Akış Şeması

İkinci adım, ikili olarak her sık öğe kümesinden kurallar oluşturmaktadır. Ardından bu kuralları bölmekte ve yüksek güven değerine sahip olanları aramaktadır (Cai, 2020).

3.6.3 Lojistik Regresyon Analizi

Lojistik regresyon veya diğer adıyla logit model, birden fazla bağımsız değişken ile kategorik bir bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi analiz etmektedir ve verileri bir lojistik eğriye uydurarak bir olayın meydana gelme olasılığını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Park, 2013). Lojistik model, trafik kazası risk faktörlerinin önemini test etmek için yaygın olarak kullanılan istatiksel yöntemlerden biridir (Karacasu ve diğ., 2014). Lojistik regresyon, 1 (başarı) ve 0 (başarısız) değerlerini alan ikili yanıt değişkenlerini modellemek için bir yöntem sağlamaktadır (Ahmed, 2017).

Lojistik model detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır (Park, 2013):

İki lojistik regresyon modeli vardır: ikili lojistik regresyon ve multinominal lojistik regresyon. İkili lojistik regresyon, bağımlı değişken ikili olduğunda ve bağımsız değişkenler ya sürekli ya kategorik olduğunda kullanılmaktadır. Bağımlı değişken ikili olmadığında ve ikiden fazla kategoriden oluştuğunda, multinominal lojistik regresyon kullanılmaktadır.

Bir olayın olasılıkları, bir olayın olma olasılığının, olmama olasılığına oranıdır. Bir olayın olma olasılığı p ise, olayın olmama olasılığı (1-p) olmaktadır.

$$\text{Oranlar (olay)} = \frac{p}{1-p} \tag{3.7}$$

Lojistik regresyon, bir olayın olma olasılığını, bir olayın gerçekleşmeme olasılığı üzerinden hesaplamaktadır. Bu nedenle bağımsız değişkenlerin etkisi çoğunlukla oranlar cinsinden açıklanmaktadır. Lojistik regresyon ile yanıt değişkeni p'nin bir açıklayıcı değişken x cinsinden ortalaması, p ile x ile ilgili olarak Denklem 3.8 aracılığıyla modellenmektedir.

$$p = \alpha + \beta x \tag{3.8}$$

Fakat, x'in uç değerleri 0 ile 1 arasında olmayan $\alpha + \beta x$ değerlerini vereceği için bu iyi bir model değildir. Lojistik regresyon ile doğal algoritmayı kullanarak olasılıkları dönüştürmek bu problemi çözmektedir. Lojistik regresyon ile doğal log oranları, açıklayıcı değişkenin doğrusal bir fonksiyonu olarak modellenmektedir.

$$\text{logit (y)} = \ln(\text{oranlar}) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta x \tag{3.9}$$

Denklem 3.9'da p ilgili sonucun olasılığı ve x açıklayıcı değişkendir. α lojistik kesme parametresidir. β, eğimi belirleyen bir regresyon katsayısıdır. Bu basit bir lojistik modeldir.

Denklem 3.9'un her iki tarafının antilogu alındığında, ilgili sonucun meydana gelme olasılığının tahmini için Denklem 3.10 türetilmektedir. χ bir tahmin edicidir.

$$p = P\ (Y = \text{ilgilenen sonuç} / X = \chi, \text{belirli bir değer}) = \frac{e^{\alpha + \beta x}}{1 + e^{\alpha + \beta x}} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x)}} \quad (3.10)$$

Basit lojistik regresyon mantığı, birden fazla tahmin ediciye genişletilebilmektedir. Karmaşık bir lojistik regresyon Denklem 3.11 ve 3.12'deki gibi oluşturulmaktadır.

$$\text{logit}(y) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_k x_k \quad (3.11)$$

$$p = P\ (Y = \text{ilgilenen sonuç} / X_1 = \chi_1, \ldots X_k = \chi_k)$$

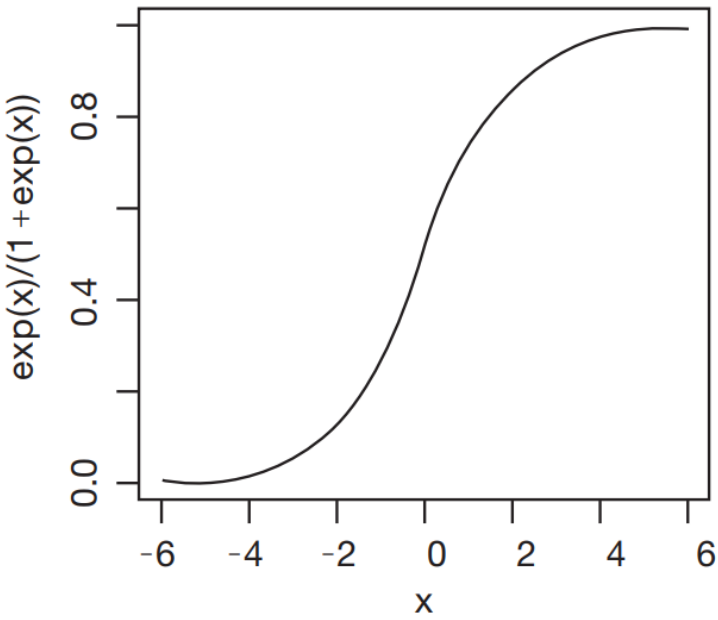
$$= \frac{e^{\alpha + \beta 1\, x1 + \ldots + \beta k\, xk}}{1 + e^{\alpha + \beta 1\, x1 + \ldots + \beta k\, xk}} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta 1\, x1 + \ldots + \beta k\, xk)}} \quad (3.12)$$

Lojistik regresyon, yanıt ikili (0-başarısız, 1-başarı) değişken ve x sayısal bir değer olduğunda, lojistik regresyon x ve y arasındaki ilişkiye bir lojistik eğri uydurmaktadır. Lojistik eğri, genellikle S şeklinde veya sigmoid bir eğridir. Bir lojistik eğri, yavaş, doğrusal bir büyüme ile başlayıp, ardından üstel büyüme izlemekte ve sonrasında tekrar sabit bir oranla yavaşlamaktadır. Basit bir lojistik fonksiyon Denklem 3.13'deki gibi tanımlanmakta ve Şekil 3.10'da grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.10'da α ve β'nın, sırasıyla 0 ve 1 değerlerini aldığı lojistik fonksiyon yer almaktadır.

$$y = \frac{e^{x}}{1 + e^{x}} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.13)$$

Esneklik sağlamak için lojistik fonksiyon Denklem 3.14'teki forma genişletilebilmektedir.

$$y = \frac{e^{\alpha + \beta x}}{1 + e^{\alpha + \beta x}} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x)}} \quad (3.14)$$



Şekil 3.10: Lojistik Eğri Grafiği (α=0 ve β=1)

Lojistik veya logit fonksiyonu, S şeklindeki bir eğriyi yaklaşık olarak düz bir eğriye dönüştürmek ve oran aralığını 0-1'den -∞ - +∞'a değiştirmek için kullanılmaktadır.

Lojistik regresyon, lineer regresyonun lineer olmayan log dönüşümünü uygulamakta ve bu sayede bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki lineer olmayan ilişkileri işleyebilmektedir. Bununla beraber, sürekli ve ayrık verileri de bağımsız değişkenler olarak işleyebilmektedir.

Bütün bu bilgilerin ışığında analizden başarılı sonuçlar elde edebilmek için dikkat edilmesi gereken birkaç husus bulunmaktadır. İlk olarak, bağımlı değişkenin ayrık çoğunlukla ikili olması gerekmektedir. İkincisi, lojistik regresyon olayın meydana gelme olasılığını tahmin ettiği için (P(Y=1)), bağımlı değişken buna göre kodlanmalıdır. Yani istenen sonuç 1 olmalıdır. Üçüncüsü, modelin doğru bir şekilde öğrenmesi (fitting) gerekir. Modelde anlamsız değişkenler varsa aşırı öğrenme (over-fitting) yaşanabilmektedir. Veya modelde dahil edilmeyen anlamlı değişkenler varsa eksik öğrenme (under-fitting) gerçekleşebilmektedir.

Lojistik regresyon hakkında ön bilgi verildikten sonra izleyen kısımda bu çalışmada kullanılan multinominal lojistik regresyon hakkında tanımlayıcı bilgilere yer verilmiştir. Multinominal (çok terimli) lojistik regresyon modeli, binary (iki terimli) lojistik regresyon modelinin basit bir uzantısıdır. Bağımlı değişken ikiden fazla nominal veya sırasız kategoriye sahip olduğunda

kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasının verisetinde seçilen bağımlı değişkenin (araç hasarı) ikiden fazla terimi (seviyesi) olması nedeniyle bu yöntem uygulanmıştır. Multinominal lojistik regresyon kullanılmasındaki amaç, verideki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve genel ilişkiyi çıkarmaktır (Bayaga, 2001).

Multinominal lojistik regresyon, kategorik bağımlı değişkenlere sahip durumlar için kullanılan tek metodoloji değildir, fakat diğer yöntemlere kıyasla üç avantajı bulunmaktadır. Bunlar: (a) yaygın olarak bulunur ve neredeyse tüm istatiksel paketler bu modeli içermektedir; (b) tahminler, özellikle çok kategori olduğunda hızla hesaplanmaktadır; (c) model sonuçlarının yorumlanması kolaydır (Kwak ve Clayton-Matthews, 2002).

3.6.4 Analiz Süreci

Analiz sürecine başlanmadan önce otonom araç trafik kaza raporlarından bir veri seti oluşturulmuştur. Veri analizi sürecinde iki yönteme başvurulmuştur. Bunlar; birliktelik analizi ve multinominal lojistik regresyon analizidir. Bu yöntemler farklı veri tipi gerektirdiği için veri ön-işleme yapılmıştır ve analize uygun hale getirilmiştir. Birliktelik analizi için verideki çok değişkenli kaza faktörleri alt değişkenlere bölünerek ikili (binary) şekilde tanımlanmıştır. Multinominal lojistik regresyon analizinde ise değişkenler olduğu gibi yani çok değişkenli faktörler olarak tanımlanmıştır.

Birliktelik analizi için apriori algoritması kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler için, kazayı etkileyen çevresel kaynaklı ve araç kaynaklı faktörler olmak üzere toplam 11 değişken tanımlanmıştır. Apriori algoritması için kullanılan veri setinde her kaza faktörü için gösterimler true (doğru) veya false (yanlış) şeklindedir. Trafik kazasında ilgili faktör gerçekleştiğinde doğru (T) değeri atanmış, değilse yanlış (F) değeri kullanılmıştır. Minimum destek, minimum güven sırasıyla 30 ve 70 olarak ayarlanmıştır. Bu değerlere sahip kuralların, trafik kaza faktörlerinin çoğunu karşılayabileceğini göstermiştir. Birliktelik analizi kullanılarak apriori model oluşturulması sırasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir (Kotu ve Deshpande, 2015):

Adım 1: Veri, işlem formatına uygun hazırlanmıştır. Birliktelik algoritmaları belirli bir biçimde biçimlendirilecek bağımsız değişkenlere ihtiyaç duymaktadır. Birliktelik analizine başlamak için veriyi ikili format (binary) biçiminde özetlemek gerekmektedir.

Adım 2: Destek ve güven parametreleri girilerek sık görülen öğe kümeleri için final listesi hazırlanmıştır. Birliktelik algoritması, analizi en sık görülen öğelerle sınırlamakta, bu yüzden bir sonraki adımda çıkarılan son kural kümesi daha anlamlı olmaktadır.

Adım 3: SPSS Modeler yazılımı kullanılarak öğe kümelerinden ilgili birliktelik kuralları oluşturulmuştur. Son olarak, algoritma destek ve güven değerlerine göre kuralları oluşturmakta ve filtrelemektedir.

Birliktelik analizi ile kazaya dair kurallar elde edildikten sonra kaza faktörlerini kendi içinde sınıflandırmak ve kaza sonucunda araç hasarının seviyesi üzerinde en önemli olan faktörleri ortaya koyabilmek için lojistik regresyon analizine başvurulmuştur.

Lojistik regresyon modellerinden multinominal lojistik regresyon uygulanmıştır. Apriori modelinde kullanılan veri formatının aksine, bu modelde çok terimli bağımsız değişkenler sayısal formata dönüştürülerek kullanılmıştır. Her değişken terimine sayısal kodlar atanmıştır. Apriori modelindeki hem öncül hem sonuç olarak kullanılan değişkenlerin aksine, bu modelde bağımsız değişkenler girdi olarak, bağımlı değişken ise hedef olarak tanımlanmıştır. Ardından model çalıştırılmıştır. Multinominal lojistik regresyon modeli ortaya konulurken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

Adım 1: Model çalıştırmak için bağımlı değişkenin kategorilerinden bir referans kategorisi seçilir. Tahmin edilen katsayılar referans kategorisine göredir. Bu yüzden referans kategorisi analiz için en uygun olan seçilmiştir (Kwak ve Clayton-Matthews, 2002).

Adım 2: Bağımlı değişkene etkisi olduğu değerlendirilen açıklayıcı bağımsız değişkenler seçilmiştir ve lojistik model SPSS Modeler yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır.

Adım 3: Lojistik model sonucunda bağımsız değişkenlerin etkileri belirlenmiştir ve ardından sonuçlar incelenmiştir.

Bu iki analiz sonucunda elde edilen bulgular, sonraki bölümde açıklanmıştır..

4. BULGULAR

Çalışmanın amacına göre, trafik kazası faktörleri arasındaki ilişkileri belirlemek için birliktelik kuralları analizi ve lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır. Bu analizler, IBM SPSS Modeler 18.2.2 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulgular, izleyen bölümde aktarılmıştır.

4.1 BİRLİKTELİK ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR

4.1.1 Apriori Modeli Parametreleri

Belli bir oranın üzerindeki birliktelikleri elde etmek için minimum destek ve minimum güven parametre değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Tablo 4.1'de görüldüğü üzere destek ve güven değerleri yüksek tutulduğunda düşük sayıda kural ortaya çıkmaktadır. Bu eşik değerleri ne kadar büyük olursa birliktelik kuralları da o kadar güçlü olacaktır. Fakat büyük değerler sonucunda bazı kurallar gözden kaçabilmektedir. Değerlerin çok küçük olması da anlamlı kurallar elde edilmesine engel olabilecektir. Bu bağlamda bu çalışmada kullanılan destek ve güven değerleri, en anlamlı kuralları elde etmek için alternatif kritik değerlerin sırasıyla değerlendirilmesi yoluyla belirlenmiştir. Sonuç olarak kural sayısı ve kuralın gücü arasındaki dengeyi koruyabilmek adına Senaryo 3'teki (bknz. Tablo 4.1) eşik değerleri seçilmiştir.

Bununla birlikte sadece istenilen sayıda nesne içermesi için üst limit koyulabilmektedir fakat tüm birliktelik sonuçlarını görmek için bu değer yüksek tutulmuştur. Bu sayede belirlenen eşik değerleri aralığındaki tüm kurallar görülebilmiştir.

Apriori kural seti oluşturmak, bir veya daha fazla giriş alanı ve bir veya daha fazla hedef alanı gerektirmektedir. Bağımsız ve bağımlı değişkenler, girdi ve hedef olarak tanımlanabileceği gibi her iki role sahip olacak şekilde de tanımlanabilmektedir (IBM, 2022). Apriori modeli, analize dahil edilen tüm değişkenlerin her iki role sahip olacak şekilde tanımlanmasıyla oluşturulmuştur. Analiz için anlamsız olan veya eksik veri içeren değişkenler (bknz. Tablo 4.2) analize dahil edilmemiştir.

Tablo 4.1: Apriori Model Parametrelerine Göre Analiz Senaryoları

Senaryo	Parametreler	Analiz Özeti
1	Destek: 20 Güven: 50	Kural Sayısı: 463 $Destek_{min}$: 20,2% $Destek_{max}$: 92,2% $Güven_{min}$: 50,0% $Güven_{max}$: 98,5% $Kaldıraç_{min}$: 0,84 $Kaldıraç_{max}$: 1,71
2	Destek: 30 Güven: 50	Kural Sayısı: 176 $Destek_{min}$: 30,9% $Destek_{max}$: 92,2% $Güven_{min}$: 50,0% $Güven_{max}$: 96,5% $Kaldıraç_{min}$: 0,86 $Kaldıraç_{max}$: 1,43
3	Destek: 30 Güven: 70	Kural Sayısı: 90 $Destek_{min}$: 30,9% $Destek_{max}$: 92,2% $Güven_{min}$: 70,1% $Güven_{max}$: 96,5% $Kaldıraç_{min}$: 0,96 $Kaldıraç_{max}$: 1,12
4	Destek: 50 Güven: 70	Kural Sayısı: 26 $Destek_{min}$: 51,1% $Destek_{max}$: 92,2%

		$Güven_{min}$: 70,1% $Güven_{max}$: 95,6% $Kaldıraç_{min}$: 0,97 $Kaldıraç_{max}$: 1,09
5	Destek: 70 Güven: 70	Kural Sayısı: 13 $Destek_{min}$: 70,4% $Destek_{max}$: 92,2% $Güven_{min}$: 70,1% $Güven_{max}$: 95,6% $Kaldıraç_{min}$: 0,98 $Kaldıraç_{max}$: 1,04

Tablo 4.2: Analiz Dışı Değişkenler

1. Araç hasarı / bilinmiyor
2. Ölüm
3. Hava durumu / karlı
4. Hava durumu / rüzgârlı
5. Hava durumu / diğer
6. Yol yüzeyi / karlı-buzlu
7. Yol yüzeyi / Kaygan (çamurlu, yağlı vb.)
8. Çarpışma türü (araç 1) / devrilmiş
9. Çarpışma türü (araç 1) / araç-yaya
10. Çarpışma türü (araç 2) / devrilmiş
11. Çarpışma türü (araç 2) / araç-yaya

Sonuç olarak birliktelik kurallarını oluşturmak için 45 değişken kullanılmış ve bu değişkenler 11 gruba ayrılmıştır. İlgili değişkenler Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3: Analizde Kullanılan Değişkenler

Değişkenler	**Seviyeleri / Grupları**
1. Sürüş Modu	▪ Otonom Mod ▪ Manuel Mod
2. Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı	▪ Yaya ▪ Bisikletli ▪ Diğer
3. Araç Hasarı	▪ Yok ▪ Az ▪ Orta ▪ Çok
4. Yaralanma	
5. Hava Durumu	▪ Açık ▪ Bulutlu ▪ Yağmurlu ▪ Sisli
6. Aydınlatma	▪ Gün Işığı ▪ Alacakaranlık/Şafak ▪ Karanlık
7. Yol Yüzeyi	▪ Kuru ▪ Islak
8. Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)	▪ Durmuş ▪ Düz İlerleme ▪ Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)

	▪ Yavaşlama/Durma ▪ Şerit Değiştirme ▪ Park Etmiş ▪ Diğer
9. Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)	▪ Durmuş ▪ Düz İlerleme ▪ Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U) ▪ Yavaşlama/Durma ▪ Şerit Değiştirme ▪ Park Etmiş ▪ Diğer
10. Çarpışma Türü (Araç 1)	▪ Doğrudan ▪ Yandan ▪ Arka Uç ▪ Geniş Tarafı ▪ Nesneyi Vurma ▪ Diğer
11. Çarpışma Türü (Araç 2)	▪ Doğrudan ▪ Yandan ▪ Arka Uç ▪ Geniş Tarafı ▪ Nesneyi Vurma ▪ Diğer

4.1.2 Apriori Modelinden Elde Edilen Birliktelik Kuralları

Apriori algoritmasının uygulanması sonucunda 90 birliktelik kuralı elde edilmiştir. Destek değeri 30%, güven değeri 70% alınmıştır. Çıkarılan kurallar, Tablo 4.4'te gösterilmektedir ve güven değerine göre büyükten küçüğe sıralanmıştır.

Tablo 4.4: Analiz Sonucunda Elde Edilen Birliktelik Kuralları

Kural	Sonuç	Öncül	Destek %	Güven %	Kaldıraç
1	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Hava Durumu - Açık	46,580	96,503	1,047
2	Yol Yüzeyi - Kuru	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Hava Durumu - Açık	35,505	96,330	1,045
3	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu - Açık	35,505	96,330	1,045
4	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu - Açık	32,248	95,960	1,041
5	Yol Yüzeyi - Kuru	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)- Düz İlerleme ve Hava Durumu - Açık	37,134	95,614	1,037
6	Yol Yüzeyi - Kuru	Hava Durumu - Açık	88,274	95,572	1,037
7	Yol Yüzeyi - Kuru	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Hava Durumu - Açık	33,876	95,192	1,033
8	Yol Yüzeyi - Kuru	Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu - Açık	61,889	94,737	1,028
9	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Hava Durumu - Açık	41,694	94,531	1,025
10	Yol Yüzeyi - Kuru	Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu - Açık	63,844	94,388	1,024
11	Yol Yüzeyi - Kuru	Aydınlatma - Gün ışığı ve Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu – Açık	44,625	93,431	1,014
12	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı	41,042	92,857	1,007

13	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu - Açık	31,596	92,784	1,007
14	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod	53,420	92,683	1,005
15	Hava Durumu - Açık	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Yol Yüzeyi - Kuru	34,853	92,523	1,048
16	Yol Yüzeyi - Kuru	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) - Düz İlerleme	42,671	92,366	1,002
17	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Yol Yüzeyi - Kuru	42,671	92,366	1,046
18	Yol Yüzeyi - Kuru	Aydınlatma - Gün ışığı	70,358	92,130	0,999
19	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Araç Hasarı - Az ve Yol Yüzeyi - Kuru	31,922	91,837	1,040
20	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Otonom Mod	46,580	91,608	0,994
21	Hava Durumu - Açık	Yol Yüzeyi - Kuru	92,182	91,519	1,037
22	Yol Yüzeyi - Kuru	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç	41,368	91,339	0,991
23	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az	37,459	91,304	0,990
24	Hava Durumu - Açık	Araç Hasarı - Az ve Yol Yüzeyi - Kuru	66,124	91,133	1,032
25	Yol Yüzeyi - Kuru	Araç Hasarı - Az	72,638	91,031	0,988
26	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Yol Yüzeyi - Kuru	49,511	90,789	1,029
27	Yol Yüzeyi - Kuru	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Araç Hasarı - Az	35,179	90,741	0,984
28	Yol Yüzeyi - Kuru	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş	38,436	90,678	0,984
29	Hava Durumu - Açık	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Yol Yüzeyi - Kuru	37,785	90,517	1,025
30	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az ve Yol Yüzeyi - Kuru	34,202	90,476	1,025
31	Hava Durumu - Açık	Aydınlatma - Gün ışığı ve Yol Yüzeyi - Kuru	64,821	90,452	1,025
32	Yol Yüzeyi - Kuru	Aydınlatma - Gün ışığı ve Araç Hasarı - Az	51,140	90,446	0,981

33	Hava Durumu - Açık	Aydınlatma - Gün ışığı ve Araç Hasarı - Az ve Yol Yüzeyi - Kuru	46,254	90,141	1,021
34	Hava Durumu - Açık	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) - Düz İlerleme ve Yol Yüzeyi - Kuru	39,414	90,083	1,020
35	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Araç Hasarı - Az	35,179	89,815	1,017
36	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı ve Yol Yüzeyi - Kuru	38,111	89,744	1,017
37	Yol Yüzeyi - Kuru	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Araç Hasarı - Az	31,596	89,691	0,973
38	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Otonom Mod	46,580	89,510	1,014
39	Hava Durumu - Açık	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş	38,436	88,136	0,998
40	Hava Durumu - Açık	Aydınlatma - Gün ışığı	70,358	87,963	0,996
41	Hava Durumu - Açık	Araç Hasarı - Az	72,638	87,892	0,996
42	Hava Durumu - Açık	Aydınlatma - Gün ışığı ve Araç Hasarı - Az	51,140	87,261	0,989
43	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod	53,420	87,195	0,988
44	Hava Durumu - Açık	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) - Düz İlerleme	42,671	87,023	0,986
45	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı	41,042	86,508	0,980
46	Hava Durumu - Açık	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az	37,459	86,087	0,975
47	Hava Durumu - Açık	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç	41,368	85,827	0,972
48	Hava Durumu - Açık	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Araç Hasarı - Az	31,596	84,536	0,958
49	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az ve Yol Yüzeyi - Kuru	34,202	79,048	1,124
50	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	30,945	78,947	1,122

51	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az ve Hava Durumu - Açık	32,248	78,788	1,120
52	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Araç Hasarı - Az	37,459	78,261	1,112
53	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Yol Yüzeyi - Kuru	49,511	76,974	1,094
54	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod	53,420	76,829	1,092
55	Araç Hasarı - Az	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç	41,368	76,378	1,051
56	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Hava Durumu - Açık	46,580	76,224	1,083
57	Aydınlatma - Gün ışığı	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	44,951	76,087	1,081
58	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Hava Durumu - Açık	41,694	75,781	1,043
59	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Otonom Mod	46,580	75,524	1,040
60	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş	38,436	75,424	1,038
61	Araç Hasarı - Az	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Hava Durumu – Açık	35,505	75,229	1,036
62	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Hava Durumu – Açık	33,876	75,000	1,033
63	Araç Hasarı - Az	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Yol Yüzeyi - Kuru	37,785	75,000	1,033
64	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Yol Yüzeyi - Kuru	42,671	74,809	1,030
65	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Yol Yüzeyi - Kuru	34,853	74,766	1,029
66	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Otonom Mod ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	39,414	74,380	1,024

67	Araç Hasarı - Az	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi - Kuru	34,202	74,286	1,023
68	Aydınlatma - Gün ışığı	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Yol Yüzeyi – Kuru	34,853	73,832	1,049
69	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi - Kuru	32,248	73,737	1,015
70	Aydınlatma - Gün ışığı	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş	38,436	73,729	1,048
71	Aydınlatma - Gün ışığı	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Hava Durumu – Açık	33,876	73,077	1,039
72	Aydınlatma - Gün ışığı	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1) - Durmuş ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi - Kuru	32,248	72,727	1,034
73	Araç Hasarı - Az	Aydınlatma - Gün ışığı	70,358	72,685	1,001
74	Araç Hasarı - Az	Hava Durumu - Açık	88,274	72,325	0,996
75	Araç Hasarı - Az	Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu – Açık	61,889	72,105	0,993
76	Araç Hasarı - Az	Yol Yüzeyi – Kuru	92,182	71,731	0,988
77	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu – Açık	35,505	71,560	0,985
78	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı	41,042	71,429	0,983
79	Araç Hasarı - Az	Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	84,365	71,429	0,983
80	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	34,202	71,429	0,983
81	Araç Hasarı - Az	Aydınlatma - Gün ışığı ve Yol Yüzeyi – Kuru	64,821	71,357	0,982

82	Aydınlatma - Gün ışığı	Çarpışma Türü (Araç 2) - Arka Uç ve Araç Hasarı - Az	31,596	71,134	1,011
83	Araç Hasarı - Az	Aydınlatma - Gün ışığı ve Hava Durumu - Açık ve Yol Yüzeyi – Kuru	58,632	71,111	0,979
84	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Manuel Mod ve Aydınlatma - Gün ışığı ve Yol Yüzeyi – Kuru	38,111	70,940	0,977
85	Aydınlatma - Gün ışığı	Araç Hasarı – Az	72,638	70,404	1,001
86	Aydınlatma - Gün ışığı	Yol Yüzeyi – Kuru	92,182	70,318	0,999
87	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) - Düz İlerleme	42,671	70,229	0,967
88	Araç Hasarı - Az	Araçların Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) - Düz İlerleme ve Hava Durumu – Açık	37,134	70,175	0,966
89	Araç Hasarı - Az	Sürüş Modu - Manuel Mod	53,420	70,122	0,965
90	Aydınlatma - Gün ışığı	Hava Durumu – Açık	88,274	70,111	0,996

Birliktelik kurallarına bakıldığında sonuç kısmında güven değerine göre en yüksekten en düşüğe: “Yol Yüzeyi-Kuru”, “Hava Durumu-Açık”, ”Aydınlatma-Gün Işığı” ve “Araç Hasarı-Az” şeklinde sıralanmaktadır. Bu 4 değişkenin diğer değişkenlerle birlikte bulunma durumu ortaya konulmaktadır. 90 kuralın 24’ünde “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeni, 24’ünde “Hava Durumu-Açık” değişkeni, 16’sında “Aydınlatma-Gün Işığı” değişkeni, 26’sında “Araç Hasarı-Az” değişkeni sonuç kısmında görülmektedir.

İlk 15 kuralın ilk 14’ünde sonuç kısmında “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeni yer almaktadır. Öncülü olarak ise 12’sinde “Hava Durumu-Açık” değişkeni yer almaktadır. 15. Kuralın ise sonuç kısmında “Hava Durumu-Açık” değişkeni yer almaktadır. Ayrıca ilk 15 kural, %32’nin üzerinde destek değerine, %92’nin üzerinde güven değerine ve %1’in üzerinde kaldıraç değerine sahiptir.

Sonuç kısmında 24 defa yer alan “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkenine bakıldığında öncülü olarak 12 defa “Hava Durumu-Açık” değişkeninin yer aldığı görülmektedir. Aynı şekilde sonuç

kısmında 24 defa yer alan “Hava Durumu-Açık” değişkenine bakıldığında öncülü olarak 12 defa “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeninin yer aldığı görülmektedir. Buradan hareketle “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeninin en çok “Hava Durumu-Açık” değişkeniyle birlikte bulunduğu çıkarılmaktadır. Bu iki değişkenin birlikte bulunduğu kurallar, %31’in üzerinde destek değerine, %89’un üzerinde güven değerine ve %1’in üzerinde kaldıraç değerine sahiptir.

Sonuç kısmında 16 defa yer alan “Aydınlatma-Gün Işığı” değişkenine bakıldığında öncülü olarak sekiz defa “Sürüş Modu-Manuel Mod” değişkeninin yer aldığı görülmektedir. Buradan hareketle “Aydınlatma-Gün Işığı” değişkeninin en çok “Sürüş Modu-Manuel Mod” değişkeniyle birlikte bulunduğu çıkarılmaktadır. Bu iki değişkenin birlikte bulunduğu kurallar, %30’un üzerinde destek değerine, %76’nın üzerinde güven değerine ve %1’in üzerinde kaldıraç değerine sahiptir.

Sonuç kısmında 26 defa yer alan “Araç Hasarı-Az” değişkenine bakıldığında öncülü olarak 12 defa “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeninin yer aldığı görülmektedir. Buradan hareketle “Araç Hasarı-Az” değişkeninin en çok “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkeniyle birlikte bulunduğu çıkarılmaktadır. Bu iki değişkenin birlikte bulunduğu kurallar, %32’nin üzerinde destek değerine, %70’in üzerinde güven değerine ve %0,98’in üzerinde kaldıraç değerine sahiptir.

Öncüllerde üç değişkenin yer aldığı 18 kural bulunmaktadır. Bu nedenle toplam dört değişkenin yer aldığı kurallar toplam kuralların %20’sine denk gelmektedir. Bu 18 kuralın dokuzunda öncüllerde “Sürüş Modu-Manuel” değişkeni bulunmaktadır. Bunun da beşinde öncüllerde “Sürüş Modu-Manuel”, “Hava Durumu-Açık” değişkeni ile birlikte bulunmaktadır. Buradan hareketle dört değişkenin birlikte yer aldığı bir trafik kazasında otonom aracın manuel modda olma ihtimali %50’dir.

Öncüllerde dört değişkenin yer aldığı iki kural bulunmaktadır. Toplamda beş değişkenin yer aldığı bu iki kuralın öncüllerinde “Sürüş Modu-Manuel Mod”, “Hava Durumu-Açık” ve “Yol Yüzeyi-Kuru” değişkenlerinin ortak olduğu görülmüştür.

4.1.3 Apriori Modelinin Genel Değerlendirmesi

Apriori algoritmasının en temel amacı veri setlerinden birliktelik kurallarını çıkarmaktır. Bu algoritma yardımıyla otonom araç kazalarına ait trafik kaza faktörlerine dair birliktelik kuralları elde edilmiştir. Buradan hareketle kazalara sebep olan faktörlerin birlikte görülme durumları

ortaya konulmuştur. Algoritmanın çalışması için, alternatiflerin değerlendirilmesi yoluyla araştırma için en anlamlı sonucu veren destek ve güven değerleri seçilmiştir. Analizde anlamsız olacak olan veya eksik veri içeren değişkenler analize dahil edilmemiştir. Kullanılacak değişkenlerin belirlenmesinden sonra belirlenen %30 destek ve %70 güven eşik değerlerine sahip kurallar çıkarılmıştır.

Analiz sonucunda elde edilen kurallar değerlendirildiğinde; analizde kullanılan tüm değişkenlerin içinde en çok bulunan değişkenler "Yol Yüzeyi-Kuru", "Hava Durumu-Açık", "Aydınlatma-Gün Işığı" ve "Araç Hasarı-Az" olmuştur. En yüksek güven değerine (%96.5) sahip olan kural, sonucunda "Yol Yüzeyi-Kuru" değişkeni ile öncülünde "Sürüş Modu - Manuel Mod" ve "Hava Durumu – Açık" değişkenlerinin birlikte bulunduğu durumdadır. En yüksek destek değerine (%92,18) sahip olan üç kural bulunmuştur. Bu üç kuralın öncülünde "Yol Yüzeyi-Kuru" değişkeni yer almakta, sonucunda ise "Hava Durumu-Açık", "Araç Hasarı-Az" veya "Aydınlatma-Gün Işığı" değişkenleri vardır. Buradan hareketle yol yüzeyinin kuru olmasının, tüm kazalar içinde en çok görülen değişken olduğu söylenebilmektedir.

4.2 LOJİSTİK REGRESYON ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR

4.2.1 Lojistik Model Parametreleri

Lojistik modelde "Araç Hasarı" değişkeni bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Tablo 4.5'teki diğer tüm değişkenler, bağımsız değişken olarak alınmıştır. Lojistik modelin amacı, araç hasarını azdan çoğa artıran araç kaza faktörlerinin (bağımsız değişkenlerin) önem seviyelerini belirlemektir. Bu amaçla gerçekleştirilen multinominal lojistik regresyon analizinin sonuçları izleyen kısımlarda açıklanmıştır.

Tablo 4.5: Değişken Kodları, Frekans ve Yüzdelikler

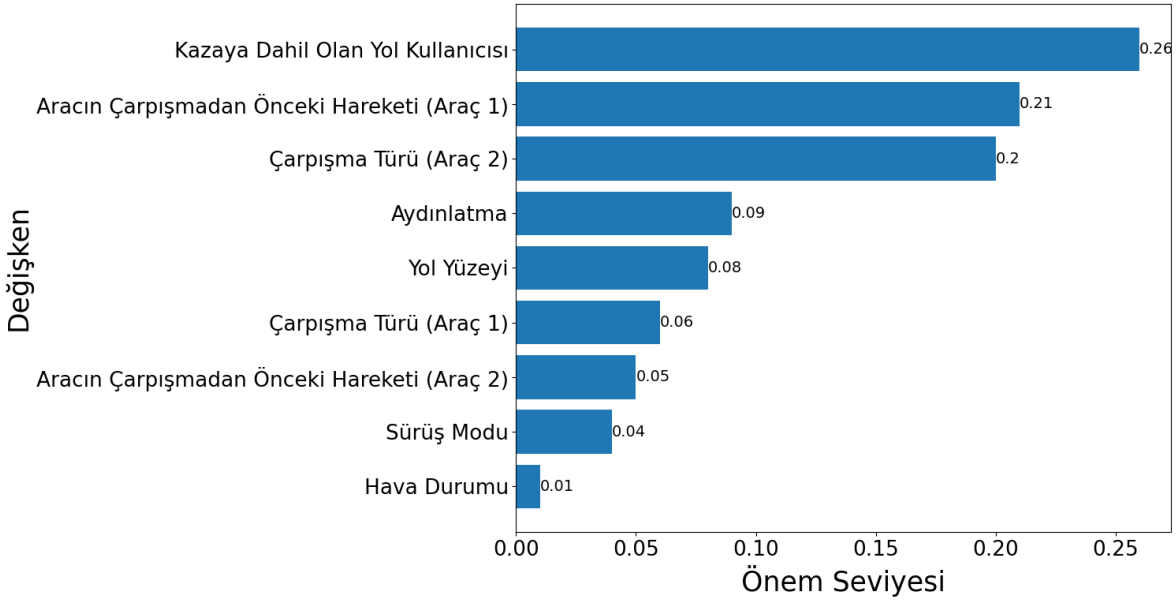
Değişken	Seviye	Kod	Sayı	Marjinal Yüzde
Sürüş Modu	Otonom Mod	1	143	46,6 %
	Manuel Mod	2	164	53,4 %
Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı	Yaya	1	2	0,7 %
	Bisikletli	2	16	5,2 %
	Diğer	3	59	19,2 %
	Yok	99	230	74,9 %
Araç Hasarı	Bilinmiyor	1	0	0,0 %
	Yok	2	33	10,7 %
	Az	3	223	72,6 %
	Orta	4	46	15,0 %
	Çok	5	5	1,6 %
Hava Durumu	Açık	1	271	88,3 %
	Bulutlu	2	28	9,1 %
	Yağmurlu	3	5	1,6 %
	Karlı	4	0	0,0 %
	Sisli	5	3	1,6 %
	Diğer	6	0	0,0 %
	Rüzgarlı	7	0	0,0 %
Aydınlatma	Gün Işığı	1	216	70,4 %
	Karanlık	2	11	3,6 %
	Alacakaranlık/Şafak	3	80	26,1 %
Yol Yüzeyi	Kuru	1	283	92,2 %
	Islak	2	14	4,6 %

	Karlı/Buzlu	3	0	0,0 %
	Kaygan (Çamurlu, Yağlı vb.)	4	0	0,0 %
	Yok	99	10	3,3 %
Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)	Durmuş	1	118	38,4 %
	Düz ilerleme	2	88	28,7 %
	Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	3	37	12,1 %
	Yavaşlama/Durma	4	29	9,4 %
	Şerit Değiştirme	5	8	2,6 %
	Park Etmiş	6	7	2,3 %
	Diğer	7	20	6,5 %
	Yok	99	0	0,0 %
Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)	Durmuş	1	8	2,6 %
	Düz ilerleme	2	131	42,7 %
	Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	3	35	11,4 %
	Yavaşlama/Durma	4	5	1,6 %
	Şerit Değiştirme	5	28	9,1 %
	Park Etmiş	6	20	6,5 %
	Diğer	7	54	17,6 %
	Yok	99	26	8,5 %
Çarpışma Türü (Araç 1)	Doğrudan	1	15	4,9 %
	Yandan	2	33	10,7 %
	Arka Uç	3	44	14,3 %
	Geniş Tarafı	4	13	4,2 %
	Nesneyi Vurma	5	14	4,6 %

	Devrilmiş	6	0	0,0 %
	Araç/Yaya	7	0	0,0 %
	Diğer	8	15	4,9 %
	Yok	99	173	56,4 %
Çarpışma Türü (Araç 2)	Doğrudan	1	40	13,0 %
	Yandan	2	54	17,6 %
	Arka Uç	3	126	41,0 %
	Geniş Tarafı	4	23	7,5 %
	Nesneyi Vurma	5	0	0,0 %
	Devrilmiş	6	0	0,0 %
	Araç/Yaya	7	0	0,0 %
	Diğer	8	8	2,6 %
	Yok	99	56	18,2 %

4.2.2 Lojistik Modelin Sonuçları

Lojistik model sonuçlarına bakıldığında modeldeki dokuz bağımsız değişkeni kendi aralarında önem seviyelerine göre sıralanmışlardır (bknz. Şekil 4.1). Buna göre, otonom araç kazalarında araç hasarını artıran en etkili faktör kazaya dahil olan yol kullanıcısıdır. Bu değişken kadar önemli ve birbirine yakın önem seviyelerine sahip olan diğer iki değişken, kaza yapan aracın kaza öncesi hareketi ve diğer aracın otonom araca nasıl çarptığıdır. Bu ilk 3 değişken dışındakilerde araç hasarının artırılmasında rol oynama seviyeleri epey düşüktür. Bunlar da önem seviyelerine göre; aydınlatma, yol yüzeyi, diğer aracın otonom araca çarpma türü, diğer aracın kaza öncesi hareketi, sürüş modu ve en az etkili olan değişken olan hava durumu olmuştur.



Şekil 4.1: Önem Seviyelerine Göre Değişkenler

Model Uyum Bilgileri (Model Fitting Information) (bknz. Tablo 4.6), son modelin tüm parametre katsayılarının 0 (boş) olduğu bir olasılık oranı testidir (IBM, 2021a). Bu tablonun "Final" satırı, modelin tüm katsayılarının sıfır olup olmadığı (yani, katsayılardan herhangi birinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı) hakkında bilgi sunmaktadır (Laerd, 2022). Bu sonucu değerlendirmenin başka bir yolu, eklenen değişkenlerin, "Intercept Only" satırı (yani, hiçbir değişken eklenmeden) ile karşılaştırıldığında modeli istatistiksel olarak önemli ölçüde iyileştirip iyileştirmediğidir. Analiz sonucunda hesaplanan ki-kare değeri, "Final" ve "Intercept Only" modellerinin -2 Log olasılıkları arasındaki farkı temsil etmektedir.

H0 = Bağımsız değişkenlerin olmadığı model ile bağımsız değişkenlerin yer aldığı model arasında ilişki yoktur.

p = .000 olan sütun; H0'ı reddedip "Final" modelinin tek başına "Intercept Only" modelinden daha iyi performans gösterdiği ve istatistiksel olarak daha iyi tahmin ettiği anlamına gelmektedir (IBM, 2021a).

Tablo 4.6: Model Uyum Bilgileri (Model Fitting Information)

Model	Model Uyum Kriterleri			Olabilirlik Oranı Testleri		
	AIC	BIC	-2 Log Olasılıkları	Ki-Kare	sd	p
Intercept Only	475,022	486,203	469,022			
Final	518,717	921,217	302,717	166,305	105	0,000

Modelin Uyum İyiliği (Goodness-of-Fit) tablosu (bknz. Tablo 4.7) modelin verilere ne kadar iyi uyduğunu değerlendirmek için kullanılabilecek iki ölçü sağlamaktadır (Laerd, 2022): "Pearson" etiketli ilk satır, Pearson ki-kare istatistiğini sunmaktadır. Büyük ki-kare değerleri ("Ki-Kare" sütununun altında bulunur) model için zayıf bir uyumu göstermektedir. İstatistiksel olarak anlamlı bir sonuç (yani, $p < .05$), modelin verilere iyi uymadığını göstermektedir. Tablo 4.7'ye bakılarak, p-değerinin .931 (yani, p .931) olduğunu ve bu ölçüme dayalı olarak, modelin verilere iyi uyduğu ve tutarlı olduğu söylenebilmektedir. Tablonun diğer satırı (yani, "Sapma" satırı) Sapma ki-kare istatistiğini sunmaktadır. Bu iki uyum iyiliği ölçüsü her zaman aynı sonucu vermeyebilir.

Tablo 4.7: Model Uyum İyiliği (Goodness of Fit)

	Ki-Kare	sd	p
Pearson	552,285	603	0,931
Deviance	278,692	603	1,000

R^2, bağımsız değişkenlerle ilişkili bağımlı değişkendeki varyans oranını özetlemektedir. Büyük R^2 değerleri, lojistik modeldeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki varyansı daha fazla açıkladığını göstermektedir. R^2'nin tüm özelliklerine sahip farklı istatistikler (bknz. Tablo 4.8) hesaplanmaktadır. Cox ve Snell, modelin log olasılığını temel almaktadır. Nagelkerke ise, 0 ile 1 arasındaki tüm aralığı kapsayacak şekilde istatistiğin ölçeğini ayarlayan Cox ve Snell'in ayarlanmış bir versiyonudur. McFadden, "Intercept Only" model ile tam tahmin modeli için log-olabilirlik çekirdeklerine dayanan başka bir versiyondur. R^2 değerleri, farklı uygulama

alanlarında değişiklik göstermektedir. Bu ölçüye göre en büyük R^2 istatistiğine sahip model en iyi olarak değerlendirilmektedir (IBM, 2021b). Buradan hareketle, Nagelkerke ölçüsüne göre, "Araç Hasarı" için gözlemlenen varyansın yüzde 51'i bu modele dahil edilen bağımsız değişkenlerle açıklanabilmektedir.

Tablo 4.8: R^2 Değerleri

Cox ve Snell	0,418
Nagelkerke	0,518
McFadden	0,329

Olabilirlik oranı testleri (bknz. Tablo 4.9), her bir değişkenin modele katkısını kontrol etmektedir. Her değişkende indirgenmiş model için -2 log-olasılığı hesaplanmaktadır. Ki-kare istatistiği, bu tablodaki indirgenmiş modelin -2 log olasılıkları ile Model Uyum Bilgileri tablosunda rapor edilen "Final" modeli arasındaki farktır. Testin anlamlılığı küçükse ($p<0,05$), değişken modele katkıda bulunmaktadır (IBM, 2021c). Sonuç olarak bu tablo, bağımsız değişkenlerden hangilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (Laerd, 2022).

Tablo 4.9 incelendiğinde "Sürüş Modu", "Hava Durumu", "Yol Yüzeyi", "Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)", "Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)", "Çarpışma Türü (Araç 1)" ve "Çarpışma Türü (Araç 2)" değişkenlerinin etkilerinin istatiksel olarak anlamlı olmadığı ($p>0,05$) görülmektedir. Öte yandan, "Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı" değişkeni ile "Aydınlatma" değişkeninin etkileri istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<0,05$). "Intercept Only" satırıyla genellikle herhangi bir ilgi bulunmamaktadır

Tablo 4.9: Olabilirlik Oran Testleri (Likelihood Ratio Tests)

Bağımsız Etki	Model Uydurma Kriterleri			Olabilirlik Oranı Testleri		
	AIC indirgenmiş model	BIC indirgenmiş model	-2 Log Likelihood indirgenmiş model	Ki-Kare	sd	p
Intercept	518,717	921,217	302,717	0,000	0	
Sürüş Modu	514,379	905,698	304,379	1,662	3	0,645
Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı	549,867	918,825	351,867	49,15	9	0,000
Hava Durumu	508,127	877,084	310,127	7,409	9	0,595
Aydınlatma	525,586	905,725	321,586	18,869	6	0,004
Yol Yüzeyi	513,118	893,257	309,118	6,401	6	0,380
Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)	504,567	839,983	324,567	21,85	18	0,239
Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)	501,209	825,445	327,209	24,492	21	0,270
Çarpışma Türü (Araç 1)	497,773	833,189	317,773	15,056	18	0,658
Çarpışma Türü (Araç 2)	510,039	856,636	324,039	21,322	15	0,127

Ek1'de Parametre Tahminleri Tablosu bulunmaktadır. Bu tablo, her bir tahmin edicinin etkisini özetlemektedir (modelin katsayıları olarak da bilinmektedir) (Laerd, 2022). Tablodan görüleceği üzere her değişken, "Araç Hasarı" değişkeni için bir katsayıya sahiptir. Ancak, genel

bir istatistiksel anlamlılık değeri yoktur. Bu, önceki tabloda sunulmuştur (yani, Olabilirlik Oranı Testleri tablosu). Bağımlı değişkenin dört kategorisi olduğundan, üç lojistik regresyon katsayısı olduğu görülmektedir. İlk katsayı grubu "Az" satırında bulunmaktadır ve "Araç Hasarı" kategorisinin referans kategorisi olan "Yok" ile karşılaştırmasını temsil etmektedir. İkinci katsayısı grubu "Orta" satırında bulunmaktadır ve "Araç Hasarı" kategorisinin referans kategorisi olan "Yok" ile karşılaştırmasını temsil etmektedir. Üçüncü katsayısı grubu "Çok" satırında bulunmaktadır ve "Araç Hasarı" kategorisinin referans kategorisi olan "Yok" ile karşılaştırmasını temsil etmektedir. Her üç katsayı grubu için de "Sürüş Modu-Otonom Mod" un istatiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir. (Sırasıyla p = .831, p = 0.667 ve p = .435; "p değeri")

EK1'de yer alan Parametre Tahminleri Tablosuna bakılarak istatiksel olarak anlamlı ($p<0,05$) sonuçlar Tablo 4.10'da özetlenmiştir. Bu tablodan hareketle, araç hasarının az ve orta olduğu durumlarda istatiksel olarak anlamlı değişkenler olduğu görülmektedir. Yani, araç hasarının çok olduğu durumda istatiksel olarak anlamlı bir değişken bulunmamaktadır ve bu nedenle tabloya bu "Araç Hasarı" sınıfı dahil edilmemiştir.

"Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı = Diğer" açıklayıcı değişkeni hem "Araç Hasarı = Az" sınıfında hem de "Araç Hasarı = Orta" sınıfında istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, araç hasarının az ve orta olduğu durumlarda kazaya yaya ve bisikletlinin dışında diğer bir yol kullanıcısının dahil olması anlamlı bir değişken olarak tespit edilmiştir. "Çarpışma Türü (Araç 2) = Diğer", iki sınıfta da yer alan diğer anlamlı bir değişkendir. Buradan hareketle diğer çarpışma türlerinden ziyade diğer grubu içinde yer alan çarpışmalar araç hasarının az ve orta olduğu durumlarda daha fazla önem arz etmektedir.

"Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı = Bisikletli" değişkeninin parametre katsayısı negatif olduğundan exp(B) değeri 1'den küçük çıkmıştır. "Araç Hasarı = Az" sınıfı için exp(B) = 0,019 şu şekilde yorumlanabilir: 1-0,019 = 0,981 yani "Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı = Bisikletli" nin, "Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı = Diğer" e göre "Araç Hasarı = Az" sınıfında yer alması %98,1 daha düşüktür. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, bir otonom araç kazasına diğer bütün yol kullanıcılarına kıyasla bir bisikletlinin dahil olması, araç hasarının az olmasında %98,1 daha az etkilidir.

“Araç Hasarı = Az” sınıfında yani araç hasarının az olmasında, “Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) = Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)” ve “Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2) = Yavaşlama/Durma” bağımsız değişkenleri istatiksel olarak önemlidir. Bu değişkenler sırasıyla ikinci aracın çarpışmadan önce dönüş yapması ve yavaşlıyor veya duruyor olması anlamına gelmektedir ve araç hasarının az olmasında etkilidir.

“Aydınlatma = Gün Işığı” bağımsız değişkeni de “Araç Hasarı = Orta” sınıfında yani araç hasarının orta olmasında istatiksel olarak önemli bulunmuştur. Daha açık ifade etmek gerekirse, bir otonom araç kazasının gün ışığında gerçekleşmesi orta seviye araç hasarına sahip olunmasında etkilidir.

Tablo 4.10: İstatiksel Olarak Anlamlı Değişkenler

		B	**Std. Hata**	**Wald**	**sd**	**p**	**Exp(B)**
Araç Hasarı = Az	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Bisikletli	-3,955	0,998	15,720	1	0,000	0,019
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Diğer	-2,763	0,623	19,643	1	0,000	0,063
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Dönüş Yapma(Sağ, Sol veya U)	-3,441	1,730	3,958	1	0,047	0,032
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yavaşlama/Durma	-4,068	1,979	4,225	1	0,040	0,017
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Diğer	-2,954	1,462	4,085	1	0,043	0,052
Araç Hasarı = Orta	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Diğer	-2,273	0,751	9,167	1	0,002	0,103
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Diğer	-5,172	2,546	4,128	1	0,042	0,006
	Aydınlatma=Gün Işığı	18,082	0,781	535,574	1	0,000	71248054

Sınıflandırma tablosu (bknz. Tablo 4.11), çok terimli lojistik regresyon modelini kullanmanın pratik sonuçlarını gösterir. Her bir durum için, tahmin edilen yanıt kategorisi, model tarafından tahmin edilen en yüksek olasılığa sahip kategori seçilerek seçilir. Köşegendeki hücreler doğru tahminlerdir. Köşegen dışındaki hücreler yanlış tahminlerdir (IBM, 2021d).

Sınıflandırma tablosundan şu çıkarımlar yapılabilir: "Araç Hasarı = Yok" yani araç hasarının olmadığı durumda 33 kazadan 15'i doğru sınıflandırılmıştır. "Araç Hasarı = Az" yani araç hasarının az olduğu durumda 223 kazadan 209'u doğru sınıflandırılmıştır. "Araç Hasarı = Orta" yani araç hasarının orta olduğu durumda 46 kazadan 13'ü doğru sınıflandırılmıştır. "Araç Hasarı = Çok" yani araç hasarının çok olduğu durumda 5 kazadan 3'ü doğru sınıflandırılmıştır. Tablo 4.11'in en alt satırında yer alan doğruluk yüzdesi ise çalışmada oluşturulan lojistik modelin tahmin başarısını göstermektedir. Buna göre modeldeki bağımsız değişkenlerin hasar seviyesini doğru sınıflandırmada %78,2 başarıya sahip olduğu bulunmuştur. Bu doğruluk oranın yüksek bir oran olduğu söylenebilir.

Tablo 4.11: Sınıflandırma Tablosu

Gözlemlenen	**Tahmin Edilen**				
	Yok	**Az**	**Orta**	**Çok**	**Yüzde doğruluk**
Yok	15	18	0	0	45,5%
Az	2	209	12	0	93,7%
Orta	3	29	13	1	28,3%
Çok	0	2	0	3	60,0%
Genel Yüzde	6,5%	84,0%	8,1%	1,3%	78,2%

4.2.3 Lojistik Modelin Genel Değerlendirmesi

Lojistik model, araç hasarının azdan çoğa artmasında etkili olan faktörleri önem sırasına göre ortaya koymaktadır. “Araç Hasarı”, bağımlı değişken olarak seçilmeden önce, “Yaralanma” bağımlı değişken olarak kabul edilip farklı bir lojistik model daha oluşturulmuştur. Fakat istatiksel olarak anlamlı sonuçların elde edilemeyeceği ve modelin verilere uymayacağı elde edilen sonuçlarda görülmüş ve bu yüzden “Araç Hasarı” bağımlı değişkeninin sonuçları raporlanarak değerlendirilmiştir.

Araç hasarının az olmasında kazaya dahil olan yol kullanıcısı, ikinci aracın çarpışmadan önceki hareketi, çarpışma türü bağımsız değişkenleri etkili olmuştur. Bu bağımsız değişkenlerden sırasıyla bisikletli veya diğer bir yol kullanıcısının dahil olması, ikinci aracın çarpışmadan önce dönüş yapıyor olması ve yavaşlıyor/duruyor olması ve son olarak diğer çarpışma türünün gerçekleşmesi alt değişkenlerinin etkileri istatiksel olarak önemli bulunmuştur.

Araç hasarının orta olmasında kazaya dahil olan yol kullanıcısı, çarpışma türü ve aydınlatma bağımsız değişkenleri etkili olmuştur. Bu bağımsız değişkenlerden sırasıyla diğer bir yol kullanıcısının dahil olması, diğer çarpışma türünün gerçekleşmesi ve son olarak kazanın günışığında olması alt değişkenlerinin etkileri istatiksel olarak önemli bulunmuştur.

Model sonucunda Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’da elde edilen değerler ışığında, otonom araç kazalarındaki araç hasarını artıran istatiksel olarak en önemli iki bağımsız değişkenin kazaya dahil olan yol kullanıcısı ve aydınlatma olduğuna ulaşılmaktadır. Bunu, çarpışma türü ve aracın kaza öncesi hareketi bağımsız değişkenleri izlemektedir. Bununla beraber bütün bağımsız değişkenler incelendiğinde istatiksel olarak anlamlı değişkenlerin araç hasarının az ve orta olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Bu iki sınıfta da yine en etkili faktör kazaya dahil olan yol kullanıcısı olmuştur. Bu bilgilere paralel olarak, Şekil 4.1’de gösterilen bağımsız değişkenlerin önem seviyelerine bakıldığında, kazaya dahil olan yol kullanıcısı değişkeni en önemli değişken olarak birinci sırada yer almaktadır. Bunu sırasıyla aracın çarpışmadan önceki hareketi, çarpışma türü ve aydınlatma değişkenleri izlemiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Araştırmanın bu bölümünde elde edilen literatür taramasına ve bulgulara dayalı olarak sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

5.1 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kara yolu trafik kazaları hâlâ şehirlerin en büyük sorunları arasındadır. Trafik kazalarının önüne geçilmesi ve güvenli sürüşün sağlanması için çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Otonom araç uygulamalarının geniş bir alana yayılması, güvenlik sorunları nedeniyle hâlâ zorlu olmaya devam etmektedir (Wang ve diğ., 2020). Otonom araç sayısının giderek artmasıyla kara yolu ulaşımının değişmesi beklenmektedir. Gelecekte yollar, otomasyonun olmadığı seviyeden tam otomasyonlu seviyeye kadar farklı araçlar tarafından paylaşılacaktır. Bu durum, hem otonom araçlar hem de otonom olmayan araçlar için zorluklar yaratacaktır. Bu nedenle otonom araçların trafiğe entegre edilmesi ve muhtemel otonom araç kazaları konusunda çalışmalar yapılması önemlidir. Kutela ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada savunmasız yol kullanıcılarının dahil olduğu otonom araç kazalarının modelleri araştırılmıştır ve bu modeller savunmasız yol kullanıcılarının dahil olduğu ve olmadığı kazaları karşılaştırmak için uygulanmıştır. Wang ve Li (2019a) tarafından yapılan çalışmada otonom araçlar tarafından başlatılan ayrılma nedenleri ve etkileri araştırılmıştır. Yine aynı şekilde, Boggs ve diğ. (2020a) tarafından yapılan çalışmada da otomatik sürüş sistemi tarafından başlatılan devreden çıkma eğiliminin sonuçları tartışılmıştır. Yapılan çalışmalar göz önünde alındığında otonom araç kazalarında araç hasarına bağlı trafik kaza faktörlerinin belirlenmesine ilişkin bir literatür boşluğu olduğu değerlendirilebilir. Literatürdeki bu açığı kapatmak ve otonom araç trafik kazalarını açıklamak, çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmuştur. Bu tez çalışması, akıllı ulaşım sistemleri kapsamında otonom araçların karıştığı trafik kazalarını analiz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, otonom araçlarda meydana gelen kazalara ait faktörleri belirlemek ve faktörlerin aralarındaki ilişkileri ortaya koymaktır.

Trafik kaza faktörlerinin ana örüntülerini belirlemek için birliktelik kuralları analizi kullanılmış ve apriori algoritması uygulanmıştır. Ashraf ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada da otonom araç kazalarındaki faktörlerin belirlenmesi için apriori algoritması kullanılmıştır fakat çalışmanın odak noktası çarpışma türü modellemesi olduğu için bu esas alınarak ilgili birliktelik kuralları elde edilmiştir. Bu yönüyle bu tez çalışmasından farklılık göstermektedir.

Birliktelik kuralları elde edildikten sonra bu kaza faktörlerini, araç hasarı seviyesi üzerindeki etkileri açısından önem sırasına göre sıralamak için multinominal lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır. Wang ve Li (2019a) tarafından yapılan çalışmada da lojistik yöntemi kullanılmış fakat sıralı lojistik regresyon modeli uygulanmıştır. Ayrıca otonom araçların devreden çıkma nedenleri analiz edilmiştir. Bu yönleriyle, bu tez çalışmasıyla mukayese edildiğinde farklılık gösterdiği söylenebilir.

Bu çalışmada rapor edilen araştırmanın iki ana bulgusu aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Apriori modelinden elde edilen birliktelik kurallarına göre, en çok görülen değişkenler sırasıyla araç hasarının az olması, yol yüzeyinin kuru olması, havanın açık olması ve kazanın gün ışığında gerçekleşmesi olmuştur. Kazaya dahil olan yol kullanıcısı, yaralanma ve birinci aracın çarpışma türü değişkenleri ise bu birliktelik kurallarında görülmemiştir. En önemli kuralların, otonom araç kazalarındaki yol yüzeyinin kuru olmasıyla ilgili olduğu tespit edilmiştir. Yol yüzeyinin kuru olduğu kazalarda en çok havanın açık olduğu görülmüştür. Aynı şekilde havanın açık olduğu kazalarda ise en çok yol yüzeyinin kuru olduğu görülmüştür. Kazanın gün ışığında gerçekleştiği kazalarda en çok aracın manuel modda sürüldüğü görülmüştür. Araç hasarının az olduğu kazalarda ise en çok havanın açık olduğu görülmüştür. Birliktelik analizi sonucunda otonom araç kazalarında en çok birlikte görülen trafik kaza faktörleri belirlenmiştir. Çalışmanın asıl amacı bu faktörleri ortaya koymaktır ve buna göre otonom araçların geliştirilmesi için dikkate alınması ve geliştirilmesi veya değiştirilmesi gereken kaza faktörlerine dikkat çekmektir. Bu analize göre otonom araç kazalarının çoğu kuru yol yüzeyi ve açık hava durumunda az hasarlı gerçekleştiği için farklı hava durumu ve yol yüzeyi sonucunda kazaların nasıl sonuçlandığı ve bu durumun araç hasarını nasıl etkilediği araştırılması gereken bir konu olarak değerlendirilebilir.

- Analiz, lojistik modelin veriyle uyumlu olduğunu ve istatiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Araç hasarı için gözlemlenen varyansın yarısından çoğu bu modele dahil edilen bağımsız değişkenlerle açıklanabilmektedir. Lojistik modelde kullanılan tüm bağımsız değişkenler arasında en önemli değişken, kazaya dahil olan yol kullanıcısı olmuştur. Buna göre otonom araç kazalarında araç hasarını en aza indirmek için diğer yol kullanıcılarının otonom araçlarla ilişkisi incelenmelidir. Araç hasarının

artmasında etkili olan en önemli diğer iki faktör, kaza yapan aracın kaza öncesi hareketi ve diğer aracın otonom araca nasıl çarptığıdır. Sürüş modu ve hava durumu değişkenleri, araç hasarını artırmada en az etkili bağımsız değişkenler olmuştur. Kazaların büyük çoğunluğunun hava açıkken gerçekleştiği göz önünde bulundurulduğunda istatiksel olarak önemli bir değişken olmaması beklenen bir durumdur. Aynı şekilde, sürüş modunun kazaların yarısında manuel modda olduğu diğer yarısında ise otonom modda olduğu görülmüştür ve analize göre istatiksel olarak önemli bulunmamıştır. Model sonucunda istatiksel olarak anlamlı değişkenlerin, araç hasarının az ve orta olduğu kazalarda görüldüğü çıkarılmıştır. Diğer bir deyişle, araç hasarının çok olduğu kazalarda istatiksel olarak anlamlı değişkenler elde edilmemiştir ve bu beklenen bir durumdur çünkü incelenen tüm otonom araç kazaları içinde araç hasarının çok olduğu kazalar sayıca çok azdır. Kazaya bir bisikletlinin dahil olması veya yaya dışında diğer bir yol kullanıcısının dahil olması, araç hasarının az olmasında önemli bulunmuştur. Bununla birlikte, ikinci aracın dönüş yapıyor olması, yavaşlaması veya durması da araç hasarının az olmasında etkili ve istatiksel olarak önemli bulunmuştur. Kaza sonucu araç hasarının orta olmasında ise, kazanın gün ışığında gerçekleşmesi istatiksel olarak önemli bulunmuştur. Aynı şekilde, yaya ve bisikletli dışında diğer bir yol kullanıcının dahil olması da orta araç hasarı oluşmasında etkili diğer bir değişkendir. Multinominal lojistik regresyon sonucunda otonom araç trafik kaza faktörlerinin araç hasarının artmasında ne derece önemli oldukları tespit edilmiş ve önem seviyelerine göre sıralanmıştır. Otonom araç kazalarında araç hasarını en çok etkileyen kaza faktörlerinin belirlenmesi ve aralarında sıralanması çalışmanın diğer bir amacını oluşturmaktadır. Bu analizden otonom araç kazalarında özellikle kazaya dahil olan her türlü yol kullanıcısının ve otonom aracın kaza öncesi hareketinin daha kapsamlı incelenmesi gerektiğine ulaşılmıştır.

Otonom araçlar test edilmekte ancak bu araçlar henüz trafiğe katılacak kadar olgun hale gelmemişlerdir. Otonom araçlarla ilgili akademik araştırmalar giderek artmakta ve sektöre özel uygulamalar hızla gelişmektedir. Bazı şirketler otonom araçları halka açık yollarda test etmektedir. Bu araçlar hâlâ test aşamasındadır, dolayısıyla kapsamlı, eksiksiz ve gerçek hayat senaryolarını yansıtan bir veri henüz elde edilememiştir. Verinin sektörel önemi yadsınamayacak olup çalışmaların ivme kazanmasında bir gerekliliktir. Mevcut durum göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada sınırlı bir örneklemle çalışılması gerekmiştir. Analiz

esnasında ve bulguların değerlendirilmesi noktasında bir dezavantaj olsa da, literatüre katkı bakımından önem arz etmektedir. Çalışma, otonom araç kazalarına neden olan faktörlerdeki ana kalıpların belirlenmesi bakımından otomobil üreticileri ve yasa belirleyiciler için yol gösterici olma niteliği taşımaktadır. Otonom araç teknolojisinin geliştirilmesi için kullanılması, çalışmanın en önemli katkılarından biridir. Geliştirme süreci, otonom araç şirketleri, trafik güvenliği yetkilileri ve kanun uygulayıcılar gibi farklı paydaşların ortak çalışmasını gerektirmektedir. Yapılan tüm çalışmalar, otonom araç çarpışma mekanizması hakkında farklı bakış açıları yaratacak olup asıl amaç olan trafikte sürüş güvenliğini sağlamaya hizmet edeceği değerlendirilmektedir.

5.2 GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu çalışmanın bulgularından birçok pratik anlam çıkarılabilir. Kazaya dahil olan yol kullanıcısı, kazada araç hasarını en çok artıran faktör olmuştur. Spesifik olarak bir bisikletlinin kazaya dahil olması istatiksel olarak önemli bir değişken olarak tespit edilmiştir. Simülasyon ortamlarında veya test sırasında yaya, bisikletli, scooter dışında çok çeşitli yol kullanıcılarının dahil edildiği karmaşık trafik senaryoları, otonom araçların trafiğe entegrasyon süreci için katkı sağlayacaktır. Bir diğer çıkarım; araç hasarının az olduğu kazalar üzerinden yapılabilir. Bu tür kazalarda en çok havanın açık olduğu görülmüştür. Buradan hareketle otonom araçların farklı hava durumlarında gözlenmesi ve araç hasarında yapacağı değişiklik, önemli bir diğer bulgu olacaktır.

Akademik araştırma ve endüstri uygulamaları, yol tasarımını, otonom araç trafik güvenliğini ve araç tasarımını iyileştirmiştir. Ancak sürücüsüz otomobil araştırmalarının geliştirilmesi için hükümetlerin ve yerel yönetimlerin bu çerçevede gerekli yasal düzenlemeleri yaparak sektörün gelişimine uygun bir ortam oluşturması gerekmektedir. Otonom araçlar hukuki çerçevede değerlendirilip bu araçlar hakkında ilgili regülasyonlar oluşturulduktan sonra otonom araç pazarı daha hızlı büyüyecektir.

Araştırmacıların işletmeler ve devlet kurumları tarafından toplanan verilere erişebilmesi, çözülmesi gereken bir diğer sorundur. Otonom araçlar ve bu araçların karıştığı kazalar için halka açık bir veriye ihtiyaç vardır. Bu şekilde otomobil üreticileri, yeni araç teknolojilerini yolda test ederek sürücüsüz otomobillerin trafiğe entegre edilmesini sağlamaya önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Otonom araçların trafiğe entegrasyonu ile ilgili çalışılması gereken

araştırma konusu kuşkusuz otonom ve insan güdümlü araçların birlikte yer aldığı karma trafik senaryolarının planlamasıdır. Gelecekte otomasyonsuz seviyeden tam otomasyonlu seviyeye kadar farklı araçları barındıracak olan trafik sistemi, hem otonom hem de otonom olmayan araçlar için zorlukları da beraberinde getirecektir. Bu problemlerin akademik ve sektörel çevrede hem teorik hem de pratik açıdan araştırılması ve çözülmesi gerekecektir.

Otonom araçlarla ilgili kazalar hakkında daha kapsamlı verilerin toplanması en önemli ihtiyaçlardan biridir. Kazaların daha iyi anlaşılması ve önleyici tedbirler alınması için verinin çeşitli ve hacimsel olarak fazla bilgi barındırması gerekmektedir. Örneğin, çarpışma raporları, kaza anında sürücünün bilişsel durumu ve aracın hızı gibi bilgilerle desteklenebilir. Kapsamlı veriler, sonuçları daha anlamlı kılan daha ayrıntılı bilgiler içermektedir. Bu durum, güvenlik çözümüyle bağlantılı olarak alınan önlemleri daha etkin hale getirmektedir. Gelecekte, daha ayrıntılı kaza modelleri geliştirilmesine olanak sağlayacak otonom araç ve kazalarına ait kapsamlı bir veri tabanı mevcut olacaktır. Örneğin bu çalışmayı bir adım daha ileri götürmek için sürücüsüz bir otomobilin karıştığı bir kazada insan faktörleri de ele alınabilir. Otonom olmayan aracı kullanan insan sürücünün, otonom araçlarla etkileşimi ve bunun zaman içinde değişimi, daha ileri araştırmaların konusu olabilir.

KAYNAKLAR

Abbas, K., Tawalbeh, L. A., Rafiq, A., Muthanna, A., Elgendy, I. A. ve Abd El-Latif, A. A., 2021, Convergence of Blockchain and IoT for Secure Transportation Systems in Smart Cities, *Security and Communication Networks*, 2021.

Abraham, K. S. ve Rabin, R. L., 2019, Automated Vehicles and Manufacturer Responsibility for Accidents, *Virginia Law Review*, 105 (1), 127–171.

Ahmed, H. U., Huang, Y., Lu, P. ve Bridgelall, R., 2022, Technology Developments and Impacts of Connected and Autonomous Vehicles: An Overview, *Smart Cities*, 5 (1), 382–404.

Ahmed, L. A., 2017, Using Logistic Regression in Determining The Effective Variables in Traffic Accidents, *Applied Mathematical Sciences*, 11 (42), 2047–2058.

Akkaya, S. ve Tektaş, N., 2022, The Effect of World ITS Congresses on ITS Awareness and Dissemination, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5 (1), 94–108.

Alambeigi, H., McDonald, A. D. ve Tankasala, S. R., 2020, Crash Themes in Automated Vehicles: A Topic Modeling Analysis of the California Department of Motor Vehicles Automated Vehicle Crash Database, *Proceedings of the 99th Transportation Research Board Annual Meeting*, 0–1.

Albino, V., Berardi, U. ve Dangelico, R. M., 2015, Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives, *Journal of Urban Technology*, 22 (1), 3–21.

Al-Ghamdi, A. S., 2002, Using Logistic Regression to Estimate The Influence of Accident Factors on Accident Severity, *Accident Analysis and Prevention*, 34 (6), 729–741.

Almeaibed, S., Al-Rubaye, S., Tsourdos, A. ve Avdelidis, N. P., 2021, Digital Twin Analysis to Promote Safety and Security in Autonomous Vehicles, *IEEE Communications Standards Magazine*, 5 (1), 40–46.

An, S., Lee, B. ve Shin, D.-R., 2011, A Survey of Intelligent Transportation Systems, *Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 332–337.

Aradi, S., 2020, Survey of Deep Reinforcement Learning for Motion Planning of Autonomous Vehicles, *arXiv*, 1–20.

Ashraf, M. T., Dey, K., Mishra, S. ve Rahman, M. T., 2021, Extracting Rules from Autonomous-Vehicle-Involved Crashes by Applying Decision Tree and Association Rule Methods, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675 (11), 522–533.

Astarita, V. ve Giofré, V. P., 2019, From Traffic Conflict Simulation to Traffic Crash Simulation: Introducing Traffic Safety Indicators Based On The Explicit Simulation of Potential Driver Errors, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 94 (September 2018),

215–236.

Auer, A., Feese, S. ve Lockwood, S., 2016, History of Intelligent Transportation Systems, *Intelligent Vehicle Systems Joint Program Office*, 1–56.

AUS Türkiye, 2021, *AUS'un Türkiye'deki KM Taşları*, https://www.ausder.org.tr/yayinlar/, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Bacchiani, G., Molinar, D. ve Patander, M., 2019, Microscopic Traffic Simulation By Cooperative Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, 3, 1547–1555.

Balasubramaniam, A., Junaid, M., Gul, J. ve Menon, V. G., 2021, Blockchain For Intelligent Transport System, *IETE Technical Review*, 38 (4), 438–449.

Balasubramaniam, A., Paul, A., Hong, W. H., Seo, H. C. ve Kim, J. H., 2017, Comparative Analysis of Intelligent Transportation Systems for Sustainable Environment in Smart Cities, *Sustainability (Switzerland)*, 9 (7), 1–12.

Balmer, M., Nagel, K. ve Raney, B., 2004, Large-Scale Multi-Agent Simulations For Transportation Applications, *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 8 (4), 205–221.

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G. ve Portugali, Y., 2012, Smart Cities of The Future, *European Physical Journal: Special Topics*, 214 (1), 481–518.

Bayaga, A., 2001, Multinomial Logistic Regression: Usage and Application in Risk Analysis, *Context*, 5 (2), 288–297.

Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. ve Krajzewicz, D., 2011, SUMO-Simulation of Urban Mobility: An Overview, *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*.

Boggs, A. M., Arvin, R. ve Khattak, A. J., 2020, Exploring The Who, What, When, Where, and Why of Automated Vehicle Disengagements, *Accident Analysis and Prevention*, 136 (July 2019), 105406.

Boggs, A. M., Wali, B. ve Khattak, A. J., 2020, Exploratory Analysis of Automated Vehicle Crashes in California: A Text Analytics & Hierarchical Bayesian Heterogeneity-Based Approach, *Accident Analysis and Prevention*, 135 (October 2019), 105354.

Bonnefon, J. F., Shariff, A. ve Rahwan, I., 2016, *The Social Dilemma of Autonomous Vehicles*, Science.

Brummelen, J. Van, Brien, M. O., Gruyer, D. ve Najjaran, H., 2018, Autonomous Vehicle Perception: The Technology of Today and Tomorrow, *Transportation Research Part C* [online], 89, 384–406.

Buch, N., Velastin, S. A. ve Orwell, J., 2011, A Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12 (3), 920–939.

CA DMV, 2022, *Autonomous Vehicle Collision Reports*, https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Cai, Q., 2020, Cause Analysis of Traffic Accidents on Urban Roads Based on an Improved Association Rule Mining Algorithm, *IEEE Access*, 8, 75607–75615.

Camacho, F., Cárdenas, C. ve Muñoz, D., 2018, Emerging Technologies and Research Challenges for Intelligent Transportation Systems: 5G, HetNets, and SDN, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12 (1), 327–335.

Casula, M., Rangarajan, N. ve Shields, P., 2021, The Potential of Working Hypotheses For Deductive Exploratory Research, *Quality and Quantity*, 55 (5), 1703–1725.

Chang, K.-H., 2015, Wireless Communications for Vehicular Safety, *IEEE Wireless Communications*, 22 (1), 6–7.

Chen, Y., Ardila-gomez, A. ve Frame, G., 2017, Achieving energy savings by intelligent transportation systems investments in the context of smart cities, *Transportation Research Part D*, 54, 381–396.

Choosakun, A., Chaiittipornwong, Y. ve Yeom, C., 2021, Development of The Cooperative Intelligent Transport System in Thailand: A Prospective Approach, *Infrastructures*, 6 (3), 36.

Cui, J., Sabaliauskaite, G., Liew, L. S., Zhou, F. ve Zhang, B., 2019, Collaborative Analysis Framework of Safety and Security for Autonomous Vehicles, *IEEE Access*, 7, 148672–148683.

Damaj, I., Al Khatib, S. K., Naous, T., Lawand, W., Abdelrazzak, Z. Z. ve Mouftah, H. T., 2021, Intelligent transportation systems: A survey on modern hardware devices for the era of machine learning, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, (xxxx).

Datta, S. K., Da Costa, R. P. F., Harri, J. ve Bonnet, C., 2016, Integrating Connected Vehicles in Internet of Things Ecosystems: Challenges and Solutions, *WoWMoM 2016 - 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 1–6.

Davidson, P. ve Spinoulas, A., 2015, Autonomous Vehicles - What Could This Mean for the Future of Transport?, *AITPM National Conference*.

Dhattarwal, S. K., Rathee, S. K. ve Singh, H., 2004, Pattern and Distribution of Fatal Injuries in Road Traffic Accidents in Haryana, *Medico-Legal Update*, 4 (4), 111–114.

Dixit, V. V, Chand, S. ve Nair, D. J., 2016, Autonomous Vehicles: Disengagements, Accidents

and Reaction Times, *PLoS ONE*, 11 (12), 1–14.

Duarte, F. ve Ratti, C., 2018, The Impact of Autonomous Vehicles on Cities : A Review, *Journal of Urban Technology*, 25 (4), 3–18.

Fagnant, D. J. ve Kockelman, K., 2015, Preparing a Nation for Autonomous Vehicles : Opportunities , Barriers and Policy Recommendations, *Transportation Research Part A*, 77, 167–181.

Faisal, A., Yigitcanlar, T., Currie, G., Journal, S., Use, L. ve Yigitcanlar, T., 2019, Understanding Autonomous Vehicles : A Systematic Literature Review on Capability, Impact, Planning and Policy, *Journal of transport and land use*, 12 (1), 45–72.

Favarò, F., Eurich, S. ve Nader, N., 2018, Autonomous Vehicles ' Disengagements : Trends , Triggers , and Regulatory Limitations, *Accident Analysis and Prevention*, 110, 136–148.

Festag, A., 2015, Standards for Vehicular Communication — from IEEE 802 . 11p to 5G, *Elektrotech. Inftech.*, 132 (7), 409–416.

Figueiredo, L., Jesus, I., Tenreiro Machado, J. A., Rui Ferreira, J. ve Martins De Carvalho, J. L., 2001, Towards The Development of Intelligent Transportation Systems, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1206–1211.

Figueiredo, M. C., Rossetti, R. J. F., Braga, R. A. M. ve Reis, L. P., 2009, An Approach to Simulate Autonomous Vehicles In Urban Traffic Scenarios, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 322–327.

Furukawa, H. ve Kiyohara, R., 2019, Traffic Flow in the Mixed Environment of Autonomous and Human-Operated Vehicles, *2018 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network, ICMU 2018*, 0–1.

Gao, C., Wang, G., Shi, W., Wang, Z. ve Chen, Y., 2021, Autonomous Driving Security: State of the Art and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (10), 7572–7593.

Garg, S., Mehrotra, D., Pandey, H. M. ve Pandey, S., 2021, Accessible Review of Internet of Vehicle Models for Intelligent Transportation and Research Gaps for Potential Future Directions, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14 (2), 978–1005.

Gavanas, N., 2019, Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities, *Urban Science*, 3 (2), 61.

Ghafari, S. M. ve Tjortjis, C., 2019, A Survey on Association Rules Mining Using Heuristics, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 9 (4), 1–29.

Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H. ve Meijers, E., 2007, Smart Cities: Ranking of European Medium-Sized Cities, *Vienna University of Technology.*

Gohar, A. ve Nencioni, G., 2021, The Role of 5G Technologies in a Smart City: The case for Intelligent Transportation System, *Sustainability*, 13 (9), 1–24.

Gordon, T. J. ve Lidberg, M., 2015, Automated Driving and Autonomous Functions on Road Vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 53 (7), 958–994.

Graefe, V. ve Kuhnert, K.-D., 1992, Vision-based Autonomous Road Vehicles, *In*: Graefe, V. and Kuhnert, K.-D., eds. *Vision-based Vehicle Guidance*. New York, NY: Springer, 1–29.

Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T. ve Macesanu, G., 2020, A Survey of Deep Learning Techniques for Autonomous Driving, *Journal of Field Robotics*, 37 (3), 362–386.

Guerrero-Ibañez, J., Contreras-Castillo, J. ve Zeadally, S., 2021, Deep Learning Support for Intelligent Transportation Systems, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32 (3), 1–22.

Haghighat, A. K., Ravichandra-Mouli, V., Chakraborty, P., Esfandiari, Y., Arabi, S. and Sharma, A., 2020, Applications of Deep Learning in Intelligent Transportation Systems, *Journal of Big Data Analytics in Transportation*. 2(2), 115-145.

Harantová, V., Kalašová, A., Hájnik, A., Harantová, V. ve Kalašová, A., 2021, Use of Electromobility and Autonomous Vehicles at Airports in Europe and Worldwide, *Transportation Research Procedia*, 55, 71–78.

Hasrouny, H., Ellatif, A., Bassil, C. ve Laouiti, A., 2017, VANet Security Challenges and Solutions : A Survey, *Vehicular Communications*, 7, 7–20.

Henriksson, J., Borg, M. ve Englund, C., 2018, Automotive Safety and Machine Learning: Initial Results From A Study on How To Adapt The ISO 26262 Safety Standard, *2018 ACM/IEEE 1st International Workshop on Software Engineering for AI in Autonomous Systems*, 47–49.

Hong, J., Tamakloe, R. ve Park, D., 2020, Discovering Insightful Rules among Truck Crash Characteristics using Apriori Algorithm, *Journal of Advanced Transportation*, 4323816.

IBM 2021a, *Model Fitting Information*, https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=diagnostics-model-fitting-information, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

IBM, 2021b, *Pseudo R Square*, https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=model-pseudo-r-square, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

IBM, 2021c, *Likelihood Ratio Tests*, https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=model-likelihood-ratio-tests, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

IBM, 2021d, *Classification Table*, https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=crm-classification-table, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

IBM, 2022, *Apriori Node*, https://www.ibm.com/docs/en/cloud-paks/cp-data/4.0?topic=modeling-apriori-node, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Jha, N., Srinivasa, D. K., Roy, G. ve Jagdish, S., 2004, Epidemiological Study of Road Traffic

Accident Cases: A Study from South India, *Indian Journal of Community Medicine*, 1, 20–24.

Ji, B., Zhang, X., Mumtaz, S., Han, C., Li, C., Wen, H. ve Wang, D., 2020, Survey on The Internet of Vehicles : Network Architectures and Applications, *IEEE Communications Standards Magazine*, 4 (1), 34–41.

Juan Antonio Guerrero Ibáñez, S. Z. ve Contreras-Castillo, J., 2015, Integration Challenges of Intelligent Transportation Systems with Connected Vehicle, Cloud Computing, and Internet of Things Technologies, *IEEE Wireless Communications*, 22 (6), 122–128.

Juyal, A., Sharma, S. ve Matta, P., 2021, Deep Learning Methods for Object Detection in Autonomous Vehicles, *2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 751–755.

Kaffash, S., Truong, A. ve Zhu, J., 2021, Big Data Algorithms and Applications in Intelligent Transportation System : A Review and Bibliometric Analysis, *International Journal of Production Economics*, 231, 107868.

Kapusta, J. ve Kalašová, A., 2015, Motor Vehicle Safety Technologies in Relation to The Accident Rates, *Communications in Computer and Information Science*, 531, 172–179.

Karacasu, M., Ergül, B. ve Yavuz, A. A., 2014, Estimating The Causes of Traffic Accidents Using Logistic Regression and Discriminant Analysis, *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 21 (4), 305–313.

Khadka, A., Karypidis, P., Lytos, A. ve Efstathopoulos, G., 2021, A Benchmarking Framework for Cyber-Attacks on Autonomous Vehicles, *Transportation Research Procedia* , 52, 323–330.

Khalid Khan, S., Shiwakoti, N. ve Stasinopoulos, P., 2022, A Conceptual System Dynamics Model for Cybersecurity Assessment of Connected and Autonomous Vehicles, *Accident Analysis and Prevention*, 165 (June 2021), 106515.

Kim, H., Jo, G. ve Son, J., 2021, Implementation and Verification of Virtual Environment for Autonomous Driving System Development, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 29 (4), 331–336.

Kim, J. H., 2022, Smart City Trends: A Focus on 5 Countries and 15 Companies, *Cities*, 123, 103551.

Kim, Y., Park, S., Kim, I., Ko, H., Cho, S. ve Yun, Ii., 2021, Study on Establishment of Development Strategy for K-City Based on Analysis of Domestic and Overseas Automated Vehicle Testbeds, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 20 (4), 28–46.

Koschuch, M., Sebron, W., Szalay, Z., Torok, A., Tschiurtz, H. ve Wahl, I., 2019, Safety & Security in The Context of Autonomous Driving, *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, 1–7.

Kotu, V. ve Deshpande, B., 2015, Association Analysis, *In*: *Predictive Analytics and Data Mining*. 195–216.

Kutela, B., Das, S. ve Dadashova, B., 2021, Mining Patterns of Autonomous Vehicle Crashes Involving Vulnerable Road Users to Understand The Associated Factors, *Accident Analysis & Prevention*, (May), 106473.

Kwak, C. ve Clayton-Matthews, A., 2002, Multinomial Logistic Regression, *Nursing Research*, 51 (6), 404–410.

Laerd, 2022, *Multinomial Logistic Regression using SPSS Statistics*, https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/multinomial-logistic-regression-using-spss-statistics.php, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Laña, I., Sanchez-Medina, J. J., Vlahogianni, E. I. ve Ser, J. Del, 2021, From Data to Actions in Intelligent Transportation Systems: A Prescription of Functional Requirements for Model Actionability, *Sensors (Switzerland)*, 21 (4), 1–34.

Lee, C. K. H. ve Wu, K. Y. K., 2021, Making Autonomous Vehicle Systems Human-Like: Lessons Learned from Accident Experiences in Traffic, *Enterprise Information Systems*, 1–23.

Li, L., Huang, W., Liu, Y., Zheng, N. ve Wang, F., 2016, Intelligence Testing for Autonomous Vehicles : A New Approach, *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT VEHICLE*, 1 (2), 158–166.

Liu, P., Yang, R. ve Xu, Z., 2019, How Safe Is Safe Enough for Self-Driving Vehicles?, *Risk Analysis*, 39 (2), 315–325.

Macheret, P. D., Savchuk, R. R. ve Shkuratov, G. I., 2021, Intelligent Transport Systems: Analysis of the Current State and Prospects of Development, *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 234–237.

Makarova, I., Shubenkova, K., Mukhametdinov, E. ve Pashkevich, A., 2018, Safety Related Problems of Transport System and Their Solutions, *11th International Science and Technical Conference Automotive Safety, AUTOMOTIVE SAFETY 2018*, 1–9.

Makino, H., Tamada, K., Sakai, K. ve Kamijo, S., 2018, Solutions for Urban Traffic Issues by ITS Technologies, *IATSS Research*, 42 (2), 49–60.

Martínez-Díaz, M. ve Soriguera, F., 2018, Autonomous Vehicles: Theoretical and Practical Challenges, *Transportation Research Procedia*, 33, 275–282.

Martinho, A., Herber, N., Kroesen, M. ve Chorus, C., 2021, Ethical Issues In Focus By The Autonomous Vehicles Industry, *Transport Reviews*, 41 (5), 556–577.

Metro İstanbul, 2017, *M5 Üsküdar-Çekmeköy Metro Hattı*, https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/HatDetay?hat=M5, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Nanda, A., Puthal, D., Rodrigues, J. J. P. C. ve Kozlov, S. A., 2019, Internet of Autonomous Vehicles Communications Security : Overview, Issues, and Directions, *IEEE Wireless Communications*, 26 (4), 60–65.

OECD, 2021, Road Safety Annual Report 2021: The Impact of Covid-19, Paris.

OKANOM, 2011, *OKANOM - Okan Otonom Araç Projesi*, https://www.okan.edu.tr/arastirma/sayfa/914/okanom-okan-otonom-arac-projesi/, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

OL316, 2022, *Report of Traffic Collision Involving an Autonomous Vehicle*, https://www.dmv.ca.gov/portal/file/report-of-traffic-accident-involving-an-autonomous-vehicle-ol-316-pdf/, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Park, H. A., 2013, An Introduction To Logistic Regression: From Basic Concepts To Interpretation With Particular Attention To Nursing Domain, *Journal of Korean Academy of Nursing*, 43 (2), 154–164.

Park, S. H., Synn, J., Kwon, O. H. ve Sung, Y., 2018, Apriori-Based Text Mining Method for The Advancement of The Transportation Management Plan in Expressway Work Zones, *Journal of Supercomputing*, 74 (3), 1283–1298.

Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A. A., Jarawan, E. ve Mathers, C., 2004, *World Report on Road Traffic Injury Prevention*, World Health Organization.

Petrovic, D., Mijailović, R. ve Pešić, D., 2020, Traffic Accidents with Autonomous Vehicles: Type of Collisions, Manoeuvres and Errors of Conventional Vehicles' Drivers, *Transportation Research Procedia*, 45 (2019), 161–168.

Putri, T. D., 2021, Intelligent transportation systems (ITS): A systematic review using a Natural Language Processing (NLP) approach, *Heliyon*, 7 (August), e08615.

Qiao, W. ve Shang, B., 2011, Current Situation Analysis and Safety Countermeasure Study on Road Traffic Accidents in China, *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 3034–3037.

Rachmat Suryadithia, Muhammad Faisal, Arman Syah Putra ve Nurul Aisyah, 2021, Technological developments in the Intelligent Transportation System (ITS), *International Journal of Science, Technology & Management*, 2 (3), 837–843.

Rajasekhar, M. V. ve Jaswal, A. K., 2015, Autonomous Vehicles: The Future of Automobiles, *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC)*, 1–6.

Rowley, J., Liu, A., Sandry, S., Gross, J., Salvador, M., Anton, C. ve Fleming, C., 2018, Examining The Driverless Future: An Analysis of Human-Caused Vehicle Accidents and Development of An Autonomous Vehicle Communication Testbed, *2018 Systems and Information Engineering Design Symposium, SIEDS 2018*, 58–63.

Rudskoy, A., Ilin, I., Prokhorov, A., Rudskoy, A., Ilin, I. ve Prokhorov, A., 2021, Digital Twins in the Intelligent Transport Systems, *Transportation Research Procedia*, 54 (2020), 927–

935.

Rustagi, N., Kumar, A., Norbu, L. ve Vyas, D., 2018, Applying Haddon Matrix for Evaluation of Road Crash Victims in Delhi, India, *Indian Journal of Surgery*, 80 (5), 479–487.

Sabaliauskaite, G., Cui, J. ve Liew, L. S., 2018, Integrating Autonomous Vehicle Safety and Security Analysis Using STPA Method and the Six-Step Model, *International Journal on Advances in Security*, 11 (1-2), 160-169.

Saidallah, M., El Fergougui, A. ve Elalaoui, A. E., 2016, A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators, *MATEC Web of Conferences*, 81.

Schwarting, W., Alonso-Mora, J. ve Rus, D., 2018, Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1 (January), 187–210.

Sharma, O., Sahoo, N. C. ve Puhan, N. B., 2021, Recent Advances in Motion and Behavior Planning Techniques for Software Architecture of Autonomous Vehicles : A State-of-The-Art Survey, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 101.

Shi, Y., 2011, The Research of Road Traffic Accidents In Henan Province Based on The Human Factors Engineering, *2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IE and EM 2011*, 1424–1427.

Shlaclover, S. E., 2007, PATH at 20 - History and Major Milestones, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8 (4), 584–592.

Sinha, A., Vu, V., Chand, S., Wijayaratna, K. ve Dixit, V., 2021, A Crash Injury Model Involving Autonomous Vehicle: Investigating of Crash and Disengagement Reports, *Sustainability (Switzerland)*, 13 (14), 1–22.

Skrickij, V., Šabanovič, E. ve Žuraulis, V., 2020, Autonomous Road Vehicles: Recent Issues and Expectations, *IET Intelligent Transport Systems*, 14 (6), 471–479.

Sohn, S. Y. ve Shin, H., 2001, Pattern Recognition for Road Traffic Accident Severity in Korea, *Ergonomics*, 44 (1), 107–117.

Sørensen, H. T., Sabroe, S. ve Olsen, J., 1996, A Framework For Evaluation of Secondary Data Sources For Epidemiological Research, *International Journal of Epidemiology*, 25 (2), 435–442.

Steger, M., Karner, M., Hillebrand, J., Rom, W. ve Romer, K., 2016, A Security Metric for Structured Security Analysis of Cyber-Physical Systems Supporting SAE J3061, *2016 2nd International Workshop on Modelling, Analysis, and Control of Complex CPS, CPS Data 2016*, 1–6.

Strom, E. G., 2011, On Medium Access and Physical Layer Standards for Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe, *Proceedings of the IEEE*, 99 (7), 1183–1188.

Sumalee, A. ve Ho, H. W., 2018, Smarter and more connected: Future intelligent transportation

system, *IATSS Research*, 42 (2), 67–71.

Sun, N., 2021, Intelligent Transportation System Planning in the Age of Artificial Intelligence, *E3S Web of Conferences*, 253, 4–8.

Sussman, J. M., 1993, Intelligent Vehicle Highway Systems: Challenge for The Future, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1, 101–104.

Sussman, J. M., 2005, ITS: A short history and perspective on the future, *In*: Sussman, J. M., ed. *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Boston, MA: Springer, 3–17.

Tai, W. K., Wang, H. C., Chiang, C. Y., Chien, C. Y., Lai, K. ve Huang, T. C., 2019, RTAIS: Road Traffic Accident Information System, *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, 1393–1397.

Talha, B., Pätzold, M., Luis, J. G., Carreras, I., Coviello, C., Marzorati, S. ve Perez, G., 2013, What's New in Intelligent Transportation Systems?: An Overview of European Projects and Initiatives, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8 (4), 45–69.

Tay, R., Rifaat, S. M. ve Chin, H. C., 2008, A Logistic Model of The Effects of Roadway, Environmental, Vehicle, Crash and Driver Characteristics on Hit-and-Run Crashes, *Accident Analysis and Prevention*, 40 (4), 1330–1336.

Technoloav, S. E. I. I., 1994, Smart Cars, Smart Highways, *IEEE Spectrum*, 31 (4), 27–33.

Teoh, E. R. ve Kidd, D. G., 2017, Rage Against The Machine? Google's Self-Driving Cars versus Human Drivers, *Journal of Safety Research*, 63, 57–60.

Tran, C. N. N., Tat, T. T. H., Tam, V. W. Y. ve Tran, D. H., 2022, Factors affecting intelligent transport systems towards a smart city: a critical review, *International Journal of Construction Management*, 0 (0), 1–17.

Tsugawa, S. ve Kato, S., 2010, Energy ITS: Another Application of Vehicular Communications, *IEEE Communications Magazine*, 48 (11), 120–126.

UAB, 2020, *Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı*, https://www.uab.gov.tr/duyurular/ulusal-akilli-ulasim-sistemleri-strateji-belgesi-ve-2020-2023-eylem-plani-yayinlandi, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Üneş, M. ve Közkurt, C., 2021, Üniversite Yerleşkesi Ulaşım Planlamasında Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojilerinin Kullanılması, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 4 (2), 99-119.

Veres, M. ve Moussa, M., 2020, Deep Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey of Emerging Trends, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21 (8), 3152–3168.

Wang, J., Zhang, L., Huang, Y. ve Zhao, J., 2020, Safety of Autonomous Vehicles, *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 8867757.

Wang, S. ve Li, Z., 2019a, Exploring Causes and Effects of Automated Vehicle Disengagement Using Statistical Modeling and Classification Tree Based on Field Test Data, *Accident Analysis and Prevention*, 129 (January), 44–54.

Wang, S. ve Li, Z., 2019b, Exploring The Mechanism of Crashes with Automated Vehicles Using Statistical Modeling Approaches, *PLoS ONE*, 14 (3), 1–16.

Weng, J., Zhu, J. Z., Yan, X. ve Liu, Z., 2016, Investigation of Work Zone Crash Casualty Patterns Using Association Rules, *Accident Analysis and Prevention*, 92, 43–52.

WHO, 2018, *Global status report on road safety 2018*, https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

WHO, 2020, *The top 10 causes of death*, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

WHO, 2022, *Road traffic injuries*, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries, [Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2022].

Xu, L. ve Liu, Q., 2013, Human Factors Analysis to Yangtze River Water Traffic Accidents Based on Fault Tree, *Proceedings of 2013 6th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2013*, 3, 23–25.

Yabing, J., 2013, Research of an Improved Apriori Algorithm in Data Mining Association Rules, *International Journal of Computer and Communication Engineering*, 2 (1), 25–27.

Yan, X., Zhang, H. ve Wu, C., 2012, Research and Development of Intelligent Transportation Systems, *Proceedings - 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*, 321–327.

Yang, Y., Yuan, Z. Z., Sun, D. Y. ve Wen, X. L., 2019, Analysis of The Factors Influencing Highway Crash Risk in Different Regional Types Based on Improved Apriori Algorithm, *Advances in Transportation Studies*, 49 (February 2020), 165–178.

Ye, W., Wang, C., Chen, F., Yan, S. ve Li, L., 2021, Approaching Autonomous Driving with Cautious Optimism: Analysis of Road Traffic Injuries Involving Autonomous Vehicles Based on Field Test Data, *Injury Prevention*, 27 (1), 42–47.

Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J. ve Walsh, J., 2021, Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles : A Review, *Sensors*, 21 (6), 2140.

Yu, S., Jia, Y. ve Sun, D., 2019, Identifying Factors That Influence The Patterns of Road Crashes Using Association Rules: A Case Study From Wisconsin, United States, *Sustainability (Switzerland)*, 11 (7), 1–14.

Yuan, T., Da Rocha Neto, W., Rothenberg, C. E., Obraczka, K., Barakat, C. ve Turletti, T., 2022, Machine Learning for Next-Generation Intelligent Transportation Systems: A Survey, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33 (4), 1–35.

Zhang, J., Wang, F. Y., Wang, K., Lin, W. H., Xu, X. ve Chen, C., 2011, Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12 (4), 1624–1639.

Zhang, W. H., Deng, H. X. ve Wang, X. Bin, 2010, Safety Factor Analysis For Traffic Accident Scene Based on Computer Simulation, *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2010*, 3, 260–263.

Zhang, Y., 2021, Cause-and-Effect Analysis on Autonomous Vehicle Disengagement with NLP Deep Transfer Learning : A Scalable End-to-End Pipeline Approach Using the California DMV Dataset, 0, 1–19.

Zhang, Y., Yang, X. J. ve Zhou, F., 2021, Disengagement Cause-and-Effect Relationships Extraction Using an NLP Pipeline, (September 2014), 1–10.

EKLER

EK 1. Lojistik Model Parametre Tahminleri (Parameter Estimates)

Araç Hasarı		**B**	**Std. Hata**	**Wald**	**sd**	**p**	**Exp(B)**
Az	Intercept	20,094	7339,9	0	1	0,998	
	Sürüş Modu=Otonom Mod	0,111	0,523	0,045	1	0,831	1,118
	Sürüş Modu=Manuel Mod	0,000	,	,	0	,	,
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yaya	17,612	5577,6	0	1	0,997	44525898,35
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Bisikletli	-3,955	0,998	15,720	1	0,000	0,019
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Diğer	-2,763	0,623	19,643	1	0,000	0,063
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Hava Durumu=Açık	-16,046	7339,9	0	1	0,998	1,07E-07
	Hava Durumu=Bulutlu	-15,445	7339,9	0	1	0,998	1,96E-07
	Hava Durumu=Yağmurlu	2,487	8272,7	0	1	1	12,023
	Hava Durumu=Sisli	0,000	,	,	0	,	,
	Yol Yüzeyi=Kuru	0,362	1,402	0,067	1	0,796	1,437
	Yol Yüzeyi=Islak	-1,376	1,836	0,561	1	0,454	0,253
	Yol Yüzeyi=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Durmuş	0,509	1,338	0,145	1	0,704	1,664

	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Düz İlerleme	0,538	1,402	0,147	1	0,701	1,712
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	1,145	1,446	0,628	1	0,428	3,144
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Yavaşlama/Durma	-0,423	1,446	0,085	1	0,77	0,655
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Şerit Değiştirme	15,207	5016,6	0,000	1	0,998	4020078,649
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Park Etmiş	0,574	1,890	0,092	1	0,761	1,776
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Diğer	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Durmuş	-2,090	2,187	0,914	1	0,339	0,124
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Düz İlerleme	-2,670	1,640	2,649	1	0,104	0,069
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)= Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	-3,441	1,730	3,958	1	0,047	0,032
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yavaşlama/Durma	-4,068	1,979	4,225	1	0,040	0,017
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Şerit Değiştirme	-1,869	2,041	0,838	1	0,360	0,154
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Park Etmiş	-1,132	2,167	0,273	1	0,601	0,322
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Diğer	-2,746	1,641	2,801	1	0,094	0,064

	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Doğrudan	0,685	1,238	0,306	1	0,58	1,984
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yandan	0,306	1,014	0,091	1	0,763	1,358
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Arka Uç	-0,247	0,762	0,105	1	0,746	0,782
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Geniş Tarafı	-0,646	1,296	0,249	1	0,618	0,524
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Nesneyi Vurma	17,194	2490,9	0,000	1	0,994	29322111,53
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Diğer	-0,439	1,271	0,119	1	0,73	0,645
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Doğrudan	-0,598	1,114	0,289	1	0,591	0,55
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yandan	0,006	1,145	0,000	1	0,996	1,006
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Arka Uç	-0,551	1,135	0,236	1	0,627	0,576
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Geniş Tarafı	2,121	1,562	1,843	1	0,175	8,337
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Diğer	-2,954	1,462	4,085	1	0,043	0,052
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aydınlatma=Gün Işığı	1,055	0,949	1,235	1	0,266	2,871
	Aydınlatma=Karanlık	1,801	1,096	2,701	1	0,1	6,056
	Aydınlatma=Alacakaranlık/ Şafak	0,000	,	,	0	,	,

Orta	Intercept	-50,891	8926,2	0,000	1	0,995	
	Sürüş Modu=Otonom Mod	-0,275	0,638	0,185	1	0,667	0,76
	Sürüş Modu=Manuel Mod	0,000	,	,	0	,	,
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yaya	0,006	9351,5	0,000	1	1	1,006
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Bisikletli	-22,416	7490,3	0,000	1	0,998	1,84E-10
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Diğer	-2,273	0,751	9,167	1	0,002	0,103
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Hava Durumu=Açık	-0,610	8716,4	0,000	1	1	0,543
	Hava Durumu=Bulutlu	0,096	8716,4	0,000	1	1	1,101
	Hava Durumu=Yağmurlu	4,425	10316	0,000	1	1	83,473
	Hava Durumu=Sisli	0,000	,	,	0	,	,
	Yol Yüzeyi=Kuru	16,705	0,000	,	1	,	17980439,79
	Yol Yüzeyi=Islak	-2,024	4293,8	0,000	1	1	0,132
	Yol Yüzeyi=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Durmuş	18,916	1923,9	0,000	1	0,992	164045134,8
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Düz İlerleme	19,562	1923,9	0,000	1	0,992	313120751,7
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	19,983	1923,9	0,000	1	0,992	477115730,9

	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Yavaşlama/Durma	16,727	1923,9	0,000	1	0,993	18380582,71
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Şerit Değiştirme	35,529	5372,9	0,000	1	0,995	2,69E+15
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Park Etmiş	18,192	1923,9	0,000	1	0,992	79524654,91
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Diğer	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Durmuş	-13,611	2935,7	0,000	1	0,996	1,23E-06
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Düz İlerleme	-0,394	2,400	0,027	1	0,870	0,674
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)= Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	-3,189	2,644	1,454	1	0,228	0,041
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yavaşlama/Durma	-18,156	4587,4	0,000	1	0,997	1,30E-08
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Şerit Değiştirme	1,12	2,689	0,173	1	0,677	3,064
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Park Etmiş	2,144	2,890	0,55	1	0,458	8,53
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Diğer	-1,123	2,450	0,21	1	0,647	0,325
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Doğrudan	0,717	1,515	0,224	1	0,636	2,048
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yandan	-1,672	1,321	1,601	1	0,206	0,188

	Çarpışma Türü (Araç 1)=Arka Uç	-1,122	1,019	1,212	1	0,271	0,326
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Geniş Tarafı	-0,54	1,517	0,127	1	0,722	0,583
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Nesneyi Vurma	18,712	2490,9	0,000	1	0,994	133755021,4
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Diğer	2,376	2,061	1,330	1	0,249	10,763
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Doğrudan	0,702	1,601	0,192	1	0,661	2,018
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yandan	0,849	1,600	0,281	1	0,596	2,336
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Arka Uç	-0,815	1,607	0,257	1	0,612	0,443
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Geniş Tarafı	2,625	2,029	1,674	1	0,196	13,804
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Diğer	-5,172	2,546	4,128	1	0,042	0,006
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aydınlatma=Gün Işığı	18,082	0,781	535,574	1	0,000	71248054
	Aydınlatma=Karanlık	19,151	0,000	,	1	,	207490369,9
	Aydınlatma=Alacakaranlık/ Şafak	0,000	,	,	0	,	,
Çok	Intercept	-101,072	18198	0,000	1	0,996	
	Sürüş Modu=Otonom Mod	-1,415	1,813	0,609	1	0,435	0,243
	Sürüş Modu=Manuel Mod	0,000	,	,	0	,	,

	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yaya	35,213	0,000	,	1	,	1,96E+15
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Bisikletli	32,8	734,32	0,002	1	0,964	1,76E+14
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Diğer	-15,346	812,35	0,000	1	0,985	2,16E-07
	Kazaya Dahil Olan Yol Kullanıcısı=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Hava Durumu=Açık	29,696	8925,7	0,000	1	0,997	7,88E+12
	Hava Durumu=Bulutlu	33,666	8925,7	0,000	1	0,997	4,18E+14
	Hava Durumu=Yağmurlu	-4,863	10674	0,000	1	1	0,008
	Hava Durumu=Sisli	0,000	,	,	0	,	,
	Yol Yüzeyi=Kuru	6,596	10073	0,000	1	0,999	732,256
	Yol Yüzeyi=Islak	22,999	10288	0,000	1	0,998	9735018433
	Yol Yüzeyi=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Durmuş	47,265	2521,4	0,000	1	0,985	3,37E+20
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Düz İlerleme	16,112	2235,9	0,000	1	0,994	9936246,107
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	34,053	2446,6	0,000	1	0,989	6,15E+14
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Yavaşlama/Durma	45,191	2521,5	0,000	1	0,986	4,23E+19
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Şerit Değiştirme	13,146	8231,7	0,000	1	0,999	512081,066

	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Park Etmiş	42,43	5872,4	0,000	1	0,994	2,67E+18
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 1)=Diğer	0,000	,	,	0	,	,
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Durmuş	42,143	14804	0,000	1	0,998	2,01E+18
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Düz İlerleme	13,707	6464,8	0,000	1	0,998	896736,538
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)= Dönüş Yapma (Sağ, Sol veya U)	-6,957	6666	0,000	1	0,999	0,001
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yavaşlama/Durma	-2,177	7855,7	0,000	1	1	0,113
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Şerit Değiştirme	28,019	7281,5	0,000	1	0,997	1,47E+12
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Park Etmiş	38,026	7157,3	0,000	1	0,996	3,27E+16
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Diğer	14,776	6464,8	0,000	1	0,998	2613530,02
	Aracın Çarpışmadan Önceki Hareketi (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Doğrudan	-16,661	1332,6	0,000	1	0,99	5,81E-08
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yandan	-14,151	2962,3	0,000	1	0,996	7,15E-07
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Arka Uç	-1,587	2,814	0,318	1	0,573	0,205
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Geniş Tarafı	-11,027	2989,7	0,000	1	0,997	1,63E-05

	Çarpışma Türü (Araç 1)=Nesneyi Vurma	57,381	7339,7	0,000	1	0,994	8,32E+24
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Diğer	-9,114	6897,2	0,000	1	0,999	0
	Çarpışma Türü (Araç 1)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Doğrudan	-7,646	1137,2	0,000	1	0,995	0
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yandan	-24,233	1593,4	0,000	1	0,988	2,99E-11
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Arka Uç	-9,429	1137,2	0,000	1	0,993	8,04E-05
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Geniş Tarafı	-6,896	1137,2	0,000	1	0,995	0,001
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Diğer	-18,723	8405,6	0,000	1	0,998	7,39E-09
	Çarpışma Türü (Araç 2)=Yok	0,000	,	,	0	,	,
	Aydınlatma=Gün Işığı	-19,998	603,28	0,001	1	0,974	2,06E-09
	Aydınlatma=Karanlık	16,045	423,89	0,001	1	0,970	9293077,4
	Aydınlatma=Alacakaranlık/ Şafak	0,000	,	,	0	,	,

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Halil ÇEVİK
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Bölümü	Elektrik Elektronik Mühendisliği (%100 İngilizce)
Mezuniyet Yılı	19.06.2019

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı
Programı	Akıllı Ulaşım Sistemleri Programı