

TRAFFIC MONITORING AND INTELLIGENT TRANSPORTATION WITH UAVS: POST-2020 DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS

BÜŞRA BİŞKİN, TUĞÇE İNAĞ

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have emerged as a key technology in traffic monitoring and intelligent transportation systems. Their agility, operational flexibility, and real-time high-resolution data collection capabilities suit them for various transportation applications. This study reviews UAV-based traffic monitoring and intelligent transportation research conducted since 2020, focusing on the integration of image processing, artificial intelligence, and sensor fusion technologies. The increasing demand for contactless and adaptive monitoring solutions in the post-COVID-19 era has further highlighted the advantages of UAVs. Unlike stationary or vehicle-mounted systems, UAVs can efficiently cover large areas, adapt to dynamic conditions, and reduce infrastructure costs. The study also provides policy recommendations and technical guidance for the effective integration of UAVs into national traffic management strategies, with a specific emphasis on the Türkiye context.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Traffic Monitoring, Intelligent Transportation Systems, Image Processing, Artificial Intelligence, Traffic Management

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

Mail: busrabiskin@gazi.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7826-4717>

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

Mail: tugceduzce@gazi.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-6727>

Makale Atf Bilgisi:	Bişkin, B., İnağ, T. (2025). "İHA'lar ile Trafik İzleme ve Akıllı Ulaşım: 2020 Sonrası Gelişmeler ve Uygulamalar". <i>Ulaştırma ve Altyapı</i> , Yıl: 2, Sayı: 2, s. (236-258)
Makale Türü:	Araştırma
Geliş Tarihi:	28.04.2025
Kabul Tarihi:	12.06.2025
Yayın Tarihi:	25.06.2025
Yayın Sezonu:	Ocak-Haziran 2025

İHA'LAR İLE TRAFİK İZLEME VE AKILLI ULAŞIM: 2020 SONRASI GELİŞMELER VE UYGULAMALAR

BÜŞRA BIŞKIN, TUĞÇE İNAĞ

ÖZ

İnsansız hava araçları (İHA'lar), trafik izleme ve akıllı ulaşım sistemlerinde önemli bir teknolojik araç olarak öne çıkmaktadır. Yüksek manevra kabiliyeti, operasyonel esneklik ve gerçek zamanlı veri toplama kapasiteleri sayesinde İHA'lar, ulaşım uygulamalarında etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma, 2020 sonrası dönemde gerçekleştirilen İHA tabanlı trafik izleme ve akıllı ulaşım sistemlerine ilişkin literatürü incelemekte; görüntü işleme, yapay zekâ ve sensör füzyonu gibi teknolojilerle entegrasyon süreçlerini ele almaktadır. COVID-19 sonrası dönemde artan temasız ve uyarlanabilir izleme ihtiyacı, İHA'ların etkinliğini artırmıştır. Sabit kamera ve araç tabanlı sistemlere kıyasla daha geniş alanları kapsayabilen, esnek çözümler sunan ve altyapı maliyetlerini azaltan İHA'lar, trafik yönetiminde stratejik roller üstlenmektedir. Çalışma ayrıca Türkiye bağlamında değerlendirmeler yaparak, ulusal stratejilere yönelik politika önerileri ve teknik tavsiyelerde bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, Trafik İzleme, Akıllı Ulaşım Sistemleri, Görüntü İşleme, Yapay Zekâ, Trafik Yönetimi

1. Giriş

Kentsel nüfusun artışı ve araç sayısındaki hızlı yükseliş, trafik yönetimini küresel ölçekte önemli bir sorun haline getirmiştir. Geleneksel sistemler, artan trafik yoğunluğunu etkili biçimde yönetmede yetersiz kalmakta; bu nedenle yeni teknolojik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda, İnsansız Hava Araçları (İHA) teknolojisindeki gelişmeler, bu alanda yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır (Hossain vd., 2019).

İHA'lar, esnek konumlandırma imkânı, geniş kapsama alanı ve hızlı veri üretimi özellikleriyle trafik yönetiminde öne çıkmaktadır. Sabit kamera sistemleri, yerleşik sensörler ve manuel sayımlarla karşılaştırıldığında, İHA'lar dinamik ve gerçek zamanlı veriler sağlayarak karar süreçlerini desteklemektedir. Ayrıca kazaların tespiti, acil müdahale planlaması ve trafik akışının optimizasyonu gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır.

COVID-19 pandemisi sonrasında, temaslı gözlem ve ulaşım yöntemlerine olan güven önemli ölçüde azalmış; bu durum, özellikle şehir içi ulaşım, toplu taşıma sistemleri ve lojistik faaliyetlerinde temassız ve esnek çözümler arayışını artırmıştır. Bu çerçevede İHA'lar, yalnızca trafik izleme ve yönetiminde değil, aynı zamanda sağlık lojistiği ve kriz yönetimi alanlarında da aktif biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin Hindistan'da İHA'lar ulaşılması zor bölgelere ilaç ve aşı ulaştırmak amacıyla kullanılmış; bu sayede insan teması azaltılarak enfeksiyon zincirinin kırılması hedeflenmiştir (Sharma, 2021). Avustralya'da, COVID-19 sonrası dönemde İHA'ların tıbbi teslimatlar ve ulaşım hizmetlerinde yaygın biçimde kullanılması, bu teknolojinin esnek ve düşük riskli bir ulaşım alternatifi sunduğunu ortaya koymuştur (Heiets vd., 2023). Benzer şekilde Avusturya'da mevcut drone altyapıları, COVID-19 test kitlerinin dağıtımını amacıyla yeniden yapılandırılmış ve kriz zamanlarında ulaşım sistemlerinin dayanıklılığını artırmak için kullanılmıştır (Kunovjanek & Wankmüller, 2021). Tüm bu gelişmeler 2020 sonrası dönemde İHA'ların yalnızca gözetim değil, akıllı ulaşım çözümlerinin ayrılmaz bir bileşeni haline geldiğini göstermektedir.

Bu çalışma, 2020 yılı ve sonrasında geliştirilen İHA tabanlı trafik izleme ve yönetim sistemlerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Araştırma, bu sistemlerin trafik yönetiminde nasıl kullanıldığını, bu uygulamaların avantajlarını ve karşılaşılan zorlukları değerlendirmektedir. Ayrıca, farklı ülkelerdeki örnek uygulamalar ve vaka çalışmaları analiz edilerek, Türkiye için uygulanabilir çözüm önerileri sunulmaktadır.

2. İHA'ların Trafik Yönetiminde Kullanımı

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), özellikle trafik gözetimi ve denetim süreçlerinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bölümde, İHA'ların trafik izleme, akışın iyileştirilmesi ve acil durumlara müdahale gibi temel uygulama alanları sistematik biçimde ele alınmaktadır.

2.1. Ulaşım Gözetiminde Kullanılan İHA Türleri ve Teknik Özellikleri

Ulaşım gözetimi ve trafik izleme uygulamalarında farklı İHA türleri farklı operasyonel avantajlar ve teknik sınırlamalar sunmaktadır. Bu nedenle, kullanılacak İHA platformunun uçuş süresi, taşıma kapasitesi, manevra kabiliyeti ve sensör entegrasyonu gibi özellikleri, uygulanacak senaryoya göre dikkatle seçilmelidir. Bu bölümde sabit kanatlı, döner kanatlı ve hibrit İHA'ların karakteristik yapıları, tipik kullanım alanları ve teknik özellikleri özetlenmekte; ayrıca trafik izleme bağlamında yaygın olarak kullanılan sensör sistemlerine kısaca değinilmektedir.

Sabit Kanatlı İHA'lar (Fixed-Wing): Uçak benzeri gövde ve sabit kanat yapısıyla aerodinamik kaldırma oluşturarak uzun süreli ve geniş menzilli uçuş sağlarlar. Saatler düzeyinde havada kalabilir, yüksek hız ve ağır sensör taşıma kapasitesine sahiptirler. (Coifman vd., 2003) sabit kanatlı MLB BAT III ile ~150 m irtifada, ~50 km/s hızla iki saatlik gerçek zamanlı video aktarımı sağlamıştır.

Döner Kanatlı İHA'lar (Rotary-Wing): VTOL (dikey kalkış ve iniş) yeteneğine sahip çok rotorlu sistemlerdir. Yüksek manevra kabiliyetleri sayesinde özellikle kentsel alanlarda kısa menzilli görevlerde etkilidirler. Tipik uçuş süreleri 20-60 dakika, menzilleri birkaç kilometre ile sınırlıdır. (Lee vd., 2015), quadrotor (dört rotor) drone ile kavşak gözetimi ve kaza tespitinde başarı sağlamış, ancak görüntü stabilizasyonu sorunları bildirmiştir.

Hibrit İHA'lar (Hybrid VTOL): Sabit ve döner kanat sistemlerinin avantajlarını birleştirirler. Dikey kalkış-iniş sonrası yatay uçuşa geçerek enerji verimliliği sağlarlar. Yaklaşık 1 saatlik uçuş süresi sunarken, dikey kalkış mekanizması taşıma kapasitesini sınırlayabilir.

Genel Sensör Donanımları: Trafik izleme amaçlı İHA'larda en yaygın kullanılan sensörler, yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmeyi sağlayan optik (RGB) kameralardır. Bu kameralar, araçların, yayaların ve yol durumunun gün ışığında ayrıntılı şekilde izlenmesini mümkün kılar (Coifman vd., 2003). Düşük ışık veya gece koşullarında ise termal kızılötesi (IR) kameralar kullanılarak 24 saat kesintisiz trafik gözetimi sağlanabilir (Lee vd., 2015). Işık Tespiti ve Menzil (LiDAR) sistemleri ise lazer darbeleriyle çalışan ve araçların konum, hız ve boyutlarını yüksek hassasiyetle ölçmek için kullanılan sensörlerdir (Niu vd., 2018). Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ve Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (GNSS) sensörleri ise İHA'nın konumunun izlenmesi ve çekilen görüntülerin haritalarla eşlenmesi için kullanılır. Bazı gelişmiş İHA'larda radar sensörleri de bulunur ve bu sensörler sis, yağmur gibi zorlayıcı hava koşullarında nesne algılamaya olanak tanır. Son dönemde, sensör füzyonu adı verilen yaklaşımla, aynı İHA üzerinde optik, termal ve LiDAR sensörlerinin bir arada kullanıldığı sistemler geliştirilmekte; böylece farklı veri katmanları birleştirilerek daha güvenilir ve çok boyutlu trafik analizi mümkün hale gelmektedir.

2.1.1. İHA Türlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

İHA türlerinin teknik özellikleri, operasyonel avantajları ve sınırlılıkları, trafik izleme uygulamalarında hangi platformun hangi senaryoya daha uygun olduğunun belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu çerçevede, sabit kanatlı, döner kanatlı ve hibrit sistemler arasında yapılan karşılaştırmalı değerlendirme, uygulama gereksinimlerine göre en uygun İHA tipinin seçilmesini kolaylaştırmaktadır. Tablo 1, bu üç temel İHA türüne ilişkin uçuş süresi, menzil, taşıma kapasitesi, kullanılan sensör çeşitleri, yaygın uygulama alanları ve başlıca kısıtları özetleyerek bütüncül bir bakış sunmaktadır.

Tablo 1: Farklı İHA Türlerinin Teknik Özellikleri, Uygulamaları ve Kısıtları

Çalışma	İHA Türü	Tipik Uçuş Süresi	Menzil	Faydalı Yük Kapasitesi	Kullanılan Sensörler	Yaygın Uygulamalar	Başlıca Kısıtlar
<i>(Coifman vd., 2003)</i>	Sabit Kanatlı	Uzun (1-2 saat veya üzeri)	Yüksek (onlarca km ve üzeri)	Yüksek (kg mertebesinde)	Optik kamera, GPS, (mümkünse) LiDAR	Geniş alan taraması, otoyol devriyesi, kırsal trafik gözlemi, afet sonrası keşif	Pist gereksinimi, hover yapamama, sınırlı manevra kabiliyeti
<i>(Lee vd., 2015)</i>	Döner Kanatlı	Kısa (20-60 dk)	Düşük (birkaç km)	Düşük (genellikle <1-2 kg)	Optik kamera (RGB), termal kamera (opsiyonel), GPS	Kentsel gerçek zamanlı gözetim, kavşak izleme, olay yeri inceleme	Kısa batarya ömrü, rüzgâra duyarlılık, sınırlı kapsama alanı
<i>Niu vd., 2018</i>	Hibrit (VTOL)	Orta-Uzun (~1 saat civarı)	Orta-Yüksek (onlarca km)	Orta (sabit kanatlıya göre az)	Optik kamera, GPS (opsiyonel LiDAR)	Uzak mesafe devriye + noktasal inceleme, koridor izleme, çok noktalı veri toplama	Kompleks yapı (bakım ihtiyacı), karma uçuş kontrolü, maliyet

Tablo 1 verileri genel bir çerçeve sunmakla birlikte, kesin değerler İHA modeline ve donanımına göre değişebilir. Örneğin sabit kanatlı mikro-İHA'ların uçuş süresi 1 saatten az, bazı hibrit modellerin taşıma kapasitesi ise sabit kanatlıları aşabilir. Genel olarak, sabit kanatlılar dayanıklılık ve kapsam, döner kanatlılar esneklik ve yakın detay, hibrit sistemler ise çok yönlülük açısından avantaj sağlar. Bu farklılıklar, trafik izleme uygulamasına uygun İHA tipinin seçimini kritik hale getirir.

2.1.2. İHA'ların Operasyonel ve Çevresel Kısıtları

İnsansız hava araçlarının trafik izleme operasyonlarında etkin kullanımı, belirli teknik ve çevresel kısıtların dikkatlice yönetilmesini gerektirir.

Batarya ve Uçuş Süresi Sınırlamaları: Elektrik motorlu döner kanatlı İHA'lar genelde 20–30 dakika, bazı hibrit modeller 60 dakika havada kalabilir. Sınırlı uçuş süresi, geniş alanlar için daha fazla sorti veya çoklu İHA kullanımını gerektirir.

Hava Koşulları ve İklimsel Etkiler: Rüzgâr, yağış, sis gibi çevresel faktörler İHA performansını etkiler. Güçlü rüzgârlar küçük İHA'ların stabilitesini bozabilir; yoğun yağmur veya kar elektronik aksamı riske atar ve görüşü kısıtlar.

Fiziksel Engel ve Coğrafi Kısıtlar: Yüksek binalar, enerji hatları gibi yapılar görüş hattını kesebilir ve çarpışma riski oluşturur. Sensör destekli çarpışma önleme sistemleri geliştirilmiş olsa da mutlak güvenlik garantisi edilemez.

Hava Sahası ve Yasal Düzenlemeler: Birçok ülkede maksimum uçuş irtifası 120 m (400 feet) ile sınırlıdır. Görüş hattı içinde uçuş (VLOS) ve kalabalık üzerinde uçuş yasağı gibi kurallar uygulanır. Özel izinler ve risk değerlendirmesi gereklidir.

Hukuki ve Mahremiyet Konuları: Araç plakalarının veya kişilerin kaydedilmesi kişisel veri koruma yasalarına tabidir. Gerçek zamanlı bulanıklaştırma gibi yöntemlerle mahremiyet sağlanmaya çalışılır. Ayrıca düşme riskine karşı sigorta, sertifika ve lisans zorunlulukları bulunur.

Sonuç olarak, İHA tabanlı trafik izleme sistemlerinin tasarımı, yalnızca teknik yeterlilik değil; hava sahası entegrasyonu, güvenlik, mahremiyet ve düzenleyici uyumluluk gibi çok boyutlu gereksinimleri kapsmalıdır. Uygun planlama ve otoriteler arası koordinasyon ile bu kısıtların çoğu yönetilebilir.

2.2. Trafik İzleme ve Denetleme

İHA'lar, yüksekte geniş alanları görüntüleyebilme yetenekleri sayesinde trafik izleme ve denetim süreçlerinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yoğun kentsel bölgelerde, sabit kamera sistemlerine kıyasla daha esnek ve hızlı veri elde etme avantajı sunmaktadır (Barmounakis & Geroliminis, 2020).

İHA tabanlı görüntüler, gelişmiş nesne tanıma algoritmalarıyla işlenerek araç sayımı, yaya yoğunluğu ve ihlaller gibi pek çok veriyi eş zamanlı şekilde sağlayabilmektedir. (Srivastava vd., 2021) YOLOv4 algoritmasının, İHA görüntülerinde araç tespitinde %95'in üzerinde doğruluk sağladığını göstermiştir. (Byun vd., 2021), bu tür sistemlerin özellikle otoyol segmentlerinde araç takibinde başarılı sonuçlar verdiğini raporlamıştır. Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamalar için kenar bilişim altyapılarının kullanılması, verilerin sahada işlenerek gecikmenin azaltılmasını mümkün kılmaktadır (Balamuralidhar vd., 2021).

İHA'lara entegre radar sistemleri ya da görüntü tabanlı hız ölçüm yöntemleri ile hız ihlalleri, ani durmalar ve olağandışı davranışlar tespit edilebilmektedir. (Bouassida vd., 2020), drone sinyalizasyonunun yaya geçitlerinde sürücü davranışları üzerinde pozitif etkiler sağladığını ortaya koymuştur.

2.3. Trafik Akışı Optimizasyonu

İHA'lar, trafik akışının optimizasyonunda da önemli rol oynamaktadır. Topladıkları veriler, trafik sinyalizasyon sistemlerinin adaptif olarak yönetilmesi ve trafik sıklığının azaltılması için kullanılabilirlerdir.

2.3.1. Kavşak Yönetimi ve Sinyal Optimizasyonu

İHA'lar, kavşaklardaki trafik akışını gerçek zamanlı olarak izleyerek, sinyal sürelerinin trafik yoğunluğuna göre otomatik olarak ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. (Alahvirdi & Tuci, 2023) tarafından yürütülen bir çalışmada, hücre geçiş modeli (Cell Transmission Model- CTM) ile donatılmış İHA sürülerinin, SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) algoritmasıyla trafik sinyal sürelerini optimize ettiği gösterilmiştir. Bu yaklaşımla, sabit zamanlı sistemlere göre ortalama seyahat süresinde %30'a varan iyileşmeler elde edilmiştir. Benzer şekilde, Türkiye özelinde gerçekleştirilen bir çalışmada, Polatlı Refik Cesur kavşağında sürü zekasına dayalı bir sinyal optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen sistemin ortalama gecikme süresini mevcut sabit zamanlı kontrol sistemine kıyasla %32 ila %42 oranında azalttığını göstermiştir (İnağ & Arıkan, 2024). Her ne kadar söz konusu çalışmada İHA doğrudan kullanılmamış olsa da geliştirilen algoritma yapısı, gerçek zamanlı trafik verisinin bu sistemler aracılığıyla toplanması durumunda kolaylıkla entegre edilebilecek niteliktedir. Bu bağlamda, İHA'ların veri sağlayıcı unsur olarak kullanılacağı sistemlerde yapay zekâ ve sezgisel algoritmalara dayalı karar destek modelleri yüksek uyum potansiyeli sunmaktadır.

2.3.2. Trafik Sıklığı Önleme Algoritmaları

İHA'lar tarafından toplanan gerçek zamanlı trafik verileri, trafik sıklığının öngörülmesi ve önlenmesi için kullanılan algoritmaların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. (Garau Guzman & Baeza, 2024), bu araçları Görünür Işık İletişimi (VLC) teknolojileriyle entegre eden bir sistem geliştirerek, trafik sıklığını önceden tespit etme ve alternatifleri rotalama konusunda çalışmışlardır.

Bu sistemler ayrıca, büyük etkinlikler veya beklenmedik durumlar nedeniyle oluşabilecek trafik sıklıklarının yönetilmesinde de etkili olmaktadır. Bu tür senaryolarda, hava araçları hızla konuşlandırılarak trafik durumunun anlık izlenmesi ve gerekli müdahale adımlarının belirlenmesi mümkün hâle gelmektedir.

2.4. Acil Durum ve Afet Yönetimi

Bu teknolojiler, acil durum ve afet yönetimi alanlarında da stratejik roller üstlenmektedir. Trafik kazalarının erken tespiti ile deprem, sel gibi afet senaryolarında yol erişilebilirliğinin hızlı biçimde değerlendirilmesi gibi uygulamalarda yüksek verimlilik sağlamaktadır.

2.4.1. Trafik Kazalarının Tespiti ve Hızlı Müdahale

Bu araçlar, geniş alanları hızla tarayarak trafik kazalarının erken tespitine olanak sağlamaktadır. Yapay zekâ destekli görüntü analiz sistemleri, İHA kameralarından alınan görüntülerdeki anormal durumları otomatik olarak tespit edebilmektedir. (Li vd., 2023) tarafından geliştirilen bir sistem, derin öğrenme algoritmaları kullanarak İHA görüntülerinden trafik kazalarını %92 doğrulukla tespit edebilmiştir. Ayrıca, kazaların gerçek zamanlı tespiti için geliştirilen görüntü işleme modelleri de %90'ın üzerinde doğruluk sağlayabilmektedir (Biyik vd., 2023).

Kaza tespitinin ardından, bu sistemler acil müdahale ekiplerinin yönlendirilmesi için de kullanılabilir. Kazanın konumu, büyüklüğü ve etkisi hakkında gerçek zamanlı bilgiler sağlayarak, müdahale sürecinin etkinliğini artırmaktadır. Ayrıca, kaza bölgesine ulaşan en hızlı rotanın belirlenmesi için trafik durumunun analiz edilmesinde de faydalı olmaktadır.

2.4.2. Doğal Afetlerde Yol Durumu Değerlendirmesi

Deprem, sel veya heyelan gibi doğal afetlerin ardından yol ağının durumunun hızla değerlendirilmesi, afet müdahale operasyonlarının etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu tür durumlarda, insansız hava araçları ulaşılması güç bölgelerin havadan incelenmesini mümkün kılarak, hasar gören yol ve köprülerin tespiti için hızlı veri sağlamaktadır.

(Outay vd., 2020), bu teknolojilerin yol altyapısındaki hasarların belirlenmesi ve trafik akışının yeniden yönlendirilmesi süreçlerinde stratejik roller üstlendiğini belirtmiştir.

Ayrıca, bu araçlar afet anında alternatif ulaşım güzergâhlarının belirlenmesinde de etkili olmaktadır. Ana arterlerdeki hasarlar nedeniyle devreye alınabilecek ikincil yolların tespiti ve bu bilgilerin navigasyon sistemlerine entegrasyonu, kriz bölgelerinde ulaşımın sürdürülebilirliğine katkı sunmaktadır.

3. İHA Tabanlı Trafik Analizi Yöntemleri

İnsansız hava araçlarının trafik izleme süreçlerinde etkin kullanılabilmesi, yalnızca görüntü toplama kabiliyetleriyle değil, aynı zamanda bu verilerin işleme biçimiyle de yakından ilişkilidir. Bu nedenle görüntü işleme, sensör tabanlı veri toplama ve yapay zekâ uygulamaları İHA sistemlerinin analiz gücünü belirleyen üç temel teknolojik eksendir.

3.1. Görüntü İşleme Teknikleri

İHA'larla elde edilen hava görüntüleri, araç ve yaya tespiti, hız ölçümü ve davranış analizi gibi pek çok amaca hizmet edebilecek biçimde işlenmektedir. Bu süreçte yaygın olarak YOLO (You Only Look Once), Konvansiyonel Sinir Ağları (CNN), Faster R-CNN, DeepSORT gibi algoritmalar kullanılmaktadır (Srivastava vd., 2021)

(Cao vd., 2023), İHA verileriyle nesne tespiti konusunda yapılan sistematik bir literatür taramasında, YOLOv5'in yüksek doğruluk ve işlem hızı sunduğu raporlanmıştır. Türkiye'den (Duman vd., 2022), YOLOv5 mimarisiyle araç tespiti üzerine yürüttükleri çalışmada, %93'ün üzerinde doğruluk elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Araç tanımlama sürecinde, araçların türleri (otomobil, otobüs, kamyon vb.) ve hareket yönleri gibi özellikler de belirlenebilmektedir. Bu bilgiler, trafik akışının daha detaylı analiz edilmesine ve araç türüne özgü trafik yönetim stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.2. Sensör Tabanlı Veri Toplama

İHA'lar, yalnızca görüntü değil; aynı zamanda LiDAR, GPS ve radar gibi çeşitli sensörler aracılığıyla çok boyutlu veri toplayabilmektedir. Bu sistemler, düşük görüş koşulları veya olumsuz hava şartlarında dahi yüksek doğrulukla çalışabilmektedir (Hossain vd., 2019).

LiDAR (Light Detection and Ranging) sensörleri, lazer ışınları kullanarak nesnelerin üç boyutlu koordinatlarını yüksek hassasiyetle belirlemektedir. İHA platformlarına entegre edilen bu sensörler, araç konumlarının ve boyutlarının detaylı biçimde ölçülmesini mümkün kılmaktadır.

GPS (Global Positioning System) teknolojisi ise hava aracının anlık konumunu belirlemenin yanı sıra, toplanan verilerin coğrafi referanslarla eşleştirilmesini sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle geniş alanlara yayılan trafik verilerinin haritalandırılması açısından kritik önemdedir.

Balamuralidhar vd., (2021), MultEYE platformu kapsamında geliştirilen kenar bilişim temelli bir İHA sisteminin, hız ve konum takibi için LiDAR ile kamera verilerini birlikte kullandığını ifade etmiştir. Benzer şekilde, Huang vd., (2021), merkezi yapılar yerine dağıtık sensör ağına sahip otonom sistemlerin trafik izleme uygulamalarında etkin biçimde çalışabildiğini göstermektedir.

3.3. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları, İHA'lardan toplanan verilerin analiz edilmesi ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, büyük veri setlerinin işlenmesini ve karmaşık trafik modellerinin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Derin öğrenme yöntemleri, bu tür veriler üzerinden trafik yoğunluğu tahmininde etkili sonuçlar üretmektedir. Özellikle LSTM (Long Short-Term Memory) modelleri ile zaman serisi tahminleri yapılmakta, trafik yoğunluğu ve sıkışıklık olasılığı önceden kestirilebilmektedir. (Fu vd., 2024), Bayesyen derin öğrenme ile trafik akış tahminlerinin doğruluk oranını optimize eden yeni bir yöntem geliştirmiştir. (Khan vd., 2020) ise İHA'ların akıllı trafik sistemlerine entegrasyonunun, bu yapay zekâ yaklaşımlarıyla mümkün olduğunu vurgulamıştır.

Şekil 1, İHA destekli trafik analizinin temel sürecini görsel olarak özetlemektedir. Süreç, dört temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar, görüntü toplama,

görüntü işleme, yapay zekâ destekli analiz ve karar desteklidir. İlk adım olan görüntü toplama, İHA'ların yüksek çözünürlüklü kameralardan veri elde etmesiyle başlar. Görüntü işleme aşamasında bu verilerden anlamlı nesnelere ve hareket kalıpları çıkarılır. Yapay zekâ analizleri ise trafik yoğunluğu tahmini, çarpışma riski değerlendirmesi gibi daha karmaşık çıkarımları mümkün kılar. Son olarak, karar destek sistemleri, analiz edilen verilerin yöneticilere anlamlı şekilde sunulmasını sağlar. Bu yapı, İHA'ların sadece veri sağlayıcı değil, aynı zamanda yönetsel karar süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline geldiğini göstermektedir.



Şekil 1: İHA Destekli Trafik Analiz Süreci

Makine öğrenimi aynı zamanda trafik kazası riski, araç davranış örüntüleri ve yol kullanım yoğunluğu gibi karmaşık değişkenlerin modellenmesinde de önemli katkı sağlamaktadır (Butilă & Boboc, 2022).

İHA'lardan toplanan trafik verileri, zaman serisi analizi yöntemleri kullanılarak işlenmekte ve gelecekteki trafik durumu hakkında öngörüler oluşturmaktadır. ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) ve Prophet gibi zaman serisi modelleri, trafik akışındaki periyodik değişimlerin ve eğilimlerin belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Makine öğrenimi algoritmaları ayrıca, trafik kazası risk analizleri için de kullanılmaktadır. İHA'lardan toplanan trafik verileri ve tarihsel kaza verileri kullanılarak, belirli bölgelerdeki kaza riskleri tahmin edilebilmekte ve önleyici tedbirler alınabilmektedir.

4. İHA Tabanlı Trafik Analizi Yöntemleri

İnsansız hava araçlarının (İHA) trafik izleme ve yönetim sistemlerinde kullanımına yönelik çalışmalar, son yirmi yılda giderek artan bir ilgi görmüştür. Bu bölümde, odak noktasını 2020 yılı ve sonrasındaki önemli gelişmeler oluşturmakla birlikte, alandaki ilerlemenin bütüncül bir bakışla değerlendirilebilmesi amacıyla erken ve orta dönem çalışmalara da kısaca yer verilmiştir. Öne çıkan araştırmalar, elde edilen bulgular ve farklı coğrafyalardaki uygulamalar sistematik şekilde incelenmiştir. İHA'ların trafik izleme süreçlerine entegrasyonu, kullanılan yöntemler ve geliştirilen teknolojik yaklaşımlar bakımından sınıflandırılarak tartışılmıştır.

4.1. İHA Tabanlı Trafik İzleme Üzerine Seçili Çalışmalar ve Bulgular

İHA'ların trafik izleme alanında kullanımı, son yirmi yılda artan araştırma ilgisine konu olmuştur. Bu bölümde, alanda öne çıkan kilit çalışmalar özetlenmekte ve genel eğilimler tartışılmaktadır.

4.1.1. Erken Dönem Uygulamalar (2003–2006)

İnsansız hava araçlarının trafik gözlemine uygulanabilirliği ilk olarak 2000'lerin başında araştırılmıştır. (Coifman vd., 2003), küçük sabit kanatlı bir İHA ile otoyol trafik akış verileri toplamış; araç sayımı, yoğunluk ve ortalama hız gibi parametreleri başarıyla ölçmüştür. (Coifman vd., 2006) devam eden çalışmalarında mikro-İHA görüntülerinden araç geçiş hızları, şok dalgaları ve kaynak-hedef (OD) matris tahmini gibi trafik akış verileri çıkarılmıştır. Sonuçlar hava görüntülerinin uygun koşullarda sabit kameralar kadar doğru veri sağlayabildiğini göstermiştir. Bu öncü çalışmalar, İHA'ların esnek konumlanma avantajıyla trafik mühendisliğinde veri toplama potansiyelini ortaya koymuş ve sonraki araştırmalar için temel oluşturmuştur.

4.1.2. Orta Dönem Gelişmeler (2015–2019)

2010'lu yılların ortalarından itibaren drone teknolojisinin gelişmesi ve maliyetlerin düşmesiyle İHA'lar trafik izleme uygulamalarında daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. (Lee vd., 2015), küçük bir quadcopter'in 4G mobil şebeke üzerinden gerçek zamanlı video akışı ile şehir içi trafik gözetiminde kullanılabilirliğini göstermiştir; ancak görüntü stabilitesinde sorunlar bildirilmiştir. 2018 yılına gelindiğinde literatürde hem görüntü işleme algoritmaları hem de sistem mimarileri açısından önemli atılımlar görülmektedir. (Niu vd., 2018), 3DR Solo quadcopter ve GoPro kamera kullanarak bulut tabanlı trafik izleme mimarisi geliştirmiş, Haar Cascade algoritmasıyla %83–90 araç tespit doğruluğu ve %100'e yakın izleme doğruluğu sağlamıştır. Bu sistemde İHA tarafından toplanan gerçek zamanlı video verileri bir yer istasyonuna aktarılmış; araç algılama için Haar Cascade tabanlı görüntü işleme algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak %83–90 aralığında araç tespit doğruluğu ve %100'e yakın izleme doğruluğu elde edilerek İHA destekli gerçek zamanlı trafik analizinin mümkün olduğu gösterilmiştir. (Khan vd., 2018) Pakistan'ın Karaçi kentinde bir kavşakta drone görüntülerinden araç konum-zaman verilerini çıkararak şok dalgalarını ve kuyruklanmaları analiz etmiştir. Benzer şekilde 2018 yılında literatürde akıllı şehirler için UAV tabanlı trafik yönetimi konseptleri de tartışılmıştır. (Oubbati vd., 2021), İHA'ların kara taşıtlarına havadan destek sağlayarak yoğun kentsel ortamlarda VANET (ad-hoc araç ağı) içinde iletişim kopukluklarını azaltabileceklerini önermiştir. Bu yaklaşım İHA'ların yalnızca gözlemci değil, aynı zamanda haberleşme düğümü olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.1.3. 2020 ve Sonrası Öne Çıkan Çalışmalar

Yeni dönem çalışmalarının ortaya koyduğu yaklaşımlara ek olarak, literatürde farklı dönemlerde yapılmış ve İHA tabanlı trafik izleme ve analiz uygulamalarını temsil eden bazı seçkin çalışmalar da dikkat çekmektedir. Bu bölümde, söz konusu çalışmalardan öne çıkanlar Tablo 2'de incelenmiştir. Bu çalışmaların birçoğu, görüntü işleme (YOLO, DeepSORT) ve kenar bilişim teknolojilerini kullanarak araç tespiti ve takip süreçlerini optimize etmeye odaklanmıştır

Tablo 2: Literatürde Öne Çıkan Çalışmalar

Çalışma	Odak	Teknoloji	Uygulama ve İzleme Tipi	Kapsam ve Kapasite	Perfor-mans	Zorluklar ve Kısıtlar	Çözüm	Uygula-ma Alanı
(Barm-pounakis & Geroliminis, 2020)	Büyük ölçekli trafik izleme	Drone filo-su, çoklu veri akışı	Gerçek zamanlı, çoklu İHA görüntüleme	10 İHA 1,3 km ² ka-vşak	Geniş alan kapsama, yüksek veri hacmi	Görüntü sen-kronizasyonu, yoğun veri işleme ihtiyacı	Planlı uçuş rotası ve veri hizalama	Atina şehir merkezi, çok kavşaklı kentsel alan
(Outay vd., 2020)	Yol güvenliği ve altyapı denetimi	Görüntü işleme tabanlı İHA sistemi	Gerçek zamanlı, yüksek çözünürlüklü görüntü analizi	Ulaşılmaması zor alan-larda İHA uçuşları	Hasar tespiti ve altyapı değerlendirmede yüksek verim	Hava koşulları ve görüş sınırlar-maları	Uygun sensör seçimi ve görev öncesi planlama	Afet son-rası yol durumu ve altyapı gözlemi
(Garau Guzman & Baeza, 2024)	Gerçek zamanlı trafik yönetimi ve yoğunluk tespiti	YOLOv5, Görünür Işık iletişimi (VLC)	Gerçek zamanlı görüntü işleme ve sinyal kontrolü	Yoğun bölgelerde uçuş, İHA-trafik lambası iletişimi	Dinamik sinyal ayarı, yoğunluk analizi	VLC ente-grasyonu karmaşıklığı, ışık koşullarına duyarlılık	VLC ile radyo frekansı dışı iletişim, görüntü işleme desteği	Ka-vşaklar, kentsel yoğun trafik alanları
(Alah-virdi & Tuci, 2023)	Sinyal opti-mizasyonu	SPSA,CT-M,İHA sürüsü	Simülasyon, veri toplama	Geniş ağ, çoklu İHA	%30 iyileşme	Gerçek veri yok,uygulama zayıf	Gerçek veri-yle sistem testi	Teorik kavşak yapısı
(Balamu-ralidhar vd., 2021)	Araç tespiti, takibi ve hız tahmini	LIDAR, kamera, kenar bilişim (MultEYE)	Gerçek zamanlı analiz, gömülü sistemle görüntü işleme	Şehir içi, kısa men-zil, kenar birimlerde işlem	Gerçek zamanlı araç ve hız takibi	Gömülü donanımda işlem gücü kısıtlı, yüksek çözünürlüklü görüntü zor-layıcı	Optimi-zasyonlu kenar bilişim mimarisi	Kentsel trafik izleme ve analiz
(Duman vd., 2022)	Araç tespiti	YOLOv5	Gerçek zamanlı, görüntü tabanlı	Kentsel alan, 60 dk uçuş	Yüksek başarı	Gece görüş problemi	YOLOV5 opti-mizasyon	Kavşaklar şehir içi
(Hossain vd., 2019)	Akıllı şehirlerde trafik gözetimi uygulamaları	Kamera donanımlı İHA, bulut tabanlı görüntü işleme	Gerçek zamanlı trafik takibi ve veri aktarımı	Şehir içi yollar, çoklu araç ve yaya gözlemi	Anlık yoğunluk tespiti ve yön-lendirme	Hava koşulları, veri aktarım gecikmesi	Bulut bilişim destekli analiz ve planlama	Kentsel trafik, yoğun alanlar

(Ahmed vd., 2021)	Heterojen trafik akışının modellenmesi	DJI Phantom 3 drone, görüntü işleme, regresyon	Gerçek görüntülerden trafik verisi çıkarımı	Çok şeritli düzensiz trafik	Doğrusal trafik diyagramı	Şerit disiplinsizliği, karma veri yapısı	Özgün regresyon yaklaşımı ile kalibrasyon	Gelişmekte olan ülke yolları
(Gupta vd., 2021)	İHA'ların mevcut ve gelecekteki ulaşım sistemlerindeki rolü	Gelişen İHA teknolojileri ve akıllı sistemler	Kavramsal analiz, literatür taraması	Geniş kapsam, çeşitli ulaşım modları	Stratejik potansiyel değerlendirilmesi	Mevzuat, altyapı uyumu, güvenlik açıkları	Entegre sistem önerileri ve araştırma alanları	Akıllı Ulaşım Sistemleri, strateji ve politika
(Shan vd., 2021)	Araç tespit ve takibi	YOLO v3, DeepSORT	Gerçek zamanlı görüntü analizi ve nesne takibi	Kavşaklar, düşük görüşlü alanlar	%90.88 tespit, %98.9 takip doğruluğu	Görüş kısıtları, nesne örtüşmesi	Parametre çıkarımı ve çoklu senaryo testi	Kentsel trafik, otopark, kavşak
(Kujawski & Dudek, 2021)	Kentsel ulaşımında yol durumu analizi	Görüntü işleme, İHA kameraları	Hava görüntüsü üzerinden veri analizi	Kesişim noktaları, yerel ve ulusal yollar	Yol kapanmalarının izlenmesi ve görseleştirme	Görsel karmaşa, yapısal engeller	Görüntü analiz algoritmaları ve veri akışı izleme	Şehir içi ulaşım kesişimlerinde karar destek
(Liu & Zhang, 2021)	Araç tespit ve takibi	YOLO v4, DeepSORT	İHA görüntülerinden hedef tespiti ve izleme	Kentsel alan, kısa menzil uçuş	Yüksek doğrulukla araç tespiti ve konumlama	Yoğun trafikte hedef ayırımı, hızlı hareketli nesnelere	Derin öğrenme algoritmaları ile detaylı ayrıştırma	Şehir içi trafik izleme, hedef takibi
(Srivastava vd., 2021)	Araç tespit ve analizi	YOLO v4, DeepSORT	Gerçek zamanlı, görüntü tabanlı	Şehir içi, kısa menzil	%95 doğruluk	Yoğunlukta görüntü örtüşmesi	Gelişmiş algoritma uygulama	Kentsel alan, otoparklar

Barmpounakis & Geroliminis (2020) çalışması, çoklu İHA sürüsü ile büyük ölçekli veri toplama konseptini tanıtarak literatürde önemli bir dönüşüm başlatmıştır. Diğer taraftan, Garau Guzman & Baeza (2024) gibi çalışmalar, VLC (Visible Light Communication) teknolojisinin entegre edilmesiyle gerçek zamanlı trafik yönetiminde yeni bir boyut açmıştır. Tablo 2, yalnızca kullanılan teknolojileri değil, aynı zamanda bu teknolojilerin trafik yönetimine sağladığı spesifik katkıları da gözler önüne sermektedir. Bu yönüyle Tablo 2, okuyucuya araştırma eğilimleri hakkında kapsamlı bir bakış sunmaktadır.

Trafik izleme ve araç tespiti alanında yapılan bazı çalışmalar, geleneksel görüntü işleme tekniklerini temel almaktadır. Bu yöntemler genellikle, verilerden belirli desenlerin çıkarılması yoluyla çalışmakta ve ölçekten bağımsız özellik dönüşümü (SIFT), yönlü gradyan histogramları (HOG), yerel ikili desenler (LBP) ile Viola-Jones nesne tanıma yöntemi gibi teknikleri içermektedir (Khan vd., 2020; Javadi vd., 2021; Aggarwal & Kumar, 2020). (Hossain vd., 2019), akıllı şehirlerin gelişiminde trafik yönetiminin önemini vurgulayarak, İHA verilerine dayalı bir izleme sistemi önermiştir. Bu modelde, trafik görüntüleri ve videolarının kaydedilmesi için kamera donanımlı İHA'lar kullanılmakta; elde edilen veriler bulut sunuculara aktarılmakta ve burada işlenerek yoğunluk tespiti ve yönlendirme kararlarında kullanılmaktadır.

(Barmounakis & Geroliminis, 2020), çok modlu ve sıkışık bir kentsel ortamda, İHA'ları kullanarak trafik akışını kayıt altına almak ve böylece kritik trafik olgularının derinlemesine incelenmesi amacıyla araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada geleneksel görüntü işleme tekniklerine güçlü bir alternatif sunulmaktadır. pNEUMA kodu adıyla anılan bir sistem geliştirmişlerdir. On İHA'dan oluşan bir sürü, Atina'nın merkezi iş bölgesi üzerinde birkaç gün boyunca uçarak, 1.3 km²'lik sıkışık bir bölgede, 100 km'den fazla yol ağı, yaklaşık 100 kavşak, çok sayıda otobüs durağı ve yarım milyona yakın araç güzergahı içeren trafik akışlarını kaydetmiştir.

Ahmed vd., (2021), Pakistan'ın Karaçi kentinde şerit disiplini olmayan ve heterojen yapıya sahip trafik akışını modellemek amacıyla, İHA ile elde edilen trafik videoları üzerinden yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu teknoloji ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, boyuna ve enine mesafelerin detaylı analizine olanak sağlamıştır. İlk kez bu tür bir trafik yapısı için stokastik temel trafik diyagramları, hız ve yoğunluk ilişkilerini yansıtacak şekilde ağırlıklı en küçük kareler regresyonu ile geliştirilmiştir. Araştırma, mikroskobik ve makroskobik trafik modellerinin kalibrasyonu için yeni bir yol açmaktadır.

(Gupta vd., 2021), İHA'ların ulaştırma sistemlerindeki mevcut ve gelecekteki rollerini ele alan kapsamlı bir literatür taraması sunmuştur. Akıllı Ulaşım Sistemleri'ne geçişle birlikte, bu teknolojilerin söz konusu altyapıların işleyişinde stratejik bir konum üstleneceği öngörülmektedir. Makalede, ulaştırma alanında ortaya çıkan İHA teknolojileri, bu alandaki güncel araştırma eğilimleri ve bu sistemlerin Akıllı Ulaşım Sistemleri'ne entegrasyonuna ilişkin zorluklar ve fırsatlar detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca, geleceğin akıllı ve dayanıklı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi adına bu teknolojilerle ilgili potansiyel araştırma alanları belirlenmiştir.

Son dönemde yapılan çalışmalar, araç tespiti ve analizinde, derin öğrenme tabanlı yöntemlerin geleneksel bilgisayarla görüntü işleme tekniklerine kıyasla daha etkili olduğunu göstermiştir. Srivastava ve arkadaşları çalışmalarında, İHA görüntülerinden yer seviyesindeki araçların tespiti, trafik yönetimi, otopark alanı yönetimi, afet bölgelerinde ve zorlu arazi koşullarında kurtarma operasyonlarının kolaylaştırılması gibi konulara odaklanmıştır. Çalışmalarında YOLOv4 ve DeepSORT algoritmaları kullanılarak, hem araçların tespiti hem de takibi tam otomatik bir sistem aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yapı sayesinde, gerçek zamanlı ve entegre çözümler sunan bir analiz çerçevesi oluşturulmuştur (Srivastava vd., 2021).

(Shan vd., 2021), YOLO v3 nesne algılama modeli ve DeepSORT izleme algoritması kullanarak araçların tespiti ve takibi üzerine sistematik bir yaklaşım önermektedir. Geliştirilen yöntem, araç tespitinde %90.88, araç takibinde ise %98.9 doğruluk oranı ile yüksek güvenilirlik sunmaktadır. Parametre çıkarımında %98'e varan genel doğruluk elde edilmiştir. Kavşaklar, döner kavşaklar ve düşük görüş koşulları gibi farklı trafik senaryolarında yöntemin sağlamlığı test edilmiştir. Ayrıca, bu sistemden elde edilen verilerin, sürücü davranışı analizinde kullanılabilmesi vurgulanmaktadır. Bu yönüyle çalışma akıllı trafik izleme ve analiz sistemlerine katkı sağlayan yüksek hassasiyetli bir çözüm sunmaktadır.

(Kujawski & Dudek, 2021), İHA'ya monte edilmiş kameralar aracılığıyla verilerin nasıl elde edileceği ve analiz edileceğine dair yaklaşımlar sunmaktadırlar. Elde edilen veriler, ulusal ve yerel yolların kesişim noktalarında kentsel ulaşım ile ilişkili durumları kapsamaktadır. Yerel yolların onarım çalışmaları nedeniyle kapatılması gibi durumlar, görüntü işleme ve veri akışı analiz algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir.

(Liu & Zhang, 2021) hedef tespit ağı olan YOLO v4 ile tespit tabanlı çoklu hedef takip algoritması DeepSORT birleştirilerek, kentsel ortamlarda araçların otomatik tespiti ve takibine yönelik derin öğrenme tabanlı bir yöntem tasarlanmıştır. Belirli bir bölge İHA'larla kaydedilmiş ve daha sonra bu videolardan anlamlı bilgiler çıkarılmıştır.

Duman ve arkadaşları, YOLOv5 modeli kullanılarak araç nesnelere tespiti için derin öğrenme tabanlı bir sistem önermektedirler. Modelin, test aşamasına ayrılan görüntüler üzerindeki tespitleri incelendiğinde, oldukça başarılı sonuçlar elde ettikleri görülmektedir. Önerilen yöntemin günlük yaşamda uygulanması sayesinde, yüksek çözünürlüklü görüntülerden araç nesnelere otomatik olarak ve yüksek başarı oranıyla tespit edilmesi mümkün hale gelecektir.

(Balamuralidhar vd., 2021), MultEYE adlı bir trafik izleme sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, hava görüntüleri üzerinden araçların tespiti, takibi ve hız tahmini gibi görevleri, İHA'ya entegre edilmiş gömülü bir bilgisayar üzerinde gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebilmektedir. MultEYE, gerçek dünya koşulları altında İHA platformları için özel olarak tasarlanmış ve optimize edilmiş ilk sistemlerden biri olarak dikkat çekmektedir.

(Alahvirdi & Tuci, 2023), İHA'ların, trafik sıkışıklığı, güvenlik, kaynak yönetimi, zaman kaybı ve çevre kirliliği gibi sorunlara çözüm üretebilmesi özelliği üzerinde durmuşlardır. Bu makalede, hücre geçiş modeli (CTM) kullanılarak trafik akışının simüle edildiği bir yol ağı üzerinde sürekli olarak trafiği izleyen bir İHA sürüsü kullanılmaktadır. Bu araçlar, ağın farklı bölümlerindeki trafik birimlerinin durumu hakkında veri toplayarak trafik durumunu sürekli olarak izlemekte ve bu bilgileri akıllı trafik ışığı birimleri ile paylaşmaktadır. Simülasyon sonuçları, önerilen sistemin trafik sıkışıklığını azaltmada özellikle etkili olduğunu göstermektedir.

(Garau Guzman & Baeza, 2024), gerçek zamanlı trafik izleme ve yoğunluk tespiti amacıyla YOLO algoritmasını kullanarak bir sistem geliştirmiştir. Görüntü

yakalama ve işleme yoluyla, yoğun bölgeler hızlı biçimde belirlenebilmekte ve bu bilgiler trafik lambalarına iletilerek dinamik sinyal ayarları yapılabilmektedir. Ayrıca, Görünür Işık İletişimi (VLC) teknolojisi kullanılarak, İHA'larla trafik lambaları arasında doğrudan bir iletişim hattı kurulmuş ve bu sayede geleneksel radyo frekansı çözümleri tamamlanmıştır.

Entegrasyon ve Değerlendirme

Yukarıda özetlenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, İHA tabanlı trafik izlemenin evrimi ve çok boyutlu katkıları açıkça görülmektedir. İlk uygulamalardan itibaren temel motivasyon, karayolu ağlarından esnek ve hızlı veri toplayabilme kabiliyetidir. 2015-2018 aralığındaki çalışmalar, İHA'ların gerçek zamanlı olay yönetimi (kaza tespiti, acil durum müdahalesi) ve mikro-düzyer trafik analizi (trafik akış parametrelerinin doğrudan ölçümü, şok dalgası analizi) için kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu dönemde ayrıca İHA'ların mevcut akıllı ulaşım altyapılarına entegrasyonu konusunda önemli adımlar atılmıştır. 2020 ve sonrasında ise, COVID-19 pandemisinin de temassız izleme ihtiyacını artırmasıyla, İHA'ların daha otonom, koordineli ve büyük ölçekli kullanımına dair araştırmalar hız kazanmıştır. Uygulamaya dönük çalışmalar, İHA'ların gerçek saha koşullarında geleneksel trafik izleme sensörlerini tamamlayıcı bir unsur olmaktan öte, gerektiğinde onların yerini alabilecek yetkinliğe eriştiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, tüm bu literatür bir arada incelendiğinde, ortak bazı zorluk alanları da belirginleşmektedir: İHA'ların sınırlı uçuş süresi ve hava koşullarına bağımlılığı, veri iletiminde bant genişliği gereksinimleri, şehir içinde uçuşlarda güvenlik ve mahremiyet endişeleri gibi. Sonuç olarak, literatürdeki birikim İHA tabanlı trafik izlemenin teknik olarak uygulanabilir ve faydalı olduğunu güçlü biçimde ortaya koymaktadır. Mevcut eğilimler, önümüzdeki yıllarda daha fazla otonomi (ör. uçuş planlamasını kendi yapan ve akıllı karar verebilen İHA'lar), daha iyi çoklu sensör füzyonu ve düzenleyici çerçevenin olgunlaşmasıyla birlikte İHA'ların trafik yönetiminde asli bir bileşen haline geleceğine işaret etmektedir. Bu literatür incelemesi ışığında, İHA tabanlı çözümlerin avantajları (esneklik, kapsam, gerçek zamanlılık) ile kısıtları (süre, hava, mevzuat) dengeli bir şekilde değerlendirilerek, geleceğin akıllı ulaşım sistemlerine entegre edilmesi için kapsamlı bir strateji geliştirilmesi gerektiği söylenebilir.

4.2. Eğilimler ve Metodolojik Yaklaşımlar

2020 yılı sonrasında gerçekleştirilen araştırmalar, İHA tabanlı trafik yönetim sistemlerinde belirgin bazı eğilimlerin ve teknolojik yönelimlerin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu kapsamda, akıllı sistemler ve İHA entegrasyonu çerçevesinde öne çıkan yöntemsel yaklaşımlar aşağıda ana başlıklar halinde özetlenmiştir:

- Derin Öğrenme Algoritmaları: Nesne tespiti ve takip süreçlerinde YOLOv4/v5, Faster R-CNN ve DeepSORT gibi derin öğrenme temelli mimariler yaygın olarak kullanılmaktadır (Duman vd., 2022; Li vd., 2023). Ayrıca uzun süreli bağımlılıkları modellemek amacıyla LSTM gibi tekrar eden sinir ağları da tercih edilmektedir (Fu vd., 2024).

- Hibrit Veri Entegrasyonu (Sensör Füzyonu): Görüntü, LiDAR, GPS ve radar verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan çok kaynaklı sistemler, çevresel farkındalığın artırılmasına olanak tanımaktadır (Balamuralidhar vd., 2021). Bu tür sensör füzyonu, konumsal doğruluk ve güvenilirliği önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak, farklı sensörlerden elde edilen verilerin senkronizasyonu ve kalibrasyonu oldukça karmaşık olabilmektedir. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda, bu süreçlerin işlem gücü ve bant genişliği açısından yüksek gereksinimler doğurması, sistemin genel performansını sınırlayabilmektedir. Ayrıca veri kaynakları arasındaki uyumsuzluklar yanlış çıkarımlara neden olabilirken; sistem karmaşıklığı arttıkça bakım ve yazılım güncellemeleri de daha zahmetli hale gelmektedir.
- Kenar Bilişim: Verilerin, üretildikleri noktaya yakın birimlerde işlenmesini esas alan kenar bilişim yaklaşımı, özellikle sahada gerçek zamanlı işlem yapma ihtiyacının bulunduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yöntem, gecikme süresini azaltmakta ve sistemin tepki hızını artırmaktadır (Huang vd., 2021). Ancak, kenar bilişim sistemleri genellikle sınırlı donanım kaynaklarına sahip olduğundan, özellikle yüksek çözünürlüklü görüntülerin işlenmesi gibi yoğun işlem gücü gerektiren görevlerde performans kısıtlarına neden olabilmektedir. Ayrıca sistemin dağıtık yapısı, veri güvenliği ve yönetimi açısından ek zorluklar doğurabilmektedir. Özellikle çok sayıda kenar biriminin koordinasyon içinde çalışması gereken uygulamalarda, senkronizasyon problemleri ve bakım maliyetleri de dikkate alınmalıdır.
- Zaman Serisi Tahmin Yöntemleri: Trafik yoğunluğu veya hareketli nesne tahmini gibi zaman tabanlı analizlerde, LSTM, Bayesyen modeller, Prophet ve Bayesian Deep Learning (BDL) gibi yöntemler tercih edilmektedir (Fu vd., 2024). Bu modeller özellikle şehir içi tahminleme süreçlerinde önemli katkılar sağlamaktadır.
- Dağıtık ve Otonom İHA Ağları: Merkeziyetsiz veri toplama ve işleme sistemleri kapsamında, dağıtık İHA ağları ile gerçek zamanlı izleme yapılmakta, bu da sistemin esnekliğini ve kapsama alanını artırmaktadır (Huang vd., 2021).
- Enerji Verimliliği Çözümleri: Uzun süreli görev yapabilen sistemler geliştirmek amacıyla güneş enerjili İHA'lar ve optimize edilmiş batarya teknolojileri üzerine çalışmalar artmaktadır. Bu sayede uçuş süresi uzatılarak operasyonel verimlilik sağlanmaktadır.

Son dönemde yapılan araştırmalarda, derin öğrenme tabanlı görüntü işleme teknikleri en yaygın kullanılan metodolojiler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle YOLO, Faster R-CNN ve MobileNet gibi algoritmaların İHA görüntülerindeki araçların tespiti ve sınıflandırılması için yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir.

Hibrit sensör sistemleri de giderek daha fazla ilgi görmektedir. Optik kameralar, LiDAR, radar ve termal görüntüleme sistemlerinin bir arada kullanılması, farklı hava ve ışık koşullarında daha güvenilir veri toplanmasını sağlamaktadır.

Kenar bilişim teknolojileri, İHA tabanlı sistemlerde veri işleme süreçlerini hızlandırmak ve bant genişliği gereksinimlerini azaltmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. İHA'lar üzerinde gerçekleştirilen yerel veri işleme, gerçek zamanlı uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

Teknolojik Gelişmelerin Etkisi

İHA teknolojisindeki gelişmeler, trafik izleme ve analiz kapasitesini artırmıştır. Daha uzun uçuş süreleri, yüksek çözünürlüklü kameralar ve gelişmiş hesaplama gücü bu alana katkı sağlamaktadır.

5G teknolojisinin yaygınlaşması, kontrol merkezleri ile İHA'lar arasında yüksek hızlı veri aktarımı sağlayarak büyük veri setlerinin gerçek zamanlı işlenmesine olanak tanır.

Batarya teknolojilerindeki ilerlemeler İHA'ların havada kalma süresini uzatmış; güneş enerjili sistemler ise gün boyu operasyon potansiyeli sunmuştur.

4.3. Farklı Coğrafyalardaki Uygulamalar

İHA tabanlı trafik yönetim sistemleri, dünya genelinde farklı coğrafyalarda çeşitli uygulamalarla hayata geçirilmektedir. Bu bölümde, Avrupa, ABD, Asya ve diğer bölgelerdeki örnek uygulamalar karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

4.3.1. Avrupa, ABD, Asya ve Diğer Bölgelerdeki Çalışmaların Karşılaştırması

Avrupa'da, özellikle Hollanda ve Almanya, İHA tabanlı trafik yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması konusunda öncü rol oynamaktadır. Amsterdam'da yürütülen bir projede, İHA'lar ve yapay zekâ teknolojileri kullanılarak bisiklet trafiğinin izlenmesi ve yönetilmesi amaçlanmıştır. Bu sistem, bisiklet yollarının yoğunluğunu analiz ederek, bisiklet trafik ışıklarının optimizasyonunu sağlamaktadır (Shulajkovska vd., 2024)

ABD'de, özellikle Kaliforniya ve Teksas eyaletlerinde, İHA sistemleri otoyol trafiğinin izlenmesi ve acil durum yönetimi için aktif olarak kullanılmaktadır. Los Angeles'ta uygulanan bir sistem, otoyol üzerindeki trafik durumunu gerçek zamanlı analiz ederek kazalara müdahale sürelerini azaltmaktadır (Jian vd., 2019). Florida'da ise, kasırga sonrası yol durumu değerlendirmelerinde İHA'lar etkin şekilde kullanılmaktadır (Krueger, 2004).

Asya bölgesinde, özellikle Çin, Japonya ve Güney Kore, İHA tabanlı trafik yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Şangay'da, 5G teknolojisi ile entegre çalışan bir sistem, trafik akışını gerçek zamanlı izleyerek trafik sinyallerini dinamik biçimde düzenlemektedir. Bu uygulamanın, ortalama seyahat süresinde %15'e varan azalma sağladığı raporlanmıştır (Chen & Qiu, 2022). Japonya'da ise, deprem sonrası acil müdahale planlamasına yönelik özel amaçlı İHA sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler,

kritik altyapının değerlendirilmesi ve rotaların yeniden planlanmasında kullanılmaktadır (Gomez & Purdie, 2016).

Ortadoğu ve Afrika bölgelerinde de İHA destekli trafik yönetim sistemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Birleşik Arap Emirlikleri'nde, Dubai Trafik İdaresi tarafından yürütülen bir projede, İHA sistemleri trafik ihlallerinin tespiti ve trafik sıklığının izlenmesi için kullanılmaktadır (Mohammed vd., 2014).

Farklı coğrafyalardaki uygulamalar karşılaştırıldığında, teknolojik altyapı, yasal düzenlemeler ve ekonomik faktörlerin İHA tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasında belirleyici rol oynadığı görülmektedir. Gelişmiş ülkelerde, daha yüksek veri işleme kapasitesine sahip ileri teknoloji sistemleri kullanılırken, gelişmekte olan ülkelerde daha maliyet etkin çözümler tercih edilmektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, 2020 sonrası dönemde İHA tabanlı trafik izleme ve akıllı ulaşım sistemleri alanındaki bilimsel ve teknolojik gelişmeleri kapsamlı şekilde incelemiştir. Elde edilen bulgular, İHA'ların trafik yönetimi süreçlerinde giderek artan bir rol üstlendiğini ve geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Geniş kapsama alanı, esnek konumlandırma imkânı ve düşük altyapı maliyetleri sayesinde, bu sistemler hem kentsel hem de kırsal bölgelerde etkin biçimde kullanılabilirlerdir.

Görüntü işleme, yapay zekâ ve sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, İHA'ların veri toplama, analiz ve karar destek sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırmıştır. Derin öğrenme temelli algoritmalar sayesinde trafik akışının daha hassas ve gerçek zamanlı şekilde izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Bu sistemlerin afet yönetimi, acil durum müdahalesi ve trafik sıklığını azaltma gibi birçok alanda da fayda sağladığı görülmektedir.

İHA tabanlı trafik izleme ve yönetim sistemlerinin daha yaygın ve etkin biçimde kullanılması için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Yasal düzenlemelerin oluşturulması: Hava sahası kullanımı, veri gizliliği ve güvenlik gibi konuları kapsayan net ve güncel düzenlemeler geliştirilmelidir.
- Sistem entegrasyonu: İHA'ların sabit kameralar, akıllı trafik sistemleri ve yol sensörleriyle entegre edilmesi, çok katmanlı veri analizine imkân tanıyacaktır.
- Kenar bilişim altyapısının yaygınlaştırılması: Verilerin sahada işlenmesine olanak sağlayan kenar bilişim mimarileri, gecikmesiz karar destek sistemleri açısından kritik önemdedir.
- Ar-Ge ve pilot uygulama desteği: Üniversiteler, belediyeler ve özel sektör iş birliğinde yerel ihtiyaçlara uygun pilot projeler teşvik edilmelidir.

- Eğitim ve kapasite geliştirme: Üniversitelerde bu alana yönelik ders içerikleri oluşturulmalı, kamu personeli için teknik eğitim programları düzenlenmelidir.
- Türkiye'nin büyük şehirlerdeki trafik yoğunluğu, turizm bölgelerindeki mevsimsel değişkenlik ve dağlık alanlardaki erişim zorlukları dikkate alınarak yerel İHA uygulama senaryoları geliştirilmelidir. İstanbul'da TEM ve D-100 gibi ana arterlerde İHA destekli yoğunluk haritalama ve kaza tespiti sağlanabilir. Antalya ve Muğla'da yaz aylarında artan trafik, İHA'lar ile izlenerek dinamik yönlendirme yapılabilir. Karadeniz'de ise dağlık yerleşimlerde yol durumu ve heyelan riski takibinde İHA'lar etkili olabilir. Bu yaklaşımlar, Türkiye'nin coğrafi ve demografik çeşitliliğine uygun esnek çözümler sunar.

Gelecekteki akademik araştırmalar için ise afet sonrası yol kullanılabilirliği haritalama, karma İHA sistemleriyle adaptif trafik kontrolü, mikro mobilite davranışlarının analizi ve sosyal medya ile İHA verilerinin bütünlük kullanımı gibi konular ön plana çıkmaktadır. Ayrıca radar ve görüntü tabanlı çok katmanlı sensör füzyonu uygulamaları da ileri düzey analizler için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

İHA tabanlı trafik izleme sistemleri, kentsel mobilite, güvenlik ve kriz yönetimi alanlarında stratejik katkılar sağlayabilecek kapasiteye sahiptir. Türkiye, sahip olduğu teknolojik altyapı ve yetişmiş insan gücü ile bu alanda küresel ölçekte rekabet edebilecek güçlü bir potansiyele sahiptir.

Kaynakça

- Aggarwal, S., & Kumar, N. (2020). Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. İçinde *Computer Communications* (C. 149, ss. 270-299). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>
- Ahmed, A., Ngoduy, D., Adnan, M., & Baig, M. A. U. (2021). On the fundamental diagram and driving behavior modeling of heterogeneous traffic flow using UAV-based data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 148, 100-115. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.03.001>
- Alahvirdi, D., & Tuci, E. (2023). Autonomous Traffic Monitoring and Management by a Simulated Swarm of UAVs. *11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2023*, 91-96. <https://doi.org/10.1109/ICRoM60803.2023.10412448>
- Balamuralidhar, N., Tilon, S., & Nex, F. (2021). MultEYE: Monitoring system for real-time vehicle detection, tracking and speed estimation from UAV imagery on edge-computing platforms. *Remote Sensing*, 13(4), 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs13040573>
- Barmponakis, E., & Geroliminis, N. (2020). On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: The pNEUMA large-scale field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, 50-71. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.023>

- Biyik, M. Y., Atik, M. E., & Duran, Z. (2023). Deep learning-based vehicle detection from orthophoto and spatial accuracy analysis. *International Journal of Engineering and Geosciences*, *8*(2), 138-145. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1080624>
- Bouassida, S., Neji, N., Nouvelière, L., & Neji, J. (2020). *Evaluating the Impact of Drone Signaling in Crosswalk Scenario*. <https://doi.org/10.3390/app11010>
- Butilă, E. V., & Boboc, R. G. (2022). Urban Traffic Monitoring and Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Systematic Literature Review. İçinde *Remote Sensing* (C. 14, Sayı 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs14030620>
- Byun, S., Shin, I. K., Moon, J., Kang, J., & Choi, S. Il. (2021). Road traffic monitoring from uav images using deep learning networks. *Remote Sensing*, *13*(20). <https://doi.org/10.3390/rs13204027>
- Cao, Z., Kooistra, L., Wang, W., Guo, L., & Valente, J. (2023). Real-Time Object Detection Based on UAV Remote Sensing: A Systematic Literature Review. İçinde *Drones* (C. 7, Sayı 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/drones7100620>
- Chen, H., & Qiu, T. Z. (2022). Distributed Dynamic Route Guidance and Signal Control for Mobile Edge Computing-Enhanced Connected Vehicle Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *23*(8), 12251-12262. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3111855>
- Coifman, B., Mccord, M., Mishalani, R. G., Iswalt, M., & Ji, Y. (2006). *Roadway Traffic Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle*.
- Coifman, B., Mccord, M., Mishalani, R. G., & Redmill, K. (2003). *Surface Transportation Surveillance from Unmanned Aerial Vehicles*.
- Duman, Z. N., Çulcu, M. B., & Katar, O. (2022). YOLOv5-based Vehicle Objects Detection Using UAV Images. *Turkish Journal of Forecasting*, *06*(1), 40-45. <https://doi.org/10.34110/forecasting.1145381>
- Fu, F., Wang, D., Sun, M., Xie, R., & Cai, Z. (2024). Urban Traffic Flow Prediction Based on Bayesian Deep Learning Considering Optimal Aggregation Time Interval. *Sustainability* (Switzerland) , *16*(5). <https://doi.org/10.3390/su16051818>
- Garau Guzman, J., & Baeza, V. M. (2024). Enhancing Urban Mobility through Traffic Management with UAVs and VLC Technologies. *Drones*, *8*(1). <https://doi.org/10.3390/drones8010007>
- Gomez, C., & Purdie, H. (2016). UAV- based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review. İçinde *Geoenvironmental Disasters* (C. 3, Sayı 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0060-y>
- Gupta, A., Afrin, T., Scully, E., & Yodo, N. (2021). Advances of UAVs toward Future Transportation: The State-of-the-Art, Challenges, and Opportunities. *Future Transportation*, *1*(2), 326-350. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020019>
- Heiets, I., Kuo, Y.-W., La, J., Yeun, R. C. K., & Verhagen, W. (2023). Future Trends in UAV Applications in the Australian Market. *Aerospace*, *10*(6), 555. <https://doi.org/10.3390/aerospace10060555>

- Hossain, M., Hossain, M. A., & Sunny, F. A. (2019, Aralık 1). A UAV-Based traffic monitoring system for smart cities. *2019 International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0, STI 2019*. <https://doi.org/10.1109/STI47673.2019.9068088>
- Huang, H., Savkin, A. V., & Huang, C. (2021). Decentralized Autonomous Navigation of a UAV Network for Road Traffic Monitoring. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(4), 2558-2564. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3053115>
- İnağ, T., & Arıkan, M. (2024). A Fuzzy Based Intelligent Traffic Light Control (ITLC) Method: An Implementation in Ankara City. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 292-306. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1388486>
- Javadi, S., Dahl, M., & Pettersson, M. I. (2021). Vehicle Detection in Aerial Images Based on 3D Depth Maps and Deep Neural Networks. *IEEE Access*, 9, 8381-8391. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049741>
- Jian, L., Li, Z., Yang, X., Wu, W., Ahmad, A., & Jeon, G. (2019). Combining Unmanned Aerial Vehicles With Artificial-Intelligence Technology for Traffic-Congestion Recognition: Electronic Eyes in the Skies to Spot Clogged Roads. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 8(3), 81-86. <https://doi.org/10.1109/MCE.2019.2892286>
- Khan, M. A., Ectors, W., Bellemans, T., Ruichek, Y., Yasar, A.-H., Janssens, D., & Wets, G. (2018). Unmanned Aerial Vehicle-based Traffic Analysis: A Case Study to Analyze Traffic Streams at Urban Roundabouts. *Procedia Computer Science*, 130, 636-643. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.114>
- Khan, N. A., Jhanjhi, N. Z., Brohi, S. N., Usmani, R. S. A., & Nayyar, A. (2020). Smart traffic monitoring system using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Computer Communications*, 157, 434-443. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.049>
- Krueger, L. B. (2004). *Airborne traffic surveillance systems proof of concept study: A leadingedge traffic surveillance success*.
- Kujawski, A., & Dudek, T. (2021). Analysis and visualization of data obtained from camera mounted on unmanned aerial vehicle used in areas of urban transport. *Sustainable Cities and Society*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103004>
- Kunovjanek, M., & Wankmüller, C. (2021). Containing the COVID-19 pandemic with drones - Feasibility of a drone enabled back-up transport system. *Transport Policy*, 106, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.03.015>
- Lee, J., Zhong, Z., Kim, K., Dimitrijevic, B., Du, B., & Gutesa, S. (2015, Ocak 15). Examining the Applicability of Small Quadcopter Drone for Traffic Surveillance and Roadway Incident Monitoring. *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*.
- Li, S., Yang, X., Lin, X., Zhang, Y., & Wu, J. (2023). Real-Time Vehicle Detection from UAV Aerial Images Based on Improved YOLOv5. *Sensors*, 23(12). <https://doi.org/10.3390/s23125634>
- Liu, X., & Zhang, Z. (2021). A Vision-Based Target Detection, Tracking, and Positioning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/5565589>

- Mohammed, F., Idries, A., Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., & Jawhar, I. (2014). Opportunities and Challenges of Using UAVs for Dubai Smart City. *2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2014.6814041>
- Niu, H., Gonzalez-Prelcic, N., & Heath, R. W. (2018). A UAV-Based Traffic Monitoring System - Invited Paper. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417546>
- Oubbati, O. S., Lakas, A., Lorenz, P., Atiquzzaman, M., & Jamalipour, A. (2021). Leveraging Communicating UAVs for Emergency Vehicle Guidance in Urban Areas. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 9(2), 1070-1082. <https://doi.org/10.1109/TETC.2019.2930124>
- Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 116-129. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>
- Shan, D., Lei, T., Yin, X., Luo, Q., & Gong, L. (2021). Extracting key traffic parameters from UAV video with on-board vehicle data validation. *Sensors*, 21(16). <https://doi.org/10.3390/s21165620>
- Sharma, M. (2021). Drone Technology for Assisting COVID-19 Victims in Remote Areas: Opportunity and Challenges. *Journal of Medical Systems*, 45(9), 85. <https://doi.org/10.1007/s10916-021-01759-y>
- Shulajkovska, M., Smerkol, M., Noveski, G., & Gams, M. (2024). Enhancing Urban Sustainability: Developing an Open-Source AI Framework for Smart Cities. *Smart Cities*, 7(5), 2670-2701. <https://doi.org/10.3390/smartcities7050104>
- Srivastava, S., Narayan, S., & Mittal, S. (2021). A survey of deep learning techniques for vehicle detection from UAV images. İçinde *Journal of Systems Architecture* (C. 117). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102152>