

Derleme | Review Article

## Mikro Ölçekli Trafik Simülasyonu, Mikro Ölçekli Emisyon Modellemesi ve Görüntü İşleme Teknikleri Üzerine Bir Derleme

Elif İzol<sup>1,3</sup> , Abdulkadir Yıldırım<sup>2,5</sup> , Güzin Akyıldız Alçura<sup>3</sup> , Halit Özen<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>2</sup> Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>3</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ulaştırma ABD, İstanbul, Türkiye

<sup>4</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ulaştırma ABD, İstanbul, Türkiye

<sup>5</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği ABD, Afyonkarahisar, Türkiye

### Öz

Kentsel ölçekte araç emisyonlarının doğru tahmin edilmesi, etkili çevre yönetimi ve trafik planlaması için büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda, mikroskobik trafik simülasyonu, mikroskobik emisyon modellemesi ve görüntü işleme tabanlı araç tespit yöntemlerini birleştiren entegre yaklaşımlar, tahmin doğruluğunu artırma potansiyelleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bununla birlikte, her üç bileşeni bir çerçevede birleştiren çalışmalar literatürde oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu derleme, araç tespiti için görüntü işleme tekniklerini (örn. Gerçek zamanlı nesne tanıma yöntemi olan You Only Look Once [YOLO]), Kalman Filtresi, optik akış), trafik akışı modellemesi için trafik simülasyon araçlarını (örn. Trafik mikro simülasyon yazılımı, Verkehr In Städten – Simulation [VISSIM]), kentsel hareketlilik simülasyonu (Simulation of Urban Mobility [SUMO]) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>), karbonmonoksit (CO), azotoksit (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde (PM) gibi emisyonların hesaplanması için çeşitli emisyon modellerini (örn. Passenger Car and Heavy Duty Emission Model (PHEM), Vehicle Emission Model [VERSIT+]) kullanan seçilmiş araştırmaları incelemektedir. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalara ve farklı veri kaynaklarının bütünleştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışma, mevcut hibrit yaklaşımların avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymakta ve trafik verilerini emisyon tahmin araçlarıyla bütünleştiren kapsamlı modellerin geliştirilmesine yönelik geleceğe dair öneriler sunmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin karar destek mekanizmalarına entegre edilmesiyle şehir yönetiminde etkinlik sağlanabilmesi konusunda fikirler sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** trafik simülasyonu, emisyon modellemesi, görüntü işleme, hava kirliliği

## A Review of Microscopic Traffic Simulation, Microscopic Emission Modeling, and Image Processing Techniques

### Abstract

Accurately estimating vehicle emissions at the urban scale is crucial for effective environmental management and traffic planning. In recent years, integrated approaches that combine microscopic traffic simulation, microscopic emission modelling, and image processing-based vehicle detection techniques have gained significant attention due to their potential to enhance prediction accuracy. However, studies that holistically incorporate all three components within a single framework remain scarce in the literature. This review analyzes selected research that utilizes image processing methods (e.g., YOLO, Kalman Filter, Optical Flow) for vehicle detection, traffic simulation platforms (e.g., VISSIM, SUMO) for modelling traffic flow, and various emission models (e.g., PHEM, VERSIT+) for estimating pollutants such as CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, and PM. The study particularly emphasizes real-time applications and the integration of heterogeneous data sources. By examining the strengths and limitations of existing hybrid approaches, the paper highlights current challenges and identifies future research opportunities for developing comprehensive, data-driven systems that integrate traffic dynamics with emission estimation tools. Furthermore, it explores how these integrated systems can be leveraged as part of intelligent decision-support mechanisms to enhance urban management and sustainability efforts.

**Keywords:** traffic simulation, emission modeling, image processing, air pollution

<sup>1</sup> İletişim / Contact: Elif İzol, Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. E-Posta / E-mail: [elifizol@harran.edu.tr](mailto:elifizol@harran.edu.tr). Gönderildiği tarihi / Date submitted: 26.05.2025, Kabul edildiği tarih / Date accepted: 20.10.2025

Alıntı / Citation: İzol, E., Yıldırım, A., Alçura, A. G. ve Özen, H. (2026). Mikro ölçekli trafik simülasyonu, mikro ölçekli emisyon modellemesi ve görüntü işleme teknikleri üzerine bir derleme. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 9, 1706324. <https://doi.org/10.38002/tuad.1706324>



## Mikro Ölçekli Trafik Simülasyonu, Mikro Ölçekli Emisyon Modellemesi ve Görüntü İşleme Teknikleri Üzerine Bir Derleme

### 1. Giriş

Günümüzde iklim değişikliği ve hava kirliliği, çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden en önemli küresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Sanayileşmenin hızlanması, fosil yakıt tüketiminin artması ve motorlu taşıt kullanımının yaygınlaşması, küresel sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde artırarak atmosferdeki karbon yoğunluğunun yükselmesine neden olmuştur. Bu süreç, başta CO<sub>2</sub>, metan (CH<sub>4</sub>) ve NO<sub>x</sub> olmak üzere çeşitli emisyonların birikmesine yol açarak küresel ısınmayı hızlandırmakta, ekstrem hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırmakta ve ekosistemlerin dengesini bozmaktadır. Artan emisyon seviyeleri, hava kalitesinin düşmesine, biyoçeşitliliğin azalmasına ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen kirleticilerin yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Uluslararası toplum, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek amacıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (Birleşmiş Milletler, 1992), Kyoto Protokolü (Birleşmiş Milletler, 1998) ve Paris Anlaşması (Birleşmiş Milletler, 2015) gibi çeşitli çevre anlaşmalarını yürürlüğe koymuştur. Özellikle Paris Anlaşması, küresel ısınmayı 2 °C'nin (tercihen 1,5 °C) altında tutmayı hedefleyerek, tüm ülkeleri kapsayan uzun vadeli bir çerçeve sunmaktadır. İklim finansmanı, teknoloji transferi ve karbon ticareti gibi mekanizmalarla düşük karbonlu ekonomiye geçiş desteklenmektedir. Bunların yanı sıra sürdürülebilir kentsel hareketlilik planlarıyla da yerel yönetimlerin ihtiyaç ve gereksinimlerinin belirlenmesi konusunda adımlar atılmaya başlanmıştır (Karaçor ve ark., 2024).

Ancak, 2016 Avrupa Birliği Referans Senaryosu'na (2016) göre, iddialı bir karbonsuzlaştırma politikası olmaksızın, ulaşım kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonlarının 2010-2050 arasında yalnızca %8 azalması ve 2050'de zirveye ulaşması beklenmektedir. Bu sınırlı düşüş, binek araç sayısındaki artış, elektrikli araçların yavaş yayılması ve alternatif yakıtlara geçişin sınırlı kalması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Niroomand ve ark., 2021). Bu durum, yalnızca küresel anlaşmaların ve makro ölçekli politikaların yeterli olmadığını, ulaşım sektöründeki emisyonları azaltmak için yerel düzeyde daha etkili çözümler

geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Alam ve ark., 2025; Jia ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2022).

Bu çalışma, mikro ölçekli trafik simülasyonu, mikro ölçekli emisyon modellemesi ve görüntü işleme tekniklerinin entegrasyonunu ele alan kapsamlı bir derleme niteliğindedir. Mevcut literatürde bu üç alanı birleştiren sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup, bu araştırma, söz konusu alanların birlikte nasıl değerlendirilebileceğine dair sistematik bir inceleme sunmayı amaçlamaktadır.

Mikro ölçekli trafik simülasyonları, bireysel araç hareketlerini ayrıntılı bir şekilde modelleyerek trafik akışının daha gerçekçi bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, SUMO, PTV VISSIM, Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks (AIMSUN) ve Parallel Microscopic Simulation (PARAMICS) gibi yaygın olarak kullanılan mikroskobik trafik simülasyon yazılımlarının temel özellikleri incelenmiş ve bu sistemlerin emisyon modelleme süreçleriyle nasıl entegre edilebileceği değerlendirilmiştir.

Mikro ölçekli emisyon modellemesi ise trafik simülasyonlarından elde edilen hız, ivme ve diğer sürüş parametrelerini kullanarak CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve PM gibi hava kirleticilerinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, PHEM ve Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) gibi daha birçok mikro ölçekli emisyon modellerinin kullanımı ve trafik simülasyonu ile entegrasyonu ele alınmış, bu modellerin doğruluğu ve uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Görüntü işleme teknikleri ise trafik verilerinin toplanması ve analiz edilmesi sürecinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. YOLO, DeepSORT ve optik akış gibi yapay zekâ destekli nesne tespiti ve takibi algoritmalarının, araç sayımı, hız tahmini ve trafik yoğunluğu analizleri için kullanımı incelenmiştir. Bununla birlikte, trafik kamera verilerinin mikro ölçekli trafik simülasyonlarıyla bütünleştirilerek daha gerçekçi trafik modelleri oluşturulabileceği vurgulanmıştır. Özellikle, görüntü işleme teknikleri ile elde edilen trafik verilerinin doğrudan emisyon hesaplamalarına entegre edilmesi üzerine yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu doğrultuda, bu çalışmanın temel amacı, mikro ölçekli trafik simülasyonları, mikro ölçekli emisyon modellemesi ve görüntü işleme tekniklerinin bütünlük bir çerçevede ele alınarak kentsel trafik

yönetimi ve çevresel etki analizlerinde nasıl daha etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktır. Mevcut çalışmaların sistematik bir analizi yapılarak, bu üç alanın entegrasyonuna yönelik mevcut eksiklikler ve potansiyel araştırma alanları belirlenmiştir. Böylece, gelecekte yapılacak çalışmalar için teorik bir temel oluşturulması hedeflenmiştir.

## 2. Yöntem

### 2.1. Literatür İncelemesinin Metodolojisi ve Temel Özellikleri

Şekil 1, bu çalışmanın genel yapısını özetlemektedir. Çalışma kapsamında, mikro ölçekli trafik simülasyonları, yapay zekâ destekli görüntü işleme teknikleri ve mikro ölçekli emisyon modelleme yöntemlerinin entegrasyonu ele alınmıştır. Literatür taraması, ilgili alanlardaki temel anahtar kelimeler üzerinden gerçekleştirilmiş ve mevcut araştırmalar incelenerek üç temel bileşenin nasıl entegre edilebileceği araştırılmıştır. Öncelikle, mikro ölçekli trafik simülasyonlarında kullanılan modeller ve bu modellerin trafik akışını nasıl analiz ettiği incelenmiştir. Ardından, mikro ölçekli emisyon modelleri ile trafik simülasyonlarının entegrasyonu değerlendirilmiştir. Görüntü işleme teknikleri açısından ise nesne tespiti ve takibi algoritmalarının trafik verisi toplama süreçlerinde nasıl kullanıldığı ele alınmıştır.

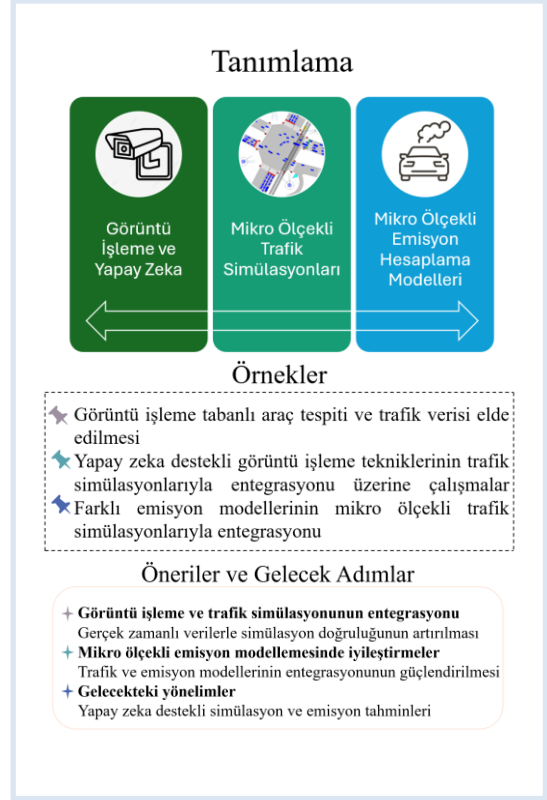
Çalışmada, bu üç alanın entegrasyonu üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunduğu tespit edilmiş olup, bu bileşenlerin birlikte ele alındığı bir çerçevenin oluşturulmasının literatüre önemli bir katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Literatür taramasında kullanılan yöntemler üç ana başlık altında ele alınmıştır:

- **Tanımlama:** Çalışmada ele alınan konu ile ilgili temel kavramlar ve kullanılan modeller belirlenmiştir.
- **Örnekler:** Simülasyon, görüntü işleme ve emisyon modelleme konularındaki önemli çalışmalar incelenmiştir.
- **Öneriler ve Gelecek Adımlar:** Gelecekte yapılacak çalışmalar için iyileştirme önerileri ve araştırma yönelimleri tartışılmıştır.

Şekil 2’de sunulan bibliyometrik ağ haritası, Web of Science (WoS) veri tabanında 2015–2025 yılları arasında yayımlanmış çalışmalardan elde edilen

anahtar kelimeler temelinde oluşturulmuş olup, VOSviewer yazılımı kullanılarak görselleştirilmiştir. Anahtar kelime taraması “microscopic traffic simulation (mikroskobik trafik simülasyonu)”, “emission (emisyon)”, “deep learning (derin öğrenme)”, “vehicle emissions (araç emisyonları)” ve “traffic simulation (trafik simülasyonu)” gibi terimlerle gerçekleştirilmiş ve toplamda 450’den fazla akademik yayının anahtar kelime kümesinden elde edilen veriler analiz edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın kavramsal çerçevesi ve bileşenleri.

Bu haritada, düğüm büyüklükleri belirli bir anahtar kelimenin literatürde kaç farklı yayında geçtiğini, yani kullanım sıklığını göstermektedir. Büyük düğümler, o terimin araştırmacılar arasında daha yaygın olarak ele alındığını ve alandaki merkezi rolünü temsil eder. Renk geçişleri ise yayınların yıllara göre dağılımını ifade eder; açık mavi tonlar daha eski yayınları (2015–2018), koyu mor tonlar ise daha güncel çalışmaları (2022–2025) temsil etmektedir. Bu görselleştirme, alandaki evrimsel araştırma yönelimlerini anlamaya olanak tanımaktadır.

2015–2018 döneminde literatürde ilgili alanlarda kullanılan yaygın anahtar kelimeler arasında yer alan “traffic simulation”, “vehicle emissions” ve “air quality” gibi daha geleneksel konular öne çıkarken, 2020 sonrası dönemde “deep learning”, “YOLO”,

“Long Short-Term Memory (LSTM)” ve “neural network” gibi yapay zekâ tabanlı tekniklerin sıkça kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Ayrıca “source apportionment”, “health risk” ve “urban air pollution” gibi terimler de çevresel ve halk sağlığı odaklı araştırmaların artışı göstermektedir.

Bu sonuçlar, trafik simülasyonu ve emisyon modellemesinde veri odaklı, makine öğrenmesi temelli yöntemlerin giderek daha fazla yer kazandığını ve disiplinler arası çalışmalara geçişin hızlandığını göstermektedir. Haritadaki kümelenmeler, aynı zamanda araştırmaların üç ana ekseninde (trafik modelleme, emisyon tahmini, yapay zekâ uygulamaları) şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Bu analiz, mevcut literatürdeki gelişmeleri görselleştirmenin ötesinde, gelecekteki çalışmalara yön verebilecek odak alanları (örneğin gerçek zamanlı emisyon tahmini, entegre sensör sistemleri, trafik-kaynaklı sağlık etkileri) belirleme açısından yol gösterici niteliktedir.

Çalışma, trafik verisi toplamında yapay zekâ tabanlı görüntü işleme tekniklerinin de önemine vurgu yaparak, görüntü tabanlı verilerin simülasyonlara entegrasyon potansiyelini tartışmaktadır. Yapay zekâ destekli yöntemlerin, trafik simülasyonlarının doğruluğunu artırmada ve veri güdümlü modellerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Gelecekte, yapay zekâ tabanlı trafik ve emisyon tahmin modellerinin geliştirilmesi, kentsel ulaşım ve çevresel analizlerin daha doğru ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Mikro Ölçekli Trafik Simülasyon Modelleri

Trafik simülasyon modelleri 4 ana gruba ayrılmaktadır (Lopez ve ark., 2018)

1. Makroskobik
2. Mikroskobik
3. Mezokobik
4. Alt-mikroskobik.

Makroskobik modellerde trafik yoğunluğu gibi ortalama araç dinamikleri simüle edilir, mikroskobik modelde her araç ve dinamikleri bireysel olarak modellenir, mezokobik modeller makroskobik ve mikroskobik modellerin birleşiminden oluşurken alt-mikroskobik modellerde araçların kendisiyle birlikte iç işlevleri de detaylı bir şekilde modellenir (örneğin, vites değişimi) (Lopez ve ark., 2018).

Çevresel ve güvenlik sorunlarının günlük yaşam üzerindeki etkisi giderek artmakta, trafik mikro simülasyonu ise bu sorunların analiz edilmesi ve çözüm üretilmesinde güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Enerji tüketimi, hava kirliliği ve trafik güvenliği gibi konulara yönelik artan ilgiyle birlikte bu sorunların incelenmesinde mikrosimülasyon modellemelerinin kullanımı giderek yaygınlaşan bir alan haline gelmiştir (Song ve ark., 2020). Akkaya ve Engin (2022) ise farklı trafik simülasyon yazılımlarını (SUMO, AIMSUN, Vissim, SimTraffic, Corridor Simulation (CORSIM), PARAMICS) karşılaştırmalı olarak ele alarak, bu yazılımların altyapı planlama, trafik akışının modellenmesi ve çeşitli senaryoların test edilmesinde sunduğu olanakları ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Şekil 3’te, mikro ölçekte trafik simülasyonu amacıyla yaygın olarak kullanılan 10 farklı yazılım ve bu yazılımların entegre mikro emisyon modelleme yetenekleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, yalnızca SUMO ve PTV VISSIM yazılımlarının doğrudan entegre veya harici uyumlu mikro emisyon modelleriyle birlikte kullanılabildiği görülmektedir. Diğer simülasyon yazılımlarında ise, entegre bir emisyon modülü yer almamakta, bu nedenle dış kaynaklı modelleme araçları (örneğin: Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT), CMEM, EMIT) ile birlikte çalıştırılmaları gerekmektedir. Bu durum, SUMO ve VISSIM’in saha uygulamaları ve politika senaryoları açısından daha işlevsel olduğunu göstermektedir. Özellikle SUMO’nun açık kaynaklı yapısı, kullanıcıların özel ihtiyaçlara göre model modifikasyonu yapmasına olanak tanımakta ve bu yönüyle akademik çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. PTV VISSIM ise ticari bir yazılım olup, detaylı ağ modellemesi ve EnViVer emisyon hesaplama modülü ile kapsamlı analizlere olanak sağlar.

Bununla birlikte, AIMSUN, PARAMICS ve TransModeler gibi yazılımlar da kullanıcıya güçlü trafik analiz araçları sunsa da emisyon modelleme açısından doğrudan destek sunmamaktadır. Bu da bu yazılımların kullanıldığı projelerde veri aktarımı ve senkronizasyon açısından ek çaba gerektirebilir. Şekilde yer alan simülasyon programlarının çoğu, emisyon tahmini için dış kaynaklı modellerle veri alışverişine uygun olsa da bu entegrasyonların doğruluğu ve zaman senkronizasyonu bakımından dikkatli yönetilmesi gerekir. Özellikle gerçek

zamanlı uygulamalar veya kentsel ölçekte karar destek sistemleri için entegre çözümler daha avantajlıdır.

**SUMO** (2025), Alman Havacılık ve Uzay Merkezi tarafından geliştirilen açık kaynaklı, mikro ölçekli bir trafik simülasyon yazılımıdır. Ayırık (discrete), zaman adımlı (time-step) ve sürekli uzamsal (space-continuous) bir yaklaşıma dayanarak bireysel araç hareketlerinin detaylı şekilde modellenmesine olanak tanır. SUMO, mikroskobik trafik akış modeli kullanarak araçlar, sürücüler ve trafik sinyallerini ayrı varlıklar olarak ele alır. TraCI arayüzü sayesinde makine öğrenme modelleri ve gerçek dünya verileriyle entegre çalışabilir. HBEFA ve PHEM modelleriyle CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM, Hidrokarbon (HC) emisyonlarını ve yakıt tüketimini simüle eder. Adaptif trafik sinyal kontrolü, V2V (Vehicle-to-Vehicle) ve V2I (Vehicle-to-Infrastructure Communication) iletişimi gibi akıllı ulaşım sistemlerini destekler. Açık kaynaklı yapısıyla trafik analizi ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri için güçlü bir platform sunar.

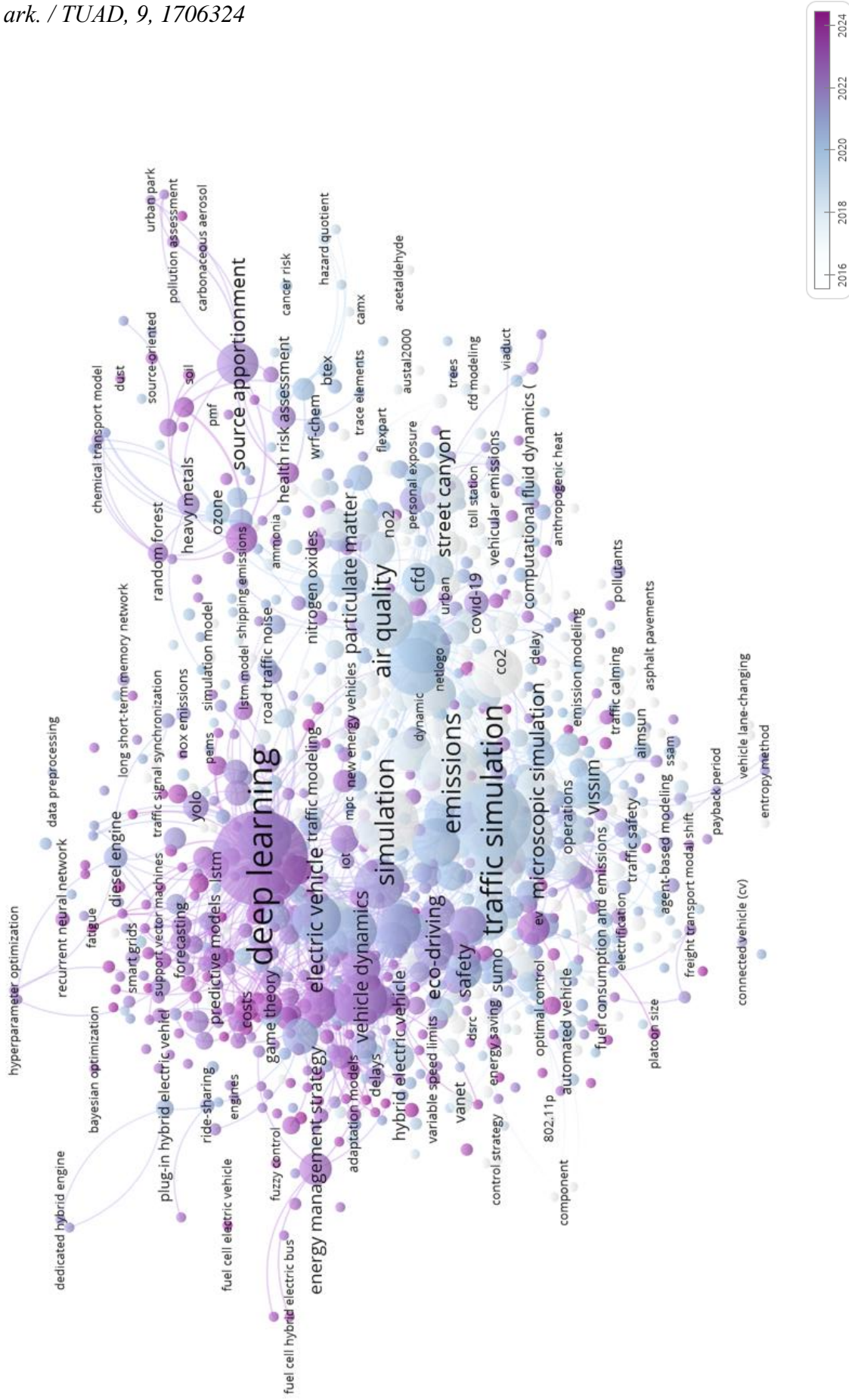
**VISSIM**, PTV Group tarafından geliştirilmiştir. Mikroskobik ve çok modlu bir trafik simülasyon yazılımıdır. Ayırık (discrete), stokastik ve zaman adımlı (time-step based) bir trafik akış modeli üzerine kurulmuş olup bireysel araç hareketlerini detaylı bir şekilde modellemektedir. Bu model, Wiedemann'ın araştırmalarına dayanarak geliştirilmiş olup, araç hareketlerini uzunlamasına takip etmek için psikofiziksel bir araç takip modeli, yan hareketler için ise kural tabanlı bir algoritma kullanmaktadır. VISSIM, araçlar, sürücüler ve trafik sinyallerini bağımsız varlıklar olarak ele alarak mikroskobik düzeyde trafik akışlarını simüle etmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, otomobiller, bisikletler, toplu taşıma araçları ve yayaların etkileşimlerini içeren çok modlu trafik analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra, harici yazılımlar ve trafik yönetim sistemleriyle entegrasyonu kolaylaştıran çeşitli uygulama programlama arayüzleri sunarak, gerçek zamanlı trafik optimizasyonu ve dijital ikiz uygulamaları için güçlü bir platform sağlamaktadır. Gelişmiş grafik arayüzü ve 3D görselleştirme yetenekleri, karmaşık trafik senaryolarının analizini kolaylaştırarak ulaşım projelerinin etkinliğini artırmaktadır (PTV Vissim, 2025; Ratrou ve Rahman, 2009).

**AIMSUN**, seyahat talebi modellemesini, makroskobik işlevleri ve mezoskopik-mikroskobik hibrit simülatörü entegre eden bir trafik modelleme

yazılım ortamıdır (Ejercito ve ark., 2017). Farklı ölçeklerde trafik simülasyonu yapabilen ve bu modelleri tek bir platformda entegre eden bir trafik modelleme yazılımıdır. Bu entegrasyon, kullanıcıların çeşitli detay seviyelerinde trafik akışını analiz etmelerine ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmalarına olanak tanımaktadır.

**PARAMICS**, mikroskobik trafik simülasyonu gerçekleştiren ve trafik sıkışıklığı yönetimi için kullanılan bir yazılımdır. Edinburgh Paralel Computing Centre (EPCC) ve SIAS Ltd. tarafından geliştirilmiş olup, paralel hesaplama teknikleri kullanarak büyük ölçekli yol ağlarında yüksek doğruluklu simülasyonlar yapabilmektedir. PARAMICS, bireysel araç seviyesinde trafik akışını modelleyerek, sürücü davranışlarını, şerit değiştirme kararlarını ve trafik sinyalizasyon sistemlerinin etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır. Bu yazılım, şehir içi yollar, otoyollar ve kavşaklar gibi farklı trafik ortamlarında uygulanabilmekte ve trafik ışıkları optimizasyonu, hız yönetimi ve toplu taşıma entegrasyonu gibi trafik politikalarının etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır (Paramics Microsimulation, 2025; Smith ve ark., 1995).

**Multi-Agent Transport Simulation (MATSim)**, çok Ajanlı Ulaşım Simülasyonu, büyük ölçekli ajan tabanlı ulaşım simülasyonlarını ve ulaşım planlama modellerini uygulamak için açık kaynaklı bir çerçevedir (Ejercitove ark., 2017). Bireysel hareketli nesnelere (araçlar, insanlar, mobil cihazlar vb.) izle-



Şekil 2. Trafik simülasyonu ve emisyon modellemesinde yapay zekâ: bibliyometrik bir bakış (2015–2025)

<i>Simülasyon Programı</i>	<i>Entegre Mikro Emisyon Modeli</i>	<i>Kaynak</i>
1 SUMO	PHEM ve dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	SUMO, 2025
2 PTV Vissim	Enviver ve dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	PTV Vissim, 2025
3 AIMSUN	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	AIMSUN, 2025
4 MATSim	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	MATSim, 2025
5 PARAMICS	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	PARAMICS, 2025
6 CORSIM	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	TSIS-CORSIM, 2025
7 TransModeler	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	TransModeler, 2025
8 MITSIMLab	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	Ben-Akiva, 2025
9 DRACULA	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	Liu, 1994
10 TRANSIMS	Entegre emisyon modeli bulunmaz, dış kaynaklı modellerle kullanılabilir	TRANSIMS, 2025

Şekil 3. Bazı mikro ölçekli trafik simülasyon programları

mek için kullanılan mikrosimülasyon modellerinden biridir. Mikrosimülasyon, ajanları oluşturmak ve en iyi yönlendirme kararlarını seçmek için rastgele sayılara dayanır (Miyazaki ve ark., 2020).

**CORSIM**, trafik operasyonlarını analiz etmek için geliştirilmiş stokastik bir mikroskobik simülasyon modelidir. 1970'lerin ortalarında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Federal Karayolu İdaresi tarafından oluşturulmuş ve ABD'de yaygın olarak kabul görmüştür. CORSIM, TSIS (Traffic Software Integrated System) paketinin temel bir parçasıdır ve kullanıcıların trafik analizleri gerçekleştirmesine olanak tanır. Bu model, otoyollar, ana yollar ve toplu taşıma sistemlerinin simülasyonunu yaparak trafik akışlarını incelemeye yardımcı olur. NETSIM (ana yol ağı modeli) ve FRESIM (otoyol modeli) olmak üzere iki mikroskobik simülasyon modelini birleştirir. Araç takip, trafik kontrol ve trafik atama gibi bileşenleri içeren çeşitli modüllerle detaylı analiz imkânı sunar (Park ve Qi, 2004).

**Microscopic Traffic SIMulation Laboratory (MITSIMLab)**, Gelişmiş Trafik Yönetim Sistemleri ve Gelişmiş Yolcu Bilgi Sistemleri'nin tasarımı ve değerlendirilmesi için geliştirilmiş bir mikroskobik trafik simülasyon laboratuvarıdır. MITSIMLab, çeşitli trafik yönetim sistemlerini temsil edebilir ve sürücülerin gerçek zamanlı trafik bilgisi ve kontrolüne verdikleri tepkiyi modelleyebilir. Böylece, trafik yönetim sistemi ile sürücüler arasındaki dinamik etkileşimi simüle eder (Barcelo 2010; Sterzin, 2004).

**TransModeler**, trafik yönetimi ve planlaması için geliştirilmiş kapsamlı bir analiz aracıdır. Farklı yol ağlarına yönelik detaylı incelemeler yaparak, şehir merkezlerinden otoyollara kadar uzanan çeşitli ulaşım sistemlerini modelleyebilir. Buna ek olarak, TransCAD entegrasyonu sayesinde seyahat talebi analizleri ve tahminleri yaparak gelecekteki ulaşım planlamalarına yönelik stratejik öngörüler sunabilir (Ullah ve ark., 2021).

**Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation (DRACULA)**, dinamik rota atama, sürücü öğrenimi ve mikrosimülasyon süreçlerini birleştiren ticari bir trafik simülasyon yazılımıdır. Deneme sürümü bulunan bu yazılım, trafik modellemesi için kapsamlı analiz seçenekleri sunmaktadır. Bu sistem, mikroskobik ve makroskobik seviyelerde rota seçimi modellemesi yapabilmektedir. Sürücülerin alternatif güzergâhlara verdiği tepkileri analiz ederek, her

sürücünün önceki deneyimlerini sistem içinde depolayabilir. Trafik akışı modellemesi açısından, şerit değiştirme ve boşluk kabulü algoritmalarını kullanarak trafikte kuyruk birikmelerini ve sürücü davranışları üzerindeki etkilerini analiz edebilir. Ayrıca, trafik sıklıklarının geriye doğru yayılımını (şok dalgaları) modelleyerek, yoğunluk değişimlerinin sürücüler üzerindeki etkisini değerlendirebilir (Liu 1994; Ullah ve ark., 2021).

**Transportation Analysis and Simulation System (TRANSIMS)**, ABD Ulaştırma Bakanlığı, Çevre Koruma Ajansı ve Enerji Bakanlığı'nın desteğiyle Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilmiş bir trafik simülasyon sistemidir. Bu model, büyük ölçekli ulaşım analizleri ve dinamik trafik atamalarını gerçekleştirmek için tasarlanmış olup, hücresel otomat tabanlı bir yaklaşım kullanmaktadır. Ayrıca, araçların anlık hız ve ivmelenme verilerini işleyerek, yüksek çözünürlüklü trafik akışı ve emisyon haritaları oluşturma yeteneğine sahiptir (Lee ve ark., 2014).

### 3.2. Mikro Ölçekli Emisyon Modelleri

Akıllı ulaşım sistemlerinin çevre üzerindeki etkisini değerlendirmek büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yüksek doğruluklu bir araç emisyon modeli geliştirmek, uzun süredir ulaşım araştırmalarının odak noktalarından biridir (Jia ve ark., 2022). Karayolu ulaşımından kaynaklanan trafik emisyonları, CO, NOx, uçucu organik bileşikler (Volatile Organic Compounds [VOC]) ve PM kentsel alanlar için yerel kirletici emisyonlarının ana kaynağıdır. Bu emisyonlar yalnızca çevre sorunlarına yol açmakla kalmayıp aynı zamanda insan sağlığının ve sosyal refahın bozulmasına neden olmaktadır. Mikroskobik emisyon modelleri, yerel (kentsel) trafikten kaynaklanan emisyonların tahmini ve kontrolü ile enerji tüketimi konusundaki artan endişelerden dolayı saha uygulamalarından önce operasyonel ulaşım projelerinin trafik etkilerini değerlendirme yetenekleri sayesinde yoğun ilgi görmektedir (Ma ve ark., 2012).

**EnViVer**, VISSIM trafik simülasyonundan alınan verileri kullanarak trafik emisyonlarını tahmin edebilen VERSIT+ tabanlı bir eklenti modülüdür. Enviver, VISSIM'den hız-zaman profillerini alarak emisyon değerlerini hesaplar. Bu emisyonlar araç türüne, yol tipine ve hız-zaman profillerine göre değişkenlik göstermektedir. Eğer varsayılan araç filosu seçilirse Hollanda'ya ait filo kullanılmış olur.

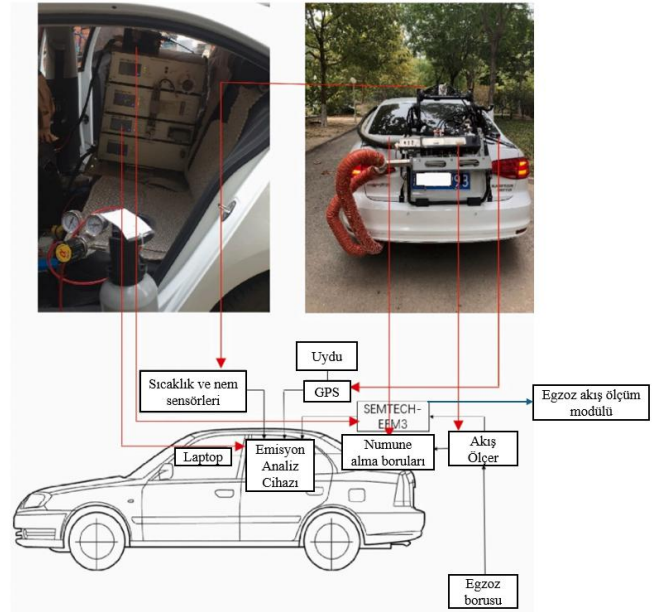
Ancak bu seçimi değiştirmek ve özelleştirmek mümkündür (Blomgren ve Jungbjer, 2019).

**CMEM modeli**, 300'den fazla aracın motor çıkış ve egzoz emisyonları için saniye bazında veri toplanarak geliştirilmiştir. Veriler, FTP (Federal Test Procedure), US06 ve MEC (Modal Emission Cycle) sürüş çevrimlerinde ölçülmüştür. MEC döngüsü, bir aracın yakıt zenginleştirme moduna ne zaman geçtiği belirlemek için UC Riverside araştırmacıları tarafından tasarlanmıştır. Model, geniş bir araç ve teknoloji yelpazesi için egzoz emisyonlarını ve yakıt tüketimini tahmin eder. Basit, parametreleştirilmiş fiziksel bir yaklaşıma dayanarak, emisyon sürecini altı modülde analiz eder: motor hızı, motor gücü, motor çıkış emisyonları, hava-yakıt oranı, yakıt kullanımı ve katalizör ekisi. Araç hızı, ivme ve yol eğimi gibi değişkenler ise model parametreleri girdisi olarak kullanılır (Rakha ve ark., 2004).

**Portable Emissions Measurement System (PEMS)**, (Taşınabilir Emisyon Ölçüm Sistemi), laboratuvar ortamlarından ziyade gerçek sürüş koşullarında ölçüm yaparak gerçek zamanlı araç emisyonlarını değerlendirmede önemli bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Yolda testlere doğru bu geçiş özellikle Euro 6 standartları gibi düzenleyici çerçeveler ışığında, araçlar tarafından üretilen emisyonların doğru bir şekilde ölçülebilmesi için önemlidir. Gerçek Sürüş Emisyon testleri de PEMS kullanımını zorunlu kılmaktadır (Chen ve ark., 2022; Giechaskiel ve ark., 2021; Pignatta ve Balazadeh 2022). Şekil 4'te, 2018 model bir binek araca entegre edilmiş taşınabilir emisyon ölçüm sistemi ekipmanları gösterilmektedir. Bu sistemde yer alan emisyon analiz cihazı, egzozdan çıkan gazların bileşimini ve konsantrasyonlarını gerçek zamanlı olarak tespit etmektedir. Küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System [GPS]) ve uydu bağlantısı, aracın konum bilgisi ve hız verisini sağlamaktadır. Ayrıca, ortam sıcaklığı ve nem sensörleri, ölçümlerin çevresel koşullara göre standardize edilmesine olanak tanımaktadır.

Egzoz borusuna bağlı numune alma boruları ve akış ölçer hem gaz örneklerinin cihaza iletilmesini hem de debi hesabını yaparak toplam emisyon miktarının doğru hesaplanmasını mümkün kılar. Tüm bileşenler bir dizüstü bilgisayar ile entegre biçimde çalışmakta, bu da verilerin çevrim içi olarak işlenmesine ve kaydedilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sistem, hem laboratuvar dışı gerçek sürüş koşullarında ölçüm yapılabilmesini sağlar, hem de model kalibrasyonu ve

doğrulama çalışmalarında önemli bir referans verisi sunar.



Şekil 4. Benzinli aracın PEMS ekipmanları (Yu ve ark., 2021).

**Vehicle Specific Power (VSP)**, (Taşıt Özgül Gücü emisyon modeli), çeşitli çalışma koşullarında ve yük durumlarında araç emisyonlarını ölçmede kritik bir araçtır. Klasik hız tabanlı modellere göre emisyonların daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlar (Frey ve ark., 2010; Zhai ve ark., 2017). VSP ton başına kilowatt cinsinden taşıtın birim kütlesi başına anlık güç olarak tanımlanmaktadır. Taşıtın hızı, bir aracın çalışma koşullarını ölçmede, yakıt tüketimini ve emisyonları tahmin etmede önemli bir değişkendir. VSP tabanlı modellerin yakıt tüketiminde ve CO<sub>2</sub> emisyon ölçümlerinde açıklayıcılık gücünün (R<sup>2</sup>) diğer emisyonlara oranla daha güçlü olduğu görülmüştür (Barth ve Boriboonsomsin, 2008; Ko ve ark., 2012; Zhai ve ark., 2017).

**PHEM** taşıtların yakıt tüketim ve emisyonlarını, boylamsal dinamiklerine ve motor emisyon haritalarına dayanarak 1 saniyelik zaman çözünürlüğünde hesaplar. Model ilk olarak hız-zaman serisi ve yol eğimi temelinde bir taşıtın 1 saniyelik motor gücünü tahmin eder. Motor hızı, şanzıman oranları ve bir vites değiştirme modeli kullanılarak tahmin edilir. Daha sonra motor emisyon haritaları, yakıt tüketimlerinin ve havadaki kirletici ve PM emisyonlarının zaman içerisindeki seyrini tahmin etmeye imkân sağlar. Model ayrıca geçici

düzeltilme işlevleri ve bir soğuk çalıştırma aracı içerir (Hausberger ve ark., 2003; Lejri ve ark., 2018).

**PHEMlight**, PHEM'in basitleştirilmiş versiyonu olarak tanımlanabilir. PHEMlight motor hızını dolaylı olarak motor gücünün bir fonksiyonu şeklinde hesaplar. Dolayısıyla yakıt tüketimi ve emisyonların hesaplanması bu şekilde elde edilmektedir. Genel bir yapılandırma kılavuzu amacıyla PHEMlight'in yeterli olduğu düşünülebilir. Bireysel araç yörüngelerinin optimize edilmesi gerektiğinde, vites değiştirme gibi ayrıntılı parametreler önemlidir, bu nedenle çalışmanın nihai amacını yansıtacak şekilde seçim yapılması önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra hem PHEM hem de PHEMlight araç sınıflarının karışımından araç filosunu simüle edebilirken, PHEMlight ağırlıklı ortalama araç (kamyon, araba, ticari vd.) bazında da kullanabilmektedir (Blokpoel ve ark., 2017).

**Virginia Tech Microscopic Emission Model (VT-Mikro)**, emisyon modelleri, araçların hız ve ivme verileri üzerinden yapılan deneysel çalışmalarla geliştirilmiştir. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'ndan elde edilen şasi dinamometre verileri kullanılarak farklı matematiksel kombinasyonlar test edilmiş; en iyi uyumu sağlayan, daha az karmaşık model seçilmiştir. Bu veriler, farklı araç tiplerinden (hafif otomobiller ve kamyonetler) alınan çok sayıda ölçümü içermektedir (Ahn ve ark., 2002). Model saniye saniye araç emisyonu ve yakıt tüketim oranları, her bir etkinlik ölçüleri için verilen hız, ivme ve katsayılarından oluşan polinom regresyon denklemleri oluşturularak elde edilmiştir. Sonuç olarak ortaya çıkan regresyon, ivme ve hız için küp, kare ve lineer terimlerinin kombinasyonunu içeren en iyi model olarak elde edilmiştir. VT-Micro model katsayıları, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> dahil olmak üzere yakıt tüketimi ve emisyonlar için mevcuttur. (Kwak ve ark., 2012; Rakha ve ark., 2004).

**International Vehicle Emission (IVE)**, her taşıt tipinin emisyon faktörünü gerçek durumuna göre değiştirir ve çalışma alanındaki toplam araç sayısını birleştirerek tüm filonun toplam emisyonunu elde eder. Diğer modellerle karşılaştırıldığında IVE modelinin temel özelliği, motor güç parametresi ve motor çalışma yoğunluğu parametresinin araç sürüş durumu ile emisyonlar arasındaki ilişkiyi kapsamlı bir şekilde ele almak için bir araya getirilmesidir. IVE emisyon tahmin modeli, motorlu araçlardan kaynaklanan emisyonları tahmin etmek için tasarlanmış olup esas amacı gelişmekte olan ülkelerde kullanılmaktır. Bu emisyon modeli, yerel

hava kirleticileri, sera gazı emisyonları ve toksik kirleticileri tahmin etmektedir. IVE, araç sürüş alışkanlıklarıyla ilgili tüm bilgilerin direkt yüklenmesine imkân tanır. Bu işlem, zaman, hız ve yükseklik verilerine dayalı olarak hesaplanan VSP aralıkları aracılığıyla gerçekleştirilir. Ayrıca tüm bu verilerin GPS kullanılarak rota boyunca kaydedilmesi gerekmektedir (Romero ve ark., 2020; Zhao ve ark., 2021).

Tablo 1'de, mikro emisyon modelleme araçlarının farklı ölçek, senaryo ve veri tipleriyle nasıl uygulandığına dair temsili örnekler sunulmuştur. Çalışmalar, hem makroskobik trafik stratejilerinin emisyon etkilerinin değerlendirilmesinde hem de gerçek sürüş verilerine dayalı incelemelerde mikro modellerin esnek ve güçlü yapısını ortaya koymaktadır. Model çeşitliliği açısından bakıldığında, CMEM ve VT-Micro gibi modellerin senaryo bazlı analizlerde sıkça kullanıldığı, PEMS temelli uygulamaların ise gerçek zamanlı saha verileriyle uyumlu ölçüm ve kalibrasyon çalışmalarında öne çıktığı görülmektedir. Özellikle araç hız profili, güzergâh seçimi, sürüş tarzı ve trafik sıklığı gibi parametrelerin, emisyon seviyeleri üzerinde %10 ile %60 arasında değişen etkilere sahip olduğu farklı çalışmalarda raporlanmıştır.

Yeni nesil uygulamalarda makine öğrenmesi algoritmalarının (örneğin: VSP tabanlı modellerde yapay sinir ağları, regresyon ağaçları vb.) emisyon tahmin doğruluğunu artırdığı ve araç türü/koşullarına göre özelleştirilebilir çıktılar sunduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda emisyon kontrol sistemlerinin motor gücünde %5-10 arasında düşüşe neden olabildiği ve bu durumun enerji verimliliği ile emisyon azaltımı arasında denge gerektirdiği vurgulanmıştır.

Tablo 2, mikro ölçekte trafik simülasyonu ve mikro emisyon modelleme sistemlerinin entegre biçimde kullanıldığı çok disiplinli akademik çalışmalardan derlenmiş örnekleri sunmaktadır. Bu çalışmaların büyük kısmı, şehir içi trafik yoğunluğu, kavşak geometrileri, araç teknolojileri ve sürüş davranışlarının egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Tabloda en sık kullanılan trafik simülasyon modelleri arasında VISSIM, SUMO, AIMSUN ve MATSim yer almakta; emisyon modelleme tarafında ise EnViVer, CMEM, VT-Micro, PEMS ve IVE gibi sistemlerin öne çıktığı görülmektedir. Özellikle VISSIM ile EnViVer entegrasyonunun yaygınlığı, ticari yazılımların saha uygulamalarında tercih edilme eğilimini ortaya

koyarken; SUMO'nun açık kaynak yapısı ise akademik çalışmalarda esnek modelleme olanağı sağlamaktadır.

Çalışmalarda öne çıkan eğilimler arasında sürüş profili değişiminin (örneğin agresif sürüşe karşı ekolojik sürüş) CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi emisyonlar üzerinde %10–50 arasında değişen etkiler yarattığı, yeni nesil araç teknolojilerinin (örneğin AV/CAV sistemleri) geleneksel araçlara göre daha düşük emisyon salımı sağladığı ve yapay zekâ temelli optimizasyon tekniklerinin mikro düzeyde karar destek sistemleriyle entegre kullanılmaya başlandığı gözlemlenmektedir. Kavşak yönetimi, sinyalizasyon, yol tipi farklılıkları gibi detayların da emisyon çıktılarını üzerinde anlamlı etki yarattığı görülmektedir.

Bununla birlikte, mevcut literatürde bazı önemli sınırlılıklar da dikkat çekmektedir. Özellikle kavşaklar ve trafik ışıkları gibi lokal müdahale alanlarında yapılan mikro ölçekte emisyon modelleri hâlen sınırlı kalmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde gerçekleştirilen vaka çalışmaları az sayıda olup, coğrafi ve sosyoekonomik farklılıkların emisyon tepkilerine olan etkileri yeterince araştırılmamıştır. Ayrıca, kamera, dron veya uydu gibi görüntü işleme tabanlı sistemlerle anlık trafik verilerinin elde edilerek doğrudan emisyon modellerine entegre edilmesi oldukça az sayıda çalışmada görülmektedir. Bunun yanı sıra, otonom araçlar, yol fiyatlandırması gibi politika senaryolarının emisyon tepkileriyle birlikte eş zamanlı modellenmesine ilişkin uygulamalar da oldukça sınırlı sayıdadır.

### 3.3. Görüntü İşleme ve Derin Öğrenme Teknikleri

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte görüntü ve video verilerinde büyük bir artış yaşanmıştır. Bu durum, etiketsiz ve işlenmemiş veri yığınlarının oluşmasına neden olmuş ve bu verilerin anlamlandırılması ile analiz edilmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sorunu çözmek için çeşitli görüntü işleme algoritmaları geliştirilmiş olup, bu algoritmalar; yararlı bilgiyi ayırt etme, metin, görüntü ve ses dosyalarına anlam kazandırma gibi işlevlerin yanı sıra yüz tanıma, plaka okuma ve nesne tespiti gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, veri miktarındaki artışa bağlı olarak verilerin daha karmaşık hale gelmesi, geleneksel yöntemlerin yetersiz kalmasına yol açmıştır. Bu tür durumlarda, son yıllarda giderek daha fazla tercih edilen, güçlü öğrenme yeteneklerine sahip ve yüksek doğruluk

sağlayan derin öğrenme yöntemleri ön plana çıkmıştır.

Görüntülerde nesnelere hızlı bir şekilde belirleyen ilk algoritmalarından biri 2001 yılında Viola ve Jones (2001) tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde görüntü tabanlı araç nesne tespiti, geleneksel makine görüşü teknikleri ve gelişmiş derin öğrenme yaklaşımları olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Geleneksel yöntemler, hareketli bir aracın sabit bir arka plandan ayrıştırılması prensibine dayanır. Bu yaklaşımlar üç ana grupta incelenebilir (Song ve ark., 2019):

1. *Arka plan çıkarma yöntemi:* Belirli bir sahnenin durağan arka planını referans olarak hareketli nesnelere tespit etmeyi amaçlar.
2. *Sürekli video çerçeve farkı yöntemi:* Arka arkaya gelen video kareleri arasındaki farkları analiz ederek hareketli nesnelere belirler.
3. *Optik akış yöntemi:* Görüntüdeki piksellerin zaman içindeki hareket yönü ve hızını hesaplayarak araçların tespit edilmesini sağlar.

Bu geleneksel teknikler, günümüz derin öğrenme tabanlı çözümlerine kıyasla daha az hesaplama gücü gerektirse de karmaşık sahnelerde veya değişken ışık koşullarında doğruluk açısından bazı sınırlamalara sahip olabilir.

**Tablo 1. Mikro emisyon modelleri kullanılarak yapılan çalışmalara örnekler**

Kaynak	Emisyon Modeli	Çalışma Kapsamı	Tanım
Csikós ve Varga, 2012	Enviver	Otoyol trafik emisyonlarının gerçek zamanlı modellenmesi ve kontrol analizi	Makroskobik düzeyde otoyol trafik emisyonlarının gerçek zamanlı modellenmesi ve kontrol analizi gerçekleştirilmiştir. COPERT IV modeli ile uzay-zaman emisyon dağılımı analiz edilmiş, ardından Enviver yazılımındaki mikroskobik emisyon tahmin modeli ile kıyaslanmıştır. Çalışma, Enviver modelinin doğrulama için kullanılabilirliğini göstermiştir.
Noland ve Quddus, 2006	CMEM	Trafik akış iyileştirme stratejilerinin emisyonlar üzerindeki etkileri	Bu çalışma, trafik akışının iyileştirilmesinin emisyonlara etkisini incelemiştir. VISSIM mikro simülasyon modeli ve CMEM modal emisyon modeli kullanılarak yapılan analizler sonucunda trafik akışındaki iyileştirmelerin kısa vadede emisyonları azalttığı ancak uzun vadede artan yolculuk talepleri nedeniyle toplam emisyon seviyelerini artırdığını görmüştür.
Zhang ve Ioannou, 2016	CMEM	Değişken hız sınırı ve şerit değiştirme kontrolü ile trafik düzenlenmesi	Değişken hız sınırı ve şerit değiştirme kontrolü stratejilerinin entegrasyonu ile trafik yoğunluğunun azaltılması hedeflenmiştir. Bu iki stratejinin birleşimi sonucunda ortaya çıkan çevresel etkiler incelenmiştir. Bu kapsamda MOVES ve CMEM emisyon modelleri kullanılarak yapılan değerlendirmelerde bu kontrol stratejilerinin araç yakıt tüketimini optimize ettiği ve CO, HC, NOx emisyonlarında %20'nin üzerinde azalma sağladığını belirtmişlerdir.
Ahn ve Rakha, 2008	VT-Micro, CMEM	Güzergâh seçimlerinin enerji tüketimi ve emisyonlara etkisi	Bu çalışma, farklı güzergâh seçimlerinin enerji tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Farklı emisyon ve yakıt tüketimi hesaplama modellerini karşılaştırmalı olarak sunan çalışmada GPS verileri ve simülasyonlarla gerçekleştirilen analizlerde hızlı ama uzun otoyolların her zaman çevresel olarak avantajlı olmadığını göstermiştir. Arter yolların kullanımının CO <sub>2</sub> emisyonlarını %47-63 oranında azaltabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca, makroskobik emisyon modellerinin anlık hız ve ivmelenme verilerini göz ardı ettiği ve bu nedenle doğru sonuçlar üretmeyebileceği belirtilmiştir.
Zhang ve ark., 2011	CMEM	Trafik sıklığının emisyonlar ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri	Trafik sıklığının araç emisyonları ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Michigan, Ann Arbor'daki Interstate 94 otoyolunda yapılan ölçümlerle serbest akım, yoğun saat ve şantiye bölgesi koşulları (yol yapım çalışmaları olduğu zamanlarda da ölçüm yapılmış) karşılaştırılmıştır. CMEM modeli ile yapılan analizlerde, serbest akım trafiğinden sıklığa geçiş dönemlerinde emisyonların artışı gösterildiği, şantiye bölgelerinde ise yakıt tüketiminin diğer koşullara oranla daha fazla olduğu belirtilmiştir. Emisyon azaltıcı stratejiler geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.
Xu ve ark., 2018	VSP, VT-Micro, CMEM	Kamyon yakıt tüketimi ile sürüş davranışları arasındaki ilişki	Bu çalışma, kamyon yakıt tüketimi ile sürüş davranışları arasındaki ilişkiyi belirlemek için Araçların İnterneti (IoV) verilerini kullanmıştır. İki yeni model (ECI - Energy Consumption Index ve GRNN - Generalized Regression Neural Network) geliştirilerek, bunların VSP, VT-Micro ve CMEM modelleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlara göre, yeni geliştirilen modeller özellikle düşük hız koşullarında daha iyi tahmin performansı sergilemiş ve sürücüler için daha enerji verimli sürüş davranışlarını belirlemeye yardımcı olmuştur.
Chen ve ark., 2022	PEMS	İnşaat makinelerinin gerçek çalışma koşullarındaki emisyonları ve azaltım yöntemleri	İnşaat makinelerinin gerçek çalışma koşullarında taşınabilir emisyon ölçüm sistemleri (PEMS) ile yapılan emisyon ölçümleri analiz edilmiştir. Sekiz farklı makine (eksavatör, Loader, forklift) seçilerek boşta çalışma, hareket etme ve aktif çalışma modlarında emisyon değerleri belirlenmiştir. Dizel oksidasyon katalizörü, katalitik dizel partikül filtresi ve seçici katalitik indirgeme sistemlerinin emisyonları %90 oranında azaltabildiği gözlemlenmiştir.
Su ve ark., 2023	PEMS	PEMS ile yol üzerindeki NOx ölçümlerinin belirsizliği	Gerçek yol test verilerine dayanarak, taşınabilir emisyon ölçüm sistemleri (PEMS) ile yapılan NOx ölçümlerinin belirsizliği değerlendirilmiştir. Çalışma, EN 17507 standardındaki 'tip B' yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve PEMS cihazlarının %95 güven aralığında ±%1,5 olduğu tespit edilmiştir. Daha sıkı düzenlemelerin, PEMS ölçüm güvenilirliğini zorlaştırdığı ve üreticilerin cihaz performansını artırma ihtiyacı olduğu vurgulanmıştır.
Yu ve ark., 2021	PEMS	Sürüş davranışlarının yol seviyesi emisyonlar üzerindeki etkisi	Bu çalışma, taşınabilir emisyon ölçüm sistemi (PEMS) kullanarak farklı sürüş davranışlarının yol seviyesi emisyonlar üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Klasik eko-sürüş stratejileri en yüksek vitesle sürüşü önerse de bu çalışmada en yüksek vitesin NOx emisyonlarını artırabileceği gösterilmiştir. Örneğin, 7. vitesle CO <sub>2</sub> emisyonlarının %22 azalırken, NOx emisyonlarının %14 arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, yüksek viteslerde motorun fakir karışımında çalışması ve üç yollu katalitik konvertörün NOx'leri yeterince azaltamaması gösterilmiştir.
Mađziel ve ark., 2024	PEMS	Euro 6 start-stop sistemli araçların anlık CO <sub>2</sub> emisyon modellemesi	Bu çalışma, Euro 6 emisyon standartlarına sahip start-stop sistemli bir aracın anlık CO <sub>2</sub> emisyonlarını modellemek için yapay zeka tekniklerini kullanmaktadır. Gerçek yol testlerinden elde edilen verilerle oluşturulan modelde, hız, ivme ve yol eğimi gibi değişkenler dikkate alınarak CO <sub>2</sub> emisyon tahmini yapılmıştır. Çalışmada kullanılan Gradient Boosting algoritması, en başarılı tahmin sonuçlarını vermiştir ve start-stop sisteminin emisyon azaltmadaki etkisi doğrulanmıştır.
Patino-Aroca ve ark., 2022	IVE	Karayolu taşıt emisyonlarının mekansal ve zamansal dağılım analizi	Guayaquil'deki karayolu taşıtlarından kaynaklanan emisyonlar analiz edilerek mekansal ve zamansal dağılımı belirlenmiştir. Emisyonların büyük kısmının eski dizel araçlardan ve yoğun trafikten kaynaklandığı tespit edilmiş, hava kalitesini iyileştirmek için araç filolarının yenilenmesi ve temiz yakıt kullanımının teşvik edilmesi önerilmiştir.

**Tablo 2. Mikro ölçekli trafik simülasyonları ve mikro emisyon modelleri kullanılarak yapılan çalışmalara örnekler**

Kaynak	Trafik Simülasyonu	Emisyon Modeli	Çalışmanın Yapıldığı Ülke	Tanım
Overtoom ve ark., 2020	VISSIM	Enviver Pro	Hollanda	Bu çalışma, Lahey şehrinde otonom paylaşımlı araçların trafik sıklığı ve yol kenarında durma davranışları üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. VISSIM simülasyon yazılımı kullanılarak, farklı otonom oranları (%40, %60, %80, %100) test edilmiş ve sonuçlarda, otonom paylaşımlı araçların yol kenarında yavaşlama nedeniyle trafik tıkanıklığını artırdığı, ancak belirli altyapı değişiklikleri ile bu etkileri azaltılabileceği gösterilmiştir.
Rahimi, 2023	VISSIM	Enviver	İtalya	Egzoz emisyonları ve fren aşınma partiküllerinin tahmini üzerine yapılan bu çalışmada, VISSIM mikrosimülasyon modeli ve Enviver mikro emisyon modeli kullanılmıştır. Ayrıca, Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network-ANN) ile fren aşınma partiküllerini tahmini yapılmış, hız sınırlarının düzenlenmesi ve ağır taşıtların belirli saatlerde trafığe çıkmasının emisyonları önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir.
Fan ve ark., 2019	VISSIM	VSP	Çin	Bu çalışma, tek yönlü trafik yönetiminin araç emisyonları üzerindeki etkilerini incelemek için mikroskobik trafik simülasyonu aracı VISSIM ve anlık emisyon modeli VSP'yi entegre ederek, Şanghay'da iki farklı senaryo üzerinde emisyon değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar, tek yönlü trafik yönetiminin CO, HC ve NOx emisyonlarını sırasıyla %21,34, %22,29 ve %23,77 oranında azalttığını göstermiştir.
Tenekeci, 2019	VISSIM	Enviver	İngiltere	İngiltere'nin Bath şehrinde yapılan çalışmada, VISSIM mikroskobik trafik simülasyonu ve EnViVer emisyon modeli kullanılarak kavşak tasarımının çevresel etkileri incelenmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemi (QGIS) ile emisyon haritaları oluşturulmuş, NOx emisyonlarında %14-34, CO <sub>2</sub> emisyonlarında %13-32, PM10 emisyonlarında %14-26 oranında azalma gözlemlenmiştir. Yeniden tasarlanan kavşağın trafik yoğunluğunu %42-69 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir.
Beza ve ark., 2022	VISSIM	Enviver	-	Bu çalışma, farklı türde otonom araçların (Autonomous Vehicles [AV]) otoyollarda trafik akışı ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. VISSIM mikroskobik trafik simülasyonu ve EnViVer emisyon tahmin modeli kullanılarak yapılan analizlerde, Tam otonom araçlar (Fully Autonomous Vehicles [AAV]) ve Kooperatif otonom araçlar (Cooperative Autonomous Vehicles [CAV]) farklı segmentlerde değerlendirilmiştir.
Mądziel ve ark., 2020	VISSIM	PEMS	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temel otoyol ve birleşme bölgelerinde: %100 AAV senaryosu CO<sub>2</sub>'yi %7, NOx'i %13 ve PM10'u %7 oranında azaltmıştır.</li> <li>• Ayrılma ve ölüme segmentlerinde: %100 AAV senaryosu CO<sub>2</sub>'yi %19, NOx'i %29 ve PM10'u %10 artırmış, CAV senaryosu ise CO<sub>2</sub>'yi %13, NOx'i %22 ve PM10'u %5 yükseltmiştir.</li> <li>• AV'lerin heterojen dağılımı emisyonları artırma eğilimindedir. CAV'ler trafik kapasitesini artırırken, AAV'lerin trafik akışını daha dengeli hale getirdiği gözlemlenmiştir.</li> </ul>
Mądziel ve ark., 2023	VISSIM	Enviver	Polonya	Bu çalışma, VISSIM trafik simülasyonu yardımıyla ve PEMS aracılığıyla kavşak düzenlemelerinde araç hareketlerinin emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, alternatif kavşak düzenlemesinin CO <sub>2</sub> emisyonlarını %20, CO emisyonlarını %80 oranında azalttığı ve kavşak girişindeki trafik sıklığının emisyonları büyük ölçüde artırdığı belirtilmiştir.
Chauthan ve ark., 2019	VISSIM	Enviver	Hindistan	Bu çalışma, dört kolu kavşaklarda farklı trafik kontrol yöntemlerinin (dur işaretleri, yol ver işaretleri ve trafik ışıkları) geçikme süreleri ve NOx/PM10 emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. VISSIM simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilen modelleme, 1200 araç/saat trafik hacmi altındaki kavşaklar için dur ve yol ver işaretlerinin uygulanabilir olduğunu ancak bu hacmin üzerindeki trafiğin ışık kontrollü kavşaklar ile daha iyi yönetilebileceğini göstermiştir.
Adamidis ve ark., 2020	SUMO	PHEMlight	Yunanistan	Kavşaklardaki hız bazı emisyon analizlerinde, VISSIM simülasyon modeli ve EnViVer emisyon tahmin modeli kullanılarak farklı araç türlerinin emisyon seviyeleri değerlendirilmiştir. Çalışmada motosikletlerin en yüksek emisyon kaynağı olduğu belirlenmiş ve araç çeşitliliği ile sinyalizasyon optimizasyonu sayesinde CO <sub>2</sub> , PM10 emisyonlarının %25'e kadar NOx emisyonlarını %6'lara kadar azaltılabileceği tespit edilmiştir.
Quaassdorff ve ark., 2016	VISSIM	VERSIT+micro	İspanya	Bu çalışma, sürüş davranışlarının trafik akışı ve emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyerek, agresif sürüş davranışlarını kontrol altına almanın trafik akışını iyileştirmenin emisyonlara etkisini araştırmıştır. SUMO simülasyon programı ve gerçek dünya verilerine dayalı k-means kümeleme algoritması kullanılarak, farklı sürüş profilleri (agresif, normal ve çevreci) analiz edilmiş ve çevreci sürüşün emisyonlarda önemli bir azalma sağladığı, ancak trafik akışını yavaşlattığı bulunmuştur.
Bari ve ark., 2023	VISSIM	IVE+VSP	Hindistan	Bu çalışma, Madrid'deki yoğun trafığe sahip bir dönel kavşakta mikroskobik trafik simülasyonu ve buna bağlı emisyon tahmini yapmayı amaçlamıştır. VISSIM ile trafik simülasyonları gerçekleştirilmiş, VERSIT+micro ve ENVIVER yazılımlarıyla NO <sub>x</sub> ve PM <sub>10</sub> emisyonları hesaplanmış ve sonuçlar yoğun trafik koşullarında emisyonların önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca COPERT 4 ile karşılaştırılmış ve mikroskobik modelin, özellikle trafik sıklığı gibi durumlarda emisyonları daha ayrıntılı şekilde tahmin ettiği tespit edilmiştir.

**Tablo 2. Mikro ölçekli trafik simülasyonları ve mikro emisyon modelleri kullanılarak yapılan çalışmalara örnekler (devam edilen)**

Kaynak	Trafik Simülasyonu	Emisyon Modeli	Çalışmanın Yapıldığı Ülke	Tanım
Wei ve ark., 2019	PARAMICS	IVE	Çin	Bu çalışma, mikroskobik trafik simülasyonu ve emisyon modellerini entegre ederek daha doğru ve otomatik araç emisyon hesaplamaları yapmayı amaçlamaktadır. Genetik Algoritma ile trafik simülasyonu kalibre edilerek, gerçek trafik verilerine daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. IVE modeli ile entegre edilen sistem, farklı araç türlerinin emisyonlarını gerçek zamanlı hesaplayarak çevresel analizleri hızlandırmakta ve trafik yönetim stratejilerinin emisyon üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak tanımaktadır.
Chawla ve ark., 2021	VISSIM	Enviver	Hindistan	Hindistan'ın Delhi şehrinde NH-19 otoyolunun 800 metrelik kesiminde hız değişimlerinin emisyonlara etkisi incelenmiştir. VISSIM ve EnViVer kullanılarak yapılan analizde, hız limitinin düşürülmesiyle CO <sub>2</sub> %13,75, NOx %8,25 ve PM10 %6,25 oranında azalma sağlandığı belirtilmiştir. Ancak, hız limitinin aşırı düşürülmesi trafik sıkışıklığını artırarak emisyon seviyelerini tekrar yükseltebilir.
Gao ve ark., 2020	SUMO	GT-Suite	-	Bu çalışma, gerçek trafik koşullarında dizele bir aracı yakıt tüketimi ve emisyonlarını analiz etmek amacıyla SUMO ve GT-Suite simülasyonları entegre ederek kapsamlı bir model oluşturmuştur. Trafik sıkışıklığı, kazalar ve yol eğiminin yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiş, özellikle yüksek yoğunluklu trafikte ve eğimli yollarda tüketimin ve emisyonların önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, trafik yönetimi ve sürdürülebilir ulaşım politikaları açısından önemli bilgiler sunmaktadır.
Chauhan ve ark., 2024	VISSIM	Enviver	Hindistan	Vadodra (Hindistan) Mahal kavşağında yapılan çalışma, sinyalizasyon sistemlerinin taşıt emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. VISSIM simülasyonu modeli ile trafik akışı modellenmiş, EnViVer kullanılarak CO <sub>2</sub> , NOx ve PM10 emisyonları hesaplanmıştır. 90 saniye sinyal süresi ile emisyon seviyeleri belirlenmiş, 60 saniye sinyal döngüsü kullanıldığında ise CO <sub>2</sub> %27, NOx %32 ve PM10 %18 oranında azalma sağlandığı görülmüştür. Hava kirliliğini azaltmak için dur-kalk hareketlerini en aza indiren sinyalizasyon sisteminin gerekliliği vurgulanmıştır.
Gräbe ve Joubert, 2022	MATSim	PEMS	Güney Afrika	Bu çalışma, MATSim trafik simülasyonu ile gerçek sürüş emisyonları (PEMS) arasındaki farkları analiz ederek model doğruluğunu değerlendirmiştir. Çalışmada, HBEFA emisyon faktörleri kullanılarak Gauteng, Güney Afrika'da hafif ve ağır araçlar için trafik kaynaklı emisyonları simüle edilmiştir. Sonuçlar, özellikle ağır taşıtların NOx emisyonlarının model tarafından ciddi şekilde düşük tahmin edildiğini ve yol eğimi, trafik sıkışıklığı gibi faktörlerin modelde yeterince temsil edilmediğini göstermektedir. Çalışma, şehir ölçeğinde emisyon tahmin modellerinin iyileştirilmesi ve çevresel politika kararlarının daha doğru verilmesi için önemli öneriler sunmaktadır.
Okebe ve ark., 2024	AIMSUN	Entegre Emisyon Modeli	Kenya	Bu çalışma, AIMSUN mikro trafik simülasyonu modeli kullanılarak kentsel arter yollarında emisyon azaltma politikalarının etkilerini incelemiştir. Panis et al.'s Pollutant Emission Model gibi mikro ölçekli emisyon modelleri kullanılarak, anlık hız ve ivmelenmeye dayalı CO, NOx, VOC ve CO <sub>2</sub> emisyonları hesaplanmıştır. Sonuçlar, elektrikli araçların kullanımının artmasıyla ilgili yamalı motorlu araçlara kıyasla önemli ölçüde daha az emisyon ürettiğini ve Euro 4/IV standartlarının özellikle ağır vasıtalar ve motosikletlerde hava kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak buna karşılık batarya tüketiminde ciddi artışlar olduğu belirtilmiştir.
Acuto ve ark., 2022	AIMSUN	VSP	İtalya	Bu çalışma, kentsel dönel kavşaklarda emisyonları değerlendirmek için VSP metodolojisi ile mikroskobik trafik simülasyonu yazılımı AIMSUN'u entegre ederek ikinci bazında emisyon tahminleri yapılmıştır. Emisyon hesaplamaları için VSP modeli kullanılmış ve CO <sub>2</sub> , NOx, CO ve HC emisyonları anlık hız ve ivmelenme verilerine dayanarak hesaplanmıştır. Çalışma, Palermo, İtalya'daki altı farklı dönel kavşakta hız profillerinin VSP bazlı emisyon tahminlerine etkisini analiz ederek, altyapı tasarım değişikliklerinin çevresel performansa olan katkısını değerlendirmiştir.
Int Panis ve ark., 2006	DRACULA	Entegre Emisyon Modeli	Belçika	Bu çalışma, Akıllı Hız Adaptasyonu (Intelligent Speed Adaptation [ISA]) sistemlerinin trafik akışı, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemek için DRACULA mikroskobik trafik simülasyonu ile entegre edilen yeni bir emisyon modeli geliştirilmiştir. Emisyon hesaplamaları, hız, ivmelenme, yavaşlama ve seyir gibi sürüş dinamiklerine dayalı olarak anlık bazda gerçekleştirilmiş ve ISA'nın hız dalgalanmalarını azaltarak yakıt tüketimini düşürdüğü, ancak emisyonlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Çalışma, ISA'nın genel trafik verimliliğini artırabileceğini, ancak emisyon azaltımında etkili olması için ek stratejilerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.
Liu ve Tate, 2004	DRACULA	Entegre Emisyon Modeli	İngiltere	Çalışma, Akıllı Hız Adaptasyonunun (ISA) şehir içi yol ağlarında egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisini ele almıştır. Leeds şehrine yaklaşık olarak 8 km uzaklıkta bulunan bir yol ağı incelenmiş, %100 ISA uygulanması durumunda yakıt tüketiminde %8-9 oranlarında düşüşler gözlemlenmiştir. NOx ile HC emisyonlarında anlamlı bir değişim görülmemiştir.
Lee ve ark., 2008	TransModeler	CMEM	ABD	Bu çalışmada TransModeler trafik simülasyonu modeli kullanılmış ve emisyon hesaplamaları için CMEM tercih edilmiştir. Çalışma, liman bölgesinde kamyon trafiğinin emisyon etkilerini analiz etmek için mikroskobik bir yaklaşım benimsenmiş ve farklı senaryolar altında hava kalitesi ve emisyon değişimlerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, kamyon filosunun modernize edilmesi ve tren kullanımına geçiş gibi stratejilerin önemli emisyon azaltımları sağlayabileceğini göstermektedir.
Park ve ark., 2009	CORSIM	VT-Micro	ABD	Bu çalışmada CORSIM mikroskobik trafik simülasyonu modeli kullanılmış ve emisyon hesaplamaları için VT-Micro modeli entegre edilmiştir. Çalışma, sürdürülebilir trafik sinyali optimizasyonunu sağlamak için stokastik bir optimizasyon yöntemi geliştirilerek yakıt tüketimini ve emisyonları minimize etmeyi hedeflemiştir. Sonuçlar, trafik sinyali zamanlamasının optimize edilmesinin emisyonları ve yakıt tüketimini önemli ölçüde azalttığı, ancak trafik akışı ve çevresel sürdürülebilirlik arasında bir denge gerektiğini göstermektedir.
Kwak ve ark., 2012	TRANSIMS	VT-Mikro	ABD	Bu çalışmada TRANSIMS mikroskobik trafik simülasyonu modeli kullanılmış ve emisyon hesaplamaları için VT-Micro entegre edilmiştir. Trafik sinyali optimizasyonunun yakıt tüketimi ve araç emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuçlar, optimize edilmiş trafik sinyali zamanlamalarının yakıt tüketimini %20, toplam araç emisyonlarını %8-20 ve araç seyahat süresini %27 oranında azalttığı göstermektedir.



Şekil 5. Genel nesne tespiti

Tablo 3. Görüntü işleme ve yapay zeka yöntemlerinin trafik analizinde kullanımı ile bu yöntemlerin emisyon modelleri ve trafik simülasyonlarıyla entegre edildiği çalışmalar

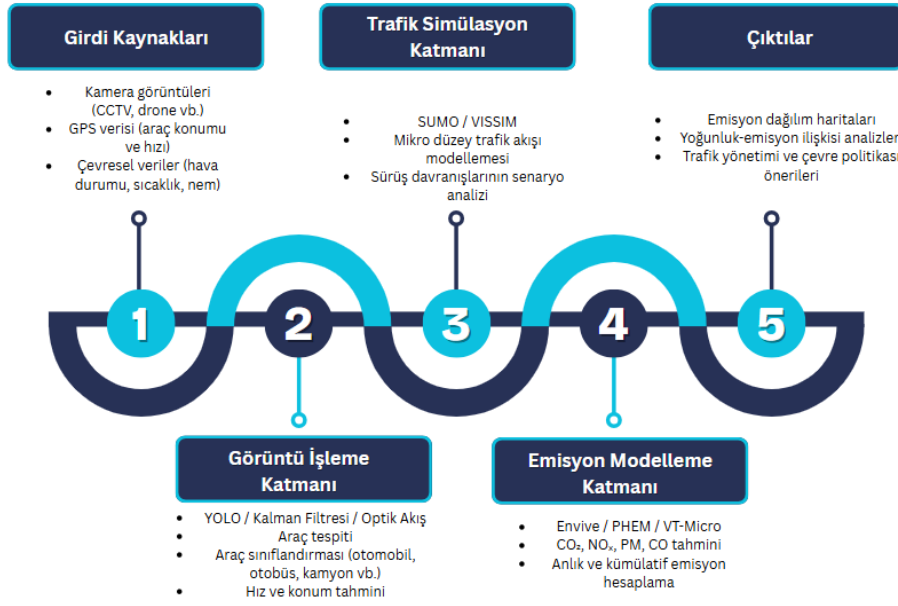
Kaynak	Yöntem	Veri Seti	Kullanılan Teknikler	Tanım
Song ve ark., 2019	YOLOv3	Otoyol Kamera Görüntüleri	Derin Öğrenme, ORB Algoritması	YOLOv3 nesne tespit ağı ve Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB) algoritması kullanılarak otoyollarda araç tespiti ve sayımı yapılmıştır. Araçların hareket yönleri analiz edilerek trafik akışı belirlenmiştir.
Zhao ve ark., 2019	Derin Öğrenme ile Nesne Tespiti	Çeşitli Veri Setleri	CNN, R-CNN, YOLO	Bu çalışma, geleneksel nesne tespiti yöntemleri ile derin öğrenme tabanlı yaklaşımları karşılaştırmaktadır. Convolutional Neural Networks (CNN) ve türevleri olan Bölge temelli evrimsel sınırlı ağı modeli (Regions with Convolutional Neural Network Features [R-CNN]), Fast R-CNN, Faster R-CNN ve YOLO gibi derin öğrenme modellerinin mimarileri, eğitim stratejileri ve optimizasyon teknikleri analiz edilmiştir.
Metil ve Nigavelkar, 2019	Görüntü İşleme	Trafik Kameraları	Referans Görüntü Karşılaştırma	Bu çalışma, trafik yoğunluğunu belirlemek için referans görüntü karşılaştırma yöntemini kullanmaktadır. Gerçek zamanlı kamera görüntüleri analiz edilerek trafik sıklığı tespit edilmiş ve çeşitli görüntü işleme algoritmaları karşılaştırılmıştır. (Arka plan çıkarma ile hareket algılama, Radar sensörlü araçlar ile yerel trafik yoğunluğunu ölçme, Canny kenar algılama ile araçların çevresel hatlarını tespit etme, Raspberry Pi, Arduino gibi gömülü sistemlerle gerçek zamanlı uygulama)
Xia ve ark., 2016	GMM + EM Algoritmaları	Video Görüntüleri	Arka Plan Çıkarma, Bölge Oharımı	Gaussian Mixture Model (GMM) ve Expectation-Maximization (EM) algoritmaları kullanılarak araç segmentasyonu iyileştirilmiş, görüntü azaltma ve engelleme tespit sistemleri geliştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı ise trafik akışını daha doğru bir şekilde tahmin edilemek için araç sayım yöntemlerinin kalitesini artırmaktır.
Wu ve ark., 2021	YOLOv3-SPP	Trafik Kameraları	Derin Öğrenme, Nesne Takibi	YOLOv3-SPP modeli kullanılarak gerçek zamanlı araç sınıflandırma ve sayımı gerçekleştirilmiştir. Trafik kameralarından alınan görüntüler işlenerek araçlar küçük, büyük ve motosiklet olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma, farklı yol tiplerinde test edilerek trafik yönetimi için veri sağlamaktadır.

**Tablo 3. Görüntü işleme ve yapay zeka yöntemlerinin trafik analizinde kullanım ile bu yöntemlerin emisyon modelleri ve trafik simülasyonlarıyla entegre edildiği çalışmalar (devam edilen)**

Kaynak	Yöntem	Veri Seti	Kullanılan Teknikler	Tanım
Fachrie, 2020	YOLOv3	Trafik Kameraları	Çerçeve Bazlı Sayım	Geleneksel arka plan çıkarma veya nesne takibi yöntemleri yerine çerçeve bazlı doğrudan sayım yöntemi kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü video verileri üzerinde test edilerek doğruluk artırılmış ve trafik yönetiminde uygulanabilirliği incelenmiştir. Takip gerektirmeyen bir araç sistemi geliştirmeyi hedeflemiştir.
Saadeldin ve ark., 2024	YOLOv8n+DeepSORT	Trafik Kameraları	Araç Takibi ve Sayımı	Gerçek zamanlı düşük maliyetli trafik analizi için YOLOv8n ve DeepSORT algoritmaları kullanılmıştır. DeepSORT algoritması, araç kimliklerinin korunmasını sağlayarak araç takibini daha tutarlı hale getirmiştir. Nvidia Jetson Nano gibi gömülü cihazlarda düşük gecikmeli ve verimli analiz sağlanmıştır.
Unzueta ve ark., 2012	AMC	Video Görüntüleri	Gölgeleri Engelleme	Bu çalışma, trafik izleme sistemlerinde gölge ve far yansımaları gibi çevresel etkenleri en aza indirmek için uyarlanabilir çok ipuculu arka plan çıkarma (Adaptive Multi-Cue background subtraction [AMC]) yöntemi geliştirmiştir. Çeşitli hava koşullarında test edilerek daha güvenilir araç tespiti sağlanmıştır. Çalışmada yalnızca bir standart video kamera kullanılmıştır.
Adi ve ark., 2018	Arka Plan Çıkarma + Morfolojik İşlemler	Gri Tonlamalı Videolar	Otomatik Araç Sayımı	Sınır çizgilerinden geçen araçlar tespit edilerek düşük maliyetli otomatik araç sayımı gerçekleştirilmiştir. Ancak gece doğruluğunun düşük olduğu belirtilmiştir. Düşük maliyetli araç sayımı ihtiyacına yönelik olsa da modern yöntemlerle kıyaslandığında, örneğin YOLO gibi, çevresel değişimlere karşı daha savunmasız bir sistem olduğu söylenebilir.
Rajput ve ark., 2023	Arka Plan Çıkarma + Grayscale + Kontur tespiti + morfolojik işlemler	Video Görüntüleri	Makine Öğrenmesi, Araç Tespiti	Bu çalışmada farklı teknikler kullanılarak araç tespiti ve sayımı gerçekleştirilmiş ve bunlar kıyaslanmıştır. Geleneksel yöntemlerden arka plan çıkarma ve morfolojik işlemlere dayalı tekniklerle araçların geçişleri takip edilmiştir. %96 doğrulukta da sayımların gerçekleştirildiği vurgulanmıştır.
Abdelwahab, 2019	GMM	GRAM Veri Seti	Nesne Takibi Gerektirmeyen Yöntem	GMM kullanılarak araçların tespiti, sağlanmış ve segmentasyon hatalarını gidermek için morfolojik işlemler uygulanmıştır. Çalışma, nesne takibi gerektirmeyen bir sistem geliştirerek hızlı ve verimli araç sayımı yapmayı amaçlamaktadır.
Maduro ve ark., 2008	Optik Akış + Kalman Filtresi	Trafik Kameraları	Araç Takibi, Hız Tahmini	Lucas-Kanade optik akış algoritması ve Kalman filtresi kullanılarak kamera bazı araç hız tahmini yapılmıştır. Çalışmanın amacı araçların hızlarını doğru bir şekilde tahmin etmeyi sağlamaktır. GPS doğrulamalı testlerde düşük hata oranı elde edilmiştir.
Zhang ve ark., 2017	FCN+rLSTM	Şehir Kameraları	Derin Uzamsal-Zamansal Model	Şehir kameralarından alınmış olan düşük kaliteli videolardan araç sayımı yapan sistem önermek çalışmanın amaçlarındandır. Yoğun trafikte araç tespiti ve sayımı için Tam evrimsel ağ – Fully Convolutional Network (FCN) ve yinelenen uzun-kısa süreli bellek ağı – recurrent Long Short-Term Memory (rLSTM) birleşimine dayalı model (FCN-rLSTM) modeli kullanılmıştır. FCN ile görüntülerin mekansal özellikleri çıkarılmış, yinelenen uzun-kısa süreli bellek ağı (rLSTM) kullanılarak zamansal bağıntılar öğrenilmiştir.
Chonchanmavar ve Arunkumar, 2022	YOLOv4	Trafik Kameraları	Derin Sınırlı Ağları (DNN)	Gerçek zamanlı video bazlı araç tespiti için optimize edilen YOLOv4 modeli, farklı trafik koşullarında test edilmiştir. Önerilen sistem, trafik akışı analizi için yüksek performans sunmaktadır. Görüntülerden araçlar YOLO ile tespit edilerek ORB algoritmasıyla da takip sağlanarak sayım yapıyor.
Yang ve Qu, 2017	Low-Rank Decomposition (arka plan çıkarma yöntemlerinden)	CDnet2014, YouTube Veri Setleri	Arka Plan Çıkarma, Nesne Takibi	Karmaşık trafik sahnelerinde (hareketli kamera, gölgeler, yoğunluk vs.) araç tespiti için hızlı ve güvenilir bir sistem geliştirmeyi amaçlamıştır. Kalman filtresi ile çoklu nesne takibi sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda belirlenen koşullarda bile yüksek doğruluğa sahip tespitler yapıldığı belirtilmiştir.
Namekawa ve ark., 2019	YOLO + OpenCV	Trafik Kameraları	Nesne Tespiti Karşılaştırması	Çalışmada trafik simülasyonlarında kullanılabilirlik verileri üretmek için kavşaktaki araç hareketlerini gözlemlemiştir. Bu kapsamda OpenCV Haar Cascade ve YOLO nesne tespit modelleri karşılaştırılmış, YOLO'nun çok daha yüksek doğruluk sağladığı belirtilmiştir.
Chhadikar ve ark., 2019	Haar Cascade Classifier	Trafik Kameraları	Viola-Jones Algoritması	Düşük maliyetli trafik yönetimi için Haar Cascade tabanlı araç tespiti ve bölge tabanlı nesne takibi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verileri trafik yoğunluğu analizlerinde kullanmayı hedeflemiştir. Sistem %78 doğruluk oranında çalışmış, düşük maliyetli bir çözüm sunabileceği vurgulanmıştır.
Dai ve ark., 2019	YOLOv3 + KCF Algoritması	VCD Veri Seti	Çoklu Nesne Takibi, Araç Sayımı	Karmaşık olan kentsel trafik sahneleri için yalnızca video görüntülerinden yola çıkılarak YOLOv3 ile nesne tespiti yapılmış, KCF algoritması ile nesnelere takip edilerek araç sayımı gerçekleştirilmiştir. Trafik akışı analizi için yönlü verileri işlenmiştir. T kavşak ve düz yol için belirlenen senaryolarda %90'ın üzerinde bir doğruluk gösterdiği vurgulanmıştır.

**Tablo 3. Görüntü işleme ve yapay zeka yöntemlerinin trafik analizinde emisyona modelleri ve trafik simülasyonlarıyla entegre edildiği çalışmalar (devam edilen)**

Kaynak	Yöntem	Veri Seti	Kullanılan Teknikler	Tanım
Charef ve ark., 2024	YOLOv8 + Simülasyon	Mobil Telefon Videoları	Motosiklet Hareket Analizi, VISSIM Simülasyonu	Maraş'ta motosiklet yoğunluğunun trafik sıklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. YOLOv8 ile motosiklet hareketleri analiz edilmiş ve özel motosiklet şeritlerinin trafiği rahatlatığı belirlenmiştir. Motosiklet yoğunluğunun trafik sıklığı üzerindeki etkisi incelenmiş, trafik akışı simülasyonları ile entegre edilmiştir.
Yavuz ve ark., 2024	YOLOv7	Trafik Kameraları	COPERT emisyon hesabı	Bu çalışma, YOLOv7 ve Kalman tabanlı Simple Online and Realtime Tracking (SORT) algoritması kullanarak gerçek zamanlı araç tespiti, sayımı ve takibini gerçekleştiren yapay zeka tabanlı bir metodoloji geliştirmiştir. ISTraffic adında yeni bir veri kümesi oluşturularak farklı hava koşulları ve trafik yoğunlukları altında modelin performansı artırılmıştır. YOLOv7, en yüksek doğruluğu sağlarken, gece ve yağmurlu hava gibi zorlu koşullarda modelin başarısının düşüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, modelin COPERT v5.7 ile hesaplanan emisyon değerleri karşılaştırılmış ve %7,7 ile %10,1 arasında bir hata payı ile doğruya yakın sonuçlar elde edilmiştir.
Elshebli ve Erdos, 2022	YOLOv3 + SORT	VISSIM Simülasyonu	Trafik Simülasyonu ile Entegrasyon	Çalışma trafik emisyonlarının azaltılması için trafik simülasyonu ile makine öğrenme tekniklerini birleştirmiştir. Emisyon analizleri gerçekleştirilerek geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlanmıştır. Çalışmada CO ve NO emisyonlarının azaltan en uygun çözümün seçilmesini sağlamışlardır.
Shokrolah Shirazi ve ark., 2022	YOLOv5 + CSRT	Trafik Kameraları SUMO Simülasyonu	LCSS (hareket analizi), t-testleri (istatistiksel analiz)	Bu çalışma, trafik simülasyonlarını gerçekçi hale getirmek için video tabanlı dönüş hareketi sayımı (TMC - Turning Movement Count) verilerini SUMO simülasyonuna entegre eden iki farklı yöntemi karşılaştırmaktadır. YOLOv5 ve CSRT algoritmaları kullanılarak kavşaklardaki araç hareketleri tespit edilmiş ve SUMO'da trafik akışı modellenmiştir. Çalışmanın hedefi, kavşak tasarımı ve planlaması için gerçek trafik davranışlarını daha doğru modellemektir. Sonuçlar, gerçek trafik verilerinin simülasyonlara entegrasyonunun trafik sinyali tasarımını optimize edebileceğini ortaya koymaktadır.
Li ve Yoon, 2023	YOLOv4 + Regresyon	Trafik Kameraları	3D Konumlandırma	Tek kamera ile araçların 3D dünya koordinatlarında konumlandırılması sağlanmış, kamera kalibrasyonu olmadan doğruluk artırılmıştır. Sınır ağları ve regresyon tabanlı hata düzeltme modelleri kullanılmıştır. 2D olan görüntülerden 3D dünya koordinatlarına dönüşüm sağlayan sistemde %70'in üzerinde bir konum doğruluğu iyileşmesi sağlandığı vurgulanmıştır. Bu sayede trafik sinyali yönetimde daha etkin bir şekilde kullanılabilceğine değinilmiştir.
Suparwitove ark., 2025	YOLOv9	Trafik Kameraları	Emisyon Tahmini	Günlük saatlere göre CO emisyon seviyeleri tahmin edilerek trafik yoğunluğu ile hava kalitesi ilişkisi incelenmiştir. YOLOv9 büyük nesnelere yüksek doğrulukla tespit etse de küçük nesnelere için geliştirilmeler önerilmektedir.
Yang ve ark., 2024	YOLO-SD + UAV	Drone Görüntüleri	Trafik Emisyon Modelleme	İnsansız hava aracı (Unmanned Aerial Vehicle [UAV]) görüntüleri ile YOLO-SD kullanılarak araç tespiti yapılmış ve bu veriler mikro ölçekli emisyon modeline entegre edilmiştir. Özellikle CO <sub>2</sub> , NOx ve PM10 emisyonlarının tahmininde kullanılmıştır. VERSIT+ ile tahmin edilen emisyonların çıkan sonuçlarını VISSIM simülasyonu ile karşılaştırarak doğruluğunu değerlendirmişlerdir.
Prohanov ve ark., 2021	YOLOv4	Trafik Kameraları	Emisyon Haritalama	Şehir içi ulaşım sistemlerinde trafik yoğunluğu ile hava kalitesi ilişkisi değerlendirilerek dinamik emisyon haritaları oluşturulmuştur. Web üzerinden yayımlanan grafiksel trafik sıklığı verileri de emisyon tahmininde kullanılmıştır. Şehirlerdeki emilili olan yol kesimlerinin belirlenmesi için bir temel sunduğuna değinilmiştir.
Sakhare ve ark., 2020	IoT + Görüntü İşleme	Gerçek Zamanlı Kamera Verisi	Trafik Yoğunluğu Analizi	Çalışmada IoT (Nesnelerin İnterneti) ve görüntü işleme tekniklerine dayalı dinamik bir trafik yönetim sistemi geliştirilmiştir. Trafik ışıkları gerçek zamanlı görüntü işleme teknikleri ile analiz edilerek dinamik sinyali ayarlaması sağlanmış ve CO <sub>2</sub> emisyonları düşürülmüştür.
de la Rocha ve Palacios, 2010	Görüntü İşleme	IP Kamera Görüntüleri	Trafik Işık Optimizasyonu	Trafik kameralardan elde edilen veriler analiz edilerek trafik ışıklarının yoğunluk bazlı yönetimi sağlanmış, yakıt tüketimi ve emisyon seviyeleri optimize edilmiştir. Çalışmada sabit zamanlı trafik ışığı kontrolü yerine araç yoğunluğuna dayalı bir trafik yönetiminin daha verimli olacağı ve emisyonları azaltacağına değinilmiştir.
Fang ve ark., 2025	Derin Öğrenme	Şanghay Hava Kalitesi ve Trafik Verileri	CNN-LSTM-ATT, GCN-LSTM, Trafik Yoğunluğu İndeksi (TCI)	Trafik yoğunluğu endeksi (Traffic Congestion Index [TCI]) ile PM2.5 emisyonları arasındaki ilişkiyi değerlendirmişlerdir. Farklı ölçeklerde trafik verilerinin hava kirliliği tahminine etkisi analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar, CNN-LSTM-ATT modelinin PM2.5 tahmininde yüksek doğruluk sağladığını ve trafik verilerinin hava kalitesi modellemesinde önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.
Lin ve ark., 2025	Bayes Ağları ve Derin Öğrenme	Taipei Hava Kalitesi ve Trafik Verileri	Bayesian Networks, LSTM, GAM (Genelleştirilmiş Ekleme Modeli)	Bu çalışma, trafik emisyonları ve meteorolojik faktörlerin hava kirliliği üzerindeki etkisini inceleyen çalışmaları değerlendirmiştir. Bayes Ağları (BN) ve LSTM kullanılarak, trafik yoğunluğu, araç hızı, yağış ve hava kirliliği arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Farklı yağış türlerinin PM2.5 seviyelerini nasıl etkilediği araştırılmış ve uzun süreli yoğun yağışın emililiyi artırarak büyük ölçüde etkisine sahip olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, hava kirliliği tahmininde trafik verilerinin önemli bir rol oynadığını ve LSTM modelinin yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.



Şekil 6. Mikroskobik trafik simülasyonu, emisyon modellemesi ve görüntü işleme

Şekil 5’te gelişmiş derin öğrenme yaklaşımları ile nesne tespiti için kullanılan yöntemler iki temel çerçevede ele alınmıştır (Zhao ve ark., 2019):

1. **Bölge önerisine dayalı yöntemler (Region Proposal-based)**
2. **Regresyon/Sınıflandırma tabanlı yöntemler (Regression/Classification-based)**

Bu iki yaklaşım da derin öğrenme tekniklerinden yararlanarak nesne tespit performansını artırmak için geliştirilmiştir.

### **Bölge Önerisine Dayalı Yöntemler (Region Proposal-based)**

- R-CNN → Derin öğrenme kullanarak nesne tespitine ilk büyük katkıyı yapmıştır.
- SPP-net → Uzamsal Piramit Havuzu (SPP) ile farklı boyutlardaki nesnelere daha iyi işlemiştir.
- Fast R-CNN → R-CNN’in hızını artıran bir modeldir.
- Faster R-CNN → Bölge Öneri Ağı (RPN) eklenerek nesne tespit sürecini büyük ölçüde hızlandırmıştır.
- R-FCN → Tam evrişimli ağları kullanarak hesaplama verimliliğini artırmıştır.
- FPN & Mask R-CNN → Özellik piramidi ile çok ölçekli nesne tespiti yapmış ve nesne segmentasyonu eklemiştir.

### **Regresyon/Sınıflandırma Tabanlı Yöntemler (Regression/Classification-based)**

- YOLO → “You Only Look Once” yaklaşımı ile gerçek zamanlı nesne tespitini başlatmıştır.
- SSD → “Single Shot MultiBox Detector” Çoklu ölçeklerde nesne tespiti yaparak doğruluk seviyesini artırmıştır.
- DSSD, DSOD → “Deconvolutional Single Shot Detector, Deeply Supervised Object Detector” YOLO ve SSD modellerinin geliştirilmiş versiyonlarıdır. Daha fazla doğruluk ve hız kazandırılmıştır.

Tablo 3, görüntü işleme ve yapay zekâ temelli yöntemlerin trafik analizinde nasıl uygulandığını ve bu yöntemlerin emisyon modelleme ya da trafik simülasyon yazılımlarıyla nasıl bütünleştirildiğini ele alan literatür örneklerini sunmaktadır. Çalışmalar, temelde iki ana eksen etrafında gruplanmaktadır: İlki, görüntü işleme algoritmalarıyla trafik yoğunluğu, araç sayısı ve araç tipi gibi verilerin toplanarak doğrudan emisyon modellerine girdi olarak sağlandığı çalışmalardır. Bu tür çalışmalarda, örneğin YOLO, CNN, GMM veya Haar Cascade gibi algoritmalarla elde edilen araç sınıflandırma ya da hız verisi, emisyon tahmin sistemlerine entegre edilmiştir. İkinci tür çalışmalarda ise, görüntü işleme çıktıları trafik simülasyonu modellerine veri sağlayarak daha gerçekçi ve yerel koşullara özgü mikro trafik senaryoları oluşturulmuştur. Böylece hem ağ yapısına hem de zaman/mekân boyutuna duyarlı emisyon analizi mümkün hâle gelmiştir. Bazı

çalışmalarda bu iki eksen birleştirilerek, görüntü verilerinin önce trafik simülasyonuna, ardından emisyon modellerine entegre edildiği üç aşamalı bir yapı önerilmiştir. Ancak genel eğilim, çalışmaların çoğunun yalnızca iki sistemin entegrasyonu (örneğin görüntü işleme + simülasyon ya da görüntü işleme + emisyon) ile sınırlı kaldığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, görüntü kaynaklı verilerin (örneğin kamera, drone, uydu vb.) senkronizasyonu, konum doğruluğu ve veri aktarım standardizasyonu gibi teknik engellerin, entegrasyonu kısıtlayan faktörler arasında yer aldığı görülmektedir. Görüntü verilerinin zamansal ve mekânsal çözünürlük açısından optimize edilerek modellerle uyumlu hâle getirilmesi, model doğruluğunu artıracaktır. Bu gelişme, aynı zamanda gerçek zamanlı karar destek sistemlerinin etkin biçimde kullanılmasına da katkı sunacaktır.

Trafik simülasyonu, görüntü işleme ve emisyon modellemesinin üçlü bir yapı hâlinde bütünleştiği uygulamaların literatürde oldukça sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, üçlü entegrasyon uygulamalarının yaygınlaşması kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmaların genel değerlendirmesine bakıldığında, görüntü işleme, derin öğrenme ve nesne tespiti yöntemlerinin hem trafik yönetimi hem de emisyon tahmininde giderek daha yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Özellikle YOLO ve benzeri nesne tespit algoritmaları, araç sayımı, trafik yoğunluğu analizi ve bu verilerin emisyon tahmin süreçlerine entegrasyonu açısından öne çıkmaktadır. Bu sayede hem trafik simülasyonları hem de hava kalitesi modellemeleri daha gerçekçi girdilerle desteklenebilmektedir.

Trafik yoğunluğu ile emisyon salımı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan çalışmalarda, kamera tabanlı tespit sistemleri ile emisyon haritalama teknikleri bir araya getirilerek dinamik ve yerel bazlı emisyon dağılımı analizleri yapılmıştır. Ancak, düşük çözünürlüklü görüntüler, küçük nesnelerin (örneğin motosiklet gibi iki tekerlekli araçlar) tespiti ve değişken hava koşulları gibi faktörlerin sistem doğruluğunu düşürebildiği de belirtilmiştir.

Ayrıca, çalışmalarda dikkat çeken bir diğer alan, trafik yönetimi sistemlerinin akıllı hale getirilmesi ve IoT tabanlı çözümlerle desteklenmesidir. Anlık kamera verilerinin kullanılmasıyla trafik ışıklarının dinamik olarak kontrol edilmesi, sadece trafik akışını optimize etmekle kalmamakta, aynı zamanda egzoz

emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Geleceğe dönük olarak, YOLO gibi derin öğrenme tabanlı sistemlerin daha gelişmiş versiyonlarının (örneğin, hibrit CNN-LSTM modelleri) ve UAV ile uç cihazlar (Edge Computing) gibi teknolojilerin bir arada kullanımı sayesinde daha yüksek doğrulukta, daha geniş kapsama sahip ve düşük maliyetli veri toplama olanakları ortaya çıkacaktır. Bu gelişmeler, akıllı şehir uygulamaları ve karar destek sistemleri için temel teşkil edecek ve çevresel politikaların etkili biçimde uygulanmasını destekleyecektir.

### 3.4. Veri Akışı ve Sistem Entegrasyonu: Trafik Simülasyonu, Emisyon Modeli ve Görüntü İşleme Bileşenleri

Bu çalışmada ele alınan üç temel bileşenin (görüntü işleme, trafik simülasyonu ve emisyon modelleme) bütüncül bir yapı içerisinde nasıl entegre edildiği, Şekil 5' te sunulan veri akış şeması ile açıklanmaktadır. Bu mimari, gerçek zamanlı ya da sahaya özel veri kaynaklarının birbirini tamamlayan modüllere nasıl aktarıldığını göstermektedir. Sistem dört temel katmandan oluşmaktadır:

1. Girdi verileri, kamera görüntüleri, GPS sinyalleri ve çevresel koşullar gibi çoklu kaynaklardan toplanmaktadır.
2. Görüntü işleme katmanında, araçlar YOLO, Kalman Filtresi veya benzeri algoritmalar ile tespit edilip sınıflandırılmakta; hız, konum ve yoğunluk gibi parametreler çıkarılmaktadır.
3. Trafik simülasyonu katmanı, SUMO veya VISSIM gibi yazılımlar ile mikro düzeyde trafik akışını modellemekte; bu modelleme davranış tabanlı senaryoları içermektedir.
4. Emisyon modelleme katmanı, simülasyon çıktılarından elde edilen verilerle CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO ve PM gibi kirleticilerin mikroskobik düzeyde hesaplandığı bölümdür. Burada PHEM, Enviver, VT-Micro gibi modeller kullanılmaktadır. Son olarak, bu süreçlerden elde edilen çıktılar; emisyon yoğunluk haritaları, trafik senaryolarına bağlı emisyon tepkileri ve karar destek sistemlerine aktarılacak yönetim verileri olarak kullanılmaktadır.

## 4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu derleme çalışması, mikro ölçekli trafik simülasyonları, emisyon modellemeleri ve görüntü işleme temelli araç algılama/takip yöntemlerinin eş zamanlı ve bütünlük kullanımına odaklanan sınırlı

sayıdaki çalışmaları sistematik biçimde inceleyerek, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışmanın en güçlü yönlerinden biri, mikro ölçekli trafik simülasyonları ile mikro emisyon modellerinin entegre kullanıldığı literatürün kapsamlı şekilde taranması ve çeşitli ülkelerdeki örnek uygulamaların (örneğin, Hollanda, İtalya, Çin, Hindistan) tablolaştırılarak sistematik biçimde sunulmasıdır. Tablo 2' de ve Tablo 3' teki örnek çalışmalar, üçlü sistemin (trafik simülasyonu, emisyon modelleme ve görüntü işleme) farklı şekillerde kullanıldığı senaryoları karşılaştırmalı biçimde ortaya koymakta ve bu çalışma aracılığıyla araştırmacılara geniş bir karşılaştırma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamalara yönelik çıkarımlar ve gelecekteki yapay zekâ temelli senaryo üretimlerine dair öneriler, çalışmanın hem teorik hem de uygulamalı katkısını artırmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmanın bazı kısıtlılıkları da bulunmaktadır. Derleme kapsamında sadece açık erişimli ve belirli veri tabanlarında indekslenen çalışmalara yer verilmiş olup, bazı güncel ya da yerel çalışmalar kapsam dışında kalmış olabilir. Ayrıca, çalışmalarda kullanılan yöntemlerin başarı düzeylerinin karşılaştırılmasına yönelik nicel analiz yapılmamış, sadece nitel bir değerlendirme sunulmuştur. Bu nedenle, önerilen yaklaşımların uygulanabilirliği ve etkinliği konusunda ileri deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Yalnızca simülasyon temelli modellerin kullanıldığı çalışmalar, özellikle hızlanma, ani şerit değişimi gibi geçici durumlarda saha koşullarını tam olarak yansıtamamakta ve bu nedenle saha gerçekliğinden uzak kalabilmektedir. Zhang ve Ioannou (2016), CMEM ve MOVES gibi farklı emisyon modellerini kullanarak yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada, fiziksel model olan CMEM'in bu tür geçiş davranışlarına daha duyarlı olduğunu ve saha verilerine daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Aynı şekilde, sadece simülasyon tabanlı emisyon tahminleri, gerçek zamanlı trafik davranışlarını yeterince yansıtamayabilir. Essamlali ve ark. (2025), simülasyon temelli bir yaklaşım benimsenmiş olması nedeniyle çalışmanın sonuçları teorik düzeyde kalmaktadır. Gerçek trafik verileri kullanılmadığı gibi, her ne kadar gerçek şehirler modellenmiş olsa da trafik kazaları, trafik ışıkları ve sürücü davranışları gibi dinamik gerçeklik unsurları modele dâhil edilmemiştir. Trafik ışıkları ve sürücü karar süreçleri göz ardı edilerek yalnızca şehir geometrisinin etkisi izole edilmeye çalışılmıştır. Tüm

şehirler için sabit trafik davranışı, yol koşulları ve araç tipi gibi varsayımlar yapılmış olması, elde edilen sonuçların genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Bu noktada üç sistemin (görüntü işleme, trafik simülasyonu, emisyon modellemesi) birlikte kullanılması hem doğruluk hem de senaryo esnekliği açısından literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Sonuç olarak, mevcut bulgular, şehir içi ulaşım kaynaklı emisyonların daha hassas modellenmesi için çok kaynaklı ve disiplinler arası veri entegrasyonunun gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu üçlü yapının standartlaştırılması, yapay zekâ destekli otomatik senaryo üretimi ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerine entegrasyonu, sürdürülebilir kent içi ulaşım ve çevre yönetimi açısından kritik bir potansiyele sahiptir. Trafik yönetimi, hava kalitesi modellemesi ve emisyon izleme alanlarında entegre yaklaşımlar yalnızca bugünün ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayıp aynı zamanda gelecekte gerçek zamanlı ve çok katmanlı sistemlerin temelini oluşturacak bir yönelim sergilenmektedir.

Bu bağlamda, yapılan gözlemler doğrultusunda aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Gerçek zamanlı trafik verileri, mikro ölçekli trafik simülasyonlarında kullanılarak emisyon tahminlerinin doğruluğunu artırabilir. Bu nedenle, veri toplama süreçlerinde yüksek doğruluk oranına sahip nesne tespit ve takip algoritmalarının kullanılması gerekmektedir.
- Mikro ölçekli trafik modelleri ile emisyon modellerinin entegrasyonu, doğruluk açısından kritik bir adım olup, hız ve ivme profillerinin doğru bir şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir.
- Farklı ölçeklerde kullanılan emisyon modelleri ile mikro trafik simülasyonları arasında kurulacak bütünleşik bir köprü, çevresel etkilerin daha gerçekçi ve kapsamlı biçimde analiz edilmesine imkân tanıyacaktır.
- Mevcut modeller genellikle varsayılan sistem verileriyle çalışmakta olup bu verilerin bölgesel ve yerel koşullara uygun şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, gelecekteki çalışmalar için daha gelişmiş yapay zekâ tekniklerinin

kullanılması, gerçek zamanlı trafik verileriyle simülasyon modellerinin entegre edilmesi ve mikro ölçekli emisyon tahminlerinin hassasiyetinin artırılması önerilmektedir. Ayrıca, farklı trafik senaryolarının çevresel etkiler üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendirmek için daha kapsamlı veri kümeleri ve modelleme teknikleri kullanılmalıdır. Bunun yanı sıra emisyon değerlerinin ölçümü için kullanılan araçla bütünleşik çalışan bazı emisyon kontrol sistemlerinin motor gücünde kayıplara neden olması da bir diğer husustur. Bu kapsamda da ileride yapılacak çalışmalarla motor gücü ve performansını etkilemeyecek emisyon kontrol sistemlerinin geliştirilmesi konuları önerilmektedir.

### Etik Kurul Onay Beyanı

İlgili çalışmada insan veya hayvan katılımcılardan veri toplanmadığı için etik kurul izni gerekmemektedir.

### Kaynakça

Abdelwahab, M. A. (2019). Fast approach for efficient vehicle counting. *Electronics Letters*, 55(1), 20–22. <https://doi.org/10.1049/el.2018.6719>

Acuto, F., Coelho, M. C., Fernandes, P., Giuffrè, T., Macioszek, E., ve Granà, A. (2022). Assessing the environmental performances of urban roundabouts using the vsp methodology and AIMSUN. *Energies*, 15(4), 1371. <https://doi.org/10.3390/en15041371>

Adamidis, F. K., Mantouka, E. G., ve Vlahogianni, E. I. (2020). Effects of controlling aggressive driving behavior on network-wide traffic flow and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.05.003>

Adi, K., Widodo, A. P., Widodo, C. E., Pamungkas, A., ve Putranto, A. B. (2018). Automatic vehicle counting using background subtraction method on gray scale images and morphology operation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1025(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1025/1/012025>

Ahn, K., ve Rakha, H. (2008). The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(3), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.01.005>

Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., ve Van Aerde, M. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 182–190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182))

Aimsun. (t.y.). *Aimsun – Mobility intelligence for decisions that count*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://www.aimsun.com/> adresinden erişilmiştir.

Akkaya, S., ve Engin, T. (2022). Trafik simülasyon yazılımlarına genel bakış. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(2), 158–168. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1090209>

Alam, G. M. I., Arfin Tanim, S., Sarker, S. K., Watanobe, Y., Islam, R., Mridha, M. F., ve Nur, K. (2025). Deep learning model based prediction of vehicle CO<sub>2</sub> emissions with eXplainable AI integration for sustainable environment. *Scientific Reports*, 15(1), 1–28. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87233-y>

Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation*. Springer Press.

Bari, C., Gangwal, A., Rahimi, Z., Srikanth, L., Singh, B., ve Dhamaniya, A. (2023). Emission modeling at toll plaza under mixed traffic condition using simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 11409. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11409-0>

Barth, M., ve Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record*, 2058(1), 163–171. <https://doi.org/10.3141/2058-20>

Beza, A. D., Maghrour Zefreh, M., ve Torok, A. (2022). Impacts of different types of automated vehicles on traffic flow characteristics and emissions: a microscopic traffic simulation of different freeway segments. *Energies*, 15(18), 6669. <https://doi.org/10.3390/en15186669>

Birleşmiş Milletler. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

- Birleşmiş Milletler. (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.  
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- Birleşmiş Milletler. (2015). *Paris Agreement*.  
[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_pari\\_s\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_pari_s_agreement.pdf)
- Blokpoel, R., Hausberger, S., ve Krajzewicz, D. (2017). Emission optimised control and speed limit for isolated intersections. *IET Intelligent Transport Systems*, 11(3), 174–181.  
<https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0027>
- Blomgren, M., ve Jungbjer, P. (2019). *Emissions modeling of electric urban transit: Analysis of environmental effects of electric public transit in Johanneberg by using the software PTV Vissim and EnViVer [Yüksek lisans tezi]*. Chalmers University of Technology.
- Caliper Corporation. (t.y.). *TransModeler traffic simulation software*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm> adresinden erişilmiştir.
- Charef, A., Jarir, Z., ve Quafafou, M. (2024). The impact of motorcycle positioning on start-up lost time: the empirical case study of signalized intersections in marrakech using VISSIM. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(3), 14313–14318.  
<https://doi.org/10.48084/etasr.7141>
- Chauhan, B. P., Joshi, G. J., ve Parida, P. (2019). Car following model for urban signalised intersection to estimate speed based vehicle exhaust emissions. *Urban Climate*, 29, 100480.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100480>
- Chauhan, B. P., Joshi, G. J., ve Parida, P. (2024). Traffic simulation-emission modelling to evaluate impact of signal cycle on automobile emissions. *European Transport / Trasporti Europei*, 98, 1–15.  
<https://doi.org/10.48295/et.2024.98.9>
- Chawla, A., Khare, M., ve Khan, S. (2021). Evaluating the effect of speed variation on vehicular emission using an integrated modelling approach. S. S. Arkatkar, S. Velmurugan ve A. Verma (Ed.), *Recent advances in traffic engineering* içinde (ss. 299–315). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3_20)
- Chen, J., Li, Y., Meng, Z., Feng, X., Wang, J., Zhou, H., Li, J., Shi, J., Chen, Q., Shi, H., ve Wang, S. (2022). Study on emission characteristics and emission reduction effect for construction machinery under actual operating conditions using a portable emission measurement system (PEMS). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9546.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19159546>
- Chhadikar, N., Bhamare, P., Patil, K., ve Kumari, S. (2019). Image processing based tracking and counting vehicles. *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICECA.2019.8822092>
- Chonchannavar, S. R., ve Arunkumar, T. (2022). Vehicle detection and counting using video frame. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 4(8).  
<https://doi.org/10.56726/irjmets29427>
- Csikós, A., ve Varga, I. (2012). Real-time modeling and control objective analysis of motorway emissions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 1027–1036.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.818>
- Dai, Z., Song, H., Wang, X., Fang, Y., Yun, X., Zhang, Z., ve Li, H. (2019). Video-based vehicle counting framework. *IEEE Access*, 7, 64460–64470.  
<https://doi.org/10.1109/access.2019.2914254>
- De La Rocha, E., ve Palacios, R. (2010). Image-processing algorithms for detecting and counting vehicles waiting at a traffic light. *Journal of Electronic Imaging*, 19(4), 043025–043028.  
<https://doi.org/10.1117/1.3528465>
- Eclipse SUMO. (2025). *SUMO (Simulation of Urban Mobility) user documentation*. 10 Şubat 2025 tarihinde <https://sumo.dlr.de/docs/> adresinden erişilmiştir.
- Ejercito, P. M., Nebrija, K. G. E., Feria, R. P., ve Lara-Figueroa, L. L. (2017). Traffic simulation software review. *Proceedings of the 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)* (ss. 1–4). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/iisa.2017.8316415>

- Elshebli, E., ve Erdos, F. (2022). Combination of simulation and machine learning to mitigate traffic emissions. *Proceedings of the 2022 13th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* (ss. 41–46). IEEE.
- Essamlali, I., Nhaila, H., ve El Khaili, M. (2025). Impact of urban block shape on traffic and air quality: A SUMO-based comparative study of rectangular, radial, and triangular forms. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101413>
- European Commission. (2016). *EU reference scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions trends to 2050*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2833/9127>
- Fachrie, M. (2020). A simple vehicle counting system using deep learning with YOLOv3 model. *RESTI Journal (System Engineering and Information Technology)*, 4(2), 462–468. <https://doi.org/10.29207/resti.v4i2.5474>
- Fan, J., Gao, K., Xing, Y., ve Lu, J. (2019). Evaluating the effects of one-way traffic management on different vehicle exhaust emissions using an integrated approach. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/6248796>
- Fang, Y., Zhang, S., Yu, K., Gao, J., Liu, X., Cui, C., ve Hu, J. (2025). PM<sub>2.5</sub> concentration prediction algorithm integrating traffic congestion index. *Journal of Environmental Sciences*, 155, 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.09.029>
- Frey, H. C., Zhang, K., ve Roupail, N. M. (2010). Vehicle-specific emissions modeling based upon on-road measurements. *Environmental Science and Technology*, 44(9), 3594–3600. <https://doi.org/10.1021/es902835h>
- Gao, J., Chen, H., Dave, K., Chen, J., ve Jia, D. (2020). Fuel economy and exhaust emissions of a diesel vehicle under real traffic conditions. *Energy Science and Engineering*, 8(5), 1781–1792. <https://doi.org/10.1002/ese3.632>
- Giechaskiel, B., Casadei, S., Rossi, T., Forloni, F., ve Di Domenico, A. (2021). Measurements of the emissions of a “golden” vehicle at seven laboratories with portable emission measurement systems (PEMS). *Sustainability*, 13(16), 8762. <https://doi.org/10.3390/su13168762>
- Gräbe, R. J., ve Joubert, J. W. (2022). Are we getting vehicle emissions estimation right? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103477. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103477>
- Hausberger, S., Rodler, J., Sturm, P., ve Rexeis, M. (2003). Emission factors for heavy-duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment*, 37(37), 5237–5245. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.05.002>
- Int Panis, L., Broekx, S., ve Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of The Total Environment*, 371(1–3), 270–285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.017>
- Jia, T., Zhang, P., ve Chen, B. (2022). A microscopic model of vehicle CO<sub>2</sub> emissions based on deep learning - a spatiotemporal analysis of taxicabs in Wuhan, China. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 18446–18455. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3151655>
- Karaçor, F., Ergül, H., Hatipoğlu, S. ve İzol, E. (2024). Yerel yönetimlerin sürdürülebilir kentsel hareketlilik planları yeterliliklerinin tespiti üzerine bir uygulama. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 75–84. <https://doi.org/10.38002/tuad.1388954>
- Ko, M., Lord, D., ve Zietsman, J. (2012). Environmentally conscious highway design for crest vertical curves. *Transportation Research Record*, 2270(1), 96–106. <https://doi.org/10.3141/2270-12>
- Kwak, J., Park, B., ve Lee, J. (2012). Evaluating the impacts of urban corridor traffic signal optimization on vehicle emissions and fuel consumption. *Transportation Planning and Technology*, 35(2), 145–160. <https://doi.org/10.1080/03081060.2011.651877>

- Lee, G., You, S. I., Ritchie, S. G., Saphores, J.-D. M., Sangkapichai, M., ve Jayakrishnan, R. (2008). Environmental impacts of a major freight corridor: A study of the I-710 in California (UCTC-FR-2008-11). *University of California Transportation Center*.  
<https://escholarship.org/uc/item/7kw9370n>
- Lee, K. S., Eom, J. K., ve Moon, D. S. (2014). Applications of TRANSIMS in transportation: A literature review. *Procedia Computer Science*, 32, 769–773.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2014.05.489>
- Lejri, D., Can, A., Schiper, N., ve Leclercq, L. (2018). Accounting for traffic speed dynamics when calculating COPERT and PHEM pollutant emissions at the urban scale. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 588–603.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.023>
- Li, S., ve Yoon, H. S. (2023). Vehicle localization in 3d world coordinates using single camera at traffic intersection. *Sensors*, 23(7).  
<https://doi.org/10.3390/s23073661>
- Lin, Y. C., Lin, Y. T., Chen, C. R., ve Lai, C. Y. (2025). Meteorological and traffic effects on air pollutants using Bayesian networks and deep learning. *Journal of Environmental Sciences*, 152, 54–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.057>
- Liu, R. (1994). *DRACULA microscopic traffic simulator*. (Working Paper 431). University of Leeds.
- Liu, R., ve Tate, J. (2004). Network effects of intelligent speed adaptation systems. *Transportation*, 31(3), 297–325.  
<https://doi.org/10.1023/B:PORT.0000025394.78857.13/METRICS>
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., ve Wießner, E. (2018). Microscopic traffic simulation using SUMO. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (ss. 2575–2582). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938>
- Ma, X., Lei, W., Andréasson, I., ve Chen, H. (2012). An evaluation of microscopic emission models for traffic pollution simulation using on-board measurement. *Environmental Modeling and Assessment*, 17(4), 375–387.  
<https://doi.org/10.1007/s10666-011-9296-9>
- Maduro, C., Batista, K., Peixoto, P. ve Batista, J. (2008). Estimating vehicle velocity using rectified images. *Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2008)* (ss. 551–558). SciTePress.  
<https://doi.org/10.5220/0001088205510558>
- Maździel, M. (2024). Instantaneous CO<sub>2</sub> emission modelling for a Euro 6 start-stop vehicle based on portable emission measurement system data and artificial intelligence methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(5), 6944–6959.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-31022-5>
- Maździel, M., ve Campisi, T. (2023). Investigation of vehicular pollutant emissions at 4-arm intersections for the improvement of integrated actions in the sustainable urban mobility plans (SUMP). *Sustainability*, 15(3).  
<https://doi.org/10.3390/su15031860>
- Maździel, M., Jaworski, A., Savostin-Kosiak, D., ve Lejda, K. (2020). The impact of exhaust emission from combustion engines on the environment: Modelling of vehicle movement at roundabouts. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(4), 8360–8371.  
<https://doi.org/10.15282/ijame.17.4.2020.12.0632>
- MATSim. (t.y.). *MATSim – Open-source framework for large-scale agent-based transport simulations*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://www.matsim.org/> adresinden erişilmiştir.
- McTrans Center. (2025). *TSIS-CORSIM 2025 – Traffic software integrated system*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://mctrans.ce.ufl.edu/tsis-corsim/> adresinden erişilmiştir.
- Metil, P. D., ve Nigavekar, A. R. (2019). Review on traffic density count using image processing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(1), 285–290. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.1048>

- Miyazaki, H., Witayangkurn, A., ve Kii, M. (2020). A review of MATSim: A pilot study of Chatuchak, Bangkok THAILAND. *Journal of Intelligent Informatics and Smart Technology*, 4, 1–6. <https://ph05.tci-thaijo.org/index.php/JIIST/article/view/97/93>
- Namekawa, M., Kanagawa, S. ve Shinkai, K. (2019). Image recognition for vehicle traffic analysis at intersections. *Proceedings of the 23rd International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2019)* (ss. 484–490). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Niroomand, N., Bach, C., ve Elser, M. (2021). Segment-based CO<sub>2</sub> emission evaluations from passenger cars based on deep learning techniques. *IEEE Access*, 9, 166314–166327. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135604>
- Noland, R. B., ve Quddus, M. A. (2006). Flow improvements and vehicle emissions: Effects of trip generation and emission control technology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2005.06.003>
- Okebe, M. W., Abuodha, S. O., ve Ochieng, M. O. A. (2024). Evaluating emission reduction policies along an urban arterial highway using the AIMSUN model. *Journal of Advanced Transportation*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6309854>
- Overtoom, I., Correia, G., Huang, Y., ve Verbraeck, A. (2020). Assessing the impacts of shared autonomous vehicles on congestion and curb use: A traffic simulation study in The Hague, Netherlands. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2020.03.009>
- Park, B. B., Yun, I., ve Ahn, K. (2009). Stochastic optimization for sustainable traffic signal control. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4), 263–284. <https://doi.org/10.1080/15568310802091053>
- Park, B., ve Qi, H. (2004). Development and evaluation of a calibration and validation procedure for microscopic simulation models (Report No. VTRC 05-CR8). *Virginia Transportation Research Council*. <https://doi.org/10.21949/1503647>
- Patiño-Aroca, M., Parra, A., ve Borge, R. (2022). On-road vehicle emission inventory and its spatial and temporal distribution in the city of Guayaquil, Ecuador. *Science of the Total Environment*, 848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157664>
- Pignatta, G. ve Balazadeh, N. (2022). Hybrid vehicles as a transition for full e-mobility achievement in positive energy districts: A comparative assessment of real-driving emissions. *Energies*, 15, 2760. <https://doi.org/10.3390/en15082760>
- Prohanov, S., Bart, A., Fazliev, A. Z. ve Starchenko, A. V. (2021). Use of computer vision in assessment of air quality in city transportation system. *Proceedings of the 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics (Cilt 11916, Madde 119168T)*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2603497>
- PTV Group. (t.y.). *PTV Vissim: Multimodal traffic simulation software*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim/> adresinden erişilmiştir.
- Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, D., ve de Andrés, J. M. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 416–427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.051>
- Rahimi, M. (2023). *Modeling and simulation of vehicle emissions for the reduction of road traffic pollution* [Doktora tezi, University of Trento]. IRIS Institutional Research Information System. [https://doi.org/10.15168/11572\\_365449](https://doi.org/10.15168/11572_365449)
- Rajput, D., Singhai, T., Bhaduria, D., ve Relan, S. (2023). Comparative analysis for vehicle detection and counting system using machine learning. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 7(3), 1–6. <https://doi.org/10.55041/ijrsrem17924>

- Rakha, H., Ahn, K., ve Trani, A. (2004). Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(1), 49–74. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(03\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(03)00054-3)
- Ratrout, N. T., ve Rahman, S. M. (2009). A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 121–133. <https://www.researchgate.net/publication/228676772>
- Romero, B., Coello, M., ve Cordero-Moreno, D. (2020). GPS data correction through the IVE model for use in vehicle emission estimates for congestion pricing. *Proceedings of the 2020 IEEE ANDESCON (ANDESCON 2020)*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272080>
- Saadeldin, A., Rashid, M. M., Shafie, A. A., ve Hasan, T. F. (2024). Real-time vehicle counting using custom YOLOv8n and DeepSORT for resource-limited edge devices. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 22(1), 104–112. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v22i1.25096>
- Sakhare, N. N., Tatale, S. B., Sakhare, S. R., Dusaane, H., Puri, M., Girme, P., Sankpal, R., ve Ghule, P. (2020). Image processing and iot based dynamic traffic management system. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 7(2), 180–188. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET207230>
- Shokrolah Shirazi, M., Chang, H. F., ve Tayeb, S. (2022). Turning movement count data integration methods for intersection analysis and traffic signal design. *Sensors*, 22(19), 7111. <https://doi.org/10.3390/s22197111>
- Smith, M., Duncan, G., ve Druitt, S. (1995). *PARAMICS: Microscopic traffic simulation for congestion management. The Institution of Electrical Engineers*. <https://doi.org/10.1049/ic:19950249>
- Song, H., Liang, H., Li, H., Dai, Z., ve Yun, X. (2019). Vision-based vehicle detection and counting system using deep learning in highway scenes. *European Transport Research Review*, 11(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0390-4>
- Song, Z., Wang, H., Sun, J., ve Tian, Y. (2020). Experimental findings with VISSIM and TransModeler for evaluating environmental and safety impacts using micro-simulations. *Transportation Research Record*, 2674(8), 566–580. <https://doi.org/10.1177/0361198120925077>
- Sterzin, E. D. (2004). *Modeling influencing factors in a microscopic traffic simulator* [Yüksek lisans tezi, Massachusetts Institute of Technology]. DSpace@MIT. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/29398>
- Su, S., Hou, P., Wang, X., Lyu, L., Ge, Y., Lyu, T., Lai, Y., Luo, W., ve Wang, Y. (2023). Evaluating the measurement uncertainty of on-road NOx using a portable emission measurement system (PEMS) based on real testing data in China. *Atmosphere*, 14(4), 702. <https://doi.org/10.3390/atmos14040702>
- Suparwito, H., Prakoso, B. G. H., Kumalasanti, R. A., ve Polina, A. M. (2025). Real-time vehicle detection and air pollution estimation using YOLOv9. *Jurnal Sisfokom (Sistem Informasi dan Komputer)*, 14(1), 23–30. <https://doi.org/10.32736/sisfokom.v14i1.2339>
- SYSTRA. (t.y.). *Paramics microsimulation – Designs and evaluates road transport network*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://www.systra.com/digital/solutions/transport-planning/paramics/> adresinden erişilmiştir.
- Tenekeci, G. (2019). Computation and assessment of environmental emissions resulting from traffic operations at roundabouts. *European Journal of Science and Technology, (Special Issue)*, 130–145. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.637594>
- Travel Forecasting Resource. (t.y.). *TRANSIMS*. 12 Şubat 2025 tarihinde <https://tfresource.org/topics/TRANSIMS.html> adresinden erişilmiştir.

- Ullah, M. R., Khattak, K. S., Khan, Z. H., Khan, M. A., Minallah, N., ve Khan, A. N. (2021). Vehicular traffic simulation software: A systematic comparative analysis. *Pakistan Journal of Engineering and Technology*, 4(1), 66–78. <https://journals.uol.edu.pk/pakjet/article/view/686/469>
- Unzueta, L., Nieto, M., Cortés, A., Barandiaran, J., Otaegui, O., ve Sánchez, P. (2012). Adaptive multicue background subtraction for robust vehicle counting and classification. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2), 527–540. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2174358>
- Viola, P., ve Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (Cilt 1, ss. 511–518). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517>
- Wei, Y., Yu, Y., Xu, L., Huang, W., Guo, J., Wan, Y., ve Cao, J. (2019). Vehicle emission computation through microscopic traffic simulation calibrated using genetic algorithm. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 9(1), 67–80. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2018-0025>
- Wu, J. D., Chen, B. Y., Shyr, W. J., ve Shih, F. Y. (2021). Vehicle classification and counting system using YOLO object detection technology. *Traitement du Signal*, 38(4), 1087–1093. <https://doi.org/10.18280/ts.380419>
- Xia, Y., Shi, X., Song, G., Geng, Q., ve Liu, Y. (2016). Towards improving quality of video-based vehicle counting method for traffic flow estimation. *Signal Processing*, 120, 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.10.035>
- Xu, Z., Wei, T., Easa, S., Zhao, X., ve Qu, X. (2018). Modeling Relationship between Truck Fuel Consumption and Driving Behavior Using Data from Internet of Vehicles. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(2), 209–219. <https://doi.org/10.1111/MICE.12344>
- Yang, H., ve Qu, S. (2017). Real-time vehicle detection and counting in complex traffic scenes using background subtraction model with low-rank decomposition. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(1), 75–85. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0047>
- Yang, Y., Yang, Y., Zhang, B., Cheng, P., Lee, D. H. ve Hu, S. (2024). Traffic emission estimation and modelling at urban intersections using high-resolution UAV-based video. *2024 Forum for Innovative Sustainable Transportation Systems (FISTS)* (ss. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FISTS60717.2024.10485600>
- Yavuz, E., Öztürk, A., Balkanlı, N. G. N., Engin, Ş. N., ve Kuzu, S. L. (2024). Development of artificial intelligent-based methodology to prepare input for estimating vehicle emissions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(23), 11175. <https://doi.org/10.3390/app142311175>
- Yu, Q., Yang, Y., Xiong, X., Sun, S., Liu, Y., ve Wang, Y. (2021). Assessing the impact of multi-dimensional driving behaviors on link-level emissions based on a Portable Emission Measurement System (PEMS). *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 414–424. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2020.09.022>
- Zhai, Z., Song, G., Lu, H., He, W., ve Yu, L. (2017). Validation of temporal and spatial consistency of facility- and speed-specific vehicle-specific power distributions for emission estimation: A case study in Beijing, China. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(9), 949–957. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1294545>
- Zhang, K., Batterman, S., ve Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions. *Atmospheric Environment*, 45(11), 1929–1939. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.01.030>
- Zhang, R., Wang, Y., Pang, Y., Zhang, B., Wei, Y., Wang, M., ve Zhu, R. (2022). A deep learning micro-scale model to estimate the CO<sub>2</sub> emissions from light-duty diesel trucks based on real-world driving. *Atmosphere*, 13(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/atmos13091466>

- Zhang, S., Wu, G., Costeira, J. P., ve Moura, J. M. F. (2017). FCN-rLSTM: Deep spatio-temporal neural networks for vehicle counting in city cameras. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (ss. 3687–3696). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.396>
- Zhang, Y., ve Ioannou, P. A. (2016). Environmental impact of combined variable speed limit and lane change control: A comparison of MOVES and CMEM model. *IFAC-PapersOnLine*, 49(3), 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.054>
- Zhao, H., Mu, L., Li, Y., Qiu, J., Sun, C., ve Liu, X. (2021). Unregulated emissions from natural gas taxi based on IVE model. *Atmosphere*, 12(4), 478. <https://doi.org/10.3390/atmos12040478>
- Zhao, Z.-Q., Zheng, P., Xu, S., ve Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11), 3212–3232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865>