

PAPER DETAILS

TITLE: Trafik Akisi İyilestirmesinin Trafik Sikisikligini Azaltmaya Etkisi: Simülasyonlu Alternatif Bakis

AUTHORS: Utkan Uluçay, Mehmet Tanyas

PAGES: 96-110

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3049510>

Araştırma Makalesi

Trafik Akışı İyileştirmesinin Trafik Sıkışıklığını Azaltmaya Etkisi: Simülasyonlu Alternatif Bakış

Utkan Uluçay^{1*} , Mehmet Tanyaş² 

¹ Lojistik ve TZY Doktora Programı, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Öz

Çalışmanın amacı büyük şehirler için çevre yolunda dinamik trafik akışına uygun düzenlemelerle akışı iyileştirerek emisyonu azaltmak, seyahat süresini uzatan beklemleri azaltarak yakıt tasarrufu sağlamaktır. Bir çevre yolundaki trafik akışı için farklı kuralları içeren senaryolar Goldratt Research Labs tarafından AnyLogic üzerinde hazırlanan Traffic Flow paket simülatörü kullanılarak operasyonel bazda kıyaslanmıştır. Yaygın kullanılan statik ve sensörlerle desteklenen hibrit uygulamalar yerine trafik yoğunluğuna dayalı katılım sınırı içeren dinamik sistem kullanıldığında yoldan geçen araç sayısı artmakta ve seyahat süresi kısalmaktadır. Büyüyen şehirler ve artan lojistik hacim çevre yol düzenlemesini gerektirmektedir. Özellikle transit geçişlerdeki yerleşim yerlerinde ve trafik yoğunluğu yaşanan büyük şehirlerde mevcut trafik sensörleriyle bağlantılı olarak kullanılabilir. Çevre yolu trafik düzenlemeleri arasında İstanbul’da uygulanmayan akıllı sinyalizasyon, yan yolun akıllı geçiş tercihine bağlanması, yola katılım sınırlaması, otoyolda trafik sinyalizasyonu gibi alternatifler simülasyon ortamında değerlendirilmiştir. Metot içindeki acil geçiş – araba – kamyon kurgusu, iş dünyasındaki acil işler – normal kapsamlı işler – geniş kapsamlı işler olarak yorumlandığında proje yönetimi için de geçerli görünmektedir.

Anahtar Kelimeler: çevre yolu, trafik akışı, akıllı sinyalizasyon, simülasyon

Reducing Traffic Congestion by Improving Traffic Flow: An Alternative Approach by Simulation

Abstract

This study aims to propose an alternative approach for traffic flow regulation in smart city ring roads by dynamic signalization to reduce emissions and traffic congestion. Benchmarking is based on a commercially available simulator (Traffic Flow) developed by Goldratt Research Labs and AnyLogic. Static, hybrid and dynamic rules were assessed under various scenarios and selected key performance indicators (KPIs). Dynamic signalization backed up with a load cap yielded better results compared to traditional static or sensor-assisted hybrid systems. Growing cities and increasing logistics volume require ring road regulation. It can be used in conjunction with existing traffic sensors, especially in residential areas in transit and in big cities with heavy traffic. Among the ring road traffic regulations, the alternatives that are not implemented in Istanbul such as smart signalization, load cap, smart fast lane pass, and signalization on highway were evaluated in the simulation environment. Considering emergency vehicles as urgent projects, cars and trucks as normal and large projects it seems to be valid for project management as well.

Keywords: ring road, traffic flow, smart traffic lights, simulation

* İletişim / Contact: Utkan Uluçay, Lojistik ve TZY Doktora Programı, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. E-Posta / E-mail: utkan.ulucay@gmail.com.

Gönderildiği tarihi / Date submitted: 31.03.2023, Kabul edildiği tarih / Date accepted: 08.08.2023

Alıntı / Citation: Uluçay, U. ve Tanyaş M. (2023). Trafik akışı iyileştirmesinin trafik sıkışıklığını azaltmaya etkisi: Simülasyonlu alternatif bakış. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 96–110. doi: 10.38002/tuad.1274489



Trafik Akışı İyileştirmesinin Trafik Sıkışıklığını Azaltmaya Etkisi: Simülasyonlu Alternatif Bakış

Birleşmiş Milletlerin öncülüğünde küresel çapta sürdürülebilirlik ana gündem haline gelmiştir. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarıyla bütüncül bir yaklaşım sergilenmiştir. İklim krizi riski karbon emisyonu konusunun önemini artırmıştır. Trafik sıkışıklığı araçların trafikte beklenenden daha uzun süre kalmasına, daha çok fosil yakıt tüketmesine, daha çok emisyonla yol açmakta ve sürücü ve yolcuların ruh halini olumsuz etkilemektedir. Trafik akışı iyileştirilerek yoldan geçen araç sayısını artırıldığında ve yolda geçen süre azaltıldığında bu olumsuz etkiler hafifleyecektir.

Kırsaldan kente olan nüfus hareketi şehirlerin büyümesine ve trafik sıkışıklığının artmasına yol açmaktadır. Önümüzdeki on yıl içinde, büyüyen şehirlerin %95' i gelişmekte olan ülkelerde olacaktır (Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları, 2023). Dolayısıyla gelişmekte olan ülkelerde lojistik merkezlerin çevre yollarına uygun konumlandırılması ve çevre yollarında azami trafik akışının sağlanması emisyonu azaltacaktır. Trafik akışını iyileştirmek üzere yeni bir otoyol veya köprülül kavşak inşası pahalı ve zaman alıcı bir çabadır ve kimi zaman çevresel şartlar nedeniyle mümkün olamamaktadır. Bu nedenle mevcut altyapının iyi değerlendirilmesi önem kazanmaktadır (Ki, Na ve Kim, 2019).

Trafik akışını zorlaştıran bir diğer faktör trafikteki araç sayısıdır. Çevre yolu kullanımının şehrin günlük hayatıyla özdeşleştiği İstanbul'da paylaşımlı araç kullanımı, uygun ve yeterli toplu taşıma olanaklarının yetersizliği, farklı kurumlarda farklı mesai saati uygulamasının yapılmaması, uzaktan çalışmanın yeterince desteklenmemesi, şehrin genişlemesine rağmen iş merkezlerinin görece aynı yerde kalması, trafik kurallarına uyumun bireyler arasında farklılık göstermesi, yeterli park yerinin sağlanamaması ve gece lojistiğinin gelişmemesi gibi faktörler trafik akışını zorlaştırmaktadır.

Özetle göç alarak nüfusu artan ve artan nüfusla beraber trafiği yoğunlaşan büyük metropollerin çevre yollarındaki trafik akışının iyileştirilmesi kamu yararı sağlayabilecektir.

Makalenin ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümünde kullanılan simülator, parametreleri, seçilen kriterler ve senaryolar, dördüncü bölümünde belirlenen kriterlerde senaryo karşılaştırmaları, seçilen yol kesiti için 2021 verisiyle fiili - öneri karşılaştırmaları, beşinci bölümünde bulguların tartışılması, altıncı bölümünde sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2. Literatür Araştırması

Trafik akışını iyileştirmek üzere sinyalizasyon, kavşak yönetimi, şerit sayısını artırma, sürat limitleri, zaman veya araç tipi bazlı yol kullanım hakkı sınırlamaları, toplu taşıma, ücretli geçiş, alternatif güzergâh, kademeli mesai saatleri, merkezi kontrol, trafik yönlendirmede dijital uyarı tabelaları, trafik kural ihlal belirleme sistemleri, trafikle ilişkili ek vergilendirme gibi farklı seçenekler gündeme gelmiştir (Öztürk, 2006; Pulur, 2010).

Bu seçeneklerden şehir içi toplu taşıma sistemi (Köylü ve Önder, 2017), merkezden kontrollü akıllı sinyalizasyon (Öztürk, 2006), döner kavşakta sinyalizasyon (Uludamar ve Tüccar, 2018) konulu çalışmalarda simülasyon yöntemi kullanılmış ancak çevre yolu konusuna değinilmemiştir.

Çevre yolu içeren çalışmalarda gişesiz otoyol geçişi (Pulur, 2010), sensörle trafik yoğunluğu takibi (Sönmez, 2017), sürücü-yol-merkez etkileşimi (Kuklova ve Pribyl, 2019) ve araç tipi bazında sürat-rota sınırlamaları ve paylaşımlı araç kullanımı (Kuklova, 2021) değerlendirilmiş ancak bu çalışmada söz edilen yan yol kullanımı ve akıllı sinyalizasyonla yola katılım sınırlaması alternatifleri yer almamıştır.

Akıllı yol ve akıllı araç gerektiren sistemlerin merkezi kontrol birimiyle ilişkilendirildiği çalışma (Ki, Na ve Kim, 2019), gelişmekte olan ülkelerde önemli bir altyapı yatırımı gerektirecektir.

Trafik akışının karmaşık doğası itibarıyla en uygun analiz yöntemi simülasyondur (Köylü ve Önder, 2017). Simülasyon yazılımları arasında SUMO ver 0.10.3, Aimsun ver 6.0.4, Paramics ver 6.4.1, SimTraffic ver 6, CORSIM ver 6.1 ve PTV Vissim ver 9 yazılımları karşılaştırılmıştır (Akkaya ve Engin, 2022). Ancak bu karşılaştırmaya ayrık olay (Discrete Event), etmen tabanlı (Agent Based) ve sistem dinamikleri (System Dynamics) yöntemlerini aynı anda kullanabilen AnyLogic dahil edilmemiştir.

AnyLogic yazılımını tercih edenler arasında takiben optimizasyon yapılmasını önerenler (Merkuryeva ve Bolshakovs, 2010), etmen tabanlı yöntem sayesinde sürücü davranışını canlandırabilme avantajına dikkat çekenler (Kuklova ve Pribyl, 2019) ve gerçek hayat şartlarına uygun model kurma esnekliği üzerinde duranlar (Kuklova, 2021) olmuştur.

Trafik akışını düzenleme konulu çalışmalar arasında çevre yoluna odaklı, mevcut altyapıda önemli değişiklik gerektirmeyen, yan yol kullanımı ve akıllı sinyalizasyon ile yola katılım sınırlamasını inceleyen çalışma görülememiştir.

Araştırma sorusu “İstanbul’da denenmeyen trafik akışı düzenleme alternatiflerinin çevre yolunda trafik akışına etkisi nedir?” şeklinde seçilmiştir. Yol veya köprülülük kavşak gibi önemli yatırımlar gerektirmeyen bu alternatifler yan yolun akıllı geçiş tercihinin bağlanması, akıllı sinyalizasyon ile yola katılım sınırlaması olacaktır.

Değerlendirilen çalışmalar Tablo 1’de derlenmiş ve çalışmalar modellenirken kullanılan trafik simülasyon yazılımı not edilmiştir.

Tablo 1. Literatür değerlendirmesi

Yazarlar	Yayın Tarihi	Sürdürülebilirlik	Trafik Kontrol	yayın	Uygulama
Öztürk	2006		x	Y.Lis.Tezi	Sinyalizasyon
Pulur	2010		x	Y.Lis.Tezi	Trafik kontrol merkezleri
Merkuryeva, Bolshakovs	2010		x	Konferans	Simülasyon: AnyLogic
Köylü, Önder	2017	x	x	Dergi	Simülasyon: AnyLogic
Sönmez	2017		x	Y.Lis.Tezi	Yapay sinir ağı
Uludamar, Tüccar	2018		x	Dergi	Simülasyon: Vissim
Ki, Na ve Kim	2019	x	x	Konferans	Simülasyon: AnyLogic
Kuklova, Prybil	2019	x	x	Konferans	Simülasyon: AnyLogic
Kuklova	2021	x	x	Konferans	Simülasyon: AnyLogic
Akkaya, Engin	2022			Dergi	Simülasyon yazılımları
Total		4	9	10	6 Simülasyon

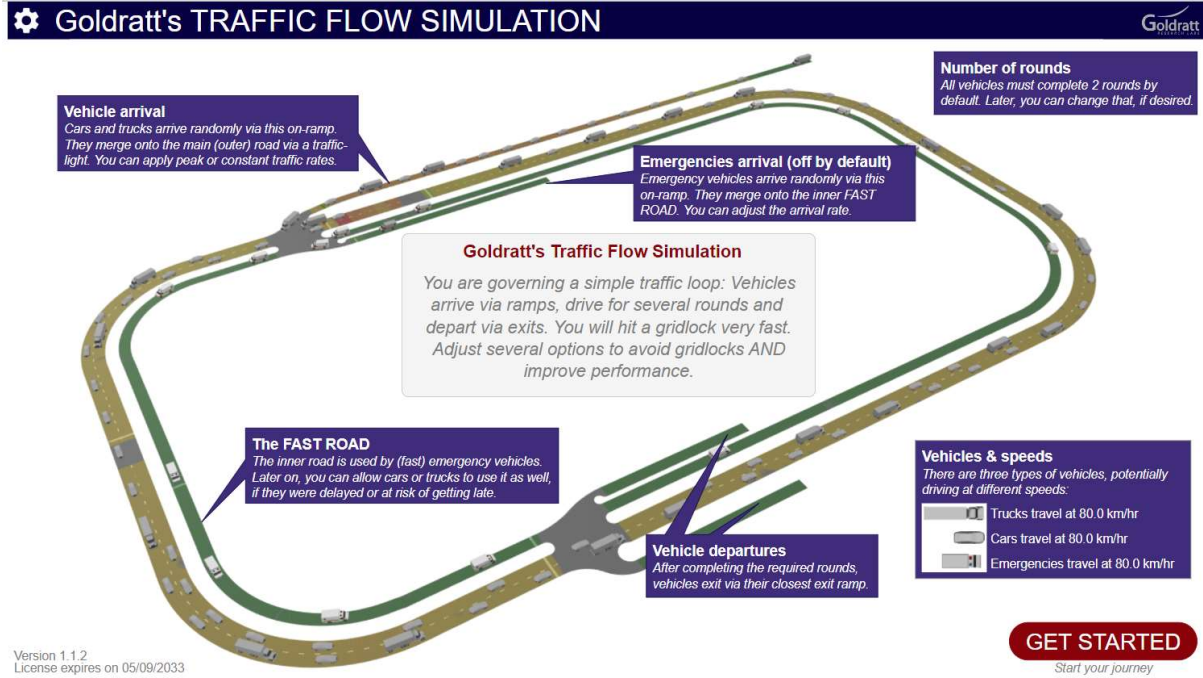
3. Yöntem

Bu çalışmada tekrar edilebilirlik niteliği olan, varsayımları belirli, parametrik yapılı ve AnyLogic ile hazırlanan orijinal İngilizce dilindeki Traffic Flow ver 1.1.2 kullanılmıştır (Goldratt-Research-Labs, 2023). Şekillerin altında temel noktalar için Türkçe notlar verilmiştir.

3.1. Simülatörün Yapısı

Simülatörün açılış ekranı Şekil 1’de gösterilmiştir. Parkur iki şeritlidir ve opsiyonel yan yol vardır. Yan yollar ana yola tek bir noktada birleşir ve yine tek bir noktada ayrılır. Ambulans,

itfaiye, polis gibi geçiş üstünlüğü olan araçlar tanımlanabilir. Ayrıca kendine özgü parametreleriyle otomobil ve kamyon olarak iki araç tipi tanımlanmıştır. Simülatör 4 saatlik süreyi canlandırmaktadır. Her senaryoda belirlenen kurala göre planlanan varış süresi hesaplanmakta ve simülatör çalışırken hem araçlar hem yol bölümleri renk kodlu olarak gösterilmektedir. Gecikmelere siyah, gecikmek üzere olanlara kırmızı, normal olanlara sarı ve planın ilerisinde olanlara yeşil renk kodu verilmiştir.



Şekil 1. Trafik simülatörü açılış ekranı

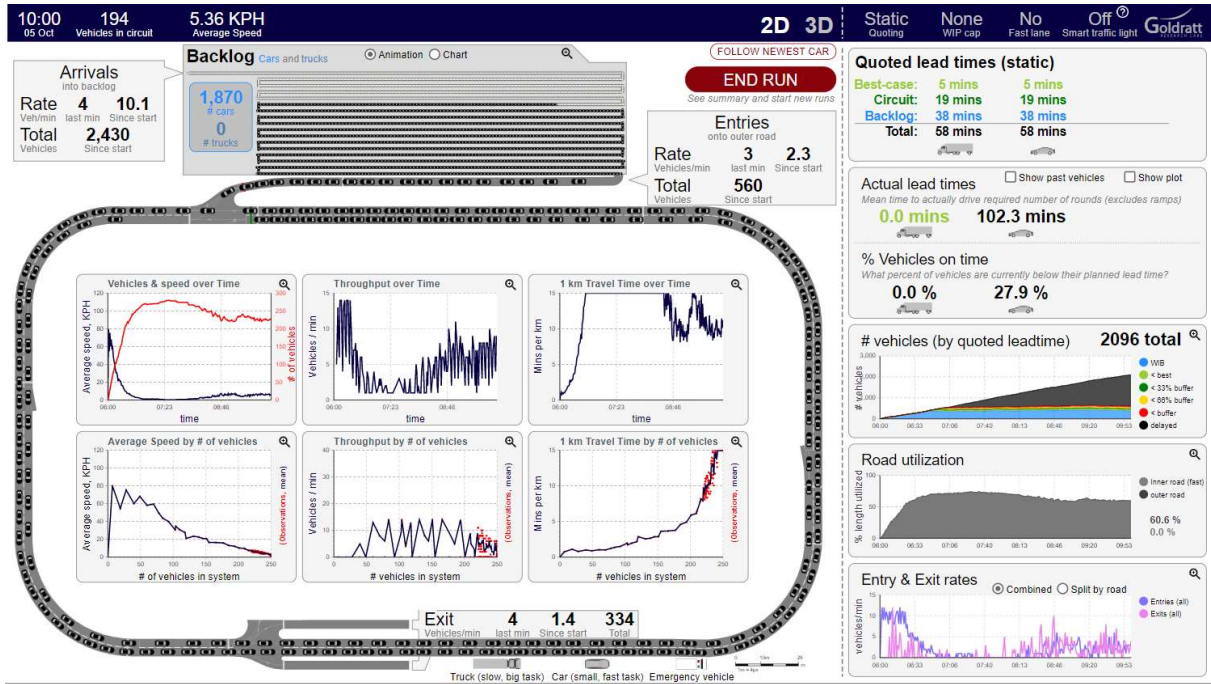
Not: **Vehicle Arrival**-Araç girişindeki kamyon payı, **The FAST ROAD**-yan yol kullanımı, **Vehicle departures**-yoldan çıkış noktası, **Vehicles & speeds**-araç tipine göre hız ataması, **Emergencies arrival**-geçiş üstünlüğü olan araç giriş temposu, **Number of rounds**-tur sayısı

Karşılaştırma için kullanılacak temel senaryoda kamyon girişi yoktur, yan yol yoktur, geçiş üstünlüğü olan araçlar girmeyecektir, otomobillerin seyir hızı 80 km/saattir, otoyola katılım temposu dakikada 5 araçtır ve saatlik dalgalanma yoktur. Otoyola katılımda sabit süreli trafik lambası vardır, katılan araçlara %70 oranında yeşil ışık yanmaktadır ve araçlar parkurda 2 tur kalacaklardır. Planlanan seyir süresi statik kurala göre (1) eşitliğinde gösterilen şekilde hesaplanmıştır.

(1) Planlanan süre = boş parkur tamamlama süresi + 3 kat emniyet payı + 2 kat giriş kayıp payı

(2) Örnek: Planlanan süre = 5 dakika + 3 x 5 dakika + (5 dakika + 3 x 5 dakika) x 2 = 60 dakika

Bu simülasyonun sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir. Planlanan süre 58 dakika olmasına rağmen gerçekleşen süre 44 dakika gecikmeyle 102 dakikadır. Araçların sadece %27,9’ u planlanan sürede parkuru tamamlayabilmiştir. Araçların ortalama hızı 3 dakika boyunca 3km/saatin altında kaldığında simülatör trafiğin kilitlendiğini raporlamaktadır, bu senaryoda 45 dakika içinde trafik kilitlenmiştir. Yola katılmak isteyen 2430 araçtan ancak 560 tanesi yola girebilmiş ve yola giren araçlardan sadece 334 araç hedefe ulaşabilmiştir.



Şekil 2. Trafik simülatorü açılış ekranı

Not: **Arrivals**-giren araç sayıları, **Backlog**-yola katılamayan araçlar, **Entries**-yola katılan araç sayıları, **Quoted lead times**-hesaplanan tahmini varış süreleri, **Actual lead times**-gerçekleşen varış süreleri, **#vehicles**-hesaplanan süreye uyum performansı, **Road utilization**-yol kapasitesinin kullanım oranı, **Entry & Exit rates**-giriş ve çıkış tempoları

Başka bir ifadeyle yolun kapasitesi daha yoğun trafiği kaldırabilecek seviyede olduğu halde yola katılamayan araçlar şehir içinde sıkışıklığa sebep olurken, yola katılabilenler hedeflerine gecikmeli ulaşabilmiştir. Katılan araç sayısı artarken trafiğin akışı yavaşlamıştır.

3.2. Simülatorün Parametreleri

Simülatorde araçların içindeki kamyon payı, geçiş üstünlüğü olan araç giriş temposu, belirli dönemlerde artan trafik yoğunluğu, araç tipi bazında hız limiti, yan yol kullanımı, parkurda kalma süresi, seyahat süresi hesabı için parametre alternatifleri ayarlanabilmektedir.

Sisteme kamyon giriş oranı giren araçların yüzde cinsinden %0 ila %100 arasında belirlenebilmektedir, kamyonlar diğer araçlardan daha uzun oldukları için yolda daha çok yer kaplamakta ve daha yavaş oldukları için daha uzun süre yolda kalmaktadır.

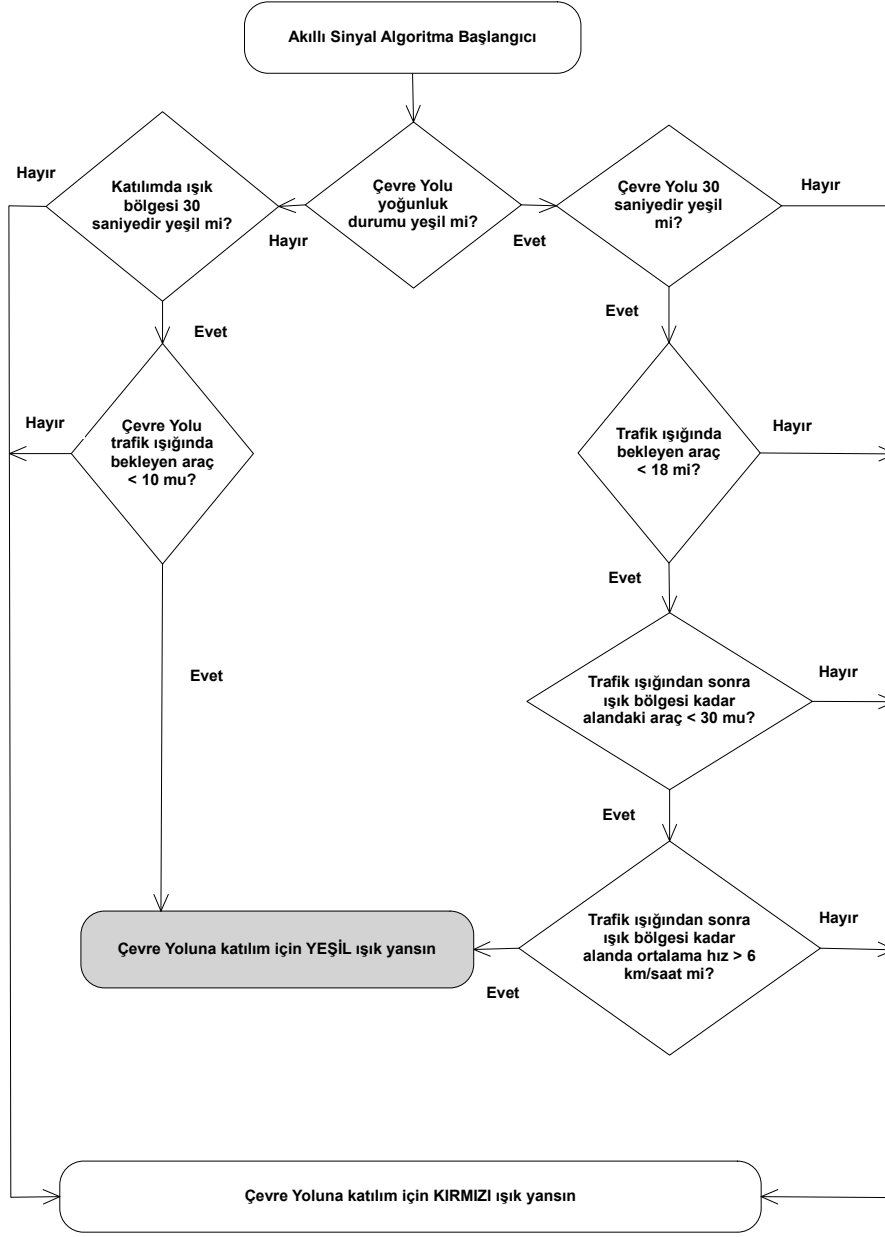
Acil durumları temsilen geçiş üstünlüğü olan araç girişi opsiyoneldir ve araç girişine izin verildiğinde yola giriş temposu 0 adet/dakika ila 5 adet/dakika aralığında belirlenebilmektedir.

Araç girişleri sabit seçildiğinde 0 adet/dakika ila 5 adet/dakika aralığında veya belli dönemlerdeki trafik yoğunluğunu temsilen zamana duyarlı seçilirse 06:00 – 10:30 çalışma dönemi içinde 15 dakikalık dönemlerde 0 adet/dakika ila 15 adet/dakika aralığında ayarlanabilmektedir.

Geçiş üstünlüğü olan araçlar, otomobiller ve kamyonlar için araç hızları bağımsız belirlenebilmektedir.

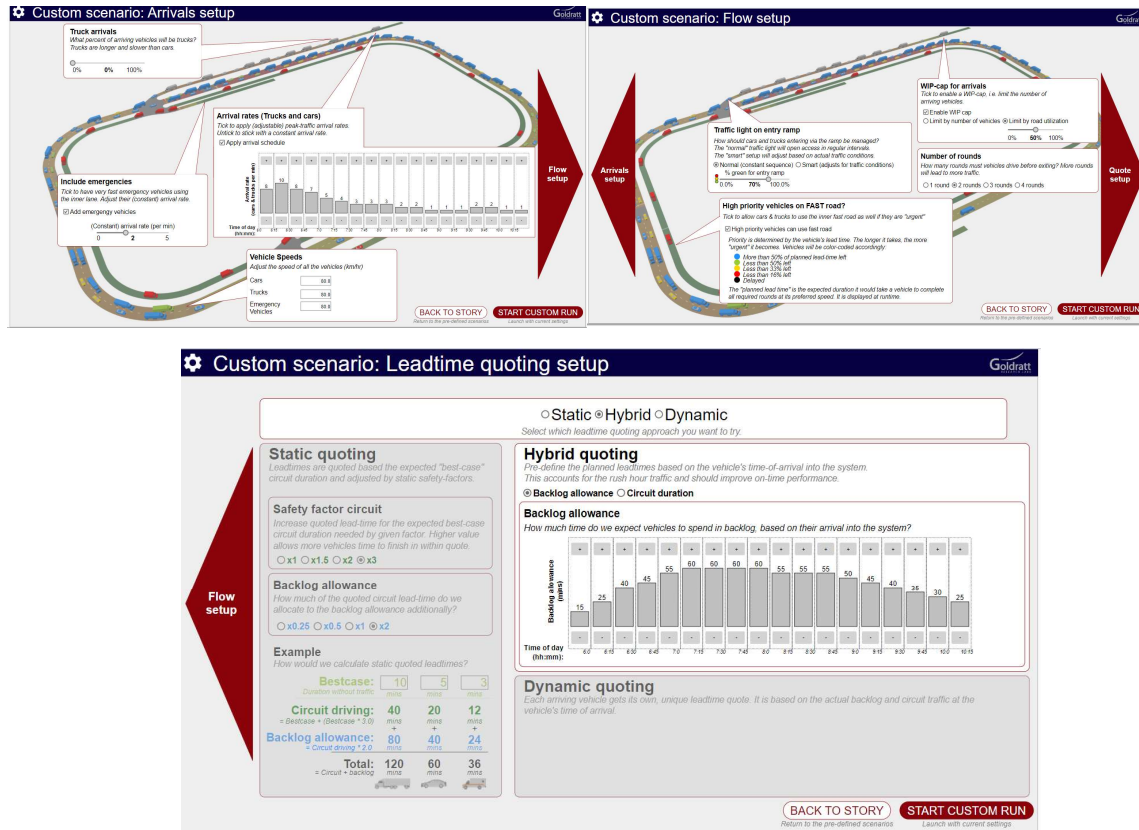
Otoyola katılımdaki trafik ışıkları normal seçildiğinde yeşil yanan zaman yüzdesi parametrik, akıllı seçildiğinde katılım noktasındaki trafik ışığı bölgesinde ve çevre yolunda trafik yoğunluğu %33'ten az iken yeşil, %33-67 aralığında sarı ve %67'den büyükse kırmızı olarak gösterilmektedir. Çalışma prensibi Şekil 3'te gösterilmiştir. Eşik değerler simülatorde gömülüdür ancak gelecekte çalışılan vakaya uygun eşik değerlerinin simülasyonla

modellenecek belirlenmesi uygun olacaktır. Bu çalışmada sadece alternatif bakış açısı gösterilmek istenmiştir.



Şekil 3. Akıllı trafik ışıkları algoritması

Statik kuralda planlanan seyahat süresi her araç için aynı şekilde ve (1) eşitliğinde gösterildiği gibi emniyet faktörlerine uygun olarak hesaplanır. Hibrit kuralda planlanan seyahat süresi hesaplanırken trafik yoğunluğuna göre on beşer dakikalık dilimler halinde girişte bekleme kayıp süresi ve parkurda kalma süresi ayarlanabilir. Dinamik kuralda planlanan seyahat süresi her araç için sisteme giriş anında yol ve trafik durumuna göre otomatik hesaplanır. Parametre ayar ekranları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Parametre ayarlama ekranları

Not: **Arrival setup**: araç girişlerindeki kamyon payı, geçiş üstünlüğü olan araç giriş temposu, araç hızları, 15 dakikalık dilimlerde trafik yoğunluğu tanımlaması. **Flow setup**: yola katılımda sinyalizasyon, yan yol kullanımı, tur sayısı, trafiğe göre yola katılım sınırlaması. **Leadtime quoting setup**: static, hibrit veya dinamik tahmini varış süresi hesaplaması

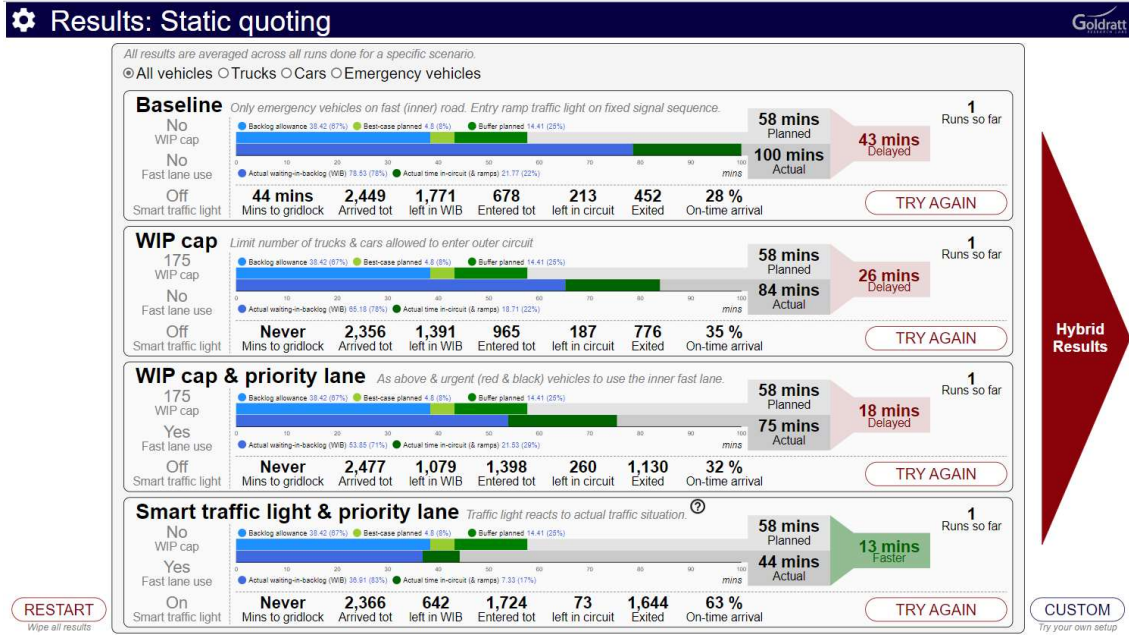
3.3. Simülâtördeki Kriterler

Taranan literatürde kullanılan değerlendirme kriterleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu kriterlerden yol kapasitesi anlamında parkurda kalan ve çevre yoluna katılamayan araç sayıları ve ortalama hız anlamında trafik kilitlenene kadar geçen zaman kriterleri kullanılmıştır.

Tablo 2. Literatürde kullanılan kriterler

Yazarlar	Yayın Tarihi	Kullanılan Kriterler
Pulur	2010	Seyahat süresi, ortalama hız, ortalama gecikme süresi, taşıt sayısı
Merkuryeva, Bolshakovs	2010	Seyahat süresi
Sönmez	2017	Seyahat süresi, yol kapasitesi, ortalama hız
Uludamar, Tüccar	2018	Seyahat süresi, gecikme süresi
Ki, Na, Kim	2019	Seyahat süresi, taşıt sayısı

Ayrıca Şekil 5’te gösterildiği gibi senaryoların sıralı özet tablosunda trafik kilitlenene kadar geçen süre, katılmak isteyen araç sayısı, katılamayan araç sayısı, katılan araç sayısı, çıkan araç sayısı, plana uygun tamamlayan araç yüzdesi, planlanan ve gerçekleşen süre, ortalama gecikme süresi, bu sürelerin görsel dağılımı ve verilen parametre setiyle simülasyonun tekrar sayısı karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 5. Senaryo özet rapor ekranı

Not: **Baseline:** Kıyaslama senaryosu, **WIP cap:** yola katılım sınırlaması, **WIP cap & priority lane:** yola katılım sınırlaması ve yan yol kullanımı, **Smart traffic light & priority lane:** Akıllı sinyalizasyon ve yan yol kullanımı.

Dolayısıyla performans ölçütü olarak seçilen kriterlerin toplu listesi aşağıdaki gibidir:

- Katılamayan araç sayısı – çevre yoluna giremeyerek şehir içi trafiğine yığılanlar
- Parkurda kalan araç sayısı – çevre yolu için kullanım oranı ve kapasite indikatörü
- Çıkan araç sayısı – iş ortamında üretim indikatörü
- Plana uygun tamamlanma %- zamanında teslim performansı
- Ortalama seyahat süresi – iş ortamında akış süresi
- Ortalama gecikme süresi – çözüm alternatiflerinin optimizasyonu için kriter
- Kilitlenme süresi – kırmızı çizgi, trafiğin kilitlenmesi istenmemektedir

3.4. Senaryolar

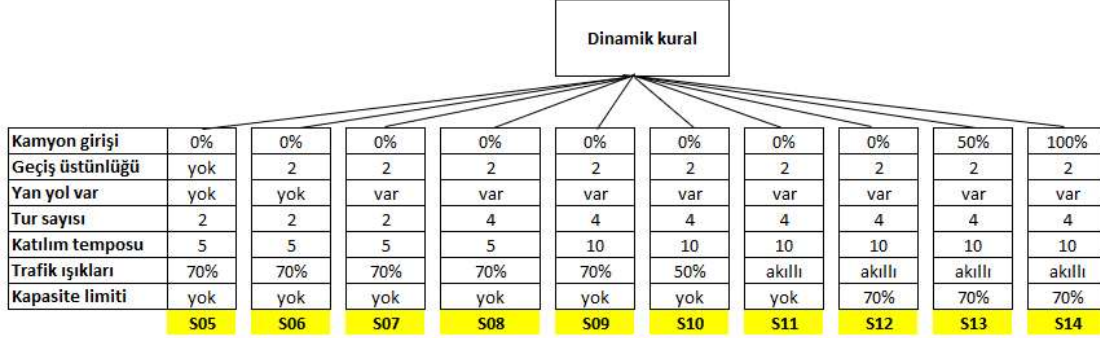
Senaryolar altı adımda kıyaslanmıştır:

Birinci adımda, kıyaslamanın bazını oluşturmak ve simülatörü tanımak üzere başlangıç ayarlarıyla çalıştırılmıştır ve senaryolara sıra numarası verilmiştir (S01-Birinci senaryo).

İkinci adımda, olası iyileştirme seçenekleri seyahat süresi hesaplama kurallarına göre karşılaştırılmıştır. Başlangıç ayarlarıyla sinyalizasyon (a varyantı), yola katılım sınırı (b varyantı), yan yol kullanımı (c varyantı) ve yan yola akıllı sinyalizasyonla katılım (d varyantı) değerlendirilecektir. Senaryolar statik kuralda (S02a, b, c, d), hibrit (S03a, b, c, d) ve dinamik (S04a, b, c, d) olarak numaralandırılmıştır.

Üçüncü adım, İstanbul'daki kamyon trafiğine kapalı herhangi bir çevre yolu canlandırmasıdır. Bu adımda parametreler sırayla değiştirilerek önce trafik yoğunluğu artırılacak, sonra iyileştirme önerileri denenecektir. S05 numaralı dinamik kurallı üçüncü adımın baz senaryosunda kamyon girişi, geçiş üstünlüğü olan araç girişi ve yan yol yoktur, parkurda iki tur atılır, katılım temposu dakikada 5 araçtır, trafik yoğunluğuna göre giriş kısıtlaması yoktur, katılım noktasındaki trafik ışığı katılıma %70 oranında yeşil ışık yakmaktadır. Bu senaryoya sırasıyla dakikada iki adet geçiş üstünlüğü olan araç girişi eklenerek (S06), yan yol eklenerek (S07), tur sayısı ikiden dörde yükseltilerek (S08), katılım temposu dakikada 10 araca yükseltilerek (S09), katılımda yeşil ışık yanma süresi %50'ye düşürülerek (S10), trafik ışıkları

akıllı sisteme çevrilerek (S11), trafik doluluğu %70 olduğunda yola giriş kısıtlaması uygulayarak (S12), giren araçların yarısını kamyon seçerek (S13) ve giren araçların tamamını kamyon seçerek (S14) farklı parametrelerin trafik akışına etkisi değerlendirilecektir. Üçüncü adımın senaryoları Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Son adımın senaryo ağacı

Dördüncü adımda, sadece kamyonlara (ağır vasıtalar) açık bir çevre yolunda yola katılımın yavaşlatılması, hız limitleri, yola katılım sınırlaması ve geçiş üstünlüğü olan araç etkisi sorgulanarak gerçek hayat şartlarına benzer iki alternatif öneri senaryolaştırılmıştır.

Beşinci adımda, sadece kamyon girişli baz senaryo (S05a) ile yan yol kullanımı, yola katılımın yavaşlatılması, akıllı sinyalizasyon kullanımı, katılım sınırlaması, hız limiti sorgulanmıştır.

Altıncı adımda, Karayolları Genel Müdürlüğü’nün 2021 yılı fiili geçiş istatistikleri kullanılarak yol kesitinin mevcut trafik yönetimi kuralları ve bu çalışmada önerilen kurallar karşılaştırılmıştır.

4. Bulgular

4.1. Birinci ve İkinci Adım Senaryoları

Bu adımların baz senaryosu S01’dir. S01, S02a, S03a ve S04a senaryoları benzer karakterdedir. Gerçek hayattakinden farklı olarak, çevre yoluna katılım noktasında trafik ışığı (sinyalizasyon) düşünülmüştür. Statik Kuralda trafik yoğunluğu dikkate alınmamıştır, araçların emniyet paylı olarak hesaplanan varış süresi 58 dakikadır ve “yönetilmeyen” yolda bu süre 100 dakikayı bulmuştur.

Yola trafik yoğunluğunu temsilen rastgele 175 araçlık bir kapasite limiti koyulduğunda trafik akışı iyileşmiştir, farklı kapasite limitleri simülatörle denenebilmektedir (S02b).

Kapasite limitine ilave olarak yan yol, ücretli ve araç-yol-merkez uyumlu bir sistemle yetkilendirilmiş olarak kullanıma açıldığında akış iyileşmiştir (S02c). Ancak ortalama seyahat süresi hala planlanan süreden uzundur.

Çevre yolunu rahatlatırken şehir içinde yığılmalara sebep olabilecek giriş limiti (kapasite) uygulaması yerine tercihli yan yola ilave olarak çevre yolu katılımlarında akıllı trafik sinyalizasyonu denendiğinde en büyük gelişme sağlanmıştır, ortalama seyahat süresi planlanandan kısadır ve yoldan geçen araç sayısı yaklaşık dört katına ulaşmıştır (S02d).

Hibrit kuralda temel farklılık belirli saatlerde trafiğin daha yoğun olmasıdır, dolayısıyla planlanan süre 58 dakikadan 76 dakikaya yükselmiştir. Senaryolar aynı sırayla denendiğinde en iyi sonucun yine tercihli yan yol ve akıllı sinyalizasyonla elde edildiği görülmüştür (S03a, b, c, d).

Dinamik kuralda planlanan süre her araç için o andaki trafik yoğunluğuna göre ayrı ayrı hesaplanmaktadır, dolayısıyla hesaplanan ortalama plan süresi her senaryoda farklıdır ve her durumda statikteki 58 dakika ve hibritteki 76 dakikanın üzerindedir. Buna rağmen ortalama seyahat süresi önceki kurallara benzerlik gösterir. Bununla birlikte planlanan sürede varış oranı ve yolu kullanan araç sayısı yüksektir (S04a, b, c, d).

Toplam 13 senaryonun karşılaştırmalı görünümü Şekil 7’de verilmiştir. Her durumda yola katılımı sınırlamak yerine yan yol kullanımına izin vererek akıllı sinyalizasyon uygulamak daha iyi netice vermiştir.

Birinci ve İkinci Adımlar	Baglangıç	Statik Kural				Hibrit Kural				Dinamik Kural			
	S01 temel	S02a serbest	S02b giriş kısıtlı	S02c giriş kısıtlı + yan yol var	S02d yan yol var + akıllı sinyal	S03a serbest	S03b giriş kısıtlı	S03c giriş kısıtlı + yan yol var	S03d yan yol var + akıllı sinyal	S04a serbest	S04b giriş kısıtlı	S04c giriş kısıtlı + yan yol var	S04d yan yol var + akıllı sinyal
Katılmayan araç sayısı, adet	1.731	1.719	1.460	1.085	649	1.754	1.403	1.038	807	2.004	1.495	868	807
Parkurda kalan araç sayısı, adet	228	213	187	243	68	198	192	246	82	245	192	254	47
Çıkan araç sayısı, adet	461	474	769	1.150	1.643	400	778	1.090	1.518	118	765	1.331	1.551
Plana uygun varış%	28%	28%	33%	34%	64%	36%	37%	52%	94%	37%	60%	61%	81%
Planlanan seyahat süresi (dakika)	58	58	58	58	58	76	76	76	76	151	188	110	76
Ortalama seyahat süresi (dakika)	99	100	84	74	44	104	86	71	48	111	87	59	47
Ortalama gecikme süresi (dakika)	41	43	27	16	-14	29	11	-5	-27	-41	-101	-51	-28
Kilitlenme süresi (dakika)	44	44	yok	yok	yok	43	yok	yok	yok	44	yok	yok	yok

Şekil 7. Temel – Statik – Hibrit – Dinamik senaryo kıyaslamaları

4.2. Üçüncü Adım Senaryoları

Üçüncü adımın baz senaryosu S05’tir. Gerçek hayattaki trafik yoğunluğunu göstermek amacıyla parametreleri Şekil 6’da gösterildiği gibi adım adım ağırlaştırılarak dinamik kural, tercihlili yan yol, yol kapasite limiti ve akıllı sinyalizasyon opsiyonlarının etkinliği incelenmiştir. 10 senaryonun karşılaştırmalı görünümü Şekil 8’de verilmiştir.

S05 numaralı baz senaryoda kamyon, geçiş üstünlüğü olan araç, yan yol kullanımı ve yol kapasite limiti yoktur, 2 turdur, sinyalizasyon yola katılıma %70 izin vermektedir, dakikada 5 araç girişi vardır. Sırayla geçiş üstünlüğü olan araçların dakikada 2 araç temposuyla katılımı (S06), yan yolun kullanıma açılması (S07), tur sayısının daha uzun mesafeleri gözeterek 4 tura çıkarılması (S08) ve katılım temposunun dakikada 5 araçtan 10 araca çıkarılması (S09) sağlandığında ortalama seyahat süresi 100 dakika olmuştur ve 48 dakikada trafik kilitlenmiştir.

İyileştirmek amacıyla sırasıyla katılım noktasındaki sinyalizasyonun katılım izni (yeşil ışık süresi) %70’ten %50’ye düşürüldüğünde (S10), sinyalizasyon trafik yoğunluğuna uyumlu akıllı hale getirildiğinde (S11), trafik yoğunluğu %70’e ulaşınca katılımlar durdurulduğunda (S12) ortalama seyahat süresi 67 dakikaya düşmüş ve trafik kilitlenmemiştir.

Yola kamyon girişine %50 oranında izin verildiğinde (S13), tamamen kamyonlara açıldığında (S14) ortalama seyahat süresi 90 dakikaya kadar yükselmiş, trafik kilitlenmemiştir. Geçiş üstünlüğü olan veya olmayan tüm araçlar 80 km/s ve kamyonlar 60 km/s hız limitleriyle tanımlanmıştır.

Çevre yolunda akışı iyileştirmeye gayret edilirken yola katılmayan araçlar nedeniyle trafik yoğunluğu şehir içine kaymıştır.

Üçüncü Adım	Senaryolar												
	S05 baz	S06 + geçiş üstünlüğü	S07 + yan yol var	S08 + 2 tur daha	S09 + hızlı katılım	S10 - azalan katılım yeşil ışık süresi	S11 + akıllı sinyalizasyon	S12 + %70 trafik yoğunluk limiti	S13 + girişin yarısı kamyon	S14d + girişin tamamı kamyon	S14s + girişin tamamı kamyon	S14h + girişin tamamı kamyon	S15s yoğunluk limiti yok
Katılmayan araç sayısı, adet	74	497	4	870	2.018	1.860	1.229	1.284	1.721	1.876	1.692	1.911	1.824
Parkurda kalan araç sayısı, adet	256	257	147	306	284	282	158	178	179	166	165	164	176
Çıkan araç sayısı, adet	783	909	1.510	503	546	627	1.352	1.345	968	719	792	737	825
Plana uygun varış%	45%	61%	52%	65%	71%	71%	71%	74%	68%	73%	79%	32%	78%
Planlanan seyahat süresi (dakika)	35	60	24	157	425	424	149	156	240	364	145	76	146
Ortalama seyahat süresi (dakika)	28	44	17	81	100	92	66	67	82	90	87	92	87
Ortalama gecikme süresi (dakika)	-7	-16	-7	-76	-325	-332	-83	-89	-158	-274	-59	16	-58
Kilitlenme süresi (dakika)	224	135	yok	92	48	72	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok

Şekil 8. Dinamik senaryo kıyaslamaları

4.3. Dördüncü Adım Senaryoları

Dördüncü adımın baz senaryosu S14d'dir. Bu adım kamyon trafiğine açık bir çevre yolunu canlandırmaktadır. Planlanan süredeki farklılıkları değerlendirmek üzere S14 senaryosu dinamik (S14d), statik (S14s) ve hibrit (S14h) kurallı olarak denenmiştir.

Pratik hayata uygunluk açısından dinamik yerine benzer performanstaki statik kural tercih edilerek şehir içi trafiği zorlamamak için yol kapasite limiti kaldırılmıştır (S15s).

Kamyonların hız limiti 60 km/s yerine 80 km/s çıkarıldığında belirgin bir fark görülmemiştir (S16s).

Kamyon hız limiti 60 km/s tanımlanarak yan yol kullanımından vazgeçildiğinde (S17s) hedefe ulaşan araç sayısı artarken ortalama seyahat süresinde sadece 3 dakika uzama olmuştur.

Geçiş üstünlüğü olan araçlar çevre yoluna alınmadığında (S18s) ortalama seyahat süresi uzamış görülmektedir. Şekil 9'da alternatif kurguların karşılaştırması gösterilmiştir.

Alternatif Kurgular	Senaryolar								
	S14d + girişin tamamı kamyon	S14s + girişin tamamı kamyon	S14h + girişin tamamı kamyon	S15s yoğunluk limiti yok	S16s kamyon hızı 80km/s	S17s yan yol yok	S18s geçiş üstünlüğü yok	S19s öneri akıllı sinyalizasyon	S20s öneri %70 katılım serbestisi
Katılamayan araç sayısı, adet	1.876	1.692	1.911	1.824	1.885	1.865	1.819	948	416
Parkurda kalan araç sayısı, adet	166	165	164	176	169	42	109	15	135
Çıkan araç sayısı, adet	719	792	737	825	791	925	406	930	376
Plana uygun varış%	73%	79%	32%	78%	60%	79%	77%	100%	24%
Planlanan seyahat süresi (dakika)	364	145	76	146	114	145	154	77	77
Ortalama seyahat süresi (dakika)	90	87	92	87	84	87	102	40	120
Ortalama gecikme süresi (dakika)	-274	-59	16	-58	-29	-59	-52	-37	43
Kilitlenme süresi (dakika)	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	43

Şekil 9. Alternatif kurgu kıyaslamaları

Dolayısıyla çevre yolu trafik akışını düzenlemek üzere denenen senaryolar arasından gerçek hayatı temsil edebilecek aşağıdaki gibi bir öneri (S19s) hazırlanmıştır:

- Giren araçların tamamı kamyondur, seyir hızı 60 km/s seçilmiştir,
- Hibrit (sabah saatlerinde yoğun ve sonrasında seyreden trafik) akışlıdır,
- Geçiş üstünlüğü olan araçlara izin verilmemiştir (ortalama süre hesabını bozmamak içindir),
- Yan yol kullanımına izin verilmemiştir,
- Yola katılımda akıllı sinyalizasyon kullanılmıştır (TIR parklarında bekletilerek, partiler halinde trafiğe çıkışa izin verilen),
- Yola katılımda kapasite limiti yoktur (katılımlar sinyalizasyonla düzenlenir),
- 2 turlu (pilot uygulamayı temsilen) statik (x3 emniyet faktörü ve x2 bekleme payıyla) yapıdır.

Bu senaryo için kıyaslama senaryosunda yola katılımda %70 serbestlik (fiilen yola katılım tamamen serbesttir ancak yoldaki en yoğun trafik her zaman katılım ve çıkış noktalarında görülmektedir) kullanılacaktır (S20s).

S19s öneri senaryosu, kıyaslama için yapılan S20s senaryosundan daha başarılı görünmektedir.

4.4. Beşinci Adım Senaryoları

Beşinci adımın baz senaryosu S05 senaryosunun tamamı kamyon girişli versiyonu olan S05a'dır. Sıralı senaryolarda parametre değişiklikleri tamamı kamyon girişli, geçiş üstünlüğü olan araçlara izin verilmeyen baz senaryo (S05a), sadece yan yola izin verildiğinde (S05b), sadece katılım yavaşlatıldığında (S05c), sadece akıllı sinyalizasyon kullanıldığında (S05d),

sadece trafik yoğunluğu %70'e ulaştığında katılımlar engellendiğinde (S05e), sadece kamyonlara izin verilen hız limiti yükseltildiğinde (S05f) denenecek ve önerilen yöntemin karşılaştırılabilir olması açısından hibrit olmayan versiyonuyla (S19s-) karşılaştırılacaktır. Karşılaştırma sonucu Şekil 10'da verilmiştir. Önerilen S19s- senaryosu, baz senaryoya (S05a) göre daha başarılıdır.

Sadece Kamyonlu, geçiş üstünlüğü olmayan senaryolar	Senaryolar						
	S05a baz	S05b yan yol var	S05c azalan katılım yeşil ışık süresi	S05d akıllı sinyalizasyon	S05e %70 trafik yoğunluk limiti	S05f kamyon hızı 80km/s	S19s- hibrit olmayan
Katılamayan araç sayısı, adet	894	820	17	102	607	668	102
Parkurda kalan araç sayısı, adet	141	190	57	48	128	129	48
Çıkan araç sayısı, adet	194	623	1.087	994	502	440	994
Plana uygun varış%	38%	37%	100%	100%	50%	39%	100%
Planlanan seyahat süresi (dakika)	77	77	77	77	77	58	77
Ortalama seyahat süresi (dakika)	100	73	13	20	77	78	20
Ortalama gecikme süresi (dakika)	23	-4	-64	-57	0	20	-57
Kilitlenme süresi (dakika)	45	44	yok	yok	yok	yok	yok

Şekil 10. Alternatif kurgu kıyaslamaları

4.5. Altıncı Adım Senaryosu

Altıncı adımın baz senaryosu 2021 yılı fiili geçiş kayıdır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2021 yılı kayıtlarına göre devlet yolları 1. bölgede yer alan İstanbul ili, 020-06 KKNO, 1 numaralı dilim ile tanımlanan 24 km uzunluktaki kesitte izlenen günlük ortalama geçişler 8.334 adet araba (100 km/s ortalama hız ve 5,8 adet/dakika yoğunluk) ve 2.771 adet kamyon/otobüs (80 km/s ortalama hız ve 1,9 adet/dakika yoğunluk) şeklindedir (KGM-YOGT, 2022).

Söz konusu kesitte yan yol yoktur, acil araç çıkışı ihmal edilecek seviyededir, iş trafiğinden etkilenen bir bölge değildir ve yola katılımlar sabit trafik ışıklı kavşaklardır. Bu şartlarda gerçek durum ve akıllı sinyalizasyon olmak üzere iki kurgu karşılaştırılmış, sonuçları Şekil 11'de verilmiştir.

Sadece akıllı sinyalizasyon uygulamasıyla kesitten 4 saat içinde geçen araç sayısının 459 dan %220 artarak 1469 araca yükseleceği, seyahat süresinin 62 dakika kısılacağı öngörülmüştür. Bağlantı yollarında biriken araç sayısının 1264 adetten %75 azalarak 324 adede düşeceği, dolayısıyla şehir içine yansıyan trafik sıkışıklığının azalacağı tahmin edilmiştir.

İstanbul 020-006 Dilim1 24km kesit (2021)	Kurgular		Gelişme	
	Fiili baz	Öneri akıllı sinyalizasyon		
Katılamayan araç sayısı, adet	1.264	324	74%	azalmıştır
Parkurda kalan araç sayısı, adet	165	50	70%	azalmıştır
Çıkan araç sayısı, adet	459	1.469	220%	artmıştır
Plana uygun varış%	26%	87%	235%	artmıştır
Planlanan seyahat süresi (dakika)	49	49	0%	aynıdır
Ortalama seyahat süresi (dakika)	92	30	67%	azalmıştır
Ortalama gecikme süresi (dakika)	43	-19	100%	azalmıştır
Kilitlenme süresi (dakika)	55	yok	100%	azalmıştır

Şekil 11. İstanbul 020-06 KKNO ve 1.dilim için kurgu kıyaslamaları

5. Tartışma

Gelişmekte olan ülkelerde finansal kaynaklar kıttır ve bütçenin topluma en yüksek faydayı sağlayacak şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu ülkelerde aynı zamanda önemli ölçüde kırsaldan kente nüfus hareketi vardır, eğitim – sağlık – trafik – asayiş gibi her konuda sorunlar çıkabilmektedir. Büyük ölçekli altyapı yatırımı gerektirmeden, mevcut altyapıyla trafik akışı iyileştirilebilir.

Pulur'un çalışmasında köprü gişelerindeki geçiş sisteminin kartlı yerine otomatik geçiş sistemi olacak şekilde düzenlenmesiyle seyahat süresinde %47 azalma ve yolu kullanan taşıt sayısında %10 artış öngörülmüştür (Pulur, 2010). Çalışmamızda, KGM verisiyle yapılan denemede seyahat süresinde %67, taşıt sayısında %220 artış tahmin edilmiştir.

Sönmez'in çalışmasında seyahat süresi ve ortalama hız tahmini yapılmıştır ancak herhangi bir karşılaştırma yoktur (Sönmez, 2017). Çalışmamızdaki karşılaştırma mevcut durum ve öneri için simülör sonuçlarının karşılaştırmasıdır, saha çalışması değildir.

Uludamar ve Tüccar'ın çalışmasında döner kavşakta iyileştirme yapılarak seyahat süresinde %14.7 azalma öngörülmüştür (Uludamar ve Tüccar, 2018). Çalışmamızda seyahat süresindeki azalma tahmini %67'dir.

Gelişmiş dünya metropollerinde sensörler ve komuta merkezi modeliyle trafik yoğunluğu izlenmektedir (Pulur, 2010). Bu durumda köprülül kavşak veya daha geniş yollar gibi yüksek yatırım gerektiren seçenekler yerine mevcut trafik izleme yapısına eklenen akıllı sinyalizasyon daha etkin olacaktır (Uludamar ve Tüccar, 2018). Bulgularımız bu çalışmalarla paraleldir ve akıllı sinyalizasyon için farklı bir algoritma önerisi sunulmuştur.

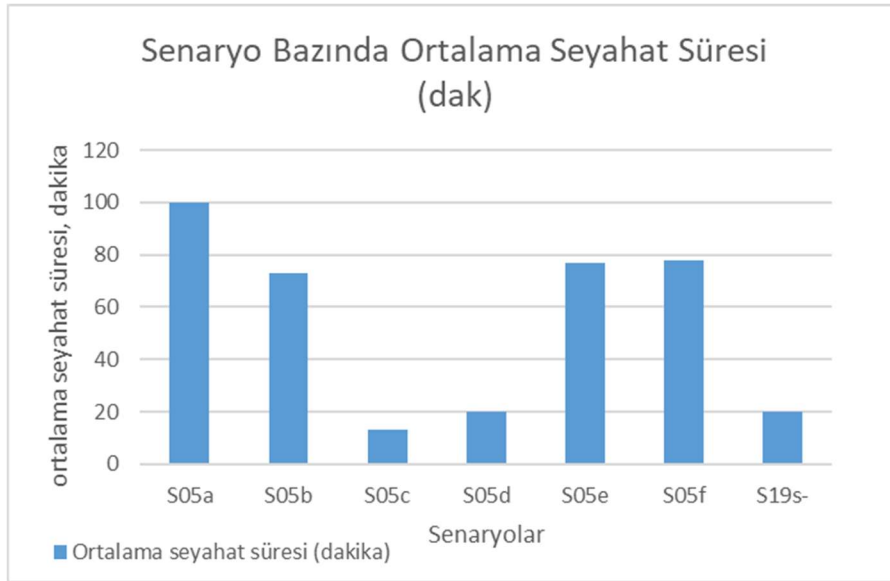
Ayrıca alışılmış uygulamalardan farklı olarak emniyet şeridini yasaklamak yerine ücretli-tercihli geçişe tahsis etmek, yan yol kullanımını akıllı sisteme dahil olan araçlar için ücrete tabi hale getirmek, otoyol üzerinde sıkışıklık yaratan katılım noktalarında sinyalizasyon uygulamak gibi pratikte denenmemiş ve literatürde karşılaşılmamış yöntemleri değerlendirmekte yarar vardır (Goldratt-Research-Labs, 2023).

Bu çalışmanın limitasyonu özgün bir model yerine simülasyon deneyimi olmayan araştırmacıların öğrenme sürecini hızlandırmak amacıyla hazır bir paket yazılım tercih edilmesidir. Böylece tekrar edilebilirlik ve kıyaslanabilirlik kolaylaştırılmıştır.

Uygulama trafik konulu olmakla birlikte üretim ortamına uyarlanabilir. Parkuru üretim ortamı; giriş yapan otomobilleri rutin siparişler, kamyonları geniş kapsamlı projeler, geçiş üstünlüğü olan araçları acil siparişler; araç giriş temposunu satış hızı; parkurdan geçiş süresini akış süresi, çıkan araç sayısını üretim adedi olarak düşünmek mümkündür. Bu durumda yan yol opsiyonu üretimde kapasite artışı sağlayan fazla mesai, taşeron, süreç iyileştirmesi gibi konulara; akıllı sinyalizasyon planlamadaki çizelgelemeye ve yola katılım sınırlaması işletme içindeki stokları sınırlandırmaya benzetilebilecektir. Dolayısıyla küçük ölçekli bir üretim kesiti için olası iyileştirmeler trafik simülörleriyle denenebilecektir.

6. Sonuç ve Öneriler

Gerçek hayata benzerliği nedeniyle S19s senaryosu baz alınmıştır. Bu senaryoda sadece yük-yolcu taşıyan büyük araçlar vardır, 60km/s hız limiti uygulanır, mesai başlama-bitiş saatlerinde artan trafik yoğunluğu görülür, geçiş üstünlüğü olan araçlara izin verilmez, yan yol kullanılmaz, yola katılımda akıllı sinyalizasyon uygulanır ve yola katılım sınırlaması yapılmaz. Bu senaryodan her defasında bir önlem değiştirilerek trafik akışına etkisi ortalama seyahat süresi üzerinden Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Senaryo bazında ortalama seyahat süreleri

Dolayısıyla araştırma sorusu olan “İstanbul’da denenmeyen trafik akışı düzenleme alternatiflerinin çevre yolunda trafik akışına etkisi” olumlu değerlendirilmiştir. Bu bağlamda;

- Transit trafiği şehir dışında tutacak çevre yolu uygulamasının trafik yoğunluğuna duyarlı akıllı sinyalizasyonla desteklenmesi önerilmektedir. Bunu sağlamak üzere kent girişindeki lojistik merkezlerin konumu ve araçların bekleyebileceği park alanları oluşturulmalıdır.
- Yan yolları araç-yol-merkezi yönetim birimi entegrasyonu ile farklı yol kesitleri ve araç tipleri (HGS sınıfı gibi) için sisteme abone olma haline göre ücretlendirilerek tercihlili yol haline getirme ve otoyol katılımlarında akıllı sinyalizasyon alternatifleri üzerinde düşünülmelidir.

Gelecek araştırmalarda araç-yol-merkez ve navigasyon-ödeme destekli Akıllı Sistem Entegrasyonu ile yönlendirme yerine ücretlendirme olanağı sağlayan sistemler özgün simülasyon modelleriyle değerlendirilebilir.

Etik Kurul Onay Beyanı

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

Kaynakça

- Akkaya, S. ve Engin, T. (2022). Trafik simülasyon yazılımlarına genel bakış. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(2), 157-168. doi:10.51513/jitsa.1090209
- Goldratt-Research-Labs. (2023). *Harmony Apps- Traffic Flow Simulator*. 15 Mart 2023 tarihinde Harmony-change-simulators: <https://harmonyapps.com/apps/harmony-change-simulators/> adresinden alındı
- Karayolları Genel Müdürlüğü - YOGT. (2022). *2021 Trafik ve Ulaşım Bilgileri*. Ankara: KGM.
- Ki, Y., Na, B. ve Kim, B.-I. (2019). Travel time prediction-based routing algorithms for automated highway systems. *IEEE Access*, 7, 121709-121718. doi:10.1109/ACCESS.2019.2937826
- Köylü, M. ve Önder, M. (2017). Karmaşıklık kuramı ve kamu yönetiminde uygulanması: Yalova kentiçi ulaşım hizmetlerinin dijital modelleme ve simülasyonu. *S. Demirel Üniversitesi İİB Fakültesi Dergisi*, 22 (Kayfor15 Özel Sayısı), 1707-1726.
- Kuklova, J. (2021). Highway modeling in AnyLogic for multi-agent approach to smart city management. *Smart Cities Symposium Prague 2021*. Prague: IEEE Computer Society. doi:10.1109/SCSP52043.2021.9447402
- Kuklova, J. ve Pribyl, O. (2019). Framework model in AnyLogic for smart city ring road management. *Smart Cities Symposium 2019*. Prague: IEEE Computer Society.
- Merkuryeva, G. ve Bolshakovs, V. (2010). Vehicle schedule simulation with AnyLogic. *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (s. 169-174). Riga: IEEE Computer Society. doi:10.1109/UKSIM.2010.38
- Öztürk, N. B. (2006). *Akıllı Trafik Sistemleri* (yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Pulur, B. (2010). *Trafik Kontrol Merkezinin Yapısı ve İşlevleri, Gelişmiş Dünya Metropollerindeki Ulaşım Yönetim Sistemi ile Trafik Kontrol Merkezleri* (yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Sönmez, N. (2017). *Trafik Sensör Verileri kullanılarak Trafik Akış Tahmini: İstanbul Şehri İçin Bir Uygulama* (yayımlanmamış yüksek lisans tezi). TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, İstanbul.
- Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları*. (2023). 15 Nisan 2023 tarihinde <https://www.kureselamaclar.org/amaclar/surdurulebilir-sehirler-ve-topluluklar/> adresinden alındı
- Uludamar, E. ve Tüccar, G. (2018). Comparison of traffic densities at different signalization timings in roundabouts. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 217-223. doi:10.28948/ngumuh.386593