

Kentsel Kavşaklarda Düşük Maliyetli Düzenlemelerin Çok Ölçütlü Değerlendirmesi

Ali Sercan KESTEN^{1*}, Elif Nisa YILDIRIM², Murat AYTAR³

^{1,2,3} İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

^{1*} sercankestent@gtu.edu.tr, ² elifyildirim2021@gtu.edu.tr, ³ m.aytar2020@gtu.edu.tr

(Geliş/Received: 29/10/2025;

Kabul/Accepted: 09/02/2026)

Öz: Kentsel kavşaklar, trafik güvenliği, akış verimliliği ve çevresel etkiler açısından kritik olup; uygun olmayan geometri ve yetersiz sinyal süreleri nedeniyle tıkanıklıklara ve dolayısıyla ek yakıt tüketimi, emisyonlar ve gecikmelere yol açmaktadır. Bu nedenle, verimli trafik akımını sağlamak ve emisyonları azaltabilmek için kavşakların performanslarının ölçülmesi gereklidir. Bu çalışmada, kent içinde yer alan, yaya-araç ve araç-araç etkileşimlerinin yoğun olduğu bir düğüm noktası olan kavşak bölgesindeki sorunlar tespit edilerek çözüm önerilerinin kazanç/maliyet oranları kıyaslanmıştır. Mevcut kavşak performansı hem analitik yöntem hem de trafik mikro-simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiştir. Alternatif tasarımlar optimize edilmiş sinyal senaryosu ve dört farklı geometrik tasarımdan oluşmaktadır. Tüm tasarımlar için gecikme, kuyruk uzunluğu, emisyon ve hizmet seviyesi gibi temel performans göstergeleri hesaplanmıştır. Tasarım alternatiflerinin maliyetleri ve yarattığı kazançların parasal karşılıkları hesaplanarak fayda/maliyet oranları kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, özellikle Alternatif Tasarım 3 ve 4, mevcut durum ve sinyal optimizasyonlu senaryoya kıyasla ortalama araç gecikmesini 140 saniyenin üzerinden 20 saniyenin altına düşürmüş, LOS seviyesini F'den C'ye yükseltmiş ve emisyonlarda %70'in üzerinde azalma sağlamıştır. Alternatif Tasarım 3, düşük maliyetiyle en verimli çözüm olurken, Alternatif Tasarım 4, en yüksek operasyonel ve çevresel iyileşmeyi sunmuştur. Bu çalışma, düşük maliyetli kavşak düzenlemelerinin, karmaşık ve maliyetli tasarımlara kıyasla yatırım verimliliği açısından daha avantajlı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Düşük maliyetli düzenlemeler, kentsel kavşaklar, çok ölçütlü değerlendirme

Multi-Criteria Evaluation of Low-Cost Improvements at Urban Intersections

Abstract: Urban intersections are pivotal for traffic safety, flow efficiency, and environmental performance; however, inadequate geometry and insufficient signal timings often cause congestion, leading to excessive fuel consumption, emissions, and delays. This study focuses on an urban intersection characterized by intense pedestrian-vehicle and vehicle-vehicle interactions. Existing operational problems were identified, and multiple improvement alternatives were evaluated through both analytical methods and traffic micro-simulation. The proposed alternatives included an optimized signal timing scenario and four distinct geometric redesigns. For each scenario, key performance indicators—delay, queue length, emissions, and level of service (LOS) were measured, and benefit/cost ratios calculated by comparing implementation costs with the monetary value of achieved benefits. Simulation results revealed that Alternatives 3 and 4 significantly outperformed the existing condition and the optimized signal scenario, reducing average vehicle delay from over 140 seconds to below 20 seconds, improving LOS from F to C, and decreasing emissions by more than 70%. Alternative 3 emerged as the most cost-effective due to its low implementation cost, while Alternative 4 delivered the greatest operational and environmental improvements. These findings demonstrate that low-cost geometric modifications can provide substantial performance gains and may offer a more efficient investment compared to high-cost intersection designs.

Key words: Low-cost improvements, urban intersections, multi-criteria evaluation

1. Giriş

Kentsel ulaşım sistemleri, özellikle gelişmekte olan ülkelerde artan nüfus, hızlı kentleşme ve motorlu taşıt kullanımındaki yükseliş nedeniyle giderek daha karmaşık ve sorunlu hale gelmektedir. Gelişigüzel yapılaşma, yetersiz altyapı, kontrolsüz yoğunluk artışı ve düzensiz toplu taşıma kullanımı; şehir içi trafik sistemlerinin hem kapasite hem de güvenlik açısından alarm verici düzeyde zorlanmasına yol açmaktadır [1]. Bu durum özellikle kavşaklar gibi kritik geçiş noktalarında gecikmelere, çatışma potansiyeline ve sistemsel verimsizliğe neden olmaktadır [2]. Kentsel alanlarda kavşaklar, trafik güvenliği açısından en kritik noktalar arasında yer almaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yayımlanan 2023 yılı trafik kazası istatistiklerine göre, kent içi toplam kaza sayısının yaklaşık %42'si kavşaklarda meydana gelmiştir. 2024 yılına ait KGM verilerinde de benzer bir tablo ortaya çıkmış; kent içindeki toplam kazaların yaklaşık %42,1'inin kavşaklarda gerçekleştiği belirlenmiştir. İki yıl arasındaki oranların neredeyse aynı seviyede seyretmesi, kavşak kaynaklı kaza oranlarında belirgin bir azalma olmadığını ve bu durumun süreklilik arz ettiğini göstermektedir. Bu bulgu, kentsel ulaşım

* Sorumlu yazar: sercankestent@gtu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8522-3382, ² 0009-0005-7581-0029, ³ 0009-0007-5335-9390

planlamasında kavşak güvenliğine yönelik önlemlerin yeterli düzeyde etkili olmadığını ve müdahale gerektiren bir alan olduğunu ortaya koymaktadır [3, 4].

Gelişmiş ülkelerde trafik yönetim sistemleri teknolojik çözümlerle desteklenirken, gelişmekte olan ülkelerde ise daha sınırlı kaynaklarla verim artırıcı, düşük maliyetli müdahale yöntemleri geliştirilmektedir [5]. Türkiye'nin özellikle büyükşehirlerdeki işlevselliğini yitirmiş kavşaklarda, yüksek maliyetli ve uzun süreli müdahaleler yerine uygulanabilir geometrik düzenlemeler tercih edilebilmektedir. Bu düzenlemeler, düşük maliyetli, kısa süreli ve mevcut yapılaşmada kolay uygulanabilir niteliktedir [6]. Bu kapsamda, "dolaylı sağa dönüş" gibi basit geometrik düzenlemeler dahi yoğun saatlerde kavşaklardaki tıkanıklığı önemli ölçüde azaltabilmektedir [7]. Yine benzer şekilde, sinyal fazlarının düzenlenmesi ve yaya-araç etkileşiminin dikkatle planlanması; kavşakların performansını artırırken, kaza riskini de düşürdüğü gözlemlenmiştir [8].

Kavşak performansını etkileyen temel faktörler arasında taşıt hacmi, ağır taşıt oranı, yaklaşım geometrisi ve sinyal süresi düzenlemeleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda ağır taşıtların artışının kavşaklardaki gecikme süresini ciddi biçimde artırdığı gözlemlenmiştir [9, 10]. Buna ek olarak sinyalizasyon optimizasyonu, kentsel kavşaklarda trafik akışını iyileştirmek ve bekleme sürelerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli bir uygulamadır [11]. Sinyal süresi optimizasyonu, mevcut geometrik yapının değiştirilmesine gerek kalmadan kavşak verimliliğini önemli ölçüde artırabilmektedir [12]. Ayrıca Lagos kentindeki trafik sıkışıklığına dair yapılan analitik bir çalışmada ise; yetersiz yol kapasitesi, sinyal koordinasyon eksikliği ve zayıf altyapı planlaması başlıca sebepler arasında sıralanmıştır [1].

Trafik sıkışıklığının operasyonel etkilerinin ötesinde ciddi çevresel çıktıları da söz konusudur. Fan ve arkadaşları [13], sinyalle kavşaklarda ağır vasıtaların ve sola dönüş hareketlerinin emisyonlar üzerindeki etkisini incelemiş ve uygun optimizasyonun, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Sinyal kontrol algoritmalarının performansı ise, taşıt-altyapı (V2I) haberleşmesinin güvenilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu alanda yapılan çalışmalar, bu iletişimin doğruluğu azaldıkça sinyalizasyon verimliliğinin de ciddi oranda düştüğünü ortaya koymuştur [14]. Bununla birlikte, kentsel kavşaklardaki yaya güvenliği hâlâ en kritik konulardan biri olarak öne çıkmaktadır. Hindistan'da orta büyüklükteki bir şehirde yapılan bir çalışmada, farklı arazi kullanımı tiplerinin yaya güvenliğini nasıl etkilediği detaylı biçimde analiz edilmiş; sonuçta sinyal sürelerinin ve geçiş zamanlarının yaya güvenliği açısından merkezi rol oynadığı vurgulanmıştır [15]. Özen [2], dört kollu sinyalle kentsel kavşaklarda gerçekleşen çarpışmaların sıklığını etkileyen faktörleri incelemiştir ve yaklaşım geometrisi, trafik hacmi ve sinyal sürelerinin çarpışma sayısı üzerinde önemli bir belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda, sinyal değişim sürelerinin doğruluğu da hem yayalar hem de taşıtlar için kritik olup, yanlış ayarlanan sarı ve temizleme sürelerinin çarpışma riskini artırabileceği bilinmektedir [8].

Yaibok ve ekibinin yaptığı mikro-simülasyon destekli analiz çalışması, şehir içi kavşaklarda önerilen tasarım senaryolarının güvenlik performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuş ve alternatiflerin sayısal çıktılarla kıyaslanmasının önemine dikkat çekmiştir [16]. Raji & Smith [17], yaptığı kapsamlı bir saha çalışması ile yol çizgilime, sinyal güncellemesi ve kavşak yönlendirme gibi düşük maliyetli trafik mühendisliği düzenlemelerinin, yatırım başına 185 kat ekonomik fayda sağladığı tespit edilmiştir.

Ocakdan [18] tarafından yürütülen çalışmada, düşük maliyetli sinyal optimizasyonunun kısa vadede kavşak performansını artırmak ve gecikmeleri azaltmak için etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Buna karşın, talebin sürekli arttığı kentsel arterlerde yalnızca sinyal sürelerinin iyileştirilmesinin uzun vadede yeterli olamayacağı da ortaya konmuştur. Bu nedenle, sinyal optimizasyonuna ek olarak yapılacak basit geometrik düzenlemelerin; kapasite artışı, trafik akışının dengelenmesi ve güvenliğin iyileştirilmesi açısından önemli katkılar sağlayabileceği belirlenmiştir.

Promotes Saha [19] tarafından yürütülen bu kentsel çalışmada, sınırlı bütçeyle en etkili güvenlik önlemlerini belirlemek için bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Düşük maliyetli önlemler arasında; yatay ve düşey işaretlemeye iyileştirmeler ve sinyal iyileştirme düzenlemeleri yer almaktadır. Buna göre, yaklaşık 81.000 \$ yatırımla, beş yıl içinde 61'i ölümlü ve yaralanmalı olmak üzere 164 kazanın önlenmesi hedeflenmiştir. Kazalardaki azalmanın 15 milyon dolarlık bir kazanç sağlayacağı öngörülmüştür. Dolayısıyla, harcanan her 1 \$ için tahmini olarak 185 \$ ekonomik fayda sağlanacağı değerlendirilmiştir.

Raji, R., & Smith, S. [17], düşük maliyetli trafik mühendisliği müdahalelerinin kaza oranları ve trafik performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Söz konusu raporda; sinyal görünürlüğünün artırılması, zemin işaretlemeleri, yönlendirme levhaları, geometrik iyileştirmeler ve park yasağı uygulamaları gibi düzenlemelerin, özellikle kavşaklarda uygulandığında toplam kazalarda %50'ye, yaralanmalı kazalarda ise %60'a varan azalmalar sağladığı vurgulanmıştır. Detroit ve Grand Rapids gibi şehirlerde uygulanan bu stratejilerin fayda/maliyet oranlarının 15:1 ve 16:1 seviyelerine ulaştığı, yani yapılan her 1 birimlik yatırıma karşılık 15 birimden fazla

toplumsal fayda elde edildiği raporlanmıştır. Düşük maliyetli mühendislik çözümlerinin kısa sürede uygulanabileceğini ve yüksek etki düzeyiyle dikkat çekici sonuçlar doğurabileceğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma, kentsel bir alanda yer alan, yüksek taşıt ve yaya talebine maruz kalan, işlevsel olarak dönel kavşak niteliği taşıyan bir çoklu kavşak koridorunda gözlemlenen operasyonel problemleri incelemekte ve performans iyileştirmesi için uygulanabilir çözüm önerileri geliştirmektedir. Çalışma alanı, Şekil 1’de gösterilen uydu görüntüsünde de görülebileceği üzere, bir ana arter ile çeşitli tali yolların birleştiği, çevresinde eğitim kurumları ve toplu taşıma duraklarının yoğunlaştığı karmaşık bir trafik yapısına sahiptir. Çalışma kapsamında, ilk olarak mevcut trafik performansı bir trafik mikro-simülasyon programı aracılığıyla altı farklı senaryo test edilmiştir: mevcut durum, Webster yöntemiyle optimize edilmiş sinyal planı ve dört farklı alternatif geometrik tasarım. Bu senaryoların her biri, gecikme, kuyruk uzunluğu, emisyon ve hizmet seviyesi gibi temel göstergelerle değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı; düşük maliyetli, uygulanabilir düzenlemelerle kentsel kavşak performansında sağlanabilecek iyileştirme potansiyelini ortaya koymak ve teorik yaklaşımlarla saha uygulamaları arasında köprü kurarak, karar vericilere gerçekçi çözüm önerileri sunmaktır.

2. Metot

2.1. Alan tanıtımı ve mevcut durum analizi

Bu çalışmada incelenen yol koridoru, Kocaeli ili Çayirova ilçesinde, Gebze Teknik Üniversitesi yakınında yer alan ve çok işlevli ulaşım bağlantıları içeren kentsel bir arterdir. Bayramoğlu Caddesi ve bağlantılı yollar üzerinden şekillenen koridor, Tuzla, Darıca ve Çayirova ilçeleri arasında hem bölgesel hem de yerel düzeyde yoğun taşıt ve yaya trafiğine hizmet vermektedir. Çevredeki eğitim kurumları ve toplu taşıma istasyonları, değişken trafik talepleriyle birlikte karmaşık bir ulaşım yapısı ve güvenlik sorunları oluşturmaktadır.

Kavşaklardaki trafik hareketlerinin analizinde, taşıt güzergâhları yaklaşım bazlı olarak sınıflandırılmıştır. Bu güzergâhlar, koridor içindeki başlangıç ve bitiş (origin–destination) noktalarına göre araç manevralarını temsil etmektedir. Geometrik yapı ve saha gözlemleri sonucunda 13 farklı güzergâh tanımlanmış; her bir yaklaşım kolu (Yaklaşım 1–8) numaralandırılarak giriş-çıkış yönleri belirlenmiştir (Şekil 1). Tüm hareketler yön, yaklaşım ve manevra türüne göre özetlenmiş; 13 rota Tablo 1’de detaylı biçimde sunulmuştur.



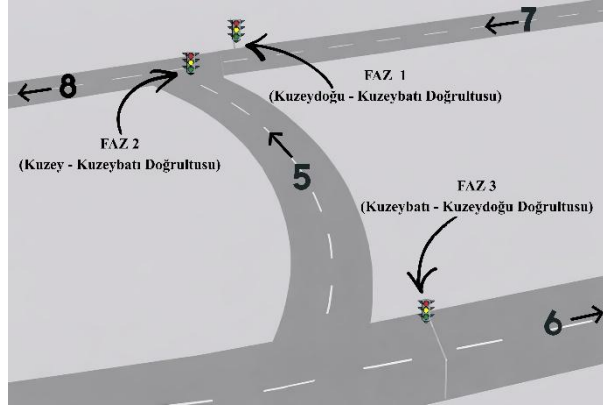
Şekil 1. Taşıt yaklaşımlarının numaralandırılmış görünümü ve oklarla gösterilen giriş-çıkış yönleri.

Tablo 1. Yön, giriş-çıkış yaklaşımı ve manevra türü tablosu.

Hareket Rotası	Başlangıç-Bitiş	Tanım
1–4	Bayramoğlu Caddesi → 2254. Sokak	Ana yoldan tali yola sağa dönüş hareketi
1–5	Bayramoğlu Caddesi → U-dönüşü	Sinyalize edilmiş U-dönüş bölgesine sola dönüş hareketi
1–6	Bayramoğlu Caddesi → Bayramoğlu Caddesi	Ana koridor üzerinde düz ilerleyiş
2–4	Bayramoğlu Yan yolu → 2254. Sokak	Yan yoldan tali yola sağa dönüş hareketi
2–5	Bayramoğlu Yan yolu → U-dönüşü	Yan yol yaklaşımı üzerinden sola dönüş/U-dönüş
2–6	Bayramoğlu Yan yolu → Bayramoğlu Caddesi	Yan yoldan ana yola katılım
3–4	U-dönüşü → 2254. Sokak	U-dönüş alanından tali yola keskin sağ dönüş
3–5	U-dönüşü → U-dönüşü	Aynı eksen üzerinde tam U-dönüş manevrası
3–6	U-dönüşü → Bayramoğlu Caddesi	U-dönüş sonrası ana yola katılım
4–5	2254. Sokak → U-dönüşü	Tali yoldan U-dönüş bölgesine geçiş

4-6	2254. Sokak → Bayramoğlu Caddesi	Tali yoldan ana yola sağ dönüş hareketi
7-3	Bayramoğlu Caddesi → U-dönüşü	U-dönüş alanına giriş
7-8	Bayramoğlu Caddesi → Şekerpınar Yolu	Koridor boyunca düz yönlü geçiş

Alana ilişkin yapılan yerinde incelemeler ve video tabanlı trafik gözlemleri, mevcut durumda birbiriyle ilişkili birçok yapısal problemin var olduğunu ortaya koymuştur. Öncelikle, koridorda bulunan sinyalizasyon kavşaklarının sabit zamanlı kontrol esasına dayandığı ve bu kontrol yapısının günün farklı zaman dilimlerinde değişkenlik gösteren trafik hacimlerine uyum sağlayamadığı belirlenmiştir. Sinyal sürelerinin bazı yönlerde yetersiz kalması, ciddi seviyede gecikmelere ve kuyruk birikmelerine yol açmaktadır. Şekil 2’de konumlandırılması gösterilen söz konusu sinyalizasyon yapısı, özellikle U-dönüşü yapan ve tali yollardan ana yola katılan araçlar için yetersiz kapasite sunmakta; bu durum kavşak içi manevraların düzensiz ve kontrolsüz hâle gelmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. Mikro-simülasyon ortamında sinyalizasyonların konumlandırılması.

İncelenen kavşakta uygulanan mevcut sinyal kontrolü, yoğun saatlerde sabit zamanlı olarak çalışmaktadır. Faz 1 ve Faz 2 eşzamanlı işletilirken, Faz 3 bu fazlardan bağımsızdır. Üç faz, farklı yönlerden gelen taşıt hareketlerini düzenlemekte ancak sistem değişken trafik talebine uyum sağlayamamaktadır. Bu durum özellikle sabah ve akşam zirve saatlerinde kapasiteyi azaltmakta, gecikmeleri artırmakta ve performansı düşürmektedir.

Yoğun olmayan saatlerde sistem yarı adaptif (semi-adaptive) yapıya geçmekte, yayalar için düğmeyle çağrılan sinyal kontrolü devreye girmektedir. Ayrıca Faz 2’deki dönüş manevrası, araç dedektörüyle desteklenmiştir. Düşük yoğunlukta Faz 2’nin süresi sabit olmayıp, yaklaşan araçlar tespit edildiğinde sistem dinamik biçimde yanıt vererek Faz 2’yi yeşile çevirmekte, bu sırada Faz 1 kırmızıya geçmektedir. Böylece Faz 1 ve Faz 2’nin birbirine bağlı biçimde, gerçek zamanlı dedeksiyona dayalı olarak çalıştığı görülmektedir.

Faz-1, Bayramoğlu Caddesi boyunca güney yönlü (Yaklaşım 7 → Yaklaşım 8) düz geçişi kapsamaktadır. Araçlara 96 saniye yeşil, 3 saniye sarı ve 22 saniye kırmızı süre tanınmaktadır. Şekil 4’te görüldüğü üzere, bu faz çevrimde en uzun yeşil süredir. Bu durum ana arter akışının önceliklendirildiğini ve yüksek hacmi yansıtmaktadır; ancak düşük yoğunlukta bu uzun süre verimsizliğe yol açabilmektedir.

İkinci faz, Yaklaşım 5’ten Yaklaşım 8’e yapılan dönüş manevrasını kontrol etmektedir. Bu faz için 13 saniyelik yeşil süre tanımlanmış olup, öncesinde 102 saniyelik kırmızı, sonrasında ise 3 saniye sarı ve 3 saniyelik tüm yönler için kırmızı süresi uygulanmaktadır (Şekil 3). Fiziksel kısıtlar dikkate alındığında, bu kısa yeşil sürenin orta düzeydeki dönüş kuyruklarını dahi azaltmada yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Mevcut çevrim süresi blok faz diyagramları (Faz 1: 7 → 8; Faz 2: 5 → 8)

Üçüncü faz, tali yollardan Bayramoğlu Caddesi’ne erişimi sağlayan hareketleri içermektedir (örneğin Yaklaşım 2’den katılım veya Yaklaşım 4’ten sağa dönüş). Bu fazda araçlara 96 saniyelik yeşil süre, ardından 3 saniye sarı ve 21 saniyelik kırmızı süre uygulanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Mevcut çevrim süresi blok faz diyagramları (Faz 3: 1,2,3,4 → 6)

Koridor üzerinde yaya hareketliliği oldukça yoğundur. Gebze Teknik Üniversitesi, STFA Lisesi ve Marmaray Fatih İstasyonu gibi yaya trafiği üreten noktalar, taşıt yolları ile doğrudan etkileşim hâlinindedir. Özellikle sabah ve akşam zirve saatlerinde, yaya ve taşıt yoğunluğu birlikte arttığından kaza riski yükselmektedir. Bu kapsamda, yerinde gözlemler ve dron destekli hava çekimleriyle koridordaki davranış biçimleri, geometrik kısıtlar ve kontrolsüz etkileşim noktaları detaylı biçimde incelenmiştir. Bulgular, koridorda yalnızca operasyonel değil, aynı zamanda güvenlik açısından da çok yönlü sorunlar bulunduğunu göstermektedir.

Bayramoğlu Yan Yol'dan (Yaklaşım 2) Bayramoğlu Caddesi'ne (Yaklaşım 6) katılan araçlar, hızlanma şeridi, kanallı giriş veya sinyal kontrolü olmaksızın doğrudan ana trafiğe dâhil olmaktadır (Şekil 5). Bu yetersiz tasarım, sürücülerin uzun süre boşluk beklemesine, agresif birleşmelere ve kuyruk oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca yan yol, kesit genişliği bakımından belirsizdir; tek şerit olarak tanımlansa da araçlar çoğunlukla yolu gayriresmî biçimde iki şeritli kullanmakta, bu durum geçiş üstünlüğü karmaşası ve kaza riskini artırmaktadır.



Şekil 5. Bayramoğlu Yan Yolu'nun gayriresmî iki şeritli kullanımı.

Koridorda yapılan gözlemler, ağır taşıtların trafik akışı üzerindeki etkisinin özellikle kavşak bölgelerinde belirginleştiğini ortaya koymuştur. Ana akım üzerinde seyreden otobüs ve kamyon türündeki araçlar, düşük hızlanma kabiliyetleri ve büyük boyutları nedeniyle, tali yollardan ana yola katılım sağlamaya çalışan taşıtların manevralarını kısıtlamakta, bu da tali yönlerde ciddi gecikmelere ve kapasite düşüşlerine yol açmaktadır. Nitekim Bayramoğlu Yan Yolu (Yaklaşım 2) gibi doğrudan ana akıma bağlanan kollarda, ağır taşıt yoğunluğu nedeniyle katılım hareketlerinin geciktiği, sürücülerin daha riskli aralıklarla manevra yapmak zorunda kaldığı gözlemlenmiştir.

2254. Sokak'tan (Yaklaşım 4) Bayramoğlu Caddesi'ne (Yaklaşım 6) gerçekleştirilen sağa dönüş hareketi, dar dönüş yarıcağı nedeniyle özellikle büyük araçlar (otobüs, kamyon) için manevra zorluğu yaratmaktadır. Bu araçlar dönüş esnasında komşu şeride taşmakta, bu da düz ilerleyen araçlarla çakışma noktaları oluşturarak trafik akışını bozmaktadır. Arkadaki hafif taşıtlar ise ani şerit değiştirerek bu araçları geçmeye çalışmakta, bu da ani ve öngörülemeyen hareketlere neden olmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Bir halk otobüsünün 2254. Sokak'tan Bayramoğlu Caddesi'ne sağa dönüşü.

2254. Sokak'tan (Yaklaşım 4) çıkan araçların, U-dönüş bölgesi olan Yaklaşım 5'e erişebilmek için kısa bir mesafe içinde şerit değişimi yapması gerekmektedir. Bu segmentin dar ve yoğun olması, araçların yan yana pozisyon almasını zorlaştırmakta, sürücülerin güvenli manevra yapma kapasitesini düşürmektedir.

Bayramoğlu Caddesi üzerindeki Yaklaşım 1 yönünde oluşan uzun kuyruklar, özellikle kırmızı faz süresince, Yaklaşım 4 ve yan yol olan Yaklaşım 2 gibi diğer yönlerde doğru geri taşmakta; bu da dönüş kollarının tıkanmasına ve hem dönüş hem de düz geçiş yapan araçlar için gecikme ve hizmet seviyesi kaybına yol açmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Bayramoğlu Caddesi üzerinde (Yaklaşım 1) oluşan kuyruk birikmesi.

U-dönüş cebi olan Yaklaşım 3'ten çıkan araçlar, kısa bir mesafe içinde iki şerit birden değiştirerek Yaklaşım 4'e yönelmek zorundadır. Bu geçiş, herhangi bir yönlendirme şeridi veya fiziksel kılavuz bulunmaksızın gerçekleşmektedir. Bu nedenle manevralar, çoklu taşıt etkileşimlerine ve şerit ihlallerine yol açmakta; bu da özellikle şerit değişimi kaynaklı çarpışma riskini ciddi ölçüde artırmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Yaklaşım 3'ten ayrılarak 2254. Sokak yönüne (Yaklaşım 4) geçiş yapan bir araç.

Tüm bu sorunlar değerlendirildiğinde, koridorun mevcut hâliyle hem kapasite hem de güvenlik açısından sürdürülebilir olmadığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmanın devamında, sinyal zamanlarının optimize edilmesi ve geometrik düzenleme önerilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır; önerilerin etkileri mikro-simülasyon temelli analizlerle ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Kavşak performansının mevcut koşullar altında incelenmesi amacıyla, insansız hava aracı (drone) görüntüleri üzerinden araç hareketliliği analizi gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmaları sırasında gerçekleştirilen gözlemler doğrultusunda, kavşakta trafik talebinin en yoğun olduğu zaman aralığının 17:45–18:45 olduğu belirlenmiştir; bu zaman dilimi pik saat (peak hour) olarak tanımlanmıştır. Bu belirleme sonrasında, 25 Nisan 2025 (Cuma) günü, okul ve iş çıkışı dönemine karşılık gelen 17:45–18:45 saatleri arasında drone çekimleri gerçekleştirilmiştir. Çekimler sırasında, kavşağın tüm yaklaşım kollarının aynı anda ve kesintisiz biçimde izlenebileceği bir kamera açısı kullanılmıştır. Pik saat süresince kaydedilen drone görüntüleri üzerinden, her bir yaklaşım kolu için araç sayımları gerçekleştirilmiştir. Araç hacimleri (Q), yapılan araç sayımlarıyla elde edilmiş, böylece analizlerde kullanılan hacim değerleri, sahada elde edilen gerçek verilerle oluşturulmuştur.

Araç sayımları, geometrik analiz sırasında tanımlanan 13 farklı hareket yolu esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Her bir hareket, kavşak yaklaşımı ve varış yönü doğrultusunda tanımlanan kanal bazlı taşıt güzergâhlarını temsil etmektedir. Böylece taşıtların gerçek manevraları, yönsele ve işlevsel olarak net biçimde ortaya konmuştur. Sayım verileri, taşıt türlerine göre sınıflandırılarak dört ana grupta raporlanmıştır: otomobil ve taksiler (Tablo 2), hafif ticari araçlar ve minibüsler (Tablo 3), ağır vasıtalar ve otobüsler (Tablo 4) ve motosikletler (Tablo 5). Bu sınıflama, kavşak üzerindeki taşıt tipi dağılımının ayrıntılı biçimde incelenmesine ve farklı taşıt türlerinin operasyonel etkilerinin daha sağlıklı biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Tablo 2. Araç sayımı verileri (otomobil- taksi).

Video Kayıt Zaman Aralığı	1-4	1-5	1-6	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	7-3	7-8	
17.45	18.00	36	21	398	2	9	103	1	0	1	26	35	2	282
18.00	18.15	41	23	406	4	13	109	2	0	2	32	41	4	295

18.15	18.30	42	28	415	4	12	111	3	0	2	34	45	5	291
18.30	18.45	47	35	435	6	16	116	3	0	3	33	41	6	288
TOPLAM		166	107	1674	16	50	439	9	0	8	125	162	17	1156

Tablo 3. Araç sayımı verileri (Panelvan, minibüs- midibüs).

Video Kayıt Zaman Aralığı		1-4	1-5	1-6	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	7-3	7-8
17.45	18.00	9	0	58	0	0	14	0	0	0	5	6	0	102
18.00	18,15	10	1	61	0	0	15	0	0	0	6	7	0	105
18.15	18.30	9	2	59	0	1	15	0	0	0	7	8	0	106
18.30	18.45	10	2	62	0	1	16	0	0	0	8	8	0	105
TOPLAM		38	5	240	0	2	60	0	0	0	26	29	0	418

Tablo 4. Araç sayımı verileri (ağır vasıta- otobüs).

Video Kayıt Zaman Aralığı	1-4	1-5	1-6	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	7-3	7-8
17.45	18.00	0	0	56	0	0	2	0	0	0	0	0	10
18.00	18.15	0	0	61	0	0	3	0	0	0	0	0	11
18.15	18.30	0	0	62	0	0	3	0	0	0	0	0	12
18.30	18.45	0	0	63	0	0	4	0	0	0	0	0	12
TOPLAM		0	0	242	0	0	12	0	0	0	0	0	45

Tablo 5. Araç sayımı verileri (motosiklet).

Video Kayıt Zaman Aralığı	1-4	1-5	1-6	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	7-3	7-8	
17.45	18.00	7	1	14	0	1	4	0	0	0	3	0	0	26
18.00	18.15	5	1	15	0	0	4	0	0	1	4	1	1	25
18.15	18.30	5	1	17	1	1	5	1	0	1	5	1	2	26
18.30	18.45	7	1	17	2	1	5	0	0	1	4	2	1	27
TOPLAM		24	4	63	3	3	18	1	0	3	16	4	4	104

Araç sayımları, geometrik analizde tanımlanan 13 hareket yolu temelinde yapılmıştır. Böylece taşıt manevraları yönsel ve işlevsel olarak net biçimde ortaya konmuştur. Sayımlar taşıt türlerine göre dört grupta sınıflandırılmıştır: otomobil–taksi, hafif ticari araç–minibüs (MPV–LDV), ağır vasıta–otobüs (HGV) ve motosiklet. Bu sınıflama, taşıt türlerinin operasyonel etkilerinin daha sağlıklı analiz edilmesini sağlamıştır.

Sayım sonuçları, 13 hareket için zaman dilimi bazında raporlanmıştır; yönsel taşıt yoğunlukları, trafik hacmi değişimleri ve araç türü dağılımları belirlenmiştir. Bu veriler, mikro-simülasyon modellerine girdi olarak kullanılarak kavşağın mevcut performansının modellenmesi ve senaryo tabanlı çözüm önerilerinin nesnel biçimde karşılaştırılmasına temel oluşturmıştır.

2.2. Sinyal optimizasyonu

Çalışmada sabit zamanlı sinyal kontrol stratejisi temel alınmış ve mevcut koşullarda güvenli ve öngörülebilir bir yapı sunan **Webster yöntemi** ile sinyal sürelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yöntem, kavşak kollarındaki gecikme sürelerini en aza indirmeyi ve hizmet seviyesini artırmayı hedefleyen matematiksel bir formülasyona dayanmaktadır. Geliştirilen sinyal planı, daha sonra mikro-simülasyon ortamında test edilerek, mevcut duruma kıyasla sağladığı kazanımlar değerlendirilmiştir.

Webster Yöntemi, sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün optimizasyonunda yaygın olarak kullanılan analitik bir yaklaşımdır. Yöntem, her bir faz için gözlemlenen trafik hacimleri ve doyma akımları esas alınarak kritik akım oranlarının (Y_i) hesaplanmasına dayanır. Bu oranlar, sarı ve tüm kırmızı sürelerinden kaynaklanan kayıp zamanlar dikkate alınarak optimum çevrim süresinin hesaplanmasında kullanılır. Etkili yeşil süre, her fazın göreceli akım talebine göre dağıtılır. Optimum çevrim süresi, Eş. 1 [20] ile belirlenir:

$$C = \frac{1,5 \times L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n Y_i} \quad (1)$$

C: Optimum çevrim süresi (s)

L: Çevrim başına toplam kayıp zaman (s)

n: Faz sayısı

Y_i : i fazına ait kritik akım oranı

Bu bölümde, Webster Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sinyal optimizasyonu örneklendirilmektedir. Amaç, kritik trafik akım oranlarına dayanarak optimum çevrim süresini hesaplamak ve yeşil süreleri trafik sinyal fazları arasında orantılı bir şekilde dağıtmaktır.

Zirve Saat Faktörü (PHF), zirve saat içerisindeki trafik akışının düzenliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir ölçüttür. Bu değer, trafik hacminin söz konusu saatin en yoğun 15 dakikalık zaman dilimi içerisinde ne derece yoğunlaştığını nicel olarak ifade eder [21]. PHF, Eş. 2 ile hesaplanmaktadır:

$$PHF = V/4 \times V_{15} \quad (2)$$

V: Zirve saat boyunca toplam trafik hacmi (veh/h)

V_{15} : Zirve saat içerisindeki en yoğun 15 dakikalık zaman aralığında ölçülen trafik hacmi

PHF değerinin 1'e yakın olması, trafik akışının saat boyunca dengeli dağıldığını; düşük PHF değerleri ise araç yoğunluğunun kısa bir zaman diliminde yoğunlaştığını ve trafik akışının düzensiz ve ani artışlar gösterdiğini ifade eder. Bu durum, trafik yönetimi ve sinyal zamanlaması açısından önemli kararların alınmasında dikkate alınan kritik bir göstergidir.

Bayramoğlu Caddesi (Yaklaşım 7) - Şekerpınar Yolu (Yaklaşım 8) doğrultusu için yapılan hesaplamada, zirve saat boyunca toplam trafik hacmi 1954,5 veh/h ve en yoğun 15 dakikalık periyottaki trafik hacmi 490,5 veh/15 min olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre PHF yaklaşık 0,99 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek değer, trafik akışının saat boyunca oldukça dengeli dağıldığını göstermektedir. Buna karşın U-dönüşü (Yaklaşım 5) - Şekerpınar Yolu (Yaklaşım 8) doğrultusu için yapılan hesaplamada, toplam trafik hacmi 583,2 veh/h ve en yoğun 15 dakikadaki hacim 175,2 veh/15 min olarak bulunmuştur. Bu durumda PHF değeri 0,83 olarak hesaplanmış ve bu da trafiğin daha çok kısa bir zaman diliminde yoğunlaştığını, yani akışın daha az düzenli olduğunu göstermektedir.

Kavşağın kapasitesini etkileyen başka bir önemli faktör de doymuş akım değeridir. Araçların kavşak içerisine girdiği sabit trafik hacmine "doymuş akım" denilmektedir. Doymuş akım, sonsuz bir kuyruğun kavşağa sürekli giriş hakkı aldığı durumda ortaya çıkan hacimdir [22]. Bu değer, ideal saha koşullarından sapmaları dikkate alan çeşitli düzeltme katsayılarıyla çarpılarak gerçek saha koşullarına göre uyarlanır.

Çırak [23], ideal trafik koşulları altında şerit başına doymuşluk akımının genellikle 1900 veh/h/ln olarak kabul edildiğini belirtmektedir; bu nedenle Bayramoğlu Caddesi (Yaklaşım 7)- Şekerpınar Yolu (Yaklaşım 8) doğrultusunda olan akım için yapılan hesaplamada ideal doymuşluk akımı 1900 veh/h/ln olarak alınmıştır. Şerit genişliği ve eğime bağlı katsayılar sırasıyla 1 ve 0,9667 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm katsayılar 1 kabul edilmiştir. Bu verilere göre $s_{7-8} = 1837$ veh/h/ln olarak hesaplanmıştır. U-dönüşü (Yaklaşım 5) - Şekerpınar Yolu (Yaklaşım 8) doğrultusunda olan akım için ise, ideal doymuşluk akımı 1650 veh/h/ln olarak alınmıştır. Bu akımda şerit genişliği, ağır taşıt oranı, eğim ve park etkilerine bağlı düzeltme katsayıları sırasıyla 0,96; 0,985; 0,99 ve 1 olarak dikkate alınmıştır. Bu durumda $s_{5-8} = 1545$ veh/h/ln olarak elde edilmiştir. Bayramoğlu-Şekerpınar ve U-dönüşü-Şekerpınar fazlarına ait kritik akım oranları, hacim ve doymuş akım değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 6. Kritik akım oranları.

	Bayramoğlu-Şekerpınar (Faz 1)	U- dönüşü- Şekerpınar (Faz 2)
Q (veh/h)	1954,5	583,2
Q/PHF (veh/h)	1974,2	702,7
Şerit Başına Doymuş Akım (veh/h/ln)	1837	1545
Şerit Sayısı	2	2
Yön Başına Doymuş Akım (S_i)	3674	3090
Y_i (kritik akım oranı) = Q/S_i	0,54	0,23

$$\sum Y_i = 0,54 + 0,23 = 0,77$$

Tablo 6'da sunulan kritik akım oranları, drone görüntüleri aracılığıyla gerçekleştirilen taşıt sayımları kullanılarak elde edilmiştir. Araç hacimleri (Q), zirve saat dönemini temsil edecek şekilde yapılan sayımların saatlik hacme dönüştürülmesiyle belirlenmiştir. Şerit başına doymuş akım değerleri, HCM (Highway Capacity Manual) standartları esas alınarak belirlenmiş; her bir faz için mevcut durumda fiilen kullanılan iki şerit dikkate alınmıştır. Kritik akım oranları (Y_i), ilgili faza ait hacim ve doymuş akım değerleri kullanılarak Webster yöntemi kapsamında hesaplanmıştır.

Temizleme aralığı (Clearance Interval), sarı ışığın ardından bir aracın kavşağı güvenli biçimde terk etmesi için gereken süredir. Bu süre; sürücünün algılama-tepki süresi, yavaşlama ve kavşak genişliğini kat etme süresini içerir. Her iki faz için minimum 4,4 saniye olarak hesaplanmış, uygulamada 4,5 saniye alınmıştır. Bu süre 3,5 saniyelik sarı ve 1,0 saniyelik tüm yönler için kırmızı ışık sürelerinden oluşmaktadır. Böylece ardışık fazlar arasında çakışan hareketler güvenli biçimde ayrıştırılmakta ve araçların kesişim alanını boşaltması sağlanmaktadır.

Sinyalli kavşaklarda kayıp zaman, sinyal çevrimi boyunca araç hareketinin gerçekleşmediği süreyi ifade eder ve temizleme aralıkları ile başlangıç gecikmelerini içerir. Bu çalışmada iki fazlı sinyalizasyon yapısı için her fazda 4,4 saniyelik kayıp süre dikkate alınarak çevrim başına toplam kayıp zaman 8,8 saniye olarak hesaplanmıştır.

Optimum çevrim süresi, bir kavşakta tüm sinyal fazlarının bir tam dönüşünü tamamlaması için gereken toplam süredir. Bu sürenin belirlenmesindeki temel amaç, tüm araçlar için toplam gecikmeyi en aza indirmektir. Eş. 1’de verilmiş olan formülle hesaplanır. Daha önce hesaplanan toplam kayıp zaman değeri 8,8 saniye ve tüm fazlara ait kritik akım oranlarının toplamı 0,77 olarak alınmıştır. Bu değerlere göre yapılan hesaplama sonucunda optimum çevrim süresi yaklaşık 80 saniye olarak bulunmuştur. Optimum çevrim süresi (C) belirlendikten sonra, etkin yeşil süre (G) toplam kayıp zamanın çevrim süresinden çıkarılmasıyla hesaplanır. Elde edilen bu süre, fazların kritik akım oranlarına göre fazlar arasında dağıtılır. Hesaplanan optimum çevrim süresinden toplam kayıp zaman çıkarılarak, kavşakta araçların geçişine ayrılabilir toplam etkin yeşil süre belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 80 saniyelik çevrim süresinden 8,8 saniyelik kayıp zaman çıkarıldığında, toplam etkin yeşil süre 71,2 saniye olarak elde edilmiştir. Etkin yeşil süre, her bir faza orantılı olarak dağıtılır.

Etkin yeşil süre fazlara, kritik akım oranlarına orantılı biçimde dağıtılmıştır. Buna göre 7–8 hareketine ait fazın oranı 0,23 olup yaklaşık 21 saniye, 5–8 hareketine ait fazın oranı 0,54 olup 50 saniye yeşil süre verilmiştir. Bu dağılım, sinyal zamanlamasının akım taleplerine uygun biçimde optimize edilmesini sağlamaktadır.

Bayramoğlu yönüne ait Faz 3 için zirve saat faktörü (PHF), toplam saatlik trafik hacminin en yoğun 15 dakikalık döneme oranı esas alınarak hesaplanmıştır. Saatlik trafik hacmi 3866 veh/h ve en yoğun çeyrek saatlik hacim 1056,6 veh/15 min olarak belirlenmiş; bu değerlere göre PHF yaklaşık 0,92 olarak bulunmuştur. Bu değer, trafik akışının saat boyunca görece dengeli bir dağılım sergilediğini göstermektedir.

Tablo 7. Kritik akım oranı tablosu.

	Bayramoğlu Yönü (Faz 3)
Q (veh/h)	3866
Q/PHF (veh/h)	4202,2
Şerit Başına Doygun Akım (veh/h/ln)	1726
Şerit Sayısı	2
Yön Başına Doygun Akım (S_i)	3452
Y_i (kritik akım oranı) = Q/S_i	1,39

Tablo 7’de sunulan sonuçlara göre, Faz 3 için hesaplanan Y_i değerinin 1,0’ı aşması, mevcut geometrik koşullar altında ilgili kavşak kolundaki talebin kapasitenin üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu durumda Webster Yöntemi uygulanamaz; zira yöntem, geçerli bir optimizasyonun sağlanabilmesi için $\sum Y_i < 1$ koşulunu temel alır. Dolayısıyla, Faz 3 için geometrik iyileştirmeler veya ek şerit kapasitesi gibi alternatif bir tasarım yaklaşımının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Faz 3 için Webster yöntemi uygulanmamış; söz konusu faz, mevcut sinyal süreleri ve kontrol yapısı korunarak değerlendirilmiştir. Webster yöntemi kapsamında gerçekleştirilen sinyal optimizasyonu, yalnızca kritik akım oranı 1’in altında kalan diğer fazlar için uygulanmış ve bu fazların sinyal süreleri optimize edilmiştir. Mikro-simülasyon analizlerinde de Faz 3, herhangi bir sinyal süresi değişikliği yapılmadan, mevcut durum varsayımları altında modellenmiştir.

2.3. Tasarım alternatifleri

Sinyal optimizasyonu bulguları, yüksek trafik hacimleri, geometrik kısıtlar ve ulaşım modları arasındaki çatışmalardan kaynaklanan kalıcı sorunların yalnızca sinyal zamanlamasıyla giderilemeyeceğini göstermiştir. Özellikle Faz 3 hareketlerinin hacim-kapasite (v/c) oranlarının sınırları aşması nedeniyle, koridor genelinde performans artışı sağlamak için geometrik düzenlemelerin zorunlu olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, gecikmeleri azaltmak, tüm kullanıcıların güvenliğini artırmak, dönüş hareketlerini iyileştirmek ve güvenli geçiş noktaları oluşturmak amacıyla bir dizi düşük maliyetli geometrik tasarım alternatifi geliştirilmiştir.

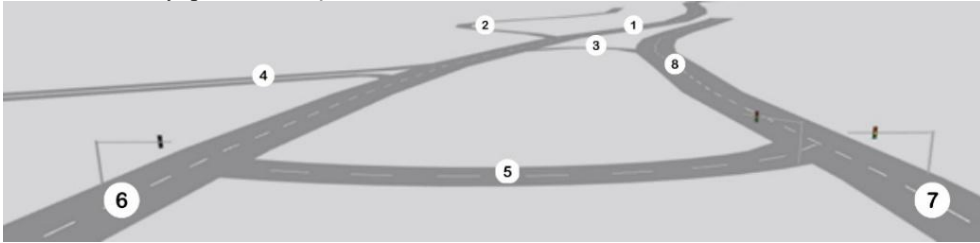
Mikro-simülasyon analizleri, PTV VISSIM (Student) 2025 (SP 06) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro-simülasyon modelinde sürücü davranışları, yazılımın “Driving Behavior” (Sürücü Davranışları) tanımları kullanılarak modellenmiş; farklı yol ve kullanıcı türleri için ayrı sürücü davranış tanımları atanmıştır.

Kentsel motorlu taşıt trafiği için “Kentsel (motorlu)” davranışı kullanılmış olup, bu davranış tanımı altında Wiedemann 74 sürücü davranışı modeli seçilmiştir. Bu tanımda serbest şerit seçimi uygulanmış ve hedef yan konum “şerit ortası” olarak belirlenmiştir. Bu modelde ortalama durma mesafesi 2,00 metre, Güvenlik mesafesinin toplama bileşeni 2,00, Güvenlik mesafesinin çarpan bileşeni 3,00 olarak alınmıştır. Araç takip modeli tanımlarında, maksimum ön mesafeye bakış 250,0 metre, arka mesafeye bakış 150,0 metre, statik engeller için durma mesafesi 0,50 m olarak kullanılmıştır. Şerit değiştirme için standart ivme değerleri kullanılmış ve fermuar örülme yöntemi seçilmiştir. Bu parametreler tüm senaryolarda sabit tutulmuş, senaryolar arasındaki karşılaştırmalarda yalnızca geometrik düzenlemeler ve sinyal süreleri değiştirilmiştir.

Alternatif tasarımlar, saha gözlemleri ve işletme analizlerinde belirlenen yetersizliklere yanıt olarak oluşturulmuş; her bir alternatif mikro-simülasyon yazılımı kullanılarak test edilmiştir. Alternatiflerin performansları, ortalama araç gecikmesi, kuyruk uzunluğu ve Hizmet Seviyesi (LOS) gibi temel performans göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir [24]. Trafik simülasyonlarının temel amacı, araçların akış içerisindeki davranışlarını incelemek ve önerilen düzenlemelerin etkilerini görselleştirmektir [25]. Kavşak tasarımı öncesinde bu tür simülasyon araçlarının kullanılması, daha doğru ve uygulanabilir tasarım kararları alınmasına önemli katkılar sağlamaktadır [26].

Mevcut ve önerilen kavşak düzenlerinin performansını değerlendirmek için simülasyon ortamında mikroskobik bir trafik modeli geliştirilmiştir. Simülasyon, drone tabanlı sayımlarla belirlenen en yoğun 17:45–18:45 aralığındaki 60 dakikalık zirve periyodunu temsil etmektedir. Trafik giriş verileri dört araç sınıfına ayrılmış; her yaklaşım için gözlemlenen trafik bileşimine göre göreceli akım yüzdeleri tanımlanmıştır. Toplam talep dört ana giriş noktasına atanmıştır: Yaklaşım 1 (2515 veh/h), Yaklaşım 2 (600 veh/h), Yaklaşım 4 (368 veh/h) ve Yaklaşım 7 (1740 veh/h). Bu veriler, “Zaman Aralığına Göre Hacim” modülüyle simülasyona aktarılmıştır. Her yaklaşım, saha gözlemlerine dayalı olarak bir veya daha fazla çıkış rotasıyla ilişkilendirilmiş; çıkış bağlantıları ve göreceli akım payları manuel olarak atanmıştır. Bu yöntem, rastgele değişkenliği ortadan kaldırarak araç hareketlerinin gerçek talep oranlarıyla uyumlu, belirleyici ve tekrarlanabilir bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

Mevcut koşullar senaryosu, saha incelemeleri sırasında gözlemlenen kavşak koridorunun mevcut işletme ve geometrik durumunu yansıtacak şekilde modellenmiştir. Bu senaryo, performans karşılaştırmaları için temel referans olarak kullanılmış ve mevcut düzenin işletme verimsizlikleri ile kapasite sınırlamalarını ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir. Simülasyon modelinde uygulanan geometrik düzen, tüm yaklaşım kolları, çatışma noktaları ve iç bağlantılar mevcut halleriyle dahil edilmiştir (Şekil 9). Sinyal kontrolü, saha ölçümlerine dayalı parametreler kullanılarak yapılandırılmıştır.



Şekil 9. Mikro-simülasyon ortamında mevcut durumun geometrik düzeni.

Analizler, Yaklaşım 1’den Yaklaşım 5 ve 6’ya olan hareketlerde en yoğun tıkanıklığın yaşandığını göstermiştir. Özellikle 1→6 yönünde maksimum kuyruk 512,10 m, araç gecikmesi 140,18 s olarak ölçülmüş ve Hizmet Seviyesi (LOS) F elde edilmiştir.

GEH istatistiği, trafik sayımlarında simülasyon veya model sonuçlarının saha verileriyle ne kadar uyumlu olduğunu ölçmek için kullanılan bir performans göstergesidir; modelden elde edilen akım ile gerçek ölçülen akım arasındaki farkı sayısal olarak ifade eder ve küçük olması, modelin gerçeği daha iyi temsil ettiğini göstermektedir. Literatürde yaygın kabul gören eşiklere göre (genellikle GEH < 5 iyi, 5–10 kabul edilebilir, >10 zayıf uyum), elde edilen GEH değerleri modelin saha verileriyle kabul edilebilir düzeyde uyum gösterdiğini ve genel trafik davranışını makul doğrulukta temsil edebildiğini ortaya koymaktadır. Modelleme çalışmaları kapsamında 2 kol üzerinde 600 saniyelik araç sayıları saatlik eşdeğere çevrilmiş ve GEH, Eş. 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (3)$$

Burada C = saha sayımı (araç/saat), M = model sonucu (araç/saat).

Elde edilen GEH değerleri incelendiğinde; 4 numaralı kol için GEH ≈ 9.91 olup kabul edilebilir ve sınırdan olmakla birlikte, modelin saha verilerini makul düzeyde temsil ettiğini, 5 numaralı kol için ise GEH ≈ 8.55 olup orta/kabul edilebilir uyum düzeyindedir ve modelin geręek akımları genel eğilimleri ile yansıtabildiğine işaret etmektedir.

Bu sonuçlar, mevcut koşullar altında modelin saha verileri ile tam birebir olmasa da, genel trafik davranışını ve akım büyüklüklerini makul ve kullanılabilir bir doğruluk seviyesinde temsil edebildiğini göstermektedir. Özellikle öğrenci versiyonu gibi teknik olarak kısıtlı bir yazılım ortamında bu düzeyde uyum elde edilmesi, model kurulumunun ve giriş verilerinin tutarlı şekilde oluşturulduğunu göstermesi açısından olumlu değerlendirilmektedir.

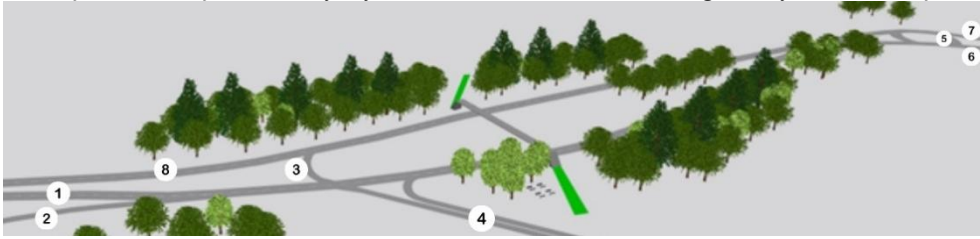
Webster Yöntemi uygulanarak kavşak sinyal zamanlamaları yeniden düzenlenmiş, çevrim süresi 80 saniye olarak kalibre edilmiş ve yeşil süreler kritik akım oranlarına göre dağıtılmıştır. Bu iyileştirme sonucunda, daha önce LOS F olan 1→5 ve 1→6 hareketleri ortalama 68,19 s gecikme ile LOS E seviyesine yükselmiştir. Benzer biçimde, 7→6 hareketi yeşil süre dağılımının etkisiyle LOS B seviyesine ulaşmıştır. Diğer bazı hareketlerde de gecikme ve kuyruk uzunluklarında orta düzeyde azalmalar gözlenmiştir.

Buna karşın, Faz 3 kontrolündeki hareketlerde tıkanıklık sürmüştür. 1→6 ve 2→6 yönlerinde 500 m'yi aşan kuyruklar oluşmuş, LOS E seviyesinde kalınmıştır. Bu durum, doğunluk aşan bölümlerde yalnızca sinyal optimizasyonunun yetersiz kaldığını göstermektedir. Sonuç olarak Webster Yöntemi kavşak içinde belirgin iyileşmeler sağlamış, ancak Faz 3'teki tıkanıklık, sonraki aşamalarda geometrik müdahalelerin gerekliliğini ortaya koymuştur.

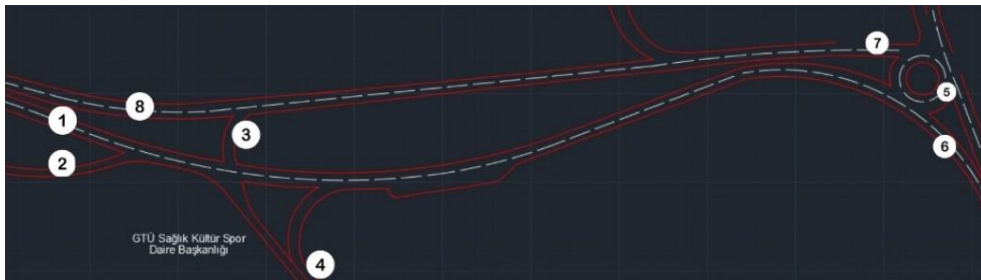
Alternatif Tasarım 1'de (şekil 10) kavşak kompleksi tamamen sinyalizasyon olmadan işletilmektedir. Amaç, dur-kalk gecikmelerini azaltarak kesintisiz araç akışı sağlamak, genel güvenliği artırmak ve yaya hareketliliğini güvenli biçimde sürdürmektir. Yüksek yaya talebi nedeniyle tasarıma bir yaya üstgeidi entegre edilmiştir; böylece yaya ve araç trafiği ayrılmış, verimlilik ve güvenliğ artırılmıştır.

Bu düzenlemede, daha önce koridor ortasında U dönüşüne izin veren 5. yaklaşım kapatılmış; bu manevra 350 m ilerideki dönel kavşağa yönlendirilmiştir. Ayrıca 3. ve 4. yaklaşımlar arasında hizalama sağlanarak birleşme geçişi iyileştirilmiş, sürüş konforu ve güvenliğ artırılmıştır. Bayramoğlu yan yolunda (2. yaklaşım) ise kesit daraltılarak tek şeritli kullanım zorunlu hâle getirilmiş, böylece birleşme disiplininin sağlanması hedeflenmiştir (şekil 11).

Sonuçlar, önceki durumda LOS F olan 1→6 hareketinin LOS D seviyesine yükseldiğini göstermiştir. Ortalama gecikme yaklaşık 34 saniyeye düşmüş, kuyruk uzunlukları belirgin biçimde azalmıştır. Genel olarak en yüksek seviye LOS D olup, sinyalizasyonlu senaryolara kıyasla belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Çevresel açıdan, bazı hareketlerde CO ve VOC emisyonlarında orta düzeyde azalma gözlenmiş; ancak yoğun talep altındaki 1→6 hareketinde birleşme davranışları nedeniyle yakıt tüketimi ve NOx salınımı görece yüksek kalmıştır.



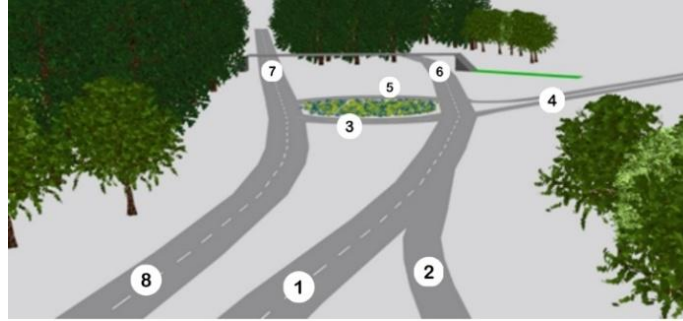
şekil 10. Alternatif Tasarım 1'in mikro-simülasyon programında modellenmiş görünümü.



şekil 11. Alternatif Tasarım 1'in plan düzlemindeki geometrik yerleşimi.

Alternatif Tasarım 2’de (Şekil 12), mevcut sinyal kontrollü kavşak kompleksi çok şeritli bir dönel kavşağa dönüştürülmüştür. Dairesel adalı kavşaklar, “U” dönüşüne olanak tanımaları ve tüm hareketleri düşük hızlı birleşmelere dönüştürerek açısız ya da kafa kafaya çarpışmaları azaltmaları nedeniyle tercih edilmektedir [27]. Bu tasarım, sinyal fazlarını ortadan kaldırarak araçların geçiş önceliği esasına göre ilerlemesini sağlar ve özellikle orta yoğunluklu trafik koşullarında toplam gecikmeyi önemli ölçüde düşürür. Ayrıca, dönel kavşak tasarımında sinyalizasyon, şerit genişliği ve dönüş yarıçapı trafik akışı üzerinde kritik etkiler yarattığı önceki çalışmalarla da gösterilmiştir [28]. Ayrıca araç akışını kesintiye uğratmadan yaya trafiğini korumak amacıyla üstgeçit eklenmiş, böylece sinyal kaynaklı gecikme ve tıkanmalar önlenmiştir. Yaklaşım 5’in şerit genişliği artırılmıştır. Bayramoğlu yan yolunda (Yaklaşım 2) kesit daraltılarak gerçek tek şerit hareketi zorunlu kılınmış, dönel kavşağa daha güvenli giriş sağlanmıştır (Şekil 13).

PTV VISSIM’de yapılan performans analizinde, Yaklaşım 1→6 hareketi LOS D seviyesine yükselmiş, maksimum gecikme 30,25 saniyeye düşmüştür. Bu değer, sinyal kontrollü senaryoda 100 saniyeyi aşan gecikmelere kıyasla belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Çoğu dönüş hareketi LOS A–B seviyesinde gerçekleşmiş, gecikme ve kuyruk uzunlukları minimuma inmiştir. Dur-kalk davranışının azalmasıyla CO, NO_x ve VOC emisyonlarında da düşüş kaydedilmiştir.



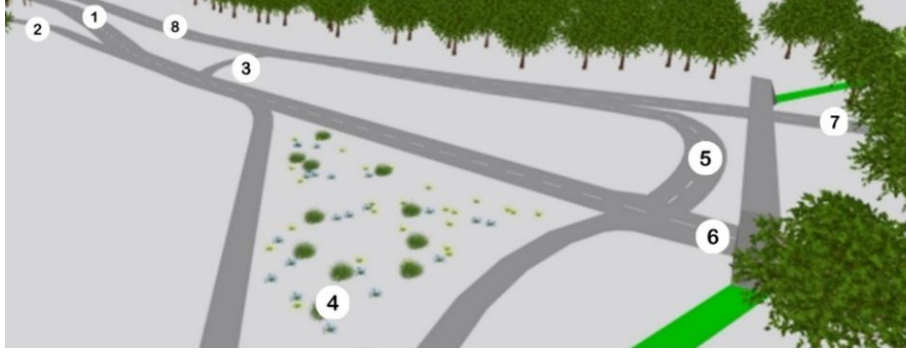
Şekil 12. Alternatif Tasarım 2’nin mikro-simülasyon programında modellenmiş görünümü.



Şekil 13. Alternatif Tasarım 2'nin plan düzlemindeki geometrik yerleşimi.

Alternatif Tasarım 3, yoğun saatlerde gözlemlenen tıkanıklık ve gecikmelere çözüm getirmek amacıyla, birleşme hareketlerini iyileştiren ve çatışma noktalarını azaltan geometrik düzenlemeler içermektedir. Genel tasarım, trafik yükünü daha dengeli dağıtarak sinyal kontrolüne olan bağımlılığı azaltmakta ve çatışmaları mekânsal ayırım yoluyla en aza indirmektedir. Bu alternatifin etkinliği PTV VISSIM simülasyonlarıyla (Şekil 14) analiz edilmiş; ortalama gecikme, kuyruk uzunluğu ve Hizmet Seviyesi (LOS) göstergeleri karşılaştırılmıştır. En belirgin değişiklik, ana kavşaktaki sinyal kontrolünün tamamen kaldırılmasıdır. Yaya güvenliğini sağlamak için, kot ayrımlı bir üstgeçit eklenmiştir. Ayrıca iki yeni bağlantı şeridi tasarlanmıştır: biri 5. yaklaşımdan 8. yaklaşıma doğrudan geçiş sağlayarak ana kavşak alanını baypas etmekte, diğeri ise 2. yaklaşımdan 6. yaklaşıma akıcı entegrasyon imkânı sunmaktadır. Bununla beraber Yaklaşım 5’in şerit genişliği artırılmıştır. Bu şeritler, araçların ana akıma katılmadan önce hız ve konumlarını ayarlamasını kolaylaştırarak akış sürekliliğini ve güvenliğini artırmaktadır (Şekil 15).

Sonuçlar, daha önce LOS F olan 1→6 hareketinin belirgin ölçüde azalan kuyruklar ve dur-kalk sıklığıyla LOS C seviyesine yükseldiğini göstermiştir. Ağ genelinde toplam gecikme azalmış; daha akıcı hareketlerde CO, NO_x ve VOC emisyonları ile yakıt tüketimi de orantılı biçimde düşmüştür.



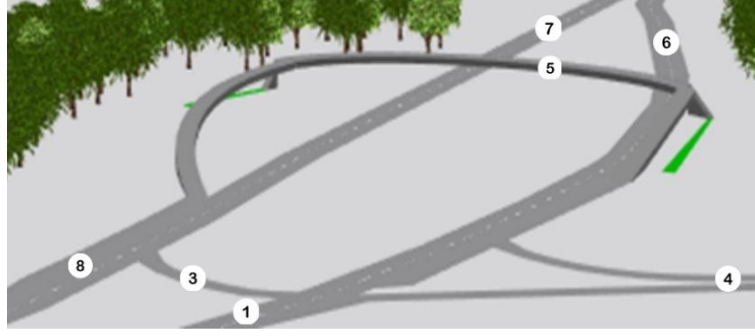
Şekil 14. Alternatif Tasarım 3'ün mikro-simülasyon programında modellenmiş görünümü.



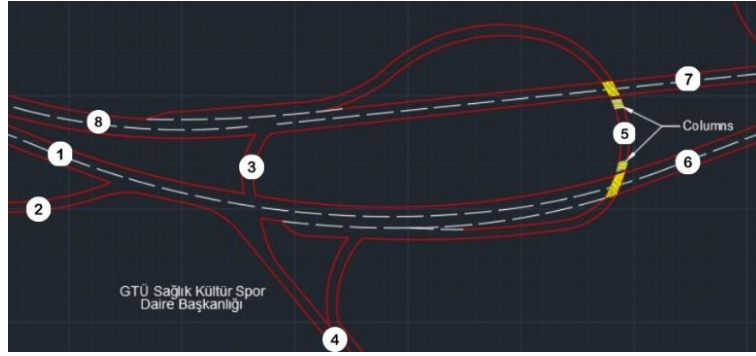
Şekil 15. Alternatif Tasarım 3'ün plan düzlemindeki geometrik yerleşimi.

Alternatif Tasarım 4, ana kavşaktaki tıkanıklığı azaltmak amacıyla kritik hareketlerin çakışma bölgelerinden uzaklaştırıldığı seviye ayrımlı bir düzenleme sunmaktadır (Şekil 16). Katlı kavşaklar, yüksek trafik yoğunluğuna sahip bölgelerde akışı hızlandırmak ve kazaları azaltmak için sıklıkla tercih edilmektedir [29]. Bu tasarımda, 1–4 numaralı yaklaşımlardan 8 numaralı yaklaşıma yönelen araçların kullandığı 5. yaklaşım kapatılmış; söz konusu araçlar, 6 ve 7 numaralı yaklaşımların üzerinden geçen yükseltilmiş bir üstgeçitle yönlendirilmiştir. Böylece sinyal kontrolüne ihtiyaç duyulmadan kesintisiz akış sağlanmıştır.

Yaya güvenliği için taşıt şeritlerinden fiziksel olarak ayrılmış bir yaya yolu üstgeçide entegre edilmiştir. Tüm sinyal grupları kaldırılmış, taşıt ve yaya akımları seviye ayrımıyla yönetilmiştir (Şekil 17). Çakışma noktalarının azaltılmasıyla operasyonel performansın artması, gecikmelerin düşmesi ve genel güvenliğin iyileşmesi hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçları, çoğu dönüş hareketinde LOS A–B seviyesine ulaşıldığını ve ortalama gecikmenin 15 saniyenin altında kaldığını göstermektedir. Önceki senaryolarda 1→6 yönünde 100 saniyeyi aşan gecikme ve LOS F gözlenirken, bu değer 16 saniyeye ve LOS C seviyesine düşmüştür. Kuyruk uzunluğu 111 metreye gerilemiştir. Ayrıca dur-kalk davranışının azalmasıyla CO, NO_x ve VOC emisyonlarında azalma, yakıt tüketiminde ise belirgin düşüş (yaklaşık 12,11 L) elde edilmiştir.



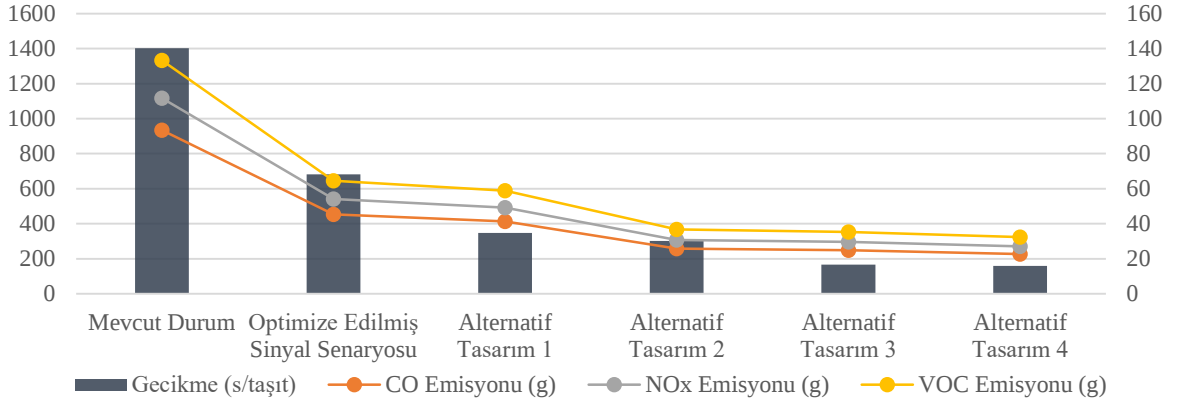
Şekil 16. Alternatif Tasarım 4'ün mikro-simülasyon programında modellenmiş görünümü.



Şekil 17. Alternatif Tasarım 4'ün plan düzlemindeki geometrik yerleşimi.

3. Sonuçlar ve tartışmalar

Koridor boyunca önerilen senaryoların etkilerini nesnel ve çok ölçütlü olarak değerlendirebilmek adına hem operasyonel verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği yansıtan bazı temel ölçütler belirlenmiştir. Bu bağlamda gecikme süresi (s/veh), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NOx) ve uçucu organik bileşikler (VOC) emisyon değerleri, sistem performansını kıyaslamak için anahtar göstergeler olarak seçilmiştir (Şekil 18). Bu göstergeler, yalnızca trafik akışının etkinliğini değil, aynı zamanda tasarımların çevresel etkilerini de bütüncül bir bakış açısıyla analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Her bir senaryonun bu göstergeler üzerindeki etkisi, karar vericilere hangi müdahalenin daha uygulanabilir, etkili ve sürdürülebilir olduğunu ortaya koyma açısından kritik rol oynamaktadır.



Şekil 18. Gecikme/emisyonlar grafiği

Trafik sıklıkının en yoğun gözlemlendiği kritik akım, Yaklaşım 1–2–3–4’ten Yaklaşım 6 yönüne ilerleyen hareketlerdir. Özellikle bu doğrultuda araçların örtlme manevralarını gerçekleştirmekte zorlanması, uzun kuyruklar ve yüksek gecikme değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle senaryolar arası karşılaştırmalar, en problemli darboğazı temsil eden 1–2–3–4 → 6 hattı üzerinde detaylandırılmıştır. Tablo 8’de, mevcut durum, Webster optimizasyonu ve alternatif tasarım senaryoları için elde edilen gecikme, LOS, emisyon ve yakıt tüketimi çıktıları özet halinde sunulmuştur.

Tablo 8. Yaklaşım 1, 2, 3, 4 → yaklaşım 6 doğrultusunda senaryo bazlı performans çıktılarının özet karşılaştırması.

Senaryo	Başlangıç Yaklaşımlar	Hedef Yaklaşım	Ortalama Gecikme (s)	LOS	CO (g)	NO _x (g)	VOC (g)	Yakıt Tüketimi (L)
Mevcut Durum	1, 2, 3, 4	6	140.18	F	935.02	181.92	216.7	52.08
Optimize Durum	1, 2, 3, 4	6	68.19	E	452.61	88.06	104.9	24.52
AT1	1, 2, 3, 4	6	34.73	D	412.49	80.26	95.6	22.34
AT2	1, 2, 3, 4	6	30.25	D	257.17	50.04	59.6	13.92
AT3	1, 2, 3, 4	6	16.68	C	248.01	48.25	57.48	13.43
AT4	1, 2, 3, 4	6	15.94	C	226.32	44.03	52.45	12.26

Çalışmada kriterlerin tek bir bileşik skor altında birleştirilmesi veya öznel ağırlıklar atanması hedeflenmemiştir. Bunun yerine, her bir performans göstergesi kendi fiziksel anlamı ve birimi korunarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir; bu sayede alternatiflerin farklı performans boyutlarındaki göreceli üstünlükleri şeffaf biçimde ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, karar vericilerin belirli bir öncelik yapısına bağlı kalmaksızın, farklı ölçütler üzerinden alternatifleri birlikte değerlendirebilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmanın odak noktası, düşük maliyetli müdahalelerin farklı performans boyutlarındaki etkilerini açık ve karşılaştırılabilir biçimde ortaya koymaktır.

Alternatif tasarımların ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla, maliyet analizleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın 2025 yılı birim fiyatları esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Tablo 9). Maliyet hesaplamalarında, önerilen düzenlemelerle doğrudan ilişkili yapım ve düzenleme kalemleri dikkate alınmış; asfalt dökümü, alt temel serimi, kazı, dolgu ve yaya/taşıt üst geçitleri gibi imalatlar maliyet analizine dahil edilmiştir.

Tablo 9. Maliyet analizinde kullanılan poz numaraları ve 2025 yılı birim fiyatlar (ÇŞİDB)

İş Kalemi	Poz No	Poz Tanımı	Birim	2025 Birim Fiyat (TL)	Kullanım / Not
Asfalt dökümü (bağlayıcı)	10.330.5421	Asfalt çimentosu (penetrasyon asfaltı)	kg	16,1	Sıcak karışım kaplama
Alt temel serimi	15.125.1008	Kırmataş ≤32 mm, makine ile serme-sıkıştırma	m ³	529,19	Alt temel (t = 0,30 m)
Kazı	15.120.1001	Makine ile toprak kazısı (serbest kazı)	m ³	47,54	Ortalama d = 1,50 m
Dolgu (kazı sonrası)	15.125.1004	Çakıl dolgu, makine ile serme-sıkıştırma	m ³	201,69	Geri dolgu (h = 1,00 m)
Dolgu (rampalar) – araç	15.125.1010	Kırmataş ≤63 mm, makine ile serme-sıkıştırma	m ³	472,94	0–4,80 m yaklaşım dolgusu
Üst geçit (yaya) – beton	15.150.1006	Hazır beton C30/37 (nakil dahil)	m ³	3.276,28	Yaya üst geçidi
Üst geçit (araç) – beton	15.150.1007	Hazır beton C35/45 (nakil dahil)	m ³	3.401,28	Araç üst geçidi
Üst geçitler – kalıp	15.180.1003	Plywood betonarme kalıbı	m ²	824,39	Üst geçit kalıp
Üst geçitler – donatı	15.160.1004	Nervürlü beton çeliği Ø14–Ø28	ton	38.016,85	Üst geçit donatı

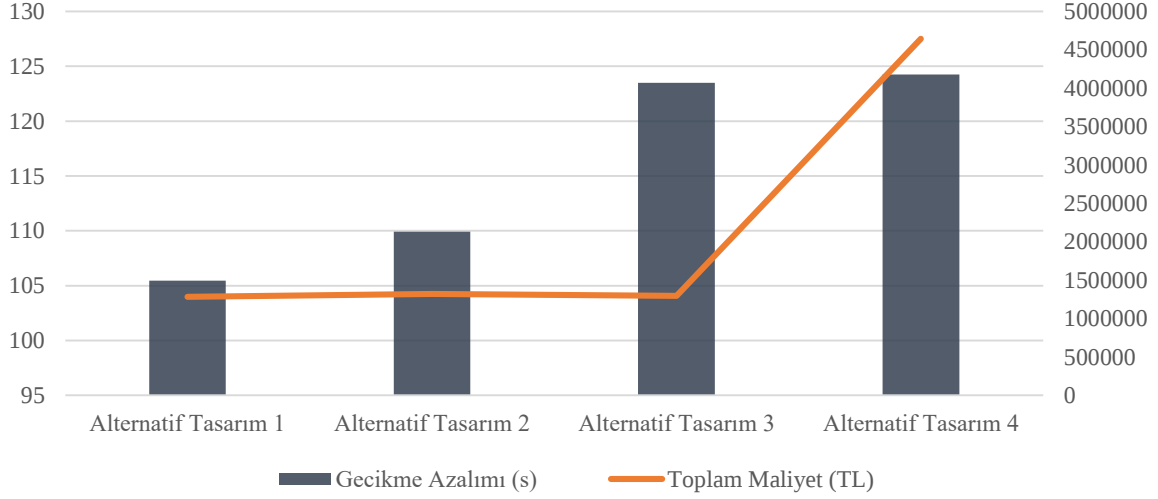
Metrajlar, her bir alternatif tasarım için önerilen geometrik düzenlemelerin plan şemaları üzerinden yaklaşık olarak belirlenmiş ve tüm alternatiflerde aynı birim fiyat seti kullanılarak maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. Böylece maliyet farklarının yalnızca tasarım türünden kaynaklanması hedeflenmiştir. Elde edilen toplam yapım maliyetleri Tablo 10’da sunulmaktadır.

Tablo 10. Tasarımların maliyetleri.

İş Kalemi	Alternatif Tasarım 1	Alternatif Tasarım 2	Alternatif Tasarım 3	Alternatif Tasarım 4
Asfalt Dökümü	112.000	125.000	134.700	194.834
		341		

Alt Temel Serimi	49.000	81.900	97.600	115.500
Kazı	35.000	35.000	32.000	24.255
Dolgu (Kazı sonrası)	88.000	88.000	80.000	73.464
Üst Geçit (Yaya)	950.000	950.000	950.000	0
Üst Geçit (Araç)	0	0	0	4.092.000
Dolgu (Rampalar)	0	0	0	128.427
TOPLAM	1.234.000	1.279.900	1.294.300	4.643.980

Dört farklı kavşak düzenlemesi için elde edilen gecikme azalmaları ile bu düzenlemelere ait toplam maliyetler karşılaştırılmalı olarak Şekil 19'da sunulmaktadır. Mavi sütunlar, her senaryoda mevcut duruma göre sağlanan ortalama zaman tasarrufunu (saniye cinsinden) temsil ederken, turuncu çizgi ise ilgili senaryonun toplam maliyetini (TL cinsinden) göstermektedir.



Şekil 19. Fayda/maliyet grafiği.

Bu çalışmada, farklı kavşak türlerinin sağladığı toplam fayda (zaman ve emisyon kazancı) ile yatırım maliyetleri karşılaştırılarak kazanç/maliyet verimliliği hesaplanmıştır. Tablo 11'de sunulan gecikme ve emisyon değerleri, Tablo 8'de verilen kritik akım doğrultusundaki çıktılarından farklı olarak, mutlak sonuçları değil, her bir senaryonun mevcut duruma göre sağladığı değişimi ifade eden değerleri göstermektedir. Zaman kazancı, her düzenleme için ortalama zaman tasarrufu (Δt), PHF ile düzeltilmiş araç sayısı (4202 araç) ve zaman değeri ($V_oT = 454 \text{ TL/h}$) kullanılarak belirlenmiştir. Emisyon kazancı ise CO, NOx ve VOC emisyonlarındaki azalmaların birim parasal değerleriyle çarpılmasıyla elde edilmiştir. Toplam kazanç, zaman ve emisyon kazançlarının toplamı olarak hesaplanmış, bu değerlerin kavşak yapım maliyetlerine oranlanmasıyla da kazanç/maliyet endeksi oluşturulmuştur. Bu yöntemle, her kavşak alternatifinin ekonomik ve çevresel etkinliği nicel olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 11. Tasarımların kazanç/maliyet endeksleri.

Alternatif	Δt (s)	ΔCO (g)	ΔNOx (g)	ΔVOC (g)	Zaman Kazancı (TL/h)	Emisyon Kazancı (TL/h)	Toplam Kazanç (TL/h)	Maliyet (TL)	Kazanç/Maliyet Endeksi (h^{-1})
AT1	105,45	522,52	101,66	121,10	2341,33	420	2761,33	1.234.000	0,0021
AT2	109,93	677,84	131,88	157,10	2442,89	476	2918,89	1.279.900	0,0022
AT3	123,5	687,00	133,67	159,22	2746,67	530	3276,67	1.294.300	0,0025
AT4	124,24	708,69	137,89	164,25	2762,13	593	3355,13	4.643.980	0,0007

Bu çalışmada önerilen alternatiflerin karşılaştırılabilmesi amacıyla, normalize edilmiş performans analizi kapsamında, gecikme azalımı (Δt), toplam kazanç ve kazanç/maliyet endeksi göstergeleri kullanılmıştır. Göstergeler farklı birimlere sahip olduğundan, alternatifler arasında karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla min-max normalizasyon yöntemi uygulanmıştır. Tüm göstergelerde yüksek değerler daha iyi performansı temsil etmektedir (Tablo 12). Normalizasyon için Eş. 4 kullanılmıştır.

$$\frac{x_{norm}}{x - x_{min}} = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

Her bir göstergeye eşit ağırlık ($w = 1/3$) verilerek toplam performans skoru Eş. 5 ile hesaplanmıştır:

$$S = \frac{1}{3} (\Delta t_{norm} + Toplam\ Kazanç_{norm} + K/M_{norm}) \quad (5)$$

Tablo 12. Alternatif tasarımlara ait ham ve normalize performans göstergeleri ile toplam skor ve sıralama sonuçları.

Alternatif	Ham Değerler			Normalize Edilmiş Göstergeler				Sıralama
	Δt (s)	Toplam Kazanç (TL/saat)	Kazanç/Maliyet Endeksi (saat ⁻¹)	$(\Delta t)_{norm}$	(Toplam Kazanç) _{norm}	$(K/M)_{norm}$	Toplam Skor	
AT1	105,45	2761,33	0,0021	0,00	0,00	0,78	0,26	4
AT2	109,93	2918,89	0,0022	0,24	0,11	0,83	0,39	3
AT3	123,50	3276,67	0,0025	0,95	0,74	1,00	0,90	1
AT4	124,24	3355,13	0,0007	1,00	1,00	0,00	0,67	2

AT4 gecikme azalımı ve toplam kazanç açısından yüksek değerlere sahip olmakla birlikte, yatırım maliyetinin yüksek olması nedeniyle kazanç/maliyet endeksinde zayıf kalmaktadır. AT3 ise tüm göstergeler arasında daha dengeli bir performans sergileyerek en yüksek toplam skoru elde etmiştir.

Model sonuçlarının parametre belirsizliklerine karşı sağlamlığını incelemek amacıyla, duyarlılık analizi kapsamında, zaman ve emisyon kazançlarının parasal karşılıkları $\pm\%10$, $\pm\%20$ ve $\pm\%30$ oranlarında değiştirilmiştir. Yatırım maliyetlerinin tüm senaryolarda sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu kapsamda Tablo 13'te alternatiflerin toplam kazançları ve kazanç/maliyet endeksleri yeniden hesaplanmış ve görece sıralamaları karşılaştırılmıştır.

Zaman ve emisyon kazançlarının parasal değerlerinde $\pm\%30$ 'a kadar yapılan değişikliklere rağmen alternatiflerin görece sıralamasında herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. AT3 alternatifi tüm senaryolarda en yüksek kazanç/maliyet performansını koruyarak en avantajlı çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, elde edilen sonuçların parametre belirsizliklerine karşı sağlam olduğunu göstermektedir.

Tablo 13. Maliyet değişim senaryolarına göre kazanç/maliyet endeksleri ve alternatif tasarımların sıralaması.

Alternatif	Temel Senaryo K/M	%10 Senaryo K/M	%20 Senaryo K/M	%30 Senaryo K/M	Sıralama (Tüm Senaryolar)
AT1	0,0021	0,0019	0,0017	0,0015	4
AT2	0,0022	0,0020	0,0018	0,0015	3
AT3	0,0025	0,0023	0,0020	0,0018	1
AT4	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	2

Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla da örtüşmektedir. Örneğin, AAA Michigan tarafından Detroit ve Grand Rapids gibi şehirlerde uygulanan düşük maliyetli müdahaleler sonucunda, bu stratejilerin fayda/maliyet oranları 15:1 ve 16:1 gibi oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır [17]. Benzer şekilde, Promothos Saha tarafından yürütülen çalışmada, yalnızca 81.000 \$'lık bir yatırımla beş yıl içinde 164 çarpışmanın önlenmesi ve 15 milyon \$'lık ekonomik fayda sağlanması öngörülmüştür [19]. Bir diğer çalışmada, Ocakdan'ın [18] bulguları, sinyal optimizasyonunun tek başına önemli faydalar sağlayabildiğini, ancak geometrik düzenlemelerle birlikte uygulandığında bu kazanımların neredeyse iki katına çıkabildiğini ortaya koymuştur. Çalışmada; edilen faydalar, uygulama maliyetleri ile karşılaştırıldığında yüksek fayda/maliyet oranları ortaya koymakta; bu da düşük maliyetli sinyal optimizasyonu ve basit geometrik müdahalelerin yatırım verimliliği açısından güçlü bir potansiyel sunduğunu doğrulamaktadır.

Bu çalışmalar, mevcut araştırmada da görüldüğü üzere; sinyal optimizasyonu, zemin işaretlemeleri ve geometrik düzenlemeler gibi düşük maliyetli mühendislik müdahalelerinin hem trafik güvenliği hem de operasyonel verimlilik açısından ciddi kazanımlar sağlayabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, çoklu kavşak içeren kentsel bir koridorda trafik akışını optimize etmeye yönelik kapsamlı bir değerlendirme yapılmış ve beş farklı tasarım senaryosu operasyonel ve çevresel göstergeler üzerinden karşılaştırılmıştır. İncelenen senaryolar; Mevcut Durum, Sinyal Optimizasyonu, Alternatif Tasarım 1-4'tür. Her senaryo, VISSIM tabanlı mikro-simülasyonlarla gecikme, Hizmet Düzeyi (LOS), yakıt tüketimi, emisyon ve

maliyet kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle Alternatif Tasarım 3 ve 4'ün hem mevcut duruma hem de optimize edilmiş sinyal senaryosuna kıyasla belirgin üstünlük sağladığını göstermektedir. Ortalama araç gecikmesi 140 saniyenin üzerindeyken bu iki senaryoda 20 saniyenin altına düşmüş, LOS değerleri F'den C seviyesine iyileşmiştir.

Çevresel açıdan, CO, NO_x ve VOC emisyonlarında %70'in üzerinde azalma gözlenmiş, bu durum dur-kalk hareketlerin azalması ve daha düzgün hızlanma profilleriyle açıklanmıştır. Yakıt tüketimi de benzer biçimde azalmış; en yoğun hareketin tüketimi 24 litreden 12 litreye gerilemiştir. Alternatif Tasarım 3, düşük maliyeti (~1,29 milyon TL) ile en verimli çözüm olurken; daha pahalı olan Alternatif Tasarım 4 (~4,64 milyon TL), en yüksek operasyonel ve çevresel performansı sunmuştur.

Senaryolar ayrıca ekonomik uygulanabilirlik bakımından incelenmiş; Kazanç/Maliyet Endeksleri hesaplanmıştır. Düşük maliyetine rağmen yüksek verimlilik sağlayan Alternatif Tasarım 3 en avantajlı seçenek olarak öne çıkarken, Alternatif Tasarım 4 performans artışıyla ikinci sırada yer almıştır. Trafik güvenliği doğrudan analiz edilmemiş olsa da, gecikme ve dur-kalk davranışlarındaki azalmaların olumlu etkiler yaratacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak, analizler kapsamlı altyapı yatırımlarına gerek kalmadan da anlamlı performans artışları elde edilebileceğini göstermektedir. Özellikle Alternatif Tasarım 3 gibi düşük maliyetli geometrik düzenlemelerle LOS değerlerinde F'den C seviyesine düşüş sağlanmış, böylece yüksek maliyetli adaptif sistemlere ihtiyaç duyulmadan etkili sonuçlar alınabileceği kanıtlanmıştır. Elde edilen bulgular, ekonomik ve teknik açıdan dengeli müdahalelerin kentsel kavşak performansını artırmada güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Kaynaklar

- [1] D.N, N., Chidiebere A, A., C. Felix, O., & C.C., E. (2019). Analytical Study of Causes, Effects and Remedies of Traffic Congestion in Nigeria: Case Study of Lagos State. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 05(09), 11-19.
- [2] Özen, M. (2020). Dört Kollu Sinyalize Kentsel Kavşaklarda Trafik Kazalarının Sıklığını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *Teknik Dergi*, 31(3), 10033-10053.
- [3] Karayolları Genel Müdürlüğü. (2025). *2024 yılı trafik kazalarına ait özet bilgiler*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [4] Karayolları Genel Müdürlüğü. (2024). *2023 trafik ve ulaşım bilgileri*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [5] Taner, İ., Büyükcay, H., Özsan, F., & Ghasemlou, K. (t.y.). KAMERA TABANLI DİNAMİK KAVŞAK YÖNETİM SİSTEMLERİNİN TRAFİK KAZALARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ: KONYA ÖRNEĞİ.
- [6] Öksüz, M. İ. (2022). Kavşaklar üzerinde yapılan geometrik düzenlemelerin araç trafiği problemlerinin çözümlerine etkileri (Bahçelievler örneği).
- [7] Ahmed, K. (2011). Evaluation of Low Cost Technique "Indirect Right Turn" to Reduce Congestion at Urbanized Signalized Intersection in Developing Countries. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 568-577.
- [8] Traffic Signal Change and Clearance Interval Pooled Fund Study: Synthesis Report. (t.y.).
- [9] M., Demirel, Z., Pehlivan, Ö., Esirgün, E., & Almusawi, A. (2025). Impact of Increased Heavy Vehicle Traffic on Three-Leg Intersections: A Case Study on Traffic Flow and Congestion Analysis.
- [10] Erol, D. (2018). Kentiçi ışıklı ve dönel kavşak uygulamalarının performans kriterlerine etkisi: Denizli örneği (Master's thesis).
- [11] Ağbulut, O. (2024). Optimization of traffic signals on roundabouts via reinforcement learning [Doktora tezi, Yaşar Üniversitesi].
- [12] Çelik, G. (2024). Sinyalize kavşaklarda piezoelektrik sensörler ile erişilebilir yaya butonu uygulaması (Master's thesis).
- [13] Fan, J., Li, A., İlahi, A., & Gao, K. (2023). Emission impacts of left-turn lane on light-heavy-duty mixed traffic in signalized intersections: Optimization and empirical analysis. *Heliyon*, 9(5), e16260.
- [14] Finkelberg, I., Petrov, T., Gal-Tzur, A., Zarkhin, N., Pocta, P., Kovacicova, T., Buzna, L., Dado, M., & Toledo, T. (2022). The Effects of Vehicle-to-Infrastructure Communication Reliability on Performance of Signalized Intersection Traffic Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 15450-15461.
- [15] Mukherjee, D. (2025). Assessing pedestrian safety at urban signalized intersections across various land use types: Insights from a mid-sized Indian city. *Discover Applied Sciences*, 7(5),
- [16] Yaibok, C., Suwanno, P., Pornbunyanon, T., Kanjanakul, C., Luatthep, P., & Fukuda, A. (2024). Improving urban intersection safety insights from simulation analysis. *IATSS Research*, 48(4), 523-536.
- [17] Raji, R., & Smith, S. (2003). Low cost traffic engineering improvements at urban intersections: A review and case study. Institute of Transportation Engineers.
- [18] Ocakdan, S. (2010). *Arterlerin yeniden yapılandırılmasında simülasyon tekniği ile karar verme ve bir kavşak uygulaması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [19] Saha, P. (2022). Developing a Low-Cost Safety Improvement Program for Intersections in an Urban Roadway Network: A Case Study. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 5713435.
- [20] Webster, F. V. (1958). *Traffic signal settings* (No. 39).

- [21] Kadioğlu, E. (2024). Sinyalize kavşakların modern dönel kavşaklara çevrilerek performans analizlerinin yapılması: Balıkesir Akçay ve Zeytinli kavşağı örneği (Master's thesis).
- [22] Atilla, T. A. L. U., & ÖZDEN, Ö. Ü. A. KAVŞAK PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE GEOMETRİK TASARIMLARININ ETKİSİNİN BENZETİM YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ: SEDAŞ KAVŞAĞI ÖRNEĞİ.
- [23] Çırak, G. (2023). Sinyalize dönel kavşakların tasarım yöntemlerinin analizi (Master's thesis).
- [24] Cheng, D., Messer, C. J., Tian, Z. Z., & Liu, J. (2003, January). Modification of Webster's minimum delay cycle length equation based on HCM 2000. In *Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington, DC*.
- [25] Akın, E. (2025). Dört kollu ve kolları birbirine dik olan bir dönel kavşakta kısmi sinyalizasyon uygulaması ve etkilerinin araştırılması: Erzincan örneği (Master's thesis).
- [26] Küçükgüngör, O. (2024). Geometrik iyileştirmesi yapılan kavşaklardaki performans değerlerinin simülasyon ortamında incelenmesi (Master's thesis).
- [27] Yavuz, F. (2024). Kavşak tasarımı ve kavşaklarda yapılan iyileştirmeler Bitlis ve Kocaeli ili örneği. (Master's thesis).
- [28] Çelik, M. (2023). Dönel kavşakların incelenmesi ve mühendislik yöntemleri ile karşılaştırılması, Elazığ ili dönel kavşak örneği (Master's thesis).
- [29] Nar, İ. (2025). Karayolunda bir köprülÜ kavşak çalışmasının enerji tasarrufu ve maddi kayıpların azalması yönünden incelenmesi (Master's thesis).