



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Koordine kavşaklarda sinyalizasyon sistemine etki eden parametrelerin incelenmesi vaka durum çalışması

Analysis of the parameters affecting the signaling system at coordinated intersections case study

Yazar(lar) (Author(s)): Zeynep Nur DUMAN¹, Yetiş Şazi MURAT², Mehmet YILMAZ³

ORCID¹: 0000-0001-9882-0573

ORCID²: 0000-0002-7033-7026

ORCID³: 0000-0002-2761-2598

To cite to this article: Duman Z. N., Murat Y. Ş. ve Yılmaz M., “Koordine kavşaklarda sinyalizasyon sistemine etki eden parametrelerin incelenmesi vaka durum çalışması”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Duman Z. N., Murat Y. Ş. ve Yılmaz M., “Koordine kavşaklarda sinyalizasyon sistemine etki eden parametrelerin incelenmesi vaka durum çalışması”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1200368

Koordine Kavşaklarda Sinyalizasyon Sistemine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi Vaka Durum Çalışması

Analysis of the Parameters Affecting the Signaling System at Coordinated Intersections Case Study

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kavşaklardaki sıkışıklıklar minimuma indirilerek daha etkili yönetilmektedir. (Congestion at intersections is minimized and managed more effectively.)
- ❖ Sinyal koordinasyonunda, etkili parametrelerin değişim durumlarına göre sistem performansının ne seviyede değişebileceği incelenmektedir. (It is examined to what extent the system performance can change according to the change states of the effective parameters in signal coordination.)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

İncelenen kavşaklar arasında koordinasyon oluşturulup, farklı senaryo durumları için değerlendirmeler yapılmıştır. (Coordination was established between the determined intersections and evaluations were made regarding different scenario cases.)

Bant Genişliği Etkinliği	B _{GBY}	B _{GDY}	B _e	Değerlendirme
Mevcut Faz Durumu	14sn	22sn	0,25	İyi İlerleme
Farklı Faz Durumu	15sn	18sn	0,23	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-S)	15sn	16sn	0,21	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-Ö-A)	15sn	17sn	0,22	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-S)	16sn	15sn	0,21	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-A)	17sn	17sn	0,23	Orta Seviye İlerleme
Sola Dönüslü Faz Durumu (15-S)	18sn	18sn	0,25	İyi İlerleme
Sola Dönüslü Faz Durumu (15-Ö)	20sn	20sn	0,27	İyi İlerleme
Sola Dönüslü Faz Durumu (15-A)	20sn	20sn	0,27	İyi İlerleme
Sola Dönüslü Faz Durumu (21-S-A)	18sn	18sn	0,25	İyi İlerleme

Şekil. Bant Genişlikleri /Figure. Bandwidths

Amaç (Aim)

Sinyal koordinasyonunda etkili parametreleri incelemek ve daha etkin bir koridor yönetimi sağlamak. (To examine the effective parameters in signal coordination and to provide a more effective corridor management.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sinyal koordinasyonunda bant genişliği optimizasyonu ve ofset optimizasyonu yöntemleri dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. (The design was made by considering the bandwidth optimization and offset optimization methods in signal coordination.)

Özgünlük (Originality)

Literatürde, incelenen parametrelerin tamamını ele alan ve bazı etkili diğer parametreleri içeren kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. (In the literature, there is no comprehensive study that covers all of the investigated parameters and includes some other effective parameters.)

Bulgular (Findings)

Faz planının ve kavşak geometrilerinin değişiminin sinyal koordinasyonuna olumlu etki ettiği ve seyahat sürelerini %50'ye varan mertebelerde azalttığı anlaşılmıştır. (It has been understood that the change of phase plan and intersection geometries has a positive effect on signal coordination and reduces travel times by up to 50%.)

Sonuç (Conclusion)

Etkili bir koridor yönetimi için, sinyal koordinasyonu birlikte kavşak geometrilerinin ve faz planlarının da değiştirilmesinin faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. (It has been concluded that for an effective corridor management, it is beneficial to change the intersection geometries and phase plans along with the signal coordination.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / (The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission)

Koordine Kavşaklarda Sinyalizasyon Sistemine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi Vaka Durum Çalışması

(Bu çalışma yüksek lisans tezinden üretilmiştir[1]. / This study was produced from a master's thesis.)

Araştırma Makalesi / Research Article

Zeynep Nur DUMAN^{1*}, Yetiş Şazi MURAT², Mehmet Yılmaz¹

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Fırat Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 07.11.2022 ; Kabul/Accepted : 15.04.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 08.09.2023)

ÖZ

Kentsel ulaşımında; nüfus fazlalaşması, sanayileşme ve hızlı kentleşme nedeniyle, sorunlar görülmekte ve bu sorunları çözmek amacıyla farklı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmada, Elazığ ili örneğinde, ayırık (izole) olarak denetlenen ve sıralı şekilde bir koridor üzerinde bulunan üç kavşak incelenmiştir. Bu koridorda bulunan yerleşik kameralar ile haftanın bütün günlerinin zirve saatlerinde trafik hacim ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kavşakların mevcut durumdaki geometrileri, denetim biçimleri, devre, faz süreleri ve faz planları dikkate alınmıştır. Kavşaklara ait mevcut durum, bir mikrosimülasyon yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Kavşaklar arasındaki ortalama hız ve mesafeler dikkate alınarak, ofset süreleri tespit edilmiş ve kavşaklar arasında eşgüdüm (koordinasyon) oluşturulmuştur. Kavşak geometrisi, faz ve devre süresi diyagramları üzerinde değişiklikler yapılarak oluşturulan dört farklı eşgüdümlü durum (senaryo) mikrosimülasyon yazılımıyla analiz edilip değerlendirilmiştir. Mevcut durum ve oluşturulan dört farklı eşgüdümlü durumun performansı; gecikme, durma sayısı, hizmet seviyesi, kuyruk uzunlukları, seyahat süresi ve ortalama hız ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, mevcut duruma göre, eşgüdümlü (koordine) denetim durumlarında, dikkate alınan performans ölçütlerinde önemli seviyelerde (%50 ve üzerinde) iyileşmeler elde edildiği, bu iyileşmelerin her bir ölçüt ve durum için farklı değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak, incelenen koridor özelinde, kavşakların ayırık denetlenmesi yerine eşgüdümlü biçimde denetlenmesinin kentsel trafik yönetimi açısından faydalı olacağı ve koridor yönetiminde, sinyal sürelerinin yanında, faz planı ve kavşak geometrilerinin de yeniden düzenlenmesinin katkı sağlayabileceği bulgusuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Trafik, sinyalizasyon, koordine kavşaklar, bant genişliği, ofset.

Analysis of the Parameters affecting the Signaling System at Coordinated Intersections Case Study

ABSTRACT

Population growth, industrialization, and rapid urbanization have led to problems in urban transportation, and different approaches are needed to solve these problems. In this study, three intersections on a sequential corridor with an isolated control system in Elazığ province were examined as an example. Traffic volume measurements were taken during peak hours of all days of the week using built-in cameras in this corridor. The existing geometry of the intersections, control forms, signal cycles, phase durations, and phase plans were also considered. The current situation of the intersections was analyzed and evaluated using microsimulation software (PTV Vissim). Offset times were determined by considering the average speed and distances between the intersections, and coordination was established between the intersections. Four different coordinated states were analyzed and evaluated using microsimulation software by making changes to the intersection geometry, phase, and cycle time diagrams. The delay, number of stops, service level, queue lengths, travel time, and average speed parameters were compared between the current situation and the four different coordinated situations created. As a result of the study, it was found that significant improvements (50% or more) were achieved in the performance criteria considered in the situations of coordinated control compared to the current situation, and these improvements had different values for each criterion and situation. Therefore, it was concluded that coordinated control of intersections instead of isolated controls would be beneficial for urban traffic management, and the reorganization of intersection geometries together with the signal timings and phase plans could contribute to corridor management.

Keywords: Traffic, signaling, coordinated intersections, bandwidth, offset.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç kullanımı her ne kadar kişilerde özgür hareket

sağlasa da; çevresel faktörler, güvenlik, zaman ve trafik gibi unsurları olumsuz yönde etkilemektedir [2]. Dünyadaki nüfusun çoğunluğunun yaşadığı ve yoğunluğunun gün geçtikçe artmaya devam ettiği kentsel alanlarda [3]; trafiğin etkin yönetilememesi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : znduman@firat.edu.tr

nedeniyle, yol ağlarında gecikmeler, kazalar ve tıkanıklıklar oluşabilmektedir. Trafikteki bu olumsuzluklar, kullanıcılarda psikolojik bazı sıkıntıların oluşmasına, gürültü kirliliğinin meydana gelmesine, çevreye zararlı gazların salınmasına ve yakıt tüketiminin artmasına sebebiyet vermektedir. Bu tür olumsuzluklar en fazla trafikteki doğrultuların çakıştığı ve dolayısıyla da kazaların en çok görüldüğü kavşak noktalarında meydana gelmektedir [4,5]. Kavşak tasarımında istenen en önemli sonuç; taşıtların minimum gecikmeyle kavşağı terk etmesidir. Bu durumun oluşması kavşakların yüksek performansla çalıştığını göstermektedir [6,7,8,9].

Kavşak tasarımında etkili olan; faz planı, devre süresi vb. pek çok unsur söz konusudur. Devre süresi içinde, taşıtların kavşaktan geçiş sıralamasına faz denilmektedir. Yaya ve taşıtların öncelik sırası, faz diyagramı sayesinde sağlanmaktadır. Faz diyagramları; dönüş hareketleri, kavşak geometrisi ve trafik hacmine göre belirlenmektedir. Sinyalizasyon sistemi tasarımında oldukça etkili bir parametredir [10,11]. Faz süresinin sıralı olarak toplanmasıyla, **devre süresi** elde edilmektedir [12]. Devre uzunluğunun artması veya azalması, çeşitli iyileşmeler sağlarken; kötüleşmelere de sebep olabilmektedir [13]. **Gecikme**; sinyalizasyon sistemlerinin, kavşak geometrisinin, trafik işaretlerinin ve kavşakta bulunan taşıtların sebep olduğu zaman kaybı olarak tanımlanmaktadır. Gecikme, kavşaklara ait hizmet seviyelerinin bir göstergesi olduğundan dolayı, kavşakların değerlendirilmesinde çok önemli bir yere sahiptir [14,15,16]. Trafik hacminin fazla olduğu kent içi kavşaklarda, gecikmenin azaltılmasıyla, etkin bir yönetim sağlanmaktadır [17]. Bir koridor üzerinde, birbirini takip eden kavşaklarda, yeşil sinyal sürelerinin başlangıçları arasındaki zaman farkına **ofset** denilmektedir. Ofset süresi, kavşaklarda yeşil dalga koordinasyonunu oluşturmak için kullanılmaktadır. **Bant genişliği** ise, trafik akımlarının, eşgüdümlü kavşaklarda, belirli bir ortalama hız değerini koruyarak, sürekli olarak geçiş yapabildiği yeşil sinyal süresi sınırını ifade etmektedir. Yeşil sinyalden geçen ilk taşıt ile son taşıt arasındaki süredir [18].

Kavşakları, ayırık veya eşgüdümlü biçimde tasarlamak ve bu çerçevede trafiği yönetmek, genel olarak izlenen yaklaşımlardır. Yol ağı yapısı, kavşakların birbirine olan mesafeleri, trafik akımlarının grup hızının korunması gibi unsurlar, bu yönetim stratejisinin tespitinde belirleyici olmaktadır. Literatürde, farklı yönetim stratejilerine dair birçok çalışma mevcuttur. Çalışma kapsamında, eşgüdümlü kavşak yönetimi yaklaşımı ele alınmış ve en uygun yönetim yaklaşımını tespit etmek amacıyla, bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, önceden oluşturulan bazı çalışmalar ve yaklaşımlar aşağıda özetlenmiştir.

Ayrık ve eşgüdümlü kavşak sistemlerinin etkin tasarımı için, ilgili parametrelerin en uygun ve doğru şekilde tespit edilmesi, kullanılması gerekmektedir. Sinyal devre süresinin optimum (en uygun) değerinin belirlenmesi, ofset süresinin doğru biçimde tespiti, doğrudan kavşaklardaki gecikmenin ve koridor boyunca seyahat süresinin azalmasını sağlayabilmektedir [19]. Sinyalizasyona etki eden parametrelerin yanında, kavşakların geometrik özelliklerinin değiştirilmesi, denetim sisteminin performansını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, sola dönüşlerin fazla olduğu durumda, kavşağın bulunduğu alanın ilave bir cep için yeterli olması halinde, ilave dönüş ceplerinin yapılması, kavşak denetiminin etkinliğini artırabilmektedir [20,21]. Sinyal tasarım parametreleri ve geometrik özelliklere ek olarak, farklı sinyal denetim yaklaşımlarının kullanılması ile kavşakların ayırık veya eşgüdümlü biçimde, daha etkin yönetilmesi mümkün olabilmektedir. Özellikle sabit zamanlı kavşak yönetimi yerine, trafik uyarmalı kavşak yönetimi yaklaşımının tercih edilmesi durumunda, kavşaklardaki gecikme sürelerinde %50'lere kadar ulaşabilen seviyelerde iyileşmeler elde edilebilmektedir [22]. Kavşakların ayırık denetimi veya eşgüdümlü denetlenmesinin, koridor ve kavşak performansına etkisi, pek çok araştırmanın gerçekleştirilmesine neden olmuştur [23]. Örneğin, koridor üzerindeki kavşaklara ilave bir kavşak daha eklenmesi ile eşgüdümün etkinliğinin artabildiği görülmüştür [24]. Koridor üzerinde ayırık denetlenen kavşak sistemlerinin eşgüdümlü denetim biçimine dönüştürülmesi, sinyal devre süresi ve ofset sürelerinin en iyi duruma getirilmesi (optimizasyonu), yakıt tüketimi, emisyon değerlerinin ve gecikme süresinin önemli seviyelerde azalmasını sağlayabilmiştir [25, 26]. Bununla beraber, bazı durumlarda, koridor üzerindeki kavşakların birbirlerine yakın mesafede bulunması halinde, kavşakların beraberce tasarlanarak, etkin yönetilen eşgüdümlü ikiz bir kavşak gibi projelendirilmesinin de mümkün olabileceği anlaşılmıştır [27]. Eşgüdümlü kavşak tasarımında, sistem performansını ölçmek ve en uygun sistemi bulmak amacıyla, performans ölçütlerinin detaylı olarak incelenmesi sonucunda, bazı yeni yaklaşımlar ve ölçütler geliştirilmiştir [28,29]. Koridordaki ortalama hız ve duruş sayısı ölçütlerinin beraber değerlendirilmesiyle, geleneksel yaklaşımlara göre daha hassas değerlendirme yapabilen, karma yaklaşım modelleri ortaya çıkmıştır [30]. Otonom ve bağlı araç teknolojilerinin yakın gelecekte kullanılabilme ve yaygınlaşma potansiyeli nedeniyle, son zamanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda, bu teknolojiler dikkate alınmış ve eşgüdümlü kavşak tasarımında, otonom araçların da bulunduğu karma trafik koşullarını içeren bazı modeller geliştirilmiştir [31, 32, 33].

Yukarıda özetlenen çalışmalarda, genellikle sinyal sürelerinin iyileştirilmesiyle ilgilenilmiştir. Faz planı ve geometrik yapıyı beraberce dikkate alan çalışmalar sınırlıdır [26, 34] Bu çalışmada, sinyal

koordinasyonunun etkinliğini artırmak amacıyla, sinyallerin süreleri yanında, faz planı ve kavşakların geometrik yapılarının değiştirilmesi konusu ele alınmıştır. Ayrıca, sistem performansını incelemek amacıyla, kavşak koordinasyonu ile oluşan bant genişliğinin etkinliği ve kapasitesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Elazığ kentinde trafik yoğunluğu açısından önem arz eden bir koridor için analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

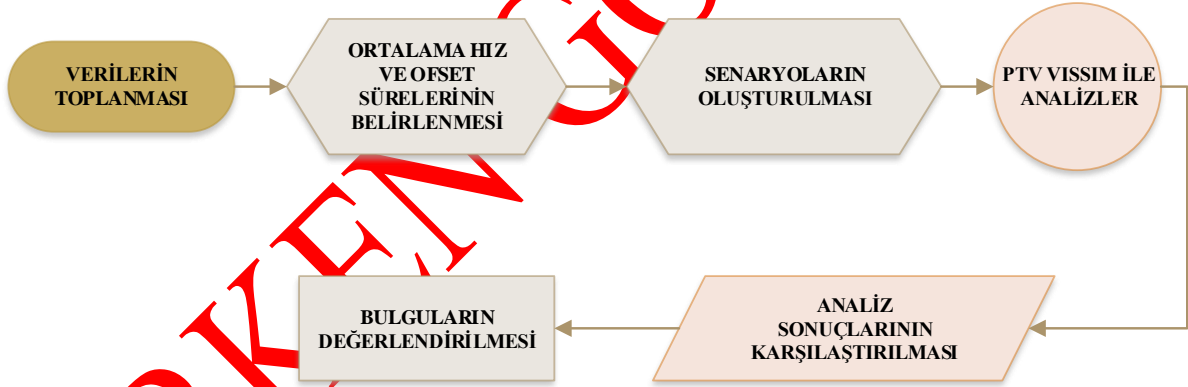
Yapılan çalışma, altı başlıktan oluşmaktadır. Çalışmanın ikinci başlığında; izlenen metodoloji ile ilgili olarak, eşgüdümlü kavşaklar ve bant genişliği üzerine genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü başlığında; incelenen kavşaklar tanımlanmış, kavşaklara ait mevcut durumdaki trafik hacim değerleri, faz ve devre diyagramları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü başlıkta; kavşaklar arasında koordinasyon sağlanarak oluşturulan farklı durumlar anlatılmıştır. Beşinci başlığında, PTV Vissim yazılımı ile mevcut ve oluşturulan dört durum analiz edilip karşılaştırılmıştır. Son olarak, altıncı başlıkta ise, elde edilmiş sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Bu çalışma, bir vaka durum analizini içermektedir. Bu çerçevede, Elazığ kentinde, trafik yoğunluğu bakımından önem arz eden bir koridor seçilmiş ve bu koridorda trafiğin daha etkin biçimde yönetilebilmesi

amacıyla, konu ile ilgili trafik mühendisliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan metodoloji, Şekil 1'deki akış çizelgesinde özetlenmiştir. Çalışma

kapsamında, öncelikle, incelenen koridor ile ilgili trafik hacim verileri ve genel olarak koridordaki kavşaklara ait sinyalizasyon ve denetim durumu hakkındaki veriler toplanmıştır. Bu veriler, Elazığ Belediyesi'nden elde edilmiştir. Veri toplama hakkındaki detaylar, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde anlatılmıştır. Öncelikle kavşakların mevcut durumdaki trafik hacim verileri, sinyallerin süreleri ve faz planları dikkate alınarak mikrosimülasyon yazılımı (PTV Vissim 2021.00-05- 64 bit versiyonu) ile analiz edilmesine karar verilmiştir. Ayrıca, koridor üzerindeki kavşakların ayrı ve eşgüdümlü olarak denetlenmesi, sinyalle dönel kavşakların, sola dönüş cepli kavşaklar biçimine dönüştürülmesi, faz planı seçeneklerinin uygulanması ve eşgüdümlü denetim için optimum ofset sürelerinin belirlenmesi vb. gibi durumlar, farklı senaryolar olarak dikkate alınmıştır. Senaryoların tamamı, mikrosimülasyon yazılımı ile analiz edilmiş ve kavşaklardaki ortalama gecikme süreleri, koridordaki seyahat süreleri, ortalama hız değerleri ve eşgüdümlü denetim için yeşil bant genişliğinin etkinliği gibi ölçütler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Konu ile ilgili aşağıda bazı terim ve başlıklar açıklanmıştır.



Şekil 1. Çalışmanın Akış Çizelgesi (Flow Chart of the Study)

2.1. Eşgüdümlü (Koordine) Kavşaklar (Coordinated Intersections)

Trafik mühendisliğinde, birbirleriyle ilişkili olarak yönetilen kavşaklara, **eşgüdümlü kavşak**; ayrı olarak yönetilen (ilişkisi bulunmayan) kavşaklara ise, **ayrık (izole) kavşak** adı verilmektedir. Kavşakların, eşgüdümlü şekilde çalışabilmeleri için, birbirlerine yakın

mesafede (en fazla 600-800 m) ve komşu olmaları gerekmektedir. Bununla beraber, taşıtların grup halinde hareket etme durumu, grup hızı ve buna bağlı olarak koridor özelliklerine göre, doğru tespit edilmiş ofset süresi gibi parametreler, koordinasyon sisteminin etkinliğini değiştirebilmektedir. Kavşaklar arasında etkin

bir koordinasyon sağlanarak; gecikmelerin, durma sayılarının ve kuyruk oluşumunun önüne geçilebilmektedir [23]. Etkin bir koordinasyon sisteminde, koridor üzerindeki kavşaklarda, belirli bir

ortalama hızı sahip olan araçların, yeşil sinyalde sürekli biçimde geçebildiği süreyi ifade eden bant genişliği kavramının iyi irdelenmesi ve maksimize edilmesi gerekmektedir.

2.2. Bant Genişliği (Bandwidth)

Taşıtların, birbirini takip eden kavşaklarda, sürekli olarak yeşil sinyalden geçebildiği maksimum süreyi ifade etmektedir. Kısacası, yeşil sinyale giren ilk taşıt ile, çıkan son taşıt arasındaki, birimi saniye olan zaman aralığıdır [10]. Bant genişliğinin maksimum seviyeye çıkarılabilmesi için; sinyal devre ve ofset sürelerinin, ayrıca faz planının, en doğru şekilde seçilmesi gerekmektedir. Optimum ofset süresi seçilmediğinde, bant genişliği aralığı azalır. Bu durum da trafik akımlarında gecikmelere sebep olmaktadır. Ayrıca, trafik akımlarının, koridor boyunca belirli bir ortalama hızı grup olarak koruyabilmeleri, ofset süresinin ve dolayısıyla bant genişliğinin etkin kullanımını sağlamaktadır.

Bant genişliği etkinliği için, Bağlantı 1 ve 2 kullanılmaktadır:

$$BG = BGBY + BGDY \quad (1)$$

$$EB = BG / 2C \quad (2)$$

Burada;

BGBY = Batı istikametindeki bant genişliği (sn),

BGDY = Doğu istikametindeki bant genişliği (sn),

EB = Bant genişliği etkinliği,

BG = Bant genişliği (sn),

C = Devre süresi (sn) dir.

Çizelge 1'de, Amerika Birleşik Devletleri'nin, yol tasarımı idaresi olan, Federal Highway Administration (FHWA) tarafından yayınlanan, Trafik Sinyali Zamanlama Kılavuzuna ait, bant genişliği etkinliklerinin değerlendirme seviyeleri gösterilmektedir. Bu kılavuz yardımıyla, Bağlantı 1 ve Bağlantı 2'ye göre hesaplanmış etkinlik aralığı esas alınarak, trafiğin ilerleme durumu belirlenmektedir.

Çizelge 1. Bant Genişliği Etkinlik Değerlendirmesi [26] (Bandwidth Efficiency Evaluation)

Etkinlik Aralığı	Değerlendirme
0.00-0.12	Kötü Seviye İlerleme
0.13-0.24	Orta İlerleme
0.25-0.36	İyi Seviye İlerleme
0.37-1.00	İleri İlerleme

Koridor boyunca mevcut olan sinyallerden, hiç duraksamadan geçen taşıt sayısı, **bant genişliği kapasitesini** ifade etmektedir. Bant genişliği kapasitesi

birimi, taşıt/saat olup, hesabı için Bağlantı 3 kullanılmaktadır.

$$C_{BG} = \frac{3600 * N * BG}{C * t} \quad (3)$$

Burada;

C_{BG} = Bant genişliği kapasitesi (tş/sa),

N = Gidilen istikametteki şerit sayısı,

BG = Bant genişliği (sn),

C = Devre süresi (sn),

T = Bir noktadan sıralı bir şekilde geçen iki taşıt arasındaki zaman farkı (sn) dir.

2.3. Ofset Süresi (Offset Time)

Ofset süresi, kavşaklar arası eşgüdümün (koordinasyonun) sağlanabilmesi için kullanılan bir parametredir. Birbirini takip eden kavşaklarda (belirli bir hız değeri için) yeşil sinyal süresinin, zaman olarak ne kadar sonra başlayacağını ifade etmektedir. Ofset süresi hesabının yapılabilmesi için, kavşaklar arası mesafe ve ortalama hız değerleri belirlenmiştir. Sahada yapılan gözlemlere göre, ortalama hız değeri, 70 km/sa olarak kabul edilmiştir. Kavşaklar arasındaki ofset sürelerinin, etkin olabilmesi için, koridor boyunca hareket eden trafik akımlarının grup olarak (dağılmadan) ilerlemesi ve ortalama hız değerlerinin değişmemesi (veya kesintiye uğramaması) gerekmektedir. Aksi durumda, eşgüdümün (koordinasyonun) etkin biçimde çalışması mümkün olmayacaktır. Ofsetin etkinliği, doğrudan eşgüdüm sisteminin etkinliğiyle ilişkilidir. Ofset sürelerinin hesabı için, aşağıda tanımlanan Bağlantı 4 kullanılmıştır. Bağlantıda görüldüğü üzere; ofset süresi, doğrudan kavşaklar arası mesafe ve ortalama hız değeri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$T_{offset} = X_{mesafe} / V_{ort.hız} \quad (4)$$

Burada;

t_{offset} = Ofset süresi (sn),

X_{mesafe} = Kavşaklar arası mesafe (m),

$V_{ort.hız}$ = Taşıtların ortalama hızları (m/sn) dir.

3. VERİ TOPLAMA VE ANALİZ (DATA COLLECTION AND ANALYSIS)

Çalışma kapsamında, incelenen koridor üzerinde ardışık olarak bulunan (Şekil 2.); Stadyum Kavşağı (1. Kavşak), Kültürpark Kavşağı (2. Kavşak) ve SGK Kavşağı (3. Kavşak) incelenmiştir. Trafiğin akışına göre, gidiş yönü için, Stadyum Kavşağı ile Kültürpark Kavşağı arasındaki mesafe 634,09 m, Kültürpark

Şekilde gösterilen Stadyum ve Kültürpark Kavşağı, dönel adalı sinyalize kavşaklar olup; SGK Kavşağı, sinyalize bir kavşaktır. Tüm kavşaklarda; doğu ve batı kolları, ana yol; kuzey ve güney kolları ise, tali yolları temsil etmektedir. Şerit genişlikleri, yaklaşık olarak 3.3-3.5 m'dir. Çalışılan üç kavşakta, kent içi trafik yoğunluğu ve akışı bakımından önemli konumdadırlar. Çizelge 2'de, bu koridorla ilgili bir kesitte, KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) tarafından ölçülen, YOGT (Yıllık ortalama günlük trafik) verileri ile, kentteki toplam nüfus ve araç sayılarının, 2012-2021 yılları arasındaki süreçte, değişimine ait veriler sunulmuştur. Çizelgede görüldüğü üzere, kentin nüfusu ile araç sayılarında on yıllık süreçte, önemli seviyelerde artış olduğu ve aynı zamanda YOGT değerlerinin de yine bu süreçte, yıllık olarak sürekli arttığı belirlenmiştir. Bu bulgulara göre, kentsel trafik yönetimi anlamında, incelenen koridorun önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 2. 2012-2021 yılları için kent nüfusu, araç sayısı ve YOGT değerlerinin değişimi (Change of urban population, number of vehicles and AADT values for the years 2012-2021)

Yıllar	Nüfus (kişi)	Araç Sayısı (taşıt)	YOGT değeri (taşıt/gün)
2012	562 703	86 800	807
2013	568 239	92 456	3837
2014	568 753	97 975	8203
2015	574 304	104 450	10428
2016	578 789	111 089	10386
2017	583 671	118 424	11281
2018	595 638	123 671	11680
2019	591 098	126 387	11983
2020	587 960	133 025	12199
2021	588 088	137 571	14353

Çalışma kapsamında, koridor üzerinde bulunan tüm kavşakların, detaylı biçimde incelenmesi gereği duyulmuş ve bu kapsamda, öncelikle trafik hacim sayımları gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber,

kavşakların denetiminden sorumlu olan Belediye'den, kavşaklara dair; sinyal süreleri, faz planları ve geometrik özellikleri gibi bilgiler elde edilmiştir.

3.1. Trafik Hacim Sayımları (Traffic Volume Counts)

Kavşakların trafik hacim sayımları, Elazığ Belediyesi Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğü'nden temin edilen, 100m'lik görüş açısına sahip, -40 °C / +85 °C sıcaklıklarda işlev gören, 7/24 performans gösteren, 1920x1920 çözünürlüklü, 360° çevre görünümü balıkgözü kameralardan alınan veriler yardımıyla yapılmıştır. Balıkgözü kameraları, kavşakların tam merkez noktalarında birer adet bulunmaktadır (Şekil 4.). Kavşaklar için haftanın tüm günlerini içerecek biçimde, kamera kayıtları alınmış ve sayımlar yapılmıştır. Ayrıca, sahada yapılan gözlemlerle, faz ve devre süresi diyagramları belirlenerek kavşakların mevcut durumları ortaya çıkarılmıştır.

Çizelge 3. Otomobil Birimi Eşdeğerlik Katsayıları [35] (Automobile Unit Equivalence Coefficients)

Taşıt Kompozisyonu	Otomobil Birimi Eşdeğerlik Katsayısı
Ağır Yük Taşıyan Araç	1.75 o.b.
Otobüs	2.25 o.b.
Hafif Yük Taşıtı	1 o.b.
Motosiklet	0.33 o.b.

Kavşakların trafik hacimlerinin belirlenmesinde, taşıt kompozisyon durumları göz önünde bulundurularak sayımlar yapılmıştır. Sayımlar tamamlandıktan sonra, her bir taşıt cinsinin karşılığı olan otomobil birimi eşdeğeri katsayısıyla çarpılıp otomobil karşılığı (Çizelge 3.) elde edilmiştir [17].



Şekil 4. Kavşakların Balıkgözü Kamera Görüntüleri (Fisheye Camera Images of Intersections) [1]

Trafik hacim sayımları, 15.03.2021-21.03.2021 tarihleri arasında, sabah, öğle ve akşam zirve saatlerinde yapılmıştır. Hafta içi; 08.00-10.00, 12.00-14.00 ve 16.00-18.00 saat aralıklarında, hafta sonu ise, 09.00-13.00 ve 16.00-20.00 saat aralıklarında, toplamda her üç kavşak için, 138 saat olacak şekilde sayımlar yapılmıştır.

Yapılan sayımlara göre; analizler için, trafiğin en fazla yoğun olduğu 15.03.2021 Pazartesi günü ve trafiğin en az yoğun olduğu 21.03.2021 Pazar günü seçilmiştir. Çizelge 4’te üç kavşağa ait otomobil eşdeğeri cinsinden hacim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4. Kavşaklara Ait Otomobil Eşdeğeri Cinsinden Trafik Hacim Sayımları (Traffic Volume Counts in Automobile Equivalent of Intersections) [1]

Akım No	15.03.2021			15.03.2021			15.03.2021			21.03.2021			21.03.2021		
	Sabah Zirve Trafik Hacmi Sayımları			Öğle Zirve Trafik Hacmi Sayımları			Akşam Zirve Trafik Hacmi Sayımları			Sabah Zirve Trafik Hacmi Sayımları			Akşam Zirve Trafik Hacmi Sayımları		
	ST	KP	SG	ST	KP	SG	ST	KP	SG	ST	KP	SG	ST	KP	SG
1 (Doğu Kolu DG)	546	783	770	756	631	748	778	612	670	350	342	499	510	468	400
2 (Doğu Kolu SaD)	28	50	39	26	50	42	28	39	33	10	16	14	25	21	18
3 (Doğu Kolu SoD)	57	132	58	86	143	84	104	129	74	36	57	65	68	105	48
4 (Doğu Kolu UD)	3	1	1	7	6	4	7	3	3	1	1	2	6	5	3
5 (Kuzey Kolu DG)	52	414	317	75	333	252	131	315	221	31	168	112	60	221	175
6 (Kuzey Kolu SaD)	33	59	577	40	67	392	36	56	377	11	26	190	19	33	245
7 (Kuzey Kolu SoD)	15	11	54	10	46	70	14	24	90	5	12	21	9	15	37
8 (Kuzey Kolu UD)	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
9 (Batı Kolu DG)	935	523	397	798	680	558	750	732	583	387	317	284	567	460	419
10 (Batı Kolu SaD)	44	96	60	57	110	84	64	97	86	25	40	36	49	77	65
11 (Batı Kolu SoD)	31	57	240	32	88	161	38	110	423	19	33	154	29	56	231
12 (Batı Kolu UD)	18	5	41	19	10	45	24	12	24	7	7	7	9	7	11
13 (Güney Kolu DG)	87	253	158	52	258	275	46	395	297	32	145	74	48	262	173
14 (Güney Kolu SaD)	21	101	167	22	134	249	18	160	264	13	75	91	19	118	145
15 (Güney Kolu SoD)	53	76	68	43	82	147	42	101	166	23	65	28	27	69	94
16 (Güney Kolu UD)	0	2	0	0	3	0	0	5	0	0	3	0	0	5	0

ST: Stadyum Kavşağı, KP: Kültürpark Kavşağı, SG: SGK Kavşağı, DG: Düz Gidiş, SaD: Sağa Dönüş, SoD: Sola Dönüş, UD: U Dönüş

3.2. Kavşaklara Ait Mevcut Faz Diyagramları (Current Phase Diagrams of Intersections)

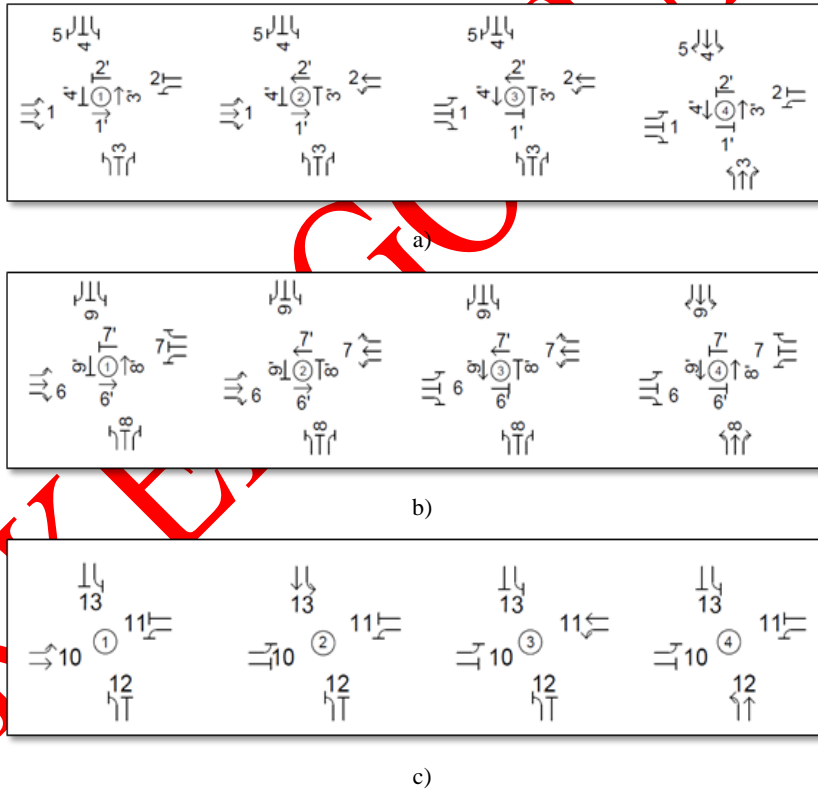
Kavşaklara ait faz diyagramları, sahada gözlem ile elde edilmiş ve ayrıca Belediye'nin ilgili biriminden bilgi

alınarak doğrulanmıştır. Kavşaklar, mevcut durumda, ayrıık olarak ve dört fazlı olarak yönetilmektedir. Şekil 5'te, kavşakların sinyal grup numaraları, Şekil 6'da ise, mevcut faz diyagramları gösterilmektedir. Şekil 6' a ve b, faz planı açısından birbiriyle benzerdir, planların

farklılığı, sadece, Stadyum Kavşağı'nın doğu yönündeki sinyal grubunda, iki akımın bulunması, Kültürpark Kavşağı'nda ise, aynı sinyal grubunda üç akımın bulunmasıdır.



Şekil 5. Kavşakların Sinyal Grupları: (a) Stadyum Kavşağı (b) Kültürpark Kavşağı (c) SGK Kavşağı (Signal Groups of Intersections: (a) Stadium Intersection (b) Kültürpark Intersection (c) SGK Intersection)



Şekil 6. Kavşaklara ait faz diyagramları: (a) Stadyum Kavşağı (b) Kültürpark Kavşağı (c) SGK Kavşağı (Phase diagrams of intersections: (a) Stadium Intersection (b) Kültürpark Intersection (c) SGK Intersection)

3.3. Kavşaklara Ait Mevcut Devre Diyagramları (Current Cycle Diagrams of Intersections)

Çalışma kapsamında incelenen; Stadyum, Kültürpark ve SGK kavşakları, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemiyle kontrol edilmektedir. Bu kavşaklar için, mevcut durumdaki devre ve faz süreleri Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. İncelenen Kavşaklara Ait Mevcut Sinyal Süreleri (Signal Times of Considered Intersections)

AKIM NUMARASI	SİNYAL GRUBU	KIRMIZI SİNYAL SÜRESİ (SN)	KIRMIZI+SARI SİNYAL SÜRESİ (SN)	YEŞİL SİNYAL SÜRESİ (SN)	SARI SİNYAL SÜRESİ (SN)	DEVRE SÜRESİ (SN)
1	1(STAD)	42	2	31	3	78
2	2(STAD)	46	2	27	3	78
3	3(STAD)	60	2	14	2	78
4	4(STAD)	60	2	14	2	78
5	3'(STAD)	40	2	34	2	78
6	4'(STAD)	40	2	34	2	78
7	1'(STAD)	42	2	31	3	78
8	2'(STAD)	46	2	27	3	78
9	5(STAD)	60	2	14	2	78
1	7(KÜLTÜR)	51	2	28	3	84
2	6(KÜLTÜR)	54	2	25	3	84
3	9(KÜLTÜR)	60	2	20	2	84
4	8(KÜLTÜR)	60	2	20	2	84
5	7'(KÜLTÜR)	51	2	28	3	84
6	6'(KÜLTÜR)	54	2	25	3	84
7	9'(KÜLTÜR)	35	2	45	2	84
8	8'(KÜLTÜR)	38	2	42	2	84
1	13(SGK)	88	2	11	3	104
2	11(SGK)	67	2	32	3	104
3	10(SGK)	77	2	22	3	104
4	12(SGK)	86	2	13	3	104

4. SENARYOLAR VE ANALİZLER (SCENARIOS AND ANALYSIS)

Çalışmada, koridor üzerinde ayrı olarak çalışan üç kavşak arasında eşgüdüm sağlanarak (yeşil dalga sistemi kurularak) sistem etkinliği incelenmiştir. Bu çerçevede, mevcut durum (Durum I) ile oluşturulan senaryolar (Durum II, Durum III, Durum IV ve Durum V), simülasyon analizi yapılarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan mikrosimülasyon yazılımının (PTV Vissim), gerçek durumu temsili anlamında geçerli olduğu önceki çalışmalarda kanıtlandığı için tercih edilmiştir [4].

Çalışmada yöntem olarak trafik mühendisliği yaklaşımları esas alınmıştır. Bu manada, koridordaki kavşaklar arasında eşgüdüm sağlanması (en uygun ofset süresinin belirlenmesi), kavşak geometrilerinin değiştirilmesi ve kavşak yönetiminde en uygun devre süresi, faz planı ve faz sayısının tespiti gibi yaklaşımlar izlenmiştir. Söz konusu yaklaşımların etkinliğinin ölçümü için, simülasyon (benzetim) tekniğinin kullanılması öngörülmüştür.

Kavşaklar arasında, eşgüdüm (koordinasyon) oluşturulabilmesi için, ofset süresi hesabı yapılmıştır. Ofset süresi hesabının yapılabilmesi için, kavşaklar arası mesafe ve ortalama hız belirlenmiştir. İncelenen koridor için, ortalama hız değeri, yapılan gözlemlere göre, 70 km/sa olarak kabul edilmiştir. Bağlantı 4 kullanılarak, kavşakların ofset süreleri hesaplanmıştır. Stadyum Kavşağı ile Kültürpark Kavşağı arasındaki

mesafe, 634,09 m olup, ofset süresi 33sn olarak hesaplanmıştır. Kültürpark Kavşağı ile SGK Kavşağı arasındaki mesafe, 782,26 m olup, ofset süresi 40sn olarak hesaplanmıştır.

Dönüş yönlerindeki ofset süreleri, kavşaklar arası mesafeler değiştiği için ayrı hesaplanmıştır. SGK Kavşağı ile Kültürpark Kavşağı arasındaki mesafe, 734,57 m olup, ofset süresi 38sn ve Kültürpark Kavşağı ile Stadyum Kavşağı arasındaki mesafe, 687,00 m olup, ofset süresi 35sn olarak tespit edilmiştir. Hesaplanan ofset süreleri haricinde, koridorda uygulanabilecek farklı hız kabullerine göre (40, 50, 60, 80 km/sa), çeşitli ofset süreleri hesaplanarak, mikrosimülasyon yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu testlerde, etkin ve verimli bir eşgüdümün sağlanamaması nedeniyle, yukarıda hesaplanan ofset süreleri, en uygun süreler olarak seçilmiştir. Her iki istikametdeki ofset sürelerine göre, hesaplamalarda kullanılacak devre süresi, 73 sn olarak kabul edilerek, değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

4.1. Oluşturulan Senaryo Durumları (Scenario Cases Created)

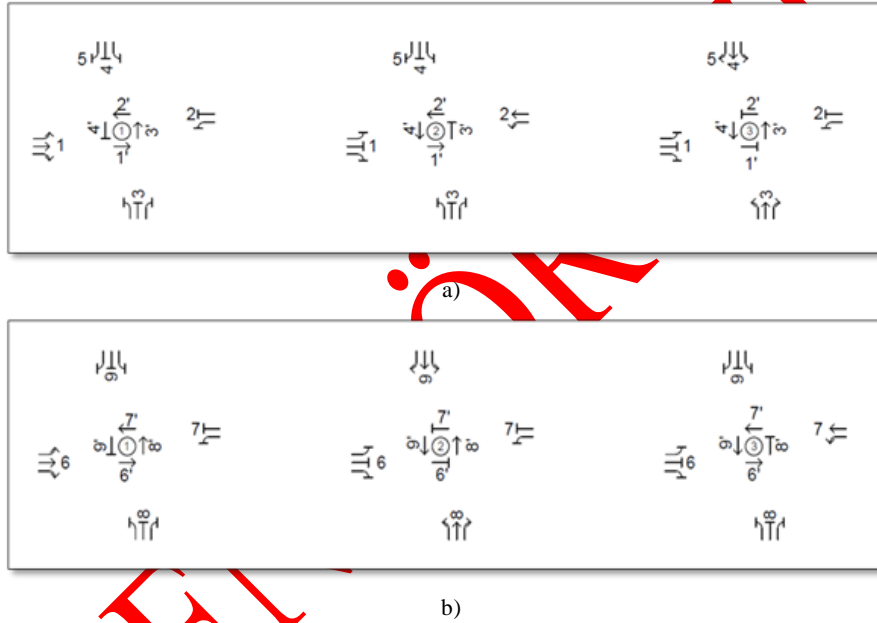
Koridor boyunca, etkin trafik yönetimi sağlamak amacıyla, kavşakların mevcut durumu yanında, bazı senaryo durumları oluşturulmuştur. Çalışmada, öncelikle kavşakların mevcut durumu, **Durum I** olarak dikkate alınmıştır. Mevcut durumda, Stadyum ve Kültürpark kavşakları, sinyalize dönel kavşak, SGK kavşağı ise, sinyalize kavşak olarak, ayrı biçimde

çalışmaktadır. Mevcut durum analizi, diğer senaryo durumlarının etkilerini incelemek için dikkate alınmıştır.

Durum II için; mevcut geometrik yapı ve faz diyagramı değiştirilmeden, ofset süreleri kullanılarak, kavşaklar arasında eşgüdüm sağlanmıştır. Bu durumun, mevcut durumdan farklılığı, sadece kavşaklar arasında eşgüdüm sağlanmasıdır. Koridor boyunca, ayrı olarak çalışan kavşakların, sadece eşgüdümlü olarak çalıştırılmasıyla, elde edilebilecek sonuçlar bu durum ile araştırılmıştır.

Durum III için; mevcut geometrik yapıda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır, ancak, yuvarlak adaya sahip kavşakların faz diyagramlarında, aşağıda gösterilen

(Şekil 7) değişiklikler yapılmıştır. Stadyum Kavşağı ve Kültürpark Kavşağı'nda aynı faz düzenleri çalışmaktadır. İlk olarak, doğu yönünde U dönüşleri serbest olacak şekilde birinci faz çalıştırılmıştır. İkinci faz durumunda, batı yönünde U dönüşleri serbest olacak şekilde faz düzeni çalıştırılmıştır. Üçüncü faz durumunda ise, güney ve kuzey yönleri eş zamanlı çalıştırılarak, faz düzeni sonlandırılmıştır. Bu durumda, yuvarlak adaya sahip olan Stadyum Kavşağı ve Kültürpark Kavşağı'nda, dört faz yerine, üç fazlı denetim uygulanmıştır. SGK kavşağı ise, kuzey ve güney kollardan sola dönen trafik hacimlerinin yoğunluğu nedeniyle, dört fazlı olarak denetlenmiştir. Kavşaklar, ofset süreleri değiştirilmeden, eşgüdümlü olarak yönetilmiştir. Durum II ve Durum III için kullanılan sinyal süreleri, Çizelge 6'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Mevcut Geometrik Yapı, Farklı Faz Diyagramları (Durum III) (a) Stadyum Kavşağı, (b) Kültürpark Kavşağı (Existing Geometric Condition, Different Phase Diagrams (Case III) (a) Stadium Intersection, (b) Kültürpark Intersection)

Çizelge 6. Durum II ve Durum III için Yeşil Sinyal Süreleri (Green Signal Times for Case II and Case III)

Yaklaşım Kolu	Durum II	Durum III
	Yeşil Sinyal Süresi	Yeşil Sinyal Süresi
Batı Kolu (Stadyum Kavşağı)	32	32
Doğu Kolu (Stadyum Kavşağı)	25	18
Güney Kolu (Stadyum Kavşağı)	21	12
Kuzey Kolu (Stadyum Kavşağı)	21	12
Batı Kolu (Kültürpark Kavşağı)	30	17
Doğu Kolu (Kültürpark Kavşağı)	22	25
Güney Kolu (Kültürpark Kavşağı)	19	17
Kuzey Kolu (Kültürpark Kavşağı)	19	17
Batı Kolu (SGK Kavşağı)	14	15
Doğu Kolu (SGK Kavşağı)	22	21
Güney Kolu (SGK Kavşağı)	10	11
Kuzey Kolu (SGK Kavşağı)	10	8

Durum IV ve Durum V için; Stadyum ve Kültürpark Kavşaklarındaki yuvarlak adalar kaldırılarak, üç kavşağa sola dönüş cebi (Şekil 8) yerleştirilmiştir. Yeşil

sinyal süreleri, Webster Yöntemi kullanılarak, günlere ve zirve saat değerlerine göre ayrı-ayrı hesaplanmıştır ve devre süresine oranlanarak, sinyal planlaması

oluşturulmuştur. Her iki durum için, kavşaklar yine eşgüdümlü olarak çalıştırılmıştır. Durum IV ile Durum V, faz planları bakımından, birbirinden farklıdır. Durum IV için dikkate alınan faz planında, tüm kavşak kollarına, ayrı ayrı (sıralı) biçimde kavşaktan geçiş hakkı verilmiştir. Durum V için ise; Doğu ve Batı yönlerindeki düz giden akımlara ile, sola dönen akımlara ayrı fazlarda geçiş hakkı tanınmış, Kuzey ve Güney yönlerinden gelen akımlara ise, sırayla ayrı ayrı geçiş hakkı verilmiştir. Böylece; Durum IV ve Durum V dört fazlı olarak çalıştırılmıştır. Şekil 8’de, Durum IV ve Durum V için (tüm kavşaklara sola dönüş cebi eklenmesi hali) simülasyon programından anlık görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 8. Sola Dönüş Cebi Eklenmiş 2D/3D PTV Vişsim Çizimleri (a) Stadyum Kavşağı, (b) Kültürpark Kavşağı, (c) SGK Kavşağı (2D/3D PTV Vişsim Drawings with Special Left Turn Lanes (a) Stadium Intersection, (b) Kültürpark Intersection (c) SGK Intersection)

Çizelge 7 ve Çizelge 8’de, Durum IV ve Durum V için, simülasyon programında modellenen tüm kavşakların, sinyal gruplarına ait yeşil sinyal süreleri verilmiştir.

Çizelge 7. Durum IV için Yeşil Sinyal Süreleri (Green Signal Times for Case IV)

Akım Kolları	15.03.2021 Sabah Zirve Saati	15.03.2021 Öğle-Akşam Zirve Saati	21.03.2021 Sabah Zirve Saati	21.03.2021 Akşam Zirve Saati
Batı Kolu (Stadyum Kavşağı)	24sn	21sn	16sn	19sn
Doğu Kolu (Stadyum Kavşağı)	16sn	22sn	15sn	20sn
Güney Kolu (Stadyum Kavşağı)	8sn	8sn	16sn	9sn
Kuzey Kolu (Stadyum Kavşağı)	8sn	8sn	10sn	9sn
Batı Kolu (Kültürpark Kavşağı)	19sn	18sn	16sn	17sn
Doğu Kolu (Kültürpark Kavşağı)	20sn	17sn	15sn	17sn
Güney Kolu (Kültürpark Kavşağı)	11sn	8sn	11sn	9sn
Kuzey Kolu (Kültürpark Kavşağı)	9sn	16sn	15sn	14sn
Batı Kolu (SGK Kavşağı)	15sn	15sn	16sn	18sn
Doğu Kolu (SGK Kavşağı)	18sn	19sn	15sn	20sn
Güney Kolu (SGK Kavşağı)	18sn	11sn	16sn	10sn
Kuzey Kolu (SGK Kavşağı)	8sn	14sn	10sn	10sn

Çizelge 8. Durum V için Yeşil Sinyal Süreleri (Green Signal Times for Case V)

Akım Kolları	15.03.2021 Sabah Zirve Saati	15.03.2021 Öğle Zirve Saati	15.03.2021 Akşam Zirve Saati	21.03.2021 Sabah-Akşam Zirve Saati
Batı-Doğu Kolu (Stadyum Kavşağı)	28sn	27sn	28sn	22sn
Sola Dönüş Cebi (Stadyum Kavşağı)	11sn	10sn	13sn	11sn
Güney Kolu (Stadyum Kavşağı)	9sn	9sn	8sn	12sn
Kuzey Kolu (Stadyum Kavşağı)	9sn	9sn	8sn	12sn
Batı-Doğu Kolu (Kültürpark Kavşağı)	23sn	21sn	22sn	20sn
Sola Dönüş Cebi (Kültürpark Kavşağı)	9sn	9sn	8sn	13sn
Güney Kolu (Kültürpark Kavşağı)	13sn	13sn	10sn	11sn
Kuzey Kolu (Kültürpark Kavşağı)	12sn	13sn	17sn	13sn
Batı-Doğu Kolu (SGK Kavşağı)	18sn	20sn	20sn	18sn
Sola Dönüş Cebi (SGK Kavşağı)	11sn	9sn	16sn	13sn
Güney Kolu (SGK Kavşağı)	23sn	14sn	10sn	13sn
Kuzey Kolu (SGK Kavşağı)	9sn	15sn	12sn	13sn

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (FINDINGS AND EVALUATION)

Çalışma kapsamında, PTV Vissim yazılımı kullanılarak, kavşaklara ait mevcut durumun ve oluşturulan dört farklı durumun analizleri gerçekleştirilmiştir. Yazılım, 1979 tarihinde, Almanya'da, PTV Group tarafından oluşturulmuştur. Mikro trafik simülasyon yazılımı olup, kullanılan bütün parametreler, ayrı ayrı ele alınmaktadır. PTV Vissim yazılımı, gerçek dünyayı, çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak, analizler yapmaktadır. Bu sebeple, trafik mühendisliğinde etkin bir role sahiptir. Çalışmada, PTV Vissim yazılımının, 2021.00-05- 64 bit eğitim versiyonu kullanılmıştır [36]. Sistem performansını ölçmek amacıyla, yazılımın verdiği sonuçlar kullanılarak; gecikme, durma sayısı, kuyruk uzunlukları, maksimum (max.) kuyruk uzunlukları, seyahat süresi ve ortalama hız gibi ölçütlerin değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 9. Simülasyon Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular (Findings Obtained from Simulation Studies)

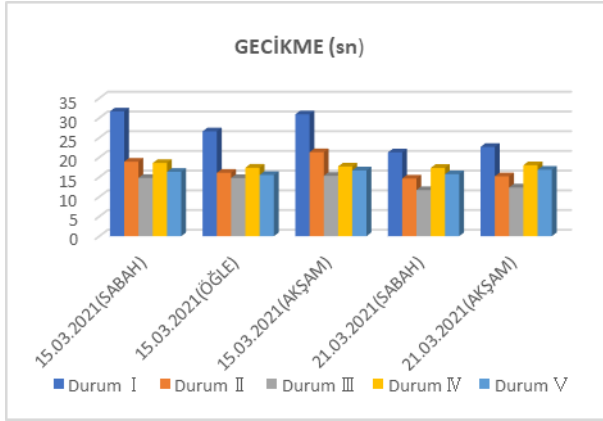
Ölçütler	Stadyum Kavşağı			Kültürpark Kavşağı			SGK Kavşağı					
	Mevcut Durum Ort.	Diğer Durum Ort.	Kazanç (%)	Mevcut Durum Ort.	Diğer Durum Ort.	Kazanç (%)	Mevcut Durum Ort.	Diğer Durum Ort.	Kazanç (%)			
Gecikme (sn/taşıt)	20.63	16.96	37.96	39.73	17.28	53.48	36.92	19.07	46.94			
Durma S	0.82	0.51	36.55	1.07	0.47	51.89	0.77	0.52	31.08			
Karbon (gr)	2482	1763	27.56	4329	2375	41.35	4265	3055	26.43			
Azot (gr)	483	343	27.56	842	462	41.35	830	594	26.43			
Yakıt Tük. (litre/saat)	35.51	25.23	27.56	61.93	33.96	41.37	60	44	25.75			
Maks. Kuyruk (m)	1	76	65	12	5	85	37	60	9	100	53	49
	2	67	28	57	6	159	41	64	10	88	69	23
	3	22	20	10	7	42	41	2	11	65	56	8
	4	43	35	16	8	46	38	12	12	140	67	28
Seyahat Süresi (sn)	1-2	85	56	33			2-3	115	62	47		
	2-1	101	53	45			3-2	127	69	36		
Ortalama Hız (km/sa)	1-2	32	44	40			2-3	28	54	93		
	2-1	31	53	84			3-2	29	44	79		

Şekil 9'da, koridordaki kavşaklar için, gecikme ölçütüne ait sonuçlar gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, mevcut durum yerine, eşgüdümlü kavşak yönetim yaklaşımı uygulanması durumunda, kavşakların tamamında gecikme değerlerinin azaldığı ve bu azalmanın, Stadyum Kavşağı'nda ortalama %38,

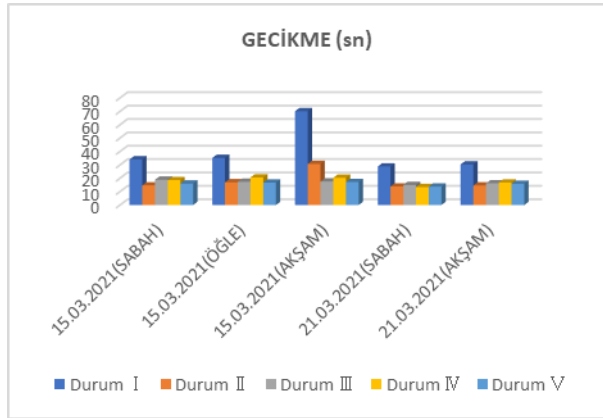
5.1. Kavşaklar Arasında Değerlendirme (Evaluation of Intersections)

Koridordaki kavşakların etkin yönetimi amacıyla, yapılan trafik mühendisliği çalışmaları ve oluşturulan senaryolar, yukarıda ifade edilen performans ölçütleri (gecikme, durma sayısı, maksimum kuyruk uzunluğu vb.) dikkate alınarak, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 9'da, simülasyon çalışmalarından elde edilen, bazı bulgulara ait bilgiler, özet olarak verilmiştir. Çizelgede, koridordaki tüm kavşaklar için, mevcut duruma ait (Durum I) sonuçların ortalama değerleri ile, eşgüdümlü denetimde ait diğer durumların (Durum II, III, IV ve V) ortalama değerleri, karşılaştırılmış ve elde edilen kazanç değeri, oransal (%) olarak verilmiştir. Çizelgedeki bulgulara ait bazı detaylar ise, çizelgenin devamındaki şekillerde gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

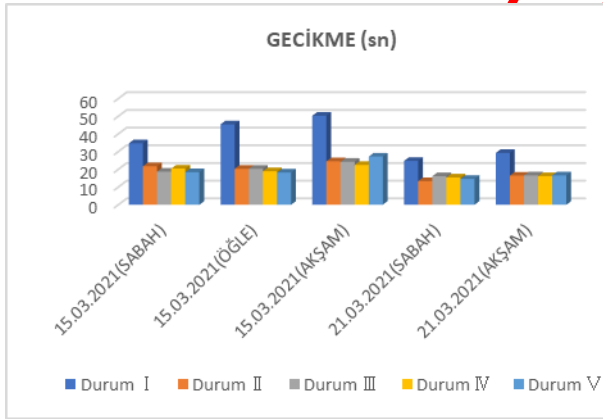
Kültürpark Kavşağı'nda ortalama %53 ve SGK Kavşağı'nda ise, ortalama %47 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, koridor üzerindeki kavşakların eşgüdümlü çalışması durumunda, gecikme sürelerinde önemli seviyede kazanç sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



(a)



(b)

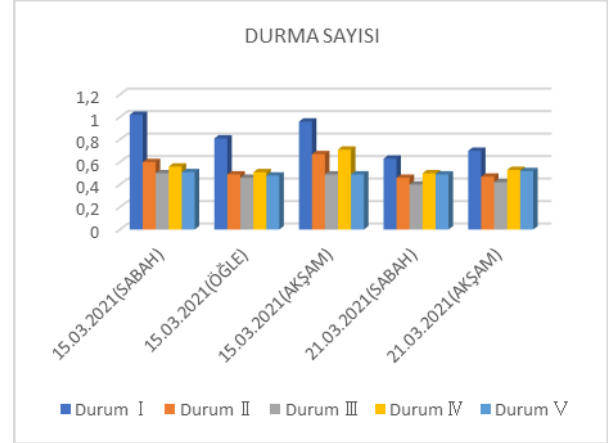


(c)

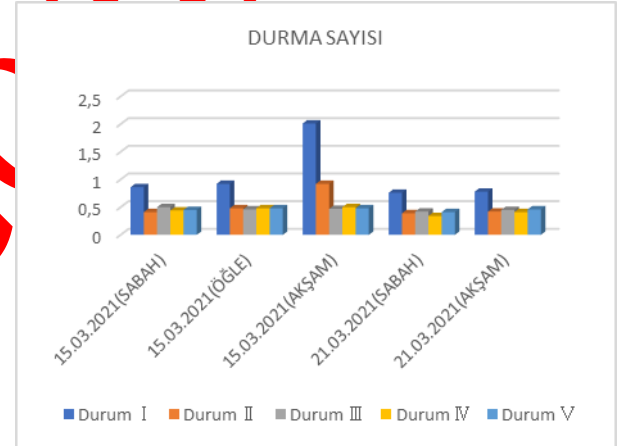
Şekil 9. Kavşaklara Ait Gecikme Değerleri (a) Stadyum Kavşağı, (b) Kültürpark Kavşağı, (c) SGK Kavşağı (Delay Values of Intersections (a) Stadium Intersection, (b) Kültürpark Intersection, (c) SGK Intersection)

Şekil 10'da, diğer bir ölçüt olan, durma sayısına ait sonuçlar gösterilmiştir. Durma sayısı, eşgüdümlü kavşaklarda, trafik akımlarının kesintiye uğraması durumunu ifade etmekte ve bu bakımdan önem arz etmektedir. Yapılan analizler sonucunda, bu ölçüt için de gecikme ölçütüne benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Durma sayısı ölçütü için; mevcut duruma göre, eşgüdümlü denetim durumlarının ortalama değerleri karşılaştırıldığında, Stadyum Kavşağı'nda ortalama

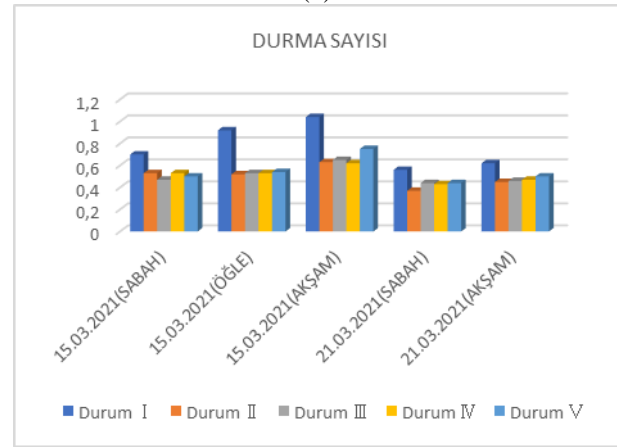
%37, Kültürpark Kavşağı'nda ortalama %52 ve SGK Kavşağı'nda ise, ortalama %31 seviyelerinde iyileşmeler elde edilmiştir. Buna göre, eşgüdümlü denetim ile trafik akımlarının koridor bazında daha az kesintiye uğradığı (duraklama yaptığı), dolayısıyla, gecikme sürelerinin azaldığı ve kavşakların ayrı olarak denetimi yerine eşgüdümlü denetimin tercih edilmesinin faydalı olacağı kanısına varılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. Kavşaklara Ait Durma Sayıları (a) Stadyum Kavşağı, (b) Kültürpark Kavşağı, (c) SGK Kavşağı (Number of Stops at Intersections (a) Stadium Intersection, (b) Kültürpark Intersection, (c) SGK Intersection)

Kavşakların genel olarak değerlendirilmesinde, dikkate alınan diğer bir ölçüt ise, Hizmet Seviyesi'dir. Sinyalize kavşaklarda hizmet seviyesi, kavşaktaki gecikme değerleri ile ilişkili olarak belirlenebilmektedir. Çizelge 10'da gösterilen hizmet seviyeleri, kavşakların ortalama gecikme değerleri dikkate alınarak ve simülasyon yazılımı sonuçlarından elde edilmiştir. Hizmet seviyeleri incelendiğinde, kavşaklarda çoğu durumda, mevcuda göre iyileşmeler gözlemlenmişken, bazı

durumlar da (nadiren), herhangi bir değişiklik olmamıştır. Hizmet seviyeleri için elde edilmiş sonuçlar, genel olarak eşgüdümlü denetimin etkinliğini doğrulamıştır.

Çizelge 10. Kavşaklara Ait Hizmet Seviyeleri (Levels of Services for Intersections)

		15.03.2021 (SABAH)	15.03.2021 (ÖĞLE)	15.03.2021 (AKŞAM)	21.03.2021 (SABAH)	21.03.2021 (AKŞAM)
Stadyum Kavşağı	Durum I	C	C	C	C	C
	Durum II	B	B	B	B	B
	Durum III	B	B	B	B	B
	Durum IV	B	B	B	B	B
	Durum V	B	B	B	B	B
Kültürpark Kavşağı	Durum I	C	D	E	C	C
	Durum II	B	B	C	B	B
	Durum III	B	B	B	B	B
	Durum IV	B	C	C	B	B
	Durum V	B	B	B	B	B
SGK Kavşağı	Durum I	C	D	C	C	C
	Durum II	C	C	C	B	B
	Durum III	B	C	C	B	B
	Durum IV	C	B	C	B	B
	Durum V	B	B	C	B	B

Koridordaki kavşakların etkin yönetimi amacıyla, dikkate alınan diğer bir ölçüt ise, kavşak yaklaşım kollarındaki kuyruk uzunluğu değeridir. Simülasyon analizi sonuçlarından, kuyruk uzunluğu ölçütü için, bazı örnek değerler, Çizelge 11 ve Çizelge 12'de sunulmuştur. Genel olarak, mevcut duruma göre, kuyruk uzunluklarında azalma görüldüğü, bununla beraber, bazı zaman dilimlerinde (örneğin 21.03.2021 akşam zirvesi gibi), kuyruk uzunluklarının artabildiği tespit edilmiştir. Örneğin, koridor boyunca maksimum kuyruk uzunluğu değerlerinde, mevcut duruma göre, Stadyum Kavşağı'nda, 1 yönü için ortalama %12,2 yönü için ortalama %57; Kültürpark Kavşağı'nda, 6

yönü için ortalama %64,7 yönü için, ortalama %2; SGK Kavşağı'nda ise, 10 yönü için ortalama %23,11 yönü için ortalama %8 seviyelerinde iyileşmeler elde edilmiştir. Kuyruk uzunluklarında azalma olması, yapılan tasarımın etkinliğini desteklemektedir. Bununla beraber, trafik yoğunluğunun fazla olduğu hallerde, kavşaklardaki tali yollardaki trafik akımlarının da etkisiyle, kavşağın genelinde kuyruk uzunluklarının artabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu duruma çözüm bulmak için, tali yollardaki akımlar için sinyal sürelerinin yeniden hesaplanması ve devre süresinin değiştirilerek, eşgüdümlü denetimin yeniden tasarlanmasının uygun olabileceği yorumu yapılmıştır.

Çizelge 11. 15.03.2021 Günü Zirve Saatler için Kuyruk Uzunluğu Analiz Sonuçları (Queue Length Analysis Results for Peak Hours on 15.03.2021)

YÖNLER	Kuyruk Uzunlukları (m)														
	Durum I			Durum II			Durum III			Durum IV			Durum V		
	S	Ö	A	S	Ö	A	S	Ö	A	S	Ö	A	S	Ö	A
1	23	15	19	12	9	13	12	10	10	18	18	17	13	11	11
1 Maks	103	78	94	86	54	70	71	69	74	94	84	85	82	56	75
2	8	14	11	2	4	5	1	4	5	2	3	3	2	3	3
2 Maks	56	89	70	19	37	88	18	44	45	17	25	26	24	35	31
3	3	2	1	2	2	1	3	2	2	5	4	4	5	3	3
3 Maks	38	23	18	23	18	18	19	25	12	25	19	25	31	20	20
4	2	4	7	1	2	4	2	3	6	3	4	11	3	4	11
4 Maks	32	46	57	29	46	40	28	34	52	39	33	52	32	38	51
5	26	19	18	0	0	0	11	7	7	6	5	4	5	4	3
5 Maks	128	88	87	30	17	19	96	34	37	75	32	36	125	31	54
6	9	18	190	4	5	25	3	4	5	5	10	12	4	7	7
6 Maks	73	97	505	35	38	178	29	45	49	26	76	80	24	37	37
7	10	10	8	8	8	6	9	8	7	13	16	12	11	10	10
7 Maks	55	50	49	42	43	38	42	44	44	56	66	49	44	56	49
8	8	8	25	6	6	11	6	7	11	10	8	12	9	8	11
8 Maks	38	37	69	42	32	45	31	37	54	38	37	61	37	42	44
9	42	26	24	21	9	10	10	7	7	16	7	9	7	4	4
9 Maks	149	113	103	114	56	90	94	60	69	103	50	74	43	45	70
10	20	19	41	14	14	32	15	15	34	8	11	16	8	10	34
10 Maks	81	82	126	60	71	105	74	82	109	49	50	94	88	55	172
11	20	13	12	12	8	7	15	12	8	10	14	10	8	10	10
11 Maks	130	56	47	62	51	44	83	75	44	92	108	45	97	71	50

Çizelge 11 (devam). 15.03.2021 Günü Zirve Saatler için Kuyruk Uzunluğu Analiz Sonuçları (Queue Length Analysis Results for Peak Hours on 15.03.2021)

12	7	117	142	4	15	20	4	13	16	6	10	14	6	11	18
12 Maks	58	290	290	50	119	140	50	145	99	56	64	86	51	81	167

S: Sabah, Ö: Öğle, A: Akşam

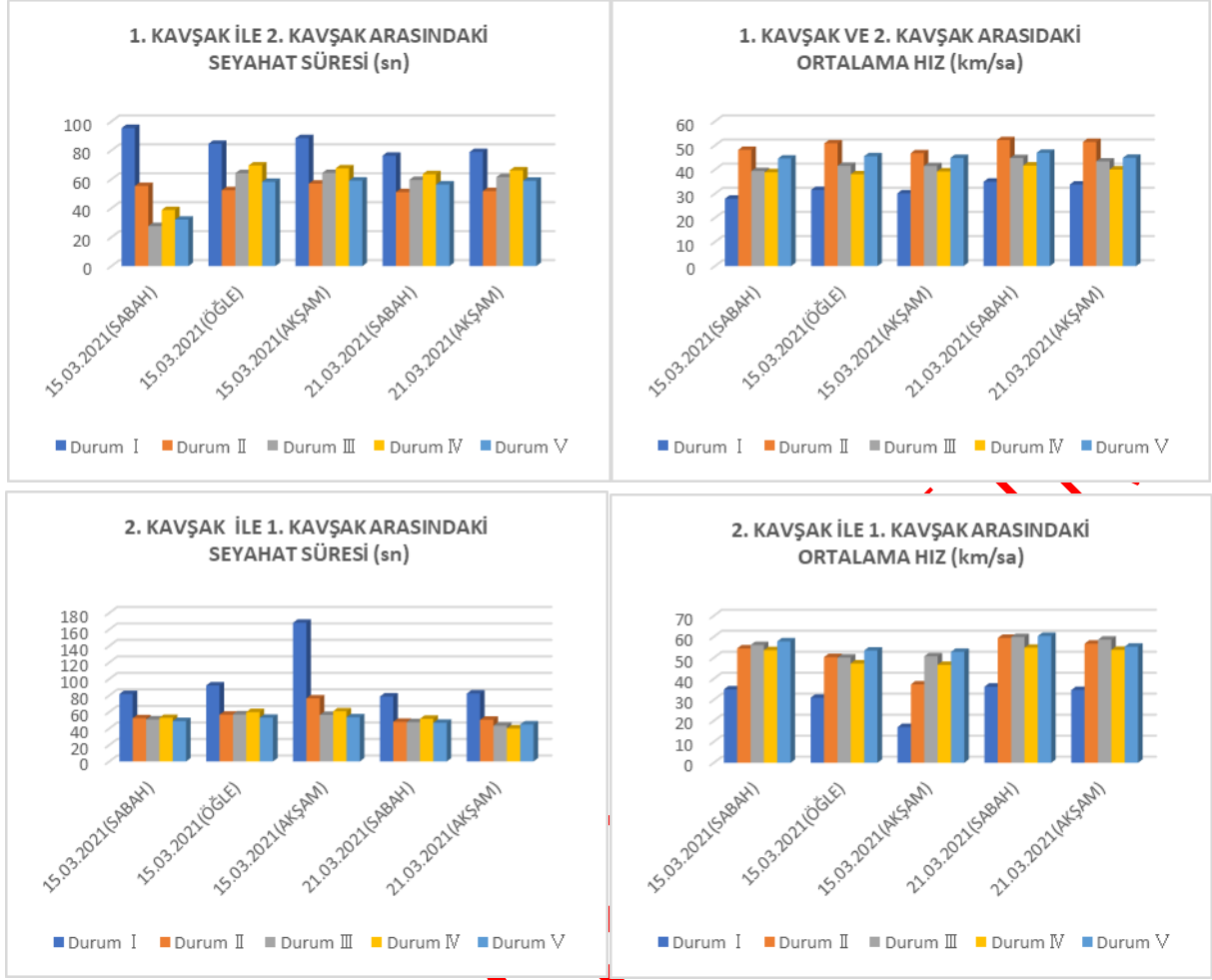
Çizelge 12. 21.03.2021 Günü Zirve Saatler için Kuyruk Uzunluğu Analiz Sonuçları (Queue Length Analysis Results for Peak Hours on 21.03.2021)

YÖNLER	Kuyruk Uzunlukları (m)									
	Durum I		Durum II		Durum III		Durum IV		Durum V	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
1	5	9	4	6	4	7	9	12	5	10
1 Maks	43	60	42	51	34	47	47	81	46	53
2	4	8	1	2	1	1	2	2	1	1
2 Maks	43	56	19	18	18	19	19	20	20	24
3	1	1	1	1	1	2	2	3	2	4
3 Maks	12	19	18	18	13	19	20	20	19	19
4	1	2	1	2	1	2	2	4	1	3
4 Maks	34	46	27	28	26	34	32	33	26	32
5	7	13	0	0	2	4	1	3	0	1
5 Maks	50	73	11	12	19	25	13	39	12	23
6	6	9	1	3	1	2	3	5	1	3
6 Maks	44	74	18	25	17	19	19	32	18	24
7	3	5	3	3	3	4	5	7	4	5
7 Maks	25	31	25	37	25	39	32	36	32	36
8	4	9	3	6	3	7	5	9	5	9
8 Maks	30	55	33	36	26	37	26	38	33	43
9	11	18	2	4	2	3	3	4	1	1
9 Maks	62	74	29	30	19	19	24	38	19	23
10	10	18	7	12	10	12	6	7	6	7
10 Maks	67	82	55	68	48	63	31	43	31	38
11	4	7	2	5	2	6	3	7	3	4
11 Maks	43	50	37	42	25	38	31	56	31	43
12	2	9	1	5	1	5	2	6	2	6
12 Maks	19	44	19	37	19	44	20	38	19	38

S: Sabah, A: Akşam

Genel olarak, trafik akımlarının etkin biçimde yönetilebilmesi, seyahat süresi ve ortalama hız ölçütleriyle doğrudan ilişkilidir. Şekil 11 ve Şekil 12’de, koridor için, sırasıyla gidiş ve dönüş yönleri dikkate alınarak, kavşaklar arası seyahat süresi ve ortalama hız değerleri, tüm durumları içerecek biçimde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 11’de gösterilen Stadyum Kavşağı ve Kültürpark Kavşağı arasındaki, gidiş ve dönüş istikameti için, seyahat süreleri ve ortalama hız değerleri incelendiğinde, gidiş yönü için (Stadyum Kavşağı’ndan Kültürpark Kavşağı

yönüne), mevcut duruma göre, tüm senaryolar için, seyahat sürelerinde ortalama %33, dönüş yönünde ise; ortalama %45 seviyesinde ve ortalama hız değerlerinde ise, gidiş yönünde %40, dönüş yönünde %84 seviyelerinde iyileşmeler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, koridor için tasarlanan eşgüdüm sisteminin performansının, kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve ayrık denetim sistemine göre, koridordaki trafik akımlarının sürekli biçimde ilerlemesini sağladığını ortaya koymuştur.

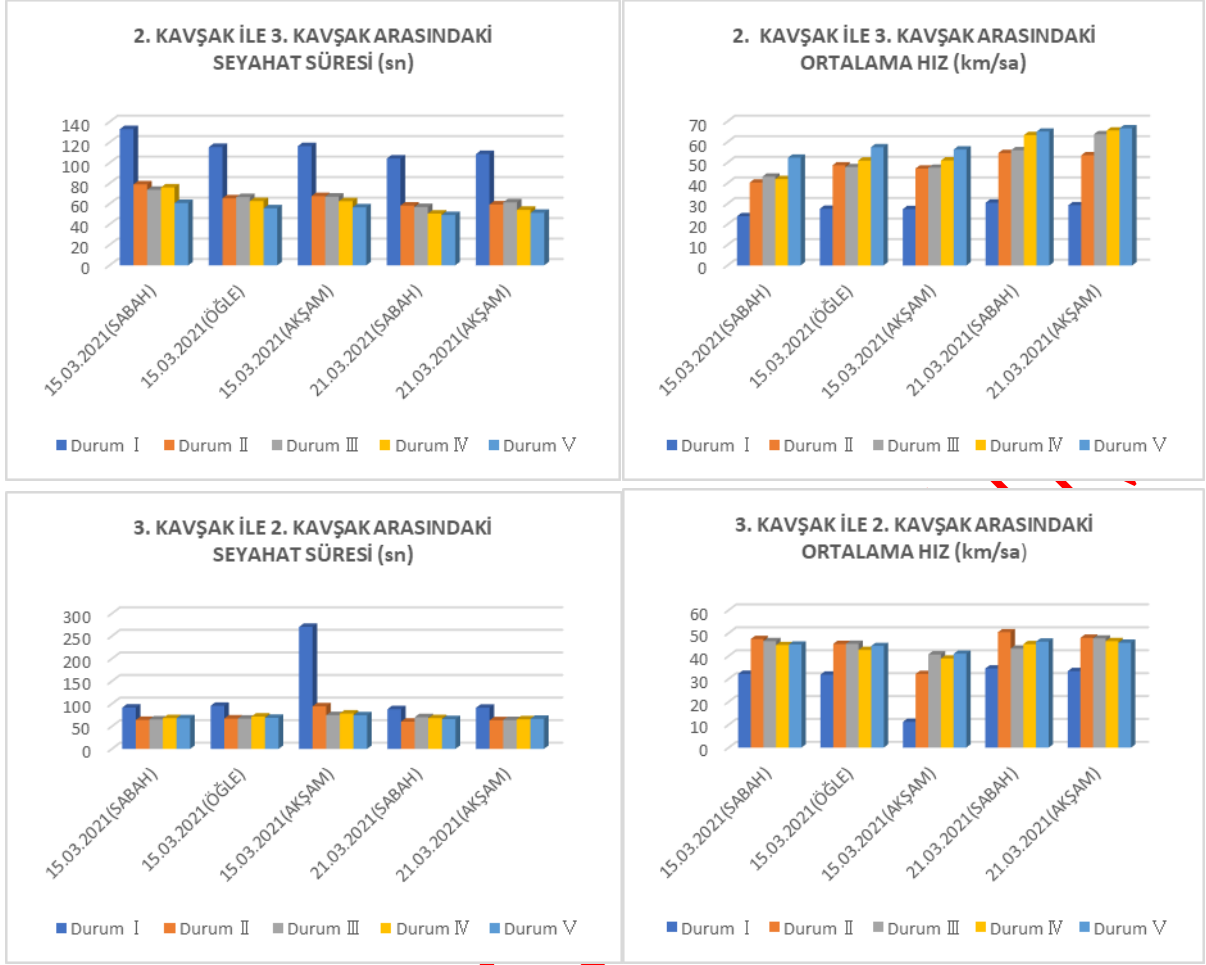


Şekil 11. Stadyum Kavşağı ile Kültürpark Kavşağı Arasındaki Gidiş ve Dönüş İstikameti için Seyahat Süreleri ve Ortalama Hızları (Travel Times and Average Speeds for both Directions between Stadium Intersection and Kulturpark Intersection)

Koridorun devamında yer alan Kültürpark Kavşağı ve SGK Kavşakları için ise, seyahat süreleri ölçütünde, mevcut duruma göre, tüm senaryolarda, yine gidiş yönünde (Kültürpark Kavşağı'ndan SGK kavşağı yönüne) ortalama %47, dönüş yönünde ortalama %36; ortalama hız ölçütünde, gidiş yönünde, %93 ve dönüş

yönünde %79 seviyelerinde iyileşmeler tespit edilmiştir. Koridorun diğer kesiti için elde edilen bu sonuçlar, eşgüdümlü denetimin faydası ve gerekliliği hakkında, bu bölüm kapsamında yapılan diğer yorum ve çıkarımları desteklemiştir.

ERİM



Şekil 12. Kültürpark Kavşağı ile SGK Kavşağı Arasındaki Gidiş ve Dönüş İstikameti için Seyahat Süreleri ve Ortalama Hızları (Travel Times and Average Speeds for both Directions between Kültürpark Intersection and SGK Intersection)

5.2. İstatistik Test ve Analizler (Statistical Tests and Analysis)

Farklı ölçütlere için elde edilen sonuçlara ait verilerin, istatistik bilimi açısından anlamlılığını belirlemek amacıyla, bazı test ve analizler yapılmıştır. Öncelikle, verilerin normal dağılıma uygunluğu test edilmiştir. Bu amaç doğrudusunda, Anderson-Darling (A-D) testinden yararlanılmıştır. Testlerde dikkate alınan ölçütlere için, mevcut durum ile diğer durumlar, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı gün ve zaman dilimleri için önceki bölümlerde incelenen veriler kullanılmıştır. Verilerin normallik testi sonuçları, izelge 13'te özetlenmiştir. Çizelgede A-D istatistiği için, % 5 anlamlılık seviyesine karşılık gelen, kritik değer olan, 0.752 değerinden büyük olan A-D değerlerine sahip veri gruplarının (sarı

renkle işaretlenmiş olan) normal dağılıma uymadığı tespit edilmiştir. Buna göre, veri gruplarının çoğunluğunun normal dağılıma uygun olduğu g r lm ştir. Analiz edilen veri sayılarının otuz ve altında olmasından dolayı ve normal dağılıma uygunluk göstermeme sonuçlarına dayanarak, grup ortalamalarının farklılığını incelemek amacıyla, Kruskal-Wallis testi kullanılmıştır. Durumlar arasındaki farklılığın anlamlılığını ayrıca test etmek amacıyla, post-hoc testi olarak Kruskal-Wallis testi devamında, Mann Whitney U testi seçilmiştir. İstatistik analiz ve testler için, Minitab yazılımının deneme sürümü (21.3) kullanılmıştır [37]. Çizelge 14'te Kruskal-Wallis, izelge 15'te ise, Mann-Whitney U testi sonuçlarına yer verilmiştir.

Çizelge 13. Anderson-Darling (A-D) Normallik Testi Sonuçları (Anderson-Darling (A-D) Normality Test Results)

Ölçüt	Test parametresi	Mevcut Durum	Durum II	Durum III	Durum IV	Durum V
Gecikme (sn/taşıt)	A-D Değeri	1.037	0.74	0.305	0.182	1.79
	p değeri	0.007	0.042	0.526	0.894	<0.005
	Ortalama	34.43	18.23	16.68	18.16	17.07
	St. Sapma	12.57	4.79	3.14	2.27	3.07
	N (veri s.)	15	15	15	15	15
Durma Sayısı	A-D Değeri	1.419	0.792	0.811	0.333	1.561
	p değeri	<0.005	0.031	0.027	0.465	<0.005
	Ortalama	0.886	0.52	0.47	0.504	0.5
	St. Sapma	0.3442	0.14	0.059	0.088	0.0764
	N (veri s.)	15	15	15	15	15
Yakıt Tüketimi (litre/saat)	A-D Değeri	0.459	0.338	0.237	0.174	0.374
	p değeri	0.225	0.452	0.741	0.908	0.37
	Ortalama	52.55	36.01	33.90	33.83	33.44
	St. Sapma	26.78	15.88	13.82	13.92	14.62
	N (veri s.)	15	15	15	15	15
Seyahat Süresi (sn) Stad-SGK Yönü	A-D Değeri	0.211	0.479	1.14	0.38	1.048
	p değeri	0.804	0.180	<0.005	0.329	0.005
	Ortalama	100.1	59.72	60.2	61.12	53.8
	St. Sapma	18.5	8.68	12.37	10.72	8.439
	N (veri s.)	10	10	10	10	10
Seyahat Süresi (sn) SGK-Stad Yönü	A-D değeri	1.829	0.413	0.188	0.215	0.514
	p değeri	<0.005	0.271	0.870	0.788	0.144
	Ortalama	113.9	63.36	59.67	61.70	59.11
	St. Sapma	60.71	13.85	10.26	11.18	10.68
	N (veri s.)	10	10	10	10	10
Ortalama Hız (km/saat) Stad-SGK Yönü	A-D Değeri	0.178	0.302	0.729	0.842	0.628
	p değeri	0.891	0.512	0.038	0.019	0.072
	Ortalama	29.73	49.39	46.90	47.11	52.49
	St. Sapma	3.26	4.16	7.56	10.30	8.53
	N (veri s.)	10	10	10	10	10
Ortalama Hız (km/saat) SGK-Stad Yönü	A-D Değeri	1.373	0.282	0.257	0.418	0.368
	p değeri	<0.005	0.557	0.636	0.263	0.355
	Ortalama	29.71	48.16	49.87	47.41	50.22
	St. Sapma	8.48	8.39	6.52	5.19	6.55
	N (veri s.)	10	10	10	10	10

Kruskal-Wallis testinde, mevcut durum ile, diğer senaryo durumları karşılaştırılmıştır. Bu testte, hesaplanan H değeri, çizelge değeri ile karşılaştırılarak, çizelge değerinden büyük olması halinde, incelenen grupların ortalama değerler açısından farklı olduğu Kruskal-Wallis testinde, diğer biçiminde yorum yapılmaktadır. Çizelge 14'teki sonuçlara göre, Kruskal-Wallis testinde, tüm ölçütler için, % 5 ve % 1 anlamlılık seviyelerinde, mevcut durum ile eşgüdümlü durumlar (senaryolar) arasında farklılıklar olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 14. Kruskal-Wallis Testi Sonuçları (Kruskal-Wallis Test Results)

Ölçüt	Serbestlik derecesi	H değeri	P değeri	x ² Çizelge değeri (0.05 Anlamlılık D.)	x ² Çizelge Değeri (0.01 Anlamlılık D.)
Gecikme		35.28	0.000		
Durma Sayısı		32.37	0.000		
Yakıt Tüketimi		6.64	0.156		
Seyahat Süresi (Stad-SGK)		27.32	0.000		
Seyahat Süresi (SGK-Stad)	4	22.27	0.000	9.48	13.27
Ortalama Hız (Stad-SGK)		26.90	0.000		
Ortalama Hız (SGK-Stad)		22.79	0.000		

Mann-Whitney U testi, Kruskal-Wallis testi sonucunda ortaya çıkan farklılıkları daha detaylı incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu testte, ikili olarak durumlar karşılaştırılmış ve durumlar arasındaki farklılıklar yorumlanmıştır. Çizelge 15'teki sonuçlara göre, hesaplanan p değerinin, kritik eşik değeri 0.05'ten küçük olması halinde, durumlar arasında anlamlı bir farklılık olduğu, aksi durumda ise, ortalamalar açısından çok farklı olmadığı tespit edilmiştir. Genel olarak tüm

ölçütler için, mevcut duruma göre, eşgüdümlü denetim durumunun fayda sağladığı, eşgüdümlü durumlar için yapılan karşılaştırmalarda (Durum II ve III), anlamlı bir farklılık olmadığı, dolayısıyla, uygulanan faz sıralaması değişiminin, sonuçlar üzerinde anlamlı bir değişikliğe neden olmadığı ve sola dönüş cepli faz uygulamaların (Durum IV ve V), sadece gecikme ölçütü için anlamlı bulunduğu belirlenmiştir.

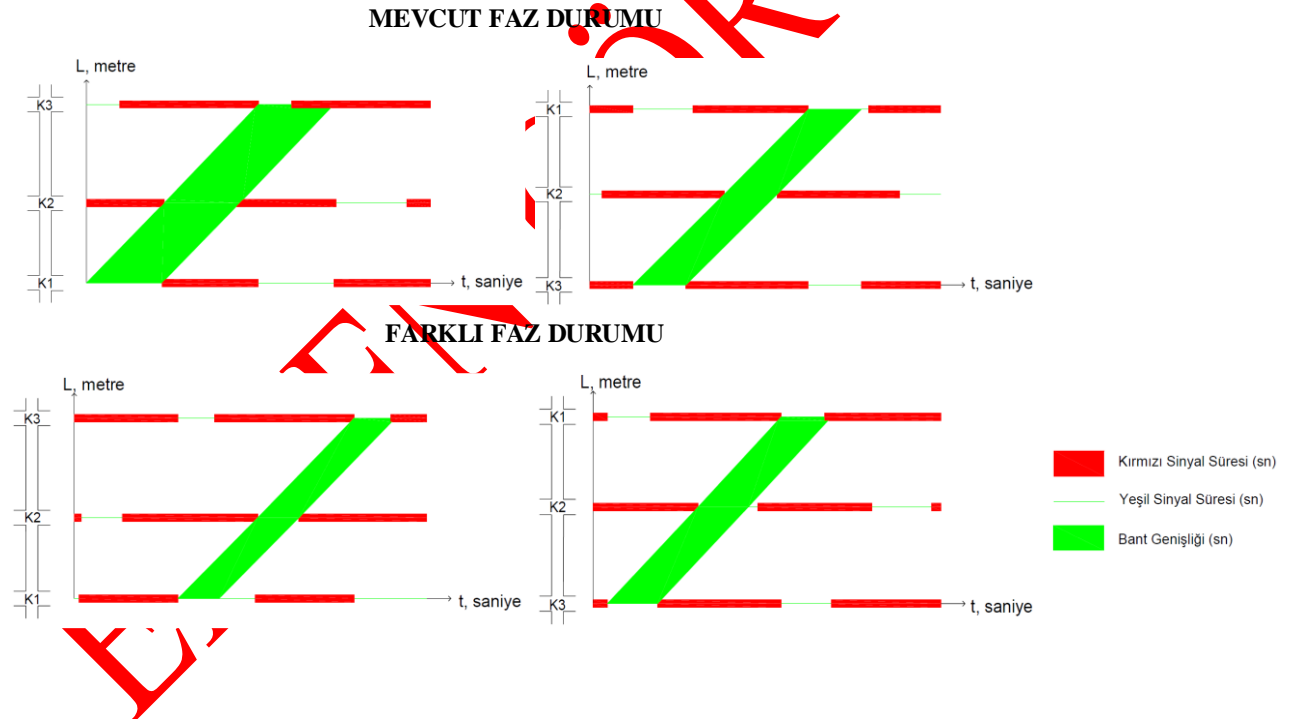
Çizelge 15. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (Mann-Whitney U Test Results)

Ölçüt	Durumlar*	P değeri	W değeri
Gecikme (sn/taşıt)	D1-D2	0.000	334
	D2-D3	0.724	241
	D4-D5	0.034	284
Durma Sayısı	D1-D2	0.000	328
	D2-D3	0.533	248
	D4-D5	0.619	245
Yakıt Tüketimi (lt/saat)	D1-D2	0.089	274
	D2-D3	0.803	239
	D4-D5	0.803	239
Seyahat Süresi (sn) Stadyum-SGK Yönü	D1-D2	0.000	153
	D2-D3	0.307	91
	D4-D5	0.054	131
Seyahat Süresi (sn) SGK-Stadyum Yönü	D1-D2	0.001	148
	D2-D3	0.734	110
	D4-D5	0.678	111
Ortalama Hız (km/saat) Stadyum-SGK Yönü	D1-D2	0.000	55
	D2-D3	0.162	124
	D4-D5	0.089	82
Ortalama Hız (km/saat) SGK-Stadyum Yönü	D1-D2	0.001	61
	D2-D3	0.85	102
	D4-D5	0.571	97

*D1: Durum 1, D2: Durum 2, D3:Durum 3, D4:Durum 4, D5: Durum 5

5.3. Kavşaklara Ait Zaman-Yörünge Diyagramları (Time-Trajectory Diagrams of Intersections)

Trafik mühendisliğinde, kavşaklardaki trafik akımlarının modellenmesi amacıyla, zaman-yörünge diyagramları, kullanılmaktadır. Bu diyagramlar ile kavşaktaki trafik akımları hakkında elde edilebilecek bazı bilgiler (trafik hacmi, hız, yoğunluk, gecikme vb.) kullanılarak, modelleme ve çıkarımlar yapmak mümkündür. Eşgüdümlü kavşak tasarımlarında da bu diyagramlar yardımıyla, sistem etkinliği ölçülebilmekte ve buna göre, yapılan tasarımlar değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan dört farklı senaryoda, koridordaki kavşakların eşgüdümlü olarak yönetilmesi öngörülmüştür. Bu tasarımların etkinliğini değerlendirmek amacıyla, koridordaki tüm kavşaklar için, (Şekil 13-14-15-16'da) ayrı sinyal süreleri içeren, zaman-yörünge diyagramları oluşturulmuştur. Bu diyagramlarda, kavşaklar arasındaki eşgüdümün sürekliliğini ifade eden, bant genişlikleri tespit edilmiştir. Eşgüdümlü kavşak denetiminde, performansın artabilmesi için, bant genişliğinin mümkün mertebede büyük değerlerde olması istenmektedir. Bant genişliği, koridordaki kavşakların eşgüdümlü sağlanan fazlarındaki yeşil sinyal süreleriyle kısıtlanmaktadır.

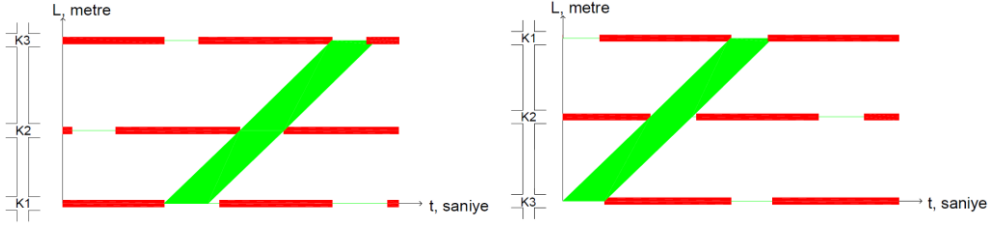


Şekil 13. Stadyum Kavşağı ve SGK Kavşağına ait Mevcut ve Farklı Faz Durumuna Göre Zaman-Yörünge Grafiği (Time-Trajectory Graph According to Current and Different Phase Plans for The Stadium Intersection and SGK Intersection)

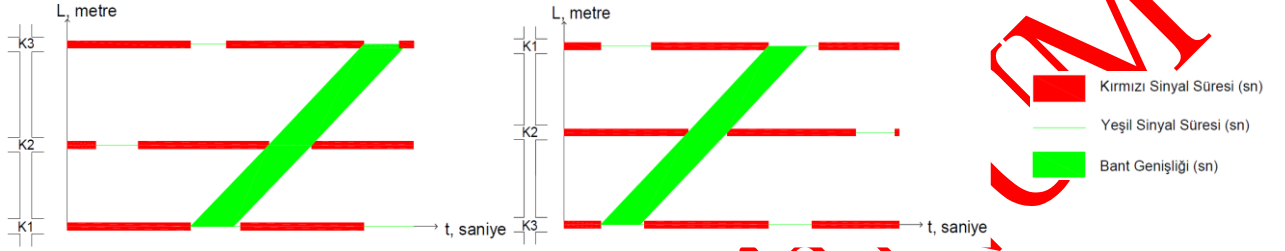
Şekil 13'te, koridorun eşgüdümlü denetlendiği mevcut faz durumunda, batı yönündeki bant genişliği 14sn, doğu yönündeki bant genişliği 22sn olarak ölçülmüştür. Farklı faz durumunda ise, batı yönündeki bant genişliği 15sn,

doğu yönündeki bant genişliği 18sn olarak elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda, her iki yön toplamında, daha fazla trafik akımına hizmet verebilme anlamında, mevcut faz durumunun daha üstün olabileceği tespit edilmiştir.

AYRI AYRI FAZ DURUMU (15.03.2021 SABAH SAATI İÇİN)



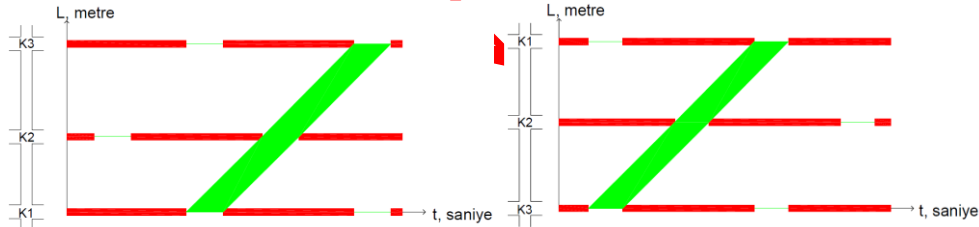
AYRI AYRI FAZ DURUMU (15.03.2021 ÖĞLE-AKŞAM SAATI İÇİN)



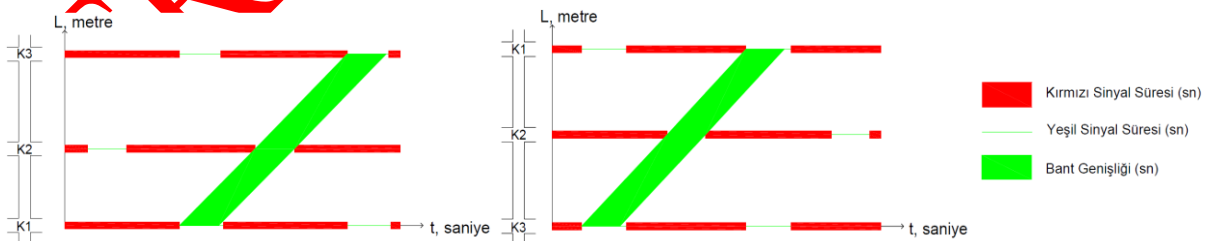
Şekil 14. Stadyum Kavşağı ve SGK Kavşağına ait Ayri Faz Durumuna Göre Zaman-Yörünge Grafiği (Time-Trajectory Graph According to Different Phase Plans for The Stadium Intersection and SGK Intersection)

Kavşak yaklaşım kollarının sırayla geçiş yaptığı ayrı-ayrı faz durumuna göre, 15.03.2021 günü sabah zirve saatlerinde ise, batı yönündeki bant genişliği, 15sn, doğu yönündeki bant genişliği, 16sn olarak tespit edilmiştir. 15.03.2021 günü öğle ve akşam zirve saatlerinde ise, batı yönündeki bant genişliği 15sn, doğu yönündeki bant genişliği 17sn olmuştur.

AYRI AYRI FAZ DURUMU (21.03.2021 SABAH SAATI İÇİN)



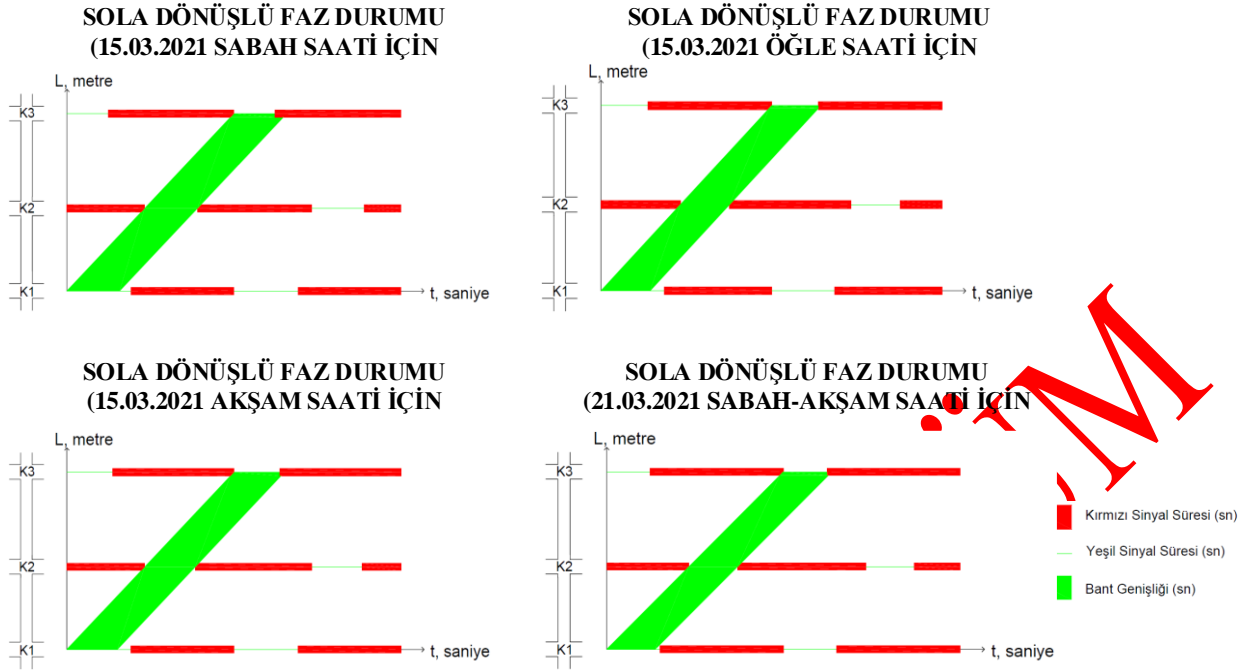
AYRI AYRI FAZ DURUMU (21.03.2021 AKŞAM SAATI İÇİN)



Şekil 15. Stadyum Kavşağı ve SGK Kavşağına ait Ayri-Ayri Faz Durumuna Göre Zaman-Yörünge Grafiği (Time-Trajectory Graph According to Different Phase Plans for The Stadium Intersection and SGK Intersection)

21.03.2021 günü sabah zirve saatlerinde ise, batı yönündeki bant genişliği, 16sn, doğu yönündeki bant genişliği, 15sn; akşam zirve

saatlerinde ise, batı ve doğu yönlerindeki bant genişlikleri, 17sn olarak ölçülmüştür.



Şekil 16. Stadyum Kavşağı ve SGK Kavşağına Ait Sola Dönüştü Faz Durumuna Göre Zaman-Yörünge Grafiği (Time-Trajectory Graph According to Protected Left Turning Phase Plan for The Stadium Intersection and SGK Intersection)

Koridordaki kavşaklarda sola dönüş cepleri yerleştirilerek, doğru giden akımlarla, sola dönen akımlar ayrılmış ve faz diyagramları da bu ayrıma göre düzenlenmiştir. Bu düzenleme için (sola dönüştü faz durumuna göre), bant genişlikleri, 15.03.2021 günü sabah zirve saatinde 18sn, öğle zirve saatinde 20sn, akşam zirve saatinde 20sn; 21.03.2021 günü sabah ve akşam zirve saatinde ise, 18sn olarak elde edilmiştir.

5.4. Bant Genişliği Etkinliği ve Kapasitesi (Bandwidth Efficiency and Capacity)

Önceki bölümde tespit edilen bant genişliği değerlerinin, etkinliğini değerlendirmek amacıyla, Bağlantı 1, 2 ve 3 kullanılarak, etkinlik (Çizelge 16.) ve kapasite (Çizelge 17.) hesaplamaları yapılmıştır.

Çizelge 16. Bant Genişlikleri (Bandwidths)

Faz Durumu	Bant Genişliği Etkinliği			Değerlendirme
	BG _{BY}	BG _{DY}	E _B	
Mevcut Faz Durumu	14sn	22sn	0,25	İyi İlerleme
Farklı Faz Durumu	15sn	18sn	0,23	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-S)	15sn	16sn	0,21	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-Ö-A)	15sn	17sn	0,22	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-S)	16sn	15sn	0,21	Orta Seviye İlerleme
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-A)	17sn	17sn	0,23	Orta Seviye İlerleme
Sola Dönüştü Faz Durumu (15-S)	18sn	18sn	0,25	İyi İlerleme
Sola Dönüştü Faz Durumu (15-Ö)	20sn	20sn	0,27	İyi İlerleme
Sola Dönüştü Faz Durumu (15-A)	20sn	20sn	0,27	İyi İlerleme
Sola Dönüştü Faz Durumu (21-S-A)	18sn	18sn	0,25	İyi İlerleme

S: Sabah Ö: Öğle A: Akşam BG_{BY}: Batı Yönlündeki Bant Genişliği BG_{DY}: Doğu Yönlündeki Bant Genişliği E_B: Bant Genişliği Etkinliği

Hesaplanan bant genişlikleri dikkate alınarak, koridordaki eşgüdüm durumunu değerlendirmek amacıyla, Çizelge 1'de önerilen aralıklara göre, Çizelge

16'da verilen ilerleme seviyeleri belirlenmiştir. Çizelge 16'daki sonuçlara göre, koridor için oluşturulan eşgüdümlü sistemler ile orta ve iyi derecede ilerleme

seviyeleri elde edilmiştir. Çizelgedeki sonuçlar incelendiğinde, özellikle sola dönüşlü faz planı uygulamasının, eşgüdüm sisteminin performansını olumlu yönde etkilediği ve ayrı-ayrı (dört fazlı) faz planının ilerleme seviyesini bir merteye düşürdüğü anlaşılmıştır.

Çalışmada ayrıca, her iki yön için bant genişliği kapasitesi hesabı yapılarak, eşgüdümlü olan yönlerdeki tahmini kapasite değerleri belirlenmiştir (Çizelge 17).

Buna göre, doğu yönündeki bant genişliği kapasitesinin, Batı yönüne göre, dört durum için daha fazla olduğu, beş durum için ise, eşit seviyede olduğu ve sadece bir durumda, Doğu yönündeki kapasitenin daha fazla olduğu kanısına ulaşılmıştır. Ayrıca faz durumları incelendiğinde, sola dönüş için ayrı faz uygulamalarının, tüm kollar için ayrı faz uygulamasına (dört fazlı durum) göre, kapasite açısından üstünlük sağladığı ve %25'lere varan oranlarda kapasiteyi artırdığı anlaşılmıştır.

Çizelge 17. Bant Genişlikleri Kapasitesi (Bandwidths Capacity)

Faz Durumu	Bant Genişliği Kapasitesi (tş/sa)	
	Batı Yönü	Doğu Yönü
Mevcut Faz Durumu	690,41	1084,93
Farklı Faz Durumu	739,73	887,67
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-S)	739,73	789,04
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (15-Ö-A)	739,73	838,36
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-S)	789,04	739,73
Ayrı-Ayrı Faz Durumu (21-A)	838,36	838,36
Sola Dönüşlü Faz Durumu (15-S)	887,67	887,67
Sola Dönüşlü Faz Durumu (15-Ö)	986,30	986,30
Sola Dönüşlü Faz Durumu (15-A)	986,30	986,30
Sola Dönüşlü Faz Durumu (21-S-A)	887,67	887,67

S: Sabah Ö:Öğle A:Akşam tş/sa: Taşıt/Saat

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Elâzığ ilinde, trafik yönetimi bakımından sorunlar görülen bir koridor üzerinde, sıralı şekilde bulunan ve ayrık (izole) olarak denetlenen üç kavşak incelenmiştir. Ayrık şekilde çalışan kavşakların, mevcut durumlarının PTV Vissim yazılımı kullanılarak analizleri yapılmıştır. Daha sonrasında, kavşaklara ait geometrik şekilleri, faz diyagramları ve sinyalizasyon sistemlerinin değiştirilmesiyle oluşan dört farklı eşgüdümlü durum (senaryo) analizler yapılmıştır. Analizler doğrultusunda elde edilen değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

- Mevcut durumda; koridor üzerinde ayrık olarak denetlenen kavşakların, eşgüdümlü biçimde denetlenmesinin, etkin koridor yönetimi açısından faydalı olacağı ve bu sonucun istatistik testler sonucunda anlamlı bulunduğu,
- Koridoru kullanan trafik akımlarının gecikme sürelerinde, eşgüdümlü denetim koşullarında, ortalama en az %38, en fazla ise %53 seviyelerinde iyileşmeler elde edilebileceği ve test istatistikleri tarafından uygun bulunduğu,

- Benzer kazanımların, koridordaki kavşaklarda taşıtların durma sayısı için ortalama en az %37, en fazla ise, %52 seviyelerinde olduğu,
- Koridor boyunca eşgüdümlü denetim durumunda, taşıtların yakıt tüketimlerinin, karbon ve azot salınımlarının azalacağı ve koridor için ortalama %32 seviyelerinde kazanım sağlayacağı, bu bulguya dayanarak, eşgüdümlü sistemlerinin kullanımının, ulaşımında sürdürülebilirlik yaklaşımını desteklediği,
- Kavşaklardaki taşıt kuyruk uzunluklarının, eşgüdümlü denetim sayesinde ortalama en az %8 ve en fazla %64 seviyesinde azalabileceği,
- Koridor boyunca trafik akımlarının seyahat sürelerinde, her iki yönde, ortalama %40 seviyesinde ve ortalama hız ölçütünde ise, her iki yön için, ortalama %75'lere ulaşan seviyelerde iyileşmeler sağlandığı,
- Kavşaklarda faz diyagramlarının tasarımının değiştirilmesinin, denetim sistemi performansında gecikme açısından etkili olabileceği, ancak, diğer

ölçütler için, istatistik testlerde çok anlamlı bulunmadığı,

- Kavşakların hizmet seviyeleri incelendiğinde, ayrık denetime göre, eşgüdümlü denetim durumlarının tamamında, en az bir merteye iyileşme görüldüğü, eşgüdümlü denetim durumları kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise, herhangi bir iyileşme görülmediği,

- Kavşak geometrisinin değiştirilmesi ile (örneğin sola dönüş cebi eklenmesi), kavşak faz düzeninin kolayca değiştirilebileceği ve sola dönüşler için ayrı faz düzenlemesi yapılması durumunda, eşgüdümlü denetim sistemine olumlu etki ederek, bant genişliğinin etkinlik seviyesini artırabileceği,

- Farklı gün ve saatler için sinyal sürelerinin değiştirilmesi ve farklı faz uygulamalarıyla kavşak denetim sisteminde bant genişliği kapasitesi bakımından %25 seviyesinde artış sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, eşgüdümlü ve dinamik (adaptif) olarak çalıştırılan kavşaklar üzerine durumlar incelenebilir ve çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, otonom ve bağlantılı araçların mevcut olduğu, karma trafik koşulları için farklı senaryolar oluşturularak, ayrık ve eşgüdümlü denetim sistemlerinin performansları karşılaştırılabilir. Yaya, bisiklet ve farklı mikromobilité araçlarının, trafik sinyal kontrol sistemine dahil edilmesi durumu farklı senaryolar için incelenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmadaki simülasyonların gerçekleştirilmesi amacıyla PTV Vissim yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın kullanılabilmesi için, akademik olarak izin veren ve destek sağlayan PTV firmasına teşekkür ederiz. Ayrıca, trafik hacimlerinin tespiti için, video kamera görüntülerinin kullanımına izin veren Elâzığ Belediyesi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zeynep Nur DUMAN: Literatür araştırması, analizler ve simülasyonun yapılması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi yapılmıştır./ Literature research, analysis and simulation, writing and editing of the article were done.

Yetiş Şazi MURAT: Bulguların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi, makalenin editörlüğü yapılmıştır.

Mehmet YILMAZ: Senaryoların ve kurgunun oluşturulması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi, makalenin editörlüğü yapılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duman, Z.N., "Koordine Kavşaklarda Sinyalizasyon Sistemine Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi." *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 145 s. (2022).
- [2] Şener, E., Sebatlı Sağlam A., Cavdur F., "Otonom Paylaşım Araç Yönetim Sistemi", *Politeknik Dergisi*, 26 (1): 81-92, (2023).
- [3] İncirci, N., Ekmekci, I., "Determining The Location Of The Urban Transport Interchanges Based On The Geographic Information System: The Case Study For İstanbul", *Politeknik Dergisi*, 24 (3):1121-1128, (2021).
- [4] Çakıcı Z., Murat, Y.S., "The Optimization of Signal Timings for Signalized Roundabouts using Differential Evolution Algorithm" May 2021, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (2):635-651, (2021).
- [5] Özinal, Y., Uz, V.E., "Dönel Kavşak Geometrik Elemanlarının Kavşak Güvenliği Üzerine Etkisinin Literatür Işığında Değerlendirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 24 (1):283-297, (2021).
- [6] Ragab M., El-Naga I.A., "Measures to Improve Traffic Operations at Signalized Intersections in Urban Areas", *International Journal for Traffic and Transport Engineering (Int. J. Traffic Transp. Eng.)* 9(4): 408 - 418, (2019).
- [7] Aktaş Y., Aslan H., Pistil F., "Sinyalize Kavşaklarda Meydana Gelen Taşıt Gecikmelerinin VISSIM Simülasyon Modellenmesi", *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku-Azerbaijan, 374-386, (2017).
- [8] Yalnız P., Arberk K., "Eskişehir'de Birbirine Yakın Kavşaklardaki Trafik Işıklarının Koordineli Olarak Düzenlenmesi", *2. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu*, Adana, s 63-74, (1999).

- [9] Zuo Z., Yang G., Shao C., "Design of Signal Timing Optimization Based on the Unsymmetrical Traffic Flow of Signalized Intersections", *in: Traffic Transp. Stud.* 374–385, (2010).
- [10] Li R., Li W., "A Study on the Improvement of T-intersection Signal Timing", *in: Traffic Transp. Stud.* 386–393, (2010).
- [11] Zhang W., Peng X., Yang B., "An Optimal Signal Timing Method for Intersections Based on Minimum Generalized Cost", *in: ICCTP 2011 Towar. Sustain. Transp. Syst.*, 1200–1210 (2011).
- [12] Murat Y.S., Cakici Z., Tian Z., "A Signal Timing Assignment Proposal For Urban Multi Lane Signalised Roundabouts", *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, Gradevinar*, 113-124, (2019).
- [13] Saha A., Chandra S., Ghosh I., "Delay at Signalized Intersections Under Mixed Traffic Conditions", *J. Transp. Eng. Part A Syst.* 143(8), (2017).
- [14] Webster, F.V., "Traffic Signal Settings", *Road Research Technical Paper*, No. 39, Road Research Laboratory, Her Majesty Stationary Office, London, UK, (1958).
- [15] Dogan, E., Akgungor, A.P., & Arslan, T., "Estimation of Delay and Vehicle Stops at Signalized Intersections Using Artificial Neural Network". *Engineering Review*, 36(2): 157-165, (2016).
- [16] Quiroga, C.A., Bullock, D., "Measuring control delay at signalized intersections". *Journal of Transportation Engineering* 125, 271-280, (1999).
- [17] Murat, Y.S., "Comparison of Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Approaches in Vehicle Delay Modeling", *Transportation Research Part C* 14 316–334, (2006).
- [18] Day, C. M., and D. M. Bullock. 2010. "Performance based management of arterial traffic signal systems". *NCHRP Project 3-79a*. Washington, DC: Transportation Research Board, (2010).
- [19] Tian, Z., and Urbanik, T., "System partition technique to improve signal coordination and progression." *J. Transp. Eng.* 133 (2): 119–128, (2007).
- [20] Haque B., Zahid A., Siddiki N. A., "Coordinated Traffic Signal Design for Major Intersections in Sylhet City", *Journal of Civil Engineering Frontiers*, 51-60, (2022).
- [21] Day, C. M., R. Haseman, H. Premachandra, T. M. Brennan, J. S. Wasson, J. R. Sturdevant, and D. M. Bullock. "Evaluation of arterial signal coordination: Methodologies for visualizing high resolution event data and measuring travel time." *Transp. Res. Rec.* 2192 (1): 37–49, (2010).
- [22] Abbas M., Bullock D., Head L., "Real-Time Offset Transitioning Algorithm For Coordinating Traffic Signals", *Transportation Research Record*, 26-39, (2001).
- [23] Lu, K., X. Zeng, L. Li, and J. Xu., "Two-way bandwidth maximization model with proration impact factor for unbalanced bandwidth demands." *J. Transp. Eng.* 38 (5): 527–534, (2012).
- [24] Abdulhafedh A., "How to Design Traffic Signals at Multiple Coordinated Intersections", *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*, 29-35, (2018).
- [25] Sunkafi, S., "The benefits of retiming traffic signals." *ITE J.* 74 (4): 26–29 (2004).
- [26] Karaoğlan M.E. "Koordine Sinyalize Kavşaklarda Optimizasyon", *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2021).
- [27] Vu M.T., Nguyen V.P., Nguyen T.A., "Methods for Designing Signalized Double-Intersections with Mixed Traffic in Vietnam", *Procedia Eng.*, 131–138, (2016).
- [28] Li, H., S. M. Lavrenz, C. M. Day, A. L. Stevens, and D. M. Bullock., "Use of both travel time and travel time reliability measures to quantify benefits of signal timing maintenance and optimization." *Transp. Res. Rec.* 2487 (1): 55–68, (2015).
- [29] Zheng, J., H. X. Liu, S. Misgen, and G. Yu., "Performance diagnosis tool for arterial traffic signals." *Transp. Res. Rec.* 2356 (1): 109–116, (2013).
- [30] Yue, R., Yang, G., Lin, D., Wang, A. And Tian Z., "Traffic Signal Retiming to Improve Corridor Performance", *ASCE J. Transp. Eng.*, 147 (1): 05020009, (2021).
- [31] Qi H., Dai R., Tang Q., Hu X., "Coordinated Intersection Signal Design For Mixed Traffic Flow Of Human-Driven And Connected And Autonomous Vehicles", *IEEE Access*, 26067-26084, (2020).
- [32] A. A. Malikopoulos, L. Beaver, and I. V. Chremos, "Optimal time trajectory and coordination for connected and automated vehicles," *Automatica*, 125(6):109469, (2021).

- [33] Yanqiu Cheng, Chenxi Chen, Xianbiao Hu, Kuanmin Chen, Qing Tang, Yang Song, "Enhancing Mixed Traffic Flow Safety via Connected and Autonomous Vehicle Trajectory Planning with a Reinforcement Learning Approach", *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, Article ID 6117890, 11, (2021).
- [34] Yao R., Zhang W., Long M., , *Mathematical Problems in Engineering* (2020).
- [35] Murat Y.Ş., "Denizli Şehiriçi Kavşaklarındaki Trafik Akımlarının Bilgisayarla İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, [Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1996).
- [36] PTV Group Vissim Academic License, ORD-06074-D9Z6C5, PTV-0501885.
- [37] Minitab 21 Statistical Software [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. (www.minitab.com) (2022).

ERKEN GÖRÜNÜM