



Tam Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sisteminde Gecikmede Sağlanan İyileşmeler

Delay Improvements in Fully Actuated Traffic Signal Systems

Seda Balaban¹ , Ebru Arıkan Öztürk²

öz

Trafik yoğunluğundan kaynaklanan sıkışıklık, yoğun olmayan periyotlardaki gereksiz beklemler ve zaman kayıpları dikkate alındığında, sinyalizasyon kavşaklarının gerçek zamanlı olarak yönetilmesinin önemi daha iyi anlaşılır. Trafik uyarmalı sistemler, gerçek zamanlı trafik değerlerine göre süre ataması yaptıkları için, gecikmeleri minimuma indiren ve kavşak performansını artıran, günümüzde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Bu çalışmada; önceki durumunda sabit zamanlı olarak çalıştırılan, daha sonra tam trafik uyarmalı sinyal sistemine dönüştürülen Polatlı Refik Cesur Kavşağı'nda taşıt başına düşen ortalama gecikme süresindeki azalmanın belirlenmesi amaçlanmaktadır. Kavşağın ilk durumundaki gecikme Webster modeli ile ikinci durumundaki gecikme ise arazi gözlemi yapılarak belirlenmiştir. Çalışmada, taşıt başına ortalama gecikmede %35 azalma sağlanabileceği ayrıca, yıllık 78 bin litre yakıt ve 190 ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sinyalizasyon kavşak, Gecikme, Yakıt tüketimi, CO₂ emisyonu.

ABSTRACT

The importance of real-time control of signalized intersections is better understood when the congestion caused by traffic density, and loss of time in off-peak periods are taken into account. Traffic actuated signal control systems minimize delays and increase the performance of the intersection as they assign time according to the actual traffic volumes. These systems are widely used today. The aim of this study is to determine the decrease in the average delay per vehicle at Polatlı Refik Cesur intersection, which was converted from a pre-timed control to fully actuated control. The delay in the first case of the intersection was determined by the Webster model, and the second case was determined by field observation. In the study, it was found that a 35% reduction in the average delay per vehicle, an annual saving of 78 thousand liters of fuel, and 190 tons of CO₂ emission could be achieved.

Keywords: Signalized intersection, Delay, Fuel consumption, CO₂ emission.

¹ Gazi Üniversitesi Trafik Planlaması ve Uygulaması A.B.D., sedaa1794@gmail.com, 0000-0001-5863-3386

² **Corresponded Author:** Gazi Üniversitesi Trafik Planlaması ve Uygulaması A.B.D., eozturk@gazi.edu.tr, 0000-0002-4971-2442



GİRİŞ:

Gecikme, bir taşıtın beklemeden kavşağı boşalttığı süre ile kavşakta beklediği süre arasındaki zaman farkıdır. Kavşakta sinyalizasyon denetimleri nedeniyle kaybedilen zaman, kontrol gecikmesi olarak adlandırılır. Kontrol gecikmesi; yavaşlama, durma ve hızlanma gecikmesi olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır (Dion vd., 2004; Yetiş ve Çakıcı, 2017; Shatnawi vd., 2018). Bir kavşakta ortalama gecikme hesaplanırken, tüm yaklaşım kollarındaki taşıtlara ait bu üç bileşenin doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir (Yetiş ve Çakıcı, 2017). Gecikme, arazi gözlemlerine dayalı olarak belirlenebildiği gibi analitik modeller yardımı ile de hesaplanabilmektedir (Ceylan vd., 2006). Ancak gözlem ile gecikmelerin ölçülmesi oldukça zor ve zaman alıcı bir işlemdir.

Sinyalizasyon kavşaklardaki gecikme; bazıları birbiriyle ilişkili, bazıları ise birbirinden bağımsız çeşitli parametrelere bağlıdır. Devre süresi, kırmızı ve yeşil süreler, trafik hacmi ve kompozisyonu, şerit sayısı ve genişliği, kavşak yakınında toplu taşıma durağı varlığı ve park etme durumu, sürücü davranışları, meteorolojik koşullar gibi pek çok parametre gecikmeyi etkiler (Başkan, 2006).

Sinyalizasyon bir kavşaktaki trafik koşulları dikkate alınmadan belirlenen süreler taşıtların kavşakta zaman kaybetmesine neden olmakta ve bu durum; kavşak kapasitesini olumsuz etkilemekte, gecikme, yakıt tüketimini artırmakta ve çevresel açıdan da olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır (Yetiş ve Çakıcı, 2015; Arabacı vd., 2019). Ayrıca kavşaklarda gecikmenin yarattığı beklemler nedeniyle oluşan zaman giderleri ile artan taşıt işletme giderleri (motoryağı, lastik, yedek parça, taşıt bakım onarım) söz konusudur. Bu giderler dışında, tehlikeli sürücü davranışları ve ihlaller nedeniyle trafik kazalarındaki artış, şehrin yaşam kalitesindeki bozulma gibi olumsuz durumlar da oluşmaktadır. Sinyalizasyon kavşaklarda gecikme sürelerindeki artış, sürücülerin güzergâh seçiminde dolayısıyla trafiğin yol ağı üzerindeki dağılımında da önemli rol oynamaktadır (Aktaş vd., 2017).

Kavşaklarda kullanılan sinyalizasyon sistemleri kontrol türlerine göre sabit zamanlı ve trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemleri olarak gruplandırılır (FHWA NCHRP Report 812, 2015). Sabit zamanlı sinyalizasyon (SZS) sisteminde, kavşak yaklaşım kollarındaki taşıt ve yaya trafiğine, önceden belirlenmiş süreler uygun olarak sıra ile geçiş hakkı verilir. Yeşil süreler ortalama trafik yükü değerlerine göre belirlenir. SZS'de günün değişik saatlerine göre değişen birkaç devre süresi uygulanır. Ancak bu devre süreleri trafik akımlarında meydana gelen değişiklikleri optimize edememekte ve gereksiz beklemlere neden olarak gecikmeyi artırmaktadır.

Gerçek zamanlı trafik değerlerine göre süre ataması yaparak gecikmeleri minimuma indiren trafik uyarmalı sinyalizasyon (TUS) sistemlerinde ise taşıtların geçiş sıraları ve süreleri algılayıcılar tarafından belirlenen trafik verilerine göre düzenlenmektedir. Bu sistem genel olarak üç türlü uygulanmaktadır (Gonca ve Gülsün, 2019):

- Yarı Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon (YTUS): Kavşak yaklaşım kollarının bazılarında uyarı alınır. Genellikle ana yol üzerindeki akımlara sürekli yeşil ışık yanar. Tali yol ve yaya için bir talep oluşmadıkça sinyal parametrelerinde bir değişiklik olmaz.
- Tam Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon (TTUS): Tüm kavşak yaklaşım kollarından sürekli uyarı alınır ve geçiş sıraları ve süreleri bu uyarılara göre değiştirilerek otomatik olarak düzenlenir.
- Adaptif Trafik Kontrol Sistemleri (ATKS): Sinyal sürelerini; trafik miktarı, kuyruklanma gibi parametrelere göre gerçek zamanlı olarak optimize eden sistemlerdir. Adaptif sistemler, trafik yoğunluklarının anlık değerlerine göre geçiş hakkı sağlarlar.

Türkiye'de trafik hacminin fazla olduğu devlet ve il yolları üzerine tesis edilen SZS biçiminde yönetilen sinyalizasyon kavşaklar; taşıt kuyruklarının oluşmasına, yolun kapasitesinin düşmesine, yol kullanıcıların zaman ve yakıt tüketimi sorunu yaşamasına, kırmızı ışık ihlallerine sebep olmaktadır. Trafik mühendisleri; sinyalizasyon kavşaklarda gecikme ve kuyruk uzunluğunun en aza indirilmesini, kavşak

performansının ve hizmet düzeyinin maksimum düzeyde olmasını, zaman, taşıt işletme maliyetleri ile çevresel maliyetlerin azaltılmasını amaçlarlar. Bu doğrultuda, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından, gecikmeden kaynaklanan sorunların çözülebilmesi amacıyla, SZS biçiminde yönetilen kavşakların TTUS biçimine dönüştürülmesi çalışmalarına başlanmıştır. KGM tarafından 2018 yılında ihale edilen “Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi Tesis Edilmesi” işi kapsamında; 2. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde 105 adet ve 4. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde 20 adet olmak üzere toplam 125 adet sabit zamanlı sinyal biçiminde yönetilen kavşağın trafik uyarmalı sinyal biçimine dönüştürülmesi planlanmıştır. Çalışmada bu iş kapsamındaki veriler kullanılmış olup çalışmanın amacı; SZS sisteminde çalıştırılan ve daha sonra TTUS sistemine dönüştürülen Polatlı Refik Cesur Kavşağı’nda, taşıt başına düşen ortalama gecikme süresindeki değişimin belirlenmesi ve meydana gelen iyileşmelerin yakıt tüketimi, emisyon açısından sağladığı faydaların tespit edilmesidir.

Literatür Özeti:

Sinyalize kavşaklarda gecikmeleri tahmin etmek için geliştirilmiş birçok analitik model mevcuttur. Bu modeller üç grupta incelenebilir: i) Webster, Tanner&Miller tarafından doygun altı akımlar için geliştirilen stokastik sabit ve dengeli gecikme modelleri, ii) May&Keller, Neuberger ve Pignataro tarafında doygun üstü akımlar için geliştirilen deterministik gecikme modelleri ve iii) Burrow, Catling, Brilon, Wu, Akçelik, Teply, Highway Capacity Manual (HCM) ve Kimber tarafından geliştirilen zaman esaslı gecikme modelleridir. Bu modeller içinde en yaygın kullanılanlar; Webster, HCM ve Akçelik gecikme modelleridir (Bayrakdar ve Doğan 2021).

Dinamik sinyal zamanlaması kullanılan kavşaklarda; taşıt başına gecikme, seyahat süresi, yakıt tüketimi ve emisyonla yönelik sağlanan iyileşmelerle ilgili çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Miller, sinyal zamanlamasını dinamik olarak ayarlamak için sinyal kontrol algoritmasını öneren ilk araştırmacıdır (Miller , 1963). Miller’in model ilkesine dayanan araştırmacılar, Split Cycle Offset Optimisation Technique (SCOOT) (Hunt vd., 1982), Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) (Lowrie, 1990), Real Time Hierarchical Optimized Distributed Effective Syste (RHODES) (Mirchandani ve Head, 2001), Traffic-responsive Urban Control (TUC) (Kraus vd., 2010), Optimization Policies for Adaptive Control (OPAC) (Gartner vd., 1991), MOTION (Brilon ve Wietholt, 2013) gibi çeşitli dinamik sinyal kontrol sistemleri geliştirmişler ve bazıları kentsel yol ağlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Aşağıda dünyadaki bazı büyük şehirlerde kavşaklarda kullanılan dinamik sinyal kontrol sistemleri sayısı görülmektedir (Stevanovic, 2009).

- Sydney, Australia SCATS-3500
- Los Angeles, U.S. ATCS-3000
- Toronto, Canada SCOOT-340
- Beijing, China SCOOT-1500
- Dublin, Ireland SCATS-614
- Manchester, U.K. SCOOT-2200
- Auckland, New Zealand SCATS-750

Avustralya Sydney’de SCATS ile kontrol edilen 21 kavşağın incelendiği çalışmada, SCATS’in seyahat süresini %28, durmaları %25 ve CO₂ emisyonunu %15 azalttığı belirtilmiştir (Chong-White vd., 2012).

Amerika Birleşik Devletleri, Oakland Eyaleti’nde SCATS sistemi ile çalıştırılan 28 kavşakta, kuyruk uzunluğunun %17,5, toplam seyahat gecikmesinin %19, yakıt tüketiminin %5,1 azaldığı, ortalama seyahat hızının ise %7 arttığı belirlenmiştir (Utpal vd., 2010).

Samadi vd., (2012) çalışmalarında, İran’ın Mashhad şehrindeki 3 bulvarda (Jomhoori Blvd., Ferdowsi Blvd., Sajjad Blvd.) yer alan kavşakların, mevcut durumu ile SCATS’la dinamik olarak çalıştırılması

durumunda sabah ve akşam zirve saatler ile zirve dışı saatlerdeki gecikme analizini yapmış, çalışmada zirve ve zirve dışı saatlerde taşıt başına ortalama gecikmede %7-%14,5 arasında azalma, yakıt tüketiminde %3,7-%15,9 arasında azalma, CO emisyonunda %4,4-%21,9 arasında azalma, ve HC emisyonunda ise %4,5-%21,3 arasında azalma olduğu belirlenmiştir.

Studer vd., (2015) çalışmalarında dört farklı dinamik sinyal kontrol sistemini karşılaştırmış; SCATS ve UTOPIA'nın metropol alanlarda, SCOOT'un kentsel ve bölgesel alanlarda, INSYNC'nin ise sınırlı sayıdaki kavşaklarda kullanımının uygun olacağı belirtilmiştir.

Toronto'da SCOOT ile yolculuk süresinde ortalama %8, gecikmede %17 oranında azalma sağlanmıştır. SCOOT ile olağandışı koşullarda (bir beyzbol maçının ardından) gecikmeler %61 oranında azaltılabilmektedir (Ketabdari, 2013)

Almanya'da dinamik sinyal kontrol teknikleri için iki sistem mevcuttur: MOTION (Siemens) ve BALANCE (GEVAS). Brilon ve Wietholt (2013) çalışmalarında, Muenster kentinin ana arterlerinden biri olan Albersloher Weg'de MOTION ile taşıt başına ortalama gecikmede %40 azalma ile kavşak performansında %30 iyileşme olduğunu belirlemiştir.

Gündoğan vd., (2014), ISBAK'ın TUBİTAK desteği ile geliştirdiği Adaptif Trafik Yönetim Sistemi (ATAK)'ın performansını incelemek amacıyla İstanbul'da gerçekleştirdikleri çalışmada; ATAK kullanılan izole kavşakta periyot süresinde yaklaşık %10, koordineli kavşaklarda (5 kavşak) ise seyahat süresinde yaklaşık %15 ve karbon emisyonunda yaklaşık %10 oranında azalma olduğunu belirlemiştir.

Swaminathan vd., (2014), Hinditan-Chennai şehrinin ana arterlerden biri olan Anna Salai'deki sinyalize beş kavşağın dinamik şekilde yönetilmesini VISSIM ile simüle ederek gecikmede %20-%39 azalma olduğunu belirlemiştir.

Promraksa vd., (2019), Thailand-Khon Kaen Eyaleti Phol şehrindeki 3 kavşağın tam uyarmalı sistemle çalışmasını VISSIM ile simüle ettikleri çalışmalarında, ortalama gecikmede %44,7, CO₂ emisyonunda ise %8,7 oranında azalma tespit etmiştir.

Çakıcı ve Murat (2021), sinyalize dönel bir kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin minimize edilmesini hedefleyen çalışmalarında bir sinyal süresi optimizasyon modeli geliştirmiş ve modeli VISSIM simülasyon programında test etmiştir. Çalışmada taşıt başına gecikmelerde mevcut duruma kıyasla ortalama %30,32 oranında azalma belirlenmiştir.

Nie vd., (2021), farklı trafik koşulları (düşük, doygun akıma yakın, doygun akımın üstünde) altında, gerçek zamanlı bir sinyal kontrol algoritması geliştirdikleri çalışmalarında, modeli VISSIM 4.30 ile test etmiş ve Çin'in Shandong Eyaleti Jinan şehri Jingba ve Weiye yolları kesişimindeki kavşak için sabit zamanlı ve dinamik olmak üzere gecikme analizi yapmıştır. Çalışmada taşıt başına ortalama gecikmede; düşük trafik akımı koşulunda %68,27, doygun akıma yakın trafik koşulunda %49,46, doygun akım üstü trafik koşulunda ise %39,35 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir.

1. Metodoloji

Çalışmada, TTUS'ne dönüştürülen kavşaktaki gecikme gözlemi drone yardımı ile yapılmıştır. Çekimlerden önce kavşaktaki tüm yaklaşım kolları için giriş ve çıkış referans noktaları belirlenmiştir. Referans noktaları, taşıtların kavşağa yaklaşırken hızlarını azaltmaya başladığı noktalar (t_{giris}) ve kavşağı terk ederken sabit seyir hızına ulaştıkları noktalar (t_{cikis}) olarak seçilmiştir. Çekimler, kavşak yaklaşım kollarındaki tüm referans noktalarını görece şekilde, zirve saat içinde gerçekleştirilmiştir. Görüntüler ofis ortamında analiz edilmiş, dört yaklaşım kolu ve her yaklaşım konundaki düz giden-sağa dönen-sola dönen akımlardaki taşıtların, referans noktalarına giriş ve çıkış yaptığı süreler tespit edilmiştir. İlgili

yaklaşım kolunda, üç yöne (düz-sağ-sol) ait kontrol gecikmelerinin ortalaması alınarak, taşıt başına düşen ortalama gecikme hesaplanmıştır. Söz konusu ölçümler üç kez tekrarlanmış olup, bu üç ölçümün ortalaması alınarak yaklaşım koluna ait nihai gecikme değeri elde edilmiştir.

Kavşağın TTUS sistemi ile çalıştırıldığı durumdaki sinyalizasyon parametreleri, "Trafik Uyarımlı Sinyalizasyon Sistemi Tesis Edilmesi" işinin yüklenici firması tarafından hazırlanmış olan MODEL 2-T sinyalizasyon algoritmasına göre belirlenmiş parametrelerdir. Arazi ölçümünden elde edilen gecikme verileri, kavşakta bu algoritma tarafından oluşturulan sinyal süreleri ve sinyal akış döngüsünün uygulanması ile elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

Sinyal sistemi değişen kavşağın önceki durumuna (SZS) ait taşıt başına ortalama gecikmeler, Webster gecikme formülü (Webster ve Cobbe, 1966) kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Formülde kullanılan veriler (devre süresi, yeşil süreler, zirve saat trafik hacim değerleri) KGM'den temin edilmiştir.

Sinyal sistemi değişen kavşağın önceki durumuna (SZS) ait taşıt başına ortalama gecikmeler, Webster gecikme formülü (Webster ve Cobbe, 1966) kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Formülde kullanılan veriler (devre süresi, yeşil süreler, zirve saat trafik hacim değerleri) KGM'den temin edilmiştir.

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\lambda} \quad (1)$$

d : Taşıt başına ortalama gecikme (saniye/taşıt),

C : Devre süresi (saniye),

q : İlgili fazdaki en yüklü akım (taşıt/sa),

λ : Yeşil sürenin (G) devre süresine oranı (G/C),

x : Doygunluk oranı ($x=q/\lambda s$) (s =doygun akım).

Kavşaklarda kırmızı ışıpta bekleyen taşıtlar rölanti konumunda beklemekte olup bu esnada yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları devam etmektedir. Çalışmada yakıt tüketimi ile CO₂ emisyonu değerleri hesaplanırken, Akçelik (2014)'e ait "Recalibration of a vehicle power model for fuel and emission estimation and its effect on assessment of alternative intersection treatments" başlıklı çalışmadaki farklı taşıt türlerine (otomobil, orta yüklü ticari taşıt, ağır vasıta) ait f_i = (rölantideki yakıt tüketim değeri ml/saat) ve f_{CO_2} (havaya salınan CO₂ değerini g/ml) değerleri kullanılmıştır. Taşıt türü aynı olsa da; taşıtın ağırlığı, lastiklerin durumu, sürücü deneyimi, iklim koşulları, taşıtın rutin bakım süreci gibi yakıt tüketimini etkileyen bazı faktörler söz konusudur ancak çalışmada bu faktörler dikkate alınmamıştır. Çalışmada taşıt başına ortalama gecikmenin, yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonunda sağladığı tasarruf miktarları Eşitlik 2 ve 3 kullanılarak hesaplanmaktadır:

Yakıt tüketiminde sağlanan tasarruf hesabı(YT):

$$YT(ml/saat) = \sum \frac{\text{Gecikme azalması} \left(\frac{sn}{\text{taşıt}}\right) \times \text{Trafik hacmi} \left(\frac{\text{taşıt}}{\text{saat}}\right) \times f_i \text{ yakıt tüketimi} \left(\frac{ml}{\text{saat}}\right)}{3600} \quad (2)$$

CO₂ emisyonunda sağlanan tasarruf hesabı(ET):

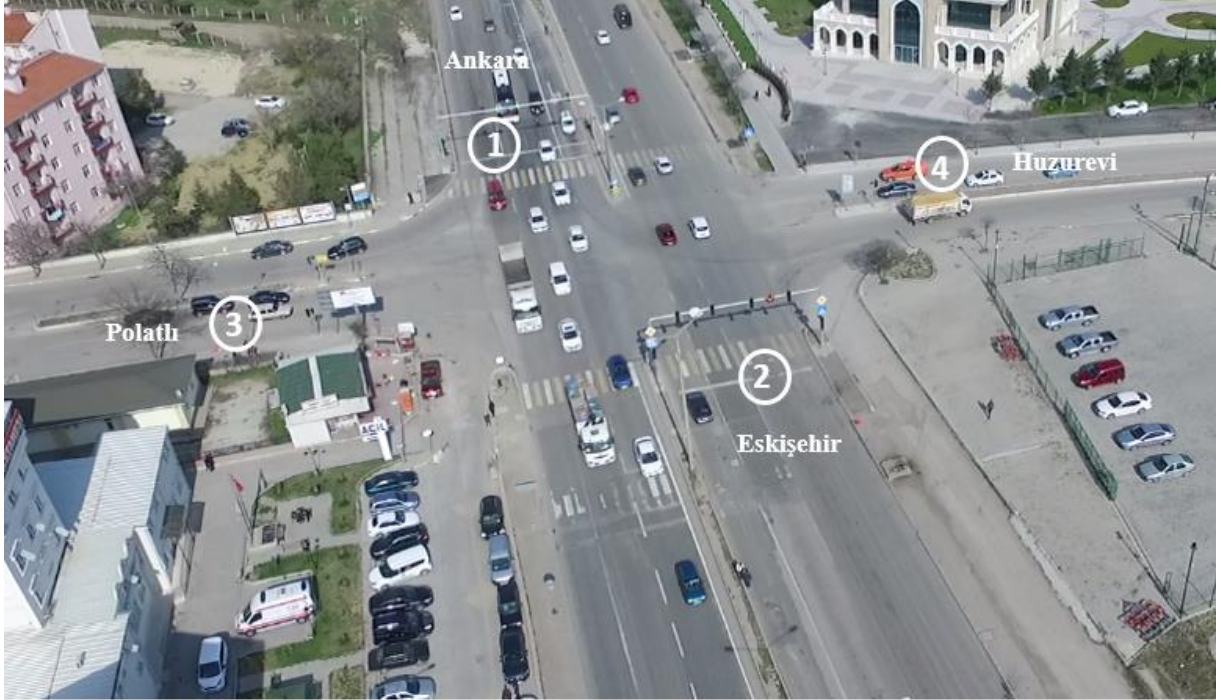
$$ET(gram/saat) = \sum \frac{\text{Yakıt tasarrufu} \left(\frac{ml}{\text{saat}}\right) \times f_{CO_2} \text{ havaya salınan} \left(\frac{gram}{ml}\right)}{10^6} \quad (3)$$

Kavşağın 4 yaklaşım kolu ve 5 farklı taşıt türü için hesaplanan mililitre cinsinden yakıt ve gram cinsinden CO₂ emisyon değerleri toplanarak, kavşağın toplam tasarruf miktarı bulunur. Zirve saat için belirlenmiş

olan bu tasarruf miktarları, 8 ile çarpılarak günlük tasarruf miktarları, günlük tasarruf değerleri de 365 ile çarpılarak yıllık tasarruf miktarları bulunur.

2. Bulgular

Polatlı Refik Cesur Kavşağı, KGM 4. Bölge Müdürlüğü yol ağında yer alan bölünmüş devlet yolu niteliğindedir. Kavşak 4 kollu olup ortasında dönel ada bulunmamaktadır. Şekil 1’de kavşağın genel bir görünümü ile kavşaktaki yaklaşım kolları görülmektedir.



Şekil 1. Polatlı Refik Cesur Kavşağı

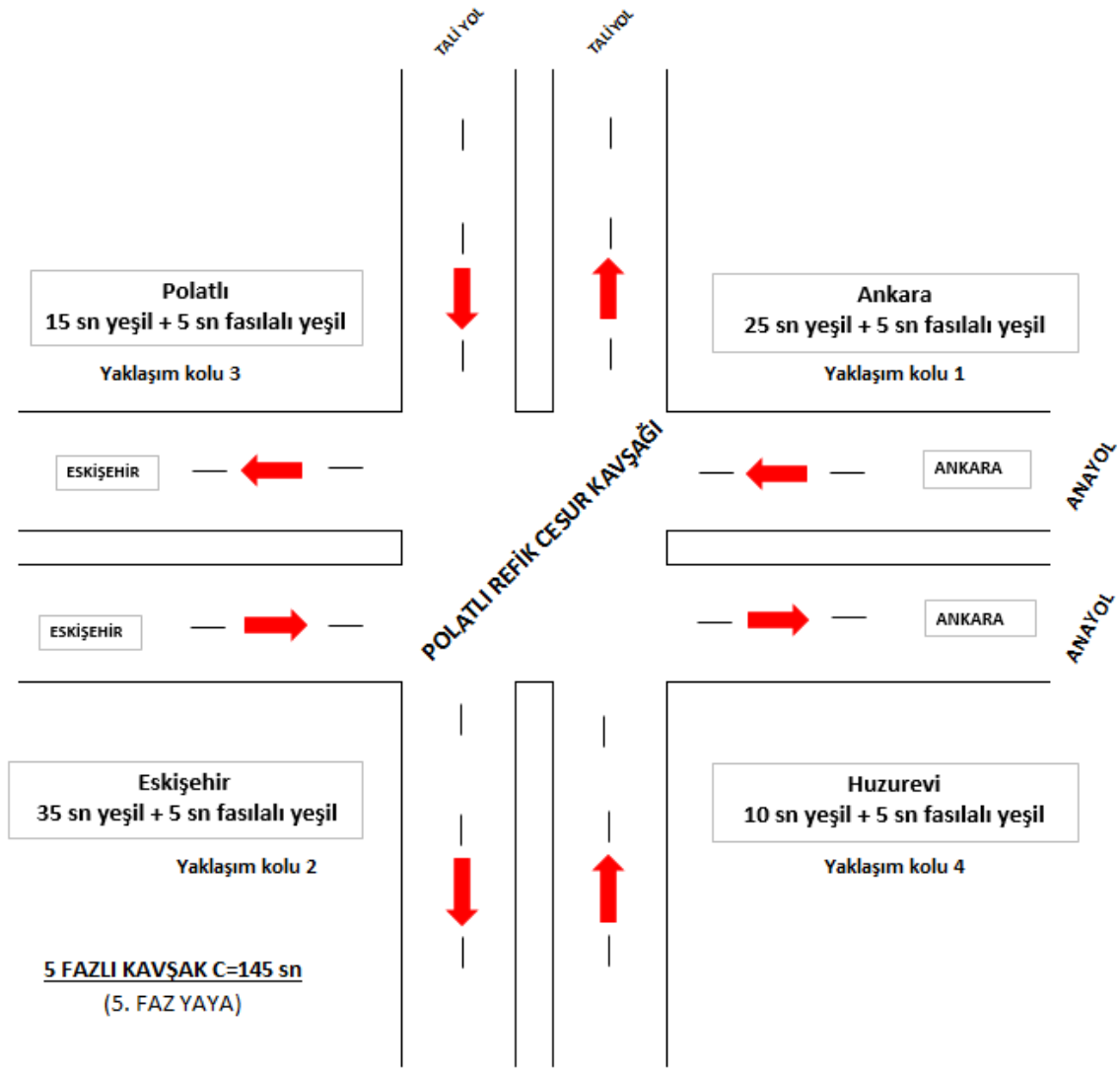
2.1. SZS Sisteminde Gecikme

Polatlı Refik Cesur Kavşağı, SZS sistemi ile çalışırken 1 fazı yaya olmak üzere 4 fazlı çalıştırılan bir kavşaktır ve devre süresi (C) 145 saniyedir. Kavşakta sola dönüşler için ayrıca bir faz düzeni oluşturulmamıştır. SZS sistemi ile çalışırken kavşağa ait devre süresi yeşil süreler Şekil 2’de görülmektedir. Kavşağa ait trafik hacim değerleri KGM’den temin edilen 2017 yılı sayım değerleridir.

Kavşağın SZS ile çalıştırıldığı durumda yaklaşım kollarındaki taşıt başına ortalama gecikmeler, Eşitlik 1’deki Webster gecikme formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan gecikme değerleri Tablo 1’de görülmektedir.

2.2. TTUS Sisteminde Gecikme

Tablo 2’de, kavşağın TTUS ile çalıştırıldığı durumda, Ankara-Eskişehir istikametindeki bir adet arazi ölçüm sonucu örnek olarak verilmiştir. (Tablo 2’de, Ankara-Eskişehir yaklaşım kolunda düz giden akımda; $t_{giriş}=33sn$ ve $t_{çıkış}=77sn$ olan ölçüm şunu ifade etmektedir: Söz konusu taşıt, bulunduğu akıma kırmızı ışık yandıktan 33 saniye sonra hızını azaltmaya başladığı birinci referans noktasından geçmiş ve 77. saniyede kavşağı terk ederek sabit seyir hızına ulaşmıştır. İki süre arasındaki fark olan 44 saniye taşıta ait gecikme süresidir). Diğer yaklaşım kollarındaki tüm ölçümlere ait sonuçlar ile ortalama ölçüm değerleri Tablo 3’de verilmiştir.



Anayol Ankara'dan Eskişehir'e					Anayol Eskişehir'den Ankara'ya					Tali yol Polatlı-Huzurevi				Tali yol Huzurevi-Polatlı					
02 sn	25 sn	05 sn	03 sn	02 sn	02 sn	35 sn	05 sn	03 sn	02 sn	02 sn	15 sn	05 sn	03 sn	02 sn	02 sn	10 sn	05 sn	03 sn	02 sn
SK	YY	YF	SS	KK	SK	YY	YF	SS	KK	SK	YY	YF	SS	KK	SK	YY	YF	SS	KK
Sarı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	Sarı	Kırmızı	Sarı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	Sarı	Kırmızı	Sarı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	Sarı	Kırmızı	Sarı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	Sarı	Kırmızı
kırmızı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	kitleme	koruma	kırmızı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	kitleme	koruma	kırmızı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	kitleme	koruma	kırmızı	Yeşil	Fasıllı Yeşil	kitleme	koruma

Şekil 2. SZS sistemine ait devre süresi ve yeşil süreler

Tablo 1. Kavşağın SZS ile çalıştırıldığı durumda taşıt başına gecikmeler

Yaklaşım Kolu No	Yaklaşım Kolu	Taşıt başına gecikme (sn/taşıt) (Webster Modeli ile)
1	Ankara-Eskişehir (C= 145sn G ₁ =30sn q=828 OB/saat s=1900 taşıt/saat)	80,45
2	Eskişehir-Ankara (C= 145sn G ₂ =40sn q=955 OB/saat s=1900 taşıt/saat)	76,17
3	Polatlı-Huzurevi (C= 145sn G ₃ =20sn q=140 OB/saat s=1900 taşıt/saat)	58,14
4	Huzurevi-Polatlı (C= 145sn G ₁ =15sn q=127 OB/saat s=1900 taşıt/saat)	62,41

Tablo 2. Örnek gecikme arazi ölçüm sonuçları

Yaklaşım Kolu	Yön	t _{giriş} sn	t _{çıkış} sn	t _{çıkış} -t _{giriş} sn	ort. gecikme (sn/taşıt)
Ankara-Eskişehir	Düz Giden Akım	1	71	70	43,05
		3	68	65	
		16	71	55	
		19	68	49	
		21	67	46	
		25	64	39	
		33	77	44	
		36	75	39	
		38	75	37	
		40	66	26	
		41	81	40	
		42	77	35	
		42	81	39	
		50	79	29	
		51	80	29	
		6	65	59	
	10	69	59		
	Sağa Dönen Akım	25	75	50	
		53	79	26	
		56	81	25	
Sola Dönen Akım	-	-	-		

Tablo 3. Kavşağın TTUS ile çalıştırıldığı durumda taşıt başına gecikmeler

Yaklaşım Kolu	Gecikme (sn/taşıt)			
	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	3 ölçüm ortalaması
Ankara-Eskişehir	43,05	39,54	34,08	39,04
Eskişehir-Ankara	44,125	43,14	39,45	42,24
Polatlı-Huzurevi	53	49,03	57,33	53,12
Huzurevi-Polatlı	33	41,50	55,67	43,39

Kavşağın TTUS ve SZS sistemlerinde çalıştırılırken hesaplanan gecikme değerleri ile gecikmede sağlanan sn/taşıt ve % cinsinden iyileşmeler Tablo 4’de görülmektedir.

Tablo 4. Gecikmede sağlanan azalma

Yaklaşım Kolu	SZS gecikme (sn/taşıt)	TTUS gecikme (sn/taşıt)	Gecikmede sağlanan azalma (sn/taşıt)	Gecikmede sağlanan azalma (%)
Ankara-Eskişehir	80,45	39,04	41,41	%52
Eskişehir-Ankara	76,17	42,24	33,93	%45
Polatlı-Huzurevi	58,14	53,12	5,02	%9
Huzur Evi-Polatlı	62,41	43,39	19,02	%31

Kavşakta gecikmede sağlanan azalma ortalama %35 düzeyindedir. Ancak, saatlik trafik hacminin fazla olduğu Ankara-Eskişehir ve Eskişehir-Ankara istikametlerindeki gecikmelerde önemli miktarda azalma gerçekleşmiştir (%52 ve %45).

2.3. Yakıt Tüketiminde Sağlanan Tasarruf

Tablo 5’de kavşak yaklaşım kollarında taşıt türlerine göre saatlik (zirve saat) trafik hacim değerleri görülmektedir. Bu trafik hacim değerleri dikkate alınarak, yaklaşım kollarındaki taşıt türlerine göre gecikmede sağlanan toplam saniye cinsinden azalmalar hesaplanmış olup sonuçlar Tablo 6’da görülmektedir.

Tablo 5. Kavşağın saatlik trafik hacim değerleri

	Trafik hacim değerleri taşıt/saat *				
	Otomobil	OYTT**	Otobüs	Kamyon	Treyler
Ankara-Eskişehir	960	36	12	61	72
Eskişehir Ankara	866	29	7	57	55
Polatlı-Huzurevi	380	36	4	40	7
Huzurevi-Polatlı	115	36	4	22	7
Toplam	2 321	137	28	180	141

*2017 yılı verileridir.

** Orta yüklü ticari taşıt

Tablo 6. Taşıt türlerine göre zirve saatte gecikmede sağlanan azalma

	Taşıt türlerine göre zirve saatte gecikmede sağlanan azalma (sn/taşıt)				
	Otomobil	OYTT	Otobüs	Kamyon	Treyler
Ankara-Eskişehir	39 753,6 (960x41,41)	1 490,76	496,92	2 526,01	2 981,52
Eskişehir Ankara	29 383,38	983,97	237,51	1 934,01	1 866,15
Polatlı-Huzurevi	1 907,6	180,72	20,08	200,8	35,14
Huzurevi-Polatlı	2 187,3	684,72	76,08	418,44	133,14
Toplam	73 231,88	3 340,17	830,59	5 079,26	5 015,95

Tablo 7’de ise gecikme iyileşmelerinin sağladığı yakıt tasarrufu miktarları, f_{otomobil} : 891 ml/saat, f_{OYTT} : 2 044 ml/saat, $f_{\text{iağırvasita}}$: 2 274 ml/saat değerleri dikkate alınarak zirve saat için hesaplanmıştır.

Tablo 7. Taşıt türlerine göre zirve saatte yakıt tüketiminde sağlanan tasarruf

Taşıt cinsi	Zirve saat gecikme iyileşmesi (sn)	f_i : Rölantide yakıt tüketimi (ml/saat)	Zirve saatte sağlanan yakıt tasarrufu (ml/saat)
Otomobil	73 232	891	18 125 (73 232x891/3600)
OYTT	3 340	2 044	1 896
Otobüs	831	2 274	525
Kamyon	5 079	2 274	3 208
Treyler	5 016	2 274	3 168
Toplam			26922 (ml/saat)

2.4. CO₂ Emisyonunda Sağlanan Azalma

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar; yakıt türü ve kalitesi, taşıtın yaşı, motorun çalışma devri, çalışma sıcaklığı ve ortam sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır (Elbir vd., 2010). LPG yakıtlı taşıtlarda; karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve azot oksit (NO_x) emisyonları benzine oranla daha düşük seviyelerde olmakla birlikte, kullanılan LPG dönüşüm sisteminin yapısına ve kullanılan elektronik kontrol donanımına bağlı olarak emisyon seviyelerinde değişim görülebilmektedir (Çelik vd., 2006).

Tablo 8’de taşıt türlerine göre CO₂ emisyonunda sağlanan azalmalar; Akçelik (2014) çalışmasında yer alan ve yakıt tüketimine göre CO₂ miktarını veren $f_{CO_2\text{otomobil}}$: 2,35 gram/ml, $f_{CO_2\text{OYTT}}$: 2,35 gram/ml ve $f_{CO_2\text{ağırvasita}}$: 2,633 gram/ml değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. LPG yakıtlı otomobillerde emisyon seviyeleri benzin ve dizel yakıt kullanan taşıtlara göre daha düşük olmakla birlikte çalışmada otomobiller için aynı f_{CO_2} değeri kabul edilerek hesaplama yapılmıştır.

Tablo 8. Zirve saatte CO₂ emisyonunda sağlanan azalma

Taşıt cinsi	Zirve saatte sağlanan yakıt tasarrufu (ml/saat)	f_{CO_2} : Yakıt miktarına göre CO ₂ emisyonu (gram/ml)	Zirve saatte sağlanan CO ₂ emisyonundaki azalma (gram/saat)
Otomobil	18 125	2,35	42 593,75 (18 125x2,35)
OYTT	1 896	2,35	4 455,6
Otobüs	525	2,633	1 382,325
Kamyon	3 208	2,633	8 446,664
Treyler	3 168	2,633	8 341,344
Toplam			65219,683 (gram/saat)

Kavşağa ait 24 saatlik sayım değerleri incelendiğinde, bir günlük trafik hacim değerinin zirve saat trafiğinin yaklaşık 8 katı olduğu görülmüştür. Bu oran kullanılarak, yakıt ve CO₂ emisyonunda sağlanan azalma miktarları, günlük ve yıllık olarak Tablo 9’da hesaplanmıştır.

Tablo 9 Günlük ve yıllık olarak yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonunda sağlanan azalma

Zirve saat için yakıt tasarrufu (litre/saat)	Günlük yakıt tasarrufu (litre/gün)*	Yıllık yakıt tasarrufu (litre/yıl)**
26,922	215,376	78 612,24
Zirve saat için CO ₂ emisyonundaki azalma (Kg/saat)	Günlük CO ₂ emisyonundaki azalma (Kg/gün)*	Yıllık CO ₂ emisyonundaki azalma (kg/yıl)**
65,220	521,757	190 441,474

* Günlük yakıt tasarrufu= Zirve saat yakıt tasarrufux8 olarak hesaplanmıştır.

* Günlük CO₂ tasarrufu = Zirve saat CO₂ tasarrufux8 olarak hesaplanmıştır.

** Yıllık yakıt tasarrufu= Günlük yakıt tasarrufux365 olarak hesaplanmıştır.

** Yıllık CO₂ tasarrufu= Günlük CO₂ tasarrufux365 olarak hesaplanmıştır.

SONUÇ ve TARTIŞMA:

Sinyalize kavşaklarda gecikmeden kaynaklanan zaman kayıpları; yakıt tüketiminde artış, çevre kirliliği, zaman kaybından kaynaklanan ekonomik kayıplar, trafik güvenliğinin olumsuz etkilenmesi gibi

sonuçları beraberinde getirmektedir. Kavşakların dinamik bir şekilde yönetilmesiyle de bu olumsuz sonuçlar azaltılmaya çalışılmaktadır.

Çalışmada sinyal sistemi TTUS sistemine dönüştürülen Polatlı Refik Cesur Kavşağı'nda; taşıt başına gecikmede sağlanan ortalama %35 azalma ile bir yılda 78 612,24 litre yakıt ve 190,441 ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. Tespit edilen bu bulgular literatür ile uyumludur. Şöyle ki; taşıt başına ortalama gecikmede, Almanya-Muenster-Albersloher Weg'de %40, Hindistan-Chennai-Anna Salai'de %39, Thailand-Khon Kaen Eyaleti-Phol'de %44,7, Çi-Shandong Eyaleti Jinan'de düşük trafik akımı koşulunda %68,27, doymun akıma yakın trafik koşulunda %49,46 ve doymun akım üstünde ise %39,35 oranında azalma sağlanmıştır. Çalışmada ise anayol akımlarında %52 ve %45 oranlarındaki gecikme meydana gelen azalma tüm yaklaşım kolları dikkate alındığında ortalama %35 düzeyindedir.

Sadece tek bir kavşak için bile yakıt tüketiminde sağlanabilecek bu tasarrufun, hem bireysel hem de toplumsal olarak önemli düzeyde ekonomik katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yine tek bir kavşak için CO₂ emisyonunda sağlanabilecek azalmanın yaratacağı olumlu çevresel etkiler de son derece önemlidir. KGM tarafından sinyal sistemi trafik uyarımlı olarak değiştirilen 125 kavşak dikkate alındığında, yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonunda sağlanabilecek azalmaların, ekonomik ve çevresel etkiler açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Kavşak, önceki durumunda sabit zamanlı olarak yönetilen bir kavşak olup kavşağın TTUS dönüştürme maliyeti (malzeme ve işçilik) 2019 yılı KGM verilerine göre yaklaşık 150 000 TL'dir. Sağlanan yıllık yakıt ve CO₂ emisyonu tasarrufu dikkate alındığında, kavşağın çok kısa sürede kendini amorti edeceği öngörülmektedir.

Benzer çalışmaların; farklı geometrideki kavşak yapısı, trafik akım özellikleri, trafik kompozisyonu, kavşağın yerleşim yeri içinde/dışında olma durumu gibi değişkenler dikkate alınarak tekrarlanması önerilmektedir.

Etik Standart ile Uyumluluk

Çıkar Çatışması: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder.

Etik Kurul İzni: Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

Finansal Destek: Bu çalışma herhangi bir finansal kaynak tarafından desteklenmemiştir

Teşekkür: Çalışmaya ilişkin verilerin temininde ve çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği desteklerden ötürü, Karayolları Genel Müdürlüğü Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Akıllı Ulaşım Sistemleri Şube Müdürü Murat Dursun BARUT ve Elektrik Elektronik Mühendisi Aysel ÇELİKÇİ'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA:

Akçelik R., Smit R. & Besley M. (16-18 April 2014). *Recalibration of a vehicle power model for fuel and emission estimation and its effect on assessment of alternative intersection treatments*. TRB 4th International Roundabout Conference, Seattle, WA, USA.

Aktaş Y., Aslan H. ve Pistil F. (29-30 September 2017). *Sinyalize kavşaklarda meydana gelen taşıt gecikmelerinin VISSIM simülasyon modellenmesi*. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science ISITES2017, Baku-Azerbaijan. <https://isites.info/PastConferences/ISITES2017/ISITES2017/papers/B8-ISITES2017ID71.pdf>

- Arabacı E., Orman R.Ç., Kılıç B., Hepdeniz K. ve Yitik B. (2019). Environmental impact of vehicles waiting at the signalized intersections: A Case Study of a Four-Phase Intersection. *Journal of Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 3(2):229-240. <https://doi.org/10.31200/makuubd.570622>
- Başkan, Ö. (2006). *İzole sinyalize kavşaklardaki ortalama taşıt gecikmelerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayrakdar, B., Doğan, E. (2021). Adaptif sinyalize kavşaklar için derin öğrenme yaklaşımı ile gecikme modelleri geliştirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2): 390-405. <https://doi.org/10.29137/umagd.843300>
- Brilon W., and Wietholt T. (2013). Experiences with Adaptive Signal Control in Germany. *Journal of the Transportation Research Board*, 2356(1): 9-16. <https://doi.org/10.3141/2356-02>
- Ceylan H., Başkan Ö., Ceylan H. ve Haldenbilen S. (2006). Yaklaşık hesaplama metodu ile sinyalize kavşaklarda gecikme bileşenlerinin matematiksel çözüm. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 13(2): 279-288.
- Chong-White C., Millar G., Shaw S., (2013). *SCATS and the environment study: an indication of road customer value*. Australasian Transport Research Forum 2013 Proceedings, Brisbane, 2–4 October 2013. https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2013_chong-white_millar_shaw.pdf
- Çakıcı Z. ve Murat Y.Ş. (2021). Sinyalize Dönel kavşaklarda diferansiyel gelişim algoritması ile sinyal süre optimizasyonu. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 8(2): 635-651. <https://doi.org/10.31202/ecjse.861429>
- Çelik M.B., Aktaş A. ve Özdalyan B. (2006). Gerçek yol şartlarında LPG ve benzinle çalışan iki taşıtın emisyon bakımından karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(1): 45-54.
- Dion F., Rakha H. & Kang Y. S. (2004). Comparison of delay estimates at under- saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38 (2): 99-122. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00003-1)
- Elbir T., Bayram A., Kara M., Altıok H., Seyfioğlu R., Ergün P. ve Şimşir S. (2010). İzmir kent merkezinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirliliğinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimler Dergisi*, 12 (1): 1-17.
- Gartner N.H., Tarnoff P.J. & Andrews C.M. (1991). Evaluation of optimized policies for adaptive control strategy. *Transportation Research Record*, issue number: 1324. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1324/1324-012.pdf>
- Gonca C.K. ve Gülsün, B. (2019). Adaptif trafik yönetim sistemleri. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 2(1): 32-40.
- Gündoğan F., Karagöz Z., Koçyiğit N., Karadağ A., Ceylan H. & Murat Y.Ş. (2014). An evaluation of adaptive traffic control system in Istanbul, Turkey. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 2(3): 198-201. <https://doi.org/10.12720/jtle.2.3.198-201>

- Hunt P.B., Robertson D.I., Bretherton R.D. & Royle M.C. (1982). The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering Control*, 23(4): 190–192.
- Ketabdari, M., (2013). *Analysis of Adaptive Traffic Control Systems and design of a Decision Support System for better choice*. Politecnico di Milano Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale Master of Science in Civil Engineering for Risk Mitigation
- Kraus Jr. W., De Souza F.A., Carlson R.C, Papageorgiou, M., Dantas L.D., Kosmatopoulos E.B., Camponogara E.& Aboudolas K. (2010). Cost effective real-time traffic signal control using the TUC strategy. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(4): 6-17. <https://doi.org/10.1109/MITS.2010.939916>
- Lowrie P. R. (1990). SCATS, Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System: A traffic responsive method of controlling urban traffic. *Australia Roads and Traffic Authority*, New South Wales, Darlinghurst.
- Miller A. J. (1963). Settings for fixed-cycle traffic signals. *Operational Research Quarterly*, 14(4)4: 373-386. <https://doi.org/10.2307/3006800>
- Mirchandani P. & Head L. (2001). A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. *Transportation. Research Part C, Emerging Technology*, 9(6): 415-432. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00047-4)
- NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) Report 812. (2015). Traffic signal timing manual, Second edition. *The Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation (DOT)*.
- Nie C., Wei H., Shi J. & Zhang M. (2021). Optimizing actuated traffic signal control using license plate recognition data: Methods for modeling and algorithm development. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9(2021)100319. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100319>
- Promraksa T., Satiennam T. & Satiennam W. (2019). Vehicle actuated signal control for low carbon society. *International Journal of GEOMATE*, 16(55): 86-91. <https://doi.org/10.21660/2019.55.4766>
- Samadi S., Rad A.P., Kazemi F.M. & Jafarian H. (2012). Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: A case study. *Journal of Transportation Technologies*, 2:248-259. <http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2012.23027>
- Shatnawi, I., Ping Y. & Ibrahim K. (2018). Automated intersection delay estimation using the input-output principle and turning movement data. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 7 (2): 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.04.001>
- Stevanovic, A., (May 2009). Review of adaptive traffic control deployments in larger cities. International Scientific Conference on Mobility and Transport, Munich, Germany.
- Studer L., Ketabdari M. & Marchionni G. (2015). Analysis of adaptive traffic control systems design of a decision support system for better choices. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 5(6). <https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000195>

- Swaminathan N., Rathinavel N., Duraisamy S. & Karuppanan G. (2014). Design of vehicle actuated signal using simulation. *GRADEVINAR*, 66(7): 635-641.
<https://doi.org/10.14256/JCE.1008.2014>
- Utpal D., Sujay B. & Brian D. (March 11-13 2010). *Comparative safety evaluation of SCATS and pre-timed control system*. 51st Annual Transportation Research Forum, Arlington, Virginia.
<https://doi.org/10.22004/ag.econ.207245>
- Webster F.V. & Cobbe, B. (1966). Traffic signals. *Road Research Laboratory, Road Research Technical Paper no:56*.
- Yetiş, Ş.M. ve Çakıcı, Z. (13-14 Kasım 2015). *Sezgisel optimizasyon algoritmalarının taşıt gecikmesi problemi üzerine uygulaması*. 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Trabzon, Türkiye.
<https://www.researchgate.net/publication/281446975> Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Taşıt Gecikmesi Problemi Üzerine Uygulaması
- Yetiş Ş.M. ve Çakıcı, Z. (24-26 Mayıs 2017). *Sinyalize kavşaklarda durma gecikmesi ve kontrol gecikmesi arasındaki ilişkinin incelenmesi*. 12. Ulaştırma Kongresi, Adana, Türkiye.
<https://www.researchgate.net/publication/317184181> Sinyalize Kavşaklarda Durma Gecikmesi ve Kontrol Gecikmesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi