

Sinyalize Dönel Kavşaklar için Hesap Yöntemi Önerisi ve Performans Analizi

Ziya ÇAKICI¹
Yetiş Şazi MURAT²

ÖZ

Sinyalize dönel kavşaklar son yıllarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen tasarım kriterleri henüz netleşmemiştir. Yaklaşım kolları ve ada etrafındaki akımlar için optimum sinyal süresi ve faz planı tasarımı için önerilen herhangi bir yöntem mevcut değildir. Söz konusu kavşakların performansının yalnızca bazı simülasyon programları ile ölçülebilmesi nedeni ile konu halâ bir çok araştırmacının ve tasarımcının ilgisini çekmektedir. Bu çalışmada, sinyalize dönel kavşaklar ele alınmış, sinyal devre süresi ve faz planı için bir hesap yaklaşımı önerilmiştir. Tasarımın etkinliği, farklı tip kavşaklar ve farklı faz planları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve gecikme performans kriteri dikkate alınarak ölçülmüştür. Analizler sonucunda, sola dönüş oranı arttıkça, faz sayısı artışına da bağlı olarak, sinyalize dönel kavşaklar yerine, farklı alternatiflerin tercih edilebileceği bulgusuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Trafik, kavşak, sinyalize dönel kavşak, simülasyon, VISSIM.

ABSTRACT

A New Calculation Procedure for Signalized Roundabouts and Performance Analysis

Roundabout with signals is a common application in many countries. Although it has an emerging trend, design criteria are still ambiguous. On the other hand, performance of these types of intersections can only be measured by a number of simulation programs. Therefore it is an interesting topic for many researchers. In this study, primarily, signalized roundabouts are discussed and in particular, the relationship between the left-turning traffic volume and the intersection storage area and signal timing system is investigated. The effects of intersection design are evaluated regarding to intersection type and phase plans and performance of design is measured by considering delays of intersections. The results show that, alternative intersection types can be preferred instead of roundabout with signals in case of increased left turns.

Keywords: Traffic, intersection, signalized roundabouts, simulation, VISSIM.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11.12.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli - zcakici@pau.edu.tr

2 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli - ysmurat@pau.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürekli artış göstermesi ve buna bağlı olarak tüm dünyada ulaşımı sağlayan taşıt sayısındaki artış, insan hayatını önemli ölçüde kolaylaştırmasına rağmen, birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Trafik kazalarında meydana gelen maddi ve manevi kayıplar, trafik tıkanıklıkları, egzoz emisyonundan dolayı çevreye verilen zararlar, taşıtların sebep olduğu gürültü kirlilikleri vb. durumlar söz konusu problemlerden yalnızca birkaçıdır [1,2,3].

Özellikle trafik tıkanıklığı problemini minimum düzeye indirmek için, farklı tip kavşak uygulamaları ve farklı denetim yöntemleri tercih edilebilmektedir. Son yıllarda tüm dünyada yaygınlaşan kavşak türlerinden birisi de sinyalize dönel kavşaklardır. Sinyalizasyonlu yapısı, trafik akımlarının geçiş düzeni ve geçiş sırası dikkate alındığında sinyalize kavşakları andıran sinyalize dönel kavşakların uygulanmasının öncelikli sebebi, kavşak kollarındaki trafik hacimlerinin ve gecikmelerin artmasıdır. Ülkemizde bu sebeplere ek olarak, sürücülerin dönel kavşakta geçiş önceliği kuralına uymaması da diğer bir gerekçe olarak söylenebilir. Bu uygulama ile dönel kavşaklarda ada etrafında sirküle olan akım ile yaklaşım kollarındaki akımların birbirleri ile olası çakışmaları minimum düzeye iner ve kaza olasılığı ortadan kalkar [4]. Kısacası, sinyalize dönel kavşak uygulaması ile kavşaktaki trafik güvenliğinin tam anlamıyla sağlanması amaçlanmaktadır.

Sinyalize dönel kavşaklarda taşıt depolama alanının yeterli olup olmaması, bu tip kavşaklarda uygulanan değişik faz planlarının ve sinyal sürelerinin kavşak performansı bakımından uygunluğu gibi konular tasarımcının aklına gelebilecek en temel sorulardır [5]. Sinyalize dönel kavşakların geometrik standartlara uygun olmaması, ada etrafında ve yaklaşım kollarında bulunan sinyalizasyon sistemlerinin sinyal süresi atamalarının kavşaktaki trafik durumuna uygun olarak yapılmaması, sinyalizasyon sistemi için belirlenen faz planının trafiğin durumuna aykırı olması gibi durumlar bu tip kavşakların performansını önemli düzeyde azaltmaktadır [4]. Bu yüzden hem geometrik açıdan hem de sinyalizasyon sistemi açısından doğru bir tasarım, kavşak performansının istenilen ve beklenen düzeyde olmasında etkin bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, sinyalize dönel kavşaklar için bir hesap önerisi geliştirmek ve sola dönüşlerin farklı oranları için, sinyalize dönel kavşaklardaki kontrol parametrelerinin (sinyal süreleri, faz sayısı, faz planları vb.) kavşak performansı üzerindeki etkilerini belirlemektir.

Çalışmanın devam eden ilk bölümünde sinyalize dönel kavşaklar tanıtarak geliştirilen hesap yaklaşımı anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, analizlerde baz alınan gecikme performans parametresi detaylı olarak anlatılırken, dördüncü bölümde ise oluşturulan farklı trafik senaryoları ile SIDRA INTERSECTION ve VISSIM simülasyon programı kullanılarak farklı tip kavşaklar için yapılan analizler verilmiştir. Beşinci bölümde, sinyalize dönel kavşak analizleri sonuçları diğer farklı tip kavşak analizleri sonuçları ile karşılaştırılmış, son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve bulgular yorumlanmış ve değerlendirilmiştir.

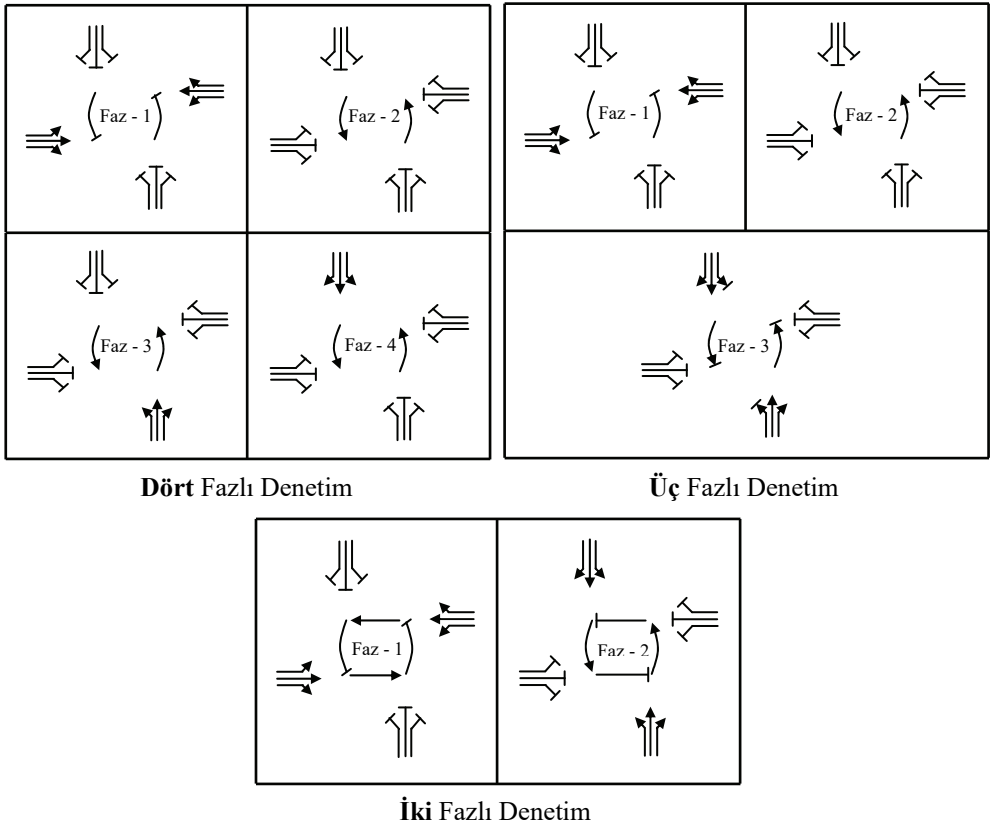
2. SİNYALİZE DÖNEL KAVŞAKLAR VE HESAP ÖNERİSİ

Sinyalize dönel kavşaklar, hem kavşak yaklaşım kollarında hem de merkez ada etrafındaki bazı noktalarda sinyalizasyon sistemlerinin bulunduğu ve trafik akımlarının kavşaktan geçiş

önceliğinin söz konusu sinyalizasyon sistemleri ile belirlendiği eşdüzey kavşaklardır. Sinyalize kavşakların ve dönel kavşakların kombinasyonu sonucu ortaya çıkan sinyalize dönel kavşaklar, genellikle trafik talebinin artışı nedeniyle veya trafik kültürünün sürücüler üzerinde tam anlamıyla yerleşmediği ülkelerde kavşağı trafik kurallarına göre kullanamama nedeniyle kavşak kapasitesinden yararlanılmadığı durumlarda karşımıza çıkmaktadırlar.

Ülkemizde de hem şehir içi hem de şehirlerarası karayolu ağlarında sayıları günden güne büyük bir hızla artan sinyalize dönel kavşakların tasarımlarının öncelikli amacı, dönel kavşakta sirküle olan trafik akımları ile kavşağı giriş yapacak olan trafik akımlarının kesişmelerini önlemek ve böylece kavşakta meydana gelebilecek olası kaza riskini minimum düzeye indirmektir [4].

Sinyalize dönel kavşaklardaki trafik yönetimi genellikle iki, üç veya dört fazlı olarak gerçekleştirilmektedir [5]. Şekil 1’ de sinyalize dönel kavşak denetiminde uygulanan faz planları detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 1. Sinyalize dönel kavşaklarda uygulanan faz planları

Dönel kavşakların ve sinyalize dönel kavşakların tasarımı ve işletilmesi aşamasında tasarımcının bazı faktörleri kesinlikle göz önünde bulundurması gerekmektedir. Kavşağın geometrik özellikleri, kavşağın geometrik elemanlarının standartlara uygun olup olmadığı, kavşak yaklaşım kollarındaki saatlik trafik hacimleri, kavşak yaklaşım kollarındaki saatlik sola dönüş hareketi yapan trafik hacimleri, sola dönüşlerde depolama yapılacak ise depolama alanının yeterli olup olmadığı, fazlara ait sinyal sürelerinin yeterli ve etkin olup olmadığı tasarımcı tarafından dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir [6].

Sinyalize dönel kavşakların tasarımı ve işletilmesi ile ilgili en önemli konulardan birisi de kavşaktaki sinyalizasyon sisteminin sinyal sürelerinin atanmasıdır [7,8]. Sinyalize dönel kavşaklar için, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesini minimize edecek şekilde optimum sinyal süresi ataması yapan veya sinyalizasyon sistemi için tanımlanmış devre süresini, kavşak yaklaşım kolları ve merkez ada etrafında bulunan trafiğin yoğunluğuna göre dağıtan herhangi bir yazılım bulunmamaktadır.

Trafiğin taşıt depolaması sistemi ile yönetildiği sinyalize dönel kavşaklarda, sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtların depolandığı, dönel kavşaktaki sirkülasyon şeritlerini kapsayan depolama alanı belirli özelliklere sahip olmalıdır. Bununla birlikte, depolama alanının boyutlarının uygun ve mantıklı bir şekilde belirlenmesi, kavşaktaki trafiğin düzenli bir şekilde akışını sağlamak için gerekli olan en önemli unsurlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Dönel kavşaklardaki depolama alanının uygun olup olmadığının tespit edilebilmesi için, öncelikli olarak kavşak yaklaşım kollarından sola dönüş hareketi yapacak olan saatlik taşıt hacimlerinin ve bu taşıtların tür ve oranlarının yaklaşık olarak bilinmesi gerekmektedir. Tasarım aşamasında, ağır taşıtların kapladığı alanın, normal taşıtlara kıyasla çok daha fazla olduğu unutulmamalı ve tasarımlarda sola dönüşlerdeki taşıt kompozisyonları kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır [9].

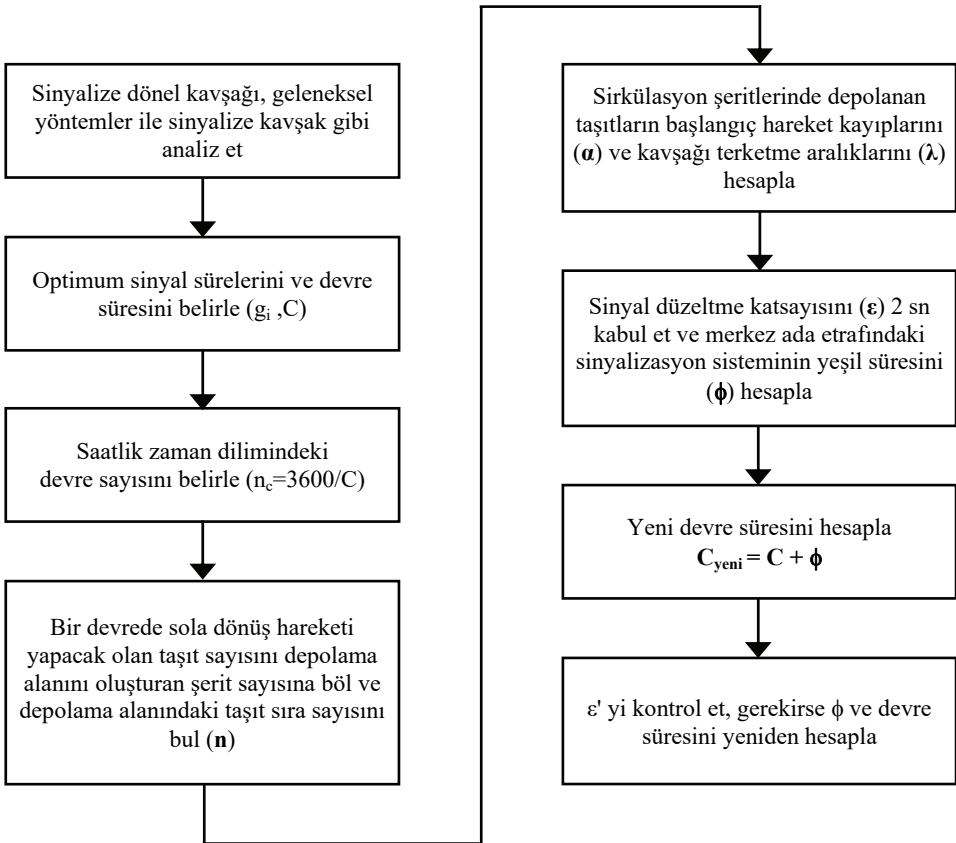
Trafiğin taşıt depolaması sistemi ile yönetildiği kavşaklarda, sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtlar, aynı yaklaşım kolunda bulunan ve düz gidecek olan taşıtların hareketlerini önemli ölçüde kısıtlamakta ve bununla birlikte kavşak yaklaşım kolunun en sol şeridinin kavşaktaki taşıt trafiğine hizmet etmesini engellemektedirler. Bu durum trafik kazası olasılığını arttırdığı gibi, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin artmasında da büyük bir rol oynamaktadır.

Sinyalize dönel kavşaklarda da gelişigüzel ve kavşaktaki mevcut trafik koşulları dikkate alınmaksızın özensizce yapılan süre atamaları, hem kavşak yaklaşım kollarında hem de merkez ada etrafında bulunan taşıtların kavşakta çok fazla zaman kaybetmelerine sebep olabilmektedir. Bu durum, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesini arttırdığı gibi, kavşak kapasitesinin azalmasına ve bir süre sonra kavşaktaki trafiğin tıkanmasına yol açmaktadır [8]. Bu yüzden hem yaklaşım kollarında hem de kavşaktaki merkez ada etrafında bulunan sinyalizasyon sistemlerinin sinyal sürelerinin doğru ve uygun bir şekilde atanması kavşak performansı açısından oldukça büyük bir önem teşkil etmektedir. SIDRA INTERSECTION, TRANSYT vb. paket programlar ile sinyalize dönel kavşak performans analizi ve sinyal süreleri tayini yapılamamaktadır. VISSIM ve AIMSUN trafik simülasyon programları ile ise sinyalize dönel kavşaklar için performans analizi yapılabilmesine rağmen, sinyalizasyon sistemi için sinyal süresi atamaları ve optimum devre süresinin belirlenebilmesi mümkün değildir.

Mevcut yazılımlar ile sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi tayini ve sinyal süresi optimizasyonu yapılamadığı için, bu çalışmada sinyalize dönel kavşakların sinyal süresinin doğru tayini amacı ile yeni bir yaklaşım önerilmektedir [5].

Sinyalize dönel kavşak tasarımında en önemli noktalardan birisi de taşıt depolama alanındaki sinyal sürelerinin belirlenmesidir. Gelişigüzel ve kavşaktaki mevcut trafik koşulları dikkate alınmaksızın belirlenen sinyal süreleri, hem kavşak yaklaşım kollarında hem de merkez ada etrafında bulunan taşıtların kavşakta uzun süre beklemelerine sebep olabilmektedir.

Mevcut paket programlar (SIDRA INTERSECTION, TRANSYT vb.) ile sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süreleri tayini ve optimizasyonu yapılamadığı için, çalışma kapsamında yeni bir sinyal süre hesabı yaklaşımı geliştirilmiş ve aşamaları Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Sinyalize dönel kavşaklar için geliştirilen sinyal süresi hesabı yaklaşımı adımları

Şekil 2' deki akış diyagramından yola çıkarak, merkez ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süresi, Çakıcı (2014) tarafından geliştirilen Denklem 1 ile kolayca hesaplanabilmektedir.

$$\phi = \alpha + [(n - 1) \times \lambda] + \varepsilon \quad (1)$$

Burada;

ϕ , merkez ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süresini (sn); α , sinyalizasyon sisteminin ön kısmındaki taşıtların başlangıç hareket kayıplarını (sn); n , depolama alanındaki taşıt sıra sayısını; λ , taşıtların kavşağı terketme aralığını (sn); ε , sinyal düzeltme katsayısını (sn) temsil etmektedir.

α ile temsil edilen başlangıç hareket kaybı parametresi, sinyal sisteminin kırmızıdan yeşile dönmesiyle kuyrukta bekleyen taşıtların harekete başlaması için geçen zamanı ifade eder. Gözlem yoluyla ilgili kavşak için doğru biçimde elde edilebilir.

n , depolama alanındaki taşıt sıra sayısı, doğrudan ada etrafındaki sinyal süresini etkileyebilecek ana parametredir. Yaklaşım kolundan sola dönen taşıt sayısı, depolama alanındaki şerit sayısı ve saatlik devre sayısı ile ilişkilidir. Bu parametrenin hesaplanması için aşağıda ifade edilen 2 numaralı denklem kullanılabilir.

$$n = \frac{q_L}{n_C \times n_{SL}} \quad (2)$$

Burada;

q_L , sola dönen trafik hacmini (taşıt/saat); n_C , saatlik zaman dilimindeki devre sayısını ($n_C = 3600/C$); n_{SL} , depolama alanındaki şerit sayısını ifade etmektedir.

λ , taşıtın kavşağı terketme aralığı, başlangıç kaybı sonrasında gözlem yoluyla doğrudan ölçülerek elde edilmelidir. Hesaplama kolaylık açısından 2.0 – 2.5 sn civarında ortalama bir değer kabul edilebilir.

ε , sinyal düzeltme katsayısıdır. Bu katsayı, hesap yaklaşımındaki bir öngörüye dayanarak eklenmiştir. Tasarımda ilk olarak, Şekil 2' de gösterildiği üzere, orta adadaki depolama durumu dikkate alınmadan bir devre süresi hesaplanmakta, daha sonra Denklem 1' e göre hesaplanan süre devre süresine eklenerek kavşağın yeni devre süresi belirlenmektedir. Bu durumda yeni devre süresi ilk devre süresinden fazla olmakta ve saatteki devre sayısı (n_C) azalmaktadır. Saatteki devre sayısının azalması ise taşıt sıra sayısının (n) artmasına neden olmakta ve neticede başlangıçtaki duruma göre, ada etrafındaki taşıtların depolama alanını terk edebilmesi için ilave süre ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunu karşılamak amacıyla ε sinyal düzeltme katsayısı denklemde kullanılmıştır. Bu katsayının hesabı için aşağıda verilen 3 numaralı denklem kullanılabilir.

$$n = \left[\frac{q_L}{n_{Cek} \times n_{SL}} \right] \times 2 \quad (3)$$

Burada n_{Cek} , devre süresi artışından kaynaklanan ve saatlik olarak azalan ek devre sayısını ifade etmekte ve $n_{Cek} = (3600/C_{yeni} - C)$ bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Hesaplama ilk olarak kolaylık açısından ε , 2.0 sn atanmakta, yeni devre süresi hesaplandıktan sonra 3 numaralı denklem ile yeterliliği kontrol edilerek gerekirse arttırılmaktadır. ε ' nin arttırılması halinde, merkez ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süresi (ϕ) ve devre süresi (C) yeniden hesaplanarak, sinyal süresi hesabı süreci sonuçlandırılmaktadır.

Çalışma kapsamında önerilen sinyal süresi hesabı yaklaşımının geçerliliğinin araştırılması amacıyla depolama şerit sayısının 2 ve 3 şerit olduğu ve sola dönüş hacimlerinin arttırılıp azaltıldığı 100 farklı örnek durum oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı örnek durumlar öncelikli olarak, Denizli kentinde bulunan bir sinyalizasyon dönel kavşağına (4 fazlı denetim uygulanan – Şekil 1) ait olan mevcut sinyal süreleri kullanılarak daha sonra ise Çakıcı (2014) tarafından önerilen sinyal süresi hesabı yaklaşımı dikkate alınarak VISSIM simülasyon programı ile analiz edilmiştir. Analizlerde performans kriteri olarak ortalama taşıt gecikmesi baz alınmıştır [10].

Tablo 1. Önerilen sinyal süresi hesabı yaklaşımı ile ortalama gecikmenin azaltılabildiği bazı örnek durumlar için trafik hacimleri ve sola dönüş hacimleri

| Örnek Durum | D.Ş.S | Toplam Trafik Hacmi (ta/sa) | Doğu Yaklaşım Kolu | Batı Yaklaşım Kolu | Kuzey Yaklaşım Kolu | Güney Yaklaşım Kolu |
|-------------|-------|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | Y.K.H-S.D.H (ta/sa) | Y.K.H-S.D.H (ta/sa) | Y.K.H-S.D.H (ta/sa) | Y.K.H-S.D.H (ta/sa) |
| 1 | 2 | 2180 | 959 - 383 | 803 - 321 | 279 - 28 | 139 - 14 |
| 2 | 3 | 2180 | 959 - 383 | 803 - 321 | 279 - 167 | 139 - 83 |
| 3 | 2 | 3354 | 1598 - 320 | 1339 - 268 | 279 - 28 | 139 - 14 |
| 4 | 3 | 2767 | 1278 - 383 | 1071 - 321 | 279 - 28 | 139 - 14 |
| 5 | 2 | 3354 | 1598 - 320 | 1339 - 268 | 279 - 167 | 139 - 83 |
| 6 | 3 | 3354 | 1598 - 320 | 1339 - 268 | 279 - 167 | 139 - 83 |
| 7 | 2 | 3942 | 1917 - 192 | 1607 - 161 | 279 - 167 | 139 - 83 |
| 8 | 3 | 3942 | 1917 - 192 | 1607 - 161 | 279 - 167 | 139 - 83 |
| 9 | 2 | 1962 | 861 - 431 | 631 - 316 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 10 | 3 | 1962 | 861 - 431 | 631 - 316 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 11 | 2 | 2708 | 1292 - 387 | 947 - 284 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 12 | 3 | 2708 | 1292 - 387 | 947 - 284 | 320 - 192 | 150 - 90 |
| 13 | 2 | 2708 | 1292 - 387 | 947 - 284 | 320 - 192 | 150 - 90 |
| 14 | 3 | 3454 | 1722 - 344 | 1262 - 252 | 320 - 192 | 150 - 90 |
| 15 | 2 | 4200 | 2153 - 215 | 1578 - 158 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 16 | 3 | 4946 | 2583 - 258 | 1893 - 189 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 17 | 2 | 4946 | 2583 - 258 | 1893 - 189 | 320 - 32 | 150 - 15 |
| 18 | 3 | 4946 | 2583 - 258 | 1893 - 189 | 320 - 192 | 150 - 90 |

Y.K.H: Yaklaşım Kolu Hacmi
S.D.H: Sola Dönüş Hacmi
D.Ş.S: Depolama Şerit Sayısı

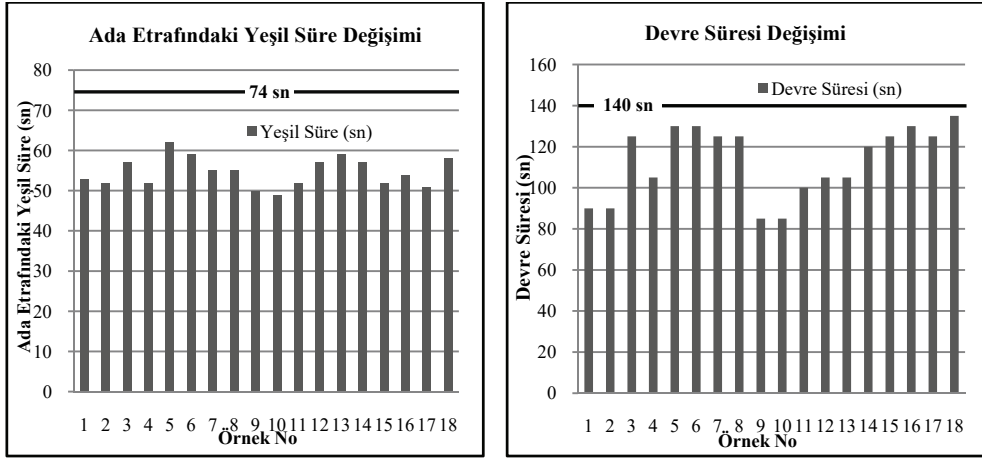
Tablo 2. Örnek durumlara ait iyileştirilmiş sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

| Örnek Durum | Mevcut Sinyal Süreleri (sn) | İyileştirilmiş Sinyal Süreleri (sn) | | | | Devre Süreleri (sn) | | Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta) | |
|-------------|---|-------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| | | Doğu – Batı Yeşil Süre (sn) | Ada Yeşil Süre (sn) | Kuzey Yeşil Süre (sn) | Güney Yeşil Süre (sn) | Mevcut Durum | İyileştirilmiş Durum | Mevcut Durum | İyileştirilmiş Durum |
| 1 | Doğu – Batı Yeşil Süre: 40 – 50 Ada Yeşil Süre: 74 Kuzey Yeşil Süre: 20 Güney Yeşil Süre: 23 | 17 – 21 | 53 | 12 | 8 | 140 | 90 | * | 51.54 |
| 2 | | 18 – 22 | 52 | 13 | 9 | 140 | 90 | 140.38 | 71.40 |
| 3 | | 43 – 52 | 57 | 15 | 9 | 140 | 125 | 143.03 | 111.44 |
| 4 | | 33 – 37 | 52 | 12 | 9 | 140 | 105 | 132.51 | 98.56 |
| 5 | | 43 – 52 | 62 | 18 | 11 | 140 | 130 | * | 116.66 |
| 6 | | 47 – 55 | 59 | 16 | 11 | 140 | 130 | 120.31 | 102.35 |
| 7 | | 46 – 54 | 55 | 16 | 11 | 140 | 125 | 136.64 | 55.96 |
| 8 | | 45 – 54 | 55 | 16 | 11 | 140 | 125 | 124.38 | 81.73 |
| 9 | | 14 – 19 | 50 | 12 | 9 | 140 | 85 | 154.48 | 47.72 |
| 10 | | 16 – 20 | 49 | 10 | 8 | 140 | 85 | 165.51 | 76.49 |
| 11 | | 25 – 32 | 52 | 12 | 8 | 140 | 100 | 151.57 | 72.27 |
| 12 | | 25 – 32 | 57 | 15 | 11 | 140 | 105 | 141.19 | 114.78 |
| 13 | | 23 – 30 | 59 | 16 | 11 | 140 | 105 | * | 116.91 |
| 14 | | 39 – 47 | 57 | 15 | 11 | 140 | 120 | 126.51 | 102.96 |
| 15 | | 42 – 57 | 52 | 13 | 8 | 140 | 125 | 129.81 | 77.07 |
| 16 | | 45 – 60 | 54 | 14 | 9 | 140 | 130 | 145.88 | 88.87 |
| 17 | | 43 – 58 | 51 | 11 | 8 | 140 | 125 | 146.07 | 112.92 |
| 18 | | 46 – 61 | 58 | 16 | 11 | 140 | 135 | 150.13 | 109.45 |

*: Ortalama taşıt gecikmesi > 250 sn/ta
Ortak kırmızı süre: 4+4=8 sn
Sarı Süre: 2+2=4 sn (Her fazın başlangıcında ve bitişinde)

Tablo 1’ de, önerilen sinyal süresi yaklaşımı ile ortalama taşıt gecikmesinin azaltılabildiği bazı örnek durumlara ait kavşak yaklaşım kolu bazlı trafik hacimleri ve sola dönüş hacimleri verilmektedir. Tablo 2’ de ise aynı örnek durumlara ait mevcut ve iyileştirilmiş sinyal süreleri ile ortalama taşıt gecikmeleri verilmiştir.

Tablo 2’ den görüldüğü üzere, kavşaktaki mevcut devre süresi 140 sn ve merkez ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süresi 74 sn’ dir. Fakat bu değerler Denklem 1 ile yapılan hesaplamalar sonucunda değişmiştir. Şekil 3’ de örnek durumlar için, merkez ada etrafındaki yeşil sinyal süresi ve devre süresinin değişimi gösterilmiştir. Yeni yapılan hesaplamalar sonucunda, ortalama taşıt gecikmelerinde %50 ve üzerinde iyileşmeler sağlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3. Örnek durumlar için ada etrafındaki yeşil sinyal süresi ve devre süresi değişimi

Tablo 2 ve Şekil 3’ de sunulan sonuçlara göre, çalışma kapsamında ada etrafındaki trafik akımları için önerilen sinyal süresi hesap yaklaşımının hem ortalama taşıt gecikmelerinde hem de sinyal sürelerinde olumlu katkı sağlayabileceği anlaşılmış ve genel kullanım açısından geçerli olabileceği çıkarımı yapılmıştır.

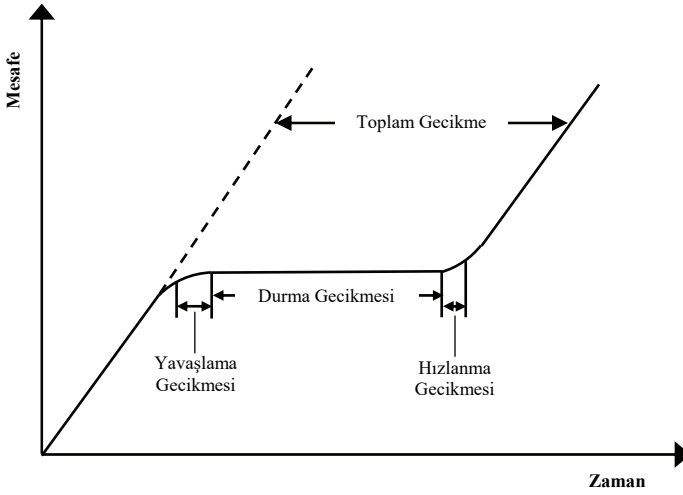
3. PERFORMANS PARAMETRESİ – GECİKME

Gecikme kavşağa yaklaşan taşıtların, diğer taşıtlar, kavşağın geometrik özellikleri, trafik işaretleri, sinyalizasyon sistemleri vb. nedenlerden dolayı kavşakta kaybettiği zaman olarak tanımlanmaktadır. Gecikme, sinyalizasyon kavşaklarının performansının ve hizmet düzeyinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir performans parametresidir.

Taşıt gecikmesinin tam olarak tahmin edilebilmesi amacı ile çeşitli hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Webster, Akçelik ve Transportation Research Board (Highway Capacity Manual) yöntemleri gecikme hesabında kullanılan en yaygın yöntemlerdir.

Kavşaklarda yanlış veya eksik yapılan gecikme ölçümleri, kavşaktaki sinyal sürelerinin doğru ve etkin bir şekilde atanamamasına neden olduğu gibi, uygun olmayan kavşak tasarımı sorununu da beraberinde getirmektedir. Ölçümlerin hassasiyetle ve dikkatle yapılması, doğru kavşak tasarımının öncelikli şartıdır [11].

Sinyalize kavşaklardaki taşıt gecikmeleri; yavaşlama, durma ve hızlanma gecikmesi olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır [12]. Yavaşlama gecikmesi, kavşağa yaklaşan taşıt sürücüsünün yaklaşım kolundaki sinyalizasyon sisteminden dolayı hızını yavaşlatmaya başladığı andan itibaren, sinyalizasyon sistemi nedeni ile (kırmızı ışıktan dolayı) durmaya (beklemeye) başladığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Durma gecikmesi, taşıtın sinyalize kavşakta kırmızı veya yeşil ışık süresince durmasından dolayı kaybettiği zaman olarak tanımlanırken, hızlanma gecikmesi ise sinyalizasyon sistemi kırmızıdan yeşile döndükten sonra taşıtın tekrar hızlanması için gerekli olan süre olarak belirtilmektedir. Şekil 4’de sinyalize kavşak yaklaşım kolundaki bir taşıtın yörünge diyagramı ve gecikme bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4. Sinyalize kavşak yaklaşım kolundaki bir taşıtın yörünge diyagramı

Sinyalize kavşaklarda gecikme tahmini zor olduğu için, yıllardır bu konu üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Akçelik [13], 1985 HCM gecikme formülünü incelemiş ve bu formülün kalibrasyonunu yaparak formül üzerinde gelişmeler sağlamıştır. Özdemir [14], sinyal optimizasyonu konusu üzerinde çalışmış ve sinyal optimizasyonu ile izole sinyalize kavşaklardaki taşıt gecikmelerinin büyük oranda azaltılabileceği sonucuna ulaşmıştır. Akgüngör [15], yapmış olduğu çalışmada, farklı analiz süresi periyodlarını göz önünde bulundurarak, zamana bağlı yeni bir gecikme hesabı yöntemi üzerine yoğunlaşmıştır. Murat [16] ve Murat ve Baskan [17], yapay sinir ağları ve bulanık mantık tekniğini kullanarak, ayrıca sinyal parametrelerini inceleyerek taşıt gecikmeleri üzerine çalışma yapmıştır.

Bu çalışmada da performans kriteri olarak ortalama taşıt gecikmesi dikkate alınmış ve oluşturulan senaryolar arasındaki karşılaştırmalar söz konusu performans kriteri baz alınarak yapılmıştır.

4. OLUŞTURULAN SENARYOLAR VE ANALİZLER

Çalışma kapsamında, yaklaşım kollarından farklı sola dönüş oranlarını içeren 12 farklı trafik senaryosu dikkate alınarak, sinyalize dönel kavşakların performansları, diğer farklı tip kavşaklar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı tip kavşaklar üzerinde, farklı faz düzenleri uygulanarak, faz düzenlerinin ve faz sayılarının ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda incelenen 8 farklı durum şu şekildedir:

- Dönel Kavşak
- Sinyalize Dönel Kavşak (2 faz)
- Sinyalize Dönel Kavşak (3 faz)
- Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak (3 faz)
- Sinyalize Kavşak (3 faz)
- Sinyalize Dönel Kavşak (4 faz)
- Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak (4 faz)
- Sinyalize Kavşak (4 faz)

Analiz aşamasında dikkate alınan on iki farklı senaryoya ait kavşak yaklaşım kolu bazlı sola dönüş oranları Tablo 3’ de verilmektedir.

Tablo 3. On iki farklı senaryoya ait kavşak yaklaşım kolu bazlı sola dönüş oranları

| Senaryo No | Doğu Kolu | Batı Kolu | Kuzey Kolu | Güney Kolu |
|------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1 | %5 | %5 | %5 | %5 |
| 2 | %5 | %5 | %30 | %30 |
| 3 | %10 | %10 | %5 | %5 |
| 4 | %10 | %10 | %30 | %30 |
| 5 | %15 | %15 | %5 | %5 |
| 6 | %15 | %15 | %30 | %30 |
| 7 | %20 | %20 | %5 | %5 |
| 8 | %20 | %20 | %30 | %30 |
| 9 | %25 | %25 | %5 | %5 |
| 10 | %25 | %25 | %30 | %30 |
| 11 | %30 | %30 | %5 | %5 |
| 12 | %30 | %30 | %30 | %30 |

6. senaryoya ait (örnek) kavşak yaklaşım kolu bazlı trafik hacimleri ise Tablo 4’ de detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 4. 6. Senaryoya ait kavşak yaklaşım kolu bazlı trafik hacimleri

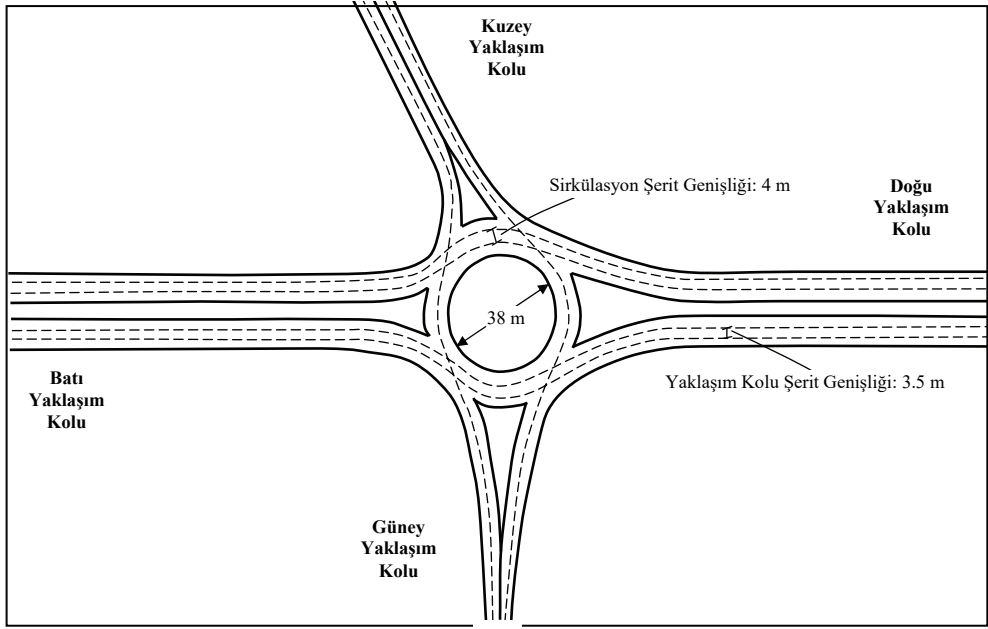
| Ana Akım Sola Dönüş Oranı: %15 Diğer Akımlar Sola Dönüş Oranı: %30 | Otomobil - Düz Giden (ta/sa) | | | | Ağır Taşıt - Düz Giden (ta/sa) | | | | Toplam Taşıt - Düz Giden (ta/sa) | | | | | | |
|---|----------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|------------------------------------|---|----|--------------------------------------|--------------------------------------|----|------|----|-----|-----|-----|
| | | B | D | K | G | | B | D | K | G | | B | D | K | G |
| | B | | 800 | | | B | | 99 | | | B | | 899 | | |
| | D | 935 | | | | D | 81 | | | D | 1016 | | | | |
| | K | | | | 132 | K | | | | 15 | K | | | | 146 |
| | G | | | 60 | | G | | | 2 | | G | | | 62 | |
| | Otomobil - Sağa Dönen (ta/sa) | | | | Ağır Taşıt - Sağa Dönen (ta/sa) | | | | Toplam Taşıt - Sağa Dönen (ta/sa) | | | | | | |
| | | B | D | K | G | | B | D | K | G | | B | D | K | G |
| | B | | | | 11 | B | | | | 0 | B | | | | 11 |
| | D | | | 66 | | D | | | 4 | | D | | | 70 | |
| K | 49 | | | | K | 0 | | | | K | 49 | | | | |
| G | | 35 | | | G | | 0 | | | G | | 35 | | | |
| Otomobil - Sola Dönen (ta/sa) | | | | Ağır Taşıt - Sola Dönen (ta/sa) | | | | Toplam Taşıt - Sola Dönen (ta/sa) | | | | | | | |
| | B | D | K | G | | B | D | K | G | | B | D | K | G | |
| B | | | 129 | | B | | | 32 | | B | | | 161 | | |
| D | | | | 153 | D | | | | 38 | D | | | | 192 | |
| K | | 67 | | | K | | 17 | | | K | | 84 | | | |
| G | 33 | | | | G | 8 | | | | G | 42 | | | | |
| Toplam Otomobil Sayısı: 2470 | | | | Toplam Ağır Taşıt Sayısı: 297 | | | | Toplam Taşıt Sayısı: 2767 | | | | | | | |

Çalışmada VISSIM trafik simülasyon programı kullanılmış, on iki farklı trafik senaryosu ve sekiz farklı durum için kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi değerleri elde edilmiştir. VISSIM programında taşıt gelişlerinin poisson dağılımına uyduğu kabul edilmektedir [18]. Genel olarak trafik akımlarının simülasyon modellemesinde bu kabulün geçerli olduğu bilinmektedir [5,6]. VISSIM programında ortalama gecikme değeri, toplam gecikmenin araç sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. VISSIM simülasyon programının arazideki gerçek durumu yansıtıp yansıtmadığını belirlemek amacı ile birçok çalışma yapılmış [5,19,20] ve programın arazideki durumu yeterince temsil edebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, VISSIM programı farklı kavşaklardaki trafik akımlarının gecikme modellenmesinde kullanılmıştır. Tüm alternatifler aynı ortamda benzetildiği için, programın hata değerinin yüksek bulunması durumunda dahi, bu durumun birbirleriyle karşılaştırmaya yansımayaacağı görüşü nedeniyle modelde herhangi bir kalibrasyon yapılmamıştır. Bu bulgulara dayanarak, VISSIM yazılımının çalışma kapsamında kullanımına karar verilmiştir.

4.1. Dönel Kavşak Analizleri

Dönel kavşak analizleri için, geometrik yapısı standartlara ve modellemeye uygun olduğundan Avustralya' dan örnek bir kavşak seçilmiştir. Şekil 5' de gösterilen bu kavşağın batı ve doğu yaklaşım kolları 3.5' er metre genişliğinde 3+3 şeritten, diğer yaklaşım kolları ise aynı şekilde 3.5' er metre genişliğinde 2+2 şeritten oluşmaktadır. Kavşaktaki sirkülasyon şeridi sayısı 2' dir ve ve bu şeritlerin herbirinin genişliği 4.0 metredir.

Oluşturulan senaryolar için, VISSIM simülasyon programında yapılan analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ise Tablo 5’ de verilmektedir.



Şekil 5. Dönel kavşak geometrisi

Tablo 5. On iki farklı trafik senaryosuna ait dönel kavşak analizi sonuçları

| Senaryo No | Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta) | Senaryo No | Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 1 | 3.30 | 7 | 5.38 |
| 2 | 3.70 | 8 | 5.78 |
| 3 | 4.10 | 9 | 6.57 |
| 4 | 4.27 | 10 | 6.92 |
| 5 | 4.41 | 11 | 7.22 |
| 6 | 4.90 | 12 | 7.90 |

Tablo 5’ den görüldüğü üzere, ana akımdaki ve diğer yaklaşım kollarındaki taşıtların sola dönüş oranı arttıkça kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri de artmaktadır.

4.2. Sinyalize Kavşak Analizleri

Kavşak yaklaşım kollarının geometrik özellikleri dikkate alındığında, seçilen dönel kavşak ile aynı geometrik özelliklere sahip olan sinyalize kavşak uygulaması, oluşturulan on iki

farklı trafik senaryosu için, öncelikli olarak dört fazlı denetim şekli, sonraki aşamada ise üç fazlı denetim şekli dikkate alınarak incelenmiştir.

VISSIM simülasyon programı [21] ile sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi optimizasyonu yapılamadığı için, bu süreçte SIDRA INTERSECTION programı [22] kullanılmış, SIDRA INTERSECTION programı ile elde edilen süreler VISSIM simülasyon programına aktarılarak, farklı sola dönüş oranlarına sahip senaryolar, VISSIM simülasyon programında analiz edilmiştir.

Dört fazlı denetim ile her bir kavşak yaklaşım koluna birbirinden farklı zamanlarda geçiş sırası (hakki) verilmiş ve böylece kavşakta meydana gelebilecek kaza olasılığının minimum düzeye indirilmesi amaçlanmıştır. Sinyalize kavşaktaki trafik akımlarını üç fazlı denetlemenin dezavantajları olduğu gibi, bazı avantajları da bulunmaktadır. Aynı trafik koşulları altında, üç fazlı denetimin uygulandığı kavşaklarda, trafik kazası görülme olasılığı dört fazlı denetimin uygulandığı kavşaklara nazaran daha fazla olmasına rağmen, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri dört fazlı denetime göre daha azdır. Ana akımın bulunduğu kavşak yaklaşım kollarındaki taşıtların bekleme ve durma sürelerinin azalması (bekleme ve durma süresi bir faz süresi kadar azalmaktadır) kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin azalmasında önemli bir etkidir.

Sinyalize kavşağın üç ve dört fazlı denetimi durumunda, tüm senaryolar için, devre süreleri ve analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri Tablo 6' da detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 6. Sinyalize kavşağın üç ve dört fazlı denetlenmesi durumunda, senaryolara ait devre süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

| Senaryo No | Sola Dönüş Oranı (Ana akım - Diğer) | Üç Fazlı Denetim | | Dört Fazlı Denetim | |
|------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) |
| 1 | %5 - %5 | 70 | 23.36 | 110 | 38.44 |
| 2 | %5 - %30 | 70 | 24.52 | 110 | 39.60 |
| 3 | %10 - %5 | 70 | 25.68 | 110 | 40.31 |
| 4 | %10 - %30 | 70 | 26.19 | 115 | 41.45 |
| 5 | %15 - %5 | 70 | 26.86 | 115 | 42.21 |
| 6 | %15 - %30 | 70 | 28.47 | 115 | 42.84 |
| 7 | %20 - %5 | 70 | 30.07 | 110 | 45.16 |
| 8 | %20 - %30 | 70 | 30.28 | 115 | 47.28 |
| 9 | %25 - %5 | 70 | 31.46 | 105 | 47.32 |
| 10 | %25 - %30 | 70 | 32.84 | 110 | 49.64 |
| 11 | %30 - %5 | 75 | 35.40 | 105 | 54.14 |
| 12 | %30 - %30 | 70 | 37.39 | 110 | 56.40 |

Tablo 6' dan görüldüğü üzere, aynı trafik hacmi için (kavşaktaki toplam trafik hacmi) sola dönüş oranı arttıkça, ortalama taşıt gecikmesi de artmaktadır. Örneğin dört fazlı denetim için ortalama taşıt gecikmesi, sola dönüşün tüm yaklaşım kollarında %5 oranında olduğu durumda 38.44 sn/ta iken, sola dönüş oranının tüm yaklaşım kollarında %30 olduğu durumda yaklaşık 1.5 kat artarak 56.40 sn/ta olarak elde edilmiştir. Faz sayısının üçe düşürülmesi de devre sürelerinde ve ortalama gecikme sürelerinde önemli bir kazanç sağlamıştır.

4.3. Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak Analizleri

Trafikte, kritik sola dönüş hareketlerinin tehlikeli ve istenmeyen sonuçlar meydana getirmesini önlemek amacı ile uygulanan trafik yönetimi tekniklerinden birisi de sola dönüş cepli kavşak uygulamasıdır. Bu tür kavşaklar sinyalizasyon sistemine gerek duyulmadan tasarlanabildiği gibi, trafiğin yoğun olduğu ve yönetiminin zor hale geldiği durumlarda sinyalizasyon sistemi ile birlikte de tasarlanmaktadır.

Sola dönüş cepli, sola dönüşlerin fazla olduğu akımların bulunduğu kavşak yaklaşım kollarında, trafiğin daha düzenli ve kesintisiz hareketine olanak sağlamak amacı ile tasarlanmakta ve yalnızca sola dönen taşıt trafiğine hizmet etmektedir. Cep uzunluğu, taşıtların güvenli ve konforlu bir biçimde yavaşlamasını sağlayacak şekilde ve sola dönüş hareketi yapacak olan trafik hacmi dikkate alınarak belirlenmelidir [6].

Bu çalışmada, örnek senaryolar için, kavşaktaki yüksek trafik hacimlerinden dolayı, yalnızca sola dönüş cepli sinyalize kavşak uygulaması dikkate alınmıştır. Farklı sola dönüş oranlarına sahip örnek senaryolar için, ana akımın bulunduğu Doğu – Batı yönünde, 75 metre uzunluğunda ve 3.5 metre genişliğinde sola dönüşlere ayrılmış şeride sahip tip kavşak kullanılarak ve çeşitli faz planları göz önünde bulundurularak, ortalama taşıt gecikmeleri tespit edilmiştir.

Sola dönüş cepli sinyalize kavşakların üç ve dört fazlı denetim şekli, cepsiz sinyalize kavşakların üç ve dört fazlı denetimi ile aynıdır. Tablo 7' de sola dönüş cepli sinyalize kavşağın üç ve dört fazlı denetimi durumunda, tüm senaryolar için, devre süreleri ve analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri verilmektedir.

Tablo 7 dikkatle incelendiğinde, kavşak yaklaşım kollarında sola dönüş oranları arttıkça, genel olarak devre süresinin azaldığı ve sekizinci senaryodan sonra devre süresinin sabit bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Devre süresinin başlangıçta yüksek olmasının sebebi, sola dönen taşıt sayısının çok fazla olmamasıdır. Sola dönüş yapan taşıt sayısının çok fazla olmadığı durumlarda, sola dönüşler için ayrılmış olan şerit yeterince kullanılmamakta, kavşak yaklaşım kolundaki taşıtlar sinyalize kavşaklardaki durumlara benzer olarak yaklaşım kolundaki diğer şeritleri kullanmaktadır. Fakat sola dönüş yapan taşıt sayısı arttıkça yaklaşım kolunda sola dönüşler için ayrılmış olan şerit daha fazla kullanılmakta ve kullanılan şerit sayısına bağlı olarak, sinyalizasyon sisteminin optimum devre süresi önemli düzeyde azalmaktadır. Bunun yanı sıra taşıtlar kavşak yaklaşım kolunda daha az bekleyerek, kavşağı daha kısa sürede terketmekte ve buna bağlı olarak da kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi azalan bir eğilim göstermektedir. Üç fazlı yönetilen sola dönüş cepli sinyalize kavşaklarda trafik kazası görülme olasılığı dört fazlı yönetilen sola dönüş cepli sinyalize kavşaklara nazaran daha fazla olsa da, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri

dört fazlı denetime kıyasla daha azdır. Ana akımın bulunduğu (Doğu ve Batı yaklaşım kolu) kavşak yaklaşım kollarındaki taşıtların bekleme ve/veya durma sürelerinin azalması kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin azalmasında önemli bir etkidir.

Tablo 7. Sola dönüş cepli sinyalize kavşağın üç ve dört fazlı denetlenmesi durumunda senaryolara ait devre süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

| Senaryo No | Sola Dönüş Oranı (Ana akım - Diğer) | Üç Fazlı Denetim | | Dört Fazlı Denetim | |
|------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) |
| 1 | %5 - %5 | 70 | 22.61 | 105 | 35.41 |
| 2 | %5 - %30 | 75 | 23.76 | 110 | 36.83 |
| 3 | %10 - %5 | 65 | 21.91 | 100 | 34.07 |
| 4 | %10 - %30 | 70 | 22.12 | 105 | 36.63 |
| 5 | %15 - %5 | 65 | 21.25 | 100 | 33.47 |
| 6 | %15 - %30 | 65 | 21.38 | 95 | 33.29 |
| 7 | %20 - %5 | 65 | 21.43 | 90 | 31.21 |
| 8 | %20 - %30 | 65 | 21.68 | 90 | 32.24 |
| 9 | %25 - %5 | 65 | 21.77 | 80 | 30.29 |
| 10 | %25 - %30 | 65 | 22.15 | 80 | 31.16 |
| 11 | %30 - %5 | 65 | 21.84 | 85 | 30.99 |
| 12 | %30 - %30 | 65 | 22.25 | 80 | 31.95 |

4.4. Sinyalize Dönel Kavşak Analizleri

Çalışma kapsamında, farklı sola dönüş oranlarına sahip örnek senaryolar için ortalama taşıt gecikmeleri, Şekil 5' deki geometriye sahip dönel kavşak kullanılarak ve çeşitli faz planları göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

Sinyalize dönel kavşak uygulamasında faz düzenleri birbirinden bağımsız olan üç farklı durum göz önünde bulundurulmuştur. Sinyalize dönel kavşak iki, üç ve dört fazlı faz planları göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği üzere, sinyalize dönel kavşak sinyal süresi atamasında en önemli unsurlardan birisi, ana akımlardan sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtların geçiş düzeninin ve önceliğinin belirlendiği, ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil sürelerinin optimizasyonudur. Ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süreleri, sola dönüş yapacak olan taşıt hacmi ile paralellik göstermelidir. Sola dönüş hareketinin çok az olduğu durumlarda ada etrafındaki sinyalizasyon sistemlerinde, artan yeşil sürenin olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Artan yeşil süreler, dönüş hareketi yapmayan taşıtların kavşakta daha fazla beklemelerine ve buna bağlı olarak da kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin gereksiz şekilde artmasına sebep olmaktadır. Sola dönüş hareketinin çok

fazla olduğu durumlarda ise sinyal sürelerinin, ada etrafında depolanan taşıtların tamamının kavşağı terkedebilmesi için, ada etrafında depolanan taşıt hacmi dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir.

Mevcut yazılımlar ve paket programlar ile sinyalize dönel kavşak sinyalizasyon sistemi süre ataması yapılamadığı için, bu çalışmada, geliştirilen sinyal süresi hesap yöntemi baz alınarak, sinyalizasyon sistemi için sinyal süresi tayini amaçlanmıştır. Öncelikle SIDRA INTERSECTION programıyla yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerine göre optimum devre ve sinyal süreleri belirlenmiş, daha sonra ada etrafındaki akımlar için Denklem 1'deki hesap yaklaşımı kullanılmıştır. Hesaplanan süreler VISSIM simülasyon programına aktarılarak kavşağın iki, üç ve dört fazlı denetlenmesi halinde, performansı incelenmiştir. Tablo 8' de sinyalize dönel kavşağın iki, üç ve dört fazlı denetimi durumunda, tüm senaryolar için, devre süreleri ve analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri verilmektedir.

Tablo 8. Sinyalize dönel kavşağın iki, üç ve dört fazlı denetlenmesi durumunda senaryolara ait devre süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

| Senaryo No | Sola Dönüş Oranı (Ana akım - Diğer) | İki Fazlı Denetim | | Üç Fazlı Denetim | | Dört Fazlı Denetim | |
|------------|--|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) | Devre Süresi (sn) | Ortalama Gecikme (sn/ta) |
| 1 | %5 - %5 | 55 | 12.56 | 60 | 20.80 | 85 | 37.03 |
| 2 | %5 - %30 | 50 | 13.41 | 65 | 22.29 | 90 | 37.74 |
| 3 | %10 - %5 | 50 | 13.90 | 60 | 21.32 | 85 | 37.31 |
| 4 | %10 - %30 | 45 | 14.60 | 65 | 23.82 | 90 | 39.97 |
| 5 | %15 - %5 | 40 | 17.69 | 60 | 23.00 | 85 | 40.54 |
| 6 | %15 - %30 | 40 | 18.83 | 65 | 24.91 | 90 | 42.01 |
| 7 | %20 - %5 | 45 | 21.09 | 60 | 25.94 | 90 | 45.13 |
| 8 | %20 - %30 | 45 | 21.19 | 65 | 26.95 | 95 | 49.53 |
| 9 | %25 - %5 | 40 | 26.57 | 65 | 28.22 | 90 | 50.20 |
| 10 | %25 - %30 | 45 | 29.35 | 70 | 31.05 | 95 | 65.56 |
| 11 | %30 - %5 | 40 | 35.08 | 70 | 32.51 | 90 | 79.46 |
| 12 | %30 - %30 | 45 | 43.58 | 75 | 35.64 | 95 | 98.72 |

Tablo 8' de, ana akımlarda sola dönüş hareketi yapacak olan taşıt oranı arttıkça devre sürelerinin de artış gösterdiği görülmektedir.

Dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus ise, sola dönüş hareketi yapan taşıt oranının tüm yaklaşım kollarında %30 olduğu durumda kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi büyük oranda artmıştır. Kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin artmasının en büyük sebebi, artan sola dönüş hareketi yapan taşıt hacminden dolayı, merkez ada etrafındaki depolama alanının yetersiz kalması ve buna bağlı olarak özellikle düz giden taşıtların hareketlerinin sola dönüş yapan taşıtlar tarafından engellenmesi ve kesintiye uğratılmasıdır. Ayrıca, Tablo 8' de, sola dönüş hareketi yapan taşıt oranı arttıkça ortalama taşıt gecikmelerinin arttığı görülmektedir. Dört fazlı denetim durumunda, ortalama taşıt gecikmesi, sola dönüş oranının kavşağın tüm yaklaşım kollarında %5 olduğu durumda 37.03 sn/ta iken, %30 olduğu durumda yaklaşık 3 kat artış göstererek 98.72 sn/ta olarak elde edilmiştir.

Tablo 8' deki sonuçlara göre, üç fazlı yönetilen sinyalize dönel kavşağın devre sürelerinin, dört fazlı yönetilen sinyalize dönel kavşağa nazaran daha az olduğu görülmektedir. Üç fazlı denetim tekniği uygulanan sinyalize dönel kavşaktaki yaklaşım kollarının tümünde, sola dönüş hareketi yapan taşıt oranı %5 iken ortalama taşıt gecikmesi 20.99 sn/ta elde edilmiştir. Oran, tüm yaklaşım kollarında %30'a çıkartıldığında ise ortalama taşıt gecikmesi yaklaşık 1.7 kat artarak 35.64 sn/ta olarak elde edilmiştir.

Sinyalize dönel kavşaklarda trafik denetiminin diğer bir yöntemi de iki fazlı uygulamalardır. Bu uygulamada, kavşağın karşılıklı yaklaşım kollarındaki taşıtlara aynı fazda geçiş hakkı verilmektedir. Sola dönüş hareketlerinin her iki fazda da engellendiği bu uygulamada, taşıtların birbirleri ile kesişme olasılığı oldukça düşüktür.

Kavşak yaklaşım kollarındaki sola dönüş oranlarının çok fazla olduğu durumlarda kavşağın iki fazlı denetimi, merkez ada etrafındaki depolama alanının taşıt depolaması için yetersiz kalması nedeniyle uygun bir çözüm olarak görülmemektedir. Böyle durumlarda, kavşağın üç veya daha fazla fazlı yönetilmesi uygundur.

İki fazlı denetimin yapıldığı sinyalize dönel kavşaklarda, aynı örnek senaryolar için devre sürelerinin, hem üç fazlı hem de dört fazlı denetime kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, iki fazlı denetimin uygulanması durumunda, örnek senaryolar için ortalama taşıt gecikmelerinin çoğunun (11. ve 12. Senaryo hariç) hem üç fazlı hem de dört fazlı denetime kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Bu durumda sinyalize dönel kavşakta uygulanacak faz sayısına karar vermek için kritik parametrenin sola dönüş oranı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu aşamada sola dönüş oranının kavşak depolama alanıyla ilişkisinin de önemli bir unsur olduğu unutulmamalıdır.

5. ANALİZ SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMALARI

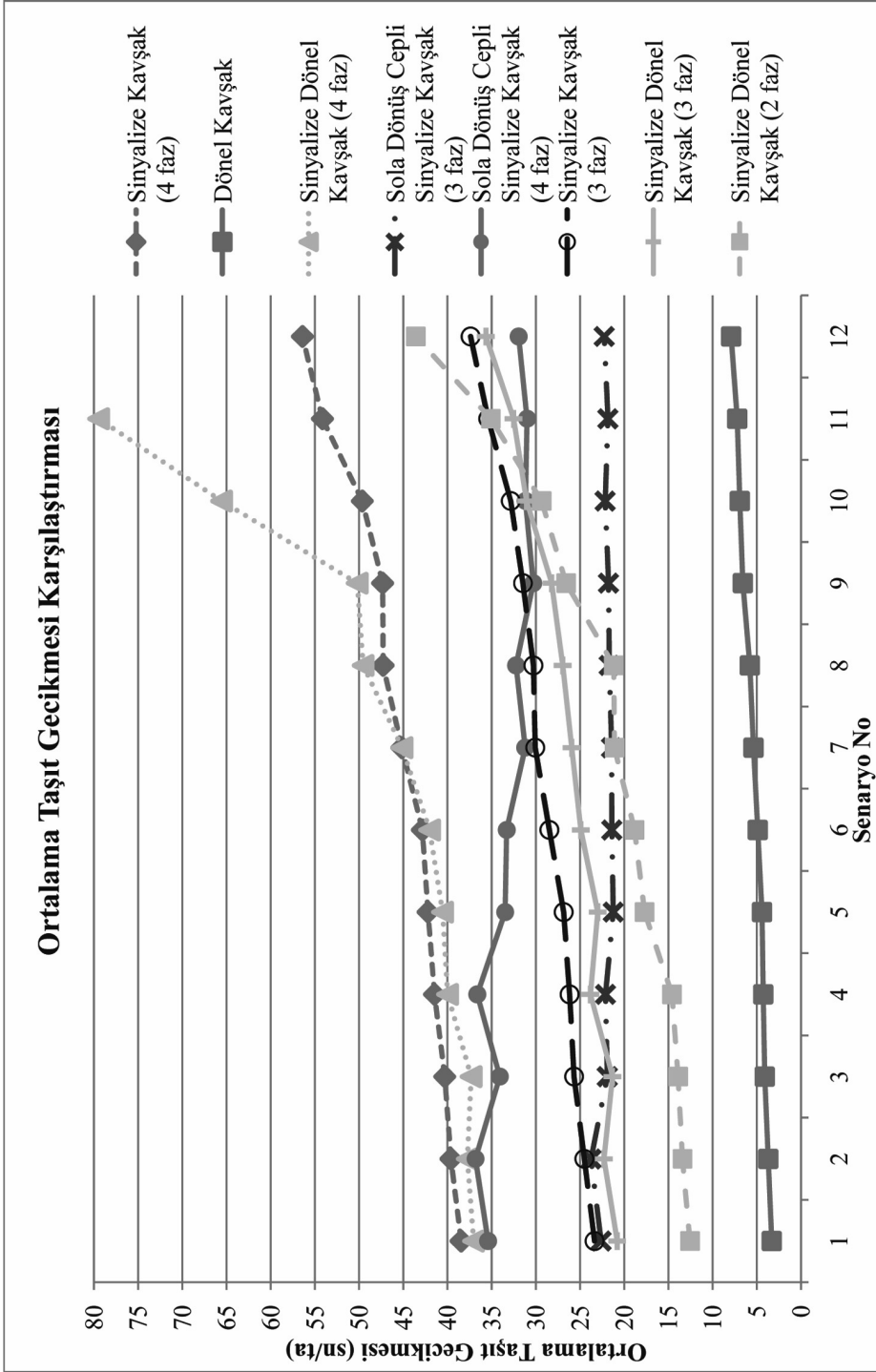
Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip sinyalize dönel kavşaklar, kavşak yaklaşım kollarındaki sola dönüş oranları birbirinden farklı olan 12 adet trafik senaryosu için, ortalama taşıt gecikmesi performans kriteri baz alınarak farklı özelliklere sahip diğer tip kavşaklar ile karşılaştırılmıştır. Böylece, kavşak yaklaşım kollarındaki sola dönüş hareketi oranının farklı tip ve özelliklere sahip kavşakların performansını hangi yönde ve ne derece etkilediği analiz edilmiştir. Çalışma kapsamınca 12 farklı senaryo ve sekiz farklı durum (toplam $12 \times 8 = 96$ adet) incelenmiştir. İncelenen örnek durumlar ve özellikleri şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Dönel Kavşak
2. Sinyalize Kavşak – Dört Fazlı Denetim
3. Sinyalize Kavşak – Üç Fazlı Denetim
4. Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak – Dört Fazlı Denetim
5. Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak – Üç Fazlı Denetim
6. Sinyalize Dönel Kavşak – Dört Fazlı Denetim
7. Sinyalize Dönel Kavşak – Üç Fazlı Denetim
8. Sinyalize Dönel Kavşak – İki Fazlı Denetim

Tablo 9’ da, oniki farklı trafik senaryosu için, yukarıda belirtilen sekiz farklı örnek duruma ait, analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 6’da ise analiz sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırmaları grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 9. On iki farklı senaryo için, farklı örnek durumlara ait analiz sonuçları

| Senaryo No | Sola Dönüş Oranı (%) (Ana Akım - Diğer) | Dönel Kavşak (sn/ta) | Sinyalize Dönel Kavşak - 2 faz (sn/ta) | Sinyalize Dönel Kavşak - 3 faz (sn/ta) | Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak - 3 faz (sn/ta) | Sinyalize Kavşak - 3 faz (sn/ta) | Sola Dönüş Cepli Sinyalize Kavşak - 4 faz (sn/ta) | Sinyalize Dönel Kavşak - 4 faz (sn/ta) | Sinyalize Kavşak - 4 faz (sn/ta) |
|------------|--|-------------------------|--|--|---|--|---|--|--|
| 1 | %5 – %5 | 3.30 | 12.56 | 20.80 | 22.61 | 23.36 | 35.41 | 37.03 | 38.44 |
| 2 | %5 – %30 | 3.70 | 13.41 | 22.29 | 23.76 | 24.52 | 36.83 | 37.74 | 39.60 |
| 3 | %10 – %5 | 4.10 | 13.90 | 21.32 | 21.91 | 25.68 | 34.08 | 37.31 | 40.31 |
| 4 | %10 – %30 | 4.27 | 14.60 | 23.82 | 22.12 | 26.19 | 36.63 | 39.97 | 41.46 |
| 5 | %15 – %5 | 4.41 | 17.69 | 23.00 | 21.25 | 26.86 | 33.47 | 40.54 | 42.21 |
| 6 | %15 – %30 | 4.90 | 18.83 | 24.91 | 21.39 | 28.47 | 33.30 | 42.01 | 42.84 |
| 7 | %20 – %5 | 5.38 | 21.10 | 25.94 | 21.43 | 30.07 | 31.21 | 45.13 | 45.16 |
| 8 | %20 – %30 | 5.78 | 21.19 | 26.95 | 21.68 | 30.28 | 32.24 | 49.54 | 47.28 |
| 9 | %25 – %5 | 6.57 | 26.57 | 28.22 | 21.77 | 31.46 | 30.29 | 50.20 | 47.32 |
| 10 | %25 – %30 | 6.92 | 29.35 | 31.05 | 22.15 | 32.84 | 31.16 | 65.56 | 49.64 |
| 11 | %30 – %5 | 7.22 | 35.09 | 32.51 | 21.84 | 35.40 | 30.99 | 79.46 | 54.14 |
| 12 | %30 – %30 | 7.90 | 43.58 | 35.64 | 22.25 | 37.39 | 31.95 | 98.72 | 56.40 |



Şekil 6. Oniki farklı senaryo için, farklı örnek durumlara ait analiz sonuçları karşılaştırması

6. SONUÇLAR VE BULGULAR

Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve bulgular genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

1. Çalışmada sinyalizasyon dönel kavşaklar için merkez ada etrafındaki akımları ve depolama alanını dikkate alan bir sinyal süresi hesabı yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın, sinyalizasyon dönel kavşakların tasarımında kullanılabilmesi ve gecikme sürelerinde önemli düzeyde kazanç sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
2. Sinyalizasyon dönel kavşakların sinyal sürelerinin tasarımında merkez ada etrafındaki depolama alanının kritik öneme sahip olduğu, bunun yanında sürücüyeye bağlı faktörlerin de (başlangıç hareket kaybı ve kavşağı terketme aralığı) önem arzettiği belirlenmiştir.
3. Sinyalizasyon dönel kavşaklar için sinyal süre tasarımı yapabilen bir yazılım olmadığından, mevcut yazılımlar ile yapılacak tasarımlarda, bu çalışmada ada bölgesi için önerilen sinyal süresi hesabı yaklaşımının kullanılmasının uygulamada faydalı olabileceği ve sistematik bir yaklaşım olması nedeniyle tercih edilebileceği çıkarımı yapılmıştır.
4. Ana akımdan sola dönüş oranının %30 ve üzerine çıktığı durumlarda orta ada etrafındaki depolama alanının kritik hale dönüştüğü ve yetersizlik durumunda gecikmeleri olumsuz yönde etkileyebileceği anlaşılmıştır.
5. Yapılan analizler ile dönel kavşaklarda, sinyalizasyon kavşaklarda ve sinyalizasyon dönel kavşaklarda, kavşak yaklaşım kollarında sola dönüş hareketi yapan taşıt hacmi arttıkça, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
6. Sola dönüş cepli sinyalizasyon kavşaklarda, diğer kavşak türlerinin aksine, belli bir sola dönüş hareketi yapacak trafik hacmine (senaryolar için yaklaşık %40-%45) kadar sola dönüş oranı arttıkça, sinyalizasyon sisteminin optimum devre süresinin ve kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin azaldığı görülmüştür. Sola dönecek olan taşıt hacmi arttıkça, sola dönüş cebinin (şeridinin) kullanımı artmış ve yaklaşım kollarında kullanılan şerit sayısı artışından dolayı ortalama taşıt gecikmesi azalmıştır.
7. Analizlerde kullanılan örnek durumlar için, sola dönen trafik hacminin çok fazla olmadığı durumlarda sola dönüş cepli sinyalizasyon kavşak uygulamaları, kavşaktaki trafiği yönetmek için uygun bir tercihtir. Bu uygulama ile kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi minimize edilebilmektedir.
8. İki fazlı sinyalizasyon dönel kavşak uygulamasında, ana akımların sola dönüş oranının %30 olduğu durumda kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri, üç fazlı kavşak denetimi (üç fazlı sinyalizasyon kavşak uygulaması, üç fazlı sinyalizasyon dönel kavşak uygulaması, üç fazlı sola dönüş cepli sinyalizasyon kavşak uygulaması) uygulanan senaryoların ortalama taşıt gecikmelerinden daha fazla elde edilmiştir. Bu durum, 11. ve 12. Örnek durumlar için, iki fazlı denetimin mümkün olmadığını, kavşaktaki trafiğin doğru ve düzgün bir şekilde yönetilebilmesi için, faz sayısının artırılması gerektiğini açıkça ortaya koymuştur. Söz konusu örnek durumlar için ana akımdaki sola dönüş oranının %30 olduğu durum, iki fazlı sinyalizasyon dönel kavşak uygulaması için bir sınır olarak görülebilir. Fakat bu oranının, kavşak yaklaşım kollarındaki trafik hacimleri ile doğrudan bağlantılı olduğu ve farklı trafik hacimleri için farklılık göstereceği kesinlikle unutulmamalıdır.

9. Üç faz baz alınarak uygulanan trafik denetiminde, farklı örnek durumlar için, sinyalize kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri, sinyalize dönel kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerine her ne kadar benzer olsa da, sinyalize kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin, sinyalize dönel kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerine kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumda, sinyalize dönel kavşağa ait sinyal sürelerinin çok iyi optimize edildiği söylenebilmektedir.
10. Sola dönüş cepli sinyalize kavşakta, ortalama taşıt gecikmeleri ilk iki örnek durumda sinyalize kavşaklar ve sinyalize dönel kavşaklar ile benzerlik göstermiş fakat sola dönüş oranı arttıkça sola dönüş cebi (şeridi) kullanımı arttığı için sinyalizasyon sisteminin optimum devre süreleri azalmış ve buna bağlı olarak diğer tip kavşaklar ile kıyaslandığında ortalama taşıt gecikmeleri de azalmıştır. Dolayısıyla sola dönüş cepli kavşak uygulamasının, özellikle sola dönüş oranının arttığı fakat sınır değeri aşmadığı durumlarda avantajlı bir trafik denetim tekniği olduğu görülmüştür.
11. Dört faz baz alınarak yapılan trafik denetiminde de ana akımların sola dönüş oranının %25 olduğu duruma kadar, sinyalize kavşak ve sinyalize dönel kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri birbirlerine oldukça benzemektedir. Fakat ana akımda sola dönüş hareketi yapan taşıt hacmi arttıkça, sinyalize dönel kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri de fazla miktarda artmaktadır. Bu durumun nedeni olarak, merkez ada etrafındaki taşıt depolama alanı yetersizliği ve sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtların, hareketine düz devam edecek olan taşıtların hareketlerini kısıtlaması ve bunun sürücülere yansıyan psikolojik etkisi gösterilebilir. Belirtilen durumlardan da anlaşılabilceği üzere, kavşak yaklaşım kollarında sola dönen trafik hacminin çok fazla olduğu durumlarda sinyalize dönel kavşak uygulamasının trafiği yönetmek için uygun bir çözüm olmadığı açıktır.

Semboller

- ϕ : Merkez ada etrafındaki sinyalizasyon sisteminin yeşil süresi (sn)
- α : Sinyalizasyon sisteminin ön kısmında bulunan taşıtların baş. hareket kayıpları (sn)
- n : Sinyalize dönel kavşak depolama alanındaki taşıt sıra sayısı
- λ : Taşıtların kavşağı terketme süresi (sn)
- ε : 2 - 3 sn olarak belirlenmiş sabit değer (sn)
- C : Devre süresi (sn)
- C_{yeni} : Yeni devre süresi (sn)
- g_L : Sola dönen trafik hacmi (ta/sa)
- n_C : Saatlik zaman dilimindeki devre sayısı
- n_{SL} : Depolama alanındaki şerit sayısı
- n_{Cek} : Devre süresi artışından kaynaklanan ve saatlik olarak azalan ek devre sayısı

Teşekkür

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimsel Yüksek Lisans Programı bünyesinde tamamlanmış olup Ziya ÇAKICI'ya ait Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir. Yazarlar, analiz aşamasında kullandıkları VISSIM simülasyon programı için PTV Planung Transport Verkehr AG'ye ve SIDRA INTERSECTION programı için Dr. Rahmi AKÇELİK'e teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Coelho, M. C., Farias, T. L., Roupail, N. M., Effect of Roundabout Operations on Pollutant Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11 (5), 333-343, 2006.
- [2] Mandavilli, S., Rys, M. J., Russel, E. R., Environmental Impact of Modern Roundabouts, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38 (2), 135-142, 2008.
- [3] Gross, F., Lyon, C., Persuad, B., Srinivasan, R., Safety Effectiveness of Converting Signalized Intersections to Roundabouts, *Accident Analysis & Prevention*, 50, 234-241, 2013.
- [4] Bai, Y., Chen, W., Xue, K., Association of Signal-Controlled Method at Roundabout and Delay, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, IEEE, 816-820, 2010.
- [5] Çakıcı, Z., Sinyalize Dönel (Yuvarlakada) Kavşakların Tasarım Esaslarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [6] Tanyel, S., Türkiye' deki Dönel Kavşaklar için Kapasite Hesap Yöntemi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilimsel, 2001.
- [7] Yang, X., Li, X., Xue, K., A New Traffic-Signal Control for Modern Roundabouts: Method and Application, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5 (4), 282-287, 2004.
- [8] Ma, W., Liu, Y., Head, L., Yang, X., Integrated Optimization of Lane Markings and Timings for Signalized Roundabouts, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 307-323, 2013.
- [9] Tanyel, S., Çalışkanelli S. P., Aydın, M. M., Utku, S. B., Yuvarlakada Kavşaklardaki Ağır Araç Etkisinin İncelenmesi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) Teknik Dergi*, 24 (4), 6479-6504, 2013.
- [10] Çakıcı, Z., Murat, Y. Ş., Sinyalize Dönel Kavşakların Performanslarının Farklı Senaryolar Altında İncelenmesi, 11. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 105-116, 2015.
- [11] Ban, X., Herring, R., Hao, P., Bayen, A. M., Delay Pattern Estimation for Signalized Intersections using Sampled Travel Times, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2130 (14), 109-119, 2009.

- [12] Dion, F., Rakha, H., Kang, Y.S., Comparison of Delay Estimates at Under-Saturated and Over-Saturated Pre-Timed Signalized Intersections, *Transportation Research Part B: Methodological*, 38 (2), 99-122, 2004.
- [13] Akcelik, R., The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections, *Institute of Transportation Engineers*, 58 (3), 23-27, 1988.
- [14] Özdemir, M., İzole Kavşaklarda Sinyal Optimizasyonunun Yararları (Benefits of Signal Optimization in Isolated Intersections), Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [15] Akgüngör, A. P., Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Tahmininin Matematiksel Modellenmesi I: Farklı Çözümleme Süreleri için Zamana Bağlı Yeni Bir Gecikme Modeli, *Teknoloji*, 7 (3), 369-379, 2004.
- [16] Murat, Y. S., Comparison of Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Approaches in Vehicle Delay Modeling, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14 (5), 316-334, 2006.
- [17] Murat, Y. S., Baskan, O., Modeling Vehicle Delays at Signalized Junctions: Artificial Neural Networks Approach, *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, 65, 558-564, 2006.
- [18] PTV VISSIM 5.30 User Manual, PTV AG, 2010.
- [19] Tianzi, C., Shaochen, J., Hongxu, Y., Comparative Study of VISSIM and SIDRA on Signalized Intersection, 13th COTA International Conference of Transportation Professionals – CICTP 2013 (Procedia Social and Behavioral Sciences), 96, 2004 – 2010, 2013.
- [20] Sun, D., Zhnag, L., Chen, F., Comparative Study on Simulation Performances of CORSIM and VISSIM for Urban Street Network, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 37 (2013), 18 – 29, 2013.
- [21] VISSIM 5.40 Software, PTV AG.
- [22] SIDRA INTERSECTION 5.1 Software - SIDRA INTERSECTION 6.0 Software, Akcelik & Associates Ptd Ltd.