

# YAKLAŞIK HESAPLAMA METODU İLE SİNYALİZE KAVŞAKLARDA GECİKME BİLEŞENLERİNİN MATEMATİKSEL ÇÖZÜMÜ

**Halim CEYLAN, Özgür BAŞKAN, Hüseyin CEYLAN, Soner HALDENBİLEN**  
Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü/Denizli

Geliş Tarihi : 01.09.2006

## ÖZET

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşık hesaplama metodu (YHM) ile sinyalize kavşaklardaki ortalama taşıt gecikmelerinin bileşenleri, koordinat transformasyon tekniği kullanılarak çözülmüştür. Kavşak performans göstergeleri doyumluk üstü durumlar için iki farklı yaklaşım ile ve doyumluk altı linkler için kuyruk oluşup oluşmaması durumlarına göre incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda, kararlı denge ve deterministik kuyruk irdelenerek zamana bağlı dönüşümler yapılarak yaklaşık matematiksel ifadeler çıkarılmıştır. Geliştirilen YHM örnek sinyalize kavşak üzerine uygulanmış ve YHM'nin performansı mevcut durum ile Webster metoduna göre test edilmiştir. Geliştirilen metod ile seçilen kavşağın ortalama performansının % 500 oranında arttığı bulunmuştur. Ayrıca sinyal parametrelerinin mevcut durum ve Webster sinyal kontrolünden oldukça büyük farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Ortalama taşıt gecikmesi, Yaklaşık hesap metodu, Sinyalize kavşaklar.

## MATHEMATICAL SOLUTIONS OF VEHICULAR DELAY COMPONENTS AT SIGNALIZED INTERSECTIONS BASED ON APPROXIMATE CALCULATION METHOD

## ABSTRACT

This study develops approximate mathematical expressions for delay components at signalized intersections. Delay components are solved with the coordinate transformation method. The performance indicators for the signalized intersection are determined as an oversaturated and under saturated cases. During the analysis, the steady-state and the deterministic queuing theory are investigated first, and then time-dependent transformation is made. Developed model, called YHM, is applied to an example signalized intersection. Results are compared with the current situation and the Webster method. YHM is improved the intersection performance by about 500 % for this example. Moreover, signal parameters are significantly differs from the current and Webster signal control.

**Key Words :** Average vehicular delay, Approximate mathematical expressions, Signalized intersections.

## 1. GİRİŞ

Sinyal kontrolü çok amaçlı bir problem olarak tanımlanarak, amaçları; eş zamanlı veya farklı

zamanlı olarak sinyalize kontrollü kavşaklardaki gecikme, kuyruk uzunluğu, hava kirliliği, yakıt tüketimi ve trafik çıktılarının hepsinin ayrı ayrı veya birleştirilerek eniyilenmesi olarak sıralanabilir. Bu amaçlar doğrultusunda kavşaklardaki sürücü

davranışları, trafik akım durumu ve sinyal sürelerinin ortalama taşıt gecikmelerine (OTG) bağlı olarak eniyilenmesi, yol kullanıcılarının seyahat maliyetlerini azaltacaktır. Ayrıca sinyal parametrelerinin hangi kriterlere göre optimum olduğunun belirlenmesi, OTG'sinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Kavşakların geometrik yapıları, optimum sinyal parametrelerinin belirlenmesi hem trafik akımına bağlı koşullardan hem de trafikten bağımsız olan koşullardan oluşmaktadır. Sinyalize kavşak parametrelerinin hepsinin birlikte değerlendirilmesi, formülize edilmesi ve çözülmesi karşımıza kavşak performans kavramını çıkarmaktadır. Genellikle kavşaklar OTG'ni minimum veya çıktıkları maksimum edecek şekilde tasarımılandırılırlar. Bu sebeple kavşaklardaki taşıt gecikmeleri sistem performanslarının değerlendirilmesinde ana kriterlerden biri olarak nitelendirilir.

Sinyalize kavşaklarda sinyal tasarımı yapılırken bilinmesi gereken en önemli unsurlardan bir tanesi trafik akımı, kuyruk oluşumu ve gecikme ilişkisinin belirlenmesidir. Bu ilişki ancak trafik akımları ve kavşak yaklaşım kollarındaki kuyruk oluşumlarını içeren matematiksel ifadeler yardımıyla elde edilebilir. Kavşaklarda meydana gelen gecikme tahminleri hem gözlem hem de matematiksel modellerle yapılabilmektedir, fakat gözlem ile ortalama taşıt gecikmelerinin ölçülmesi oldukça zor ve zaman alıcı bir işlemdir. Bu sebeple OTG'nin tahmini için verilen sinyal parametreleri ve trafik akımları için Yaklaşık Hesaplama Metodu (YHM) gibi matematiksel modellere ihtiyaç bulunmaktadır.

Webster (1958) ve Webster ve Cobbe (1966) taşıt gecikmelerini ilk modelleyen çalışmalar olarak karşımıza çıkar. Çalışmalarda doyumluk derecesine bağlı olarak gecikme hesapları yapılmıştır, fakat kritik doyumluk derecesi için gecikme sonuza gitmektedir. Oysa bu durum gerçekte böyle değildir. Bu noktadan hareketle, Kimber ve Hollis (1979) ve Kimber ve Daly (1986)'nin yapmış olduğu çalışmada kuyruk uzunluğu ve taşıt gecikmelerinin ölçümleri, zamana bağlı kuyruk modellerinin tahminlerinin testi için kullanılmıştır. Çalışmada taşıt gecikmeleri tahmini için kuyruk uzunluğundan faydalanılmış ve kuyruk uzunluğunun bulunması için iki ayrı yöntem üzerinde çalışılmıştır. Bu yöntemlerde kuyruk uzunluğunun hesaplanmasında gecikme tahmininde önemli bir parametre olan taşıt aralıkları hesaba katılmıştır. Sonuç olarak kuyruk uzunluğundan yola çıkılarak gecikme tahmini yapılmıştır. Gecikme tahmininde taşıtın hangi devrede geçtiği hesaba katılmış ve taşıt aralıklarına bağlı kuyruk uzunlukları da göz önüne alınarak taşıt

gecikmeleri zamana bağlı koordinasyon transformasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır.

Akçelik (1988) yapmış olduğu çalışmada, HCM (1985) gecikme formülünü kalibre ederek alternatif bir model oluşturmuş ve diğer gecikme modelleriyle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak; alternatif HCM formülünün doyumluk derecesinin 1'den küçük olduğu durumlarda HCM (1985) formülüne yakın değerler verdiği, aynı zamanda doyumluk derecesinin 1'den büyük olduğu durumda da Avustralya, Kanada ve TRANSYT formüllerine benzer olarak deterministik gecikme çizgisine asimptotik gecikme eğrileri ürettiği görülmüştür.

Burrow'un (1989) yapmış olduğu çalışmada, Akçelik'in (1988) yılında mevcut HCM formülünü geliştirerek oluşturduğu modele yeni yaklaşımlar getirilmiştir. Bazı ilave faktörlerin hesaba katılması gerektiği ortaya konulmuştur. Bu ilave faktörler trafik akış düzenindeki varyasyonları temsil eden  $\gamma$  terimi, pik ve normal durumdaki akım talebi arasındaki farkı ortaya koyan  $q_0$  ile yine pik ve normal durumdaki kapasite farkını ortaya koyan  $\mu_0$  olarak belirtilmiştir. Prevedouros ve Koga (1996)'nın yapmış olduğu çalışmada, iki ayrı kavşağın gecikme tahminleri HCM (1985) ve (1994) formülleri ile hesaplanarak aradaki farklar ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, HCM (1994) formülü HCM (1985)'e göre daha doğru gecikme ve hizmet seviyesi tahmini yapmaktadır. Doyum akım değeri 1900 ta/sa/şerit olarak alınmıştır. Uygunsuz düzenlemeler devre süresini artırmakta, bu da gecikme sürelerinin artmasına sebep olmaktadır.

Powell'in (1998) yapmış olduğu çalışmada, HCM (1997) kullanılarak sinyalize kavşaklardaki hizmet seviyesi tanımı için gecikme kavramında yapılan değişiklik vurgulanmıştır. Bu şekilde hizmet seviyesi kontrol gecikmesi olarak tanımlanmış ve aradaki ilişkinin daha kararlı olması sağlanmıştır. Fakat her durumda yerinde ölçüm sorunu hala mevcuttur. Burada tipik hızlanma ve yavaşlama profillerine dayalı olarak gecikme değerlerinin yerinde ölçümü için teorik ve ampirik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ölçümü yapılamayan yavaşlama ve hızlanma gecikmeleri için kuyruktaki araçlar örneklenip düzeltme faktörleri hesaba katılmıştır. Düzeltmeler, serbest akım hızı ve kuyruktaki ortalama araç sayısının bir fonksiyonu olan basit ilave faktörlerdir. Başka bir düzeltmede kuyruktaki araç sayısını fazla tahmin edecek gözlem hatalarının giderilmesi için yapılır. Tüm bu faktörler sinyalize kavşak gecikmelerinin yerinde ölçümü için HCM (1997)'ye ilave edilmiştir. Ayrıca geometrik gecikme ile kesintili ve kesintisiz akım koşulları arasındaki uygunluğun hesaba katılması için toplam gecikme kavramının geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çözümünde hazırlanmakta olan HCM (2000)'e dahil edilmesini önermiştir.

Sinyalize kavşakların performansı ve kontrol gecikmeleri, üç ayrı paket program (TRANSYT-7F, SYNCHRO ve HCS) kullanılarak Washburn vd. (2002) tarafından karşılaştırılmıştır. HCM (1997) gecikme formülünden yararlanılarak geliştirilen bu programların aynı veri grupları için farklı sonuçlar verebildiği görülmüştür. Bu farklılıklar HCM gecikme formülündeki Progression Factor (*PF*) ve *I* terimlerinden ileri gelmektedir. Bu yazılımlardan elde edilecek gecikme değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verebilmesi; sistemin sabit zamanlı olması, tüm yaklaşım kollarında rastgele geliş kabulü yapılması ve tüm hareketlerin kısıtlanması ile mümkündür. Çalışmanın sonucunda, her yazılımın farklı özellikleri belirtilerek gecikme tahmini yapılacak sisteme uygun seçimin yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Dion vd. (2003) çalışmalarında gecikme tahmini konusunda bazı analitik gecikme modellerini karşılaştırmıştır. Deterministik kuyruk oluşumu, şok dalgası, sabit durumlu stokastik, zamana bağlı stokastik gecikme modelleri ve bunun ötesinde bu tahminlerin mikroskobik trafik simülasyon modeliyle üretilen gecikmelerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda düşük doyumluk derecesi olan sinyalize kavşakların analizinde uygulanan tüm analitik gecikme modelleri arasında bir uyum olduğu görülmektedir. Ancak bu uyumun doyumluk derecesinin artmasıyla azalma eğilimi gösterdiği de görülmektedir. Ayrıca deterministik kuyruk modeli ile şok dalga modelinin en düşük tahminleri yaptığı görülmektedir. Bunun sebebi bu iki modelin sadece üniform varışları gözönüne almasıdır. Ayrıca, deterministik ve stokastik modellerin düşük doyumluk derecelerinde benzer gecikme tahminleri yaptığı görülmektedir. Bu da doyum altı akım koşullarında gecikme tahmini yapılırken rastgele gelen taşıtların ihmal edilebileceği ve bu durumlarda, deterministik veya stokastik modellerin kullanılabilirliğine işaret eder.

Murat ve Başkan (2006) tarafından sinyalize kavşaklardaki ortalama taşıt gecikmeleri yapay sinir ağı metodu (YSA) ile hesaplanmış ve ANNDEsT modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen ANNDEsT modeli Akçelik (1988), Webster ve Cobbe (1966) ve HCM 2000 modelleri ile karşılaştırılmıştır. Doyumluk üstü akım koşullarında geliştirilen ANNDEsT modeli diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yapılan çalışmaların hepsinde doyumluk üstü ve altındaki durumlar için çözümler geliştirilmiş, fakat doyumluk altı kararlı durumda oluşan kuyruk

uzunluğunu hesaplayan çalışmalar ve bunun yaklaşık hesaplarının ifade edilmesi günümüzde hala çalışılmaya devam etmektedir. Bu sebeple doyumluk altı kararlı kuyruk oluşumlarının belirlenmesi ve yol kullanıcı maliyetleri ile sinyal parametrelerinin eniyilenmesi gerekmektedir. Bu amaçla sinyalize kavşaklardaki OTG'leri üniform ve üniform olmayan iki bileşene ayrılarak bu çalışmada YHM geliştirilmiştir. YHM'nda gecikme ölçümlerine gerek olmaksızın sadece trafik hacimlerinin bilinmesi yeterli olabilmektedir. Geliştirilen YHM örnek bir sinyalize kavşağa uygulanarak, Webster ve mevcut durum ile karşılaştırılarak performansı test edilmiştir.

## 2. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Gecikmeleri en aza indirmek için kullanılan sinyalizasyon sistemleri kontrol türlerine göre birçok gruba ayrılabilir. Bunlar; sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi, trafik uyarımalı sinyalizasyon sistemi, yaya uyarımalı sinyalizasyon sistemi, el ile kumandalı sinyalizasyon sistemi olarak sıralanabilir. Bu sistemlerin detaylı açıklamaları Webster ve Cobbe (1966) ve Akçelik (1981)'de bulunabilir. Herhangi bir sinyalize kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri üniform ve üniform olmayan gecikme olarak ikiye ayrılabilir. Üniform gecikme sinyal zamanları ve trafik hacmine bağlı olarak hesaplanır. Fakat üniform olmayan gecikmelerin hesaplanmasında kuyruk oluşumu ve araçların kavşaklara rastgele varışları gözönünde bulundurulmalıdır. Genel olarak sinyalizasyon sistemleri kontrolsüz kavşaklarda kontrolü sağlamak ve aynı zamanda kavşakta meydana gelebilecek kazaları önleyerek gecikmeleri azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Bununla birlikte, gelişigüzel ve gereklilik kriterlerine uyulmadan kurulan bir sinyalizasyon tesisi hem gecikmelerin uzamasına hem de trafik kazalarının artmasına yol açabilir.

Bir kavşağın gecikme performansı (GP); sinyal parametreleri,  $\psi = (c, \theta, \phi)$ , ile trafik akımı,  $q$ 'nun bir fonksiyonu olarak formülize edilebilir. Bu amaçla verilen trafik hacimleri için gecikme, sinyal kısıtlarına bağlı olarak en minimum edilebilir. Denklem (1)'de gecikmeyi minimum edebilecek formül verilmiştir.

$\psi(c, \theta, \phi) \in \Omega_0$  kısıtlarına bağlı olarak;

$$\min_{\psi} GP(\psi, q^*(\psi)) = \sum_{a \in L} (Ww_a D_a + Kk_a S_a) \quad (1)$$

Burada,  $\psi$ ,  $\Omega_0$  kümesindeki herhangi bir sinyal değişkenleri vektörüdür. Kullanılan değişkenlerin tanımları ekte verilmiştir. Denklem (1)'in çözümü bazı kısıtları sağlamak zorundadır. Bu kısıtlar;

## 2. 1. Devre Süresi Kısıtı

Devre süreleri kontrol parametresi olarak ele alınır ve bu değişken bazı kısıtları sağlamak durumundadır.

$$c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \quad (2)$$

Burada  $c_{\min}$  ve  $c_{\max}$  sırasıyla minimum ve maksimum verilen devre süresidir.

## 2. 2. Kapasite Kısıtı

Herhangi bir kola gelen trafik hacmi kapasiyete yakın ise, araçların maruz kaldığı gecikmeler oldukça yüksek miktarlara çıkabilir. Bu yüzden maksimum doyumluk derecesi tanımlanarak sıkışık kolun bu seviyede çalışması istenir. Sinyalize bir kavşakta kapasite kısıtı Denklem (3)'te verilmiştir.

$$cq_a \leq p_a s_a (\phi_{m,n} + e_e - e_s) \quad (3)$$

$$\forall a \in m, \forall m \in M$$

Herhangi bir kavşak  $n$ 'deki  $m$  fazı altında kapasite kısıtı altında çalışan herhangi bir link  $a$  için,  $q_a$ ,  $p_a$ , ve  $s_a$  sırasıyla linke gelen toplam trafik hacmi, maksimum kabul edilebilir doyumluk derecesi ve doyumluk akımıdır.  $e_s$  ve  $e_e$  ise sırasıyla etkin yeşil süre başlangıcı ve bitişidir.  $c$  devre süresi,  $\phi_{m,n}$   $n$ 'inci kavşağın  $m$ 'inci fazındaki yeşil süre uzunluğudur. TRANSYT trafik modelinde olduğu gibi kapasite kısıtının aşılmasına zaman zaman izin verilerek problemin çözülmesi kolaylaştırılır.

## 2. 3. Yeşil Süre Kısıtı

Kabul edilebilir minimum yeşil süre genellikle araçlar ve yayalar için verilir. Yayalar için minimum yeşil süre genellikle kavşağın geometrik yapısına bağlıdır. Kısıtlar Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\phi_{\min,n,m} \leq \phi_{n,m} \leq c, \forall m \in M; \forall n \in N \quad (4)$$

Burada,

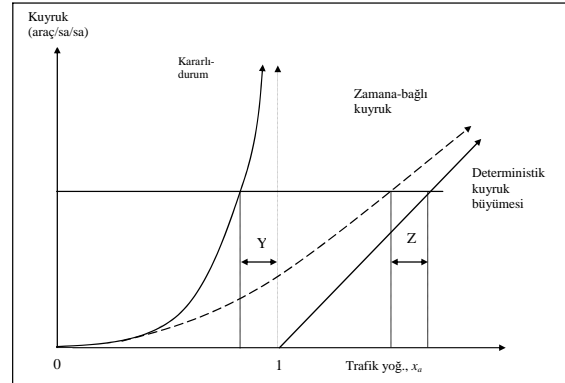
$\phi_{\min,n,m}$   $n$  kavşağının  $m$  fazındaki kabul edilebilir minimum yeşil süresidir.

## 3. YAKLAŞIK HESAP METODU

Gecikme her bir zaman dilimindeki trafiğin maruz kaldığı maliyet ile bir önceki linkteki maliyete bağlı olarak formülize edilebilir. Link kapasitesine ulaşıldığı zaman, Şekil 1'de kararlı durum grafiğinde görüldüğü üzere link maliyetleri sonsuza gitme eğilimi gösterirler. Bunun sebebi geçici aşırı yüklenmeler bir sonraki zaman dilimi içerisinde boşalır. Şekil 1'deki  $Y$  kararlı durumdaki kuyruk uzunluğunun zamana bağlı dönüşümünü  $Z$  ise zamana-bağlı kuyruk oluşumunun deterministik kuyruk uzunluğunun ifadesidir.

Sinyalize bir kavşaktaki OTG hesabının yapılabilmesi için, linkler doyumluk derecelerine ve başlangıç kuyruk formasyonlarına göre;

- 1 Doyumluk üstü akımdaki linkler;
- 2 Kuyuksuz doyumluk altındaki linkler;
- 3 Kuyruklu doyumluk altındaki linkler olarak formüle edilebilir.



Şekil 1. Zaman-bağımlı gecikme.

Bu çalışmada YHM geliştirilirken verilen tüm zaman periyodundaki toplam gecikmeyi bulmak için link-tabanlı hesaplamalar yapılmıştır. Gecikmenin üniform bileşeni matematiksel ifadeler ile geliştirilmiş, gelişigüzel ve doyumluk üstü gecikme formülasyonu için Kimber ve Hollis (1979) ve TRANSYT trafik (Vincent ve ark., 1980) tarafından geliştirilen zamana bağlı ilişkiler kullanılmıştır.

### 3. 1. Gelişigüzel Artı Doyumluk Üstü Gecikme Bileşeni (GDÜG).

Gecikmenin GDÜG bileşeni genellikle iki farklı metod ile yapılır. Kimber ve Hollis (1979)'in zamana bağlı formülasyonu ve TRANSYT trafik modelin kullandığı modeldir. Ayrıca doyumluk üstü gecikme için Akçelik (1981), Doherty, HCM (2000)'de matematiksel ifadeler geliştirilmiştir.

Zaman bağımlı gecikme modeli kararlı hal ve deterministik kuyruk teorileri esasına dayanır. Doygunluk derecesi,  $x_a$ , 1'e yaklaştıkça kararlı haldeki kuyruk sonsuza gitme eğilimi gösterir. Kuyruk teorisinde kullanılan matematiksel ifadelerin karmaşıklığından dolayı, Kimber ve Hollis (1979) koordinat dönüşüm metodunu önermiştir.

Eğer  $L_a^{ro}(0)$   $t$  zamanındaki  $L$  kümesinde bulunan link  $a$ 'daki başlangıç kuyruk uzunluğu ise, deterministik kuyruk teorisine göre periyot sonundaki kuyruk uzunluğu sıfır ya da ayrılan ve giren araçların farkına eşittir. Bu durum Denklem (5)'te verilmiştir.

$$L_a^d(t) = \text{Max} \{0, (q_a - \mu_a)t + L_a^{ro}(0)\} = \text{Max} \{0, (x_a - 1)\mu_a t + L_a^{ro}(0)\} \quad (5)$$

Burada;  $L_a^d(t)$  zaman dilimi  $t$ 'de link  $a$  üzerindeki kuyrukta bulunan araç sayısıdır.

Doygunluk üstü durum  $x_a \geq 1$  için, link  $a$ 'nın  $t$  zaman dilimi içerisinde maruz kaldığı toplam gecikme  $D_a^d(t)$  Denklem (6)'daki gibi formülize edilebilir.

$$D_a^d(t) = L_a^{ro}(0) + 0.5\mu_a(x_a - 1)t \quad (6)$$

Aynı zaman diliminde araç gecikmesi  $d_a^d(t)$  ise Denklem (7)'de verilmiştir.

$$d_a^d(t) = (L_a^{ro}(0) + 1 + 0.5(x_a - 1)\mu_a t) / \mu_a \quad (7)$$

Verilen herhangi bir zaman dilimi  $t$ 'deki ve  $L$  kümesinde bulunan  $a$  linki için doygunluk akımı altında  $x < 1$  kararlı hal koşulları Denklem (8)-(10)'de verilmiştir.

$$L_a^s = x_a + \frac{Cx_a^2}{1 - x_a} \quad (8)$$

$$D_a^s = x_a + \frac{Cx_a^2}{1 - x_a} \quad (9)$$

$$d_a^s = \frac{1}{\mu_a} \left( \frac{Cx_a^2}{1 - x_a} + 1 \right) \quad (10)$$

Burada,

$$L_a^s = \text{Kararlı haldeki toplam kuyruk uzunluğu}$$

$$D_a^s = \text{Kararlı hal gecikmesi}$$

$$d_a^s = x_a < 1 \text{ olduğu zaman kararlı haldeki ortalama taşıt gecikmesi}$$

$$C = \text{sabit olup sinyalize kavşaklar için 0.4~0.6 arasında bir değerdir.}$$

Koordinat dönüşüm tekniği Denklem (8)'deki kararlı halde sonsuza gitme eğilimindeki kuyruk uzunluğunu  $x_a=1$  civarında deterministik kuyruk uzunluğuna dönüştürmek için kullanılır. Dönüşümlerde Şekil 1'de verilen  $Y$  uzunluğu  $Z$  uzunluğuna eşit kabul edilmiştir.

$L_a^{ro}(t)$  gelişigüzel ve doygunluk üstü akımda bulunan araç sayısı,  $D_a^{ro}(t)$ , toplam gecikme ve  $d_a^{ro}(t)$ 'de ortalama taşıt başına gecikme olsun. Bu durumda aşağıdaki dönüşümler yapılabilir.

$$L_a^{ro}(t) = \frac{\sqrt{A^2 + B} - A}{2} \quad (11)$$

$$D_a^{ro}(t) = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1} - A_1}{2} \quad (12)$$

$$d_a^{ro}(t) = \frac{\sqrt{A_2^2 + B_2} - A_2}{2} \quad (13)$$

Burada,

$$A = \frac{(1-x_a)(\mu_a t)^2 + (1-L(0))\mu_a t - 2(1-C)(L(0) + x_a \mu_a t)}{\mu_a t + (1-C)}$$

$$B = \frac{4(L(0) + x_a \mu_a t)(\mu_a t - (1-C)(L(0) + x_a \mu_a t))}{\mu_a t + (1-C)}$$

$$A_1 = \frac{(1-x_a)(0.5\mu_a t)^2 + (1-L(0))(0.5\mu_a t) - 2(1-C)(L(0) + 0.5x_a \mu_a t)}{0.5\mu_a t + (1-C)}$$

$$B_1 = \frac{4(L(0) + 0.5\mu_a x_a t)(0.5\mu_a t - (1-C)(L(0) + 0.5\mu_a x_a t))}{0.5\mu_a t + (1-C)}$$

$$A_2 = \frac{(1-x_a)t}{2} - \frac{L(0) - C + 2}{\mu_a}$$

$$B_2 = \frac{2((1-x_a)\mu_a t + Cx_a \mu_a t - 2(1-C)(L(0) + 1))}{\mu_a^2}$$

Burada; yaklaşık hesaplamaları verilen koordinat dönüşüm tekniği sezgisel bir algoritmadır.

Gelişigüzel ve doygunluk üstü akımlarda meydana gelen gecikmenin hesabında ikinci bir formülasyon

TRANSYT trafik modelinin kullandığı modeldir. Bu formülasyon aşağıda verilmiştir.

$D_{aT}^{ro}$  ve  $d_{aT}^{ro}$  'in  $L$  kümesindeki  $a$  linki için  $T$  zaman periyodundaki TRANSYT gecikme notasyonu olsun. Bu durumda yaklaşık gecikme hesabı Denklem (14)-(15)' deki gibidir.

$$D_{aT}^{ro} = \frac{T}{4} \left[ ((q_a - \mu_a)^2 + \frac{4q_a}{T})^{0.5} + (q_a - \mu_a) \right] \quad (14)$$

$$d_{aT}^{ro} = \frac{D_{aT}^{ro}}{q_a} \quad (15)$$

### 3. 2. Üniorm Bileşen Hesapları

Sinyalize kavşaklardaki yaklaşık gecikme hesabının üniform bileşeninin hesaplanması tüm devre süresi gözönüne alınarak yapılmıştır. Ayrıca bu hesaplamada kavşağa üniform geliş ve ayrılış kabul edilmiştir.

$L$  kümesindeki  $a$  linkleri için üniform bileşenler doyunluk derecesine göre aşağıdaki şekilde ayrılabilir. Bunlar;

1.  $x_a \geq 1$  olduğu durumda doyunluk üstü linkleri;
2. Kuyruk oluşmamış doyunluk altı linkleri,  $x_a < 1$ . Bu durum  $L_a^{ro}(t) \leq L_a^s$  koşulu ile tanımlanabilir.
3. Kuyruk oluşmuş doyunluk altı linkleri,  $x_a < 1$ . Bu durum  $L_a^{ro}(t) > L_a^s$  koşulu ile belirlenebilir.

### 3. 3. Doyunluk Üstü Linkleri

Üniform kuyruklar,  $L_a^U$ , ve üniform gecikmeler,  $D_a^U$ , kavşağa yaklaşan taşıtların kümülatif toplamalarının sıfır olduğu varsayımı ile hesaplanır (Chiou, 1998). Bu sebeple  $L_a^U$  ve  $D_a^U$  kavşak dolum ve boşalım grafiklerinin farkları olarak bulunur. Bu durumda  $T$  periyodu için gecikmeler;

$$L_a^U = \frac{c\mu_a(1 - \Lambda_a)}{2} \quad (16)$$

$$D_a^U = \frac{c\mu_a(1 - \Lambda_a)}{2} \quad (17)$$

$$d_a^U = \frac{c(1 - \Lambda_a)}{2} \quad (18)$$

formülleri ile bulunabilir.

Burada,  $L_a^U$ , üniform kuyruk uzunluğu,  $D_a^U$  toplam üniform gecikme,  $d_a^U$  taşıtın maruz kaldığı gecikme,  $\Lambda_a$  faz yeşil oranları ve  $c$  devre süresidir.

### 3. 4. Kuyruk Oluşmamış Doyunluk Altı Linkleri

Doyunluk altı şartlarında kuyruk oluşumunun etkin kırmızı süre başlangıcında olduğu ve etkin yeşil sürede boşaldığı kabul edilmiştir. Ayrıca devre süresi etkin yeşil ve kırmızı süre periyotlarına ayrıldığı farz edilmiştir. Bu durumda kuyruk oluşmamış doyunluk altı linkleri için yaklaşık gecikme hesabı;

$$L_a^U = \frac{x_a \mu_a (1 - \Lambda_a)^2 c}{2(1 - \Lambda_a x_a)} \quad (19)$$

$$D_a^U = L_a^U$$

$$d_a^U = \frac{D_a^U}{q_a}$$

formülleri ile hesaplanabilir.

### 3. 5. Kuyruk Oluşmuş Doyunluk Altı Linkleri

Eğer zaman dilimi  $t$  için kuyruk uzunluğu,  $L_a^s$ , başlangıç kuyruk uzunluğundan,  $L_a^{ro}(0)$ 'dan az ise  $t$ 'nin başlangıcında bu kuyruğun boşalabilmesi için zamana ihtiyacı vardır.  $\tau_a$   $t$ 'nin başlangıcındaki başlangıç kuyruğunun boşalması için gerekli olan süre olsun. Kimber ve Hollis (1979)'a göre aşağıdaki matematiksel ifadeler çıkarılabilir.

$$\tau_a = \frac{L_a^{ro}(0) - L_a^s}{\mu_a (\hat{x}_a - x_a)} \quad (20)$$

Burada;  $L_a^{ro}(0)$  ve  $L_a^s$  sırasıyla  $t$  zaman dilimi için başlangıç ve birikmiş kuyruk uzunluğudur.  $x_a = \frac{q_a}{\mu_a}$

ve  $\hat{x}_a$  doyunluk dereceleri olup bu bölgede birikmiş kuyruk uzunluğu başlangıç kuyruk uzunluğuna,  $L_a^{ro}(0)$ , eşittir.

$$L_a^{ro}(0) = \frac{C\hat{x}_a^2}{1 - \hat{x}_a} + \hat{x}_a \quad (21)$$

$$\hat{x}_a = \frac{L_a^{ro}(0) + 1 - \sqrt{(L_a^{ro}(0) - 4(1-C)L_a^{ro}(0))}}{2(1-C)} \quad (22)$$

Yukarıdaki ifadeler çıkarılırken birikmiş kuyruk uzunluğunun taşıtların geliş oranına bağlı olarak  $\hat{x}_a$  ve  $x_a$  oranlarında kavşaktan boşaldığı kabul edilmiştir. Özellikle Denklem (22) kuyruk azalımı hesaplamaktadır. Fakat bu ifade birikmiş kuyruk uzunluğunun boşalması için gerekli olan süreyi daha kısa olarak bulabilir. Denklem (22)'den yola çıkılarak,  $L$  kümesindeki her bir  $a$  linki için,  $x_a < 1$  ve  $L_a^{ro}(0) > L_a^s$  koşulları altında,

1.  $\tau_a \geq t$ , gecikmenin üniform bileşeni Denklem (16)-(18) ile hesaplanabilir.
2.  $\tau_a < t$ , gecikmenin üniform bileşeni doygunluk üstü ve doygunluk altı ifadelerinin lineer birleşimi ile hesaplanabilir.

$$L_a^U = \frac{\mu_a(1-\Lambda_a)c}{2t} \left[ \tau_a + \frac{x_a(1-\Lambda_a)(t-\tau_a)}{(1-\Lambda_a x_a)} \right] \quad (23)$$

$$D_a^U = L_a^U$$

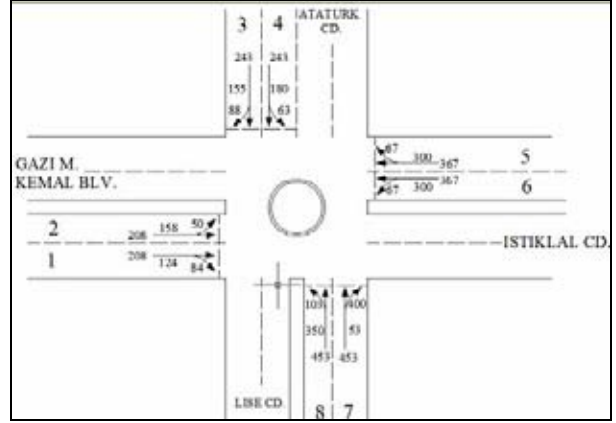
$$d_a^U = \frac{D_a^U}{q_a}$$

#### 4. UYGULAMA

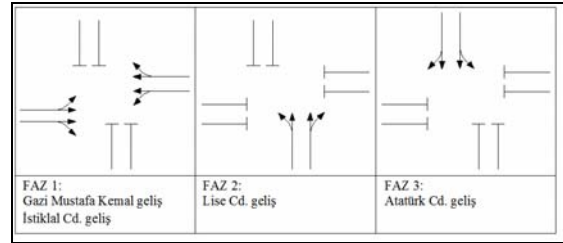
Çalışmanın bu bölümünde örnek sinyalize kavşaktan derlenen veriler kullanılarak kavşağın gecikmelere bağlı performansı ve parametreleri bulunmuştur. Hesaplamalarda kullanılan link numaraları, trafik hacimleri Şekil 2'de, dönüş oranları Tablo 1a ve 1b'de verilmiştir. Şekil 3'te örnek kavşağa ait faz diyagramları verilmiştir.

Tablo 1a ve 1b'den görülebileceği gibi eğer doygunluk akım değerleri 1600-1800 araç/saat olarak verilirse hiçbir koldaki doygunluk derecesi 0.90 olan kritik doygunluk akım oranını aşmayacaktır. Bu durumda gecikme hesapları kararlı hal durumunda doygunluk altı birikmemiş kuyruk durumu için üniform gecikme bileşeni olarak hesaplanabilir. Bu durumda gelişigüzel artı doygunluk üstü akım durumundan kaynaklanan gecikmenin toplam gecikmeye katkısı oldukça az olacaktır. Doygunluk altı akım durumlarında Webster (1958)'in gecikme hesabı kullanılabilir. Gecikme formülü Denklem (24)'deki gibidir.

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65(c/q^2)^{1/3} x^{2+5\lambda} \quad (24)$$



Şekil 2. Örnek kavşak link numaraları ve trafik yükleri



Şekil 3. Örnek kavşak faz diyagramı

Tablo 1a. Örnek Kavşak Link Trafik Hacimleri (07.30-09.00).

Link No	Trafik Hacmi	Sola	Düz	Sağa	Toplam
1-2	sayı	50	242	124	416
	%	12.0	58.2	29.8	100.0
3-4	sayı	63	335	88	486
	%	13.0	68.9	18.1	100.0
5-6	sayı	67	600	67	734
	%	9.1	81.7	9.1	100.0
7-8	sayı	103	750	53	906
	%	11.4	82.8	5.8	100.0

Tablo 1b. Örnek Kavşak Link Trafik Hacimleri (17.00-19.00).

Link no	Trafik hacmi	Sola	Düz	Sağa	Toplam
1-2	sayı	55	418	317	790
	%	7.0	52.9	40.1	100.0
3-4	sayı	137	417	102	656
	%	20.9	63.6	15.5	100.0
5-6	sayı	97	339	104	540
	%	18.0	62.8	19.3	100.0
7-8	sayı	113	309	118	540
	%	20.9	57.2	21.9	100.0

Burada;  $d$  = her koldaki her bir taşıt için ortalama gecikmeyi,  $\lambda$  = etkin yeşilin devre süresine oranı,  $x$  = doygunluk derecesini ifade etmektedir,  $c$  = devre süresi (sn),  $s$  = doygunluk akım değeri (taşıt/sa) ve  $q$  = her bir koldaki akım (ta/sa). Doygunluk derecesi

akımın maksimum mümkün akıma oranıdır ve  $x = \frac{q}{\lambda s}$  ile ifade edilir.

Denklem (24)'nin son kısmı gecikmenin % 5'i ile %15'i arasında bir değeri ifade etmektedir. Son terimin ihmal edilmesiyle gecikme;

$$d = \frac{9}{10} \left\{ \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right\} \quad (25)$$

şeklinde hesaplanabilir.

TRANSYT trafik modelinin kullanılmasıyla elde edilen sinyal parametreleri ile gecikmeler sabah trafiği için Tablo 2'de verilmiştir. Mevcut durumda devre süresi sabah trafiği için 80 saniye ve yeşil periyotlarda; Faz 1,2 ve 3 için sırasıyla 21, 25 ve 21 saniye olarak çalışmaktadır.

Webster (1958) metoduna göre optimum devre süresi sabah zirve saati için 104 ve akşam zirve saati için 100 saniye olarak bulunmuştur. Webster formülüne göre üniform gecikmeler (UG) ortalama 120 taş-sa/sa ve gelişigüzel artı doyumluk üstü gecikmeler (GDÜG) 76 taş-sa/sa civarındadır. Benzer durum akşam trafiği için de geçerlidir. UG ve GDÜG gecikme bileşenlerinin yüksek olmasının nedenlerinden bir tanesi doyumluk derecesi 1 ve üzeri olduğu zaman hesaplanan gecikme

değerlerinin tam olarak hesaplanamamasından kaynaklanmaktadır.

YHM ile yapılan çalışmalar sonucunda sabah zirve saati için optimum devre süresi 60 ve akşam zirve saati için 50 saniye olarak bulunmuştur. Orta adanın hesaba katılmasıyla devre süresi 90 saniyeye çıkmıştır. Bu durumda bile hesaplanan devre süreleri mevcut devre süresinin altındadır. Tablo 2'nin son iki kolonunda UG ile gelişigüzel GDÜG verilmiştir. UG, devre süresi arttıkça artmaktadır. Çünkü bu gecikmeler trafik akımından bağımsız olup sadece sinyal göstergelerinin değişiminden kaynaklanmaktadır. GDÜG ise devre süresi arttıkça düşme eğilimi göstermektedir. Bunun sebebi kapasitesinin doyumluk derecesinin oldukça altında olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat devre süresi arttıkça toplam gecikme hızla artış göstermektedir.

Tablo 3'te akşam trafiği için sinyal parametreleri verilmiştir. Akşam zirve saatinde trafik hacmi sabah trafiğine göre daha az olduğundan optimum devre süresi Webster metoduna göre 100 sn, YHM'na göre 50 sn olarak bulunmuştur. Mevcut durumda ise devre süresi 90 ve yeşil süreler ise 33, 17 ve 28 saniyedir. Hesaplamalara yaya fazları dahil edilmemiştir. Webster metoduna göre yapılan hesaplamalarda ortalama UG 113 taş-sa/sa ve GDÜG gecikmeler ise ortalama 80 taş-sa/sa civarındadır.

Tablo 2. Sabah Trafiği İçin Sinyal Parametreleri ve Gecikmeler (07.30-09.00).

Metodlar	Devre süresi (saniye)	Yeşil süreler			UG (taş-sa/sa)	GDÜG (taş-sa/sa)	Toplam (taş-sa/sa)
		Faz 1	Faz 2	Faz 3			
Mevcut durum	80	21	25	21	97.45	33.25	130.7
Webster ve Cobbe	60	14	17	17	75.31	71.35	146.66
	90	23	28	27	108.21	73.96	182.17
	120	32	39	37	141.84	77.73	234.80
	130	35	42	41	153.32	81.48	219.57
YHM	60	16	19	10	13.6	8.9	22.50
	90	31	17	27	19.0	6.9	25.90
	120	59	43	23	24.4	6.3	30.70
	130	43	47	25	26.2	6.2	32.40

Tablo 3. Akşam trafiği İçin Sinyal Parametreleri Ve Gecikmeler (17.00-19.00).

Metodlar	Devre süresi (saniye)	Yeşil süreler			UG (taş-sa/sa)	GDÜG (taş-sa/sa)	Toplam (taş-sa/sa)
		Faz 1	Faz 2	Faz 3			
Mevcut durum	90	33	17	28	103.64	81.32	184.96
Webster ve Cobbe	60	16	10	22	70.32	65.30	135.62
	90	25	16	36	103.64	81.32	184.96
	120	35	22	50	135.75	87.75	223.50
	130	38	25	55	145.45	87.54	232.99
YHM	60	15	9	11	11.3	9.0	20.30
	90	33	19	23	18.2	6.2	24.40
	120	48	26	31	23.2	5.8	29.00
	130	53	28	34	24.8	5.8	30.06



## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada sinyalize kavşaklardaki gecikme bileşenleri gözlem değerlerine dayanmaksızın yaklaşık matematiksel hesaplama yöntemi ile çözülmüştür. Kavşaklardaki ortalama taşıt gecikme bileşenleri sadece sinyal çevriminden kaynaklanan üniform gecikme ve kuyruk oluşum durumuna göre doygunluk altı ve üstü gelişigüzel gecikmeler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yaklaşık hesaplamalar için koordinat dönüşüm yaklaşımı kullanılmıştır. YHM ile kararlı denge ve kararsız denge durumları irdelenerek kuyruk hesaplamaları üç durum için ifade edilmiştir. Ayrıca TRANSYT trafik modelinde kullanılan GDÜG ve Webster ve Cobbe (1966)'nin gecikme formülasyonları da irdelenmiştir. YHM örnek bir kavşak üzerine sabah ve akşam zirve saatlerinde ölçülen trafik akımlarına bağlı olarak çözülmüştür. YHM'nun performansı hem mevcut durum hem de Webster metodu ile karşılaştırılarak sinyal parametrelerinin optimum değerleri ve minimum gecikme bileşenleri verilmiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

YHM'na göre sabah ve akşam trafiği için toplam gecikmenin UG bileşeni, ortalama %66 ve GDÜG bileşeni %34 oranına sahiptir. Bu durum kavşağın verilen zaman periyodu içerisinde kararlı hal gecikmesi olduğu ve deterministik kuyrukların oluşmadığı anlamını taşımaktadır. Ayrıca orta dönemler ihmal edildiği zaman optimum devre süresi mevcut duruma göre yaklaşık iki kat azalmaktadır. Ayrıca dönel olması durumunda kavşak boşaltım kapasitesi ortalama %40 azalmaktadır. Devre süresi akşam trafiğinde 90 saniyeden 50 saniyeye düşürmektedir.

Sabah trafiğinde YHM ile yapılan çözüm bu örnek için mevcut duruma göre yaklaşık %450 oranında bir gecikme azalması, akşam trafiği için ise yaklaşık %750 oranında bir performans iyileşmesi sağlamıştır.

YHM ile Webster metoduna göre aynı devre süreleri için karşılaştırmalar yapıldığı zaman toplam gecikmelerde oldukça büyük farklılıklar bulunmaktadır. Bunun sebebelerinden en önemlisi Webster'e göre UG bileşeni hesaplanırken tüm kollardaki en yüksek kritik akım değeri kullanılırken, YHM'nda ise UG bileşeni için o fazdaki akım değerleri kullanılmaktadır.

YHM bu çalışmada tipik sinyalize bir kavşağa uygulanmış ve performansı test edilmeye çalışılmıştır. Bu metodun farklı sinyalize

kavşaklarda test edilerek ortalama taşıt gecikmeleri üzerindeki performansı zamana bağlı olarak gelecek çalışmalarda yapılabilir.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak tarafından 104I119'nolu proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Tübitak'a teşekkür ederiz.

## 6. SEMBOLLER

GP	=	Gecikme performansı
$D_a$	=	Gecikme (taşıt-saat/saat)
$S_a$	=	Saat başına taşıt durma sayısı
$w_a$	=	Birim zaman için gecikme ağırlık faktörleri
$k_a$	=	Birim zaman için durma ağırlık faktörleri
N	=	$= \{1,2,3,\dots,N_j\}$ $N_j$ düğüm noktaları olup herbiri $N_j$ sabit zamanlı sinyalize kavşağı temsil eder.
M	=	Sinyalize kavşaktaki faz sayısıdır
L	=	$\{1,2,3,\dots,N_L\}$ her kavşak yaklaşımındaki trafik akımı
c	=	Ortak devre süresi
$c_{\min}$ ve $c_{\max}$	=	Sırasıyla belirlenen minimum ve maksimum devre süreleri
$\theta$	=	Ofset değişkenlerinin aralık vektörü
$\phi$	=	Yeşil zamanlar süre vektörü
$I_i$	=	Sinyal fazları arasındaki yeşillerarası süre
$\phi_{\min}$ ve $\phi_{\max}$	=	Minimum and maximum kabul edilebilir yeşil faz süreleri
$q = [q_a; \forall a \in L]$	=	a linkindeki ortalama akım vektörü $q_a$
$s_a$	=	a linkindeki doygun akım
$t = [t_w; \forall w \in W]$	=	her başlangıç-bitiş noktası arasındaki seyahat talep vektörü
m	=	Her sinyalize kavşaktaki faz sayısı
M	=	Yol ağındaki toplam faz sayısı
k	=	Bütün bir yol ağındaki sinyal süresi değişkenlerinin sayısı
$\Psi$	=	Sinyal sürelerinin genel vektörü
$e_s$ ve $e_c$	=	Sırasıyla etkin yeşil süre başlangıcı ve bitişi

## 7. KAYNAKLAR

Akçelik, R. 1981. Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis, Research Report 123, Australian Road Research Board, Melbourne, Australia,

- Akçelik, R. 1988. Estimating the capacity of a shared lane, **Proc. 14th ARRB Conf.**, 14 (2), pp. 228-41.
- Burrow, I. 1989. A Note on Traffic Delay Formulas, ITE Journal, pp. 29-32.
- Chiou, S.W. 1998. Optimisation of Area Traffic Control for Equilibrium Network Flows. PhD Thesis, University College London.
- Dion, F., Rakha, H. and Kang, Y. S. 2003. Comparison of Delay Estimates at Under-Saturated and Over-Saturated Pre-Timed Signalized Intersections, Transportation Research Part B, 37, pp. 1-24.
- Doherty, R. A. 1977. "Comprehensive Junction Delay Formula", LRT1 Working Paper, Department of Transport, UK.
- Kimber, R. M. and Daly, P. N. 1986. Time-Dependent Queuing At Road Junctions: Observation And Prediction, Transportation Research Part B, Vol. 20B, pp. 187-203.
- Kimber, R. M. and Hollis, E. M. 1979. Traffic queues and delays at road junctions, TRRL Laboratory Report 909, Crowthorne, Berkshire.
- Murat, Y. S., and Başkan, Ö. 2006. Modeling Vehicle Delays at Signalized Junctions: Artificial Neural Network Approach, Journal of Scientific and Industrial Research, Vol. 65, pp. 558-564.
- Powell, J. L. 1998. Field Measurement of Signalized Intersection Delay for 1997 Update of the Highway Capacity Manual, Transportation Research Record, (1416), pp. 79-86.
- Prevedeorus, P. D. and Koga, C. A. 1996. Comparison of 1985 and 1994 HCM: Signalized Intersection Delay Estimates, ITE Journal, pp. 26-30.
- TRB, Special Report 209. 1985. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA.
- TRB, Special Report 209. 1994. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA.
- TRB, Special Report 209. 1997. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA.
- TRB, Special Report 209. 2000. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA.
- Vincent, R.A., Mitchell, A.I. and Robertson, D.I. 1980. User guide to TRANSYT version 8, TRRL Report, LR888, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Washburn, S. S. and Larson, N. 2002. Signalized Intersection Delay Estimation: Case Study Comparison of TRANSYT-7F, Synchro and HCS, ITE Journal, pp. 30-35.
- Webster, F. V. 1958. Traffic Signal Settings, Her Majesty Stationary Office, London, UK.
- Webster, F. V. and Cobbe, B. M. 1966. Traffic Signal Settings, Road Research Laboratory, Road Research Technical Paper No.56, London, p.110.