

**SİNYALİZE KAVŞAKLARDA GECİKME TAHMİNİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ  
I: FARKLI ÇÖZÜMLEME SÜRELERİ İÇİN ZAMANA BAĞLI YENİ BİR GECİKME MODELİ****Ali Payıdar AKGÜNGÖR**Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
71451, Yahşihan, Kırıkkale, Türkiye**ÖZET**

Gecikme, trafik sinyal zamanlarının optimizasyonunda ve bir sinyalize kavşağın hizmet seviyesinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir faktördür. Bu makalede, sinyalize kavşaklarda gecikmeyi tahmin etmek için farklı bir yöntem kullanılarak zamana bağlı bir gecikme modeli geliştirilmiştir. Bu modelin en önemli özelliği gecikme değişkeni  $k$ 'nın literatürde yaygın olarak bilinen diğer modellerde olduğu gibi sabit bir sayı olmayıp, çözümlene süresinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir. Böylece sinyalize kavşaklarda gecikmenin değişen çözümlene süreleri için daha doğru tahmin edilmesi mümkün olacaktır. Geliştirilen model ile mevcut olan modellerin gecikme tahminleri karşılaştırıldığında, geliştirilen modelin değişen zaman koşullarını da göz önüne aldığından mevcut gecikme modellerine göre daha güvenilir olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Gecikme modeli, Gecikme tahmini, Sinyalize kavşaklar, Çözümlene süresi.

**MATHEMATICAL MODELING OF DELAY ESTIMATION AT SIGNALIZED INTERSECTIONS  
I: A NEW TIME-DEPENDENT DELAY MODEL FOR VARIOUS ANALYSIS TIME PERIODS****ABSTRACT**

Delay is an important factor in the optimization of traffic signals and the determination of the level of service of a signalized intersection. In this paper, using a different methodology a new time-dependent delay model was developed to estimate delay at signalized intersections. The most important feature of the proposed model is that it utilizes the delay parameter  $k$  as a function of analysis period instead of a fixed value used by the existing delay models. Therefore, the new model can produce more reasonable delay estimations at signalized intersections for variable time periods. A comparison of the delay estimations by the new model and the existing four different models indicated the delay estimations by the new model appear to be generally better than those by the other models.

**Key Words:** Delay model, Delay estimation, Signalized intersections, Analysis period.

**1. GİRİŞ**

Araç başına düşen ortalama gecikme miktarı, bir sinyalize kavşağın performansının belirlenmesinde etkin olan değişkenlerden biridir. Kavşak performansının bir ölçüsü olarak gecikme; yakıt tüketimini, sürücü hoşnutsuzluklarını ve seyahat zamanındaki kayıp miktarı direk olarak yansıttığı için hem kavşağın tasarımı, hem işletimi, hem de kavşakların farklı denetim ve akım koşulları altında performanslarının karşılaştırılmasında kullanılır. Bu nedenle doğru olarak tahmin edilmesi önemlidir. Araç başına düşen ortalama gecikme miktarı direk olarak kavşak sahasından ölçülebilir. Fakat bu işlem trafik akımının rastgele yapısı ve denetlenilemeyen bazı faktörlerden dolayı oldukça zor ve masraflıdır. Bu nedenle, sinyalize kavşaklarda gecikme tahmini için alternatif bir yöntem olarak farklı yaklaşımlarla kurulan analitik modeller yaygın olarak kullanılır[1-5].

### 1.1. Rastgele Gecikme Modeli

Literatürde yaygın olarak bilinen ve en iyi gecikme modellerinden bir tanesi olarak kabul edilen model, Webster [2] tarafından geliştirilen ve aşağıda ifade edilen gecikme modelidir.

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

Modeldeki ilk terim trafik ışıklarından kaynaklanan üniform gecikmeyi, ikinci terim ise araç gelişlerinin neden olduğu rastgele gecikmeyi tahmin etmektedir. Son terim ise ampirik bir ifade olup düzeltme terimidir ve toplam gecikme miktarının %5 ile %15 arasında bir değere sahiptir. Webster geliştirdiği bu ifadede araç gelişlerinin rastgele, ayrılışlarının ise üniform olduğu kabulünden hareket etmiştir. Bu model yalnızca kavşağa gelen akım miktarı kavşak kapasitesinden küçük olduğu durumlarda bir başka ifade ile doyunluk derecesi (x) 1,0 den küçük olduğu durumlarda kullanılmakta ve akım kapasiteye yaklaştığında ise sonsuz gecikme tahmin etmektedir.

### 1.2. Deterministik Gecikme Modeli

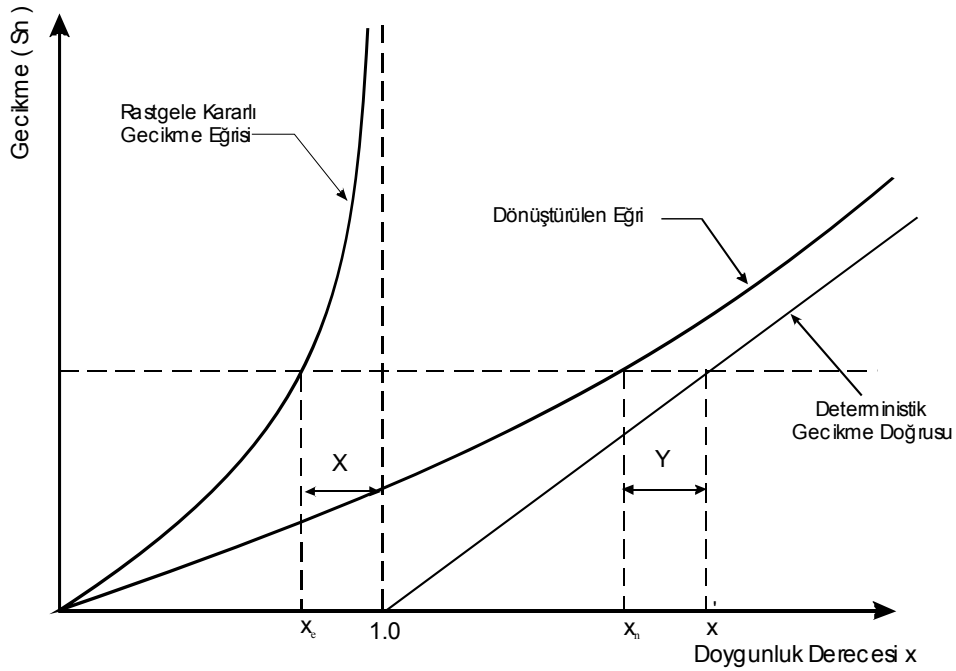
Rastgele gecikme modelleri, gecikme tahmininde sadece doyun olmayan trafik akımı için kullanılabilir olduklarından dolayı doyun ve aşırı doyun trafik akımlarında (akım/kapasite oranı 1,0 den büyük olduğu durumlarda) deterministik modeller kullanılır. Akımın kapasiteyi aştığı durumlarda aşırı doyun trafik akımı oluşur ve devam eden aşırı akımın sebep olduğu gecikme miktarı aşağıdaki deterministik modelle tahmin edilir ve bu modele aynı zamanda “sürekli aşırı akım gecikme modeli” de denir. Fakat bu model trafik akımının doğal yapısı olan rastgele olma özelliğini hesaba katmaz.

$$d_{co} = \frac{T}{2}(x-1) \quad (2)$$

Rastgele ve deterministik gecikme modellerinin bir karşılaştırması yapıldığında görülmektedir ki, doyunluk derecesi 1,0 den küçük olduğu durumda rastgele gecikme modeli; 1,0 den büyük olduğu durumda ise deterministik model gecikmeyi doğru tahmin etmektedir. Fakat doyunluk derecesi 1,0 iken modellerden bir tanesi sonsuz gecikme diğeri ise sıfır gecikme tahmin etmektedir. Bu doyunluk derecesinde, bir süreksizlik oluşmakta ve her iki modelde gecikme tahmininde başarısız kalmaktadır [6].

### 1.3. Zamana Bağlı Gecikme Modelleri

Sinyalize kavşaklarda gecikme tahmininde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek ve bu iki model arasındaki boşluğu doldurmak için zamana bağlı gecikme modelleri geliştirilmiştir [7-9]. Zamana bağlı gecikme modelleri, Kimber ve Hollis [10, 11] tarafından tanımlanan koordinat dönüşüm tekniği kullanılarak rastgele ve deterministik modellerin bir karışımı olarak geliştirilmiştir. Şekil 1 de görüldüğü üzere koordinat dönüşümü rastgele kararlı gecikme eğrisine uygulanmakta ve bu eğriyi deterministik gecikme çizgisine asimptotik yaparak eğrinin daha da yumuşatılmasını sağlamaktadır. Böylece, zamana bağlı gecikme modelleri hem doyun olmayan hem de aşırı doyun olan trafik koşulları için sinyalize kavşaklarda gecikmeyi tahmin edebilmekte ve doyunluk derecesi 1,0 de herhangi bir süreksizliğe sahip olmamaktadır.



Şekil 1 Koordinat Dönüşümü

Sinyalize kavşaklarda en yaygın olarak kullanılan zamana bağlı gecikme modelleri “1981 Avustralya Kapasite Rehberi” [12], “1995 Sinyalize Kavşaklar İçin Kanada Kapasite Rehberi” [13] ve “1997 ve 2000 Otoyol Kapasite Kullanım Kılavuzu (HCM 1997 ve 2000)” [14, 15] kaynaklarında yer alan modellerdir. Bu modellerin her biri kendine özgü birkaç özelliği ile diğerlerinden ayrılışlar bile genel yapıları itibarı ile birbirine benzemektedir. Araç gelişlerinin rastgele olduğu, başlangıçta bir kuyruklanmanın bulunmadığı ve trafik ışıkları ile yönetilen bir kavşak göz önüne alındığında aşağıda yazılan denklemler her üç modeli de kapsamaktadır.

$$d = d_U + d_O \quad (3)$$

Denklem 3’ de en genel ve basit biçimi ile verilen gecikme ifadesi ise Denklem 4, 5 ve 6 da değişkenleri ile birlikte açık şekilde yazılabilmektedir.

$$d_U = \frac{C(1 - \frac{g}{C})^2}{2(1 - x\frac{g}{C})} \quad x \leq 1,0 \text{ ise} \quad (4)$$

$$d_U = 0,5(C - g) \quad x > 1,0 \text{ ise} \quad (5)$$

$$d_O = 900T \left[ (x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kx}{cT}} \right] \quad (6)$$

#### 1.4. Gecikme Değişkeni k

Sinyalize bir kavşaktaki gecikme miktarı ve kuyruklanma seviyesi, araç gelişlerine ve kavşağın servis özelliklerine bağlı olarak değişir. Gecikme modellerinde bu özellikler bir gecikme değişkeni olan k ile ifade edilir. Kuyruklanma çözümleme yöntemleri ve benzetim teknikleri, bu değişkeni tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bir sinyalize kavşakta gecikme değişkeni k değerini kuyruklanma çözümleme yöntemi ile tahmin edebilmek için araç gelişlerini, servis imkanını ve kuyruklanma disiplini bilmek gerekir. Ancak bunlardan herhangi biri hakkında yeterli bir bilgi yoksa benzetim teknikleri ve ampirik yaklaşımlarla gecikme değişkeni k tahmin edilir.

Kimber ve diğerleri [16] bilgisayar benzetim tekniğini kullanarak “İlk-giren-ilk-çıkâr” kuyruklanma prensibi ve tek bir servis kanalı için Denklem 7 de ifade edilen  $k$  değerine ait modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarında araç geliş ve servis zamanları için lognormal dağılımı kullanmışlardır. Benzer çalışmaları farklı bir durum için negatif üstel ve Erlang 2 dağılımlarını kullanarak da yapmışlardır.

$$k = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_a}{\tau_a} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_s}{\tau_s} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Kimber ve Daly [17]’nin farklı trafik akımları için kavşaklarda yapmış oldukları gözlem ve çalışmalar neticesinde  $(\sigma_a/\tau_a)$  değerinin 0,75 ile 1,25 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Trafik koşulları ve zamana bağlı olarak  $(\sigma_a/\tau_a)$  değerinin değiştiği bilinmesine rağmen, literatürde kabul gören ve yukarıda belirtilen gecikme modellerinde gecikme değişkeni  $k$  için sabit bir değer kabul edilir. Bu sabit değer ise, Denklem 7 deki ifadeden hareketle, sinyalize olmayan bir kavşağa gelişlerin ve ayrılışların rastgele olduğu düşünülürse,  $(\sigma_a/\tau_a) = (\sigma_s/\tau_s) = 1,0$  ve dolayısı ile de  $k$  değeri 1,0 olacaktır. Diğer taraftan, sinyalize bir kavşakta rastgele gelişler ve üniform ayrılışlar kabulü ile,  $(\sigma_a/\tau_a) = 1$  ve  $(\sigma_s/\tau_s) = 0$  olacaktır. Bu durumda ise gecikme değişkeni  $k$ ’nin değeri 0,5 olacaktır. Ancak kuşkusuz ki bu değer değişen trafik koşulları ve farklı çözümleme süreleri altında her zaman sabit kabul edilmesi bir sinyalize kavşak için gecikmenin hatalı tahmin edilmesine neden olacaktır. Bu nedenle de 1990’lı yıllardan sonra birçok araştırmacı sabit gecikme değişkeninin yerini alacak farklı değişkenlere bağlı bir  $k$  değişkenini modellemeye çalışmışlardır.

Akcelik ve Rouphail [18] tarafından geliştirilen ve Denklem 8 de verilen modelde gecikme değişkeni  $k$ , rastgele gelişler için her bir devre süresindeki kapasitenin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Ancak bu model doyunluk derecesinin 0,5 den büyük olduğu durumlarda kullanılabilmekte ve  $k$  değeri 1,0 ile 0,5 arasında değişmektedir. Aynı araştırmacılar benzer bir çalışmayı da toplu araç gelişleri için yapmışlardır.

$$k = 1,22 (sg)^{-0,22} \quad (8)$$

Tarko ve diğerleri [20] trafik akış yönünü esas alarak ve önceki ve sonraki kavşakların kapasiteleri arasındaki farkları kullanarak gecikme değişkeni  $k$  için Denklem 9 de tanımlanan modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeldeki kuramın esasını, yoğunlukla araç gelişlerinden kaynaklanan rastgele aşırı akım gecikmesi oluşturmaktadır. Bu kurama göre, eğer önceki kavşağın kapasitesi sonra gelen kavşağın kapasitesinden daha az veya eşit ise rastgele aşırı akımın gecikmesi sifıra yaklaşmakta ve dolayısı ile de  $k$  değeri sifır olmaktadır. Bu durumda ise modelin kullanılabilir olabilmesi için  $(sg)_u > (sg)_d$  ve  $x > (sg)_d/100$  olması gerekmektedir.

$$k = 0,408 \left\{ 1 - e^{-0,5[(sg)_u - (sg)_d]} \right\} \quad (9)$$

Daniel [21, 22] sinyalize bir kavşakta ampirik yaklaşımı kullanarak sabit zamanlı, yarı uyarmalı ve tam uyarmalı denetim tipleri için gecikme değişkeni  $k$  değerini hesaplayan bir model geliştirmiştir. Bu modelde  $k$  değişkeni doyunluk derecesinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$k = e^{\beta_0} x^{\beta_1} \quad (10)$$

Daniel’in yaptığı araştırma sonuçlarına göre en yüksek  $k$  değerine sabit zamanlı denetim tipinde ulaşılmıştır. Bu denetim tipinde doyunluk derecesi 0,5 ile 1,0 arasında değişirken,  $k$  değeri de 0,39 ile 0,02 arasında değişmiştir. Benzer şekilde yarı uyarmalı ve tam uyarmalı denetim tiplerinde ise  $k$  değerleri sırası ile 0,197 ile 0,005 ve 0,313 ile 0,016 arasında değişmiştir. Bu çalışmada düşük ve yüksek doyunluk derecelerinde büyük  $k$  değerlerinin etkisinden mümkün olduğunca kaçabilmek için doyunluk derecesi sadece 0,5 ile 1,0 arasında değişen trafik koşulları göz önüne alınmıştır. Bu durumun dışındaki trafik koşulları için model uygulanabilir değildir.

Ampirik yaklaşım ve benzetim tekniği kullanılarak benzer bir çalışma da sabit zamanlı sinyalize kavşaklar için Akgüngör [23] tarafından yapılmış ve gecikme değişkeni  $k$  doyunluk derecesinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde modellenmiştir. Bu modelde  $k$  değeri 0,488 ile 1,50 arasında değişirken trafik akımı ise doyunluk derecesine bağlı olarak 0,1 ile 2,0 gibi geniş bir aralıkta değişebilmektedir.

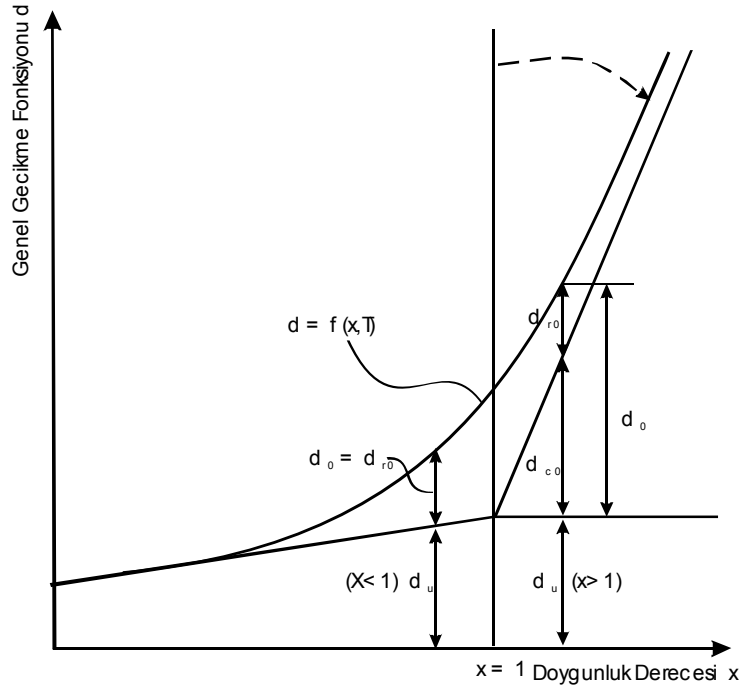
$$k = 0,8x^2 - 1,4x + 1,1 \quad (11)$$

HCM 2000 ve Kanada gecikme modelleri araç gelişlerinin rastgele ayrılışlarının ise üniform olduğu kabulünden hareketle  $k$  değeri olarak 0,5 sabit katsayısını kullanmaktadır. Avustralya gecikme modeli ise  $k$  değerini sabit kabul etmekte, ancak diğer iki modelde olduğu gibi 0,5 değeri yerine 1,5 değerini kullanmaktadır. Avustralya gecikme modelindeki bu yüksek  $k$  değeri ise gene aynı modele özgü olan  $x_0$  değişkeni tarafından düşürülerek dengelenmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki trafik ve zaman koşulları gün içerisinde devamlı değişirken gecikme tahmininde değişken bir  $k$  değerinin yerine sabit bir değerin kullanılması uygun değildir. Özellikle aşırı doyun trafik koşullarında çözümleme süresi gecikme miktarı ile doğrudan orantılıdır ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için de bu sürenin gecikme üzerindeki etkisinin ortaya konulması gereklidir.

Bu çalışma da TRAF-NETSIM benzetim modeli ve ampirik yaklaşım kullanılarak gecikme değişkeni  $k$  çözümleme süresinin bir fonksiyonu olarak modellenmekte ve sinyalize kavşaklarda gecikmenin değişen çözümleme süreleri için daha doğru tahmin edilmesi amaçlanmaktadır.

## 2. AMPİRİK YAKLAŞIM YÖNTEMİ

Daha önceden de belirtildiği üzere, eğer bir sinyalize kavşakta kuyruklanma özellikleri hakkında herhangi bir bilgi mevcut değilse  $k$  değerini tahmin etmek için alternatif bir yöntem olan ampirik yaklaşımdan faydalanılır. Bu yaklaşımda benzetim modelinden elde edilen veya arazide gözlenen toplam gecikme miktarından rastgele gecikme miktarı çekilir. Sonrasında ise rastgele gecikmelerden faydalanılarak  $k$  değerleri hesaplanır ve elde edilen sonuçlara göre model oluşturulur.



Şekil 2. Gecikme Bileşenleri İçin Genel Gecikme Fonksiyonu

Modelin geliştirilmesinde kullanılan yöntemin esası toplam gecikmeyi oluşturan üniform, rastgele aşırı akım ve sürekli aşırı akım gecikmelerinin birbirlerinden ayrıştırılması yöntemine dayanır. Doyun olmayan bir trafik durumu için üniform gecikme miktarı Denklem 4 ile, aşırı akım gecikmesi ise Denklem 6 ile tahmin

edilir. Aşırı akım gecikmesi rastgele ve sürekli aşırı akım gecikmelerinin toplamından oluşur. Sürekli aşırı akım gecikmesi sadece akımın kapasiteyi aştığı durumlarda meydana gelirken, rastgele aşırı akım gecikmesi her doyunluk derecesinde meydana gelebilir. Bu nedenle de rastgele aşırı akım gecikmesi, gecikme değişkeni  $k'$  nın modellenmesinde anahtar niteliği taşıyan bir terimdir. Denklem 3, 12 ve Şekil 2 matematiksel ve grafiksel olarak gecikme terimlerini göstermektedir.

$$d_o = d_{ro} + d_{co} \quad (12)$$

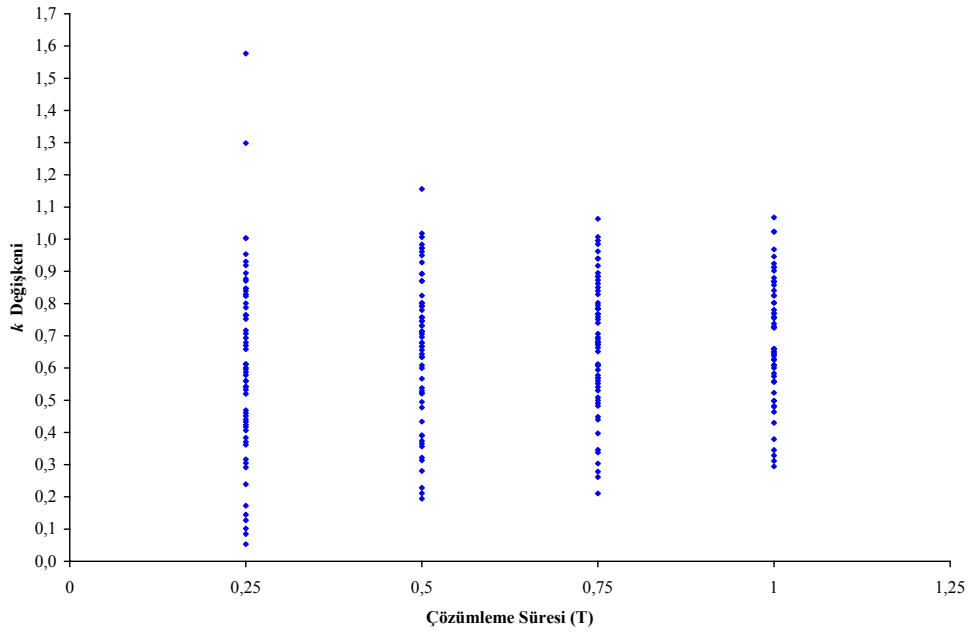
Doygun olmayan akım durumunda, bir başka ifade ile akımın kapasiteden az olduğu durumlarda sürekli aşırı akım gecikme değeri sıfırdır. Bu durumda benzetimden elde edilen gecikme üniform ve rastgele aşırı akım gecikmelerinin toplamına eşittir. Rastgele aşırı akım gecikme miktarının tahmin edilebilmesi için her zaman benzetimden elde edilen gecikme miktarının üniform gecikme miktarından büyük olması gerekir. Eğer benzetimden elde edilen gecikme değeri, üniform gecikme değerinden daha az ise bu durumda rastgele aşırı akım gecikmesinin sıfır olduğu düşünülür.

Doygun akım durumunda yani akımın kapasiteyi aştığı durumlarda rastgele aşırı akım gecikme miktarı, benzetimden elde edilen gecikme miktarından üniform ve sürekli aşırı akım gecikme miktarına ait olan değerlerinin toplamının farkının alınması ile tahmin edilir. Doymun ve doymun olmayan trafik koşulları için gecikme değişkenine ait  $k$  değerleri zamana bağlı gecikme modelinde benzetimden elde edilen rastgele aşırı akım gecikme değerinin yerine konması ile bulunur. Bu çalışmada, göz önüne alınan trafik koşullarında  $k$  değerine ait hesapları yapabilmek ve modelleyebilmek için Kanada gecikme modelinden yararlanılmıştır. 15, 30, 45 ve 60 dakikalık süreler için 60 adet simülasyon yapılarak 240 adet veri elde edilmiştir. Bu verilerden faydalanılarak da gecikme değişkeni  $k$  çözümleme süresinin bir fonksiyonu olarak başarı ile modellenmiştir.

### 3. FARKLI ÇÖZÜMLEME SÜRELERİ İÇİN GECİKME DEĞİŞKENİNİN MODELLENMESİ

Gecikme değişkeni  $k'$  yı matematiksel olarak ifade edebilmek için, TRAF-NETSIM benzetim modeli kullanılarak 4 yaklaşımlı ve her bir yönünde bir şerit olan basit bir sinyalize kavşak tasarlandı. Kavşakta, doğu-batı yönü ana yaklaşım olarak belirlenirken, kuzey-güney yönü tali yaklaşım olarak kabul edildi. Aşırı kuyruklanma neticesinde kavşağın kilitlenmesini önlemek için kavşaktaki her bir yaklaşım uzunluğu 914 m olarak belirlendi. Bununla birlikte kavşağın her bir yaklaşımında doymunluk derecesi 1,3 ile 1,5 arasında iken ve büyük çözümleme sürelerinde kuyruklanmalar oluştu. Kuyruklanmanın olduğu durumlarda kuyruklanma etkisini hesaba katabilmek için kavşak mikro nod olarak kabul edildi ve benzetimi yapıldı. Kavşak iki fazlı bir sinyal sistemi ile işletildi ve toplam devre süresi 90 sn olarak seçildi. Yeşil ışık süreleri ise ana yaklaşımlar için 45 sn, tali yaklaşımlar için 35 sn değerinin uygun olacağı düşünüldü. Sarı ve bütün yönlere aynı anda yanan kırmızı ışık sürerli ise sırası ile 3 ve 2 sn olarak kabul edildi. Kavşağın boşalması için iki taşıt arasındaki ortalama zaman aralığının 2 sn olduğu kabul edildiğinden dolayı kavşaktaki doymun akım oranı 1800 araç/saat/şerit olarak hesaplandı. Araçlar için yeşil ışığın yanması ile oluşan başlangıçtaki kayıp zaman 2 sn ve serbest hız 48 km/sa olarak seçildi. Kavşakta ana ve tali yaklaşıma yönüne giren araç sayısı sırası ile saatte 630 araç ve 490 araç olarak kabul edildi ve bütün yaklaşımlar için kamyon trafiğinin %5 olduğu düşünüldü.

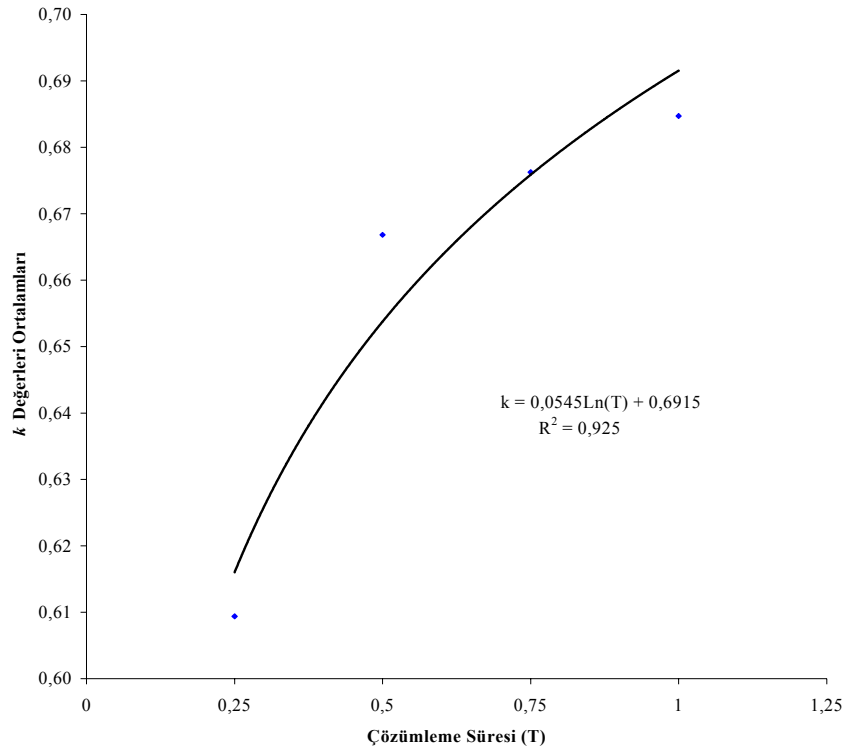
Benzetim yapılırken çözümleme süreleri 15 dakikadan 60 dakikaya kadar değiştirildi ve her bir çözümleme süresine ait 15 benzetim yapıldı. Benzer sürücü ve araç özelliklerinin değişmesini sağlamak amacıyla aynı çözümleme süresi için her bir benzetimde farklı rastgele numaralar kullanıldı. Bununla birlikte farklı çözümleme sürelerini karşılaştırabilmek için aynı trafik hareketlerini elde edilmesi gerektiğinden dolayı kullanılan rastgele numaraların aynısı diğer çözümleme sürelerinde de yer aldı. Toplam yapılan 60 benzetimden 240 adet veri elde edildi. Her bir çözümleme süresi için  $k$  değişkenleri hesaplanarak bunlara ait olan değerler Şekil 3 de verildi.



Şekil 3. k Değişkenleri ve Çözümleme Süreleri

Şekil 4 de ise her bir çözümleme süresi için bu verilerin ortalaması alınarak bu noktaları en iyi ifade eden eğri geçirildi. Elde edilen eğriyi en iyi açıklayan model ise  $R^2 = 0,925$  ile Denklem 13 teki verilen ifadeydi. Çözümleme süresi 0,05 saatten 1,0 saate kadar değişirken modele göre gecikme değişkeni k da 0,5282 den 0,6915 e kadar değişti. Bu değerler arasında kalan çözümleme sürelerine karşılık gelen k değerleri ise Tablo 1 de verildi.

$$k = 0,0545Ln(T) + 0,6915 \quad (13)$$



Şekil 4. k Değişkenleri İçin En Uygun Eğri ve Denklemi

Tablo 1. Çözümleme Süreleri T (saat) ve Bu Sürelere Karşılık Gelen Gecikme Değişkenleri

Çözümleme Süresi (T)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
k Değerleri	0,5282	0,5660	0,5881	0,6038	0,6159	0,6259	0,6343	0,6416	0,6480	0,6537
Çözümleme Süresi (T)	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
k Değerleri	0,6589	0,6637	0,6680	0,6721	0,6758	0,6793	0,6826	0,6858	0,6888	0,6915

#### 4. VERİ ANALİZİ VE GELİŞTİRİLEN MODELİN MEVCUT MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Çözümleme süresinin bir fonksiyonu olarak geliştirilen bu modelde, 4 adet zaman diliminin kullanılmasının nedeni sinyalize kavşaklardaki gecikme tahminlerinde bu sürelerin yaygın olarak kullanılmasıydı. Her bir çözümleme süresi için 60 adet veri incelendiğinde çözümleme süresi artarken sadece k değerine ait olan ortalamaların kısmen arttığı buna karşılık olarak da değişim genişliğinin, standart hatanın, standart sapmanın ve kabul edilebilir hata miktarının azaldığı görüldü. Verilerdeki en büyük dağılım 15 dakikalık çözümleme süresinde meydana gelmesinin nedeni ise kısa zaman sürelerinin kavşak yaklaşımlarında zirve akım oranını yansıtmıştıydı.

Tablo 2. k Değerlerine Ait İstatistik Özetleri

Çözümleme Süresi (T-saat)	Ortalama	Değişim Genişliği	Standart Hata	Standart Sapma	% 95 Güven Aralığı	Kabul Edilebilir Hata Payı (%)
0,25	0,609	1,524	0,037	0,292	0,535 – 0,683	12,1
0,50	0,667	0,962	0,029	0,225	0,609 – 0,723	8,5
0,75	0,676	0,852	0,026	0,204	0,624 – 0,728	7,7
1,00	0,685	0,773	0,024	0,189	0,636 – 0,732	7,0

Bu araştırmada sunulan gecikme modelinin performansını daha iyi tespit edebilmek için literatürde yaygın olarak kullanılan Avustralya, Kanada, HCM 2000 ve deterministik gecikme modelleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma esnasında doygun akım oranı 1500 araç/saat, etkili yeşil ışık süresi 30 sn, devre süresi 90 sn olduğu kabul edilmiş ve dolayısı ile de kapasite 500 araç/saat olarak hesaplanmıştır. Doygunluk derecesinin 0,1 değerinden 2,0 değerine kadar değişebilmesi içinde trafik hacmi 50 araç/saat'ten 1000 araç/saat'e kadar çıkartılmıştır. Bu karşılaştırma aynı trafik koşulları için 15 dakikadan 1,0 saate kadar uzanan dört farklı zaman dilimi için yapılmıştır. Üniform gecikme terimi bütün modellerde yaklaşık aynı yapıda olduğu için karşılaştırmada sadece aşırı akım gecikmeleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca, HCM 2000 gecikme modelinde yer alan ve ilk kuyruklanma gecikmesi olarak ifade edilen  $d_3$  terimi sıfır alınmış, böylece çözümleme süresinin başlangıcında bir kuyruklanmanın olmadığı kabul edilmiştir. On beş dakikalık çözümleme süresi için her bir modele ait aşırı akım gecikme tahminleri Tablo 3 ve Şekil 5 de verilmektedir.

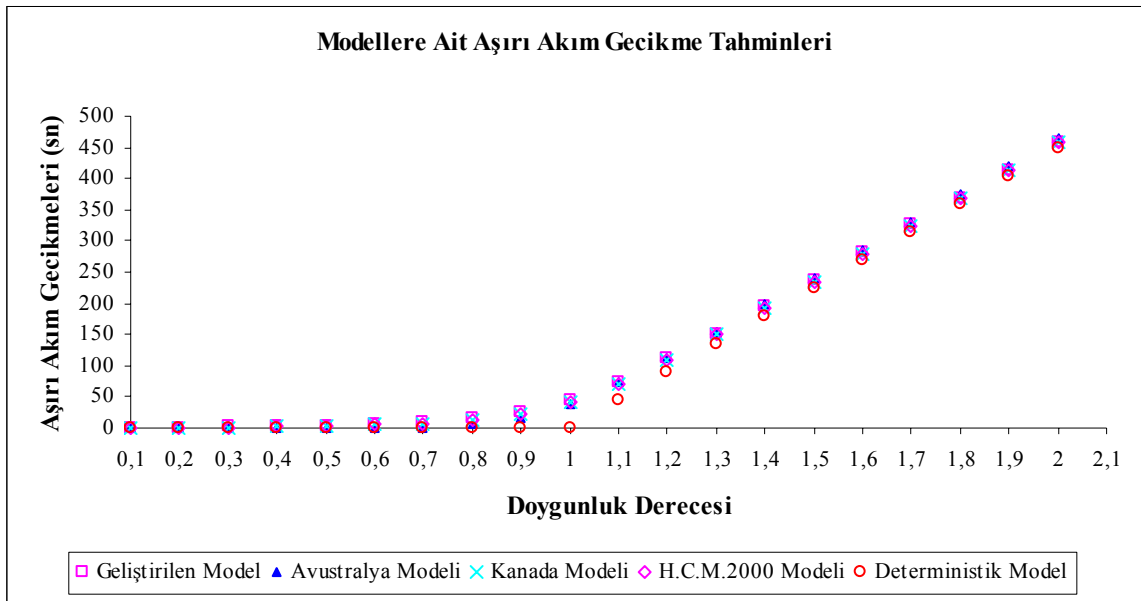
Tablo 3 ve Şekil 5 deki değerler incelendiğinde akım kapasitenin altında olduğu trafik koşullarında, geliştirilen model diğer modellere göre gecikmeleri biraz daha fazla tahmin etmektedir. Gecikmeleri en düşük tahmin eden model ise Avustralya modelidir. Avustralya modelinde  $x_0$  değişkeninden dolayı doygunluk derecesi 0,7 değerinin altında iken aşırı akım gecikme tahmini 0,00 dır. Akımın kapasiteye eşit olduğu durumda ise bütün modellerde aşırı akım gecikme tahmini 40 sn civarındadır.

Doygunluk derecesi 1,0 dan büyük olduğu durumlarda ise geliştirilen modelin Kanada modeli ve HCM 2000 gecikme modelleri ile aşırı akım için benzer gecikme miktarlarını tahmin ettiği görülür. Özellikle doygunluk derecesi 1,1 değerinden itibaren Avustralya gecikme modelinin tahminleri diğerlerinden daha fazladır. Akım kapasitenin 2 katı olduğu durumda ise ortalama aşırı akım gecikme miktarı yaklaşık olarak 460 sn civarındadır. Geliştirilen modelin performansının daha iyi saptanabilmesi için benzer karşılaştırmalar 30 dakikalık, 45 dakikalık ve 60 dakikalık süreler içinde yapılmıştır. Bu çözümleme süreleri içinde bütün modellerin gösterdikleri tepki 15 dakikalık çözümleme süresinde gösterdikleri tepkiye benzer olmuştur. Tablo 4 çözümleme süresinin 1 saat olması durumunda aynı trafik koşulları için modellerin aşırı akım gecikme tahminlerini göstermektedir.



Tablo 3. On Beş Dakikalık Çözümleme Süresi İçin Modellere Ait Aşırı Akım Gecikme Tahminleri

Doygunluk Derecesi (x)	Geliştirilen Model	Avustralya Modeli	Kanada Modeli	H.C.M.2000 Modeli	Deterministik Model
0,1	0,49	0,00	0,40	0,40	0,00
0,2	1,11	0,00	0,90	0,90	0,00
0,3	1,89	0,00	1,54	1,54	0,00
0,4	2,92	0,00	2,38	2,38	0,00
0,5	4,35	0,00	3,54	3,54	0,00
0,6	6,42	0,00	5,25	5,25	0,00
0,7	9,66	0,32	7,93	7,93	0,00
0,8	15,18	5,54	12,63	12,63	0,00
0,9	25,48	16,51	21,82	21,82	0,00
1,0	44,67	38,75	40,25	40,25	0,00
1,1	74,47	72,44	70,34	70,34	45,00
1,2	111,48	112,07	108,00	108,00	90,00
1,3	152,06	154,19	149,12	149,12	135,00
1,4	194,37	197,45	191,82	191,82	180,00
1,5	237,60	241,29	235,33	235,33	225,00
1,6	281,35	285,48	279,28	279,28	270,00
1,7	325,42	329,87	323,51	323,51	315,00
1,8	369,91	374,40	367,93	367,93	360,00
1,9	414,15	419,02	412,46	412,46	405,00
2,0	458,70	463,72	457,09	457,09	450,00



Şekil 5 15 Dakikalık Çözümleme Süresi İçin Modellere Ait Aşırı Akım Gecikmelerinin Karşılaştırılması

Tablo 4. Bir Saatlik Çözümleme Süresi İçin Modellere Ait Aşırı Akım Gecikme Tahminleri

Doygunluk Derecesi (x)	Geliştirilen Model	Avustralya Modeli	Kanada Modeli	H.C.M.2000 Modeli	Deterministik Model
0,1	0,55	0,00	0,40	0,40	0,00
0,2	1,25	0,00	0,90	0,90	0,00
0,3	2,13	0,00	1,54	1,54	0,00
0,4	3,31	0,00	2,39	2,39	0,00
0,5	4,96	0,00	3,59	3,59	0,00
0,6	7,40	0,00	5,36	5,36	0,00
0,7	11,39	0,32	8,27	8,27	0,00
0,8	18,94	5,79	13,87	13,87	0,00
0,9	37,18	20,29	28,03	28,03	0,00
1,0	94,72	77,50	80,50	80,50	0,00
1,1	224,05	216,69	213,40	213,40	45,00
1,2	387,77	385,66	380,44	380,44	90,00
1,3	560,80	561,10	555,17	555,17	135,00
1,4	737,04	738,66	732,39	732,39	180,00
1,5	914,71	917,15	910,67	910,67	225,00
1,6	1093,13	1096,12	1089,52	1089,52	270,00
1,7	1271,99	1275,38	1268,68	1268,68	315,00
1,8	1451,13	1454,82	1448,05	1448,05	360,00
1,9	1630,46	1634,38	1627,56	1627,56	405,00
2,0	1809,91	1814,03	1807,17	1807,17	450,00

## 5. SONUÇLAR

Sunulan bu çalışmada, gecikme değişkeni  $k$  nın sabit bir katsayı olmayıp zamana bağlı bir değişken olması durumunda gecikme üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki araç başına düşen ortalama gecikme miktarı, trafik koşullarının yanı sıra çözümleme sürelerine bağlı olarak da değişmektedir. Özellikle akımın kapasiteyi aştığı aşırı akım durumlarında gecikme miktarı çözümleme süresi ile orantılı olarak artmakta ve gecikme üzerinde baskın bir terim olarak karşımıza çıkmaktadır. Geliştirilen modelde farklı çözümleme süreleri için değişken  $k$  değerlerinin kullanılması ise sinyalize kavşaklarda gecikme (özellikle aşırı akım gecikme) tahmininin mevcut modellere göre daha güvenilir olmasına olanak sağlamaktadır.

## SEMBOLLER

$\sigma_a$	Araç gelişleri arasındaki dağılımın standart sapması
$\tau_a$	Araç gelişleri arasındaki dağılımın ortalaması
$\sigma_s$	Araç ayrılışları arasındaki dağılımın standart sapması
$\tau_s$	Araç ayrılışları arasındaki dağılımın ortalaması
$\beta_0$	Regresyon katsayısı
$\beta_1$	Regresyon katsayısı
$d$	Araç başına düşen ortalama gecikme (sn/araç)
$d_u$	Üniform gecikme (sn/araç)
$d_o$	Aşırı akım gecikmesi (sn/araç)
$d_{ro}$	Rastgele aşırı akım gecikmesi (sn/araç)
$d_{co}$	Sürekli aşırı akım gecikmesi (sn)
$c$	Kapasite (araç/saat)
$k$	Gecikme değişkeni
$C$	Devre süresi (sn)
$g$	Etkili yeşil ışık süresi (sn)
$q$	Akım oranı (araç/saat)
$x$	Doygunluk derecesi veya akım/kapasite oranı
$x_0$	Kendisinden daha küçük değerler için aşırı akım gecikmesini 0 yapan doygunluk derecesi
$T$	Çözümleme süresi (saat)
$s$	Doygun akım (araç/saat)

sg	Her bir devre süresindeki kapasite (araç/devre süresi)
(sg) <sub>u</sub>	Her bir devre süresinde yukarı yöndeki kapasite (araç/devre süresi)
(sg) <sub>d</sub>	Her bir devre süresinde aşağı yöndeki kapasite (araç/devre süresi)

## KAYNAKLAR

1. Allops, R. E., "Delay at a Fixed Time Traffic Signal-I: Theoretical Analysis," **Transportation Science** Vol. 6, No. 3, pp. 260-285, 1972.
2. Webster, F. V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, **Road Research Laboratory**, Her Majesty's Stationery Office, Berkshire, England, 1958.
3. Miller, A. J., Australian Road Capacity Guide Provisional Introduction and Signalized Intersections, **Australian Road Research Board**, Bulletin No. 4, 1968
4. Burrow, Ian., "A Note on Traffic Delay Formulas," **ITE Journal**, Vol. 59, No. 10, October, pp. 29-32, 1989
5. Akcelik, R., "Appendix: A Note on the Generalised Delay Model" Compendium of Technical Papers, **60<sup>th</sup> Annual Meeting of Institute of Transportation Engineers**, Orlando Florida, pp. 217-219, 1990.
6. Hurdle, V.R., "Signalized Intersection Delay Models – A Primer for the Uninitiated," Transportation Research Record 971, **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C., pp. 96-105, 1984.
7. Catling, I., "A Time-dependent Approach to Junction Delays" **Traffic Engineering and Control**, 18(11), 520-523, 526, 1977.
8. Akcelik, R., Time –Dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals. **Australian Road Research Board**. Internal Report AIR 367-1, Victoria, Australia, October, 1980
9. Akcelik, R., "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections," **ITE Journal** Vol. 58 No. 3, March, pp. 23-27, 1988.
10. Kimber, R.M., and Hollis, E.M., "Peak Period Traffic Delay at Road Junctions and Other Bottlenecks" **Traffic Engineering and Control**, 19(10), 442-446, 1978.
11. Kimber, R.M., and Hollis, E.M., Traffic Queues and Delays at Road Junctions Transportation Road Research Laboratory, **TRRL Report** 909, Berkshire, England, 1979.
12. Akcelik, R. Traffic Signals: Capacity and Time Analysis Research Report ARR 123 **Australian Road Research Board**, Melbourne, Australia, 1981
13. Tepley, S. (Ed), Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Second Edition, **Institute of Transportation Engineers**, District 7, Canada, 1995
14. TRB, 1997 Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, TRB Special Report 209, **National Research Council**, Washington D.C. 1997.
15. TRB, 2000 Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, TRB Special Report 209, **National Research Council**, Washington D.C. 2000.
16. Kimber, R. M., Summersgill, I., and Burrow, I. J., "Delay Processes at Unsignalised Junctions: The Interrelation Between Geometric and Queueing Delay" **Transportation Research –B** 20B(6), 457-476, 1986
17. Kimber, R. M., and Daly P. N., "Time-dependent Queueing at Road Junctions: Observation and Prediction" **Transportation Research –B** 20B (3), 187-203, 1986.
18. Akcelik, R., and Roupail, N. M., "Estimation of Delay at Traffic Signals for Variable Demand Conditions" **Transportation Research –B** Vol. 27B(2), 109-131, 1993.
19. Akcelik, R., and Roupail, N. M., "Overflow Queues and Delay with Random and Platooned Arrivals at Signalized Intersections" **Journal of Advanced Transportation**, 28(3), 227-251, 1994
20. Tarko, A., Roupail, N.M., and Akcelik, R., "Overflow Delay at a Signalized Intersection Approach Influenced by An Upstream Signal: An Analytical Investigation" Transportation Research Record 1389, **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C., 82-89, 1994.
21. Daniel, J. R., "Accounting for Non-random Arrivals in the Estimate of Delay at Signalized Intersections" Ph.D. Dissertation, School of Engineering, **Texas A&M University**, USA, 1995.
22. Daniel, J.R., Fambro, D.B., and Roupail, N.M. "Accounting for Non-Random Arrivals in the Estimate of Delay at Signalized Intersections", Transportation Research Record 1555, **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C, 1996
23. Akgungor, A. P., "Analytical Models of Delay Estimation at Signalized Intersections for Variable Demand and Time Conditions", Ph.D. Dissertation, School of Engineering, **University of Pittsburgh**, USA.