

Kentiçi Ulaşım Ağı Bağ Maliyet Fonksiyonlarının Geliştirilmesi

Halim CEYLAN*, **Hüseyin CEYLAN***, **Özgür BAŞKAN***

halimc@pau.edu.tr

hceylan@pau.edu.tr

obaskan@pau.edu.tr

Cenk OZAN*, **Soner HALDENBİLEN***

cozan@pau.edu.tr

shaldenbilen@pau.edu.tr

* Pamukkale Üniversitesi Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Ulaştırma Anabilim Dalı,
Kınıklı Yerleşkesi, 20070, Denizli
Tel: (258) 296 33 51

Öz

Bağ trafik hacimleri ve maliyetleri arasındaki ilişki “*bağ maliyet fonksiyonu*” adı verilen fonksiyonlarla tanımlanır. Ulaşım ağında seyahat edenlerin güzergah seçimlerini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bunlardan en önemlileri arasında seyahat süresi, mesafe, dolaysız maliyetler (yakıt tüketimi, ücretlendirme giderleri, park ücretleri vs.), emniyet ve konfor sayılabilir. Bu faktörlerden bazıları örneğin; seyahat süresi, emniyet ve konfor trafik hacmi ile ilişkili iken diğer faktörler hacimle ilişkili değildir. Bu nedenle ulaşım planlamacıları ve trafik mühendisleri çoğu zaman bu faktörleri genelleştirilmiş maliyet fonksiyonu şeklinde gösterirler.

Bağ trafik hacimleri ve maliyetleri arasındaki ilişki doğrudan ölçümler ile belirlenmektedir ancak pratikte gözlemler yapılması zaman ve maliyet açısından birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir.

Maliyet fonksiyonları deneysel ya da teorik olarak hacim ve maliyet arasındaki ilişki göz önüne alınarak geliştirilmekte ve maliyet kavramı bağlar için kullanılabildiği gibi kavşaklar için de kullanılabilmektedir. Bağlar bilindiği gibi ulaşım ağında caddelere karşılık gelirken düğümler ise kavşakları nitelendirmek için kullanılmaktadır. Trafik atama ve planlama çalışmalarında maliyet fonksiyonunun belirlenmesi ulaşım planlama sürecini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle maliyet fonksiyonları seçilirken genelleştirilmiş maliyet fonksiyonlarının yanında yerel maliyet fonksiyonlarının diğer bir deyişle bölge özelliklerini temsil edebilen maliyet fonksiyonlarının kullanılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada ulaşım ağ tasarımı probleminin çözümünde kullanılan bağ maliyet fonksiyonları tanımlanmış, ayrıca çalışma ağını temsil edecek maliyet fonksiyonunun belirlenmesi için yapılan saha ölçümleri verilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Bu kapsamda dört farklı bağ maliyet fonksiyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller Amerikan Karayolları Bürosu (BPR, 1964) fonksiyonu ile karşılaştırılmış ve ümit verici sonuçlara ulaşılmıştır. Sinyalize kavşakların yoğun olduğu ulaşım ağlarında sinyalizasyon parametrelerinin dahil edildiği bağ maliyet fonksiyonlarının BPR’e göre daha iyi sonuç vermesinden dolayı sinyalizasyon parametrelerini içeren modellerin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: Bağ maliyet fonksiyonu, Ulaşım planlaması, Ulaşım modelleri.

Giriş

Bağ trafik hacimleri ve maliyetleri arasındaki ilişki “*bağ maliyet fonksiyonu*” adı verilen fonksiyonla tanımlanmaktadır. Pratikte seyahat edenlerin rota seçimlerini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bunlardan en önemlileri arasında seyahat süresi, mesafe, yakıt tüketimi, ücretlendirme giderleri, park ücretleri, emniyet ve konfor sayılabilir. Bu faktörlerden bazıları seyahat süresi, emniyet ve konfor trafik hacmi ile ilişkili iken diğer faktörler trafik hacmi ile ilişkili değildir. Bu nedenle ulaşım planlamacıları ve trafik mühendisleri çoğu zaman bu faktörleri genelleştirilmiş maliyet fonksiyonu şeklinde göstermektedirler. Bu durum için genellikle Denklem (1)’de verilen doğrusal fonksiyon kullanılmaktadır;

$$l_j = a_{0j} + a_{1j} \text{süre}_j + a_{2j} \text{ücret}_j + \dots \quad (1)$$

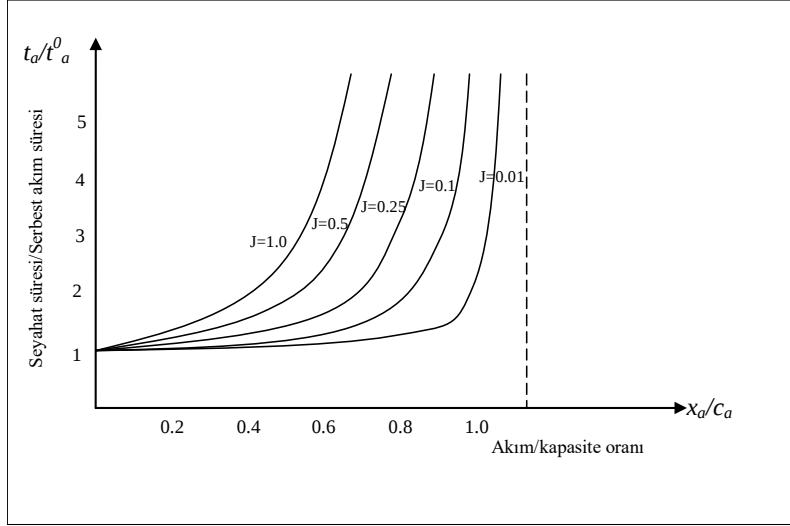
Burada; l_j j seçeneği için maliyet fonksiyonu modelini, $a_{0j}, a_{1j}, a_{2j}, \dots$ j seçeneği için denklem parametrelerinin model katsayılarını temsil etmektedir. Genel anlamda genelleştirilmiş maliyet fonksiyonunun trafik hacmi ile ilişkili en baskın bileşeni seyahat süresidir. Bağ maliyet fonksiyonları için basitleştirilmiş formların kullanımı trafik atama problemindeki matematiksel hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından önemlidir. Basitleştirilmiş maliyet fonksiyonu olarak literatürde genellikle Amerikan Karayolları (BPR, 1964) tarafından üretilen Denklem (2) kullanılmaktadır.

$$t_a = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a'} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

Burada; t_a a bağı üzerindeki seyahat süresini, x_a bağ trafik hacmini, t_a^0 serbest akım seyahat süresini ve c_a' a bağı üzerindeki pratik kapasite değerini vermektedir. α ve β parametreleri için literatürde sıklıkla kullanılan değerler sırasıyla 0,15 ve 4 değerleridir. Bu değerlerden anlaşılacağı üzere a bağı üzerindeki pratik kapasite, serbest akım seyahat süresinden %15 fazla seyahat süresine sahip akım değerine eşit olup aynı zamanda o bağ üzerindeki maksimum mümkün akıma eşittir. Trafik akım teorisine karşılık olarak BPR (1964) fonksiyonunun ürettiği maliyet fonksiyon eğrileri herhangi bir kapasite değerine asimptotik değildir. Kapasite akıma asimptotik olan fonksiyon, kuyruk teorisi şartları altında Davidson (1966) tarafından önerilmiş olup Denklem (3)’de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$t_a = t_a^0 \left[1 + J \frac{x_a}{c_a - x_a} \right] \quad (3)$$

Burada c_a yol kapasitesi, J model parametresi olarak ifade edilmektedir. Genelleştirilmiş maliyet fonksiyonunda olduğu gibi t_a^0 değeri ise serbest akım seyahat süresini göstermektedir. Davidson (1966) tarafından önerilen bağ maliyet fonksiyonu arazi ölçümleri ile daha kolay olarak tahmin edilebilmektedir. J parametresi eğrinin eğimini kontrol etmekte olup etkisi Şekil 1’de görülmektedir. Parametre değeri azaldıkça eğri dikleşmekte ve asimptota yaklaşmaktadır.



Şekil 1. Bağ maliyet fonksiyonu (Davidson, 1966)

Şekil 1’de yatay ekseninde verilen x_a/c_a oranı hacim/kapasite oranıdır. Düşey eksen a bağındaki seyahat süresinin serbest akım seyahat süresine oranı olarak gösterilmiştir. Kuramsal olarak kentiçi yollardaki seyahat süresi, verilen bir akım değeri için ortalama hareket süresi ve kavşaklarda bekleme ile harcanan ortalama sürenin toplamı olarak karşımıza çıkmakta ve sıkışıklık etkisi çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Bu nedenle bağ maliyet fonksiyonu elde edebilmek için seyahat süreleri kavşak gecikme formüllerine dâhil edilerek maliyet fonksiyonu elde edilir. Ayrıca sinyalizasyon kavşaktaki kapasite değeri $c_a \cdot (g/c)$ kadar olabilmektedir. Burada c_a kavşaktaki bağ kapasitesi, g/c ise bağdaki yeşil sürenin devre süresine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle kavşaklardaki sıkışıklık etkisinin bağ maliyet fonksiyonu üzerinde etkisi, ancak bağ kapasitesine erişilmeden önce olmaktadır. Bağ seyahat süreleri bilindiği gibi yol genişliğine yani diğer bir anlamda her bir yöndeki şerit sayısına bağlıdır. Bağ boyunca hareket eden araçlar diğer bağlardaki araçlarla ve aynı zamanda hız limitleri, park eden araçlar, taşıt kompozisyonu, yol kenarındaki yaya hareketleri ve trafik yavaşlatma uygulamaları vs. gibi birtakım yol şartları ile sürekli etkileşim halindedirler.

Maliyet fonksiyonları deneysel ya da teorik olarak trafik hacmi ve maliyet arasındaki ilişki göz önüne alınarak geliştirilebilir. Genel olarak maliyet kavramı bağlar için kullanılabildiği gibi bunun yanında kavşaklar için de kullanılabilir. Bağlar bilindiği gibi ulaşım ağına caddelere karşılık gelirken düğümler ise kavşakları nitelendirmek için kullanılmaktadır. Trafik atama ve planlama çalışmalarında maliyet fonksiyonunun özellikleri yapılan çalışmayı oldukça etkilemekte ve uygulanan çözüm yöntemlerinin yakınsama özelliklerine büyük ölçüde etki yapmaktadır. Bu nedenle maliyet fonksiyonları seçilirken genelleştirilmiş maliyet fonksiyonlarının yanında yerel maliyet fonksiyonlarının yani bölge özelliklerini temsil edebilen maliyet fonksiyonlarının kullanılması oldukça önemlidir.

Maliyet fonksiyonunun rolü trafik atama sürecinde ortaya çıkmaktadır. Trafik atama problemini çözebilmek için çözüm algoritmaları kullanılmakta, Beckmann formülasyonu tabanlı Wardrop’un I. prensibi için uygulanan çözüm algoritmalarına maliyet fonksiyonu kolayca ve hızlıca entegre edilebilmelidir. BPR (1964) ve Campbell ve diğ. (1959) tarafından üretilen maliyet fonksiyonları bu iki isteğe de karşılık verebilmektedir. Çalışmanın amacı, ulaşım ağı tasarımı için kullanılacak olan literatürde mevcut bağ maliyet fonksiyonlarının irdelenmesi ve çalışma ağını temsil edebilecek bağ maliyet fonksiyonlarının geliştirilmesidir.

Önceki Çalışmalar

Bağ trafik hacimleri ve bağ maliyetleri arasındaki ilişki genellikle gözlemler ile elde edilebilmekte, ancak zaman ve maliyet açısından her bir bağ için maliyet fonksiyonlarının bulunması oldukça zor olabilmektedir. Bu yüzden genelleştirilmiş maliyet fonksiyonlarının zaman ve maliyet açısından daha sürdürülebilir olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte bağ maliyet fonksiyonlarını elde edebilmek için trafik teorileri ve analizleri kullanılmaktadır. Bunlar mikroskobik ve makroskobik gösterimler olarak ifade edilebilir. Mikroskobik gösterimde; trafik, birtakım basit kurallara sahip bireysel araç hareketleri olarak ifade edilip; sabit hızda seyahat, kuyruk oluşumu, öndeki aracı takip etme veya belirli bir yere rastgele varış gibi durumlar göz önüne alınmaktadır. Mikroskopik gösterim türü kavşak yakınındaki veya içindeki trafik tanımlaması için bağ üzerindeki trafik hareketlerinin tanımlanmasından daha uygundur. Makroskobik gösterimde ise trafik hidrodinamikte olduğu gibi sıkıştırılabilir akışkanlar mantığına uygun olarak ifade edilmeye çalışılır. Başka bir deyişle trafik, trafik hacmi, hız ve yoğunluk olarak tanımlanan üç değişkenle ifade edilmektedir.

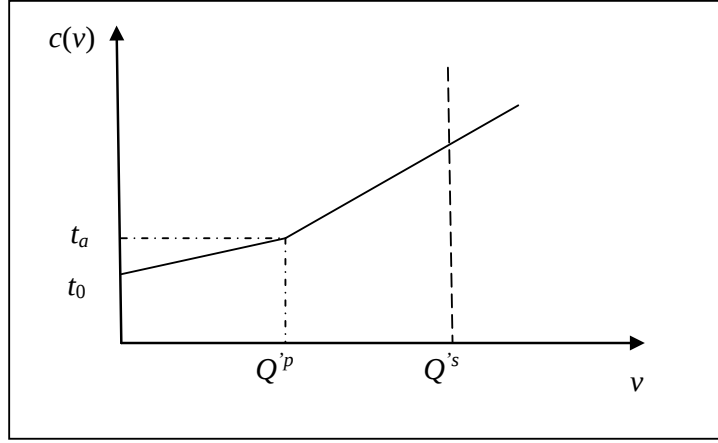
Branston (1976) maliyet fonksiyonları üzerinde araştırmalar yapmış ve bu fonksiyonların gözlem verileri üzerinde uygulanabilirliği konusunda çalışmıştır. Bağ maliyet fonksiyonları deneysel ve teorik olmak üzere iki kategoride incelenmiştir. Deneysel yöntemde, gözlem verileri üzerinden uygun maliyet fonksiyonlarının bulunması amaçlanmaktadır. Teorik yaklaşımda ise maliyet fonksiyonu, trafik hacmi ile seyahat süresi ve kavşak bekleme zamanlarının toplamından oluşan seyahat süresinin arasındaki ilişkiden faydalanılarak üretilmiştir. Genellikle uzunluk, genişlik, park kısıtlaması, dönüş hareketleri ve sinyal zamanları gibi fiziksel karakteristikler maliyet fonksiyonunun şeklini ve fonksiyon içindeki parametre değerlerini belirlemektedirler. Akçelik (1991), Branston (1976) tarafından önerilen fonksiyonun olumsuz yönlerini ortadan kaldıran bağ maliyet fonksiyonu önermiştir.

Karayolu Kapasite El Kitabında (HCM, 2000) kapasite; aşırı gecikmelere sebebiyet vermeyecek derecede trafik yoğunluğu olması ve hâkim yol ve trafik koşulları altında bağın belirlenen bir noktasından bir saat içinde geçebilecek maksimum taşıt sayısı olarak tanımlanmıştır. Diğer taraftan kararlı durum kapasitesi ise trafik akımının mikroskobik ve stokastik karakterlerinden dolayı oluşan dalgalanmaların göz ardı edildiği durumdaki kapasite olarak tanımlanmaktadır. Irwin ve diğ., (1961) Denklem (4) ve (5)'te görüldüğü gibi iki doğrusal kısımdan oluşan bir maliyet fonksiyonu önermişlerdir.

$$c(v) = t_a + \alpha_1(v' - Q'^p) \quad v' < Q'^p \quad (4)$$

$$c(v) = t_a + \alpha_2(v' - Q'^p) \quad v' \geq Q'^p \quad (5)$$

Burada $t_a = t_0 + \alpha_1 Q'^p$, t_0 serbest akım seyahat süresi, v' a bağı üzerindeki şerit başına akım, Q'^p a bağı üzerinde şerit başına pratik kapasite olarak ifade edilmiştir. Şekil 2'de önerilen maliyet fonksiyonunun grafiği görülmektedir.



Şekil 2. Maliyet fonksiyonu (Irwin ve diğ., 1961)

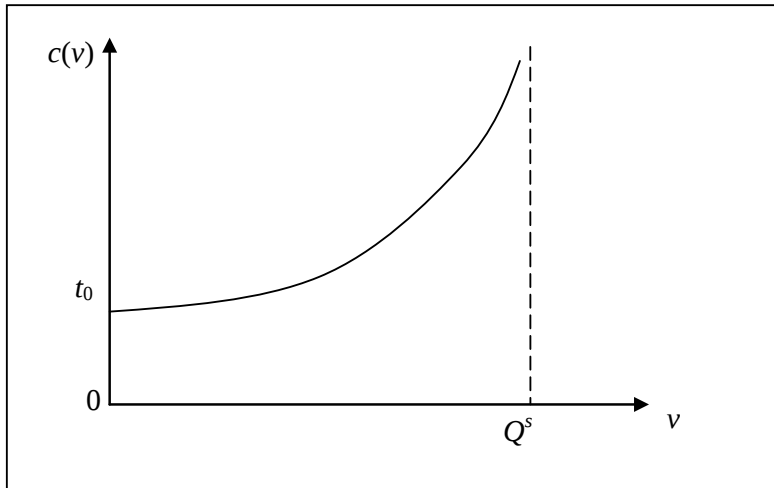
Smock (1962) tarafından önerilen maliyet fonksiyonu Detroit bölgesi ulaşım planlaması çalışmalarında kullanılmıştır. Önerilen maliyet fonksiyonu Denklem (6)'da verilmiştir.

$$c(v) = t_0 \exp(v/Q^s) \quad (6)$$

Uygulamada Q^s (kararlı durum) değeri her bir bağ için bağın başındaki ve sonundaki kavşakların kapasitelerinin ortalaması olarak tahmin edilmiştir. Önerilen fonksiyon, Michigan şehrinde kullanılmak üzere sezgisel iteratif kapasite kısıtlı atama modelinin içinde kullanılmıştır. Mosher (1963) tarafından önerilen logaritmik maliyet fonksiyonu Denklem (7)'de gösterilmiştir. Önerilen fonksiyonun $v = Q^s$ noktasında asimtotu mevcuttur.

$$c(v) = t_0 - \ln(1 - v/Q^s) \quad v < Q^s \quad (7)$$

Bununla birlikte gerçek ulaşım ağlarında seyahat maliyeti yol ağı kullanılamaz duruma gelmedikçe sınırlı olarak artar. İteratif atama modeli hesaplarında asimptotik fonksiyonun bu özelliği nedeni ile kapasitenin aşılması durumunda trafik hacimlerinin bağlar üzerine atanması durumunda maliyet fonksiyonunun hesaplanması zorlaşmaktadır. Şekil 3'de bağ trafik hacmi ve maliyet arasında belirtilen asimptotik maliyet fonksiyonu ilişkisi görülmektedir.



Şekil 3. Asimtotik bağ maliyet fonksiyonu (Mosher, 1963)

Soltman (1965) tarafından Pittsburgh bölgesi ulaşım planlaması çalışmaları için önerilen sıkışıklık fonksiyonu Denklem (8)'de verilmiştir.

$$c(v) = t_0 2^{v/Q^p} \quad v/Q^p \leq 2 \quad (8)$$

Tanımlanan maliyet fonksiyonu Pittsburgh şehri ulaşım planlama çalışmaları kapsamında atama modelinin içinde kullanılmıştır. Bu çalışmada gözlemlenen ve atanan trafik hacim değerleri arasında karşılaştırma örnekleri bulunmamaktadır. Bu durum, maliyet fonksiyonunun etkinliğinin ölçülmesinde birtakım eksiklikler olduğunu göstermektedir. Amerikan Trafik Araştırmaları Birliği (1966) tarafından Winnipeg bölgesi için yapılan çalışmalarda Denklem (9)'da verilen maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Denklem (9)'da belirtilen Bu maliyet fonksiyonunda mesafe başına seyahat maliyeti ile bağdaki şerit başına akım ilişkilendirilmiştir. Winnipeg şehrinin ulaşım ağındaki bağlar şerit başına pratik kapasiteleri ve hız limitlerine göre iki kategoriye ayrılmıştır. Her bir kategori için yüksek akım değerlerine ait az nokta bulunurken, düşük akım değerleri için çok daha fazla nokta tespit edilmiş olmasına rağmen yüksek akım değerleri için simülasyon yapılmıştır. Ardından maliyet fonksiyonu bu eğriye uydurulmuştur.

$$c(v) = \alpha_1 + \alpha_2 (v' - \alpha_3) + \sqrt{\alpha_2^2 (v' - \alpha_3)^2 + \alpha_4} \quad (9)$$

Teorik yaklaşımlarda bağ üzerindeki seyahat maliyeti ortalama hareket maliyeti ve kavşaklarda kuyruk oluşumlarında harcanan sürelerin toplamı olarak Denklem (10)'da verilmiştir.

$$c(v) = \frac{(t_r + t_q)}{D} \quad (10)$$

Burada t_r ve t_q hareket ve kuyruk beklemelelerinde harcanan seyahat maliyeti, D ise bağ uzunluğu olarak tanımlanacaktır. Campbell ve diğ. (1959) tarafından önerilen, Chicago bölgesindeki sinyalizasyon arterlerinde kullanılmak üzere hız ve hacim/kapasite oranının ilişkilendirildiği maliyet fonksiyonu Denklem (11)'de verilmiştir.

$$c(v) = \begin{cases} t_0 & (v/Q \leq 0.6) \\ t_0 + \alpha(v/Q - 0.6) & (v/Q > 0.6) \end{cases} \quad (11)$$

Wardrop (1968) tarafından geliştirilen maliyet fonksiyonu genel ortalama hız ile trafik hacmi arasındaki ilişkiyi ortaya koyan maliyet fonksiyonudur. Bağ bazında maliyet fonksiyonu oluşturmak yerine genel ulaşım ağı için maliyet fonksiyonu tanımlanmış ve Londra şehrinde uygulanmıştır. Bu fonksiyonda sinyalizasyon kavşaklarındaki kuyruk maliyeti ve sinyalizasyon kavşakları arasındaki hareket maliyeti fonksiyonun içine dâhil edilmiştir. Bu yöntem, Campbell ve diğ. (1959) tarafından önerilen kavşak gecikmelerinin hesaplanmasında kullanılan sezgisel yöntemden farklıdır. Diğer taraftan Wardrop (1968) tarafından geliştirilen, hem trafik uyarmalı hem de sabit sinyalizasyon kavşakları için ortalama gecikme ve trafik hacmi arasındaki ilişkiyi temsil eden yaklaşık formülasyon Denklem (12)'de verildiği gibidir.

$$c(v) = \frac{t_0}{(1 - v/Q)} + \frac{\alpha_2}{(1 - v/\alpha_1)D} \quad (12)$$

Tablo 1'de literatürde kullanılan maliyet fonksiyonlarının türleri ve zorluk dereceleri belirtilmiştir.

Tablo 1. Maliyet fonksiyonları karşılaştırması

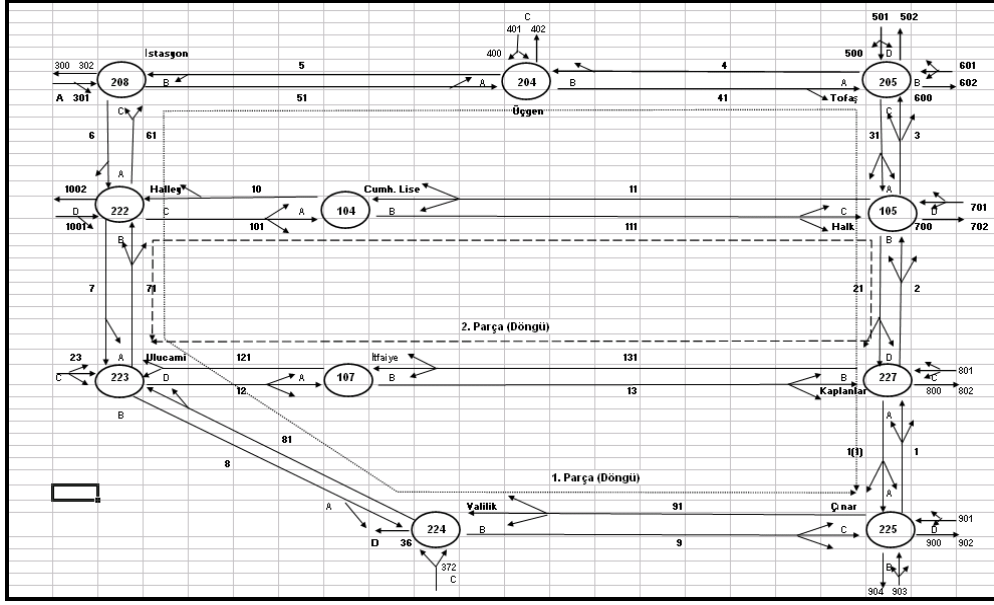
Maliyet Fonksiyonu tipi	Tür	Zorluk derecesi
Irwin ve diğ. (1961)	Polinomial	Kolay
Smock (1962)	Exponansiyel	Oldukça kolay
Mosher (1963)	Logaritmik	Oldukça kolay
BPR (1964)	Polinomial	Kolay
Soltman (1965)	Polinomial	Kolay
Campbell ve diğ. (1959)	Polinomial	Kolay
Wardrop (1968)	Polinomial	Kolay

Geliştirilen Bağ Maliyet Fonksiyon Modelleri

Çalışmada ilk olarak bağ maliyet fonksiyonu geliştirmek için çalışma ağı üzerinde güzergahlar belirlenmiştir. Bu amaçla çalışılan ulaşım ağı ikiye bölünmüş, oluşturulan alt ağlar sabah ve akşam olmak üzere iki gün içinde sayılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler binek araç kullanılarak mevcut akım koşullarında en az 2 tur atılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’de çalışma ağı ve ölçüm için yapılan güzergahlar görülmektedir. Ölçümlerde sürücünün yanında kronometre ile süre tutan yardımcı bir eleman kullanılmıştır. Yardımcı eleman kronometreyi turun başında sıfırlamış ve her bağın sonunda elde ettiği zaman değerini kayıt altına almıştır. Burada kavşaklardaki kesişmelerden dolayı oluşan gecikmeler bağ seyahat sürelerine dahil edilmiştir.

İlk gün 10 bağdan oluşan ve uzunluğu 4459 m olan güzergahta sabah 6 tur akşam 4 tur atılmak suretiyle toplam 10 turla sayım gerçekleştirilmiştir. Sayımların 5 adedi bir yönde kalanı ise diğer yönde gerçekleştirilmiştir. İkinci gün 7 bağdan oluşan ve uzunluğu 3365 m olan güzergahta sabah 6 akşam 5 tur atılarak toplam 11 turla sayım gerçekleştirilmiştir. Sayımların 7 adedi bir yönde, 4 adedi ise diğer yönde gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler sonucunda çalışma ağının 1. güzergahında sabah ölçümlerinde 596-918 sn’lik, akşam ise 710-918 sn’lik değerler belirlenmiştir. 2. güzergahta ise sabah 340-494 sn’lik, akşam 510-548 sn’lik toplam seyahat süreleri elde edilmiştir. Kümülatif olarak yapılan ölçümler sonucunda her bağa ait seyahat süresi belirlenmiştir. Seyahat süresi ölçümlerinden elde edilen veriler yardımı ile herbir bağın uzunluğuna bağlı olarak işletme hızları hesaplanmış ve Tablo 2 - 3’de verilmiştir (Ceylan, 2010).



Şekil 4. Çalışma ağı

Tablo 2. Ölçülen bağ işletme ve ortalama hızları (SABAH)

Bağ No	Ölçüm No				Ort.Hız (m/sn)
	1	2	3	4	
1	10,00	10,00	10,87		10,29
2	4,00	5,29	3,62		4,30
3	2,46	1,60	1,81		1,96
4	12,21	17,50	6,25		11,99
5	7,68	6,44	4,34		6,15
6	9,26	1,94	5,00		5,40
7	4,86	7,19	10,15		7,40
8	14,53	8,77	15,50		12,93
9	1,63	8,66	9,59		6,63
10	4,17	6,82	9,09	9,38	7,36
11	6,09	7,88	10,54	9,51	8,51
12	11,30	6,34	9,63	10,83	9,53
13	8,50	5,08	8,35	5,76	6,92
1(1)	5,49	8,93	10,64		8,35
21	3,33	10,00	8,68		7,34
31	8,25	1,40	1,65		3,77
41	18,75	6,73	11,67		12,38
51	9,82	14,26	8,81		10,96
61	6,25	2,91	6,58		5,25
71	8,85	8,21	2,48		6,51
81	12,24	15,50	15,00		14,25
91	5,04	6,34	5,00		5,46
101	5,45	7,89			6,67
111	7,88	6,45			7,16
121	11,82	3,25			7,53
131	4,97	6,50			5,74

Tablo 3. Ölçülen bağ işletme ve ortalama hızları (AKŞAM)

Bağ No	Ölçüm No			Ort.Hız (m/sn)
	1	2	3	
1	5,88	4,90		5,39
2	7,08	3,11		5,09
3	3,67	7,50		5,58
4	11,67	7,72		9,69
5	3,26	4,34		3,80
6	4,72	9,26		6,99
7	10,45	2,72		6,59
8	3,50	3,47		3,48
9	5,18	3,70		4,44
10	1,88	4,23		3,05
11	10,13	6,84		8,49
12	8,13	7,22	7,88	7,74
13	9,01	7,22	4,76	7,00
1(1)	3,65	2,54		3,09
21	3,24	7,54		5,39
31	5,32	2,29		3,81
41	7,39	9,55		8,47
51	8,44	7,13		7,78
61	5,32	8,06		6,69
71	8,21	2,76		5,49
81	14,09	9,12		11,60
91	4,58	5,18		4,88
101	8,82	6,12	5,77	6,91
111	3,70	4,51	6,96	5,06
121	2,63	8,13		5,38
131	5,55	4,95		5,25

Maliyet fonksiyonu oluşturulurken öncelikle Tablo 4’de verilen veri seti, Tablo 2 ve 3 kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen veri setinde, her bir bağa ait uzunluk, ortalama işletme hızı, trafik hacmi, trafik hacminin trafik koşullarına göre belirlenmiş kapasiteye oranı, bağın ucundaki yeşil süre ve toplam devre süresi, yeşil sürenin devre süresine oranı, bağda ölçülen seyahat süresi ve serbest akım koşullarında bağ seyahat süresi bulunmaktadır. Trafik hacim kapasite oranları belirlenirken hâkim trafik koşulları dikkate alınmıştır. İnceleme yapılan ağda yol kısmen bölünmüş kısmen bölünmemiş 2*2=4 şeritli, şerit genişlikleri 2,75-3,25 m arasında değişen ve kapasiteyi azaltıcı çok sayıda kavşak ve yol içi parkı bulunmaktadır. Bu nedenle bir yön için kapasite değeri 900 taşıt/saat olarak alınmıştır. Yeşil süreler ve devre süreleri sahada yapılan ölçümlerle bulunmuş ve oranlanarak veri setine eklenmiştir. Bağlar için gözlemlenen seyahat süreleri ise yapılan ölçümlerde elde edilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

Modelleme çalışmaları için öncelikle BPR (1964)’ın önerdiği Denklem (2) ile verilen model parametreleri Microsoft Excel “çözücü” yardımı ile bulunmuş ve geliştirilen diğer modellerin başarıları amaç fonksiyonlarındaki iyileşme ve gözlem değerleri ile model değerleri arasındaki hataların ortalamalarının karşılaştırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak hataların karelerinin toplamının minimize edilmesi ile elde edilen fonksiyon kullanılmıştır. Oluşturulan modeller

BPR (1964) modeline devre süresi ve yeşil süresi parametrelerinin çeşitli formlarda modellere eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Denklem (13)-(16)'da BPR(1964) ve geliştirilen modellerin yapıları görülmektedir. Model 1'de BPR (1964) modeline yeşil sürenin devre süresine oranı lineer olarak eklenmiştir. Model 2'de yeşil sürenin devre süresine oranı, hacim kapasite oranına ilave edilmiş ve üssel bir formda fonksiyon tanımlanmıştır. Model 3'de ise yeşil sürenin üstel formu ilave edilmiş ve üs olarak yeşil sürenin devre süresine oranı alınmıştır.

$$\text{Model BPR (1964)} \quad t = t_0 * (1 + \alpha (q/c)^\beta) \quad (13)$$

$$\text{Model 1} \quad t = t_0 * (1 + \alpha * (q/c)^\beta + \gamma * (g/C)) \quad (14)$$

$$\text{Model 2} \quad t = t_0 * (1 + \alpha * (q/c) + \beta * (g/C))^\gamma \quad (15)$$

$$\text{Model 3} \quad t = t_0 * (1 + \alpha * (q/c)^\beta + \gamma * g^{(g/C)}) \quad (16)$$

Burada; t_0 serbest akım koşullarında seyahat süresi (sn), q/c hacim değerlerinin kapasiteye oranı, g bağ ucundaki yeşil süre (sn), C bağ ucundaki toplam devre süresi (sn), g/C bağ ucundaki yeşil sürenin devre süresine oranı, α , β , γ model parametreleridir.

Modelleme çalışmalarında ilk olarak Tablo 4'de verilen veri seti bütün olarak ele alınmıştır. Bu şekilde yapılan parametre tahminleri sonucunda elde edilen modellerin performansları oldukça düşük bulunmuştur. İkinci aşama olarak veri seti q/c oranları dikkate alınarak iki gruba ayrılmıştır. Eşik değer olarak 0,85 değeri seçilmiş ve fonksiyonların formu değiştirilmeden parçalı olarak tanımlanmış ve parametreler belirlenmiştir. Denklem (17)-(20)'de elde edilen bağıntılar ve parametreler verilmiştir (Ceylan, 2010).

$$\text{Model BPR (1964)} \quad t = t_0 * (1 + 0,58 (q/c)^{0,12}) \quad (17)$$

$$\text{Model 1} \quad t = t_0 * (1 + 1,05 * (q/c)^{2,07} + 0,82 * (g/C)) \quad q/c < 0,85 \quad (18)$$

$$t = t_0 * (1 + 2,03 * (q/c)^{0,39} - 4,42 * (g/C)) \quad q/c > 0,85$$

$$\text{Model 2} \quad t = t_0 * (1 + 0,001 * (q/c) + 0,001 * (g/C))^{450,51\gamma} \quad q/c < 0,85 \quad (19)$$

$$t = t_0 * (1 + 13,04 * (q/c) - 31,97 * (g/C))^{0,22} \quad q/c > 0,85$$

$$\text{Model 3} \quad t = t_0 * (1 + 1,20 * (q/c)^{1,69} + 0,03 * g^{(g/C)}) \quad q/c < 0,85 \quad (20)$$

$$t = t_0 * (1 + 0,98 * (q/c)^{0,53} - 0,12 * g^{(g/C)}) \quad q/c > 0,85$$

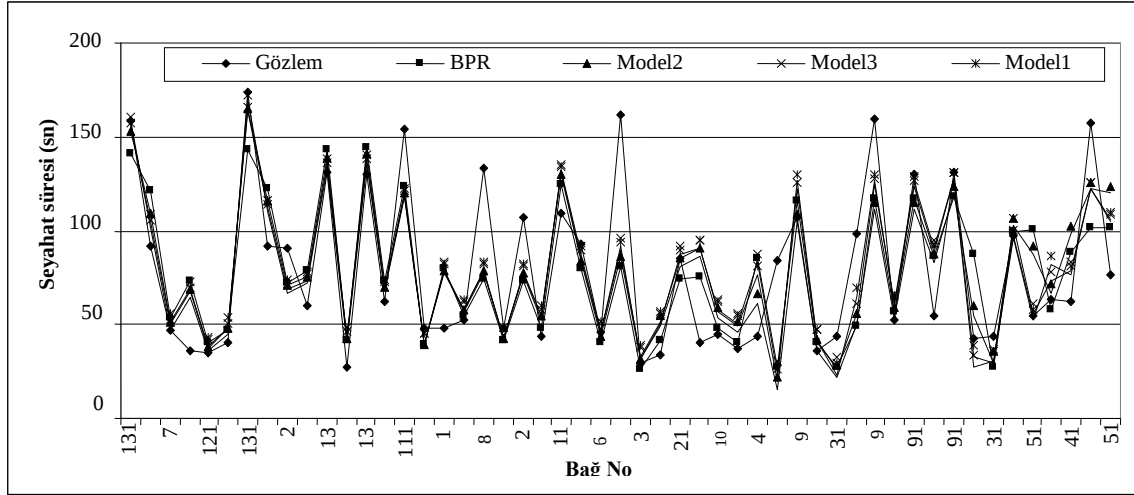
Tablo 4. Bağ maliyet fonksiyonu veri seti

Bağ No	Uzunluk (m)	Hız (m/sn)	q	q/c	Yeşil süre (sn)	Devre süresi (sn)	Oran	Gözlem (sn)	t_0
131	910	5,74	252	0,28	60	85	0,71	158,54	93,60
111	780	8,51	324	0,36	22	100	0,22	91,66	80,23
7	345	7,4	351	0,39	31	100	0,31	46,62	35,49
8	465	12,93	367	0,41	30	100	0,30	35,96	47,83
121	260	7,53	367	0,41	23	88	0,26	34,53	26,74
101	300	7,36	377	0,42	40	88	0,45	40,76	30,86
131	910	5,25	378	0,42	60	85	0,71	173,33	93,60
11	780	8,49	402	0,45	22	88	0,25	91,87	80,23
2	460	5,09	414	0,46	30	100	0,30	90,33	47,31
1(1)	500	8,35	414	0,46	27	100	0,27	59,88	51,43
13	910	6,92	438	0,49	23	88	0,26	131,50	93,60
12	260	9,53	450	0,50	40	100	0,40	27,28	26,74
13	910	7,00	456	0,51	23	88	0,26	130,00	93,60
21	460	7,34	462	0,51	18	85	0,21	62,67	47,31
111	780	5,06	486	0,54	22	100	0,22	154,15	80,23
61	250	5,25	506	0,56	28	110	0,25	47,62	25,71
1	500	10,29	521	0,58	18	85	0,21	48,59	51,43
7	345	6,59	526	0,58	41	120	0,34	52,39	35,49
8	465	3,48	550	0,61	40	120	0,33	133,50	47,83
121	260	5,38	550	0,61	23	88	0,26	48,33	26,74
2	460	4,30	564	0,63	30	100	0,30	106,98	47,31
101	300	6,91	566	0,63	40	88	0,45	43,42	30,86
11	780	7,16	585	0,65	22	88	0,25	108,94	80,23
1	500	5,39	625	0,69	18	85	0,21	92,73	51,43
6	250	5,4	645	0,72	30	100	0,30	46,30	25,71
1(1)	500	3,09	663	0,74	27	120	0,23	161,61	51,43
3	165	5,58	675	0,75	47	110	0,43	29,55	16,97
12	260	7,74	675	0,75	50	120	0,42	33,59	26,74
21	460	5,39	699	0,78	18	85	0,21	85,34	47,31
81	465	11,60	704	0,78	40	120	0,33	40,07	47,83
10	300	6,67	729	0,81	20	100	0,20	44,98	30,86
61	250	6,69	759	0,84	28	120	0,23	37,36	25,71
4	525	11,99	828	0,92	35	100	0,35	43,79	54,00
3	165	1,96	915	1,02	47	110	0,43	84,18	16,97
9	710	6,63	942	1,05	30	100	0,30	107,09	73,03
6	250	6,99	967	1,07	40	120	0,33	35,78	25,71
31	165	3,77	1044	1,16	40	100	0,40	43,77	16,97
10	300	3,05	1094	1,22	30	120	0,25	98,36	30,86
9	710	4,44	1130	1,26	40	120	0,33	159,90	73,03
71	345	6,51	1148	1,28	35	100	0,35	53,00	35,49
91	710	5,46	1166	1,30	35	100	0,35	130,04	73,03
4	525	9,69	1242	1,38	45	120	0,38	54,16	54,00
91	710	5,44	1399	1,55	45	120	0,38	130,63	73,03
41	525	12,38	1411	1,57	70	110	0,64	42,41	54,00
31	165	3,81	1566	1,74	40	100	0,40	43,34	16,97
5	599	6,15	1589	1,77	49	110	0,45	97,40	61,61
51	599	10,96	1610	1,79	61	100	0,61	54,65	61,61
71	345	5,49	1722	1,91	35	120	0,29	62,87	35,49
41	525	8,47	2116	2,35	60	110	0,55	61,98	54,00
5	599	3,80	2383	2,65	49	110	0,45	157,71	61,61
51	599	7,78	2415	2,68	61	120	0,51	76,95	61,61

Geliştirilen maliyet fonksiyon modellerinin performansları Tablo 5’de, model sonuçları ile gözlem değerlerinin grafiksel gösterimi ise Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Modellerin amaç fonksiyonu değerleri ve ortalama hata yüzdeleri

	Gözlem	BPR (1964)	Model1	Model2	Model3
Amaç Fonksiyonu		40946	30479	35587	30376
Ortalama Hata (%)		6	6	10	6
Hataların StdSp		0.47	0.56	0.73	0.48
Ortalama	78.99	77.77	78.56	78.06	78.33
StdSp	42.84	34.82	36.52	36.11	36.95

**Şekil 5.** Model ve gözlem değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 5 ve Şekil 5’den görüldüğü gibi amaç fonksiyonunu en iyileyen modeller 1 ve 3 no’lu modellerdir. BPR (1964) modeli geliştirilen modellere göre daha yüksek amaç fonksiyonu değeri vermiştir. Aynı zamanda model 1 ve 3’ün ortalama hatası model 2’ye göre daha azdır. Kentiçi ulaşım planlama çalışmaları yapılırken sinyalize kavşakların yoğun olduğı bölgelerde model 1 ve 3’ün kullanılmasının daha uygun olduğı düşünülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde ulaşım planlaması çalışmalarında kullanılan bağ maliyet fonksiyonları tanımlanmıştır. Çalışma ağını temsil edecek maliyet fonksiyonun belirlenmesi için yapılan saha ölçümleri ve bunların sonuçları irdelenmiştir. Geliştirilen üç farklı modelin performansları değerlendirilmiş ve sinyalize kavşaklı ağlarda BPR (1964) modeline göre model 1 ve model 3’ün daha iyi sonuç vermesinden dolayı kullanılmasına karar verilmiştir. Geliştirilen modellerde ek olarak kullanılan yeşil ve toplam devre süresi parametrelerinin amaç fonksiyonu üzerinde iyileştirici etkisi olduğı belirlenmiştir. Sonraki çalışmalarda ölçülen parametre sayısı artırılarak ağ için performansı daha yüksek genelleştirilmiş bir maliyet fonksiyonunun geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Kaynaklar

Akçelik, R. (1991) Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function. Australian Road Research 21 (3), pp. 49–59.

Branston, D. (1976) Link capacity functions: a review. Transportation Research 10, pp. 223-236.

Ceylan, H. (2010) Genetik Algoritma ve Oyun Teorisi Yaklaşımları ile Şehir içi Trafik Yönetimi. Tübitak Araştırma Projesi Final Raporu, 104I119.

Campbell, E. W., Keefer, L. E. and Adams, R. W. (1959) A method for predicting speeds through signalized street sections. Highway Research Board Bulletin, 230, pp. 112-125.

Davidson, K. B. (1966) A flow-travel time relationship for use in transportation planning. Proceedings Australian Road Research Board, 3, pp. 183-194.

HCM, (2000) Highway Capacity Manual.

Irwin, N. A., Dodd, N., Von Cube, H. G. (1961) Capacity restraint in assignment programs. Highway Research Board Bulletin, 297, pp. 109-127.

Mosher, W. W. (1963) A capacity restraint algorithm for assigning flow to a transportation network. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Los Angeles

Smock, R. J. (1962) An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. Highway Research Board Bulletin, 347, pp. 60-66.

Soltman, T. J. (1965) Effects of alternate loading sequences on results from Chicago trip distribution and assignment model. Highway Research Board Bulletin, 114, pp. 122-140.

U.S. Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual. U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.

Wardrop, J. G. (1968) Journey speed and flow in central London. Traffic engineering control 9, pp. 528-532.