

Birleştirilmiş Oyun Teorisi ve Genetik Algoritma İle Şehiriçi Ulaşım Ağ Tasarımı ve Uygulaması

Halim Ceylan, Hüseyin Ceylan, Özgür Başkan

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı
Kampüsü, Denizli
Tel: (258) 2963351
E-Posta: halimc@pau.edu.tr
Tel: (258) 2963386
E-Posta: hceylan@pau.edu.tr
Tel: (258) 2963392
E-Posta: obaskan@pau.edu.tr

Soner Haldenbilen

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı
Kampüsü, Denizli
Tel: (258) 2963361
E-Posta: shaldenbilen@pau.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, sinyalizasyon kavşak kontrollü şehiriçi ulaşım ağlarında trafik kontrol parametrelerinin eniyilenmesi ve yol kullanıcılarının sinyal parametrelerine verdiği tepkiler oyun teorisi çerçevesinde ele alınarak Stackelberg oyunu formüle edilmiştir. Bu amaçla birbirlerini karşılıklı etkileyen trafik kontrol ve trafik atama problemi için Birleştirilmiş Oyun Teorisi ve Genetik Algoritma (BOTGA) modeli önerilmiştir. Önerilen model, trafik kontrol modülü kısmında sinyal parametrelerini eniyilerken trafik atama modülü kısmında stokastik kullanıcı dengesi altında (SKD) hesaplanan denge trafik hacimlerini trafik kontrol modülünde kullanarak sistem optimum (SO) yaklaşımıyla ulaşım ağ performansını artırmaya çalışır. Çalışmada, SKD problemi *kapalı-tek nokta* fonksiyonu olarak ele alınmış ve trafik kontrol ve atama problemleri *lider-takipçi* oyunu olarak tanımlanmıştır. Oyunda lider, trafik kontrol parametrelerini ifade ederken, yol kullanıcıları takipçileri ifade etmektedir. Önerilen BOTGA modelinde trafik kontrol parametrelerinin eniyilenmesi için Genetik Algoritma yaklaşımı kullanılırken, trafik atama probleminin çözümü için Quasi-Newton metodu kullanılmıştır. Trafik atama kısmında Quasi-newton metodunun kullanılabilmesi için link maliyet fonksiyonu sinyal kontrol parametrelerini içerecek şekilde modifiye edilmiştir. Stachelberg oyunu olarak geliştirilen BOTGA modeli; örnek bir ulaştırma ağına uygulanmış ve ilk bulgular oyun teorisinin ulaşım ağ tasarımında kullanılabileceğini ve ulaştırma ağının sistem optimum olarak çözülebileceğini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Ulaşım ağ tasarımı, stokastik kullanıcı dengesi, trafik atama, oyun teorisi, trafik kontrol

Giriş

Şehiriçi sinyalize kavşakların tasarımı, optimum çalışma sürelerinin bulunabilmesi ve trafik hacimlerinin trafik kontrol parametrelerine etkisinin hesaplanabilmesi, iki yaklaşım altında incelenebilir: Birinci yaklaşım izole kavşak düzeyindeki yaklaşımlar olup Webster (1958), Webster ve Cobbe (1966) ve Akçelik (1981) tarafından geliştirilmiştir. İkinci yaklaşım, ağ düzeyinde sinyalize kavşakların tasarımı olup, Robertson (1969)'un TRANSYT trafik modelini kavşak grupları arasında uygulamaya başlaması ile gelişmeye başlamıştır. Bu iki yaklaşım Improta (2002) ve Ceylan ve Bell (2004, 2005)' yapmış oldukları çalışmalar ile geliştirilmeye devam edilmiştir. Ayrıca konu hakkında detaylı çalışmalar Papageorgiou ve diğ. (2003)'de bulunabilir.

Günümüze kadar geliştirilen yaklaşımların içerisinde şehiriçi ulaşım ağ tasarımının oyun teorisi (OT) ile geliştirilebileceği konusunda fazla bilgi mevcut değildir. Fakat Nash (1950)'de ortaya attığı Nash Dengesinin ekonomik teorilere uygulanmaya başlanması, araştırmacıları trafik kontrol metotlarında bu yöntemin uygulanabilirliği, formülasyonu ve nasıl yapılabileceği hakkında incelemeye yöneltmiştir. Bu çalışma, OT'nin Nash dengesi altında sinyalize kavşak optimizasyonu ve trafik atama modellerinde Genetik Algoritma (GA) ile birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması konusunu oluşturmakta ve BOTGA (birleştirilmiş oyun teorisi ve genetik algoritma) modeli geliştirmektedir.

Trafik kontrol probleminin konveks olmayan yapısından dolayı lokal arama teknikleri ile global çözüme ulaşmak oldukça zordur. Bu nedenle sinyalize kavşak optimizasyonu probleminin çözümü için literatürde sıklıkla GA yöntemi kullanılmaktadır (Ceylan, 2002; Ceylan ve Bell, 2004; Ceylan ve Bell, 2005). Stokastik trafik atama probleminin çözümünde ise doğrusal ötesi optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar veren Quasi-Newton optimizasyon metodu kullanılmıştır. Quasi-Newton yöntemi tabanlı çözüm eklentilerine günümüzde birçok çalışma tablosu yazılımında (Excel, Latex vb...) erişmek mümkündür.

Problem Formülasyonu

Stackelberg oyunu yaklaşımı altında, BOTGA modeli formüle edilirken oyuncuların birisi; trafik kontrol stratejilerini kullanıcı davranışlarına bağlı olarak belirleyip, Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) altında ulaşım ağının toplam maliyetini eniylemeye çalışırken, diğer oyuncu trafik kontrol parametrelerine bağlı SKD trafik hacimlerini hesaplar. Yol kullanıcılarının trafik kontrol parametrelerine bağlı olarak bireysel olarak rotalarını değiştirecekleri varsayımıyla şehiriçi sinyalize kavşaklardaki trafik kontrolü ise değişen kullanıcı davranışlarına bağlı olarak modifiye edilmiştir. Lider- takipçi oyunu olarak adlandırılan Stackelberg oyununda faz yeşil süreleri liderin stratejilerini, trafik atama problemi ise takipçinin stratejilerini göstermek üzere serisel bir oyun oynanır ve Denklem (1)'in sağlanması ile son bulur.

$$\|T(\mathbf{v}, \Psi)^{(k+1)} - T(\mathbf{v}, \Psi)^{(k)}\| < \zeta \quad (1)$$

Burada; $T(\mathbf{v}, \Psi)^{(k+1)}$ ve $T(\mathbf{v}, \Psi)^{(k)}$ fonksiyonları; SKD altında hesaplanan link trafik hacimlerini, $\mathbf{v}$, vektörüne ve $(k+1)$ 'inci iterasyondaki trafik kontrol vektörlerine, Ψ ,

bağlı olarak hesaplanan toplam ulaşım ağ maliyetini; ζ yakınsama kriterindeki tolerans limitini ifade etmektedir. Bu kısımda kullanılan notasyonların tanımı Ek 'te verilmiştir.

Daganzo (1983) ve Cantarella (1997) yapmış oldukları çalışmalarında SKD atamasını trafik hacim uzayında *sabit-nokta* problemi olarak tanımlamışlar ve şöyle ifade etmişlerdir.

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} t_w(\psi) \delta_{ar}^w p_r^w(\mathbf{y}^w), a \in L \quad (2)$$

Denklem (2)'deki rota seçim olasılıklarının hesabı için Cascetta ve diğ. (1996) tarafından önerilen C-logit modeli kullanılmıştır. C-logit modeli Denklem (3)'te verilmiştir.

$$p_r^w(\mathbf{y}^w) = \frac{\exp(-\gamma_0 y_r^w - \gamma_1 CF_r^w)}{\sum_{k \in R_w} \exp(-\gamma_0 y_k^w - \gamma_1 CF_k^w)}, r \in R_w, w \in W \quad (3)$$

CF_r^w faktörünün belirlenmesinde Denklem (4) kullanılmıştır.

$$CF_r^w = \sum_{a \in A} \delta_{ar}^w w_{ar}^w \ln N_a^w, r \in R_w, w \in W \quad (4)$$

w_{ar}^w ise denklem (5)'te verilmiştir.

$$w_{ar}^w = \frac{c_a(v_a, \psi)}{y_r^w}, a \in L, r \in R_w \quad (5)$$

Link maliyet fonksiyonu olarak Bureau of Public Roads (BPR) seyahat süresi fonksiyonu kullanılmıştır (BPR, 1964).

$$c_a(v_a, \psi) = c_a^0 \left(1 + 0.15 \left(\frac{v_a(\psi)}{\mu_a} \right)^4 \right) \quad (6)$$

BOTGA modelinde BPR fonksiyonu trafik kontrol parametrelerini dikkate alacak şekilde Denklem (7)'deki gibi modifiye edilmiştir. Bu modifikasyon sadece izole kavşakları dikkate alacak şekilde trafik atamanın yapılabilmesi amacıyla düzenlenmiş olup kavşaklar arası koordinasyon parametrelerini dikkate almamaktadır.

$$Q_a = \frac{\lambda s_a}{\mu_a}, a \in L \quad (7)$$

Denklemler (2)-(7)'ten görülebileceği gibi verilen her bir trafik hacmi için, v_a , SKD sabit nokta problemi *kapalı-fonksiyon* formuna dönüşür. Kapalı-fonksiyon çözümü için (8) ifadesi minimum edilirken dönüşüm kısıtları (9-11) sağlanmalıdır.

$$\min F(f_p^w(\psi), f_p^{w*}(\psi)) = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} \left(f_p^w(\psi) - f_p^{w*}(\psi) \right)^2 \quad (8)$$

Denklem (8)'deki trafik hacim dönüşüm kısıtları aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{v} = \delta \mathbf{f} \quad (9a)$$

$$\mathbf{t} = \Lambda \mathbf{f} \quad (9b)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{P} \mathbf{t} \quad (9c)$$

$$\sum_{p \in R_w} f_p^w = t_w, w \in W \quad (10)$$

$$f_p^w \geq 0, p \in P_w, w \in W \quad (11)$$

Denklemlerde verilen f_p^w her bir O-D çifti arasındaki rota p 'ye atanan trafik hacmini, f_p^{w*} rota p 'deki hesaplanan trafik hacmini ve $f = f^*$ ise rota trafik hacimleri ile rota maliyetleri arasındaki karşılıklı eşitlik kısıtını göstermektedir.

Çözüm aşamasında çözüm vektörlerinin çözüm uzayı içinde kalıp kalmadığının kontrolü için BOTGA modeline bir ceza fonksiyonu ilave edilmiştir. Ceza fonksiyonu mümkün olmayan çözüm kümesi ile mümkün çözüm kümesi arasındaki mesafeden yola çıkılarak geliştirilmiştir.

$$P(v_a) = \begin{cases} \alpha(v_a - \mu_a) & \text{eğer } v_a > \mu_a \\ 0 & \text{diğer durum için} \end{cases} \quad (12)$$

Ceza fonksiyonu $P(v_a)$, link kapasitesinin aşılması durumunda değer aldığını, diğer durumlarda bir değer almadığını gösteren bir fonksiyondur. Geliştirilen ceza fonksiyonu Denklem (8) ifadesine ilave edilerek çözüm kümelerinin arama uzayı içerisinde kalması sağlanmış ve Denklem (13)'te verilmiştir.

$$\min F(f_p^w(\psi), f_p^w(\psi)) = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} \left(f_p^w(\psi) - f_p^w(\psi) \right)^2 + \sum_{a \in L} \alpha(v_a - \mu_a) \quad (13)$$

Denklem (13)'de verilen amaç fonksiyonunun çözümünde tüm güzergahlardaki verilen ve hesaplanan trafik hacimleri eşit olduğu zaman problem çözülmüş olacaktır. BOTGA modelinde, trafik atama probleminin Stackelberg oyunu ile çözülebilmesi için O-D talepleri, ağ karakteristikleri ve yakınsama kriteri programa girdi olarak verilmiş, C-Logit modeli kullanılarak rota seçim olasılıkları belirlenmiş ve Quasi-Newton metodu kullanılarak elde edilen SKD trafik hacimleri, trafik kontrol modülüne girdi olarak verilmiştir.

Trafik Sinyal Kontrolü ve GA Formülasyonu

Alansal Trafik Kontrolünün (ATK), yol kullanıcılarının şehiriçi ulaşım ağında geçirdikleri toplam sürenin en aza indirgenmesi olarak tanımlanabilir. Bunun için sinyal kontrol parametrelerinin en iyi şekilde tasarlanması ve kavşakların sistemin toplam maliyetini en aza indireyecek şekilde işletilmesi gerekmektedir. Sinyal kontrol parametreleri;

$$c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \quad (14a)$$

$$0 \leq \theta \leq c \quad (14b)$$

$$\phi_{\min} \leq \phi \leq c \quad (14c)$$

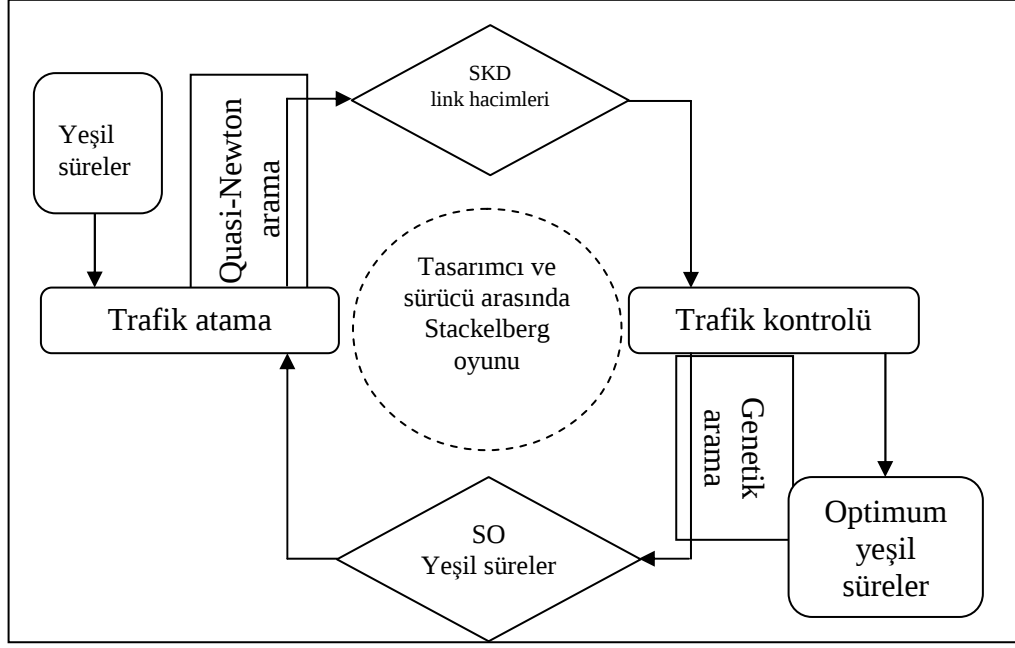
$$\sum_{i=1}^m \phi_i = c \quad (14d)$$

kısıtlarına bağlı olarak;

$$\min_{\psi, v} T(\mathbf{v}^*, \psi) = \sum_{a \in L} v_a c_a(v, \psi) \quad (15)$$

denkleminin çözülmesiyle hesaplanır. BOTGA modelinin trafik kontrol modülü kısmında sinyal parametreleri GA yardımıyla üretilmiştir. GA formülasyonu ile ilgili detaylı bilgi Ceylan (2002)'de bulunabilir.

Şekil 1'de BOTGA modeli akış şeması verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi trafik kontrol modülünden elde edilen yeşil süreler trafik atama problemine girdi olarak verilmiştir. Trafik atama modülü Quasi-Newton arama motoru yardımıyla çözülmüş ve SKD trafik hacimleri elde edilerek trafik kontrol-modülüne girdi olarak verilmiştir. trafik kontrol modülünde sinyal süreleri GA arama motoru kullanılarak çözümlenmiş ve sistem optimum (SO) maliyet fonksiyonu (15) en aza indirgeninceye kadar oyun oynanmaya devam edilmiştir.



Şekil 1 BOTGA modeli akış şeması.

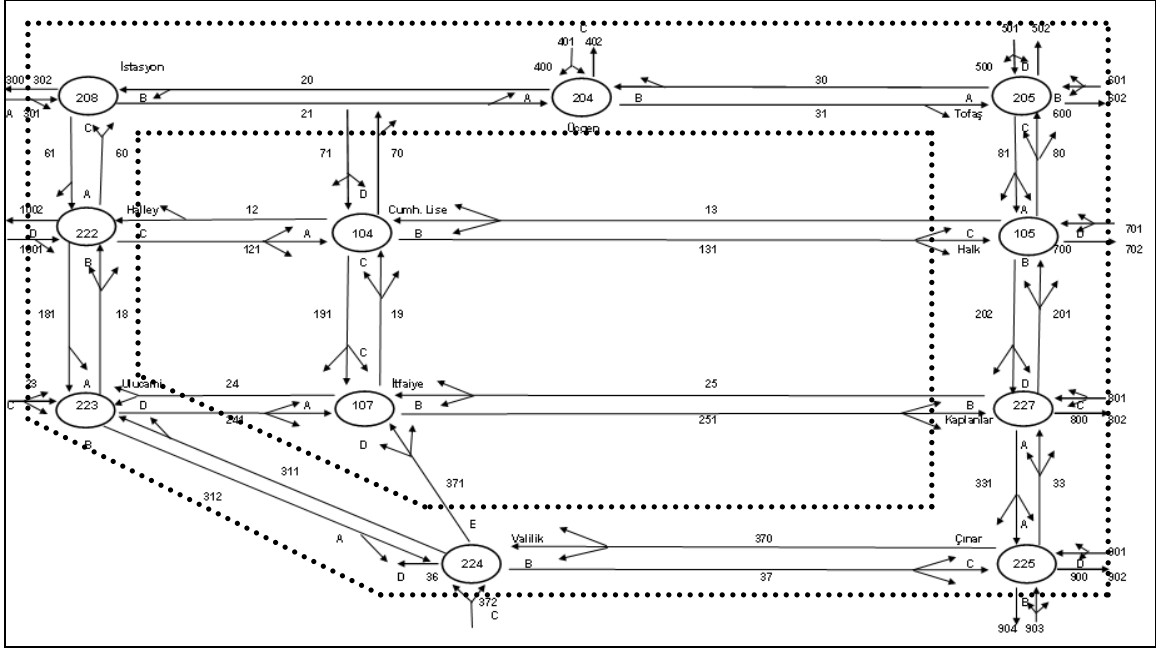
Şekil 1’den görüleceği üzere, trafik kontrol ve atama problemleri karşılıklı olarak sırayla çözülmektedir. Bu yaklaşım, literatürde lider-takipçi oyunu olarak bilinen Stackelberg yaklaşımına uymaktadır. Lider, öncelikle stratejisini belirler ve daha sonra takipçiler liderin yapmış olduğu seçimin sonucuna göre kendi davranışlarını belirlerler. Özetle, her bir problemin çıktı parametreleri diğer problemin girdi parametreleri olarak ele alınmaktadır (Villiger, 2000).

Uygulama

Şekil 2’de, 11 sinyalize kavşağı içeren örnek ulaşım ağı verilmiştir. BOTGA modelinin uygulanabilmesi ve çözülebilmesi için örnek ulaşım ağı iç zonlara olan dağıtım göz ardı edilerek kesikli çizgilerle belirlenen dış hatlardaki O-D çiftleri ve kapsadığı linkler ile birlikte rotalar göz önüne alınmıştır. 4 başlangıç ve 4 varış çifti için 14 O-D trafik talebi altında 26 link ve 36 fiziksel rotadan oluşan ulaşım ağındaki toplam seyahat süresinin devre süresine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Sinyalize kavşaklara ilişkin faz diyagramları yapılan arazi çalışmaları ile tespit edilmiştir.

Ulaşım ağı özellikleri

Örnek ulaşım ağını oluşturan linklere ilişkin serbest akım seyahat sürelerinin belirlenmesi için her bir linkin uzunluğu ölçülmüş ve trafik ölçüm cihazları ile yapılan ölçümler sonucu ortalama hız 36 km/sa olarak bulunmuş ve modelde kullanılmıştır. Tablo 1’de ulaşım ağındaki 26 linkin uzunlukları (l) ve ortalama seyahat hızına bağlı serbest akım seyahat süresi (t^0) ve doyumluk akımı (s) değerleri verilmiştir.



Şekil 2 BOTGA modelinin uygulandığı çalışma ağı.

Tablo 1 Ulaşım ağındaki linklerin uzunlukları, serbest akım seyahat süreleri ve doyumluk akımı değerleri.

Link No	l (m)	t^0 (s)	s (taş/sa)	Link No	l (m)	t^0 (s)	s (taş/sa)
12	300	30.0	1800	61	250	25.0	1800
13	780	78.0	1800	80	165	16.5	1800
18	345	34.5	1800	81	165	16.5	1800
19	340	34.0	1800	181	345	34.5	1800
20	599	59.9	1800	201	460	46.0	1800
21	599	59.9	1800	202	460	46.0	1800
24	260	26.0	1800	241	260	26.0	1800
25	910	91.0	1800	251	910	91.0	1800
30	525	52.5	1800	311	465	46.5	1800
31	525	52.5	1800	312	465	46.5	1800
33	500	50.0	1800	331	500	50.0	1800
37	710	71.0	1800	370	710	71.0	1800
60	250	25.0	1800	371	200	20.0	1800

O-D çiftleri, kavşak sayımları ve plaka eşleştirme çalışmaları sonucunda elde edilmiş ve Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2 Saatlik O-D trafik talepleri.

Başlangıç	Varış			
	225	208	222	204
225	0	320	432	332
227	416	88	634	244
205	138	148	332	106
208	144	0	244	376

BOTGA modelinin çözümü aşamasında trafik kontrol modülünün çözümü için sırasıyla türe ve dayalı Quasi-Newton ve sezgisel GA tabanlı çözüm algoritmaları Şekil 1’de verilen Stackelberg oyununu temsil eden akış diyagramına uygun şekilde bilgisayarda kodlanmış ve ardışık şekilde çalışmak üzere birleştirilmiştir. C-Logit model tabanlı stokastik atama problemi, eşdeğer bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmış ve fonksiyon değeri sıfıra yakınsayınca kadar çözüme devam edilmiştir. Daha sonra, elde edilen denge rota akımları kullanılarak GA tabanlı çözüm algoritması ile toplam ağ seyahat süresini en aza indiren yeşil süreler hesaplanmıştır. Yeni sinyal parametrelerine göre rota seçimlerini değiştirecek olan sürücülerin algılama kabiliyetlerine bağlı olarak atama problemi ve ardından yeni trafik dağılımına göre sinyal tasarım problemi önceden belirlenen durma kriteri sağlanana dek devam ettirilmiştir.

BOTGA Parametreleri

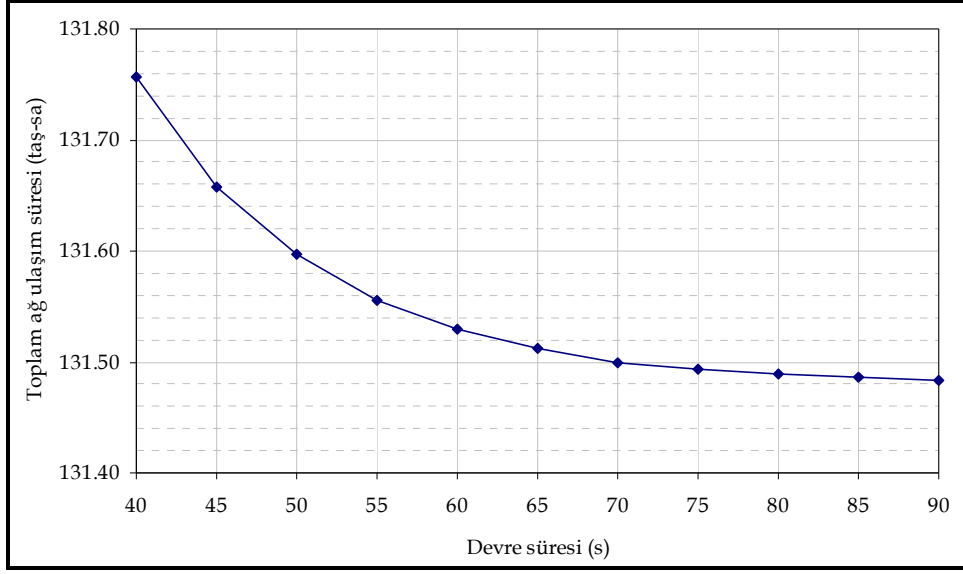
Lider-takipçi oyunu olarak da bilinen Stackelberg yaklaşımında başlangıçta her kavşakta devre süresi korunumunu ve minimum yeşil süre olarak alınan 7 saniyelik değeri sağlayacak şekilde rastgele üretilen faz yeşil süreleri için trafik atama modülü çözülmüştür. Bu problemin çözümünde sürücü algılama hatalarını temsil eden C-Logit model parametreleri olan η ve γ sırasıyla 0.05 ve 0.5 olarak alınmıştır. Bu kabul altında, rastgele üretilen faz süreleri Quasi-Newton çözümüne başlangıç değerleri olarak verilmiş ve atama probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir.

44 farklı sinyal bileşenine bağlı olarak yapılan trafik kontrol modülünün GA ile çözümünde toplum büyüklüğü 200, çaprazlama olasılığı 0.6, mutasyon oranı 0.05 ve maksimum jenerasyon sayısı ise 10.000 olarak alınmıştır. Ağ devre süresi değeri 40 saniye değerinden başlatılarak 90 saniye değerine ulaşana kadar analizler sürdürülmüş ve her 5 saniyelik devre süresi değişiminin toplam seyahat süresine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca durma kriteri olarak iki oyun arasındaki fark 0.005 taş-sa değerinden küçük oluncaya kadar oynanmıştır.

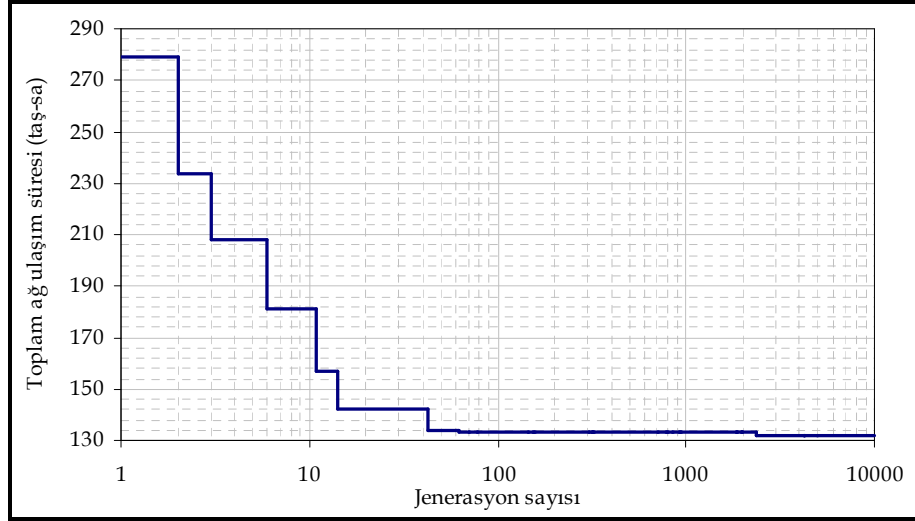
BOTGA modellemesi için belirlenen 40-90 saniyelik ağ devre süresi aralığındaki her 5 s’lik değer için yapılan analizlerde elde edilen optimum sonuçlar Şekil 3’de gösterilmiştir. 40 s için elde edilen 131.76 taş-sa değerinin 90 s için 131.48 taş-sa değerine kadar düştüğü görülmektedir. Şekil incelendiğinde toplam sistem maliyetindeki düşüşün azalan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Bu da, düşük devre süreleri için sistem performansının devre süresindeki değişimlere daha duyarlı olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Çözüm sonuçları incelendiğinde 40 ve 90 s’lik devre süreleri için elde edilen toplam ağ seyahat süresi değerleri arasındaki farkın yüksek mertebede olmamasının başlıca nedenleri olarak ulaşım ağının saatte 3954 taşıtın seyahat ettiği küçük boyutta bir alt ağ olarak seçilmiş olması ve kavşaklar arası yeşil dalga parametresinin link maliyet fonksiyonuna dahil edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4’te, 7 Stackelberg oyunu için BOTGA modelinin yakınsama grafiği verilmiştir. Şekilden’de görülebileceği gibi jenerasyon sayısına bağlı olarak toplam ulaşım ağ maliyetinde bir düşüş oluşmaktadır.



Şekil 3 Devre süreleri için elde edilen ağ maliyet değişimleri.



Şekil 4 Oynanan yedi oyun için BOTGA modelinin yakınsama grafiği.

Tablo 3'te rota maliyetleri ile taşıdıkları seyahat talepleri verilmiştir. 1 numaralı O-D çiftindeki 7 alternatif rotanın akımları ve seyahat süreleri incelendiğinde, 1-2-3 numaralı rotalar diğer dört rotaya göre daha düşük ulaşım maliyetine sahip olduklarından dolayı 320 taş/sa'lık seyahat talebinin büyük kısmını taşımaktadırlar. Aynı zamanda, bu üç rotanın ulaşım maliyeti yaklaşık 190 s civarındadır. 4-5-6-7 numaralı rotalar incelendiğinde, ilk üç rotaya göre daha yüksek ulaşım maliyetine sahip oldukları ve O-D talebinin küçük bir kısmını taşıdıkları görülmektedir. Bu dört rotanın ulaşım maliyeti ise yaklaşık 240 s civarındadır.

Tablo 3 BOTGA modelinden elde edilen rota akımları ve seyahat süreleri.

Rotalar			O-D talebi	Rotalar			O-D talebi
No	Akım (taş/sa)	Seyahat süresi (s)		No	Akım (taş/sa)	Seyahat süresi (s)	
1	105	189.12	320	20	238	91.83	634
2	96	189.19		21	199	91.90	
3	86	191.45		22	180	94.16	
4	8	238.91		23	6	163.15	
5	7	241.17		24	5	165.41	
6	7	243.79		25	6	168.03	
7	11	238.84		26	244	128.11	244
8	147	163.83	432	27	138	117.15	138
9	132	163.91		28	148	120.95	148
10	119	166.17		29	99	154.93	332
11	12	213.63		30	233	137.67	
12	10	215.89		31	106	60.70	106
13	11	218.51		32	10	237.94	144
14	332	178.59	332	33	123	187.52	
15	416	50.56	416	34	10	236.05	244
16	23	188.43	88	35	244	33.98	
17	19	190.69		36	376	68.29	376
18	18	193.31					
19	27	188.35					

Tablo 4'te çalışma ağındaki 11 sinyalize kavşaktaki 90 s'lik ağ devre süresi için elde edilen faz süreleri verilmiştir.

Tablo 4 BOTGA modellemesi sonucu kavşaklarda elde edilen optimum faz süreleri.

Kavşaklar	K105	K227	K222	K223	K107	K104	K225	K204	K224	K205	K208
Faz 1	17	40	19	39	23	23	55	20	10	7	23
Faz 2	37	14	41	18	9	29	23	48	62	18	32
Faz 3	18	18	29	33	59	38	13	23	18	47	35
Faz 4	18	18	---	---	---	---	---	---	---	18	---

Sonuçlar

Bu çalışmada, BOTGA modelinin gerçek bir sinyalize ulaşım ağına uygulanması gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Uygulama için seçilen örnek ulaşım ağına ilişkin topolojik ve ağ üzerindeki trafik talebi ile ilgili veriler arazi ölçümlerden elde edilmiştir. Yapılan analizlerde, farklı devre süreleri altında ağ üzerindeki toplam seyahat süresinin en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. 40 ila 90 saniyelik devre süresi değerleri arasındaki her 5 s'lik değişim için Stackelberg oyunu temel alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, toplam ağ seyahat süresinin düşük devre sürelerindeki değişimlere daha fazla duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Yalnızca devre süresindeki artışla birlikte sistem optimum tasarımın daha düşük seyahat süresi değerleri altında yapılabildiği görülmüştür. Ancak, çalışma ağının boyutlarının küçük olması, üzerindeki seyahat talebinin ağ kapasitesinin üzerinde olmaması ve kavşaklar arası koordinasyon parametresinin ağ maliyet fonksiyonun dahil edilememiş olması sistem performansındaki iyileşmenin beklenen düzeyde olmamasına etki eden faktör olarak gösterilebilir. Kavşaklar arası koordinasyon parametresinin ağ maliyet fonksiyonuna

dahil edilmesi işlemi ileriki çalışmalarda verilecektir. Çalışma, önerilen BOTGA modelinin ulaşım ağ tasarımı için uygulanabileceğini göstermiştir.

Teşekkür Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akcelik, R. (1981) Traffic signals: capacity and timing analysis. Australian Road Research Board, ARR 123. Vermont South, Victoria, Australia.

Cantarella, G.E. (1997) A general fixed-point approach to multimode multi-user equilibrium assignment with elastic demand. Transportation Science, 31(2), 107-128.

Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A. (1996) Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks. Proceedings of 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, eds J. B. Lesort, Lyon, France, July 24-26, Pergamon, 697-711.

Ceylan, H. (2002) A Genetic Algorithm Approach to the Equilibrium Network Design Problem. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK.

Ceylan, H. and Bell, M.G.H. (2004) Traffic Signal Timing Optimisation based on Genetic Algorithm Approach, Including Drivers’ Routing. Transportation Research, 38B(4), 329-342,.

Ceylan, H. and Bell, M.G.H. (2005) Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion. Transportation Research, 39B, 169-185,.

Daganzo, C.F. (1983) Stochastic network equilibrium with multiple vehicle types and asymmetric, indefinite link cost Jacobians. Transportation Science, 17(3), 282-300.

Impotra, G. (2002) Signal control at individual junctions: Phase-based approach. Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems, 437-478.

Nash, J. F. (1950) Equilibrium points in n-person games. Proc. Nat. Acad. U.S.A. 36, pp. 48-49.

Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A. and Wang, Y. (2003) Review of traffic control strategies. IEEE, 91(12), 2041-2067.

Robertson, D.I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool, RRL Report, LR 253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
Traffic Assignment Manual (1964) U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, June.

Villiger, R. (2000) Game Theory and Traffic Control. Semester Project, Department of Mathematics, Ecole Polytechnique, Lausanne.

Webster, F.V. (1958) Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper, No: 39. HMSO, London.

Webster, F.V. and Cobbe, B.M. (1966) Traffic Signals. Ministry of Transport, Road Research Technical Paper, No. 56, London, HMSO.

EK: Notasyon

- T : Toplam ulaşım ağı seyahat süresi (taşıt-sa)
 N : $\{1,2,3,\dots,N_j\}$ Sabit-zamanlı sinyalizasyon kontrollü kavşak sayısı
 L : Ağdaki toplam link sayısı, $L=\{1,2,3,\dots,N_L\}$
 CF_r^w : Rota $r \in R_w$ için trafik hacmi faktörü olup her bir O-D çifti, $w \in W$, arasındaki rotalar kümesi, R_w , içerisinde rota r 'nin benzeşim derecesi
 N_a^w : a linkini kullanan O-D çifti w arasındaki rota sayısını
 α : Ceza fonksiyonunun ölçek parametresidir.
 c : Ulaşım ağı devre süresi (sn),
 c_{min} ve c_{max} : Minimum ve maksimum devre süresi kısıtları.
 ϕ : Faz yeşil süreleri vektörü
 ϕ_{min} ve ϕ_{max} : Minimum ve maksimum faz devre süreleri kısıtları.
 $\mathbf{v}$: $[v_a; \forall a \in L]$ link a 'da ki ortalama trafik hacmi,
 s_a : link a 'da ki doyumluk akımı.
 W : $\{w=(r,s); \forall r \in \mathbf{R}, \forall s \in \mathbf{S}\}$ O-D çiftleri kümesi,
 R_w : Her bir O-D çifti, w , arasındaki rotalar kümesi, $\forall w \in W$,
 $\mathbf{t}$: $[t_w; \forall w \in W]$ O-D çifti arasındaki trafik talebi.,
 $\mathbf{f}$: $[f_p; \forall p \in \mathbf{P}_w, \forall w \in W]$ rota trafik hacimleri vektörü.
 δ : $[\delta_{ap}; \forall a \in L, \forall p \in \mathbf{P}_w, \forall w \in W]$ link/rota belirleme matrisi olup, elemanları; eğer $\delta_{ap}=1$ ise rota p link a 'yı kullanıyor, değilse kullanmıyor.
 Λ : O-D-rota belirleme matrisi, elemanları 1 veya 0'dır. ,
 $\mathbf{y}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\psi}) = [y_p; \forall p \in \mathbf{P}_w, \forall w \in W]$ rotaların seyahat süreleri vektörü.
 $\mathbf{t}^0$: $[t_a^0; \forall a \in L]$ linklerin serbest akım hızları vektörü.
 $\mathbf{c}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\psi}) = [c_a(v_a, \boldsymbol{\psi})]$ tüm linklerin seyahat süreleri vektörü olup, bu süreler trafik hacmine ve sinyal kontrol değişkenine bağlıdır.
 m : Her bir sinyalizasyon kavşağındaki faz sayısı. N
 M : Ulaşım ağındaki toplam faz sayısı
 $\boldsymbol{\psi}$: Sinyal kontrol parametreleri vektörü.
 $\mathbf{P}$: $p_r^w(\mathbf{t}^w)$ rotaların, $r \in R_w$, seçilme olasılığı matrisi
 μ_a : link a 'nın kapasitesi, $a \in L$
 R_{aw} : a linkini kullanan rota sayısı
 w_{ar}^w : Oransal ağırlık katsayısı
 $\gamma_0 - \gamma_1$: Gumbel dağılımının parametreleri