

Kentiçi Ulaşım Ağlarında Yedek Kapasitenin Stokastik Bağ Akımları Altında Belirlenmesi

Özgür Başkan

Pamukkale Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Denizli

Duygu Erol

Pamukkale Üniversitesi, Bozkurt Meslek Yüksekokulu,
Ulaştırma ve Trafik Hizmetleri Programı, Denizli

Cenk Ozan

Aydın Adnan Menderes Üniversitesi,
Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Aydın

Öz

Ulaşım talebinin her geçen gün artması ve buna bağlı olarak artan otomobil kullanımı neticesinde kentiçi ulaşım ağlarında meydana gelen trafik kaynaklı problemler kullanıcıları olumsuz olarak etkilemektedir. Bu olumsuz etkilerin en aza indirilebilmesi için yerel yönetimler tarafından kavşakların geometrik olarak iyileştirilmesi veya kavşak/bağ kapasite artırımı gibi maliyeti yüksek önlemler alınabilmektedir. Literatürde yedek kapasite; ulaşım ağının sıkışıklık etkisi altında kalmadan hizmet verebileceği ulaşım talebinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle yedek kapasite kavramı ulaşım ağına ait Başlangıç-Varış (B-V) matrisine uygulanacak olan talep çarpanının maksimumizasyonu olarak ifade edilebilmektedir. Çalışmada bu amaçla Diferansiyel Gelişim Algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modeli geliştirilmiştir. Üst seviyede talep çarpanını maksimum yapacak olan sinyal süreleri belirlenirken, alt seviyede ise üst seviyedeki sinyal sürelerinin değişimine bağlı olarak sürücülerin rota seçim davranışlarını temsil eden stokastik trafik atama problemi çözülmektedir. Geliştirilen iki seviyeli modelde talep çarpanının artırılması neticesinde bağ akımlarının kapasitelerini aşmaması için amaç fonksiyonuna ceza fonksiyonu eklenmiştir. Geliştirilen model 96 adet B-V çifti, 9 adet sinyalizasyon kavşak ve 28 adet bağdan oluşan ulaşım ağı üzerinde test edilmiştir. Sinyal sürelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi neticesinde ulaşım ağında sıkışıklık etkisi olmadan mevcut B-V talep matrisinin % 24 artırılabilmesi belirlenmiştir. Sonuç olarak geliştirilen modelin maliyeti yüksek yatırımlara karar verilmeden önce sinyal sürelerinin en uygun değerlerinin kullanılması ile ulaşım ağının ne kadarlık bir talep artışına cevap verebileceğinin belirlenebilmesi bakımından faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: Yedek kapasite; stokastik trafik atama; iki seviyeli programlama; diferansiyel gelişim algoritması; en uygun sinyal süreleri

Giriş

Günümüzde gelişmekte olan ülkelerde kullanıcıların günden güne artan hareketlilik ihtiyacının sonucu olarak birçok kent trafik problemleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Oluşan problemlerin nedenleri arasında özel araç kullanım oranlarının fazla olması, toplu taşıma sistemlerinin rekabet gücünün az olması, yüksek kapasiteli raylı sistem ağının gerektiği kadar iyileştirilememesi ve yerel yönetimlerin uygun olmayan trafik yönetim ve planlama stratejileri sayılabilir. Diğer taraftan ulaşım kaynaklı problemlerin en aza indirilebilmesi için yapılması gereken uygulamalardan ilki mevcut ulaşım ağının kapasitesinin verimli olarak kullanılmasıdır. Bilindiği gibi kentiçi ulaşım ağlarında eşdüzey kavşakların büyük bir çoğunluğu sinyalizasyon sistemleri ile kontrol edilmektedir. Sinyalize kavşak kapasitesinden maksimum oranda faydalanabilmek için uygun sinyal sürelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Aksi takdirde kavşak kapasitesini artırabilmek adına yerel yönetimler tarafından fiziksel iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek maliyetli yatırımlar yapılmadan önce kentiçi ulaşım ağlarının yedek kapasitesi belirlenmeli ve bu kapasitenin en verimli şekilde kullanılabilmesi için gerekli önlemler yerel yöneticiler tarafından alınmalıdır. Yedek kapasite maksimizasyonu problemi, ulaşım ağındaki tüm bağların kapasitesini aşmaması şartıyla Başlangıç-Variş (B-V) talep matrisi çarpanının maksimum değerinin belirlenmesi olarak ifade edilebilmektedir. Bu konudaki çalışmalar literatürde oldukça eskiye dayanmakta olup ilk çalışma Webster ve Cobbe (1966) tarafından yapılmıştır. Takip eden yıllarda Allsop (1972), Yagar (1985) ve Wong ve Yang (1997) tarafından yapılan çalışmalarla yedek kapasite problemi farklı bakış açıları altında çözümlenmeye çalışılmıştır. Yang ve diğ. (2000) sinyal sürelerinin değişimine bağlı olarak sürücülerin rota seçim davranışlarında değişmesi gerektiği prensibine bağlı olarak söz konusu probleme trafik atama problemini dahil etmiştir. Çalışmada bu amaçla iki seviyeli programlama modeli kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ziyou ve Yifan (2002) seyahat matrisinde her bir B-V çifti için farklı bir talep çarpanı öngörmüşler ve bu yaklaşım altında yedek kapasite probleminin çözülmesinin daha gerçekçi olduğunu çalışmalarında vurgulamışlardır. Ceylan ve Bell (2004) bir ulaşım ağında yedek kapasite hesabı için logit rota seçimi modeli tabanlı Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) trafik atamasını dikkate alarak iki adımlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Chiou (2007) yedek kapasite maksimizasyonu için eğim yöntemini kullanmıştır. Test ulaşım ağında yapılan sayısal uygulamalar ile geliştirilen yöntemin klasik metotlardan daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Chiou (2009) bir ulaşım ağındaki gecikme ve yedek kapasite değerlerinin optimum değerlerini belirlemek için bağ akımlarını zamana bağlı değişken olarak dikkate almış ve geliştirdiği algoritmayı örnek bir ulaşım ağına uygulamıştır. Miandoabchi ve Farahani (2011) yedek kapasite maksimizasyonu problemini kesikli ulaşım ağı problemi olarak ele almış ve iki seviyeli çözüm yaklaşımını kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir. Chiou (2014) yedek kapasite ve gecikme problemlerini minimum/maksimum problemi olarak ifade etmiştir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritmanın gecikme parametresini dikkate alarak yedek kapasite maksimizasyonu yapabildiğini göstermiştir. Baskan ve Ozan (2017) ulaşım ağından elde edilen faydanın kullanıcılar arasında eşit paylaştırılmasını sağlayabilmek için eşitlik kavramını probleme dahil etmişlerdir. Sayısal sonuçlar B-V matrisinin maksimum çarpanının eşitlik parametresinin değerine oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. Baskan ve diğ. (2019a) yedek kapasite maksimizasyonu ve gecikme minimizasyonu problemini beraber çözebilen ve SKD bağ akımlarını dikkate alan iki seviyeli bir algoritma geliştirmişlerdir. Son olarak Başkan ve diğ. (2019b) SKD bağ akımları kullanılarak yedek kapasite problemini orta ölçekli bir test ulaşım ağında

Armoni Araştırması Optimizasyon tekniğini kullanarak çözmüşlerdir. Literatürden görülebileceği gibi yedek kapasite birçok farklı bakış açısı altında ve farklı yöntemler kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada ise logit rota seçim modeli tabanlı SKD bağ akımları altında yedek kapasite problemi Diferansiyel Gelişim (DG) algoritması kullanılarak çözülmüştür. Bu amaçla iki seviyeli programlama modeli kullanılmıştır. Üst seviyede B-V matrisi talep çarpanı maksimum yapılmaya çalışılırken, alt seviyede ise değişen talep durumuna bağlı olarak SKD bağ akımları elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde yedek kapasite maksimizasyon problemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde problemin çözümü için geliştirilen iki seviyeli programlama modelinin detayları verilmiştir. Sonraki bölümde önerilen algoritmanın test ulaşım ağına uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde çalışmanın sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalara yer verilmiştir.

Yedek Kapasite Maksimizasyon Problemi

Kentiçi ulaşım ağlarında gecikmelerin en fazla görüldüğü kesimler olan kavşaklarda sinyal sürelerinin eniyilenmesi ile ulaşım ağının atıl kapasitesi olarak da tanımlanan yedek kapasite ortaya çıkarılabilmektedir. Bu sayede yerel yönetimlerin trafik sıklığı azaltmak ve kapasite artırımı sağlayabilmek için sıklıkla başvurmuş oldukları zamanından önce yapılan yüksek maliyetli fiziksel iyileştirmelerin önüne geçilebilmektedir. Sinyal sürelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile hem mevcut B-V seyahat matrisi koşulları altında gecikmeler azaltılabilmekte hem de gelecekte kentlerdeki seyahatlerin üretildiği zonlardaki büyümelere paralel olarak ne kadarlık bir talep artışına sistemin cevap verebileceği belirlenebilmektedir. Bu nedenle çalışmada yedek kapasiteyi maksimum yapan sinyal sürelerinin belirlenmesi amacıyla DG algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modeli önerilmiştir. Üst seviyede (ÜS) yedek kapasiteyi maksimum yapan B-V talep matrisi çarpanının belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Alt seviyede (AS) ise ulaşım ağındaki seyahat matrisinin değişimine karşılık kullanıcıların tepkileri SKD trafik atama probleminin çözülmesi ile temsil edilmiştir. Bir ulaşım ağında düğümler $n \in N$, bağlar $a \in A$, B-V çifleri $k \in K$, olarak temsil edilirse iki seviyeli programlama modeli aşağıda verildiği gibi gösterilebilir.

$$(ÜS) \quad \max_{\mu, \psi} \mu \quad (1)$$

$$(AS) \quad \min_{x(\psi)} f(x(\psi), \psi) = -\mu q^T y(x(\psi), \psi) + x^T t(x(\psi), \psi) - \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(\psi)} t_a(\psi, w) dw \quad (2)$$

Burada Denklem (1) yedek kapasite maksimizasyon problemini, μ ise B-V matrisi çarpanını ifade etmektedir. Denklem (2) ise SKD trafik atama probleminin genel ifadesidir. Burada $x(\psi)$ sinyal vektörüne bağlı bağ akımları vektörü, q talep vektörü, t ve y ise bağ ve rota seyahat süre vektörleri olarak temsil edilmiştir.

$$\psi(c, \phi) \in \Omega_0; \quad \begin{cases} c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \\ \phi_{\min} \leq \phi \leq c \\ \sum_{i=1}^z (\phi + I)_i = c \end{cases} \quad (3)$$

$$x_a^*(\mu, \psi) \leq C_a(\psi, s_a) \quad (4)$$

$$\mu q = \Lambda h, \quad x(\psi) = \delta h, \quad h \geq 0 \quad (5)$$

Denklem (3) sinyal süre kısıtlarını ifade etmektedir. Burada ψ sinyal süreleri vektörü, Ω_0 sinyal sürelerinin olası çözüm kümesi, c devre süresi, $c_{\min}$ and $c_{\max}$ devre süresinin alt ve üst sınırları, ϕ faz yeşil süresi, $\phi_{\min}$ minimum faz yeşil süresi, l yeşillerarası süre ve z kavşaktaki faz sayısı olarak ifade edilmiştir. Denklem (4)'de verilen ifade herhangi bir a bağının denge akımı değerinin ilgili bağın kapasitesine eşit ya da ondan daha küçük olması durumunu sağlamak için kullanılmıştır. Burada x_a^* a bağındaki denge akımı, C_a a bağının kapasitesi ve s_a ise doymuş akım değeri olarak ifade edilmiştir. Denklem (5) SKD trafik ataması ile ilgili kısıtları temsil etmektedir. Burada Λ B-V/rota belirleme matrisi $[\Lambda_p, \forall p \in P]$, h rota akım vektörü, δ bağ/rota belirleme matrisi ve eğer a bağı rota p üzerinde ise $\delta_{ap} = 1$ aksi takdirde $\delta_{ap} = 0$ $[\delta_{ap}, \forall a \in A; \forall p \in P]$. SKD ataması problemi Bell ve Shield (1995) tarafından geliştirilen Rota Akım Tahmin (RAT) algoritması kullanılarak etkin bir biçimde çözülebilmektedir. Bu nedenle literatürde SKD atama probleminin çözümünde RAT algoritması birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Ceylan ve Bell, 2004; Baskan ve diğ., 2019a).

Yedek kapasite maksimizasyon problemini temsil eden Denklem (1)'de verilen ifade DG algoritmasının en küçükleme metodu olmasından dolayı Denklem (6)'da verildiği gibi minimizasyon problemi olarak ifade edilmiş ve ifadenin sağ tarafı ceza fonksiyonu olarak oluşturulmuştur.

$$\min u = \frac{1}{\mu} + \sigma \overbrace{\left[\sum_{a \in A} \max(x_a^* - C_a, 0) \right]}^{\text{ceza fonksiyonu}} \quad (6)$$

σ parametresi ceza fonksiyonuna ait ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Ceza fonksiyonunun kullanılması ile herhangi bir a bağının denge akım değeri ilgili bağın kapasitesinden fazla ise bu durum minimizasyon problemine ceza olarak uygulanacak aksi durumda ise fonksiyon değerinde herhangi bir değişiklik olmayacaktır.

İki Seviyeli Programlama Modeli

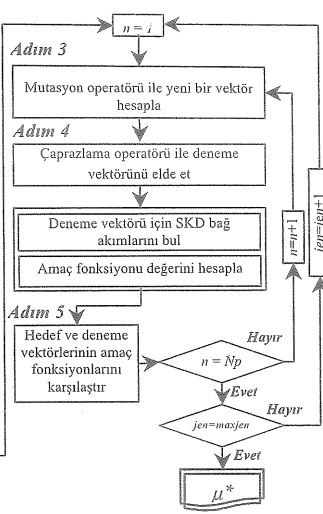
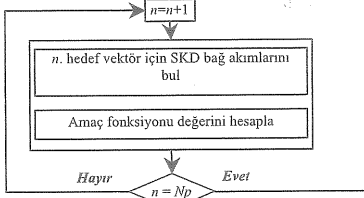
Geleneksel olarak iki seviyeli programlama bir çift optimizasyon probleminden oluşan programlama tekniği olarak tanımlanmaktadır. Bu tür programlamada üst seviye ve alt seviyelerin parametreleri her iki seviye için girdi ve çıktı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak bu tür programlama modelinde meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise Storn ve Price (1997) tarafından geliştirilen DG algoritması kullanılmıştır. DG algoritması popülasyon temelli olup kompleks optimizasyon problemlerinin çözümünde literatürde birçok farklı alanda uzun yıllardır kullanılmaktadır. DG algoritması herhangi bir optimizasyon probleminin çözümünde en uygun ya da en uyguna yakın sonuçlara ulaşmak için mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerini kullanmaktadır. Algoritmada diğer meta-sezgisel algoritmalara kıyasla daha az kontrol parametresi bulunmaktadır. F ile belirtilen mutasyon faktörü ve CR olarak ifade edilen çaprazlama oranı algoritmada kullanılan kontrol parametreleridir. Bunun dışında tüm toplum temelli meta-sezgisel algoritmalarda olduğu gibi N_p ile belirtilen toplum büyüklüğü parametreside kullanılmaktadır. Yedek kapasite probleminin çözümü için geliştirilen DG algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modelinin beş adımlı çözüm algoritması Şekil 1'de verilmiştir.

Adım 1

- Sınır değerler ($\varphi_{\min}, \mu_{\min}, \mu_{\max}, c_{\min}, c_{\max}$)
- Ağ parametreleri (q, t^0, s)
- DG algoritması parametreleri (Np, F, CR)
- $jen = 1$ ve $n = 0$

Adım 2

Talep matrisi çarpanı ve sinyal sürelerini dikkate alarak hedef vektörlerin oluşturulması



Şekil 1 DG algoritması tabanlı yedek kapasite maksimizasyon modeli

Adım 1: Başlangıç olarak da adlandırılan bu adımda talep çarpanı, devre süresi ve faz yeşil sürelerinin sınır değerleri, ulaşım ağı ile ilgili parametreler (B-V matrisi, bağ serbest akım seyahat süreleri, doymun akım) ve DG algoritması parametreleri tanımlanmalıdır. Ayrıca n ile belirtilen sayaç değeri 0 ve jen olarak ifade edilen jenerasyon sayısı ise 1 olarak alınmalıdır.

Adım 2: Bu adımda talep çarpanı ve sinyal süreleri alt ve üst sınır değerleri dikkate alınarak başlangıç toplumu oluşturulmaktadır. Oluşturulan matrisin satır sayısı Np olarak ifade edilen toplum büyüklüğü kadar sütun sayısı ise probleme özgü olarak belirlenen karar değişkeni sayısı kadar olmaktadır. Sonrasında toplum içindeki her bir çözüm vektörüne ait SKD bağ akımları ve Denklem (6)'da verilen amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır. Denklem (7)'de başlangıç toplumu ve çözüm vektörleri gösterilmektedir. Burada $\varphi_{i,j}$ notasyonu i . kavşağın j . fazının yeşil süresini, z_n ise n . kavşaktaki faz sayısını temsil etmektedir ($i=1,2,\dots, N$ ve $j=1,2,\dots, z_n$).

$$\begin{bmatrix}
 \begin{array}{cc|cccc}
 \text{B-V} & \text{Devre} & & & & \text{Yeşil} \\
 \text{çarpanı} & \text{süresi} & & & & \text{süre} \\
 \hline
 \mu^1 & c^1 & \varphi_{1,1}^1 & \varphi_{1,2}^1 & \dots & \varphi_{1,z_1}^1 & \varphi_{2,1}^1 & \dots & \varphi_{N,z_N}^1 \\
 \mu^2 & c^2 & \varphi_{1,1}^2 & \varphi_{1,2}^2 & \dots & \varphi_{1,z_1}^2 & \varphi_{2,1}^2 & \dots & \varphi_{N,z_N}^2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \mu^{Np-1} & c^{Np-1} & \varphi_{1,1}^{Np-1} & \varphi_{1,2}^{Np-1} & \dots & \varphi_{1,z_1}^{Np-1} & \varphi_{2,1}^{Np-1} & \dots & \varphi_{N,z_N}^{Np-1} \\
 \mu^{Np} & c^{Np} & \varphi_{1,1}^{Np} & \varphi_{1,2}^{Np} & \dots & \varphi_{1,z_1}^{Np} & \varphi_{2,1}^{Np} & \dots & \varphi_{N,z_N}^{Np}
 \end{array} \\
 \hline
 \text{Çözüm vektörleri, } \Gamma
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{bmatrix}
 \text{Amaç} \\
 \text{fonksiyonu} \\
 \hline
 u(x^*(\Gamma), \Gamma)^1 \\
 u(x^*(\Gamma), \Gamma)^2 \\
 \dots \\
 u(x^*(\Gamma), \Gamma)^{Np-1} \\
 u(x^*(\Gamma), \Gamma)^{Np}
 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Adım 3: Bu adımda rastgele ve birbirinden farklı olarak toplum içinden seçilen üç adet çözüm vektörü ve F faktörü kullanılarak mutasyon operatörü gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada seçilen üç farklı vektör aynı zamanda hedef vektörden de farklı olmaktadır. Mutasyona uğramış vektör Denklem (8)'de verilen ifade ile elde edilebilmektedir. Burada $r0$, $r1$ ve $r2$ rastgele seçilen vektörlerin indislerini temsil etmektedir.

$$P_{i,jen} = \Gamma_{r0,jen} + F \cdot (\Gamma_{r1,jen} - \Gamma_{r2,jen}) \quad (8)$$

Adım 4: Bu aşamada çaprazlama operatörü kullanılarak hedef vektör ve mutasyona uğramış vektörden deneme vektörü adı verilen yeni vektör Denklem (9)'da görüldüğü gibi oluşturulmaktadır.

$$E_{i,jen} = \varepsilon_{j,i,jen} = \begin{cases} \rho_{j,i,jen} & \text{Eğer } (rastgele(0,1) \leq CR \text{ or } j = j_{rastgele}) \\ \gamma_{j,i,jen} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (9)$$

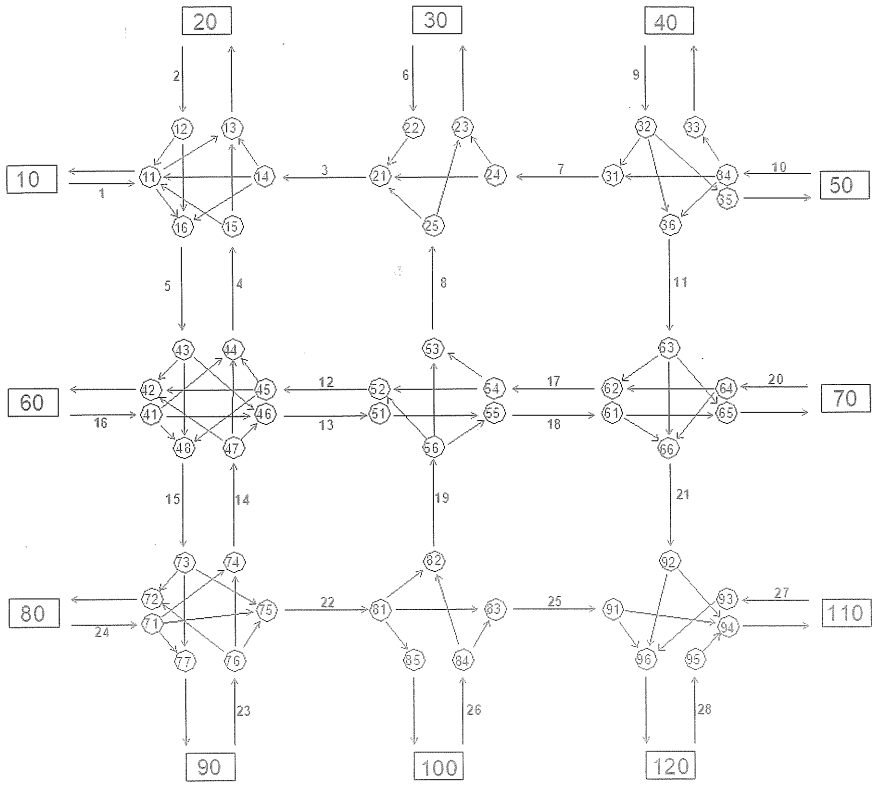
Adım 5: DG algoritmasının son adımı seçim operatörüdür. Bu aşamada hedef ve deneme vektörlerinin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılmakta ve daha küçük değer veren vektör bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Seçim işlemi Denklem (10)'da görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir.

$$\Gamma_{i,jen+1} = \begin{cases} E_{i,jen} & \text{Eğer } u(x^*(E_{i,jen}), E_{i,jen}) \leq u(x^*(\Gamma_{i,jen}), \Gamma_{i,jen}) \\ \Gamma_{i,jen} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (10)$$

DG algoritması seçilen maksimum jenerasyon sayısına ($maxjen$) ulaşılan kadar veya önceden belirlenen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilmektedir.

Sayısal Uygulama

Yedek kapasite maksimizasyonu probleminin çözümü için geliştirilen iki seviyeli programlama modeli, literatürde Gartner ve diğ. (1974) tarafından verilen ulaşım ağına modifiye edilmiş hali üzerinde test edilmiştir. Şekil 2'de verilen ulaşım ağı 96 adet B-V çifti, 9 adet sinyalizasyon kavşak ve 28 adet bağdan oluşmaktadır. Her kavşak 2 fazlı olarak işletilmektedir (Jovanovic ve diğ., 2017). Minimum faz yeşil süresi 7 sn, minimum ve maksimum devre süreleri ise sırasıyla 30 ve 120 sn olarak alınmış olup bu değerler sinyal kontrolü ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yeşillerarası süre 5 sn ve B-V matrisi çarpanının minimum ve maksimum değerleri sırasıyla 1 ve 3 olarak seçilmiştir. Doygun akım değeri 1800 ta/sa/şe, serbest akım hızı ise 50 km/sa olarak alınmıştır. Tablo 1'de bağ uzunlukları ve serbest akım hızı kabulüne bağlı olarak elde edilen serbest akım seyahat süreleri verilmiştir. Ulaşım ağındaki giriş bağlarının (1, 2, 6, vd.) serbest akım seyahat süreleri 1 sn olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2 Test Ulaşım Ağı

Tablo 1 Bağ uzunlukları (l_a) ve serbest akım seyahat süreleri (t^0)

Bağ Numarası	l_a (m)	t^0 (sn)	Bağ Numarası	l_a (m)	t^0 (sn)	Bağ Numarası	l_a (m)	t^0 (sn)
3	183	13.18	12	183	13.18	18	244	17.57
4	305	21.96	13	183	13.18	19	168	12.10
5	305	21.96	14	168	12.10	21	168	12.10
7	244	17.57	15	168	12.10	22	183	13.18
8	305	21.96	17	244	17.57	25	244	17.57
11	305	21.96						

Tablo 2’de görüldüğü üzere 96 adet B-V çiftinden oluşan talep matrisinde toplam seyahat talebi saatlik 6344 taşıttır. Geliştirilen DG algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modelinde F ve CR parametreleri literatürle uyumlu olarak 0.80 olarak seçilmiştir (Baskan ve diğ., 2019a). Test ulaşım ağındaki kavşaklara ait devre süreleri, faz yeşil süreleri ve B-V matrisi çarpanı göz önüne alındığında optimizasyon probleminin karar değişkeni sayısı 28’dir. Bu nedenle algoritmada N_p toplum büyüklüğü sayısı 60 olarak seçilmiştir. Maksimum jenerasyon sayısı (max_{jen}) ise 300 olarak alınmıştır. İki seviyeli programlama modelinin DG algoritması ile çözülmesi neticesinde amaç fonksiyonu değeri 0.807 ve B-V matrisi çarpanının maksimum değeri

yaklaşık 1.24 olarak elde edilmiştir. Elde edilen maksimum B-V matrisi çarpanı için en iyi sinyal süreleri Tablo 3’de verilmektedir.

Tablo 2 B-V talep matrisi (taşıt/saat)

B/V	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	--	100	100	--	--	100	100	100	100	100	100	100
20	60	--	60	--	--	60	60	60	60	60	60	60
30	60	60	--	--	--	60	60	60	60	60	60	60
40	60	60	60	--	60	60	60	60	60	60	60	60
50	40	40	40	40	--	40	40	40	40	40	40	40
60	50	50	50	--	--	--	50	50	50	50	50	50
70	70	70	70	--	--	70	--	70	70	70	70	70
80	90	90	90	--	--	90	90	--	90	90	90	90
90	110	110	110	--	--	110	110	110	--	110	110	110
100	30	30	30	--	--	30	30	30	30	--	30	30
110	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	45
120	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	69	--

Tablo 3 En iyi sinyal süreleri

Devre Süresi (sn)	Kavşak numarası	Yeşil süreler (sn)	
		Faz 1	Faz 2
		$\phi_{1,1}$	$\phi_{1,2}$
120	1	55	55
56	2	15	31
35	3	8	17
110	4	28	72
96	5	56	30
84	6	38	36
120	7	41	69
89	8	43	36
74	9	34	30

Tablodan görülebileceği gibi elde edilen en iyi faz yeşil ve kavşak devre süreleri analiz başlangıcında göz önüne alınan sınır şartlarını sağlamaktadır. Analiz sonucunda elde edilen SKD bağ trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri Tablo 4’te görölmektedir.

Tablo 4 Bağ trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri

Bağ Numarası	Bağ trafik hacimleri (ta/sa)	Doyumluk Derecesi (%)	Bağ Numarası	Bağ trafik hacimleri (ta/sa)	Doyumluk Derecesi (%)
1	1116	68	15	2043	99
2	666	40	16	558	61
3	1287	78	17	857	41
4	744	45	18	1198	74
5	2350	99	19	259	23
6	666	67	20	783	48
7	620	64	21	1001	69
8	756	38	22	1378	79
9	814	47	23	1008	49
10	550	67	24	1224	99
11	620	40	25	659	40
12	830	91	26	333	19
13	1669	79	27	56	7
14	1485	63	28	86	12

Toplam B-V talebi yaklaşık % 24 artırılarak 7866 ta/sa değerine ulaşmasına rağmen Tablo 4'ten görüldüğü gibi bağlara ait doygunluk dereceleri 1'in altındadır. Test ulaşım ağında 5, 15, ve 24 numaralı bağlar 0.99 değeriyle en yüksek doygunluk derecesine sahip bağlar olup, 27 ve 28 numaralı bağlar ise en az doygunluk derecesine sahip bağlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak analiz sonuçları bağ kapasiteleri aşılmadan test ulaşım ağının yaklaşık % 24'lük bir yedek kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bilindiği gibi kentiçi ulaşım ağlarındaki seyahat talebi artan nüfus, hareketlilik ihtiyacı ve arazi kullanımlarındaki plansızlıklar neticesinde günden güne artmaktadır. Yerel yöneticiler ise artan ulaşım talebi ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan trafik kaynaklı problemlerin en aza indirilebilmesi için yoğunlukla yüksek maliyetli çözümleri tercih etmektedirler. Ancak özellikle gelişmekte olan ülkeler açısından yerel ve makro ölçekte ülke kaynaklarının verimli kullanılması önem arz etmektedir. Bu nedenle çalışmada yedek kapasite maksimizasyonu probleminin çözümü için DG algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modeli geliştirilmiştir. Üst seviyede ulaşım ağına ait B-V seyahat matrisi çarpanının maksimum yapılması hedeflenirken alt seviyede ise talep matrisindeki değişikliklere karşı sürücülerin tepkileri SKD trafik atama probleminin çözülmesi ile temsil edilmiştir. İki seviyeli modelin çözümü için DG algoritması kullanılmıştır. SKD trafik atama problemi ise RAT algoritması ile çözülmüştür. Geliştirilen iki seviyeli modelin uygulanabilirliği büyük ölçekli bir ulaşım ağında test edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde bağların kapasitelerini aşmamaları koşulu altında test ulaşım ağının B-V matrisinin % 24 artırılarak toplam seyahat talebinin yaklaşık olarak 7900 ta/sa olabileceği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar yüksek maliyetli kapasite artırım yöntemleri yerine en uygun sinyal sürelerinin belirlenmesi neticesinde ulaşım ağının kapasitesinin kayda değer bir oranda artırılabilirliğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, karar vericiler tarafından yüksek maliyetli yatırımlar yaparak ulaşım ağlarında kapasite artırımına gidilmeden önce uygun sinyal sürelerinin belirlenmesi ile yedek kapasite yaratılmasının kaynakların verimli kullanılması noktasında oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

Allsop, R. E. (1972) Estimating the traffic capacity of a signalized road junction. Transportation Research, 6, 245-255.

Baskan, O. and Ozan, C. (2017) Reserve Capacity Model for Optimizing Traffic Signal Timings with an Equity Constraint. H. Yaghoubi (Edt.), Highway Engineering, pp. 1-15, IntechOpen.

Baskan, O., Ceylan, H., and Ozan, C. (2019a) A Simultaneous Solution for Reserve Capacity Maximization and Delay Minimization Problems in Signalized Road Networks. Journal of Advanced Transportation, vol. 2019, Article ID 6203137, 18 pages.

Başkan, Ö., Ozan, C., ve Ceylan, H. (2019b) Kentiçi Karayolu Ağlarında Işık Süreleri Dikkate Alınarak Yedek Kapasitenin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, ISSN: 1308-6693, (kabul edildi)

Bell, M.G.H. and Shield, C.M. (1995) A log-linear model for path flow estimation. In Proceedings of the 4th International Conference on the Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering, Y. J. Stephanedes and F. Filippi, Eds., pp. 695–699, Capri, Italy.

Ceylan, H. and Bell, M. G. H. (2004) Reserve capacity for a road network under optimized fixed time traffic signal control. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 8(2), 87-99.

Chiou, S.-W. (2007) Reserve capacity of signal-controlled road network. Applied Mathematics and Computation, 190 (2), 1602-1611.

Chiou, S.-W. (2009) Optimization for signal setting problems using non-smooth techniques. Information Sciences, 179, 2985-2996.

Chiou, S.-W. (2014) Optimal signal-setting for road network with maximum capacity. Information Sciences, 273, 287-303.

Jovanovic, A., Nikolic, M., and Teodorovic, D. (2017) Area-wide urban traffic control: A Bee Colony Optimization approach. Transportation Research Part C, 77, 329-350.

Gartner, N.H., Little, J., and Gabbay, H. (1974) Optimization of Traffic Signal Settings in Network by Mixed-Integer Linear Programming. Operations Research Center Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Miandoabchi, E. and Farahani, R.Z. (2011) Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem. Advances in Engineering Software, 42 (12), 1041-1050.

Storn, R. and Price, K. (1997) Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of Global Optimization, 11(4), 341–359.

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

Wong, S.C. and Yang, H. (1997) Reserve capacity of a signal-controlled road network. Transportation Research Part B, 31, 397-402.

Yagar, S. (1985) Addressing errors and omissions in paper on intersection capacity maximization. Transportation Research Part B, 19, 81-84.

Yang, H., Bell, M.G.H., and Meng, Q. (2000) Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks. Transportation Research Part B, 34(4), 255-275.

Ziyou, G. and Yifan, S. (2002) A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice. Transportation Research Part B, 36, 313-323.