

# Kent içi karayolu ağlarında yedek kapasite ve taşıt emisyonu problemlerinin eş zamanlı çözümü

Cenk OZAN<sup>1\*</sup>, Özgür BAŞKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Efeler, Aydın.

<sup>2</sup>Pamukkale Üniversitesi Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Kınıklı kampüsü, Denizli.

Geliş Tarihi (Received Date): 23.01.2024

Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.03.2024

## Öz

Kent içi karayolu ağlarında oluşan trafik sıkışıklıkları ve bunun beraberinde getirdiği problemler uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Trafik sıkışıklığının azaltılması amacıyla yerel yönetimlerin ilk olarak başvurduğu yöntemler yol genişletme ve kavşak kontrol tipinin değiştirilmesi olmaktadır. Ancak özellikle ışıklı kavşakların büyük çoğunlukta olduğu gelişmekte olan ülkelerde kent içi ulaşım ağlarında ışık sürelerinin optimizasyonu ile ulaşım ağlarında yedek kapasite yaratılabilmektedir. Diğer taraftan yedek kapasite yaratılması ulaşım ağında oluşan taşıt emisyon miktarının artması sonucunu beraberinde getirmekte ve bu durum çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle ışık sürelerinin optimizasyonu ile yedek kapasite yaratılırken aynı zamanda taşıt emisyon miktarlarının da belli bir seviyede tutulması gerekliliği açıktır. Bu amaçla çalışmada, kent içi ulaşım ağlarında yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyonları en küçükleme problemlerinin eş zamanlı çözümü amacıyla çok amaçlı iki seviyeli bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Model 9 adet ışıklı kavşaktan oluşan bir test ulaşım ağına uygulanmıştır. Sonuçlar ulaşım ağının fiziksel ve işletimsel özelliklerinin izin verdiği kapasite kullanımının taşıt kaynaklı emisyon miktarında ciddi oranlarda artışa yol açtığını göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Yedek kapasite, taşıt emisyonları, ışıklı kavşak, iki-seviyeli programlama, kent içi karayolu ağları.

\*Cenk OZAN, cenk.ozan@adu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0690-6033>

Özgür BAŞKAN, obaskan@pau.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5016-8328>

## Simultaneous solution for reserve capacity maximization and vehicle emission minimization problems in urban road networks

### Abstract

*The traffic congestion in urban road networks and the arising problems have attracted the attention of researchers for many years, and many studies have been carried out on this subject. The first practices applied by local authorities to reduce congestion are road expansion and changes in intersection control type. However, it is possible to reveal reserve capacity in urban road networks by optimising the timing of traffic signals, particularly in developing countries where most intersections are controlled by traffic signals. The release of reserve capacity, on the other hand, causes an increase in vehicle emissions in the urban road network, which has a negative impact on the environment and human health. For this reason, it is clear that, while releasing reserve capacity by optimizing the timing of traffic signals, it is also necessary to keep vehicle emissions at a certain level. For this purpose, in this study, a multi-objective bi-level optimisation model is developed for the simultaneous solution of reserve capacity maximisation and vehicle emissions minimization problems in urban road networks. The developed model has been applied to a road network consisting of 9 signalized intersections. The results show that the capacity utilisation allowed by the physical and operational characteristics of the road network leads to a significant increase in vehicle emissions.*

**Keywords:** Reserve capacity, vehicle emissions, signalized intersections, bi-level programming, urban road networks.

### 1. Giriş

Gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere tüm dünyada kentsel nüfus hızlı bir biçimde artmaktadır. Kentsel nüfusun artması, özellikle toplu taşıma sistemlerinin daha az kullanıldığı kentlerde artan özel taşıt kullanımı neticesinde trafik sıkışıklığının ve bunun beraberinde getirdiği problemlerin artmasına neden olmaktadır. Artan ulaşım talebinin karşılanması noktasında yerel yöneticiler/karar vericiler yol genişletme, şerit ekleme, kavşak geometrisini iyileştirme ve kavşak kontrol tipinin değiştirilmesi şeklinde yüksek maliyetli önlemler almaktadırlar. Ancak bu tür önlemler alınmadan önce ulaşım ağının mevcut kapasitesinin yanında, uygun olmayan ışık sürelerinin kullanılmasına bağlı olarak atıl durumda bekleyen yedek kapasitesinin kullanılması çok daha az maliyetli ve verimli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Yedek kapasite kavramı ulaştırma literatüründe uzun yıllardır kullanılmaktadır. Yedek kapasite en büyükleme problemi ışıklı kavşaklardan oluşan bir ulaşım ağında Başlangıç-Variş (B-V) talep matrisi çarpanının en yüksek değerinin elde edildiği ışık sürelerinin elde edilmesi olarak ifade edilebilmektedir. Elde edilen optimum ışık süreleri kullanılarak ulaşım ağındaki bağların kapasiteleri aşılmadan daha fazla ulaşım talebine hizmet edilebilmektedir. Diğer bir deyişle B-V matrisi çarpanının en yüksek değerinin elde edilmesi ile ulaşım ağında yüksek maliyetli iyileştirme çalışmaları yapılmadan önce ışık sürelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile yedek kapasite yaratılabilmektedir.

Bu konuda literatürde yapılan çalışmalar Webster ve Cobbe [2] tarafından yapılan çalışma ile başlamıştır. Bu çalışmada ışık sürelerinin kavşak kapasitesi üzerindeki etkileri

birçok açıdan ele alınmış ve ışıklı kavşaklardaki kapasite tahmini üzerine bir metot geliştirilmiştir. Webster ve Cobbe [2] tarafından yapılan çalışmadaki eksikliklere dikkate çeken Allsop [3] yapmış olduğu çalışmada neredeyse tüm kavşak tiplerine ve devre sürelerine uygun yeni bir kapasite tahmin modeli geliştirmiştir. Wattelworth ve Ingram [4] benzer şekilde ışıklı kavşaklarda kapasitenin en büyüklenmesi için doğrusal programlama metodu geliştirmiştir. Yagar [5] literatürde önceki çalışmaların eksikliklerine dikkat çekerek ışıklı kavşaklarda bir devre süresi içinde fazlar arasında farklı doygun akım değerlerinin kullanılabilmesine olanak sağlayan yeni bir kapasite tahmin modeli önermiştir. Allsop [3] tarafından ortaya atılan yedek kapasite tanımlamasından yolan çıkan Wong [6] çalışmasında öncelikli kavşaklar ve modern dönel kavşaklar için kullanılabilir yeni bir model ve formülasyon önermiştir. Sayısal uygulamaların sonuçları önerilen formülasyonun geçerliliğini göstermiştir. Wong ve Yang [7] tarafından yapılan çalışmada, o zamana kadar performans kriteri ve kavşak ışık sürelerinin tasarımı konularında kullanılan yedek kapasite kavramı bu çalışmada ilk olarak ulaşım ağı düzeyinde kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca yedek kapasite en büyükleme probleminde ışık sürelerinin belirlenmesinde iki seviyeli programlama modeli kullanılmıştır. Ziyou ve Yifan [8] ilk olarak kavşak bazında yedek kapasite en büyükleme kavramı ile sürekli ulaşım ağ tasarım problemi olarak ele alınan bağ kapasite artırım problemini birlikte ele almıştır. Yedek kapasiteyi etkileyen parametreleri inceleyen Ge ve diğ. [9] tarafından yapılan çalışmada iki seviyeli programlama modeli kullanılmıştır. Üst seviyede B-V talep matrisi çarpanının en büyük değeri belirlenmeye çalışılırken alt seviyede ise deterministik trafik atama probleminin çözümü yapılmıştır. Sonuçlar kullanıcı bilgi seviyesi arttıkça yedek kapasitenin aynı oranda artmadığını göstermiştir.

Chen ve diğ. [10] yedek kapasite formülasyonunun içine güvenilirlik indeksini dahil etmeyi amaçladıkları çalışmalarında farklı trafik koşulları altında hizmet veren ulaşım ağındaki bağların kapasitelerinin altında işletilebilme olasılıklarını ortaya koymuşlardır. Miandoabchi ve Farahani [11] ulaşım ağlarındaki tek yön ve şerit ekleme uygulama problemlerini yedek kapasite kavramı altında ifade etmişlerdir. Chiou [12] çalışmasında iki seviyeli programlama modeli kullanarak ulaşım ağındaki yedek kapasiteyi maksimum yaparken aynı zamanda taşıt gecikmelerini de minimum yapan optimum ışık sürelerini elde etmiştir. Wang ve diğ. [13] ulaşım ağındaki yedek kapasite en büyükleme probleminde stokastik kullanıcı davranışlarını dikkate almışlardır. Çalışmada iki adet iki seviyeli programlama modeli önerilmiştir. İlk olarak ışık sürelerinin optimum değerleri elde edilerek ağıdaki yedek kapasitenin maksimum değeri elde edilmiştir. Sonrasında ise problem sürekli ağ tasarım problemi kapsamında genişletilerek bağ kapasite genişletme stratejileri uygulanmış ve yedek kapasitenin daha ne kadar artırılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Baskan ve Ozan [14] ışık sürelerinin eniyilenmesinde eşitlik kavramını dikkate alarak yedek kapasite en büyükleme problemini çözmeyi amaçlamışlardır. Çözümde sezgisel optimizasyon algoritmalarından olan Armoni Araştırması Tekniğini kullanarak iki seviyeli programlama modeli geliştirmişlerdir. Sonuçlar yedek kapasite en büyükleme probleminde eşitlik kavramının dikkate alınmasının anlamlı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir. Son olarak Baskan ve diğ. [15] yedek kapasite en büyükleme ve taşıt gecikmeleri en küçükleme problemlerini eş zamanlı olarak çözebilen çok amaçlı iki seviyeli programlama modeli geliştirmişlerdir. Sonuçlar B-V matrisi çarpanının belli bir değerinden sonra taşıt gecikmelerinin ciddi oranlarda artmaya başladığını bu nedenle yedek kapasite en büyükleme probleminin çözümünde taşıt gecikmelerinin dikkate alınmasının önemli olduğunu göstermiştir.

Baskan ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada belirtildiği üzere taşıt gecikmelerini dikkate almadan yedek kapasitenin en büyüklenmesi taşıt gecikmelerinin ciddi miktarda artmasına neden olabilmektedir. Benzer şekilde ulaşım ağında ortaya çıkarılan yedek kapasite ile ağın daha fazla taşıta hizmet edebilmesi sağlanırken diğer taraftan ise taşıt emisyonları artan taşıt sayısına bağlı olarak ciddi miktarda artabilmektedir. Bir başka ifadeyle ulaşım ağının daha fazla taşıta hizmet etmesi hedeflenirken diğer taraftan çevre kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri bilinen taşıt emisyonlarının artırılması problemi ile karşı karşıya kalınabilmektedir. Bu nedenle taşıt emisyonlarını dikkate alarak yedek kapasitenin en büyüklenmesi oldukça önemlidir. Literatüre bakıldığında problemi bu açıdan değerlendiren çalışma sayısı oldukça azdır. Kwak ve diğ. [16] çalışmalarında bir kent içi arterde ışık sürelerinin yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Işık sürelerinin eniyilenmesi için trafik benzetim yazılımı, emisyon/yakıt tüketimi modeli ve genetik algoritma metodu birleştirilerek bir model önerilmiştir. Sonuçlar geliştirilen modelin literatürdeki modellerden daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ferguson ve diğ. [17] tarafından yapılan çalışmada ağ tasarım problemi taşıt emisyonları göz önüne alınarak ifade edilmiş ve yapılan analizler emisyonları dikkate almadan taşıt gecikmelerinin azaltılmasının ağ genelinde taşıtlardan kaynaklı emisyonları artırdığını göstermiştir. Zhang ve diğ. [18] koordine ışık sistemi ile yönetilen bir kent içi arterde taşıtlardan kaynaklı emisyonları dikkate alan iki amaçlı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Önerilen model simülasyon tabanlı genetik algoritma ile çözümlenmiş ve pareto optimum sonuçlar elde edilmiştir. Li ve Ge [19] yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyonları en küçükleme problemlerini beraber ele almıştır. Çözüm için tavlama benzetimi yöntemi tabanlı iki seviyeli programlama modeli kullanılmış ve alt seviyede deterministik bağ akımları dikkate alınmıştır. Son olarak Baskan [20] yedek kapasite en büyükleme probleminin çözümünde aynı zamanda ulaşım ağındaki taşıt emisyon miktarlarını da minimuma indirmeyi amaçlayan iki seviyeli bir programlama modeli geliştirmiştir. Sonuçlar birbiri ile çelişen iki amaç fonksiyonu arasında pareto optimum sonuçların elde edilmesinin sürdürülebilir ulaşım ağ yönetimi konusunda karar vericilere yol gösterici nitelikte olduğunu göstermektedir.

Önceki çalışmalardan görülebileceği üzere ulaşım ağ tasarımında yedek kapasite ve taşıt emisyonlarını ayrı olarak ele alan birçok çalışma olmasına rağmen bu iki kavramın beraber ele alındığı az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca gerek yedek kapasite gerekse taşıt emisyonları kavramlarını farklı açılardan ele alan ve sonuçların beraber değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyonları en küçükleme problemlerini eş zamanlı olarak çözebilen iki seviyeli bir optimizasyon modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde problem formülasyonu verilmiştir. Sonraki bölümde problemin çözümü amacıyla önerilen model detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde önerilen modelin test ulaşım ağına uygulanması ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde çalışmanın sonuçları ve öneriler yer almaktadır.

## 2. Problem formülasyonu

Ulaşım ağlarından sorumlu yerel yöneticiler ulaşım talebine karşılık verebilmek için uygun olmayan ışık sürelerinden dolayı kullanılmayan yedek kapasiteyi en büyükleme çalışabilmektedirler. Diğer taraftan ulaşım talebindeki artışla beraber artacak olan taşıt emisyon miktarlarını en küçükleme için çeşitli çözüm yolları aramaktadırlar. Yerel yöneticilerin ulaşmak zorunda olduğu bu iki hedef arasında bir

çelişki bulunmaktadır. Ayrıca, yerel yöneticilerin bu hedefler doğrultusunda ulaşım ağı ile ilgili alacağı kararlar ağı kullanan kullanıcıları da etkilemektedir. Ulaşım ağı kullanıcıları yukarıda bahsedilen problemleri dikkate almadan kendi ulaşım maliyetlerini en küçükleyerek en kısa sürede seyahatlerini tamamlamayı amaçlamaktadırlar. Bu çalışmada, yerel yöneticiler ile ulaşım ağı kullanıcıları arasındaki karşılıklı etkileşimi ortaya koyan çok amaçlı iki seviyeli optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modelin alt seviyesinde karar vericilerin ağ üzerinde yaptığı değişikliklere karşılık kullanıcıların verdikleri tepkileri dikkate alabilmek için stokastik trafik atama problemi çözülmeye çalışılırken, üst seviyede ise yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyon miktarlarının en küçükleme problemleri eş zamanlı olarak çözümlenmeye çalışılmıştır.

Bir ulaşım ağında düğümler,  $m \in M$ , bağlar,  $a \in A$ , rotalar,  $p \in P$ , B-V çiftleri,  $k \in K$  olmak üzere problem aşağıda verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\max_{x^*, \Omega} \Psi \quad (1)$$

$$\min_{\Psi, x^*, \Omega} Y = \sum_{a \in A} x_a^* e_a \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$\Omega(c, \varphi) \in \Omega_0; \begin{cases} c_{\min}^i \leq c^i \leq c_{\max}^i \\ \sum_{j=1}^z (\varphi_j + I) = c^i \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

$$x_a^*(\Psi, \Omega) \leq C_a(\Omega, s_a) \quad (4)$$

Burada Denklem (1) yedek kapasite en büyükleme problemini,  $\Psi$  B-V matrisi çarpanını Denklem (2) toplam taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemini ve  $Y$  ise ağdaki toplam emisyon maliyetini ifade etmektedir.  $e_a$   $a$  bağının emisyon maliyetini ve  $x_a^*$   $a$  bağındaki denge trafik akımını temsil etmektedir. Denklem (3) ışık süre kısıtlarını ifade etmektedir. Burada,  $\Omega$  ışık süreleri vektörünü,  $\Omega_0$  ışık süreleri çözüm kümesini,  $c^i$   $i$ . kavşağın devre süresini,  $c_{\min}$  ve  $c_{\max}$  devre süresinin alt ve üst sınırlarını,  $\varphi$  faz yeşil süresini,  $\varphi_{\min}$  minimum faz yeşil süresini,  $I$  yeşiller arası süreyi,  $z$  kavşaktaki faz sayısını ve  $N$  ise ağdaki kavşak sayısını temsil etmektedir. Denklem (4)'de verilen ifade herhangi bir  $a$  bağı denge akımının ilgili bağın kapasitesine eşit veya ondan daha küçük olması şartını sağlamak için kullanılmaktadır. Burada,  $C_a$   $a$  bağının kapasitesini ve  $S_a$  doymuş akım değerini temsil etmektedir. Ulaşım ağındaki herhangi bir  $a$  bağının emisyon maliyeti ise şu şekilde hesaplanabilmektedir [21].

$$e_a = \sum_k \phi_k Q_a^k \quad (5)$$

Burada;  $\phi_k$   $k$  kirletici türünün birim ağırlık başına maliyetini ve  $Q_a^k$   $a$  bağından yayılan  $k$  kirletici türünün kg cinsinden miktarını temsil etmektedir. Szeto vd. [21], herhangi bir  $a$  bağından yayılan farklı kirletici türlerinin ağırlığını  $a$  bağının uzunluğu  $l_a$  (km) ve bağ ortalama hızının  $\bar{V}_a$  (km/sa,  $\bar{V}_a = l_a/t_a$ ) bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, taşıt emisyon maliyetini hesaplamak için Baskan [20] tarafından yapılan

çalışmadan farklı olarak insan sağlığı ve çevre üzerindeki önemli etkileri nedeniyle CO, HC ve NO<sub>x</sub> kirleticileri seçilmiştir [21]. Kirleticilere ait bağıntılar Denklem (6-8)'de verilmiştir.

$$Q_a^{CO} = \frac{10.15225e^{0.015977\bar{V}_a} l_a}{\bar{V}_a} \quad (6)$$

$$Q_a^{HC} = \frac{9132.504e^{0.016527\bar{V}_a} l_a}{10972.8\bar{V}_a} \quad (7)$$

$$Q_a^{NO_x} = \frac{5155.504e^{0.044694\bar{V}_a} l_a}{10972.8\bar{V}_a} \quad (8)$$

Denklem (1)'de verilen B-V matrisi çarpanı ile Denklem (2)'de verilen ulaşım ağı toplam taşıt emisyon maliyetinin belirlenebilmesi için bağ trafik akımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bağ akımları Denklem (9-10) ile ifade edilen stokastik trafik atama probleminin çözümü ile belirlenebilmektedir.

$$\min_{x(\Omega)} F(x(\Omega), \Omega) = -\Psi^T q + x^T t(x(\Omega), \Omega) - \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(\Omega)} t_a(\Omega, w) dw \quad (9)$$

Kısıtlar:

$$\Psi q = \partial h, \quad x(\Omega) = \delta h, \quad h \geq 0 \quad (10)$$

Burada  $\partial$  B-V/rota belirleme matrisini  $[\partial_p; \forall p \in P]$ ,  $h$  rota akım vektörünü,  $\delta$  bağ/rota belirleme matrisini,  $x(\Omega)$  bağ trafik akımları vektörünü,  $q$  talep vektörünü,  $t$  ve  $y$  ise bağ ve rota seyahat süre vektörlerini temsil etmektedir. Bell ve Shield [22] tarafından önerilen ve logit rota seçim modeline dayanan Rota Akım Tahmin (RAT) algoritması ile stokastik trafik atama problemi çözülebilmektedir. RAT algoritmasının en önemli avantajı rota numaralandırmaya ihtiyaç duymadan trafik atama probleminin çözüm kümesini sınırlandırması ve çözüm süresini azaltması nedeniyle birçok çalışmada kullanılmaktadır [1, 15, 20, 23-26].

Geliştirilen çok amaçlı iki seviyeli optimizasyon modeli, eşzamanlı olarak ulaşım ağının yedek kapasitesini en büyükmeyi ve ulaşım ağındaki toplam taşıt emisyonlarının maliyetini en küçükmeyi amaçlamaktadır. Bu iki amaç karşılıklı olarak etkileşim içinde bulunduğundan, Pareto-optimum çözümler arasından uygun bir çözüm bulunmalıdır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin Pareto-optimum çözüm kümesini belirlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan, ağırlıklı toplam yöntemi, çok amaçlı optimizasyon problemini tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürmek için kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Ancak, ağırlıklı toplam yöntemini kullanabilmek için her amaç fonksiyonunun aynı birimde veya birimsiz olması gerekmektedir. Bu çalışmada her bir amaç fonksiyonu farklı birime sahip olduğundan ağırlıklı toplam yöntemi uygulanmadan önce Denklem (11) ve (12)'deki gibi normalizasyon işlemi yapılarak edilerek birimsiz hale getirilmişlerdir.

$$P_1 = \frac{\Psi^*}{\Psi} \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{Y}{Y^*} \quad (12)$$

Burada  $\Psi^*$  ve  $Y^*$  Denklem (1) ve (2)'de verilen amaç fonksiyonlarının alt ve üst sınırlarını temsil etmektedir. Bu durumda, Denklem (1) ve (2)'de verilen yedek kapasite en büyükleme problemi ile taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemi ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak Denklem (3-4)'de verilen kısıtlara bağlı olarak aşağıda verildiği şekilde tek amaçlı en küçükleme problemine dönüştürülebilmektedir.

$$\min P(\Psi, \Omega, x^*) = \lambda P_1 + (1 - \lambda) P_2 \quad (13)$$

Burada  $\lambda$ ,  $P_1$  ve  $P_2$  ile ifade edilen amaç fonksiyonları arasındaki Pareto-optimum çözümleri bulmak için kullanılan ağırlık faktörünü temsil etmektedir ve değeri 0-1 arasında değişmektedir. Ulaşım ağlarından sorumlu yerel yöneticiler tarafından 1'e yakın ağırlık faktörü değeri kullanıldığında, yerel yöneticilerin ulaşım ağının yedek kapasitesinin iyileştirilmesine daha fazla özen gösterdikleri, bunun tersine, 0'a yakın bir ağırlık faktörü değeri kullanıldığında ise, ulaşım ağındaki taşıt emisyon maliyetini en küçüklemeye odaklandıkları anlamına gelmektedir.

### 3. Model geliřimi

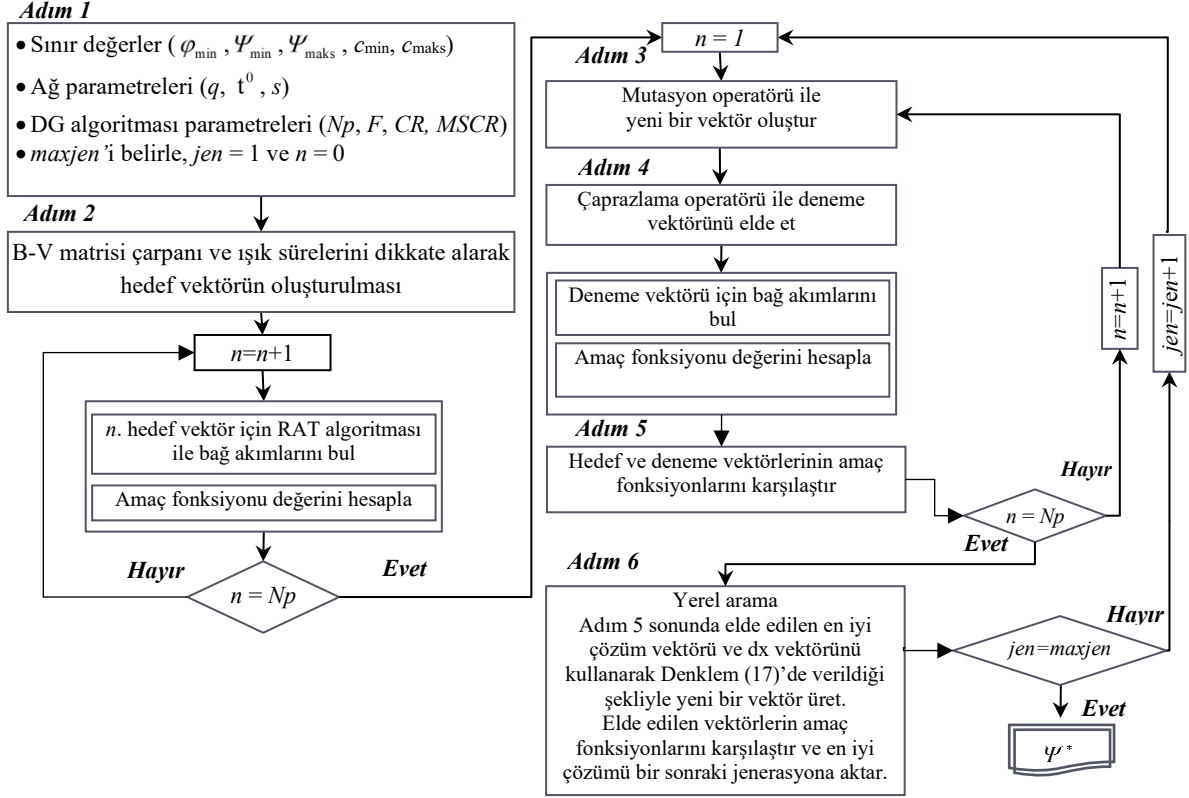
Bu çalışmada, geliştirilen çok amaçlı iki seviyeli optimizasyon modeli Baskan ve Ceylan [27] tarafından geliştirilen İyileştirilmiş Diferansiyel Gelişim (İDG) algoritması kullanılarak çözülmüştür. Storn ve Price [28] tarafından geliştirilen ve en güçlü meta sezgisel yöntemlerden biri olan popülasyon temelli Diferansiyel Gelişim (DG) algoritması karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde literatürde birçok farklı alanda uzun yıllardır kullanılmaktadır [29-32]. DG algoritması herhangi bir optimizasyon probleminin çözümünde en uygun veya en uyguna yakın sonuçlara ulaşmak için mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerini kullanmaktadır.  $F$  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 parametresi de kullanılmaktadır [28]. İDG algoritmasında standart DG algoritmasında kullanılan mutasyon stratejisine ek olarak her bir jenerasyonda en iyi çözüm vektörünün etkisini sürece dahil eden bir mutasyon mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca İDG algoritmasında her bir jenerasyon sonunda elde edilen en iyi çözüm vektörünü iyileştirebilmek ve sonraki jenerasyona daha iyi bir çözüm aktarabilmek adına yerel arama adı verilen bir iyileştirme mekanizması eklenmiştir. Denklem (13)'de verilen çok amaçlı optimizasyon modelinin çözümü için ilk olarak B-V matris çarpanının maksimum değeri  $\Psi^*$  ve taşıt emisyon maliyetinin minimum değeri  $Y^*$  değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle her iki problem ayrı ayrı İDG algoritması tabanlı iki seviyeli optimizasyon modeli yardımı ile çözülmüştür.

#### 3.1. Yedek kapasite en büyükleme modeli

Yedek kapasite en büyükleme problemini çözebilmek için, Denklem (1)'de verilen amaç fonksiyonu Denklem (3-4)'deki kısıtlara bağlı olarak İDG algoritmasının en küçükleme yapabilmesinden dolayı Denklem (14)'de verildiği gibi ifade edilmiştir.

$$\min U(x^*, \Omega) = \frac{1}{\Psi} + \sigma \left[ \sum_{a \in A} \max(x_a^*(\Psi, \Omega) - C_a(\Omega, s_a), 0) \right] \quad (14)$$

Denklem (14)'ün ikinci bileşeni, bağ akımlarının kapasite değerlerini aşmamasını sağlayan ceza fonksiyonunu,  $\sigma$  ise ceza ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Yedek kapasite en büyükleme probleminin çözümü için geliştirilen İDG algoritması tabanlı çözüm yönteminin akış şeması Algoritma-1 olarak Şekil 1'de verilmektedir.

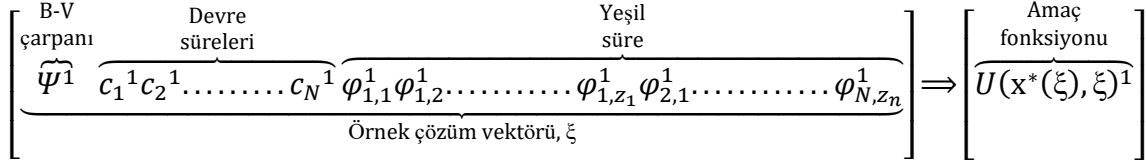


Şekil 1. Algoritma-1.

**Adım 1:** Başlangıç olarak adlandırılan bu adımda Denklem (14)'te verilen yedek kapasite en büyükleme probleminin amaç fonksiyonu, karar değişkenlerinin sınır değerleri, ulaşım ağı ile ilgili parametreler ve İDG algoritmasının parametreleri tanımlanmaktadır. Ayrıca  $n$  ile belirtilen sayaç değeri 0 ve  $jen$  olarak ifade edilen jenerasyon sayısı ise 1 olarak alınırken maksimum jenerasyon sayısı olan  $maxjen$  belirlenmektedir.

**Adım 2:** Bu adımda B-V matris çarpanı ile ışık sürelerinin alt ve üst sınır değerleri dikkate alınarak başlangıç toplumu rastgele oluşturulmaktadır. Oluşturulan matrisin satır sayısı  $Np$  olarak ifade edilen toplum büyüklüğü kadar sütun sayısı ise probleme özgü olarak belirlenen karar değişkeni sayısı ( $Kd$ ) kadar olmaktadır. Adım 2 toplumdaki her bir çözüm vektörü için amaç fonksiyonu değeri hesaplanana kadar devam ettirilmektedir. Şekil 2'de başlangıç toplumu içinde ilk satırda verilen örnek bir çözüm vektörü gösterilmektedir. Burada  $\varphi_{i,j}$   $i$ . kavşağın  $j$ . fazının yeşil süresini,  $N$  ulaşım ağındaki kavşak sayısını,  $z_n$  ise  $n$ . kavşaktaki faz sayısını temsil etmektedir ( $i=1,2,\dots, N$  ve  $j=1,2,\dots, z_n$ ).





Şekil 2. Algoritma 1 örnek çözüm vektörü.

**Adım 3:** Bu adımda rastgele ve birbirinden farklı olarak toplum içinden seçilen üç adet çözüm vektörü ve  $F$  faktörü kullanılarak mutasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada seçilen üç farklı vektör aynı zamanda hedef vektörden de farklı olmaktadır. İDG algoritmasında önceki jenerasyonda elde edilen en iyi çözüm vektörünün optimizasyon sürecine dahil edilebilmesi için MSCR parametresi kullanılmaktadır. Eğer (0,1) aralığında rastgele olarak üretilen değer MSCR parametresinden küçük ise standart mutasyon stratejisi kullanılmakta diğer durumda ise bir önceki jenerasyonda elde edilen en iyi çözüm vektörü mutasyon sürecinde kullanılmaktadır. MSCR parametresinin değeri bu çalışmada 0,90 olarak alınmıştır [27]. Mutasyona uğramış vektör Denklem (15)'de verilen ifade ile elde edilebilmektedir. Burada  $r_0$ ,  $r_1$  ve  $r_2$  rastgele seçilen vektörlerin indislerini temsil etmektedir.

$$\rho_{i,jen} = \begin{cases} \xi_{r_0,jen} + F \cdot (\xi_{r_1,jen} - \xi_{r_2,jen}) & \text{rastgele}(0,1) < \text{MSCR} \\ \xi_{r_0,jen} + F \cdot (\xi_{eniyei,jen-1} - \xi_{r_2,jen}) & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (15)$$

**Adım 4:** Bu aşamada ise çaprazlama operatörü kullanılarak hedef vektör ve mutasyona uğramış vektörden deneme vektörü adı verilen yeni bir vektör Denklem (16)'da görüldüğü gibi oluşturulmaktadır.

$$E_{i,jen} = \varepsilon_{j,i,jen} = \begin{cases} \rho_{j,i,jen} & \text{rastgele}(0,1) \leq CR \text{ veya } i = i_{rastgele} \\ \xi_{j,i,jen} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (16)$$

Burada  $\varepsilon_{j,i,jen}$ ,  $\rho_{j,i,jen}$  ve  $\xi_{j,i,jen}$  sırasıyla  $i$ . deneme, mutant ve hedef çözüm vektörlerinin  $j$ . elemanıdır. (0,1) arasında rastgele üretilen değer  $CR$  parametresinden küçük veya eşit ise  $E$  deneme vektörünün  $j$ . elemanı  $\rho$  mutant vektöründen aksi durumda ise  $\xi$  hedef vektöründen seçilir.  $i = i_{rastgele}$  koşulunun kullanılmasının amacı  $E$  deneme vektörünün en az bir elemanının  $\rho$  mutant vektöründen seçilmesini sağlamaktır. Deneme vektörü belirlendikten sonra, deneme vektörüne ait bağ akımları ve amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır.

**Adım 5:** Bu adımda hedef ve deneme vektörlerinin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılmakta ve daha küçük değer veren vektör o ana kadar elde edilen en iyi çözüm vektörü olarak saklanmaktadır.

**Adım 6:** Yerel arama olarak adlandırılan bu adımda o ana kadar elde edilen toplum içindeki en iyi çözüm vektörü  $\xi_{jen}^{eniyei}$ ,  $[\alpha_1, \alpha_2]$  aralığında rastgele olarak üretilen  $dx$  vektörü ile toplanarak çözümün iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Bu işlem sonucunda daha iyi çözüm elde edilmesi durumunda elde edilen vektör toplum içinde en iyi çözüm vektörü olarak saklanmakta ve bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Eğer daha iyi bir çözüm elde edilememişse bu durumda en iyi vektörden  $dx$  vektörü çıkartılarak daha iyi bir çözüm

vektörüne ulaşılmaya çalışılmaktadır. Bu sayede toplum içinde o ana kadar elde edilmiş en iyi çözüm vektörünün etrafında yerel arama yapılarak daha iyi çözümlere ulaşılmak hedeflenmektedir. Her bir yerel arama süreci sonunda en iyi çözümün etrafındaki sıçrama uzunluğunu azaltmak için dx vektörü %90 oranında azaltılmaktadır. Yerel arama süreci Denklem (17)'de verilen ifade ile gerçekleştirilmektedir.  $[a_1, a_2]$  aralığı probleme özgü karar değişkenlerinin alt ve üst limitlerine göre belirlenmektedir. İDG algoritması seçilen maksimum jenerasyon sayısına ( $maxjen$ ) ulaşılan kadar devam ettirilmektedir.

$$\xi_{jen+1}^{eniye} = \begin{cases} \xi_{jen}^{yeni} = \xi_{jen}^{eniye} + dx & \text{eğer } U(\xi_{jen}^{yeni}) < U(\xi_{jen}^{eniye}) \\ \xi_{jen}^{yeni} = \xi_{jen}^{eniye} - dx & \text{eğer } U(\xi_{jen}^{yeni}) < U(\xi_{jen}^{eniye}) \\ \xi_{jen}^{eniye} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (17)$$

### 3.2. Taşıt emisyon maliyeti en küçükleme modeli

Taşıt emisyon maliyeti en küçükleme probleminin çözümü için geliştirilen İDG algoritması tabanlı çözüm yöntemi, yedek kapasite en büyükleme modelinin çözüm algoritmasına benzer olarak altı adımdan oluşmaktadır. Algoritmanın ilk adımında Denklem (2) ile belirtilen emisyon maliyeti en küçükleme probleminin amaç fonksiyonu, karar değişkenleri olan ışık sürelerinin sınır değerleri, ulaşım ağı ile ilgili parametreler ve İDG algoritmasının parametreleri tanımlanmaktadır. Adım 2'de  $Np \times Kd$  büyüklüğündeki başlangıç toplumunu oluşturan ışık süreleri matrisi rastgele olarak oluşturulmaktadır. Sonrasında toplum içindeki her bir çözüm vektörüne ait bağ akımları ve Denklem (2)'de verilen amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3'te başlangıç toplumu içinde ilk satırda verilen örnek bir çözüm vektörü gösterilmektedir.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Devre} \\ \text{süreleri} \\ \hline c_1^1 c_2^1 \dots c_N^1 \\ \hline \text{Yeşil} \\ \text{süreler} \\ \hline \varphi_{1,1}^1 \varphi_{1,2}^1 \dots \varphi_{1,z_1}^1 \varphi_{2,1}^1 \dots \varphi_{N,z_n}^1 \\ \hline \text{Örnek çözüm vektörü, } \Lambda \end{array} \right] \Rightarrow \left[ \begin{array}{c} \text{Amaç} \\ \text{fonksiyonu} \\ \hline Y(x^*(\Lambda), \Lambda)^1 \end{array} \right]$$

Şekil 3. Taşıt emisyonları en küçükleme modeli çözüm algoritmasının örnek çözüm vektörü.

Adım 3'te birbirlerinden ve hedef vektörden farklı olarak toplum içinden rastgele seçilen üç adet çözüm vektörü ve  $F$  faktörü kullanılarak mutasyon işlemi Denklem (18)'deki verildiği şekliyle gerçekleştirilmektedir.

$$\rho_{i,jen} = \begin{cases} \Lambda_{r0,jen} + F \cdot (\Lambda_{r1,jen} - \Lambda_{r2,jen}) & \text{rastgele}(0,1) < MSCR \\ \Lambda_{r0,jen} + F \cdot (\Lambda_{eniye,jen-1} - \Lambda_{r2,jen}) & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (18)$$

Sonraki adımda çaprazlama operatörü kullanılarak hedef vektör ve mutasyona uğramış vektörden deneme vektörünün her bir elemanı Denklem (19)'da görüldüğü gibi oluşturulmaktadır.

$$\varepsilon_{j,i,jen} = \begin{cases} \rho_{j,i,jen} & \text{rastgele}(0,1) \leq CR \text{ veya } i = i_{rastgele} \\ \Lambda_{j,i,jen} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (19)$$

Deneme vektörü belirlendikten sonra, deneme vektörüne ait bağ akımları ve amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır. Adım 5'te hedef ve deneme vektörlerinin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılmakta ve daha küçük değer veren çözüm vektörü saklanmaktadır. Son adımda, Adım 5'te elde edilen en iyi çözüm vektörü üzerine yerel arama süreci gerçekleştirilerek elde edilen en iyi çözüm vektörü bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Algoritma maksimum jenerasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam ettirilmektedir.

### 3.3. Çok amaçlı optimizasyon modeli

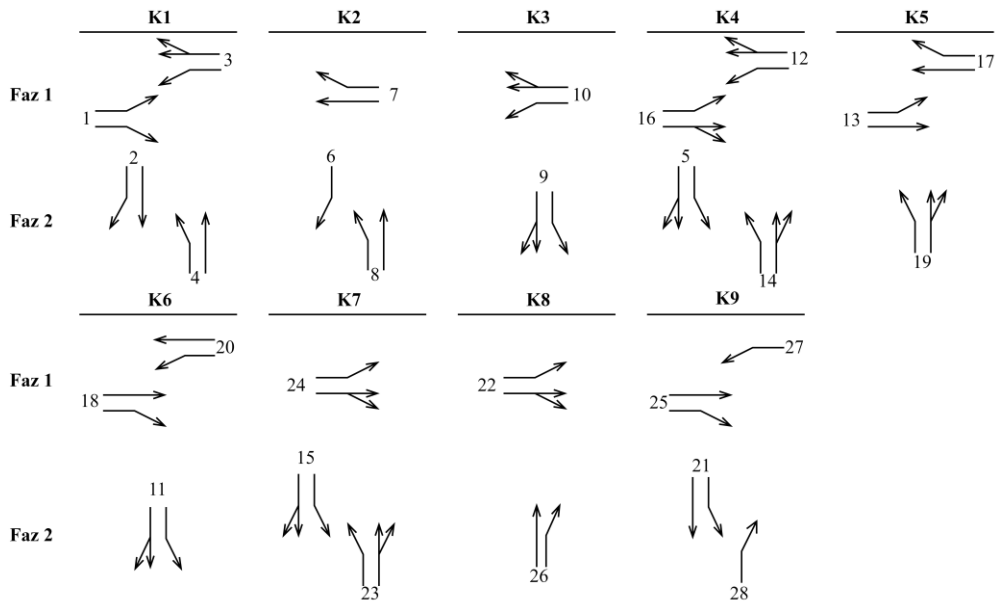
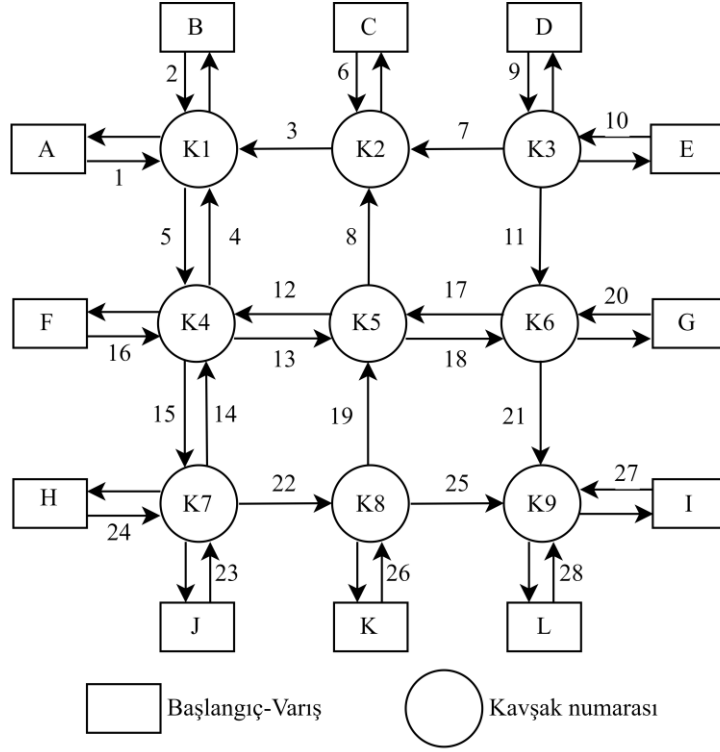
B-V matris çarpanının maksimum değeri  $\Psi^*$  ve toplam taşıt emisyon maliyetinin minimum değeri  $\gamma^*$  belirlendikten sonra, yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemleri eş zamanlı olarak aşağıda adımları verilen İDG tabanlı çözüm algoritması ile çözümlenebilmektedir.

- (1) B-V matrisi çarpanı  $\Psi$  ve ışık süre vektörünü  $\Omega$  ilgili parametrelerin alt ve üst limitlerini dikkate alarak rastgele üret ve başlangıç toplumunu ( $N_p$ ) oluştur. Ağırlık faktörü değerini ( $\lambda$ ) belirle.  $jen = 1$  ve  $n = 0$  olarak ayarla.
- (2)  $n = n + 1$  yap. Ardından, toplum içindeki  $n$ . hedef vektörü için bağ akımlarını bul ve Denklem (13)'de verilen amaç fonksiyonunu hesapla.
- (3) Eğer  $n \neq N_p$  ise Adım 2'e git.
- (4)  $n = 1$  olarak ayarla.
- (5)  $n$ . hedef vektör için mutant vektör oluştur.
- (6) Hedef vektör ile mutant vektör arasında çaprazlama yaparak  $n$ . hedef vektör için deneme vektörünü oluştur.
- (7) (6)'da oluşturulan deneme vektörü için bağ akımlarını bul ve Denklem (13)'de verilen amaç fonksiyonunu hesapla.
- (8) Hedef ve deneme vektörlerinin amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştır. Eğer deneme vektörünün amaç fonksiyonu değeri hedef vektörünün amaç fonksiyonu değerinden daha küçük ise deneme vektörünü hedef vektörünün yerine toplum içine dahil et.
- (9) Eğer  $n \neq N_p$  ise  $n = n + 1$  olarak ayarla ve Adım 5'e git.
- (10) Yerel arama sürecini gerçekleştir. En iyi çözümü bir sonraki jenerasyona aktar. dx vektörünü  $dx = dx \times 0,9$  ifadesini kullanarak azalt.
- (11) Eğer  $jen \neq maxjen$  ise  $jen = jen + 1$  olarak ayarla ve Adım 4'e git aksi takdirde algoritmayı sonlandır.

## 4. Sayısal uygulama

Yedek kapasite en büyükleme problemi ile taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemlerinin eş zamanlı çözümü için geliştirilen İDG tabanlı çözüm algoritması Gartner vd. [33] ve Jovanovic vd. [34] tarafından geliştirilen ulaşım ağına uygulanmıştır. 9 adet ışıklı kavşak ve 28 adet bağdan oluşan ulaşım ağı ışık sürelerinin optimizasyonunun hedeflendiği çalışmalarda sıkça kullanıldığı için tercih edilmiştir.

Ulaşım ağı ve faz planı sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5'ten görülebileceği üzere her kavşak iki fazlı olarak işletilmektedir. Devre süresinin alt ve üst limitleri sırasıyla 30 ve 120 sn, minimum faz yeşil süresi 7 sn, yeşiller arası süre 5 sn ve B-V matrisi çarpanının alt ve üst limitleri sırasıyla 1 ve 1,5 olarak alınmıştır.



Ulaşım ağı bağ parametreleri ve B-V matrisi sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmektedir. Bağların doygun akım değerleri 1800 ta/sa olarak alınmıştır. Ulaşım ağına giriş bağları (1, 2, 6, vd.) için serbest akım seyahat süreleri 1 sn olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Bağ parametreleri.

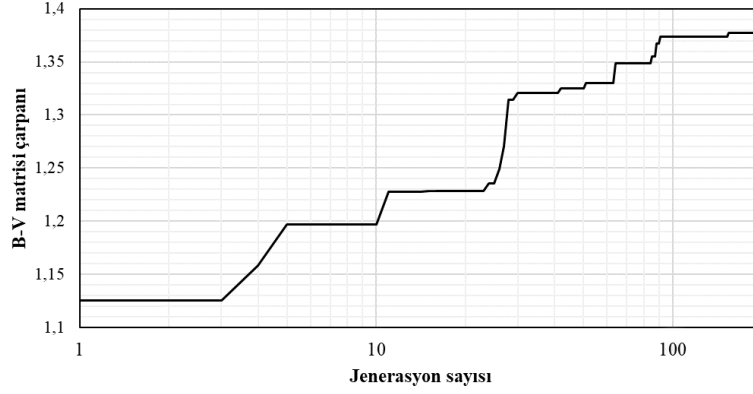
Bağ No.	Bağ uzunluğu $l_a$ (m)	Serbest akım seyahat süresi $t_a^0$ (sn)
3	183	13,18
4	305	21,96
5	305	21,96
7	244	17,57
8	305	21,96
11	305	21,96
12	183	13,18
13	183	13,18
14	168	12,10
15	168	12,10
17	244	17,57
18	244	17,57
19	168	12,10
21	168	12,10
22	183	13,18
25	244	17,57

Tablo 2. B-V matrisi (ta/sa).

B/V	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	--	90	90	--	--	90	90	90	90	90	90	90
B	54	--	54	--	--	54	54	54	54	54	54	54
C	54	54	--	--	--	54	54	54	54	54	54	54
D	54	54	54	--	54	54	54	54	54	54	54	54
E	36	36	36	36	--	36	36	36	36	36	36	36
F	45	45	45	--	--	--	45	45	45	45	45	45
G	63	63	63	--	--	63	--	63	63	63	63	63
H	99	99	99	--	--	99	99	--	99	99	99	99
I	81	81	81	--	--	81	81	81	--	81	81	81
J	27	27	27	--	--	27	27	27	27	--	27	27
K	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	41
L	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	62	--

Taşıt emisyon maliyetlerinin hesaplanmasında CO, HC ve NO<sub>x</sub> olarak dikkate alınan kirletici türlerinin birim ağırlık başına maliyetleri ( $\phi_k$ ) sırasıyla 0,51, 1,36 ve 1,03 olarak alınmıştır [21]. İDG algoritmasının kontrol parametrelerinin problemin çözüm başarımında oldukça büyük bir etkisi bulunmaktadır. Storn ve Price [27],  $F$  ve  $CR$  kontrol parametrelerinin alt ve üst limitlerini sırasıyla [0,5-1] ve [0,8-1] olarak önermişlerdir.  $F$  ve  $CR$  parametreleri literatürle uyumlu olarak 0,80 olarak seçilmiştir [15]. Ulaşım ağındaki B-V matrisi çarpanı, kavşak ve faz sayıları göz önüne alındığında optimizasyon probleminin karar değişkeni sayısı 27’dir. Bu nedenle çözüm algoritmasında toplum büyüklüğü sayısı ( $Np$ ) 60 ve maksimum jenerasyon sayısı ( $maxjen$ ) ise 300 olarak seçilmiştir.

Ulaşım ağının yedek kapasitesinin en büyüklenmesi amacıyla Denklem (14)'deki amaç fonksiyonu Denklem (3-4)'te verilen kısıtlara bağlı olarak Algoritma-1 kullanılarak çözümlenmiş ve B-V matrisi çarpanının en büyük değeri elde edilmiştir. En iyi amaç fonksiyonu değeri 300 jenerasyon sonrasında 0,725 olarak bulunmuştur. Bu sonuç ulaşım ağındaki bağların kapasiteleri aşılmadan B-V matrisi çarpanının en fazla 1,38 olabileceği anlamına gelmektedir. Diğer bir ifadeyle ulaşım ağı %38 oranında talep artışı olması durumunda uygun ışık sürelerinin kullanılması ile bağların kapasiteleri aşılmadan hizmet verebilmektedir. Şekil 6'da yedek kapasite en büyükleme problemi için uygulanan Algoritma-1'in yakınsama grafiği görülmektedir.



Şekil 6. Algoritma-1 yakınsama grafiği.

Elde edilen bağ akımları ( $x_a^*$ ), bağ kapasiteleri ( $C_a$ ), doygunluk dereceleri ( $d_s$ ) ve optimum ışık süreleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmektedir. Tablo 3'ten görülebileceği gibi 5, 15 ve 24 numaralı bağlar doygunluk derecesinin en fazla olduğu bağlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen bu sonuca paralel olarak Tablo 4'te verilen optimum ışık sürelerine bakıldığı zaman doygunluk derecesinin yüksek olduğu bağların kullandığı 4, 5, 7 ve 8 numaralı kavşaklarda devre süresinin üst sınırına yaklaşıldığı görülmektedir.

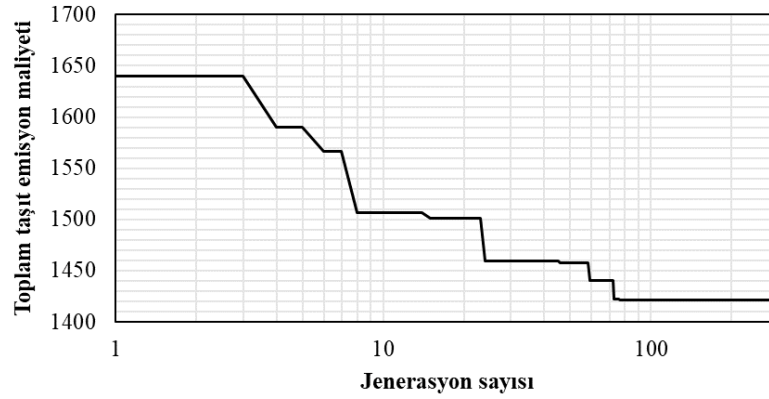
Tablo 3.  $\Psi^*$  için bağ akımları ve doygunluk dereceleri.

Bağ No.	$x_a^*$ (ta/sa)	$C_a$ (ta/sa)	$d_s$ (%)	Bağ No.	$x_a^*$ (ta/sa)	$C_a$ (ta/sa)	$d_s$ (%)
1	1107	1761	63	15	2029	2070	98
2	666	1448	46	16	549	931	59
3	1282	1761	73	17	847	2618	32
4	735	1448	51	18	946	1554	61
5	2341	2359	99	19	259	655	40
6	666	913	73	20	774	1554	50
7	616	1268	49	21	750	1507	50
8	749	1825	41	22	1608	2743	59
9	814	1636	50	23	990	2070	48
10	539	873	62	24	1215	1230	99
11	614	1667	37	25	896	1674	54
12	823	931	88	26	333	2743	12
13	1412	2618	54	27	56	837	7
14	1225	2359	52	28	85	753	11

Tablo 4.  $\Psi^*$  için optimum ışık süreleri.

Kavşak numarası	Devre Süresi (sn) $c^i$	Yeşil süreler (sn)	
		Faz 1 $\phi_1^i$	Faz 2 $\phi_2^i$
1	92	45	37
2	71	25	36
3	33	8	15
4	116	30	76
5	110	80	20
6	95	41	44
7	120	41	69
8	105	80	15
9	86	40	36

Ulaşım ağındaki taşıt emisyon maliyeti problemi Denklem (3-4) kısıtlarına bağlı olarak Denklem (2)'deki amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi ile çözümlenebilmektedir. Şekil 7'den görülebileceği gibi, en iyi amaç fonksiyonu değeri 300 jenerasyon sonrası 1421 olarak bulunmuştur. Ulaşım ağının toplam taşıt emisyonunun maliyeti için elde edilen optimum ışık süreleri Tablo 5'te verilmektedir.



Şekil 7. Taşıt emisyon maliyeti en küçükleme modeli yakınsama grafiği.

Tablo 5.  $\gamma^*$  için optimum ışık süreleri.

Kavşak numarası	Devre Süresi (sn) $c^i$	Yeşil süreler (sn)	
		Faz 1 $\phi_1^i$	Faz 2 $\phi_2^i$
1	35	12	13
2	32	10	12
3	30	10	10
4	57	15	32
5	32	12	10
6	32	10	12
7	46	14	22
8	41	20	11
9	30	10	10

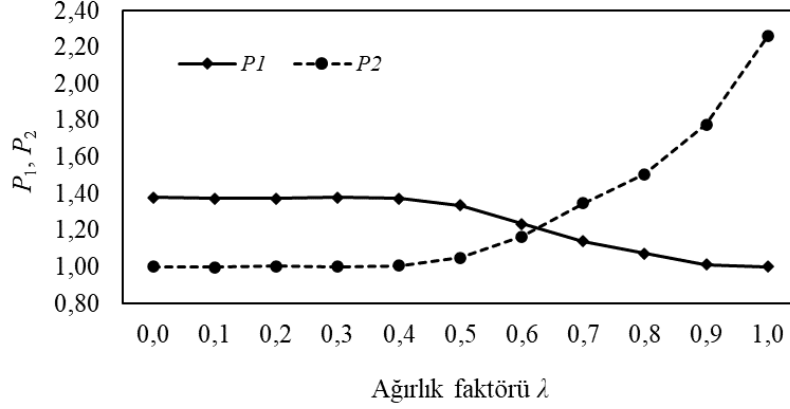
$\Psi^*$  ve  $\gamma^*$  değerleri sırasıyla 1,38 ve 1421 olarak belirlendikten sonra yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemleri eşzamanlı olarak Bölüm 3.3'te adımları verilen çok amaçlı optimizasyon modeli ile çözülmüştür. Farklı ağırlık faktörleri ( $\lambda$ ) için  $\Psi$ ,  $\gamma$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P$  değerleri Tablo 6'da verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere, ağırlık faktörü değerinin 0 ile 0,4 arasında olduğu çözümlerde yerel yöneticiler ulaşım ağındaki taşıt emisyon maliyetini en küçükleme problemine daha fazla önem göstermekte ve bu nedenle ulaşım ağının yedek kapasitesi artırılmamaktadır. Bu durumda, Denklem (11) ile ifade edilen  $P_1$  değeri  $\Psi^*$  değerine eşit olmakta ve bu da B-V matrisi çarpanının 1 değerine eşit olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca,  $\gamma$  değeri  $\gamma^*$  değerine eşit olduğu için Denklem (12) ile ifade edilen  $P_2$  değeri 1 değerine eşit olmaktadır. Bu sonuç yerel yöneticilerin ulaşım ağının yedek kapasitesini artırmak yerine ışık sürelerinin en uygun değerlerini belirleyerek taşıt emisyon maliyetini en aza indirmeyi tercih ettikleri anlamına gelmektedir. Diğer taraftan ağırlık faktörünün 0,4 değerinden sonra yerel yöneticiler ulaşım ağının yedek kapasitesinin en büyükleme problemine önem vermeye başlamaktadırlar. Tablo 6'dan görüleceği üzere özellikle ağırlık faktörü 0,5 değerinden sonra ulaşım ağındaki yedek kapasite değeri giderek artmakta ve buna bağlı olarak da taşıt emisyon maliyetleri ciddi bir biçimde artmaktadır.

Tablo 6. Farklı ağırlık faktörleri için çok amaçlı optimizasyon modeli sonuçları.

$\lambda$	$\Psi$	$\gamma$	$P_1$	$P_2$	$P$
0,0	1,00	1421	1,380	1,000	1,000
0,1	1,00	1421	1,380	1,000	1,036
0,2	1,00	1421	1,380	1,000	1,078
0,3	1,00	1421	1,380	1,000	1,114
0,4	1,00	1421	1,380	1,000	1,154
0,5	1,03	1492	1,337	1,050	1,194
0,6	1,12	1655	1,235	1,165	1,208
0,7	1,21	1917	1,140	1,349	1,203
0,8	1,28	2140	1,074	1,506	1,161
0,9	1,36	2525	1,012	1,777	1,089
1,0	1,38	3210	1,000	2,259	1,000

Şekil 8'de farklı ağırlık faktörü değerleri için çok amaçlı optimizasyon modelinin Pareto-optimum çözümleri gösterilmektedir. Ağırlık faktörü ( $\lambda$ ) 0 değerini aldığı anda, yerel yöneticiler sadece taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemini dikkate almaktadırlar. Bu durumda,  $P_2$  değeri 1 olmakta ve ulaşım ağının toplam taşıt emisyon maliyetinin değeri ( $\gamma$ ) ise Tablo 6'dan görüldüğü gibi 1421 olmaktadır. Buna karşılık, ağırlık faktörü değeri 1'e eşit olduğunda ise yerel yöneticiler sadece ulaşım ağının yedek kapasitesini artırmaya odaklanmakta ve  $P_1$  değeri 1'e eşit olmaktadır. Bu durumda, B-V matrisi %38 artırılırken ulaşım ağındaki toplam taşıt emisyon maliyeti ( $\gamma$ ) ise 3210 değerine ulaşmaktadır. Şekil 8'den görülebileceği üzere, ağırlık faktörü 0,4 değerine kadar,  $P_1$  ve  $P_2$  değerlerinde değişiklik olmamakta ancak bu noktadan sonra  $P_1$  değerinin azalış eğilimine girdiği açıkça görülebilmektedir. Bu durum, yerel yöneticilerin ulaşım ağının yedek kapasitesini artırmaya daha fazla önem vermesi nedeniyle B-V matrisi çarpanının artması anlamına gelmektedir.





Şekil 8. Farklı ağırlık faktörü değerleri için  $P_1$ ,  $P_2$  değişimi.

Diğer taraftan  $P_1$  değerinin azalma eğilimine ters olarak ağırlık faktörü 0,4 değerinden sonra  $P_2$  değeri ise ciddi oranda artmaya başlamaktadır. Ağırlık faktörünün 0,5 değerinden sonra B-V matrisi çarpanını artırmak bir başka deyişle ulaşım ağının yedek kapasitesini artırmak ulaşım ağındaki taşıt emisyon maliyetinde önemli bir artışa yol açmaktadır. Elde edilen sonuçlar, ulaşım ağındaki emisyon maliyetlerini dikkate almadan sadece bağ kapasitelerinin aşılmaması kısıtına bağlı olarak yedek kapasitenin en büyüklenmesinin taşıt emisyonlarını ciddi miktarda artırdığını göstermektedir.

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada kent içi karayolu ağlarında yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyon maliyeti en küçükleme problemlerinin eş zamanlı olarak çözülebilmesi için iki amaçlı iki seviyeli optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modelin çözümü için İyileştirilmiş Diferansiyel Gelişim algoritmasından faydalanılmıştır. Modelin üst seviyesinde her bir probleme ait amaç fonksiyonu dikkate alınırken, alt seviyede ise üst seviyede yapılan her bir değişikliğe karşılık kullanıcıların tepkileri stokastik trafik atama problemi çözülerek ifade edilmiştir.

Birbiri ile çelişen iki amacı bulunan optimizasyon modelinin pareto-optimum çözümlerinin bulunabilmesi için öncelikle her bir problemin amaç fonksiyonu birimsiz hale getirilmiştir. Sonrasında ağırlıklı toplam metodu kullanılarak çok amaçlı optimizasyon modelinin pareto-optimum çözümleri elde edilmeye çalışılmıştır. Sayısal uygulamalarda 9 adet ışıklı kavşaktan oluşan bir ulaşım ağı kullanılmıştır. Farklı ağırlık faktörleri için yedek kapasite ve taşıt emisyon maliyet değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ağırlık faktörünün 0,5 değerinden sonra ulaşım ağında yedek kapasite yaratılmaya devam edilmesi durumunda taşıt emisyon maliyetleri ciddi oranda artış göstermektedir. Bu durum ulaşım ağlarında ışık sürelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile yedek kapasite sağlanması durumunda taşıt emisyonlarının göz ardı edilmemesi gerektiğini ve yedek kapasite en büyükleme ve taşıt emisyonu en küçükleme problemlerinin beraber ele alınmasının çevresel sürdürülebilirliğe katkı koyacağını göstermiştir.

**Kaynaklar**

- [1] Başkan, Ö., Ozan, C. ve Ceylan, H., Kent içi Karayolu Ağlarında Işık Süreleri Dikkate Alınarak Yedek Kapasitenin Eniyilenmesi, **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 7(4), 787-795, (2019).
- [2] Webster, F. V. ve Cobbe, B. M., Traffic signal, Road Research Technical Paper No. 56, HMSO, London, (1966).
- [3] Allsop, R. E., Estimating the traffic capacity of a signalized road junction, **Transportation Research**, 6, 3, 245–255, (1972).
- [4] Wattleworth J. A. ve Ingram, J. W., A capacity analysis technique for highway junctions, **Highway Research Board, Highway Research Report**, 398, 31- 36, (1972).
- [5] Yagar, S., Addressing errors and omissions in paper on intersection capacity maximization, **Transportation Research Part B: Methodological**, 19, 1, 81–84, (1985).
- [6] Wong, S. C., On the reserve capacities of priority junctions and roundabouts, **Transportation Research Part B: Methodological**, 30, 6, 441–453, (1996).
- [7] Wong, S. C. ve Yang, H., Reserve capacity of a signal-controlled road network, **Transportation Research Part B: Methodological**, 31, 5, 397–402, (1997).
- [8] Ziyou, G. ve Yifan, S., A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice, **Transportation Research Part B: Methodological**, 36, 4, 313–323, (2002).
- [9] Ge, Y. E., Zhang, H. M. ve Lam, W. H. K., Network reserve capacity under influence of traveler information, **Journal of Transportation Engineering**, 129, 3, 262–270, (2003).
- [10] Chen, A., Chootinan, P. ve Wong, S. C., New reserve capacity model of signal-controlled road network, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1964, 35–41, (2006).
- [11] Miandoabchi, E. ve Farahani, R. Z., Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem, **Advances in Engineering Software**, 42, 12, 1041–1050, (2011).
- [12] Chiou, S.-W., Optimal signal-setting for road network with maximum capacity, **Information Sciences**, 273, 287–303, (2014).
- [13] Wang, J., Deng, W. ve Zhao, J., Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium, **Transport**, 30, 1, 103–116, (2015).
- [14] Baskan, O. ve Ozan, C., **Reserve capacity model for optimizing traffic signal timings with an equity constraint**, in Yaghoubi, H. (Ed.), *Highway Engineering*, IntechOpen, 1-15, London, UK, (2017).
- [15] Baskan, O., Ceylan, H. ve Ozan, C., A simultaneous solution for reserve capacity maximization and delay minimization problems in signalized road networks, **Journal of Advanced Transportation**, 2019, Article ID 6203137, 18 pages, (2019).
- [16] Kwak, J., Park, B. ve Lee, J., Evaluating the impacts of urban corridor traffic signal optimization on vehicle emissions and fuel consumption, **Transportation Planning and Technology**, 35, 2, 145–160, (2012).
- [17] Ferguson, E. M., Duthie, J. ve Waller, S. T., Comparing delay minimization and emissions minimization in the network design problem, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 27, 4, 288–302, (2012).

- [18] Zhang, L., Yin, Y. ve Chen, S., Robust signal timing optimization with environmental concerns, **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 29, 55–71, (2013).
- [19] Li, Z.-C. ve Ge, X.-Y., Traffic signal timing problems with environmental and equity considerations, **Journal of Advanced Transportation**, 48, 8, 1066–1086, (2014).
- [20] Baskan, O., A Multiobjective Bilevel Programming Model for Environmentally Friendly Traffic Signal Timings, **Advances in Civil Engineering**, 2019, Article ID 1638618, 13 pages, (2019).
- [21] Szeto, W. Y., Wang, Y. ve Wong, S. C., The chemical reaction optimization approach to solving the environmentally sustainable network design problem, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 29, 2, 140-158, (2014).
- [22] Bell, M. G. H. ve Shield, C. M., A log-linear model for path flow estimation, **Proceedings of the 4th International Conference on the Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering**, Stephanedes, Y.J. ve Filippi, F. (Eds.), 695-699, Capri, Italy, (1995).
- [23] Ceylan, H., A genetic algorithm approach to the equilibrium network design problem, Ph.D.Thesis, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK, (2002).
- [24] Ceylan, H. ve Bell, M. G. H., 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, (2004).
- [25] Dell’Orco, M., Baskan, O. ve Marinelli, M., A Harmony Search algorithm approach for optimizing traffic signal timings, **Promet—Traffic & Transportation**, 25, 4, 349–358, (2013).
- [26] Başkan, Ö., Ceylan, H. ve Ozan, C., Investigating Acceptable Level of Travel Demand Before Capacity Enhancement for Signalized Urban Road Networks, **Teknik Dergi**, 31 (2), 9897-9917, (2020).
- [27] Baskan, O. ve Ceylan, H., Modified Differential Evolution Algorithm for the Continuous Network Design Problem, **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 111, 48-57, (2014).
- [28] Storn, R. ve Price, K., Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, **Journal of Global Optimization**, 11, 4, 341–359, (1997).
- [29] Deb, A., Roy, J. S. ve Gupta, B., Performance comparison of differential evolution, particle swarm optimization and genetic algorithm in the design of circularly polarized microstrip antennas, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 62, 8, 3920–3928, (2014).
- [30] Nolle, L., Zelinka, I., Hopgood, A. ve Goodyear, A., Comparison of a self-organizing migration algorithm with simulated annealing and differential evolution for automated waveform tuning, **Advances in Engineering Software**, 36, 10, 645–653, (2005).
- [31] Vincenzi, L., De Roeck, G. ve Savoia, M., Comparison between coupled local minimizers method and differential evolution algorithm in dynamic damage detection problems, **Advances in Engineering Software**, 65, 90–100, (2013).
- [32] Bracinik, P., Dezelak, K., Otcenasova, A. ve H`oger, M., Comparison between the particle swarm optimisation and differential evolution approaches for the optimal proportional–integral controllers design during photovoltaic power plantsmodelling, **IET Renewable Power Generation**, 10, 4, 522–530, (2016).

- [33] Gartner, N. H., Little, J. D. C. ve Gabbay, H., Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming, **Transportation Science**, 9, 4, 321–343, (1975).
- [34] Jovanovic, A., Nikolic, M. ve Teodorovic, D., Area-wide urban traffic control: a bee colony optimization approach, **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 77, 329–350, (2017).