



## KENTİÇİ KARAYOLU AĞLARINDA IŞIK SÜRELERİ DİKKATE ALINARAK YEDEK KAPASİTENİN ENİYİLENMESİ

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

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

<sup>2</sup> Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aydın, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Yedek Kapasite, Kentiçi Karayolu Ağları, Işıklı Kavşaklar, İki-Seviyeli Programlama, Armoni Araştırması.</i>	Kentlerdeki trafik sıkışıklığı ekonomik, sosyal ve çevresel problemleri beraberinde getirmektedir. Bu problemlerin önüne geçmek isteyen yerel yönetimler, yol genişletmesi, şerit ilavesi ve kavşak yenileme çalışmaları gibi pahalı yatırımlar yaparak ulaşım talebini karşılamaya çalışmaktadır. Ancak bilindiği gibi kentiçi ulaşım ağlarında uygun ışık sürelerinin belirlenmesi ile yedek kapasite yaratılabilmektedir. Bu kapasitenin kullanılması neticesinde trafik sıkışıklığı ve beraberinde getirdiği olumsuz etkiler azaltılabilmektedir. Bu çalışmada kentiçi ulaşım ağlarındaki yedek kapasitenin enbüyüklenmesi probleminin çözümü için iki seviyeli bir model geliştirilmiştir. Üst seviyede Başlangıç-Variş (B-V) seyahat matrisi çarpanı enbüyüklenirken, alt seviyede trafik ataması problemi çözülmektedir. Geliştirilen modelin Allsop & Charlesworth test ağına uygulanması neticesinde yol ağındaki bağların kapasiteleri aşılmadan B-V seyahat matrisinin yaklaşık %16 artırılacağı belirlenmiştir.

## OPTIMIZATION OF RESERVE CAPACITY IN URBAN ROAD NETWORKS BASED ON TRAFFIC SIGNAL TIMINGS

Keywords	Abstract
<i>Reserve Capacity, Urban Road Networks, Signalized Intersections, Bi-level Programming, Harmony Search.</i>	Traffic congestion in cities brings economic, social and environmental problems. Local governments seeking to overcome these problems are trying to meet transportation demand by making expensive investments such as road extension, lane addition and intersection renewal. However, as is known, reserve capacity can be created by determining the appropriate signal timings in urban transportation networks. By using this capacity, traffic congestion and its negative effects can be reduced. In this study, a bi-level model is developed for solving the problem of the reserve capacity maximization in urban road networks. At the upper level, the Origin-Destination (O-D) demand multiplier is maximized and the traffic assignment problem is solved at the lower level. Applying the model to the Allsop & Charlesworth's test network, it has been found that the O-D matrix can be increased by about 16% without exceeding the capacities of the links in the road network.

### Alıntı / Cite

Başkan, Ö., Ozan, C., Ceylan, H., (2019). Kentiçi Karayolu Ağlarında Işık Süreleri Dikkate Alınarak Yedek Kapasitenin Eniyilenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(4), 787-795.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Başkan, 0000-0001-5016-8328  
C. Ozan, 0000-0003-0690-6033  
H. Ceylan, 0000-0002-8840-4936

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	11.09.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	12.04.2019
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	24.05.2019
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	19.12.2019

### 1. Giriş

Günümüzde teknolojik ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak gittikçe artan ulaşım talebi neticesinde özellikle kentiçi ulaşım ağlarında trafik sıkışıklığı ve buna bağlı

olarak ortaya çıkan birçok problem ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için yerel yöneticiler genellikle yeni yatırımlar ile ulaşım arzını artırarak kapasite artırımına gitme yolunu tercih etmektedirler. Ancak

\* İlgili yazar / Corresponding author: obaskan@pau.edu.tr, +90-258-296-3416

kentiçi ulaşım ağlarının fiziki yapısına bağlı olarak hizmete sunulan mevcut kapasitesinin yanında bir de uygun olmayan ışık sürelerinden dolayı atıl durumda olan yedek kapasitesi bulunmaktadır. Bu nedenle yüksek maliyetli ulaşım yatırımları yapılmadan önce karayolu ulaşım ağının yedek kapasitesi belirlenmeli ve bu kapasitenin en verimli şekilde kullanılabilmesi için gerekli önlemler yerel yöneticiler tarafından alınmalıdır. Literatürde yedek kapasite eniyilenmesi problemi, ulaşım ağındaki tüm bağların akım / kapasite oranlarının 1'e eşit veya daha küçük olduğu durumu sağlayan Başlangıç-Variş (B-V) talep matrisi çarpanının maksimum değerinin belirlenmesi olarak ifade edilmektedir. Söz konusu problem konveks olmayan yapısından dolayı günümüzde hala ulaştırma alanındaki araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Yedek kapasite eniyilenmesi konusundaki çalışmalar oldukça eskiye dayanmakta olup bu konudaki ilk çalışma Webster ve Cobbe (1966) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmadaki yaklaşımı uygulanabilir hale getirmek için Allsop (1972) doğrusal program yaklaşımı tabanlı yeni bir metod önermiştir. Sonrasında Yagar (1985) çalışmasında Allsop (1972) tarafından geliştirilen yaklaşımı kavşaklardaki ardışık fazlarda farklı doygun akım değerlerini dikkate alabilecek şekilde iyileştirmiştir. Wong ve Yang (1997) sürücü davranışlarının deterministik kullanıcı dengesi (DKD) ataması kullanarak temsil etmişler ve ışıklı bir ulaşım ağında yedek kapasiteyi maksimum yapan ışık sürelerini bulmuşlardır. Yang vd. (2000) trafik atama ve seyahat dağılımı modellerini birleştirerek iki seviyeli programlama yaklaşımı ile yedek kapasiteyi eniyilemeye çalışmışlardır. Ziyou ve Yifan (2002) problemi gerçeğe daha yakın ifade edebilmek için her bir B-V çifti için farklı bir talep matrisi çarpanı öngörmüşler ve bu yaklaşım altında yedek kapasiteyi enbüyüklemeyi hedeflemişlerdir. Ceylan ve Bell (2004) koordine ışıklı olarak işletilen bir ulaşım ağında yedek kapasite hesabı için stokastik kullanıcı dengesi (SKD) trafik atamasını dikkate alan iki adımlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Chiou (2007) hedeflenen eğim yöntemini kullanarak test ulaşım ağında yedek kapasite eniyilemesi yapmıştır. Geliştirilen yöntemin klasik metotlardan daha iyi performans gösterdiği sayısal uygulamalar sonucunda belirlenmiştir. Yedek kapasite eniyilenmesi konusunda farklı bir çalışma olarak Chiou (2009) bir ulaşım ağındaki gecikme ve yedek kapasite değerlerinin optimum değerlerini belirlemek için bağ akımlarını zamana bağlı olarak değişken olarak dikkate almış ve geliştirdiği algoritmayı örnek bir ulaşım ağına uygulamıştır. Miandoabchi ve Farahani (2011) yedek kapasite eniyileme problemini iki seviyeli çözüm yaklaşımı kullanarak kesikli ulaşım ağı problemi bağlamında ele almış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir. Chiou (2014) yedek kapasite ve gecikme eniyileme problemlerini min-max problemi olarak ifade etmişler ve çözüm için tek seviyeli bir algoritma önermişlerdir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritmanın denge kısıtlarını ve gecikme eniyilemesi problemini dikkate alarak yedek kapasite eniyilemesi

yapabildiğini göstermiştir. Diğer bir çalışmada Wang vd. (2015) maksimum bağ kapasite genişletmelerini ve SKD bağ akımlarını dikkate alarak yedek kapasite eniyileme problemini çözebilen bir algoritma geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçlar geliştirilen algoritmanın söz konusu problemi çözmede başarılı olduğunu göstermektedir. Xiao vd. (2017) çalışmalarında farklı bir bakış açısıyla arazi kullanım planlarında maksimum kapasite kullanımının etkilerini ortaya koyan zon tabanlı bir model önermişlerdir. Han ve Cheng (2017) sıkışıklık fiyatlandırması uygulamasının etkinliğini belirlemek için yedek kapasite problemini dikkate alan iki seviyeli bir algoritma geliştirmişlerdir. SKD bağ akımlarının kullanıldığı algoritmanın test yol ağlarına uygulanması sonucunda sıkışıklık fiyatlandırması uygulamasının ulaşım ağı performansı üzerindeki pozitif etkisi ortaya konmuştur. Son olarak Baskan ve Ozan (2017) yedek kapasite probleminin çözümünde, ulaşım ağından elde edilen faydanın kullanıcılar arasında eşit paylaşılmasını sağlayabilmek için eşitlik kavramını probleme ceza fonksiyonu olarak dahil eden bir model önermişlerdir. Problemin çözümü için Armoni Araştırması Optimizasyon (AAO) metodu tabanlı iki seviyeli bir algoritma geliştirilmiş ve bağ akımları DKD trafik ataması kullanılarak bulunmuştur. Sayısal sonuçlar B-V matrisinin maksimum çarpanının eşitlik parametresinin değerine oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir.

Literatürden görülebileceği gibi yedek kapasite eniyileme problemi birçok çalışmada farklı açılardan dikkate alınarak çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada SKD bağ akımlarını dikkate alarak ulaşım ağındaki yedek kapasiteyi belirleyebilen bir model önerilmiştir. Bu amaçla AAO metodu tabanlı iki seviyeli bir algoritma geliştirilmiştir. Üst seviyede B-V matrisi çarpanı enbüyüklenmeye çalışılırken alt seviyede ise SKD bağ akımları Rota Akım Tahmin (RAT) algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bağların akımlarının kapasitelerini aşmamalarını sağlamak amacıyla problem formülasyonuna bu koşulu temsil eden ceza fonksiyonu eklenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümde yedek kapasite eniyileme probleminin formülasyonu verilmiştir. Sonraki bölümde geliştirilen iki seviyeli çözüm algoritmasının detayları verilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen algoritmanın Allsop & Charlesworth test ulaşım ağına uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde çalışmanın sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalara yer verilmiştir.

## 2. Problem Formülasyonu

Yerel yöneticiler ulaşım ağlarındaki trafik sıkışıklığını ve gecikmeleri azaltmak için birçok farklı çözüm yöntemi uygulayabilmekte, bu sayede zamanla artan ulaşım talebi veya farklı şekillerde ortaya çıkabilen ani talep artışlarına karşı ulaşım ağlarının güvenilirliğini

sağlayabilmeye çalışmaktadırlar. Diğer taraftan yol kullanıcıları ise B-V çiftleri arasındaki seyahatlerinde yerel yöneticilerin ulaşım ağında yapmış oldukları uygulamaları dikkate alarak kendi seyahat maliyetlerini enküçükleme yoluna gitmektedirler. Ancak bilindiği gibi yedek kapasitenin en iyilenmesi ulaşım ağının daha fazla kullanıcıya hizmet verebilmesini sağlamakla birlikte uygun şekilde belirlenmeyen ışık sürelerinden dolayı kullanıcılar çok daha fazla gecikmeye maruz kalabilmekte ya da ulaşım ağının kapasitesi olması gerekenden daha düşük olabilmektedir. Bu nedenle çalışmada yedek kapasiteyi eniyileyen ışık sürelerinin belirlenmesi amacıyla AAO metodu tabanlı iki seviyeli bir algoritma geliştirilmiştir. Üst seviyede yedek kapasiteyi eniyileyen B-V matrisi çarpanının enbüyüklenmesi problemi ele alınmıştır. Alt seviyede ise ulaşım ağındaki B-V çiftleri arasındaki farklı seyahat talebi değerlerine karşılık kullanıcıların tepkileri SKD trafik atama probleminin çözülmesi ile temsil edilmiştir. Bu amaçla herhangi bir ulaşım ağında düğümler,  $n \in N$ , bağlar,  $a \in A$ , B-V çiftleri,  $k \in K$ , olarak temsil edilirse önerilen iki seviyeli programlama modeli aşağıda verildiği gibi gösterilebilir.

$$\max_{\mu, \Psi} \mu \quad (1)$$

**Kısıtlar:**

$$\Psi(c, \varphi) \in \Omega_0; \quad \begin{cases} c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi \leq c \\ \sum_{i=1}^z (\varphi + I)_i = c \end{cases} \quad (2)$$

$$x_a^*(\mu, \Psi) \leq C_a(\Psi, s_a) \quad (3)$$

Burada  $\Psi$  ışık süreleri vektörü,  $\Omega_0$  ışık sürelerinin olası çözüm kümesi,  $c$  devre süresi,  $c_{\min}$  and  $c_{\max}$  devre süresinin alt ve üst sınırları,  $\varphi$  faz yeşil süresi,  $\varphi_{\min}$  minimum faz yeşil süresi,  $I$  yeşillerarası süre ve  $z$  kavşaktaki faz sayısı olarak verilmiştir. Ayrıca  $\mu$  B-V matrisi çarpanı,  $x_a^*$   $a$  bağındaki denge akımı,  $C_a$   $a$  bağıının kapasitesi ve  $s_a$  ise doygun akım değeri olarak ifade edilmiştir. Denklem (3) herhangi bir  $a$  bağıının denge akımı değerinin ilgili bağıın kapasitesine eşit yada ondan daha küçük olması durumunu sağlamak için kullanılmıştır. Alt seviyede SKD trafik ataması Denklem (4) ve (5)'de verilen optimizasyon probleminin çözülmesi ile gerçekleştirilebilir.

$$\min_{\mathbf{x}(\Psi)} F(\mathbf{x}(\Psi), \Psi) = -\mu \mathbf{q}^T \mathbf{y}(\mathbf{x}(\Psi), \Psi) \quad (4)$$

$$+ \mathbf{x}^T \mathbf{t}(\mathbf{x}(\Psi), \Psi) - \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(\Psi)} t_a(\Psi, w) dw$$

**Kısıtlar:**

$$\mu \mathbf{q} = \Lambda \mathbf{h}, \quad \mathbf{x}(\Psi) = \delta \mathbf{h}, \quad \mathbf{h} \geq \mathbf{0} \quad (5)$$

Burada  $\Lambda$  B-V/rota belirleme matrisi  $[\Lambda_p; \forall p \in P]$ ,  $\mathbf{h}$  rota akım vektörü,  $\delta$  bağ/rota belirleme matrisi ve eğer  $a$  bağı rota  $p$  üzerinde ise  $\delta_{ap} = 1$  aksi takdirde  $\delta_{ap} = 0$   $[\delta_{ap}; \forall a \in A; \forall p \in P]$ ,  $\mathbf{x}(\Psi)$  sinyal vektörüne bağlı bağ akımları vektörü,  $\mathbf{q}$  talep vektörü,  $\mathbf{t}$  ve  $\mathbf{y}$  ise bağ ve rota seyahat süre vektörleri olarak temsil edilmiştir. SKD ataması problemi RAT algoritması (Bell ve Shield, 1995) kullanılarak etkin bir biçimde çözülebilmektedir. Bilindiği gibi RAT algoritması logit rota seçim modeli tabanlı bir algoritma olup en önemli avantajı rota numaralandırmaya ihtiyaç duymaması olarak ifade edilmektedir. Bu durum SKD problemi düşünüldüğünde olası çözüm kümesini sınırlandıran ve bu sayede çözüm süresini azaltan bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle literatürde SKD atama probleminin çözümünde birçok araştırmacı RAT algoritmasını kullanmaktadır (Ceylan, 2002; Ceylan ve Bell, 2004; Ceylan and Ceylan, 2012; Dell'Orco vd., 2013).

Çalışmada yedek kapasite eniyileme probleminin çözümü için önerilen Denklem (1)'de verilen ifade, AAO metodunun enküçükleme metodu olmasından dolayı Denklem (2-3)'de verilen kısıtlara bağlı olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir.

$$\min z(\mu, \mathbf{x}^*, \Psi) = \frac{1}{\mu} + \sigma \left[ \sum_{a \in A} \max(x_a^*(\mu, \Psi) - C_a(\Psi, s_a), 0) \right] \quad (6)$$

Denklem (1)'de verilen B-V matrisi çarpanının enbüyüklenmesi problemi  $1/\mu$  ifadesi kullanılarak enküçükleme problemine dönüştürülmüştür. Burada Denklem (6)'da verilen ifadenin sağ tarafı ceza fonksiyonunu,  $\sigma$  ise ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Geliştirilen ceza fonksiyonuna göre eğer herhangi bir  $a$  bağıının denge akım değeri ilgili bağıın kapasitesinden fazla ise bu durum  $z$  fonksiyonuna ceza olarak uygulanacak aksi durumda ise fonksiyon değerinde herhangi bir değişiklik olmayacaktır.

### 3. Yedek Kapasite Eniyileme Modeli

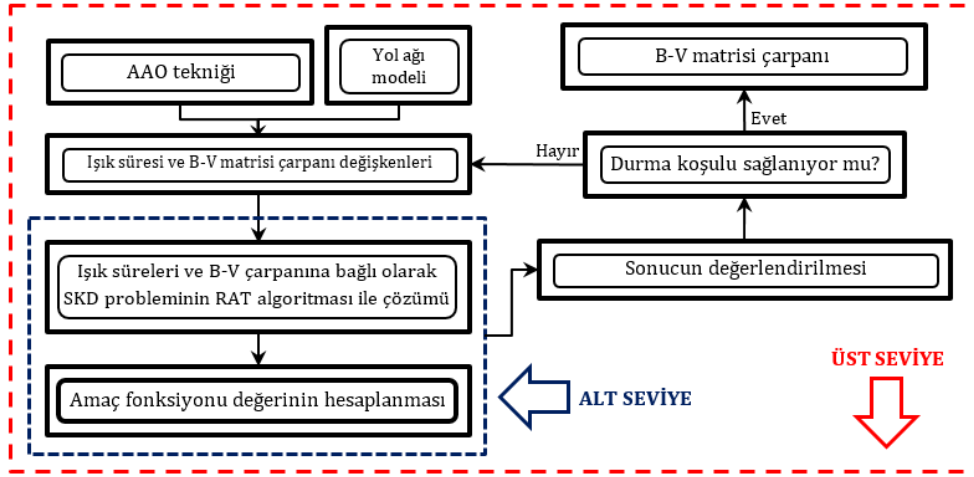
Çalışma kapsamında yedek kapasitenin eniyilenmesi problemi için geliştirilen iki seviyeli modelin çözümünde, Geem vd. (2001) tarafından geliştirilmiş olan AAO yönteminden yararlanılmıştır. AAO yöntemi, bir optimizasyon probleminin en iyi sonucunu bulabilmek için izlenen adımların, bir orkestradaki müzisyenlerin en ahenkli melodiyi çalabilmek için verdikleri çabaya benzetiminden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Bu benzetimde, eniyileme problemindeki karar değişkenleri orkestradaki müzisyenleri, karar değişkenlerinin aldığı değerler ise müzisyenlerin çaldığı notaları temsil etmektedir. AAO yönteminin temel varsayımına göre bir müzisyen doğaçlama yaparken çalacağı bir sonraki notayı;

- i) Sahnede o ana kadar çalarak belleğine almış olduğu herhangi bir notayı tekrar seçerek,
- ii) Sahnede o ana kadar çaldığı bir notanın komşusu olan notalardan birini seçerek, ya da
- iii) Enstrümanından tamamen rastgele bir nota seçerek çalabilmektedir.

Bir amaç fonksiyonunun AAO tekniği ile eniyilenmesi sırasında bir karar değişkeni;

- i) Çözüm sürecinin başında oluşturulan armoni belleği içinden herhangi bir değeri,
- ii) Armoni belleğinden seçilen bir değere belirli bir komşuluktaki başka bir değeri, ya da
- iii) Önceden bilinen alt ve üst sınır aralığı içinden tamamen rastgele seçilen bir değeri alabilmektedir.

Ayrık ve sürekli karar değişkenlerine sahip eniyileme problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılabilen



Şekil 1. Geliştirilen iki seviyeli modelin yapısı

AAO tekniğinin çalışma kapsamında geliştirilen modele uyarlanması, aşağıda verilen beş adımlı algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

**ADIM 1:** Bu adımda, Denklem 6'da verilen amaç fonksiyonu, orijinal B-V talep matrisi ( $\mathbf{q}$ ), karar değişkenlerinin sınır değerleri ( $\varphi_{\min}, \mu_{\max}, c_{\min}, c_{\max}$ ), yol ağına ilişkin parametreler (serbest akım seyahat süreleri,  $t^0$  ve doymuş akım değerleri,  $s$ ), AAO tekniği parametreleri ve durma koşulu tanımlanmaktadır. AAO tekniğinin çözüm süreci üç temel algoritma parametresi tarafından kontrol edilmektedir. Bu parametrelerden birincisi, armoni belleği kapasitesi (Harmony Memory Size, HMS) olup eniyileme sürecinde kullanılacak olan çözüm vektörü sayısını temsil etmektedir. İkinci parametre, armoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Consideration Rate, HMCR) olup değeri [0,1] aralığındadır. HMCR, yeni bir çözüm vektörü oluşturulurken herhangi bir karar değişkeninin alacağı değer hangi olasılıkla armoni belleğinden seçileceğini temsil etmektedir. Ton ayarlama oranı (Pitch Adjustment Rate, PAR) AAO tekniğinde kullanılan üçüncü parametre olup [0,1]

yöntem, son yıllarda kavşaklardaki ışık sürelerinin eniyilenmesi, ulaşım ağ tasarımı ve toplu taşıma ağlarındaki sefer sıklıklarının eniyilenmesi gibi ulaştırma problemlerinin çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Ceylan ve Ceylan, 2012; Miandoabchi vd., 2012; Dell'Orco vd., 2013; Salcedo-Sanz vd., 2013; Başkan, 2014; Gao vd., 2016; Ceylan ve Özcan, 2018).

Çalışma kapsamında geliştirilen AAO tekniği tabanlı iki seviyeli modelin genel yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üst seviyede AAO tekniği ile oluşturulan ışık süreleri ve B-V matrisi çarpanına bağlı olarak Denklem 6'da verilen amaç fonksiyonunun değeri enküçüklenirken, alt seviyede trafik ataması problemi RAT algoritması ile çözülerek SKD bağ trafik hacimleri hesaplanmaktadır.

aralığında değer almaktadır. PAR, değeri armoni belleğinden seçilecek olan bir karar değişkeni için ton ayarlama işlemi yapıp yapılmayacağını belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yeni çözüm vektörü üretiminin detayları Adım 3'te verilmektedir.

**ADIM 2:** Bu adımda öncelikle faz yeşil süreleri ve B-V matrisi çarpanı değerlerini içeren başlangıç çözüm vektörleri üretilmekte ve bu vektörler Denklem (7)'de verildiği şekliyle armoni belleğinde saklanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \mu^1 & \varphi_{1,1}^1 & \varphi_{1,2}^1 & \dots & \varphi_{N,z_n}^1 \\ \mu^2 & \varphi_{1,1}^2 & \varphi_{1,2}^2 & \dots & \varphi_{N,z_n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu^{HMS-1} & \varphi_{1,1}^{HMS-1} & \varphi_{1,2}^{HMS-1} & \dots & \varphi_{N,z_n}^{HMS-1} \\ \mu^{HMS} & \varphi_{1,1}^{HMS} & \varphi_{1,2}^{HMS} & \dots & \varphi_{N,z_n}^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} z(\mu, \mathbf{x}^*, \Psi)^1 \\ z(\mu, \mathbf{x}^*, \Psi)^2 \\ \dots \\ z(\mu, \mathbf{x}^*, \Psi)^{HMS-1} \\ z(\mu, \mathbf{x}^*, \Psi)^{HMS} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Burada  $\varphi_{i,j}$ ,  $i$ . ışıklı kavşağın  $j$ . fazındaki yeşil süreyi,  $z_n$ ,  $n$ . kavşağın faz sayısını temsil etmektedir ( $i=1,2,\dots,$

$N$  ve  $j=1,2,\dots,z_n$ ). Denklem 7'de temsil edilen başlangıç belleğindeki B-V talep çarpanı ve faz yeşil süresi değişkenlerinin başlangıç değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

(i) **B-V matris çarpanı**, 0 ile Adım 1'de tanımlanan maksimum değer arasında aşağıdaki gibi üretilmektedir:

$$0 < \mu < \mu_{\max} \quad (8)$$

(ii) **Kavşaklardaki faz yeşil süreleri**, Adım 1'de tanımlanan minimum yeşil süre ve maksimum devre süresi değerleri arasında aşağıdaki gibi üretilmektedir:

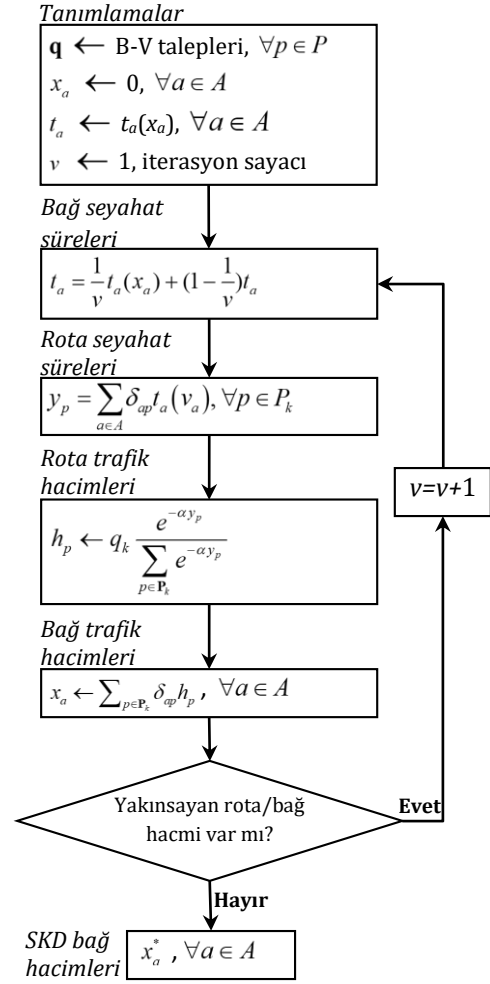
$$\varphi_{\min} < \varphi_{i,j} < c_{\max} \quad (9)$$

Kavşaklar için üretilen yeşil süre değerleri ile yeşiller arası sürelerin,  $I$ , toplamının minimum ve maksimum devre süresi değerleri arasında kalmaları için modelde aşağıdaki koşullar tanımlanmıştır:

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} \varphi_{i,j} \frac{c_{\max} - z_i I}{\sum_{j=1}^{z_i} \varphi_{i,j}} & \text{eğer } \sum_{j=1}^{z_i} (\varphi_{i,j} + I) > c_{\max} \\ \varphi_{i,j} \frac{c_{\min} - z_i I}{\sum_{j=1}^{z_i} \varphi_{i,j}} & \text{eğer } \sum_{j=1}^{z_i} (\varphi_{i,j} + I) < c_{\min} \\ \varphi_{i,j} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (10)$$

Denklem (10) incelendiğinde,  $i$  kavşağındaki yeşil ve yeşillerarası sürelerin toplamının maksimum devre süresini aşması durumunda, toplam değer maksimum devre süresine eşit olmasını sağlamak için üretilen yeşil sürelerin oransal olarak azaltıldığı görülmektedir. Benzer şekilde, söz konusu toplam değer minimum devre süresinin altında kalması durumunda üretilen yeşil sürelerin oransal olarak azaltılarak, toplam minimum devre süresine eşit olması sağlanmaktadır.

Denklem (6)'da verilen amaç fonksiyonu değerinin hesaplanabilmesi için bağlardaki kullanıcı denge akımlarına gereksinim duyulmaktadır. Geliştirilen modelde, Denklem (4) ile verilen SKD ataması problemi Şekil 2'de verilen RAT algoritması kullanılarak çözülmektedir.



Şekil 2. RAT algoritmasının akış diyagramı

Şekil 2'de verilen saçılım parametresi  $\alpha$ , yol kullanıcılarının rota seçim davranışları esnasında rota seyahat sürelerini hangi ölçüde dikkate aldıklarını belirlemektedir.

**ADIM 3:** Bu adımda, armoni belleğinden ya da her bir karar değişkeninin kendi çözüm uzayından rastgele seçilecek tonlar ile yeni bir çözüm vektörü üretilmektedir. Bu işlem, HMCR olasılığına bağlı olarak gerçekleştirilmekte olup, B-V matrisi çarpanı için aşağıdaki gibi örneklenebilir:

$$\mu' = \begin{cases} \mu' \in \{\mu^1, \mu^2, \mu^3, \dots, \mu^{HMS}\} & \text{eğer } rnd(0,1) \leq HMCR \\ \mu_{\min} \leq \mu' \leq \mu_{\max} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (11)$$

Burada  $rnd(0,1)$ ,  $[0,1]$  aralığında tekdüze dağılıma uygun olarak üretilmiş olan bir sayıyı temsil etmektedir. Seçimin armoni belleğinden yapılmasına karar verilmesi durumunda, ton ayarlama işleminin yapılıp yapılmayacağına aşağıdaki gibi karar verilmektedir:

$$\mu' = \begin{cases} \mu' \pm rnd(0,1)bw & \text{eğer } rnd(0,1) \leq PAR \\ \mu' & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (12)$$

Burada  $bw$ , ton ayarlama işlemine tabi tutulan karar değişkeninin değerinin, armoni belleğindeki hedef

değere ne kadar uzaktan seçileceğini temsil eden bant genişliğidir. Denklem (11) ve (12)'de B-V matris çarpanı için örneklenen üretim süreci, çözüm vektöründeki yeşil süreler için de aynı şekilde gerçekleştirilmektedir. Ancak, üretilen yeşil süre değerleri tamsayıya çevrilerek modele dahil edilmektedir.

**ADIM 4:** Bu adımda, yeni üretilen çözüm vektörünün amaç fonksiyonu değeri ile armoni belleğindeki en kötü vektörün amaç fonksiyonu değeri karşılaştırılır. Yeni vektör bellekteki en kötü çözümden daha düşük bir amaç fonksiyonu değeri verirse, yeni vektör armoni belleğindeki en kötü vektörün yerine belleğe dahil edilir.

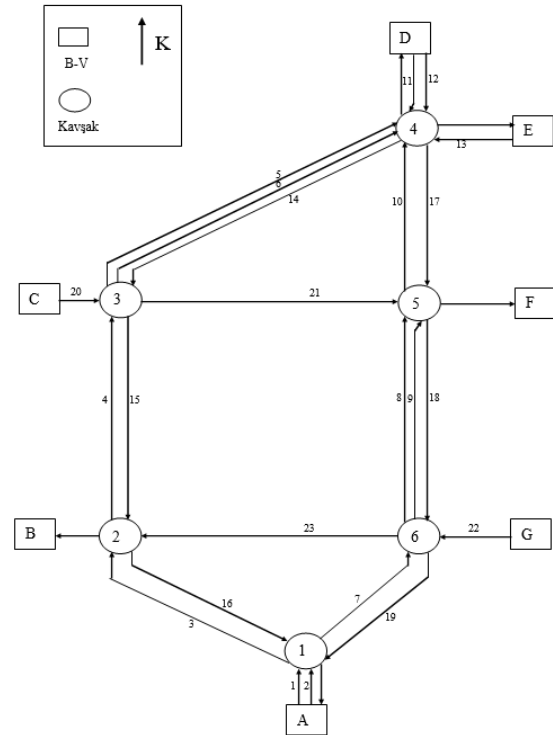
**ADIM 5:** Bu adımda, Adım 1'de tanımlanan iterasyon sayısına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Hedeflenen iterasyon sayısına ulaşıldıysa algoritma durdurulur ve armoni belleğindeki en iyi çözüm saklanır. Aksi halde, Adım 3'e dönülerek yeni bir çözüm vektörü üretilir.

#### 4. Sayısal Uygulamalar

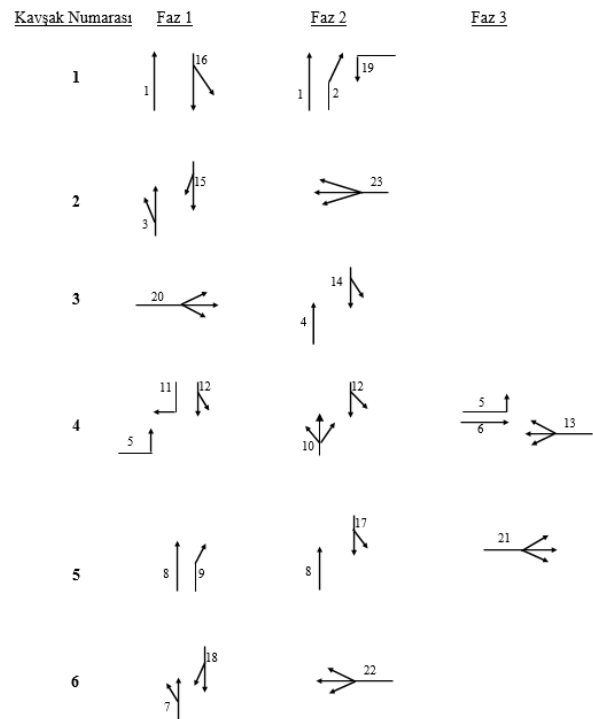
İki seviyeli modeli kullanılarak geliştirilen çözüm algoritmasının test edilebilmesi amacıyla Allsop ve Charlesworth (1977) tarafından geliştirilen test yol ağı kullanılmıştır. Literatürde birçok çalışmada kullanılan test ağında 6 ışıklı kavşak, 23 bağ ve 14 adet yeşil süre değişkeni bulunmaktadır. Test ağının yapısı ve faz planı sırasıyla Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Analizlerde kullanılan B-V talep matrisi ve bağ parametre değerleri Tablo 1-2'de verilmiştir.

Tablo 1'den görülebileceği gibi 22 adet B-V çifti arasında toplam saatlik seyahat talebi 4920 taşıt olarak alınmıştır. En düşük talebin E-F ve G-F olarak belirtilen B-V çiftleri arasında olduğu, en yüksek talebin ise C ve F zonları arasında olduğu ayrıca E-D ve D-E zonları arasında seyahat talebinin sifıra eşit olduğu Tablo 1'den görülebilmektedir. Şekil 4'de verilen faz planına göre 1,2,3 ve 6 numaralı kavşaklar iki fazlı, 4 ve 5 numaralı kavşaklar ise 3 fazlı olarak işletilmektedir.

Analizlerde kullanılan minimum faz yeşil süre değeri 7 sn, minimum ve maksimum devre süresi değerleri ise sırasıyla 36 ve 120 sn olarak alınmış olup bu değerler ulaşım ağ tasarımına ilişkin çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yeşillerarası süre 5 sn ve B-V matrisi çarpanının minimum ve maksimum değerleri sırasıyla 0 ve 3 olarak seçilmiştir.



Şekil 3. Test ağı



Şekil 4. Faz planı

Tablo 1. B-V talep matrisi (taşıt/saat)

B/V	A	B	D	E	F
A	--	250	700	30	200
C	40	20	200	130	900
D	400	250	--	0	100
E	300	130	0	--	20
G	550	450	170	60	20

**Tablo 2.** Bağ parametreleri

Kavşak Numarası	Bağ Numarası	Serbest Akım Seyahat Süresi (sn)	Doğun Akım (taşıt/saat)
1	1	1	2000
	2	1	1600
	16	10	2900
	19	10	1500
2	3	10	3200
	15	15	2600
	23	15	3200
3	4	15	3200
	14	20	3200
	20	1	2800
4	5	20	1800
	6	20	1850
	10	10	2200
	11	1	2000
	12	1	1800
	13	1	2200
5	8	15	1850
	9	15	1700
	17	10	1700
	21	15	3200
6	7	10	1800
	18	15	1700
	22	1	3600

Allsop ve Charlesworth yol ağı uygulamasında AAO metodu parametreleri *HMCR* ve *PAR* literatürle uyumlu olarak 0.90 ve 0.10 olarak seçilmiştir (Geem, 2005, 2006, 2007).  $HMS=30$  ve maksimum iterasyon sayısı ise 100,000 olarak kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmanın AAO metodu ile çözülmesi neticesinde Denklem (6)'da verilen amaç fonksiyonu değeri yaklaşık 0.86 ve B-V matrisi çarpanının maksimum değeri 1.164 olarak elde edilmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonu değeri için elde edilen B-V matrisi maksimum çarpanı ve en iyi ışık süreleri Tablo 3'te verilmiştir. 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 ilgili doyunluk dereceleri Tablo 4'te görülmektedir. Toplam talep yaklaşık %16 artırılarak 5707 ta/sa değerine ulaşmasına rağmen Tablo 4'ten görüldüğü gibi bağlara ait doyunluk dereceleri 1'in altındadır. Test ulaşım ağında, 20 ve 21 numaralı bağlar sırasıyla 0.97 ve 0.98 değerleriyle en yüksek doyunluk derecesine sahip bağlar olup, 6 ve 12 numaralı bağlar ise en az doyunluk derecesine sahip bağlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak analiz sonuçları bağ kapasiteleri aşılmadan test ulaşım ağının yaklaşık %16'lık bir yedek kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.** B-V matrisi çarpanı ve en iyi ışık süreleri

B-V matrisi çarpanı $\mu$	Devre Süresi (sn)	Kavşak no	Yeşil süreler (sn)		
			Faz 1	Faz 2	Faz 3
1.164	65	1	18	37	---
	75	2	31	34	---
	109	3	60	39	---
	120	4	38	34	33
	115	5	20	35	45
	74	6	31	33	---

**Tablo 4.** Bağ akımları ve doyunluk dereceleri

Bağ Numarası	SKD Bağ Akımları (ta/sa)	Doyunluk Derecesi (%)	Bağ Numarası	SKD Bağ Akımları (ta/sa)	Doyunluk Derecesi (%)
1	833	49	13	524	87
2	540	59	14	916	80
3	833	63	15	917	85
4	675	59	16	768	96
5	741	70	17	481	93
6	203	40	18	410	58
7	540	72	19	733	86
8	557	63	20	1502	97
9	141	48	21	1232	98
10	557	89	22	1455	91
11	579	91	23	974	67
12	294	27			

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada kentiçi karayolu ağlarında yedek kapasite eniyileme probleminin çözümü için iki seviyeli bir model geliştirilmiştir. Üst seviyede literatürden farklı olarak yedek kapasitenin eniyilenmesi amacıyla AAO metodu kullanılmıştır. Alt seviyede ise literatürde deterministik yaklaşıma göre daha gerçekçi olduğu belirtilen SKD trafik atama problemi dikkate alınmıştır. SKD bağ trafik hacimlerinin elde edilmesi amacıyla ışık sürelerinin göz önüne alındığı RAT algoritması kullanılmıştır. Önerilen modelin etkinliğinin test edilmesi amacıyla literatürde sıklıkla kullanılan Allsop ve Charlesworth ulaşım ağı seçilmiştir. Sayısal uygulamalar sonucunda test ulaşım ağına ait B-V matrisi maksimum çarpanı 1.164 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer bağ kapasitelerinin aşılmadan analizi yapılan ulaşım ağının yaklaşık olarak %16'lık bir yedek kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda yedek kapasite eniyileme probleminin çözümünde ulaşım ağındaki toplam gecikme değerini de göz önüne alabilen bir model geliştirilmesi planlanmaktadır.

## Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar

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

Allsop, R.E., Charlesworth, J.A., 1977. Traffic in a signal-controlled road network: an example of different signal timings including different routings. *Traffic Engineering Control*, 18 (5), 262-264.

Baskan, O., Ozan, C., 2017. Reserve Capacity Model for Optimizing Traffic Signal Timings with an Equity

- Constraint. H. Yaghoubi (Edt.), Highway Engineering, içinde (s.1-15), IntechOpen.
- Baskan, O., 2014. Harmony Search Algorithm for Continuous Network Design Problem with Link Capacity Expansions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (1), 273-283.
- Bell, M.G.H., Shield, C.M., 1995. A log-linear model for path flow estimation. Y.J. Stephanedes, F. Filippi (Edt.), *Proceedings of the 4th International Conference on the Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, 695-699, Capri, Italy.
- Ceylan, H., 2002. A genetic algorithm approach to the equilibrium network design problem. Doktora Tezi. Newcastle upon Tyne Üniversitesi, İngiltere.
- Ceylan, H., Ceylan, H., 2012. A Hybrid Harmony Search and TRANSYT hill climbing algorithm for signalized stochastic equilibrium transportation networks. *Transportation Research Part C*, 25, 152-167.
- Ceylan, H., 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.
- Ceylan, H., Özcan, T., 2018. Otobüs ağlarındaki sefer sıklıklarının Armoni Araştırması Algoritması ile optimizasyonu: Mandl test ağı üzerine bir uygulama. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6), 1107-1116.
- 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.
- Dell'Orco, M., Baskan, O., Marinelli, M., 2013. A Harmony Search Algorithm Approach for Optimizing Traffic Signal Timings. *Promet Traffic&Transportation*, 25 (4), 349-358.
- Gao, K., Zhang, Y., Sadollah, A., Su, R., 2016. Optimizing urban traffic light scheduling problem using harmonysearch with ensemble of local search. *Applied Soft Computing*, 48, 359-372.
- Geem, Z. W., Kim, J.H., Loganathan, G.V., 2001. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76 (2), 60-68.
- Geem, Z.W., 2005. Harmony search in water pump switching problem. In: Wang, L., Chen, K., Ong, Y.S. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science, ICNC 2005, LNCS*, vol. 3612. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 751-760.
- Geem, Z.W., 2006. Improved harmony search from ensemble of music players. In: Gabrys, B., Howlett, R.J., Jain, L.C. (Eds.), *Lecture Notes in Artificial Intelligence, KES 2006, Part I, LNAI*, vol. 4251. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 86-93.
- Geem, Z.W., 2007. Optimal scheduling of multiple dam system using harmony search algorithm. In: Sandoval, F. et al. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science, IWANN 2007, LNCS*, vol. 4507. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 316-323.
- Han, F., Cheng, L., 2017. Stochastic user equilibrium model with a tradable credit scheme and application in maximizing network reserve capacity. *Engineering Optimization*, 49 (4), 549-564.
- Miandoabchi, E., 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.
- Miandoabchi, Elnaz., Farahani R.Z., Szeto, W.Y., 2012. Bi-objective bimodal urban road network design using hybrid metaheuristics. *Central European Journal of Operations Research*, 20, 583-621.
- Salcedo-Sanz, S., Manjarres, D., Pastor-Sanchez, A., Del Ser, J.D., Portilla-Figueras, J.A., Gil-Lopez, S., 2013. One-way urban traffic reconfiguration using a multi-objective harmony search approach. *Expert Systems with Applications*, 40, 3341-3350.
- Wang, J., Deng W., Zhao, J., 2015. Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium. *Transport*, 30 (1), 103-116.
- Webster, F.V., Cobbe, B.M., 1966. Traffic signal. Road Research Technical Paper No. 56, HMSO, London.
- Wong, S.C., Yang, H., 1997. Reserve capacity of a signal-controlled road network. *Transportation Research Part B*, 31, 397-402.
- Xiao, H., Gao, J., Zou, Z., 2017. Reserve capacity model based on variable demand for land-use development control. *Transportation Planning and Technology*, 40 (2), 199-212.
- 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., Meng, Q., 2000. Modeling the capacity and level of service of urban



transportation networks. *Transportation Research Part B*, 34 (4), 255-275.

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