

# Otobüs ağlarındaki sefer sıklıklarının armoni araştırması algoritması ile optimizasyonu: Mandl test ağı üzerine bir uygulama

## Optimization of service frequencies in bus networks with harmony search algorithm: An application on Mandl's test network

Hüseyin CEYLAN<sup>1\*</sup>, Tayfun ÖZCAN<sup>2</sup>

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

hceylan@pau.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Teknolojisi Programı, Yatağan Meslek Yüksek Okulu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.

tayfunozcan@mu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.11.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 22.02.2018

doi: 10.5505/pajes.2018.43410

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Gelişmekte olan ülkelerde kentiçi toplu taşıma sistemleri arasında en yaygın tür olan otobüs taşımacılığının verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar son yıllarda artmaktadır. Otobüs sistemlerinin performansının ele alındığı birçok çalışmada, kullanıcı ve işletmeci faydalarını eniyileyen yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmada, kentiçi otobüs ağlarındaki sefer sıklıklarını eniyileyen iki-seviyeli bir simülasyon/optimizasyon modeli geliştirilmektedir. Üst seviyede, işletmeci ve kullanıcı maliyetlerini temsil eden bir amaç fonksiyonunun çözümü için sezgisel Armoni Araştırması (AA) optimizasyon tekniği tabanlı bir model önerilmektedir. Alt seviyede ise talebin toplu taşıma ağına dağılımını temsil eden toplu taşıma ataması problemi çözülmektedir. Önerilen modelde, aktarma bekleme sürelerinin kesin hesabı için zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma ataması yaklaşımı kullanılmakta ve toplu taşıma ataması problemi logit tabanlı bir modele dayalı olarak VISUM yazılımı ile çözülmektedir. Geliştirilen model, toplu taşıma ağ tasarımı çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir test ağına uygulanmıştır. Sonuçlar, AA tabanlı modelin sefer sıklığı optimizasyonu probleminin çözümünde etkin olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

**Anahtar kelimeler:** Kentsel toplu taşıma, Otobüs taşımacılığı, Armoni araştırması, Toplu taşıma ataması, VISUM

### Abstract

In developing countries, efforts to increase the efficiency of bus transportation, which is the most common type of urban public transport systems, have been increasing in recent years. Many studies addressing the performance of bus systems focus on approaches to optimizing user and operator benefits. In this study, a bi-level simulation/optimization model is developed to optimize service frequencies in urban bus networks. At the upper level, a meta-heuristic Harmony Search (HS) optimization technique based model is proposed for solving an objective function that represents operator and user costs. At the lower level, the transit assignment problem, which represents the distribution of demand over the transit network, is solved. In the proposed model, a time-table based transit assignment approach is used for the exact calculation of transfer wait times, and the transit assignment problem is solved using VISUM software based on a logit-based choice model. The developed model has been applied to a test network that is widely used in transit network design studies. The results show that the HS based model can be used effectively to solve the service frequency optimization problem.

**Keywords:** Urban transit, Bus transportation, Harmony search, Transit assignment, VISUM

## 1 Giriş

Dünya genelinde yolcu ve yük hareketliliği her geçen gün artmakta ve bu artışın devam etmesi halinde 2050 yılına gelindiğinde küresel ölçekte ulaşım aktivitelerinin 2009 yılında gözlenenin iki katına çıkması beklenmektedir [1]. Buna paralel olarak ulaştırma sektöründeki enerji kullanımı, hava kalitesinin bozulmasında önemli rol oynamakta ve sera gazı üretimini tetiklemektedir [2]. Behrens ve Egenhofer [3] 1990 yılından bu yana Avrupa ekonomisindeki tüm sektörlerde sera gazı emisyonlarının azaltıldığını, ancak ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyon artışının devam ettiğini belirtmektedirler. Anılan çalışmada, bu artışın 1990 ile 2007 yılları arasında yaklaşık %36'ya ulaştığına ve günümüzde Avrupa genelindeki emisyonların çeyreğinden ulaştırma sektörünün sorumlu olduğuna değinilmektedir. Ulaştırma sektöründeki enerji gereksinimi artışının başlıca nedeni artan özel araç kullanımı olarak değerlendirilebilir [4]. Dolayısıyla, hem artan enerji gereksiniminin önüne geçmek hem de ulaştırma sektöründen kaynaklanan çevresel sorunları en aza indirmek için özel araçlara alternatif olabilecek niteliklere sahip toplu taşıma sistemlerinin oluşturulması ya da mevcut

sistemlerin güvenlik, ekonomi, konfor ve güvenilirlik gibi performans göstergelerinin iyileştirilmesi önem taşımaktadır.

Kentsel toplu taşıma sistemlerinin performanslarının değerlendirildiği çeşitli çalışmalarda, gelişmekte olan ülkelerde toplu taşıma odaklı problemlerin birçoğunun zirve saatlerdeki kapasite yetersizliğinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur [5]-[7]. British Youth Council [8] gelişmekte olan ülkelerde toplu taşımaya olan talebin artırılabilmesi için toplu taşıma servislerindeki konfor seviyesinin artırılmasının önemine vurgu yapmaktadır. Anılan çalışmada, konfor kriterinin zirve saatlerde toplu taşıma araçlarındaki yolcu sayılarının azaltılmasıyla sağlanabileceğine değinilmektedir. Bu bağlamda, otobüs tarifelerinin planlanmasında bir taşıtta aynı anda bulunabilecek yolcu sayısının koltuk sayısına oranının en fazla 1.80 olmasının kabul edilebilir olduğu değerlendirilmektedir [9]. Ancak, gelişmekte olan ülkelerde bu değerin daha yüksek olduğu bilinmektedir [10]. Bahsi geçen göstergelerde meydana gelecek iyileşmelerin kullanıcı perspektifi açısından önemli olduğu bilirse de, toplu taşıma hizmetlerinin sürdürülebilir olması da yine kullanıcı yararı açısından vazgeçilmez bir unsurdur. Bu da, özellikle işletmeci açısından bakıldığında sistemin zarar etmeden ya da öngörülen bir karlılıkla

çalışabilmesi ile mümkündür. Dolayısıyla, sürdürülebilir kentsel toplu taşıma sistemlerinin var olması, kullanıcı ve işletmeciler tarafından birlikte gözetilmesiyle mümkün olabilir.

Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde kentsel toplu taşımacılık hizmetleri genellikle kamu/yerel yönetimlerin denetimine tabi olan özel işletmeler tarafından yürütülmektedir. Toplu taşıma hizmetinin özel kuruluşlar tarafından sağlandığı durumlarda işletmeciler, sınırlı bütçeleri ve mevcut filoları dahilinde kullanıcı faydasını gözeterek hedeflenen bir karlılığa ulaşma beklentisindedirler. Bu noktada kullanıcı faydası, güzergâhlar boyunca yüksek hizmet kalitesiyle yolcuların seyahat sürelerinin en aza indirilmesi olarak tanımlanabilir.

Toplu taşımada seyahat süresi, taşıt içinde ve dışında geçen zamanların toplamı olarak ele alınabilir. Taşıt içindeki süre, kullanıcıların başlangıç ve varış noktaları arasında toplu taşıma araçlarının içinde geçirdikleri zamandır. Taşıt dışındaki süre ise başlangıç noktasından ilk durağa erişim, durakta bekleme, aktarma esnasında kaybedilen zaman, son taşıttan indikten sonra varış noktasına erişim için harcanan zaman ve duraklarda otobüslere biniş-iniş sürelerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Özellikle karma trafik içerisinde hizmet veren lastik tekerlekli kentsel toplu taşıma sistemlerinde uygulanabilecek işletme hızları dikkate alındığında, yolcuların taşıt içinde geçirdikleri sürenin azaltılması oldukça zordur. Bir toplu taşıma ağındaki güzergâhların yapısına bağlı olarak kullanıcıların başlangıç noktalarından ilk durağa, son duraktan varış noktasına erişim için harcadıkları zamanın da sabit olacağı varsayılabilir. Bu noktada, özellikle orta ve büyük ölçekli kentlerde günümüzde önemli düzeye ulaşan aktarmalı seyahatlerde kullanıcıların aktarma duraklarındaki bekleme sürelerinin azaltılması için toplu taşıma güzergâhlarında sefer aralıklarının azaltılması ilk bakışta etkili bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Ancak, bunun işletme giderlerini ve filo gereksinimini arttıracığı dikkate alınmalıdır. Uygulamada işletmeciler, kısıtlı kaynaklarını daha iyi kullanmak ve karlılıklarını arttırmak amacıyla günün belli zamanlarında sefer aralıklarını arttırarak güzergâhlardaki servis sayısını azaltma eğilimindedirler [11]. Seyahatlerini mümkün olan en kısa sürede ve belirli bir konfor düzeyinde gerçekleştirmek isteyen kullanıcıların bu eğilimden olumsuz etkilenmelerinin önüne geçmek için güzergâhlarda uygulanabilecek en düşük sefer sayılarının ya da en yüksek otobüs yüklemeye değerlerinin yönetmelikler ve sözleşmelerle düzenlenmesi önem taşımaktadır [12],[13].

Literatürde kentiçi toplu taşıma sistemlerinin sefer aralıklarının belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar ve hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Lampkin ve Saalmans [14] sefer aralığı hesabı için bir kısıtlı optimizasyon problemi formüle etmiştir. Çalışmada, filo büyüklüğü kısıtı altında toplam seyahat süresini en aza indiren bir rastgele arama prosedürü geliştirilmiştir. Rea [15] güzergâhlardaki yolcu sayısına bağlı olarak en iyi aralık ve otobüs boyutu kombinasyonunu araştıran bir model geliştirmiştir. Silman ve diğ. [16] verilen bir güzergâh kümesi ve filo için toplam seyahat süresi ve konforsuzluk düzeyini en aza indiren türeve dayalı bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada konforsuzluk düzeyi ayakta seyahat eden yolcu sayısı ile ilişkilendirilmiştir. Dubois ve diğ. [17] sefer aralığı hesabı için iki adımlı bir arama prosedürü geliştirmiştir. Yapılan çalışmalarda temel yaklaşım, kullanıcıların güzergâh seçimlerini temsil eden toplu taşıma ataması probleminin çözümüne bağlı olarak çeşitli işletme parametrelerinin eniyilenmesidir. Toplu taşıma ağlarının tasarımına ilişkin

çalışmaların birçoğunda atama problemi yolcuların en kısa güzergâhları seçmesi prensibine dayalı olarak ele alınmıştır [18]-[25]. Anılan çalışmalarda otobüslerin sefer aralıkları, güzergâhlara atanan yolcu sayılarına bağlı olarak hesaplanmış olup aktarmalardan kaynaklanan bekleme süreleri sabit kabul edilmiştir. Doğan ve Özuysal [26] karma trafik koşullarında işletilen kent içi otobüs sistemlerindeki yüksek bekleme sürelerinin, toplu taşıma kullanıcılarının güzergâh ve hatta tür seçimini değiştirebilecek bir etkene dönüşebildiğinin altını çizmektedir. Bu noktada değinilmesi gereken bir diğer husus ise kullanıcıların duraklardaki biniş-iniş sürelerinin de otobüs sistemlerindeki seyahat sürelerini ve dolayısıyla sistem güvenilirliğini doğrudan etkilediğidir [27]. Dolayısıyla, aktarmalardan kaynaklanan bekleme sürelerini otobüs çalışma tarifelerine bağlı olarak net bir şekilde tanımlayan ve kullanıcıların güzergâh seçim davranışlarındaki rastgeleliği dikkate alan bir model yardımıyla daha gerçekçi sonuçlar elde edilebileceği değerlendirilebilir.

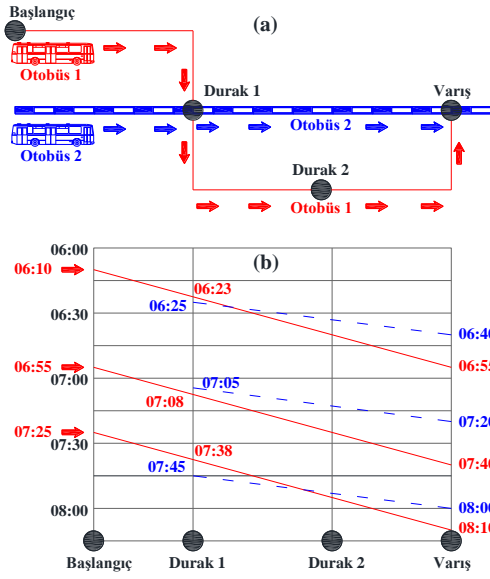
Bu çalışmada, kent içi otobüs güzergâhlarındaki optimum sefer aralığı değerlerini hesaplayan iki-seviyeli bir simülasyon/optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin üst seviyesinde kullanıcı ve işletmeciler tarafından temsil eden bir fonksiyon minimize edilirken, alt seviyede kullanıcıların güzergâhlara dağılımını temsil eden toplu taşıma ataması problemi çözülmektedir. Modelde kullanıcı faydası, zirve saatte bir toplu taşıma ağındaki toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi olarak ele alınırken, işletmeciler açısından toplam servis-km değerinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Üst seviye problemi, dakika cinsinden ele alınan sefer aralığı değerlerinin tamsayı olmasından dolayı karma tamsayılı programlama problemi olarak formüle edilmiş ve sezgisel Armoni Araştırması (AA) optimizasyon tekniği ile çözülmüştür. Toplu taşıma ataması probleminin çözümünde ise VISUM ulaşım planlaması yazılımı kullanılmıştır. VISUM yazılımı, VBA (Visual Basic for Applications) ve Python gibi programlama dilleri ile birlikte kullanılabilir. Kullanıcılar tarafından hazırlanan kaynak kodları içerisinde VISUM çağırılarak istenilen hesaplama işlemleri önceden hazırlanmış olan prosedür sıralamalarına göre yaptırılabilir ve sonuçlar alınabilmektedir [28]. Bu çalışmada geliştirilen modelin algoritması Microsoft Excel VBA çatısı altında kodlanmış ve toplu taşıma atamasının çözümü için her iterasyonda VISUM yazılımı çağırılmıştır. Geliştirilen model, literatürde toplu taşıma ağ tasarımı modellerinin performanslarının sınanmasında yaygın olarak kullanılan ve Mandl [29] tarafından geliştirilen test ağına uygulanmıştır.

Çalışmanın 2. Bölümü'nde ele alınan probleme ilişkin formülasyonlar ve VISUM yazılımının çalıştırılma düzenine ilişkin açıklamalar, 3. Bölümü'nde ise AA optimizasyon tekniği tabanlı modelin yapısı verilmiştir. Geliştirilen modelin sayısal uygulaması 4. Bölüm'de verildikten sonra elde edilen sonuçlar 5. Bölüm'de sunulmuştur.

## 2 Problem formülasyonu

Otobüs güzergâhlarındaki sefer aralıklarının, aktarma bekleme ve yolculuk süresi üzerindeki etkisi Şekil 1 incelenerek daha iyi anlaşılabilir.

Şekil 1(a) incelendiğinde, başlangıçtan varışa seyahat etmek isteyen bir kişinin, Otobüs 1'i kullanarak doğrudan varışa ulaşmasının mümkün olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, Durak 1'de Otobüs 2'ye aktarma yaparak da varışa ulaşması olasıdır.



Şekil 1: Örnek toplu taşıma ağı ve grafiksel zaman çizelgesi.

Şekil 1(b) incelendiğinde, Otobüs 2'nin Otobüs 1'den daha yüksek hıza sahip olduğu göze çarpmaktadır. Başlangıç-Varış (B-V) çifti arasındaki bağlantı alternatifleri incelendiğinde, saat 06:00'da Otobüs 1'e binen bir yolcunun, Durak 1'de diğer güzergaha aktarma yaparak varışa daha kısa sürede ulaşabileceği görülmektedir. Bir sonraki kalkışta Otobüs 1'e binen bir yolcunun ise Durak 1'de Otobüs 2'ye yetişemediği, dolayısıyla bağlantı alternatifi olmaksızın aktarmasız bir şekilde varışa ulaşabileceği söylenebilir. Otobüs 1'in son seferi incelendiğinde ise yine Durak 1'de aktarma olasılığının bulunduğu ancak birinci sefere göre daha fazla aktarma beklemesi yaşanacağı değerlendirilebilir. Zaman çizelgelerine bağlı olarak ortaya çıkan ve yukarıda bahsi geçen her bir seyahat alternatifi birer bağlantı olarak ele alınmaktadır [30]. Dolayısıyla, güzergâhlardaki sefer aralıklarında gerçekleştirilecek değişiklikler, kullanıcılar açısından yeni bağlantı alternatifleri oluşması ve aynı zamanda mevcut bağlantıların kullanılmaz hale gelmesi anlamına gelebilir. Bu kapsamda, sa. 06:00-08:00 arasında toplu taşıma ağına yüklenen bir B-V talebi için Tablo 1'de verilen bağlantı alternatifleri söz konusudur.

Tablo 1: Toplu taşıma ağı.

Bağlantı no	İlk Güzergah	Biniş sa.	Aktarma Güzergahı	Aktarma sa.	Varış sa.	Toplam Seyahat Süresi (dk.)
1	Otobüs 1	06:10	Otobüs 2	06:25	06:40	30
2	Otobüs 1	06:10	---	---	06:55	45
3	Otobüs 1	06:55	---	---	07:40	45
4	Otobüs 1	07:25	Otobüs 2	07:45	08:00	35
5	Otobüs 1	07:25	---	---	08:10	45

1 ve 2 numaralı otobüs güzergâhlarındaki servis aralıkları azaltılarak kullanıcılara daha düşük aktarma bekleme zamanları ile varış noktalarına daha kısa sürede ulaşma imkanı sağlanabilir. Ancak, bu düzenlemenin beraberinde getireceği işletme ve yatırım maliyetleri, işletmeciler açısından istenmeyen bir durumdur. Bu değerlendirmeler ışığında, otobüs güzergâhlarında sefer aralıklarına bağlı olarak toplam

seyahat süresi ve servis-km değerlerinin optimizasyonu için geliştirilen simülasyon/optimizasyon modelinin yapısı bu bölümde verilmektedir.

## 2.1 Alt seviye probleminin VISUM ile çözümü

Geliştirilen modelde toplu taşıma kullanıcılarının otobüs güzergâhlarına dağılımının hesaplanabilmesi için VISUM ulaşım modelleme yazılımının zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma ataması yaklaşımı kullanılmıştır. Şekil 2'de, VISUM arayüzünde oluşturulmuş olan örnek bir ulaşım ağı ve güzergâhları oluşturulmuş olan otobüs hatları verilmiştir.

Genel olarak VISUM yazılımında toplu taşıma ağının oluşturulması; koordinatları bilinen düğümlerin (nodes) yerleştirilmesi, düğümlerin bağlarla (links) birleştirilmesi, trafik analiz zonlarının merkezlerinin (centroids) yerleştirilmesi, zonların düğümlere bağlayıcılar (connectors) ile bağlanması, durakların (stop points) oluşturulması ve güzergâhların (line routes) yol ağı üzerine işlenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Her bir toplu taşıma güzergâhı için arzu edilen işletme koşullarını sağlayacak şekilde zaman çizelgeleri oluşturularak sistemin bu tarifelere uygun çalıştırılması durumunda aktarma olanaklarını da hassas bir şekilde dikkate alan zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma ataması, özellikle kent içi otobüs sistemlerinin ve raylı sistemlerin analizi için elverişlidir [31].

VISUM'da oluşturulmuş örnek bir zaman çizelgesi Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, zaman çizelgesi üzerinde tüm seferlerin (varsa) özel adları, numaraları, ilk duraktan kalkış saatleri ve son durağa varış saatleri gibi detaylı bilgiler yer almaktadır.

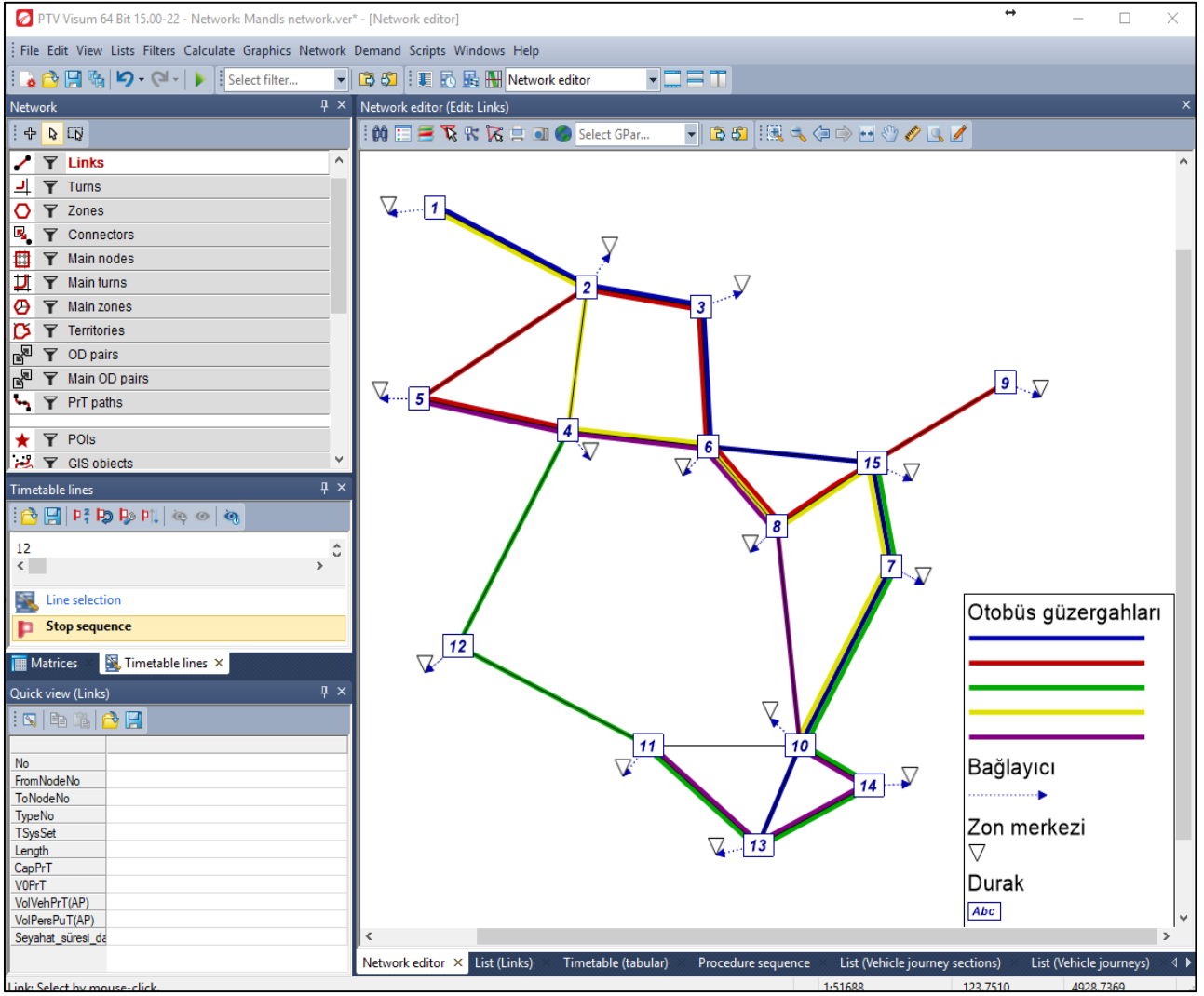
VISUM'da zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma prosedürü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

- Öncelikle bir B-V çifti arasındaki alternatif bağlantılar belirlenir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, herhangi bir güzergâh tek başına bir bağlantı oluşturabileceği gibi birden fazla güzergâh da aktarma(lar) yoluyla bir bağlantı oluşturabilmektedir,
- Daha sonra ilgili B-V çifti arasındaki seyahat talebi, olası bağlantılar arasında bir seçim modeli yardımıyla paylaşılır. Dolayısıyla, zaman çizelgesi toplu taşıma ataması yaklaşımı, kullanılacak olan seçim modelinin yapısına bağlı olarak stokastik kullanıcı denge ataması ile benzeşmektedir [30].

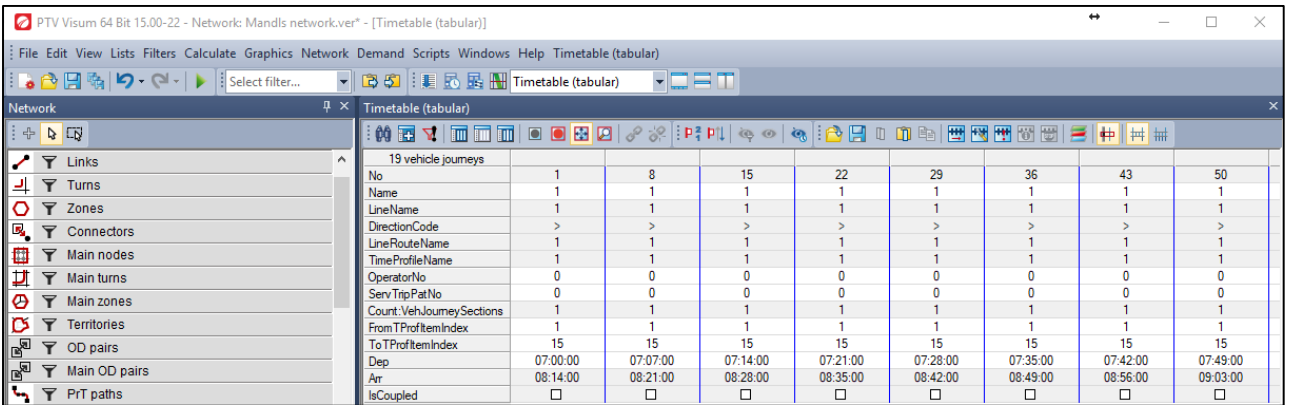
B adet üretim ve V adet çekim bölgesi arasındaki toplu taşıma seyahat talebinin  $B \times V$  boyutlarında bir B-V matrisi ile temsil edildiği varsayımıyla, zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma atamasında herhangi bir g otobüs güzergâhını kullanan yolcu sayısı (hacmi) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$h_g = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^V \sum_{k=1}^{c^{ij}} q^{ij} P_k^{ij} \delta_{gk} \quad (1)$$

Burada,  $h_g$  g otobüs güzergâhını kullanan yolcu sayısını,  $c^{ij}$  i-j B-V çifti arasındaki bağlantı sayısını,  $q^{ij}$  toplu taşıma talebini,  $P_k^{ij}$  k bağlantısının seçilme olasılığını,  $\delta_{gk}$  ise k bağlantısının g güzergâhını kullanıp kullanmadığını gösteren bağlantı-güzergâh belirleme matrisinin ilgili elemanını temsil etmektedir.



Şekil 2: VISUM arayüzünde oluşturulmuş örnek bir toplu taşıma ağı.



Şekil 3: VISUM'da oluşturulmuş örnek bir zaman çizelgesi.

Burada dikkat edilmesi gereken bir husus, eğer  $k$  bağlantısı  $g$  güzergâhını kullanıyorsa  $\delta_{gk} = 1$  aksi halde  $\delta_{gk} = 0$  olacaktır.

Bilinen bir seyahat talebine bağlı olarak güzergâhlarda taşınan yolcu sayısının hesaplanabilmesi için B-V çiftleri arasındaki

bağlantıların seçim olasılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer Denklem (2)'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir.

$$P_k^{ij} = \frac{U_k^{ij-\beta}}{\sum_{z=1}^c U_z^{ij-\beta}} \quad (2)$$

Burada,  $U_k^{ij}$   $i$ - $j$  B-V çifti arasındaki  $k$  bağlantısının fayda değeri olup ilgili bağlantının seyahat maliyetinin bir işlevi olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$U_k^{ij} = R_k^{ij-\beta} \quad (3)$$

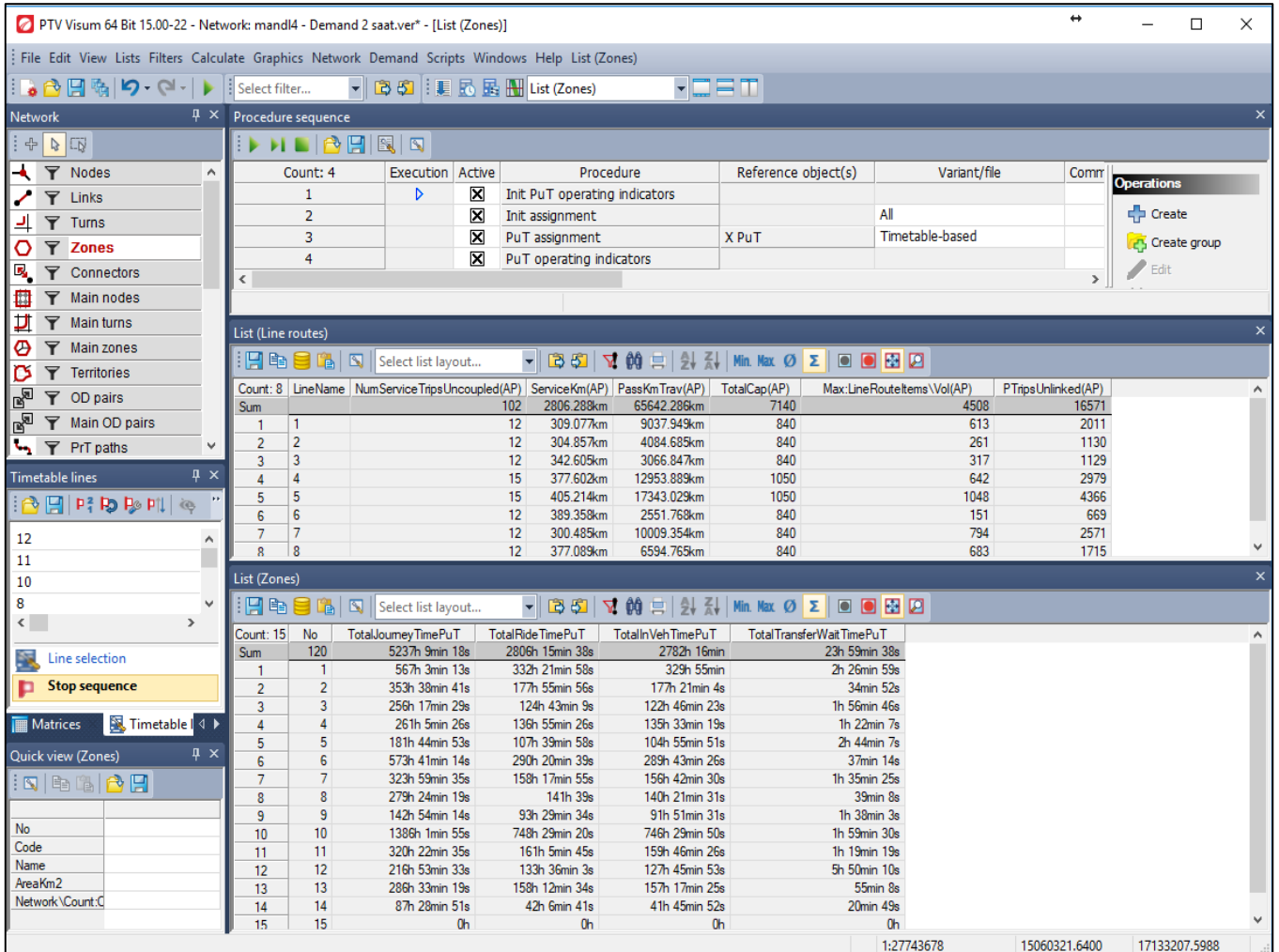
Burada,  $R_k^{ij}$   $i$ - $j$  B-V çifti arasındaki  $k$  bağlantısının seyahat maliyetini temsil etmektedir. Denklem (2)'de verilen  $\beta$  parametresi maliyet duyarlılığının modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. VISUM'da zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma atamasında  $k$  bağlantısının maliyeti, "algılanan seyahat süresi" ile otobüslerin beklenen kalkış zamanından erken ya da geç kalkması durumunda eklenecek ceza değerlerinin toplamı olarak ele alınmakta olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R_k^{ij} = (TGZ_k^{ij} + AGZ_k^{ij} + 5 \times AS_k^{ij}) + EKC_k^{ij} + GKC_k^{ij} \quad (4)$$

Denklem (4)'te parantez içinde verilen ifadeler toplu taşıma kullanıcılarının  $k$  bağlantısı için algıladıkları seyahat süresini göstermektedir. Bağlantıda,  $TGZ_k^{ij}$   $i$ - $j$  B-V çifti arasındaki  $k$  bağlantısında taşıt içinde geçen zamanı (dk),  $AGZ_k^{ij}$  aktarmada geçen zamanı (dk.),  $AS_k^{ij}$  aktarma sayısını,  $EKC_k^{ij}$   $k$  bağlantısındaki güzergâhlardaki servislerin başlangıç

durağından erken kalkış cezasını (dk.),  $GKC_k^{ij}$  ise geç kalkış cezasını (dk.) temsil etmektedir. Şekil 4'te, VISUM'da toplu taşıma atamasının yapılabilmesi için gerekli olan işlem sıralaması (procedure sequence), atamanın gerçekleştirilmesinden sonra otobüs güzergâhları ve zonlar bazında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Şekilden görüldüğü üzere her bir zaman çizelgesi tabanlı atama öncesinde, bellekte bir önceki atamadan kalan yolcu sayılarının ve işletme göstergelerinin temizlenmesi için bir başlangıç ataması (init assignment) yapılması ve yine işletme göstergelerinin temizlenmesi (init put operating indicators) gerekmektedir. Ardından, zaman çizelgesi tabanlı atama (timetable-based PuT assignment) ve gösterge hesaplama (PuT operating indicators) işlemleri gerçekleştirilmektedir. Atamanın tamamlanmasının ardından, güzergâhlarda taşınan yolcu sayıları, her bir güzergâh için maksimum yük değeri ve kapasite değerleri güzergâhlar penceresi üzerinden incelenebilmektedir. Dolayısıyla, zaman çizelgesine bağlı olarak kapasitenin aşılmış aşılmadığına ilişkin değerlendirme bu noktada yapılmaktadır. Son olarak, yolcuların analiz periyodu içinde toplu taşıma ağı üzerinde araç içi ve dışında geçirdikleri zaman değerleri zonlar penceresi üzerinden incelenmektedir.



Şekil 4: VISUM'da örnek işlem sıralaması ve atama sonuçları.

## 2.2 Üst seviye problemi

Geliştirilen modelde kullanıcı ve işletmeci faydalarının eniyilenmesini temsil eden üst seviye problemi aşağıdaki gibi formülize edilmiştir:

$$\min Z = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^V \sum_{k=1}^{c^{ij}} w_k (TGZ_k^{ij} + AGZ_k^{ij}) + \sum_{i=1}^G y_i S_i L_i + t \sum_{i=1}^G C_i (kap_i, h_i) \quad (5)$$

Denklem (5)'te verilen eşitliğin sağındaki birinci kısım kullanıcı maliyetini, ikinci kısım işletmeci maliyetini temsil etmektedir. Burada,  $G$  toplu taşıma ağındaki otobüs güzergâhları kümesini,  $S_i$   $i$  güzergâhında analiz periyodu içindeki sefer sayısını,  $L_i$   $i$  güzergâhın uzunluğunu (km) temsil etmektedir. Denklemdeki birinci ve ikinci kısımların birimlerindeki farklılığı gidermek amacıyla her iki kısım da ağırlık faktörleri ile çarpılmıştır. Burada  $w_k$  B-V çiftleri arasındaki taşıt içinde ve aktarmada geçen zamanlar için,  $y_i$  ise güzergâhlardaki sefer sayıları için kullanılan ağırlık faktörleridir. Güzergâhlarda taşınan yolcu sayısının, taşıt kapasitesini aşmamasını sağlamak için amaç fonksiyonuna üçüncü bileşen olarak bir ceza parametresi ilave edilmiştir. Bağlıtıda  $C_i$  ceza fonksiyonunu,  $kap_i$   $i$  güzergâhındaki toplam kapasiteyi,  $h_i$  taşınan yolcu sayısını,  $t$  ise ceza değerinin duyarlılığını kontrol eden ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Ceza fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$C_i = \begin{cases} (kap_i - h_i) & \text{eğer } h_i > kap_i \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (6)$$

## 3 Armoni araştırması optimizasyon tekniği ve model yapısı

Optimizasyon modeli olarak kullanılan ve ilk olarak Geem ve diğ. [32] tarafından geliştirilen AA optimizasyon tekniği, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. AA tekniğinde orkestra, ancak tüm orkestra elemanlarının birbirleri ile armonik açıdan uyumlu bir şekilde çalmaları ile en estetik melodiyi elde edebilirken, optimizasyon modellerinde en iyi çözüm ancak amaç fonksiyonunun global optimuma giderek yaklaşması sonucu elde edilebilmektedir. AA yöntemi son yıllarda taşıt rotalama, trafik ışıklarının optimizasyonu, ayrık ulaşım ağ tasarımı ve ulaştırma sektöründeki enerji talebinin tahmin edilmesi gibi problemlerin çözümünde kullanılmıştır [33]-[36]. AA çözüm süreci 5 adımdan oluşmaktadır:

### 3.1 Adım 1 - problemin kurulması ve algoritma parametrelerinin tanımlanması

Bu adımda amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, karar değişkenleri için kullanılan çözüm uzayı tanımlanmaktadır. AA çözüm sürecini kontrol eden 3 farklı parametre mevcuttur. Bunlar sırasıyla, AA'daki çözüm vektörü sayısı olan armoni belleği kapasitesi (Harmony Memory Size - HMS), armoni belleğinden yapılacak değişken seçimi oranı olan armoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate - HMCR) ve ton ayarlama oranıdır (Pitch Adjusting Rate - PAR).

### 3.2 Adım 2 - armoni belleğinin oluşturulması

Armoni belleği, tüm çözüm vektörlerinin ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin saklandığı bellektir. Fonksiyon

değerleri sayesinde, ilgili çözüm vektörlerinin kalitesi değerlendirilmektedir. Bu adımda, armoni belleği matrisi, rastgele üretilen çok sayıda çözüm vektörü ile doldurulmakta ve bu vektörler için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır.

### 3.3 Adım 3 - yeni armoninin oluşturulması

Bu adımda yeni çözüm vektörü, armoni belleğinde bulunan tonlara göre ve tamamen rastgele seçilen tonlara göre üretilmektedir. Değişkenlerin armoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, değeri 0 ile 1 arasında değişen HMCR oranına göre yapılmaktadır. Burada, HMCR bir karar değişkeninin değerinin mevcut armoni belleğinden seçilme olasılığını gösterirken, (1-HMCR) oluşturulan yeni karar değişkeninin, ilgili değişkenin alabileceği değerler vektörü içerisinde rastgele olarak seçilmesine karşılık gelmektedir. Daha sonra ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığını belirlemek için her karar değişkeninin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ton ayarlama işlemi, ancak armoni belleğinden bir değer seçilmesi durumunda gerçekleştirilmektedir.

### 3.4 Adım 4 - armoni belleğinin güncellenmesi

Bu adımda, armoni belleğindeki tüm amaç fonksiyonu değerleri en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Daha sonra yeni armoni vektörü, armoni belleği içindeki en kötü vektör ile karşılaştırılır. Eğer yeni vektör, bellek içindeki en kötü vektörden daha iyi bir sonuç veriyorsa belleğe dahil edilir ve en kötü vektör bellekten çıkarılır.

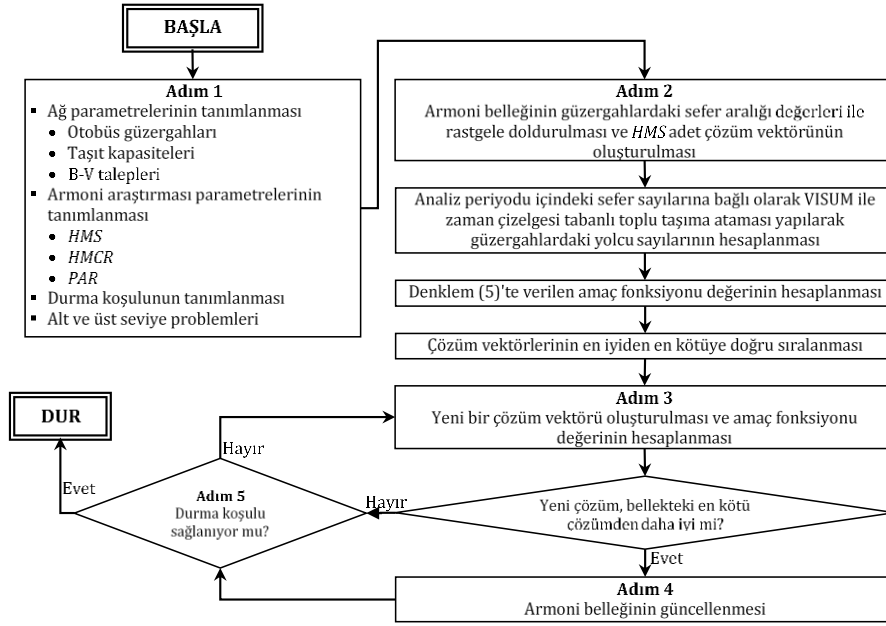
### 3.5 Adım 5 - durma koşulunun kontrolü

Bu adımda verilen durma koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Koşulun sağlanmaması durumunda, Adım 3 ile 5 arasındaki işlemler istenen koşul sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

AA optimizasyon tekniğinin ele alınan probleme adaptasyon adımlarını gösteren akış şeması Şekil 5'te verilmektedir.

Şekil 5'ten görüldüğü üzere, birinci adımda ağ parametreleri, AA parametreleri, durma koşulu ve amaç fonksiyonu tanımlanır. İkinci adımda, her bir çözüm vektörü için toplu taşıma ağındaki güzergâhların sefer aralığı değerleri önceden tanımlanan alt ve üst sınırlar dikkate alınarak rastgele üretilir. Bu işlem HMS adet çözüm vektörü için tekrarlanarak başlangıç vektörleri oluşturulur. Daha sonra, rastgele üretilen sefer aralıklarına bağlı olarak analiz periyodunun sefer çizelgeleri oluşturulur ve bu çizelgeler VISUM yazılımına girilir.

Bu aşamada, her bir çözüm vektörü için sırasıyla zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma ataması yapılır ve ardından Denklem (5)'te verilen amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. İkinci adımın son aşamasında çözüm vektörleri, aldıkları amaç fonksiyonu değerlerine göre en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Üçüncü adımda, AA prensipleri doğrultusunda üretilen sefer aralıklarını içeren yeni çözüm vektörü oluşturulur. Daha sonra yeni çözüm vektörüne bağlı olarak hazırlanan sefer çizelgeleri VISUM'a veriler ve toplu taşıma ataması problemi çözülerek yeni amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Bu adımın sonunda, yeni amaç fonksiyonu değeri ile ikinci adımda üretilen en kötü çözüm vektörünün aldığı amaç fonksiyonu değeri karşılaştırılır. Eğer yeni vektör, armoni belleğindeki en kötü vektörden daha iyi bir sonuç vermediyse modelin durma koşulu kontrol edilir. Durma koşulu sağlandıysa algoritma durdurulur ve armoni belleğindeki en iyi vektör çözüm olarak saklanır.

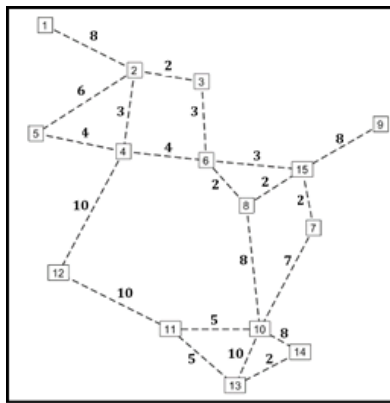


Şekil 5: AA optimizasyon tekniği tabanlı çözüm yaklaşımı.

Yeni üretilen çözüm vektörünün amaç fonksiyonu değeri bellekteki en kötü amaç fonksiyonu değerinden daha iyi ise dördüncü adıma geçilir ve armoni belleği güncellenir. Bu işlem, bellekteki en kötü vektörün bellekten atılması ve bunun yerine yeni üretilen çözüm vektörünün belleğe dahil edilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu noktada yine modelin durma koşulu kontrol edilir. Durma koşulu sağlandıysa algoritma durdurulur ve armoni belleğindeki en iyi vektör çözüm olarak saklanır. Anılan koşulun sağlanmaması durumunda üçüncü adıma dönülerek yeni çözüm vektörünün üretilmesi ve devam eden süreçler tekrarlanır.

#### 4 Sayısal uygulama

Geliştirilen modelin uygulaması, literatürde toplu taşıma ağ tasarımı problemlerinin çözümü için geliştirilen yöntemlerin sınanmasında yaygın olarak kullanılan ve Mandl [29] tarafından geliştirilen 15 düğüm ve 21 bağdan oluşan test ağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da genel görünümü ve bağ seyahat süreleri verilmektedir.



Şekil 6: Test ağının görünümü ve bağ seyahat süreleri (dk.).

Tablo 2: Test ağındaki koordinatlar.

Düğüm No	X	Y	Düğüm No	X	Y	Düğüm No	X	Y
1	1	9	6	4.6	6	11	3.8	2.25
2	3	8	7	7	4.5	12	1.3	3.5
3	4.5	7.75	8	5.5	5	13	5.25	1
4	2.75	6.2	9	8.5	6.8	14	6.7	1.75
5	0.8	6.6	10	5.8	2.25	15	6.75	5.8

Tablo 3: Test ağındaki B-V talebi (yolcu/2 sa.).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	--	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
2	400	--	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
3	200	50	--	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
4	60	120	40	--	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
5	80	20	60	50	--	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
6	150	180	180	100	50	--	100	100	30	880	60	15	15	10	0
7	75	90	90	50	25	100	--	50	15	440	35	10	10	5	0
8	75	90	90	50	25	100	50	--	15	440	35	10	10	5	0
9	30	15	15	15	10	30	15	15	--	140	20	5	0	0	0
10	160	130	45	240	120	880	440	440	140	--	600	250	500	200	0
11	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	--	75	95	15	0
12	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	--	70	0	0
13	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	--	45	0
14	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	--	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--

Sefer sıklığı ve kalkış ötelemesi hesapları, Mumford [23] tarafından önerilen 8 otobüs güzergâhı için yapılmıştır. Bu güzergâhlar Tablo 4'te verilmiştir.

Test ağının çözümünde, Tablo 4'te verilen güzergâhlardaki sefer aralığı değerleri için alt sınır 5 dk. üst sınır 30 dk. olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, her bir otobüs güzergâhı için 26 farklı sefer aralığı seçeneği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4: Toplu taşıma ağı.

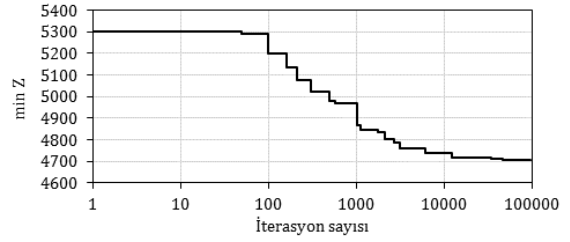
Güzergâh No	Durak Sıralaması
1	1-2-3-6-15-7-10-13
2	9-15-8-6-3-2-5-4
3	15-7-10-14-13-11-12-4
4	1-2-4-6-8-15-7-10
5	13-11-10-8-6-3-2-1
6	1-2-5-4-12-11-13-14
7	11-13-14-10-8-6-4-5
8	9-15-7-10-11-12-4-5

Dolayısıyla, global optimum sonucun, 26<sup>8</sup> adet olası çözümden oluşan bir çözüm uzayından seçilmesi gerekmektedir. Anılan büyüklüğe sahip bir çözüm uzayı içerisinde sezgisel bir yöntemle yapılacak olan bir aramanın yüksek kapasiteli bir işlemci kapasitesi ile de olsa oldukça uzun çözüm zamanı gerektireceği dikkate alınarak, geliştirilen modelin yakınsama kabiliyetinin algoritma parametrelerine olan duyarlılığını ortaya koymak amacıyla bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, farklı armoni belleği büyüklükleri ve armoni araştırması parametreleri için 27 farklı veri seti oluşturulmuştur. Duyarlılık analizleri için sefer araklarının alt limiti 7 dk. üst limiti 10 dk. olarak tanımlanmıştır. Söz konusu limit değerleri için 4<sup>8</sup>=65,536 çözüm olasılığı mevcut olup bu olasılıkların hepsi duyarlılık analizinden önce listelenerek çözümlenmiştir. Kapasite kısıtlarının da sağlandığı optimum çözüm 5609.26 olarak hesaplanmıştır. Arından, 27 farklı veri seti için model çözümleri gerçekleştirilmiş ve tüm veri setleri için optimum çözüm elde edilmiştir. Analizlerde otobüslerin 70 yolcu kapasiteli olduğu kabul edilmiştir. Anılan veri setleri, optimum çözümün bulunması için gerek duyulan iterasyon sayılarına göre en iyiden en kötüye doğru Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Duyarlılık analizi sonuçları.

Sıra	HMS	HMCR	PAR	İtresasyon Sayısı	Amaç Fonk. Değeri
1	30	0.85	0.50	191	5609.26
2	20	0.90	0.30	213	5609.26
3	20	0.85	0.30	304	5609.26
4	30	0.95	0.30	310	5609.26
5	30	0.95	0.50	349	5609.26
6	20	0.85	0.50	376	5609.26
7	20	0.95	0.50	435	5609.26
8	30	0.85	0.40	498	5609.26
9	40	0.90	0.30	642	5609.26
10	40	0.90	0.50	661	5609.26
11	30	0.95	0.40	784	5609.26
12	30	0.90	0.40	1137	5609.26
13	20	0.90	0.40	1345	5609.26
14	20	0.95	0.30	1775	5609.26
15	30	0.85	0.30	1972	5609.26
16	20	0.90	0.50	2006	5609.26
17	40	0.85	0.30	2034	5609.26
18	30	0.90	0.50	2138	5609.26
19	30	0.90	0.30	2684	5609.26
20	20	0.85	0.40	2795	5609.26
21	40	0.85	0.40	3477	5609.26
22	20	0.95	0.40	4345	5609.26
23	40	0.85	0.50	5064	5609.26
24	40	0.95	0.40	8002	5609.26
25	40	0.95	0.50	8888	5609.26
26	40	0.90	0.40	15179	5609.26
27	40	0.95	0.30	16059	5609.26

Tablo 5 incelendiğinde, HMS, HMCR ve PAR değişkenlerinin sırasıyla 30, 0.85 ve 0.50 olduğu veri seti için en düşük iterasyon sayısı ile optimum çözüm elde edilmiştir. Bu nedenle, çalışma ağının 5 dk. ile 30 dk. limitleri arasındaki sefer aralıkları için çözümü, bu veri seti için yapılmıştır. Modelde durma kriteri, ardışık 50,000 iterasyon boyunca daha iyi bir çözüm bulunamaması durumunda algoritmanın durdurulması olarak dikkate alınmıştır. Analizler 2 sa.'lik zirve periyot için gerçekleştirilmiştir. Denklem (5)'te verilen amaç fonksiyonundaki  $w_k$ ,  $y_i$  ve  $t$  ağırlık katsayıları sırasıyla 1, 1 ve 100 olarak modele dahil edilmiştir. Söz konusu parametreler için model çalıştırılmış ve elde edilen yakınsama grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Problem çözümlerinin yakınsama davranışı.

Şekil 7 incelendiğinde, modelin yaklaşık 96,000 iterasyon sonucunda durma kriterini sağladığı görülmektedir. Çözüm sonucunda amaç fonksiyonu değeri 4709.20 olarak hesaplanmış olup çalışma ağı için elde edilen sefer aralığı, sefer sayısı, güzergâhlardaki maksimum yolcu sayısı ve kapasite değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Mandl ağı için model sonuçları.

Güzergâh No	Sefer Aralığı (dk.)	Sefer Sayısı	Maksimum yolcu yükü	Kapasite
1	30	5	317	350
2	30	5	213	350
3	26	5	246	350
4	17	8	512	560
5	5	25	1674	1750
6	29	5	131	350
7	15	9	626	630
8	17	8	554	560

Tablo 6 incelendiğinde, güzergâhlardaki sefer aralıklarının kısıtlara uygun olarak elde edildiği görülmektedir. 2 sa.'lik analiz periyodu için uygulanması gereken sefer sayıları ile güzergâhlarda talep/kapasite değerlendirmesinde kullanılan maksimum yolcu yükü değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, güzergâhlarda sağlanan kapasite değerinin maksimum yük değerinin üzerinde olduğu ve modelin kapasite kısıtlarını sağladığı dikkati çekmektedir.

## 5 Sonuçlar

Literatürde otobüs sistemlerinin optimum sefer aralıklarının hesabına ilişkin çalışmalarda, toplu taşıma ataması problemi genel bir yaklaşım olarak sıklık paylaşımı yöntemine göre ele alınmaktadır. Dolayısıyla, toplu taşıma güzergâhlarındaki yolcu sayılarının, ilgili güzergâhlardaki servis sıklığı ile doğru orantılı olduğu varsayımı kullanılmaktadır. Bu noktada, kullanıcıların seyahat süresine ilişkin algılama hataları ve seçimlerindeki rastgelelik göz ardı edilmektedir. Ayrıca, kullanıcıların aktarmadaki bekleme sürelerinin 5 dk. ya da sefer aralığının yarısı şeklinde sabit bir değer olarak hesaplara dahil edilmesi yaygın olarak kullanılan bir diğer yaklaşımdır. Oysa günümüzde toplu taşıma sistemlerindeki elektronik



bilgilendirme sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte kullanıcılar, toplu taşıma servislerine biniş zamanlarını ve aktarma bekleme sürelerini daha net olarak dikkate alabilmektedir.

Bu çalışmada, otobüs sefer aralıklarını belirleyen iki seviyeli bir çözüm modeli geliştirilmiştir. Üst seviyede işletmeci ve kullanıcı maliyetlerini temsil eden bir amaç fonksiyonu geliştirilmiş ve çözüm için sezgisel AA tekniği tabanlı bir model önerilmiştir. Güzergâh seçimi ile aktarma bekleme sürelerinin kesin hesabı için zaman çizelgesi tabanlı toplu taşıma ataması yaklaşımı kullanılmıştır. Önerilen modelde otobüslerin duraklara kesin varış süreleri dikkate alınmakta ve dolayısıyla kullanıcıların aktarmalardaki bekleme süreleri daha gerçekçi olarak hesaplanmaktadır. Toplu taşıma ataması problemi logit tabanlı bir modele dayalı olarak VISUM yazılımı ile çözülmüştür. Sonuçlar, AA tabanlı modelin sefer aralığı optimizasyonu probleminin çözümünde etkin olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Kullanıcıların duraklardaki iniş-biniş sürelerinin otobüs güzergâhlarındaki seyahat süresi üzerindeki etkisi çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Gelecek çalışmalarda, önerilen modelin bu etkiyi de göz önünde bulundurarak geliştirilmesi ve gerçek veriler ile orta-büyük ölçekli toplu taşıma ağlarında filo kısıtı altında uygulanabilirliğinin sınanması planlanmaktadır. Ayrıca, otobüslerin başlangıç durağından hareket zamanlarının da optimizasyon problemine yeni bir karar değişkeni olarak eklenmesiyle, başlangıç kaydırması (offset) parametresinin kullanıcı ve işletmeci açısından yaratacağı faydaların değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

## 6 Teşekkür

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen 2017FEBE030 no.lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, VISUM akademik lisans desteği vererek bu çalışmaya katkıda bulunan PTV Planung Transport Verkehr AG'ye teşekkürlerini sunar.

## 7 Kaynaklar

- [1] IEA. *Transport, Energy and CO2: Moving Towards Sustainability*. Paris, France, International Energy Agency, 2009.
- [2] Nesheli MM, Ceder A, Ghavamirad F, Thacker S. "Environmental Impacts of Public Transport Systems Using Real-Time Control Method". *Transportation Research Part D*, 51, 216-226, 2017.
- [3] Behrens A, Egenhofer C. *Rethinking European Climate Change Policy*. Editors: Birchfield VL, Duffield JS. Toward a Common European Union Energy Policy. 217-234, New York, USA, Palgrave Macmillan Press, 2011.
- [4] Potter S, *Transport >Energy and Emissions: Urban Public Transport*. Editors: Hensher DA, Button KJ. Handbook of Transport and the Environment. 247-262, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Press, 2003.
- [5] Pucher J, Korattyswaroopam N. "The crisis of public transport in India: Overwhelming needs but limited resources". *Journal of Public Transportation*, 7(4), 1-20, 2004.
- [6] Mashiri MAM, Moeketsi PN, Baloyi V. "Increasing public transport market share in South Africa: The options". *International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport*, Cape Town, South Africa, 19-23 September 1999.
- [7] Finn B, Mulley C. "Urban Bus services in developing countries and countries in transition: a framework for regulatory and institutional developments". *Journal of Public Transportation*, 14(4), 89-107, 2011.
- [8] British Youth Council. "Public Transport & Young People In Suffolk: Youth Parliament Report". London, England, 2012.
- [9] Texas Transportation Institute. "Transit Capacity and Quality of Service Manual-Part 2". Texas, USA, 1999.
- [10] Gulhan G, Ceylan H, Baskan O, Ceylan, H. "Using potential accessibility measure for urban public transportation planning: A case study of Denizli, Turkey". *Promet Traffic & Transportation*, 26(2), 129-137, 2013.
- [11] Verbas İÖ, Mahmassani HS. "Exploring trade-offs in frequency allocation in a transit network using bus route patterns: Methodology and application to large-scale urban systems". *Transportation Research Part B*, 81(2), 577-595, 2015.
- [12] Scheele S. "A supply model for public transit services". *Transportation Research Part B*, 14(1-2), 133-146, 1980.
- [13] Furth PG, Wilson NHM. "Setting frequencies on bus routes: theory and practice". *Transportation Research Record*, 818, 1-7, 1981.
- [14] Lampkin W, Saalmans PD. "The design of routes, service frequencies and schedules for a municipal bus undertaking: a case study". *Operational Research Society*, 18(4), 375-397, 1967.
- [15] Rea JC. "Designing urban transit systems: an approach to the route technology selection problem". *51st Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, USA, 1972.
- [16] Silman LA, Barzily Z, Passy U. "Planning the route system for urban busses". *Computers & Operations Research*, 1(2), 201-211, 1974.
- [17] Dubois D, Bel G, Llibre M. "A set of methods in transportation network synthesis and analysis". *The Journal of the Operational Research Society*, 30(9), 797-808, 1979.
- [18] Baaj MH, Mahmassani HS. "An AI-based approach for transit route system planning and design". *Journal of Advanced Transportation*, 25(2), 187-209, 1991.
- [19] Shih M, Mahmassani HS. "A Design Methodology for Bus Transit Networks with Coordinated Operations". Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Texas, USA, Research Report, 60016-1, 1994.
- [20] Chakroborty P, Dwivedi T. "Optimal route network design for transit system using genetic algorithms". *Engineering Optimization*, 34(1), 83-100, 2002.
- [21] Kidwai FA, Marwah BR, Deb K, Karim MR. "A genetic algorithm based bus scheduling model for transit network". *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 477-489, 2005.
- [22] Afandizadeh S, Khaksar H, Kalantari N. "Bus fleet optimization using genetic algorithm a case study of Mashhad". *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 43-52, 2013.
- [23] Mumford CL. "New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem". *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Cancún, México, 20-23 June 2013
- [24] Nikolic M, Teodorovic D. "A simultaneous transit network design and frequency settings: computing with bees". *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7200-7209, 2014.

- [25] Gunby H, Gustavsen S. A Combined Swarm System for the Urban Transit Routing Problem. Msc Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Computer and Information Science, Oslo, Norway, 2015.
- [26] Doğan G, Özuysal M. "Toplu ulaşımda bekleme süresini etkileyen faktörlerin incelenmesi: güvenilirlik, yolcu bilgilendirme sistemi ve fiziksel koşullar". *İMO Teknik Dergi*, 481, 927-7954, 2017.
- [27] Özuysal M, Çalışkanelli SP, Tanyel S. "Otobüs duraklarındaki yolcu iniş-biniş zamanları üzerine bir tartışma". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 460-467, 2016.
- [28] PTV Group. "PTV Visum FAQs, COM & Add-In". <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/training-support/support/ptv-visum/faqs/> (28.01.2018).
- [29] Mandl CE. "Evaluation and optimization of the urban public transportation networks". *European Journal of the Operational Research*, 5(6), 396-404, 1979.
- [30] PTV Group. "VISUM-Fundamentals". PTV Traffic Mobility Logistics, Karlsruhe, Germany, 2011.
- [31] Erol D, Ceylan H. "Toplu taşımada minibüsten otobüse geçişin konfor ve çevre açısından değerlendirilmesi". *11. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-29 Mayıs, 2015.
- [32] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search". *Simulation*, 76(2), 60-68, 2001.
- [33] Geem ZW, Lee KS, Park Y. "Application of harmony search to vehicle routing". *American Journal of Applied Sciences*, 2(12), 1552-1557, 2005.
- [34] Ceylan H, Ceylan H. "A hybrid harmony search and TRANSYT hill climbing algorithm for signalized stochastic equilibrium transportation networks". *Transportation Research Part C*, 25, 152-167, 2012.
- [35] Ceylan H, Ceylan H. "Şehir içi karayolu ağlarının sezgisel harmoni araştırması optimizasyon yöntemi ile ayrık tasarımı". *Teknik Dergi*, 24(1), 6211-6231, 2013.
- [36] Ceylan H, Ceylan H. *Harmony Search Algorithm for Transport Energy Demand Modeling*. Editor: Geem ZW. Music-Inspired Harmony Search Algorithm, Studies in Computational Intelligence, 163-172, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009.