

# Şehiriçi Karayolu Ağlarının Sezgisel Harmoni Araştırması Optimizasyon Yöntemi ile Ayrık Tasarımı

Hüseyin CEYLAN\*

Halim CEYLAN\*\*

## ÖZ

Bu çalışmada, şehiriçi ulaştırma ağlarının ayrık tasarımı, doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama problemi olarak formülize edilmiş ve sezgisel Harmoni Araştırması (HA) optimizasyon tekniği ile çözümlenmiştir. Trafik akımlarının yol ağındaki dağılımını temsil eden trafik ataması problemi, kullanıcı dengesi yaklaşımı altında Genelleştirilmiş İndirgenmiş Gradyan (GİG) yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Ağ üzerindeki toplam seyahat süresini en aza indiren yatırım stratejisi, öngörülen yatırım bütçesi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Önerilen yöntem, literatürde sıkça kullanılan iki örnek yol ağına uygulanmıştır. Çalışmada, şehiriçi ulaştırma ağlarının ayrık tasarımında sezgisel HA tabanlı çözüm yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiş ve bu yöntem ile çözümlenen karayolu ağının sistem performansında yaklaşık %16'lık iyileşme sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ayrık ulaştırma ağ tasarımı, harmoni araştırması, genelleştirilmiş indirgenmiş gradyan yöntemi, trafik ataması, optimizasyon

## ABSTRACT

### Discrete Design of Urban Road Networks with Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm

In this study, the discrete design of urban transportation networks is formulated as a nonlinear mixed integer programming problem and solved with meta-heuristic Harmony Search (HS) optimization technique. The traffic assignment problem, which represents the distribution of the traffic flows on the road network, is solved under user equilibrium manner using Generalized Reduced Gradient (GRG) method. The investment strategy, which minimizes total travel time on the network, is determined by considering the available budget. The proposed method is applied on two well-known example road networks in the literature. Results showed that the meta-heuristic HS based solution method could effectively be used for discrete design of urban transportation networks and the

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30.01.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli - hceylan@pau.edu.tr

\*\* Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli - halimc@pau.edu.tr

system performance of the road network, which is solved with this method, is improved about 16%.

**Keywords:** Discrete transportation network design, harmony search, generalized reduced gradient method, traffic assignment, optimization

## 1. GİRİŞ

Şehiriçi karayolu ağlarında trafik sıkışıklığının azaltılması, hızla artan ve özellikle günün farklı zaman dilimlerinde büyük dalgalanmalar gösteren ulaşım talebinin karşılanabilmesi açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte, karayolu ağlarındaki iyileştirme çalışmaları büyük ekonomik yatırımlar gerektirdiğinden dolayı fayda/maliyet oranının titizlikle gözetilmesi gerekmektedir. Seyahat talebindeki artış ve dalgalanmalara cevap verebilmenin önemli yollarından biri ulaştırma ağındaki işletme koşullarının (kavşaklarda sinyalizasyon tasarımı, yatay-düşey işaretlemeler, yaya geçitleri vb.) düzenlenmesinden geçmektedir. Ancak arz-talep dengesinin, işletme koşullarının iyileştirilmesiyle sağlanamadığı durumlarda mevcut yol ağına yeni bağlar ilave edilmesi ya da mevcut bağların kapasitelerinin arttırılması kaçınılmaz hale gelebilmektedir. Özellikle şehiriçinde kentsel yapılanmanın yoğun olduğu kesimlerde mevcut yol ağına yeni bağlar eklemek, uygun alanların bulunmaması ya da istiklak bedellerinin yüksek olmasından dolayı çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Bu durumda, mevcut ağın fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi (şerit genişliklerinin arttırılması, şerit ilavelerinin yapılması, yol yüzey kaplamasının yenilenmesi vb.) en uygun çözüm olarak yerel yönetimlerin karşısına çıkmaktadır. Bu iyileştirmeleri gerçekleştirirken, bütçe kaynaklarını da göz önünde bulundurarak en faydalı yatırım stratejilerinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Belli amaçlar doğrultusunda ulaşım ağına yapılandırılması olarak tanımlanan Ulaşım Ağ Tasarımı (UAT), Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı (SUAT) ve Ayrık Ulaşım Ağ Tasarımı (AUAT) olmak üzere iki formda ele alınmaktadır. SUAT, ulaşım ağına mevcut yapısının korunduğu durumda parametre optimizasyonu konularını kapsamaktadır. AUAT ise ağına fiziksel yapısının optimizasyonunu ele almaktadır [1]. İçerdiği çok sayıda sıfır-bir değişkenlerinden dolayı AUAT problemi, günümüzde ulaştırma alanının en zor problemleri arasında yer almaktadır [2, 3]. AUAT probleminin çözümünde sistem performansının en iyilenmesi, yol ağındaki trafik hacmine bağlı toplam seyahat süresinin en aza indirgenmesi anlamına gelmektedir [4].

Bruynooghe [5], şehiriçi yol ağına gerçekleştirilmesi planlanan bağ ilave/iyileştirmeleri için bir tamsayı programlama modeli önermiştir. Bu modelde, ilave edilecek ya da iyileştirilecek bağlardan kaynaklanan yatırım maliyetleri ağıdaki toplam seyahat süresini temsil eden amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Ancak, çalışmada sayısal bir uygulamaya yer verilmemiştir. Diğer bir çalışmada Steenbrink [6], AUAT problemini tartışmış ve çözüm için kullanılan dal-sınır tekniklerini değerlendirmiştir. AUAT problemini ilk olarak ele alan araştırmacılarından bir diğeri olan LeBlanc [7] çalışmasında, tamsayı programlama problemi için geliştirdiği dal-sınır yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımda tekrarlı olarak geliştirilen çözüm ağacı, yönlendirilmiş dallarla bağlanan düğümler içermektedir. Ağdaki her düğüm noktası, problemin kısmi bir çözümünü temsil etmektedir. Olası çözüm vektörü sayısı kadar bağ elde edilene kadar yeni düğümler oluşturulmakta ve en iyi çözüme tekrarlı olarak ulaşılmaktadır. Bahsi geçen dal-sınır yaklaşımı ile ilgili detaylı bilgi LeBlanc'ın [8]

bir diğer çalışmasından bulunabilir. Poorzahedy ve Turnquist [9], AUAT probleminin çözümü için iki-seviyeli bir programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, üst seviyede yeni bağ yatırımlarına bağlı olarak toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi, alt seviyede ise sabit trafik talebi altında kullanıcı dengesi probleminin çözümü amaçlanmış ve dal-sınır yaklaşımı tabanlı bir sezgisel algoritma ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Chen ve Alfa [10], AUAT problemini logit tabanlı stokastik atama yaklaşımı ile ele almışlar ve çeşitli yol ağları için tasarım probleminin çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sürücü davranışlarındaki gelişigüzel algılama hatalarını dikkate alan Chen ve Alfa, ayrık tasarım probleminin çözümünde dal-sınır yöntemini kullanmışlardır. Sıfır-bir değişkenli optimizasyon yöntemlerinin çözümünde kullanılan dal-sınır yönteminin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları, çok sayıda karar değişkeni içeren problemler için yüksek bellek gereksinimi ve uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duyulmasıdır [11].

Gao ve diğerleri [12], geliştirdikleri iki-seviyeli yaklaşımla AUAT problemini doğrusal olmayan programlama problemine dönüştürmüşlerdir. Bu yaklaşımda kullandıkları destek fonksiyonu sayesinde, bağ trafik hacimlerindeki değişiklik ile yol ağına eklenen yeni bağlar arasındaki ilişkiyi açıklamayı hedeflemişlerdir. Diğer bir çalışmada Zhang ve Gao [13], AUAT probleminin çözümünü sezgisel parçacık-sürü optimizasyonu yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada, zirve saat trafik hacim değerlerindeki asimetriden kaynaklanan sıkışıklığının önlenmesi için yönlere göre şerit paylaşımının değiştirilmesi esas alınmıştır. Büyük ölçekli ulaştırma ağları için en uygun yatırım stratejisinin belirlenmesi oldukça büyük bir strateji kümesi içinden seçim yapılmasını gerektirmektedir. Tam sayı değişkenlerinden kaynaklanan süreksizlikten dolayı analitik yöntemlerle çözümü mümkün olmayan AUAT probleminin çözümünde sezgisel çözüm algoritmalarının kullanılması gerekmektedir [14].

Bu çalışmada, bir karayolu ağında fiziksel iyileştirmeler ve şerit ilaveleri yapmak suretiyle toplam seyahat süresini azaltarak sistem performansı en iyileyen ve sezgisel Harmoni Araştırması (HA) optimizasyon tekniği tabanlı yeni bir AUAT yaklaşımı geliştirilmiştir. Tasarım problemindeki fiziksel iyileştirme için öngörülen bütçe limiti bir ceza fonksiyonu ile probleme dahil edilmiştir. Bu sayede problem, bir kısıtsız optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Bahsi geçen fiziksel iyileştirmelerin hangi bağlarda yapılacağı sıfır-bir değişkenleri kullanılarak belirlenmiştir. Problemdeki sıfır-bir değeri alan karar değişkenlerinin süreksiz yapılarından dolayı çözüm için son yıllarda mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak uygulanmaya başlanan HA optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Verilen seyahat talepleri için sürücülerin rota seçim davranışları Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Doğrusal olmayan ve konveks yapıdaki DKD ataması probleminin çözümü, Genelleştirilmiş İndirgenmiş Gradyan (GIG) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Son yıllarda, içerdikleri matematiksel eklentilerden dolayı elektronik çalışma sayfalarının optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu yazılımların birçoğu (Lotus 1-2-3<sup>®</sup>, Quattro Pro<sup>®</sup>, Microsoft Excel<sup>®</sup>), doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabilen “Çözücü” eklentisine sahiptir [15]. Bu eklenti, türeve dayalı algoritmalar hakkında derinlemesine bilgi gerektirmeden kolaylıkla kullanılabilir [16]. GIG yöntemi tabanlı olan Çözücü, doğrusal ve doğrusal olmayan

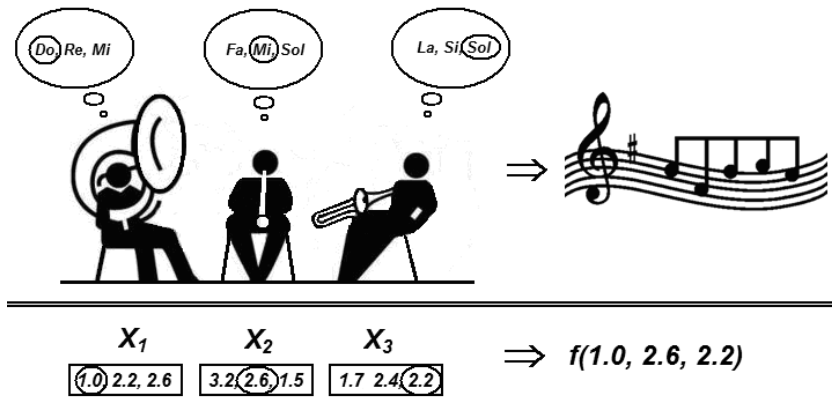
birçok optimizasyon probleminin çözümünde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır [17, 18, 19].

Önerilen yöntemin sayısal uygulamaları literatürde verilen iki karayolu ağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yol ağındaki toplam seyahat süresinin en aza indirilmesinin hedeflendiği uygulamaların birincisinde mevcut bağların iyileştirilmesi, ikincisinde ise bağlara yeni şerit ilavelerinin yapılması esas alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen HA tabanlı yeni çözüm yöntemi kullanılarak belirli bir bütçe limiti içinde mümkün olan en düşük toplam seyahat süresini veren yatırım stratejisinin başarılı bir şekilde bulunabileceğini göstermiştir. AUAT problemi, bütçe kısıtlaması nedeniyle literatürdeki farklı çalışmalarda kısıtlı optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır [2, 3, 20]. Bu çalışmada bütçe limiti, optimizasyon sürecine ceza yaklaşımı ile dahil edilerek AUAT problemi kısıtsız bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Ayrıca, konveks yapıdaki DKD probleminin çözümü için günümüzde kolaylıkla erişilebilir ofis yazılımlarının kullanımı diğer bir yenilik olarak ortaya konulmuştur.

## 2. HARMONİ ARAŞTIRMASI OPTİMİZASYON TEKNİĞİ

Sezgisel HA optimizasyon tekniği, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile harmonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır [21]. HA tekniğinde orkestra, tüm orkestra elemanlarının birbirleri ile harmonik açıdan uyumlu bir şekilde çalmaları ile en estetik melodiyi elde edebilirken optimizasyon modellerinde sonuç, amaç fonksiyonunun en iyi çözüme giderek yaklaşması ile elde edilebilmektedir.

HA tekniği günümüze kadar çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmıştır [22, 23, 24, 25, 26, 27]. Bu yöntemin başlıca avantajları: *i*) Karar değişkenleri için özel bir başlangıç çözümü tanımlanmasına gerek duyulmaması; *ii*) Birden çok çözümlerle optimizasyon işlemine devam edildiği için en iyi çözümün birden çok yönde aranması ve bu sayede yerel çözümlerden kurtulabilmesi; *iii*) Optimizasyon işleminde sürekli değişkenler kullanılabilirdiği gibi sıfır-bir değeri alan değişkenlerin de kullanılabilmesidir. Bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları melodilerle gerçek optimizasyon problemleri arasındaki bağlantının nasıl kurulacağı Şekil 1’de detaylı olarak verilmiştir [28].



Şekil 1 - HA ile gerçek optimizasyon problemleri arasındaki bağlantı.

Farklı enstrümanlar ile çalınan nota ve tonların estetik kalitesi, müzik çalışmalarında pratik yaparak iyileştirilirken, fonksiyon çözümünde bu iyileştirme birbirini takip eden iterasyonlarla gerçekleştirilmektedir [24]. HA süreci 5 adımdan oluşmaktadır:

*Adım 1: Problemin kurulması ve algoritma parametrelerinin tanımlanması*

Bu adımda, optimizasyon problemi aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$z = \min F(x) \quad x_i \in \mathbf{X}_i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

Burada, herhangi bir  $F(x)$  amaç fonksiyonu,  $x_i$  karar değişkenleri (orkestradaki enstrümanları),  $\mathbf{X}_i$  her karar değişkeni için kullanılan çözüm uzayı ve  $N$  ise toplam karar değişkeni sayısı (orkestra büyüklüğü) olarak tanımlanır. HA çözüm sürecini kontrol eden 3 farklı parametre mevcuttur. Bunlar sırasıyla, çözüm vektörü sayısını gösteren harmoni belleği kapasitesi (Harmony Memory Size, HMS), harmoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate, HMCR) ve ton ayarlama oranıdır (Pitch Adjusting Rate, PAR).

*Adım 2: Harmoni belleğinin oluşturulması*

Harmoni belleği, tüm çözüm vektörlerinin ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin saklandığı bellektir. Fonksiyon değerleri sayesinde, ilgili çözüm vektörlerinin kalitesi değerlendirilmektedir. HA tekniğinde çözüm için, Genetik Algoritmalar (GA) tekniğine benzer şekilde, aynı anda birçok çözüm vektörü araştırılmaktadır. Ancak, HA ile bir iterasyonun tamamlanması GA'ya göre daha hızlıdır [29]. Bu adımda, harmoni belleği matrisi, rastgele üretilen çözüm vektörleri ile doldurulur ve bu vektörler için ilgili amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

*Adım 3: Yeni harmoninin oluşturulması*

Bu adımda, yeni harmoni vektörü  $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N)$ , harmoni belleğinde bulunan tonlara göre ve tamamen rastgele seçilen tonlara göre üretilmektedir. Değişkenlerin harmoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, değeri 0 ile 1 arasında değişen HMCR oranına göre yapılmaktadır. Burada HMCR, bir karar değişken değerinin harmoni belleğinden seçilme oranını gösterirken,  $(1-HMCR)$  bu değer için olası çözüm uzayı içerisinde rastgele seçilmesine karşılık gelmektedir.

Bu aşamadan sonra, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığının belirlenmesi için her karar değişkeninin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu işlem, değeri 0 ile 1 arasında değişen PAR parametresi ile yapılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, HMCR ve PAR parametrelerinin, algoritmanın performansında tetikleyici rol almasıdır [20]. HMS, HMCR ve PAR parametreleri için sırasıyla 0.7-0.95, 0.2-0.5 ve 10-50 aralığındaki değerlerin seçilmesi önerilmektedir [29].

*Adım 4: Harmoni belleğinin güncellenmesi*

Yeni harmoni vektörü bellek içindeki en kötü vektörden daha iyi bir sonuç veriyorsa belleğe dahil edilir ve en kötü vektör bellekten çıkarılır.

*Adım 5: Durma kriterinin kontrolü*

Bu adımda verilen durma koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Koşulun sağlanmaması durumunda, 3. ve 5. adımlar arasındaki işlemler istenen koşul sağlanıncaya kadar tekrarlanır.

### 3. PROBLEM FORMÜLASYONU

AUAT formülasyonlarında kullanılan genel parametreler bu kısımda verilmiş olup, problemlere özel parametrelerin tanımları alt bölümlerde ve sonuçlar bölümünden sonra yapılmıştır.

$n+m$  adet bağ ve  $N$  adet düğümden oluşan bir yol ağında iyileştirmeye aday olmayan bağ sayısı  $n$ , iyileştirmeye aday bağların sayısı  $m$  ile gösterilsin. Tasarım esnasında herhangi bir bağda iyileştirme yapılıp yapılmayacağına karar  $u_i$  sıfır-bir değişkeni verilsin. Bu durumda eğer  $i$  bağı iyileştirilecekse  $u_i=1$  aksi halde  $u_i=0$  olsun.  $m$  adet iyileştirilmeye aday bağ için mevcut bağ parametre vektörleri sırasıyla  $a_i = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  ve  $b_i = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ , iyileştirme sonrasında ortaya çıkacak bağ parametre vektörleri de sırasıyla  $a_i^* = \{a_1^*, a_2^*, \dots, a_m^*\}$  ve  $b_i^* = \{b_1^*, b_2^*, \dots, b_m^*\}$  olsun. Bu parametrelerden hangilerinin seçileceği  $\hat{a}_i$  ve  $\hat{b}_i$  değişkenleri ile gösterilsin. Eğer  $u_i=1$  ise,  $\hat{a}_i = a_i^*$ , aksi halde  $\hat{a}_i = a_i$  olsun. Trafik bileşenleri ile ilgili olarak ise bağ trafik hacimleri  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_{n+m}\}$  kümesi,  $i$  bağındaki ortalama ve toplam seyahat süreleri de sırasıyla  $A_i(x_i)$  ve  $T_i(x_i)$  ile gösterilsin. Son olarak, aday bağlar için iyileştirme maliyetleri  $c = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  kümesiyle ve iyileştirmeler için harcanması planlanan bütçe limiti  $F$  ile gösterilsin.

#### 3.1. Deterministik Kullanıcı Denge Ataması

Bir yol ağındaki bağlar üzerinde seyahat eden trafik hacmini kestirebilmek için sürücü davranışları ile ilgili kabullerin öncelikle tanımlanması gerekmektedir. Ulaştırma ağlarının tasarımında atama probleminin çözümü için sıkça kullanılan kabullerden biri DKD yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, yol ağında belli bir Başlangıç-Variş (B-V) çifti arasında seyahat eden tüm sürücüler için seyahat süresinin eşit olduğu varsayımına dayanmaktadır [30]. Eğer yol ağındaki  $1, 2, \dots, p$  düğümlerinin başlangıç ve/veya varışları temsil ettiği düşünülürse ağdaki ortalama seyahat süresinin en aza indirilmesi olan DKD problemi:

$$x_i = \sum_{s=1}^{s=p} x_i^s \quad (i = 1, 2, \dots, n + m) \quad (2)$$

$$x_i^s \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n + m, s = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$$D(j,s) + \sum_{i \in Z(j)} x_i^s = \sum_{k \in Y(j)} x_k^s \quad (i = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, p, j \neq s) \quad (4)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\min \sum_{i=1}^{n+m} \int_0^{x_i} A_i(t) dt \quad (5)$$

şeklinde [31].

### 3.2. Sistem Performans Optimizasyonu

Yol ağındaki toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi,

$$\sum_{i=1}^m u_i c_i \leq F \quad (6)$$

kısıtına bağlı olarak,

$$\min T_i(x_i) \quad (7)$$

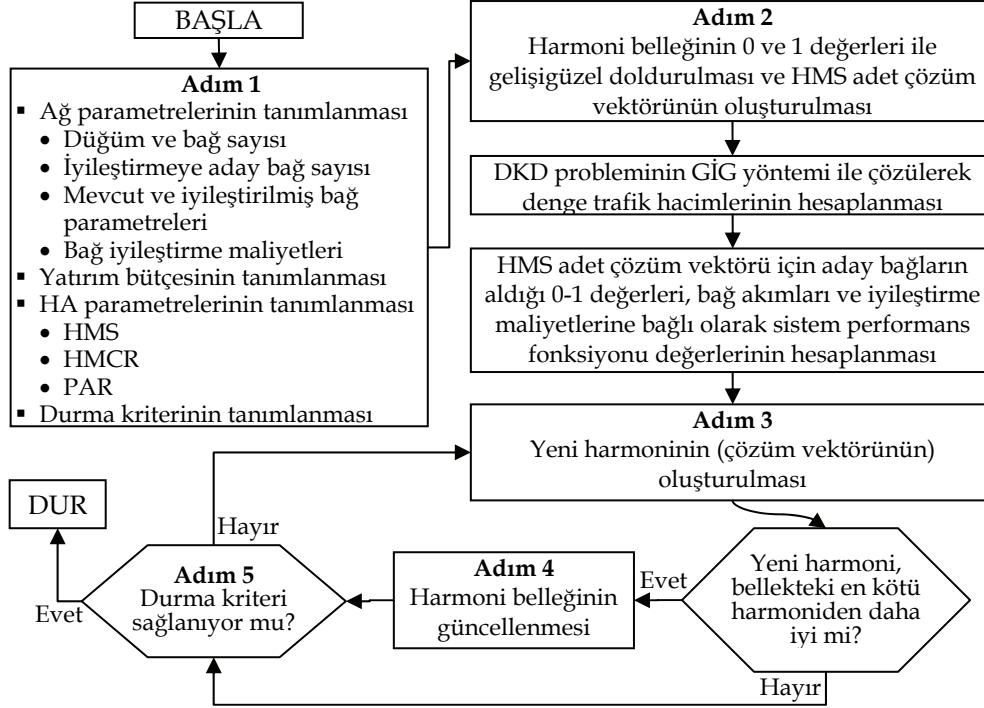
şeklinde ifade edilebilir. (6) nolu bağıntıda verilen eşitsizlik kısıtı iyileştirilecek bağlar için yapılacak yatırımın bütçe limitine eşit ya da daha az olması gerektiğini ifade etmektedir.

### 3.3. Önerilen Çözüm Yöntemi

AUAT probleminin çözümü için geliştirilen yöntemin akış diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2’den görülebileceği gibi, önerilen çözüm yönteminde, yol ağı karakteristikleri, iyileştirme maliyetleri, öngörülen toplam bütçe ve HA parametreleri öncelikle tanımlanır. Daha sonra farklı yatırım stratejileri içeren harmoni belleği gelişigüzel oluşturulur ve harmoni belleğindeki her bir çözüm vektörü için trafik atama problemi GİG yöntemiyle çözülür. Bu yöntemde öncelikle karar vektörüne ait bir başlangıç noktası için amaç fonksiyonu ve türevler hesaplanır. Daha sonra, hesaplanan türevler yardımıyla sağlanan bir arama yönü kullanılarak daha iyi bir sonuç aranır.

Bu çalışmada GİG yönteminin DKD ataması problemine uygulanması Microsoft Excel® Çözücü eklentisi ile yapılmıştır. Çözücü, arama yönünün belirlenmesi amacıyla quasi-Newton yöntemini kullanmakta olup karar değişkenlerinin kısmi türevlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yerine optimizasyon sürecinde ileri ya da merkezi fark yaklaşımlarının kullanımı Çözücü kullanımının başlıca avantajı olarak sayılabilmektedir [32].



Şekil 2 - Önerilen çözüm yönteminin akış diyagramı

Hesaplanan denge trafik hacimlerine bağlı olarak (7) nolu bağıntıda verilen sistem amaç fonksiyonu bellekteki her bir çözüm vektörü için hesaplanır. Üçüncü adımda, HA tekniği ile yeni bir çözüm vektörü oluşturulur ve ilgili amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Yeni çözüm vektörünün, bellekteki en kötü çözüm vektöründen iyi olması durumunda belleğe dahil edilmesi işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamadan sonra toplam ulaşım ağı seyahat süresi en iyilenene kadar HA prosedürü devam ettirilir. *Durma kriteri* sağlandığında, sistem maliyetini en aza indiren ağ yapılandırması rapor edilir ve AUAT problemi çözülmüş olur. Bu çalışmada durma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır.

Ancak bu noktada belirtilmelidir ki, karayolu ağlarında gerçekleştirilen kapasite artırımları, toplam seyahat süresinin artmasına ve sistem performansının azalmasına neden olabilmektedir [33]. Braess paradoksu olarak bilinen bu durum, kullanıcı denge ataması problemi ile sistem en iyileme probleminin ardışık olarak çözülmesi durumunda ortaya çıkabilmektedir [4, 7, 34]. Bu paradoks, sürücülerin kendi seyahat sürelerini iyileştirmek için güzergah seçimlerini sürekli değiştirme eğiliminde olmalarından kaynaklanmaktadır [30]. Önerilen çözüm yönteminin temel prensibi, tasarım probleminin parametrelerini seçmek ve kullanıcı dengesini çözerek toplam seyahat süresi değerini en aza indirmektedir. Bu yaklaşım ile optimizasyon sürecinde Braess paradoksuna yakalanma olasılığı ortadan kaldırılmış olmaktadır [35, 36, 37, 38].

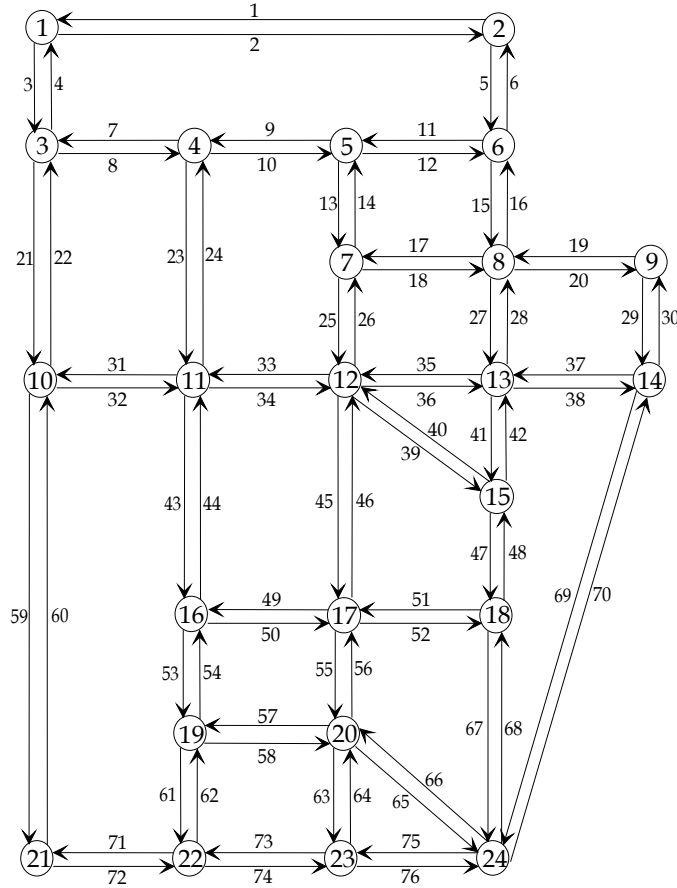


#### 4. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde, AUAT probleminin çözümü için geliştirilen çözüm yönteminin etkinliğini ortaya koymak amacıyla iki sayısal uygulama verilmiştir. Bunlardan birincisi, literatürde çözümü gerçekleştirilmiş Sioux-Falls karayolu ağı problemidir [7, 12]. Çözüm sonucu bilinen bu problem, bu çalışmada geliştirilen çözüm yönteminin etkinliğini ortaya koymak amacıyla seçilmiştir. İkinci sayısal uygulama ise Nguyen-Dupuis [39] test ağı uygulaması olup, yol ağındaki tüm bağların iyileştirmeye aday olması açısından daha büyük ölçekli ve saha uygulamasına daha yakın bir AUAT problemini temsil etmektedir.

##### 4.1. Sioux-Falls Karayolu Ağı Uygulaması

Amerika Birleşik Devletleri, Güney Dakota Eyaleti'nin Sioux-Falls şehrinin orijinal yol ağını temsil eden bu ağda toplam 24 düğüm ve 76 bağ bulunmaktadır. Yol ağının yapısı, yönlendirilmiş bağlar, düğüm ve bağ numaraları Şekil 3'te görülmektedir. Tablo 1'de düğümler arası seyahat talepleri verilmektedir.



Şekil 3 - Sioux-Falls yol ağı

*Şehirçi Karayolu Ağlarının Sezgisel Harmoni Araştırması Optimizasyon ...*

5 adet iyileştirme projesinin bulunduğu yol ağı için Tablo 2 ve Tablo 3'te sırasıyla bağlara ait mevcut ve yeni parametreler verilmektedir. Ayrıca Tablo 3'te, 5 projenin uygulanması durumunda yapılacak harcamalar da görülmektedir. Bu iyileştirme çalışması için 3,000,000 \$'lık yatırım bütçesi öngörülmektedir.

*Tablo 1 - Döğümler arasındaki seyahat matrisi (1000 taşıt/gün)*

Başlangıç düğümleri	Varış düğümleri																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1
2	1	0	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0
3	1	1	0	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0
4	5	2	2	0	5	4	4	7	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2
5	2	1	1	5	0	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0
6	3	4	3	4	2	0	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1
7	5	2	1	4	2	4	0	10	6	19	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1
8	8	4	2	7	5	8	10	0	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2
9	5	2	1	7	8	4	6	8	0	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2
10	13	6	3	12	10	8	19	16	28	0	40	20	19	21	40	44	39	7	18	25	12	26	18	8
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	0	14	10	16	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	0	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	0	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	8
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	0	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	0	12	15	2	8	11	8	26	10	4
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	0	28	5	13	16	6	12	5	3
17	4	2	1	5	2	5	10	14	9	39	10	6	5	7	15	28	0	6	17	17	6	17	6	3
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	0	3	4	1	3	1	0
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	3	8	13	17	3	0	12	4	12	3	1
20	3	1	0	3	1	3	5	9	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	0	12	24	7	4
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	6	1	4	12	0	18	7	5
22	4	1	1	4	2	2	5	5	7	26	11	7	13	12	26	12	17	3	12	24	18	0	21	11
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	7	21	0	7
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	3	0	1	4	5	11	7	0

Tablo 2 - Çalışma ağına ait bağ parametreleri

Bağlar	$a$	$b$	Bağlar	$a$	$b$
	(100 saat)	$\left(\frac{100 \text{ saat}}{(1000 \text{ taşıt/gün})^4}\right)$		(100 saat)	$\left(\frac{100 \text{ saat}}{(1000 \text{ taşıt/gün})^4}\right)$
1, 2	6	$2.0 \times 10^{-06}$	39, 40	8	$1.9 \times 10^{-03}$
3, 4	4	$2.0 \times 10^{-06}$	41, 42	2	$4.0 \times 10^{-04}$
5, 6	5	$1.2 \times 10^{-03}$	43, 44	4	$1.1 \times 10^{-03}$
7, 8	4	$7.0 \times 10^{-06}$	45, 46	6	$2.7 \times 10^{-05}$
9, 10	2	$3.0 \times 10^{-06}$	47, 48	2	$5.5 \times 10^{-04}$
11, 12	4	$1.0 \times 10^{-03}$	49, 50	5	$1.1 \times 10^{-03}$
13, 14	5	$7.5 \times 10^{-05}$	51, 52	4	$1.0 \times 10^{-05}$
15, 16	2	$5.2 \times 10^{-04}$	53, 54	4	$1.0 \times 10^{-03}$
17, 18	10	$2.3 \times 10^{-03}$	55, 56	4	$5.3 \times 10^{-05}$
19, 20	3	$1.2 \times 10^{-04}$	57, 58	4	$9.6 \times 10^{-04}$
21, 22	4	$2.0 \times 10^{-06}$	59, 60	3	$1.0 \times 10^{-06}$
23, 24	6	$1.6 \times 10^{-03}$	61, 62	2	$4.5 \times 10^{-04}$
25, 26	3	$1.2 \times 10^{-05}$	63, 64	2	$4.0 \times 10^{-04}$
27, 28	5	$1.2 \times 10^{-03}$	65, 66	5	$1.1 \times 10^{-03}$
29, 30	2	$1.0 \times 10^{-06}$	67, 68	4	$9.6 \times 10^{-04}$
31, 32	6	$1.6 \times 10^{-03}$	69, 70	4	$2.0 \times 10^{-06}$
33, 34	5	$7.5 \times 10^{-05}$	71, 72	4	$8.9 \times 10^{-04}$
35, 36	5	$1.1 \times 10^{-03}$	73, 74	3	$7.9 \times 10^{-04}$
37, 38	3	$3.0 \times 10^{-06}$	75, 76	6	$1.4 \times 10^{-03}$

Tablo 3 - Önerilen ağ iyileştirmeleri ve maliyetler

Proje No.	Maliyetler	Bağlar	$a^*$	$b^*$
	(\$)		(100 saat)	$\left(\frac{100 \text{ saat}}{(1000 \text{ taşıt/gün})^4}\right)$
1	650,000	15, 16	1.3	$1.6 \times 10^{-04}$
2	625,000	25, 26	1.6	$3.7 \times 10^{-06}$
3	850,000	71, 72	2.2	$2.7 \times 10^{-05}$
4	1,200,000	35, 36	2.7	$3.2 \times 10^{-04}$
5	1 000 000	19, 20	1.5	$3.6 \times 10^{-05}$

Öngörülen projeler için 5 adet sıfır-bir değişkeni ( $u_i$ ), 76 sürekli bağ akım değişkeni ( $x_i$ ),  $76 \times 24 = 1824$  bağlardan düğümlere olan sürekli akım değişken ( $x_i^s$ ) ve  $2^5 = 32$  farklı yatırım stratejisi söz konusudur. Ayrıca atama problemi, 76 tanımsal,  $76 \times 24 = 1824$  pozitiflik ve 552 akım korunum kısıtı içermektedir. Her proje, var olan iki yönlü bir bağın iyileştirilmesini (şerit genişletmesi, yüzey yenilemesi vb.) kapsamaktadır. Problemden, denge trafik hacimlerinin elde edilmesinde kullanılan ve Amerika Birleşik Devletleri Karayolları Dairesi tarafından geliştirilen ortalama seyahat süresi fonksiyonu,

$$A_i(x_i) = a_i + b_i(x_i)^4 \quad (8)$$

şeklinde. Bu fonksiyona (5) nolu denklemdeki dönüşüm uygulandığında aşağıda verilen bağıntı elde edilir;

$$\min A(x_i) = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \frac{b_i(x_i)^5}{5} + \sum_{i=n+1}^{n+m} \hat{a}_i x_i + \frac{\hat{b}_i(x_i)^5}{5} \quad (9)$$

Burada,  $x_i^s$ ,  $i$  bağı boyunca  $s$  varışına seyahat eden trafik hacmi,  $D(j,s)$ ,  $j$  düğümünden  $s$  düğümüne seyahat eden toplam trafik hacmidir.  $Y(j)$ ,  $j$  düğümünden çıkan bağların girdiği düğümler seti,  $Z(j)$  ise  $j$  düğümüne giren bağların çıktığı düğümler setidir. Yol ağındaki herhangi bir  $i$  bağındaki seyahat süresi bağıntısı,

$$T_i(x_i) = a_i x_i + b_i(x_i)^5 \quad (10)$$

şeklinde. Bu bağıntıdan yola çıkarak yol ağındaki toplam seyahat süresinin en iyilenmesinde kullanılan amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

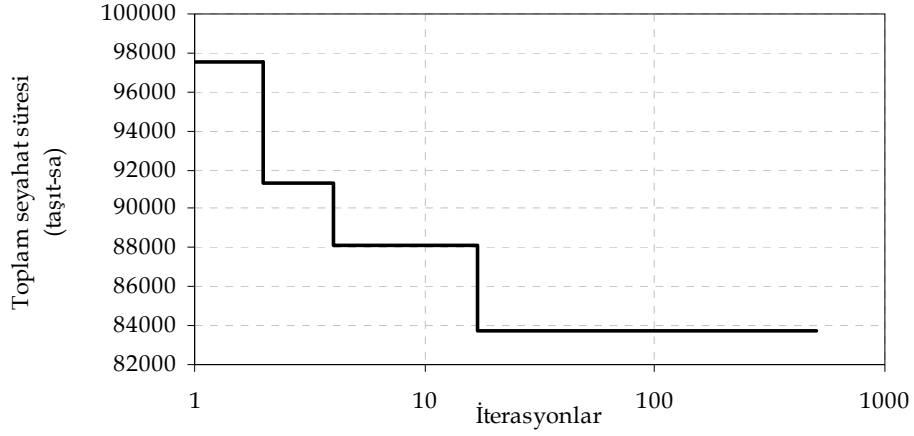
$$\min T(x, c) = \left( \sum_{i=1}^n a_i x_i + b_i(x_i)^5 \right) + \left( \sum_{i=n+1}^{n+m} \hat{a}_i x_i + \hat{b}_i(x_i)^5 \right) + P(c) \quad (11)$$

Burada  $P(c)$ , seçilen yatırım stratejisi için öngörülen maksimum yatırım bütçesinin aşılması durumunda amaç fonksiyonuna uygulanacak olan ceza fonksiyonu olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P(c) = \begin{cases} \sum_{i=1}^m u_i c_i & \text{eğer } \sum_{i=1}^m u_i c_i > F \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } \sum_{i=1}^m u_i c_i \leq F \text{ ise} \end{cases} \quad (12)$$

(12) nolu bağıntı incelendiğinde, iyileştirilmesi planlanan bağlar için yapılacak toplam harcamanın bütçe kısıtını aşmaması durumunda amaç fonksiyonuna etkiyecek ceza değeri sıfır olacaktır. Sioux-Falls ağına ilişkin problemin çözümünde HA parametreleri olan HMS, HMCR ve PAR sırasıyla 20, 0.80 ve 0.40 olarak alınmıştır. Durma koşulu olarak maksimum iterasyon sayısı 500 kabul edildiğinde yapılan analizler sonucunda en iyi çözüm

vektörü (1, 0, 1, 1, 0) olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, 2700000 \$'lık yatırım bedeli ile 1, 3 ve 4 nolu projelerin gerçekleştirilmesi durumunda en düşük ağ toplam seyahat süresi değerine ulaşılacağını göstermektedir. 17 iterasyon sonucunda en iyi amaç fonksiyonu değeri yaklaşık 83700 taşıt-saat olarak hesaplanmış ve çözümün yakınsama grafiği logaritmik eksenle Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4 - Toplam seyahat süresinin değişimi

Elde edilen sonuç, 32 alternatiflik çözüm uzayı içerisindeki en iyi değerdir [7, 12]. Çözümün HA yönteminde kullanılan parametrelere duyarlılığını görebilmek için bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için HMS, HMCR ve PAR parametrelerinin birbirinden farklı değerleri için optimizasyon işlemi 12 kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4 - Duyarlılık analizi parametreleri ve sonuçları

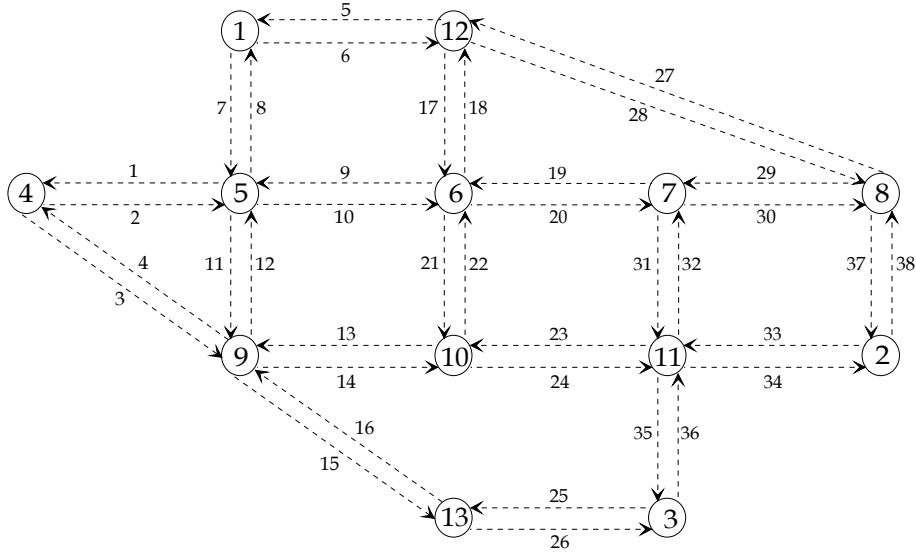
HMS	HMCR	PAR	İterasyon sayısı	HMS	HMCR	PAR	İterasyon sayısı	HMS	HMCR	PAR	İterasyon sayısı
10	0.80	0.30	19	20	0.80	0.30	100	30	0.80	0.30	63
		0.40	29			0.40	17			0.40	57
	0.90	0.30	46		0.90	0.30	12		0.90	0.30	110
		0.40	20			0.40	82			0.40	79

Tablo 4 incelendiğinde, geliştirilen çözüm yöntemiyle 12 farklı parametre seti için yapılan analizlerin tamamında en iyi çözümün elde edildiği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, farklı parametre setlerinin çözüm için gereken iterasyon sayıları üzerinde oldukça etkili olduğudur. Problemin çözümü HMS, HMCR ve PAR parametrelerinin 20, 0.90 ve 0.30 değerleri için 12 iterasyonda gerçekleşirken, aynı çözüm bu parametrelerin 30, 0.90 ve 0.30 alınması durumunda 110 iterasyon sonucunda elde edilmektedir. Bu durum, sezgisel HA optimizasyon yönteminin parametre duyarlılığının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Duyarlılık analizinde ortaya çıkan çözüm için gerekli iterasyon sayılarındaki farklılık önerilen yöntemin HA parametrelerine olan duyarlılığını ortaya koymuştur. GA'lardaki toplum büyüklüğü, mutasyon ve çaprazlama oranları ya da parçacık sürü optimizasyonu yönteminin parçacık sayısı, boyutu ve aralığı gibi parametrelere duyarlılıkları göz önüne alındığında bu durum sezgisel algoritmaların geliştirmeye en açık yönü olarak nitelendirilebilir.

#### 4.2. Nguyen-Dupuis Test Ağı Uygulaması

İkinci sayısal uygulama Şekil 5'te fiziksel yapısı verilen Nguyen-Dupuis test ağı üzerinde gerçekleştirilmiştir [39]. 13 düğüm ve 38 bağdan oluşan test ağındaki seyahat talepleri ve serbest akım seyahat süreleri ( $t^f$ ) sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 5 - Nguyen-Dupuis test ağı

Tablo 5 - Nguyen-Dupuis test ağındaki seyahat talepleri (taşıt/sa)

Başlangıç/Variş	1	2	3	4	12	13	Başlangıç Toplamı
1	---	350	450	0	0	530	1330
2	350	---	0	560	520	0	1430
3	410	0	---	420	430	0	1260
4	0	380	400	---	0	440	1220
12	0	420	400	0	---	500	1320
13	390	0	0	380	400	---	1170
<b>Variş Toplamı</b>	1150	1150	1250	1360	1350	1470	7730

Tablo 6 - Nguyen-Dupuis test ağındaki serbest akım seyahat süreleri (s)

Bağ	$t^0$	Bağ	$t^0$	Bağ	$t^0$	Bağ	$t^0$	Bağ	$t^0$	Bağ	$t^0$
1	9	8	7	15	9	22	13	29	5	36	8
2	9	9	3	16	9	23	6	30	5	37	9
3	12	10	3	17	7	24	6	31	9	38	9
4	12	11	9	18	7	25	11	32	9		
5	9	12	9	19	5	26	11	33	9		
6	9	13	10	20	5	27	14	34	9		
7	7	14	10	21	13	28	14	35	8		

Bu problemde, fiziksel yapısı Şekil 5’de verilen karayolu ağındaki toplam seyahat süresinin azaltılabilmesi için ağa yeni şeritlerin ilave edilmesi planlanmaktadır. Tüm bağların şerit ilavesine aday olduğu düşünülmekte ve bu durumda  $2^{38} = 2.75 \cdot 10^{11}$  alternatif çözüm içeren çözüm uzayı içinden en iyi yatırım planının seçilmesi gerekmektedir. Ek şeritler için yatırım maliyeti, ilgili bağın serbest akım seyahat süresinin ( $t_i^0$ ) bir işlevi olarak öngörülmüş ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$c_i(t_i^0) = u_i \cdot t_i^0 \quad (13)$$

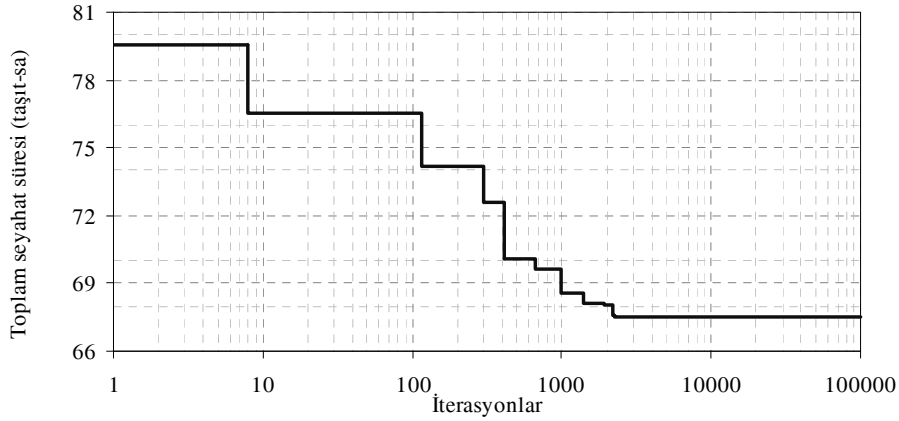
Bu durumda tüm bağlara yeni birer şerit ilave edilebilmesi için gerekli yatırım bedeli  $\sum c_i(t_i^0) = 328$  birim olmasına karşın bu problem için toplam yatırım bütçesi  $F=150$  birim olarak kabul edilmiştir. Yol ağı üzerindeki tüm bağlardaki DKD trafik hacimlerinin hesaplanması durumunda sistem performansını en iyileyecek amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\min T(x, c) = \left( \sum_{i=1}^{38} x_i t_i \right) + P(c) \quad (14)$$

Burada  $t_i$ ,  $i$  bağındaki seyahat süresidir.  $P(c)$  ise birinci sayısal uygulamada da kullanılan ceza fonksiyonunu temsil etmektedir. Bağ seyahat sürelerinin hesaplanması için seyahat süresi ile hacim/kapasite oranı arasında üstel bir ilişki olduğu kabulünü esas alan Bureau of Public Roads [40] seyahat süresi fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyon Denklem (15)'de verilmiştir.

$$t_i = t_i^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{x_i}{h_i} \right)^4 \right] \quad (15)$$

Burada  $h_i$ ,  $i$  bağıının saatlik kapasitesini (taşı/sa) temsil etmektedir. Bu uygulamada şehirçi karayolu ağlarında kabul edilebilir bir değer olan 3.05 m'lik şerit genişliği değeri için kapasite değerleri 450 taşı/sa olarak alınmıştır [41]. Nguyen-Dupuis ağındaki AUAT probleminin çözümü için birinci sayısal uygulamada yapılan duyarlılık analizi sonucunda en iyi çözüm performansını veren parametre seti kullanılmıştır. Bu değerler, HMS, HMCR ve PAR parametreleri için sırasıyla 20, 0.90 ve 0.30 olarak alınarak problem çözülmüştür. Birinci problemde daha fazla karar değişkeni ve daha büyük bir çözüm uzayına sahip olan bu problem için durma koşulu 100,000 iterasyon olarak kabul edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ağıdaki toplam seyahat süresinin değişimini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6 - Toplam seyahat süresinin değişimi

Şekil 6 incelendiğinde, başlangıçta 79.56 taşı/sa olan toplam seyahat süresi değerinin, yaklaşık 2200 iterasyon sonunda 67.49 taşı/sa değerine gerilediği görülmektedir. Çözüm sonucunda ağ genelindeki toplam seyahat süresi değerinde %15.17'lik iyileşme sağlanmış ve elde edilen yapılandırma Tablo 7'de verilmiştir.



Tablo 7 - Çözüm sonucunda elde edilen şerit ilave yapılandırması

Bağ	$u_i$	$c_i$	Bağ	$u_i$	$c_i$	Bağ	$u_i$	$c_i$	Bağ	$u_i$	$c_i$	Bağ	$u_i$	$c_i$	Bağ	$u_i$	$c_i$
1	0	0	8	1	7	15	1	9	22	0	0	29	1	5	36	1	8
2	0	0	9	1	3	16	1	9	23	0	0	30	0	0	37	1	9
3	0	0	10	1	3	17	1	7	24	0	0	31	1	9	38	1	9
4	1	12	11	1	9	18	1	7	25	0	0	32	1	9			
5	0	0	12	1	9	19	1	5	26	0	0	33	0	0			
6	0	0	13	0	0	20	1	5	27	0	0	34	0	0			
7	1	7	14	0	0	21	0	0	28	0	0	35	1	8			

Tablo 7 incelendiğinde,  $u_i$  değerinin 1 olduğu bağlara şerit ilavelerinin yapılacağı ve bu yatırımın  $\sum c_i = 149$  birimlik harcama ile gerçekleştirileceği görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karayolu ulaştırma ağlarında yapılacak bağ iyileştirme projeleri ile yol ağındaki toplam seyahat süresinin en iyilenmesini hedefleyen AUAT problemleri ele alınmıştır. Tasarım probleminde kullanılan sıfır-bir değişkenlerinin süresiz yapısından dolayı çözüm için sezgisel HA optimizasyon tekniği tabanlı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Yol ağındaki mevcut bağların iyileştirilmesi ya da bu bağlara yeni şerit ilavelerinin yapıldığı bu yaklaşımda sürücü davranışları, DKD prensipleri altında modellemeye dahil edilmiştir. Doğrusal olmayan ve konveks yapıdaki DKD probleminin çözümü GİG yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde GİG yöntemini kullanan ve birçok elektronik çalışma sayfası tabanlı ofis yazılımında kolaylıkla erişilebilir bir yardımcı eklenti olan Çözücü işlevinden yararlanılmıştır.

Geliştirilen HA tabanlı AUAT çözüm yönteminin uygulaması iki sayısal örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu örnekler, UAT modellemesinde literatürde sıklıkla kullanılan Sioux-Falls ve Nguyen-Dupuis karayolu ağlarıdır. Sioux-Falls ulaşım ağı örneğinde ceza fonksiyonu yaklaşımını içeren HA tabanlı yöntemin parametrelere bağlı duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. En düşük iterasyon sayısında çözümün elde edildiği parametre seti, ikinci sayısal uygulama olan Nguyen-Dupuis karayolu ağının çözümünde kullanılmış ve çözüm sonucunda sistem performansında yaklaşık %16'lık iyileşme sağlanmıştır.

Sonuç olarak, önerilen ceza yaklaşımı formülasyonu yardımıyla HA tabanlı yöntem kullanılarak AUAT probleminin çözüme hızlı bir şekilde ulaşılabildiği bulunmuştur. Ayrıca, çözüm sürecinde farklı yatırım stratejileri için DKD prensibi altında değişim gösteren bağ trafik hacimlerinin GİG metodunun Excel çalışma sayfası altındaki Çözücü işlevi yardımıyla hesaplanabileceği ortaya konulmuş ve AUAT probleminin çözümü konusunda cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir.

### **Semboller**

- HMS: Harmoni belleği kapasitesi (Harmony Memory Size)  
HMCR: Harmoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate)  
PAR: Ton ayarlama oranı (Pitch Adjusting Rate)  
 $n$ : Yol ağındaki iyileştirme planı dışında kalan bağ sayısı  
 $m$ : İyileştirmeye aday bağ sayısı  
 $N$ : Yol ağındaki toplam düğüm sayısı  
 $u_i$ : Bağ iyileştirmesinde kullanılan sıfır-bir değişkeni  
 $a_i, b_i$ : Mevcut bağ parametreleri (saat), [saat/(taşıt/gün)<sup>4</sup>]  
 $a_i^*, b_i^*$ : İyileştirme sonrası bağ parametreleri (saat), [saat/(taşıt/gün)<sup>4</sup>]  
 $\hat{a}_i, \hat{b}_i$ :  $i$  aday bağının iyileştirilmesi durumunda yeni bağ parametrelerin kullanılmasını ayarlayan parametreler (saat), [saat/(taşıt/gün)<sup>4</sup>]  
 $x_i$ :  $i$  bağındaki trafik hacmi (taşıt/gün)  
 $A_i(x_i)$ :  $i$  bağındaki ortalama seyahat süresi (saat)  
 $T_i(x_i)$ :  $i$  bağındaki toplam seyahat süresi (saat)  
 $c_i$ :  $i$  bağı için iyileştirme maliyeti (\$)  
 $p$ : ağdaki B-V çiftlerini temsil eden düğüm sayısı  
B-V: Başlangıç-Variş  
 $L$ : Yol ağındaki bağlar kümesi  
 $L_1$ : İyileştirme planı dışında kalan bağlar kümesi  
 $L_2$ : İyileştirmeye aday bağlar kümesi  
 $x_i^s$ :  $i$  bağı boyunca  $s$  varışına seyahat eden trafik hacmi (taşıt/gün)  
 $D(j,s)$ :  $j$  düğümünden  $s$  düğümüne seyahat eden toplam trafik hacmi (taşıt/gün)  
 $Y(j)$ :  $j$  düğümünden çıkan bağların girdiği düğümler seti  
 $Z(j)$ :  $j$  düğümüne giren bağların çıktığı düğümler seti  
 $F$ : Toplam yatırım bütçesi (\$)  
 $P(c)$ : Seçilen yatırım stratejisi için öngörülen maksimum yatırım bütçesinin aşılması durumunda amaç fonksiyonuna uygulanacak olan ceza fonksiyonu  
 $l^0$ : Bağ serbest akım seyahat süreleri kümesi  
 $t_i$ :  $i$  bağındaki seyahat süresi (s)  
 $h_i$ :  $i$  bağının saatlik kapasitesini (taşıt/sa)  
 $\hat{a}_i, \hat{b}_i$ :  $i$  aday bağının iyileştirilmesi durumunda yeni bağ parametrelerin kullanılmasını ayarlayan parametreler

### **Teşekkür**

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminin desteklemiş olduğu 2007-FBE-003 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

### **Kaynaklar**

- [1] Bell, M. G. H., Iida, Y., Transportation Network Analysis. England, John Wiley & Son Ltd., 1997.
- [2] Magnanti, T. L., Wong, R. T., Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. Transportation Science 18, 1–55, 1984.
- [3] Yang, H., Bell, M. G. H., Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and Some New Developments. Transport Reviews, 18, 257–278, 1998.
- [4] Sheffi, Y., Urban Transportation networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. MIT. New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1985.
- [5] Bruynooghe, M., An Optimal Method of Choice of Investments in a Transport Network. Proceedings of PTRC, 1972.
- [6] Steenbrink, A., Transport Network Optimization in the Dutch Integral Transportation Study. Transportation Research Part B, 8, 11–27, 1974.
- [7] LeBlanc, L. J., An Algorithm for the Discrete Network Design Problem. Transportation Science, 9(3), 183–199, 1975.
- [8] LeBlanc, L. J., Mathematical Programming Algorithms for Large Scale Network Equilibrium and Network Design Problems, Ph.D. Dissertation, Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University, 1973.
- [9] Poorzahedy, H., Turnquist, M. A., Approximate Algorithms for the Discrete Network Design Problem. Transportation Research Part B, 16, 45–55, 1982.
- [10] Chen, M., Alfa, A. S., A Network Design Algorithm Using a Stochastic Incremental Traffic Assignment Approach. Transportation Science, 25, 215–224, 1991.
- [11] Chen, X., An Improved Branch and Bound Algorithm for Future Selection. Pattern Recognition Letters, 24, 1925-1933, 2003.
- [12] Gao, Z., Wu, J., Sun, H., Solution Algorithm for the Bi-Level Discrete Network Design Problem. Transportation Research Part B, 39, 479–495, 2005.
- [13] Zhang, H., Gao, Z., Two-Way Road Network Design Problem With Variable Lanes. J Syst Sci Syst Eng, 16(1), 2007.
- [14] Duthie, J., Waller, S. T., Incorporating Environmental Justice Measures into Equilibrium-Based Network Design. Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington, 2008.
- [15] Frontline System Inc., A Tutorial on Spreadsheet Optimization, 1999.

- [16] Stokes, L., Plummer, J., Using spreadsheet solvers in sample design. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44(3), 527-546, 2004.
- [17] Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., Ratner, M., Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 4(1), 34-49, 1978.
- [18] Ayvaz, M. T., Kayhan, A. H., Ceylan, H., Gurarslan, G., Hybridizing harmony search algorithm with a spreadsheet solver for solving continuous engineering optimization problems. *Engineering Optimization*, 41(12), 1119-1144, 2009.
- [19] Kayhan, A. H., Ceylan, H., Ayvaz, M. T., Gurarslan, G., PSOLVER: A New Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Continuous Optimization Problems. *Expert Systems with Applications*, 37(10), 6798-6808, 2010.
- [20] Boyce, D. E., Urban Transportation Network Equilibrium and Design Models: Recent Achievements and Future Prospectives. *Environment and Planning*, 16, 1445-1474, 1984.
- [21] Geem, Z. W., Kim, J-H., Loganathan, G. V., A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simulation*, 76(2), 60-68, 2001.
- [22] Kim, J. H., Geem Z. W., Kim, E.S., Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1131-1138, 2001.
- [23] Lee, K. S., Geem, Z. W., A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm. *Computers and Structures*, 82(9-10), 781-798, 2004.
- [24] Geem, Z. W., Optimal Cost Design of Water Distribution Networks Using Harmony Search. *Engineering Optimization*, 38(3), 259-280, 2006.
- [25] Ayvaz, M. T., Simultaneous Determination of Aquifer Parameters and Zone Structures with Fuzzy c-Means Clustering and Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm. *Advances in Water Resources*, 30(11), 2326-2338, 2007.
- [26] Ceylan, H., Ceylan, H., Haldenbilen, S., Baskan, O., Transport Energy Modeling with Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm, an Application to Turkey. *Energy Policy* 36, 2527-2535, 2008.
- [27] Ceylan, H., Ceylan, H., Baksan, O., Haldenbilen, S., Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği İle Stokastik Trafik Ataması. *ASYU-2008, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu*, Isparta, 2008.
- [28] Ayvaz, M. T., Karahan, H., Gurarslan, G., Su Dağıtım Şebekelerinin Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği İle Optimum Tasarımı, 5. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Hatay, 2007.
- [29] Lee, K. S., Geem, Z. W., Lee, S. H., Bae, K. W., The Harmony Search Heuristic Algorithm for Discrete Structural Optimization. *Eng Optimiz*, 37(7), 663-684, 2005.
- [30] Wardrop, J. G., Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Inst. Civ. Eng., Part II*, 325-378, 1952.

- [31] Beckmann, M., McGuire, C. B., Winsten, C., *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1956.
- [32] OTC, Optimization Technology Center's Web site (online). <http://www-fp.mcs.anl.gov/OTC/Guide/SoftwareGuide/Blurbs/grg2.html>, (31.05.2011 tarihinde erişildi).
- [33] Braess, D., Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, 12, 258–268, 1969.
- [34] Ceylan, H., *A Genetic Algorithm Approach to the Equilibrium Network Design Problem*. Doktora Tezi, University of Newcastle upon Tyne, England, 2002.
- [35] Patriksson, M., *The Traffic Assignment Problem – Models and Methods*. V.S.P. Intl Science, 1994.
- [36] Ceylan, H., Bell, M. G. H., Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion. *Transportation Research Part B*, 39, 169–185, 2005.
- [37] Başkan, Ö., *Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Ulaşım Ağ Tasarımı*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2009.
- [38] Ceylan, H., *Şehir içi Ulaşım Ağlarının Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği ile Tasarımı*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2009.
- [39] Nguyen, S., Dupuis, C., An Efficient Method for Computing Traffic Equilibria in Networks with Asymmetric Transportation Costs. *Transportation Science*, 18, 185–202, 1984.
- [40] BPR, Bureau of Public Roads, *Traffic Assignment Manual*, U.S. Department of Commerce, Washington, 1964.
- [41] The Highways Agency, *Design Manual for Roads and Bridges, Part 3 – Traffic Capacity of Urban Roads*, 5(1), 1999.