

Birleştirilmiş Ulaşım Ağ Tasarım Probleminin Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Çözümü

Özgür Başkan

Pamukkale Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Ulaştırma Anabilim Dalı, Denizli

Tel: (258) 2963416

E-Posta: obaskan@pau.edu.tr

Öz

Bu çalışmada Birleştirilmiş Ulaşım Ağ Tasarımı (BUAT) probleminin çözümü amacıyla Diferansiyel Gelişim (DG) algoritması kullanılmıştır. Temel olarak Genetik Algoritma tekniğine benzer çalışma prensibine sahip olan DG algoritması, diğer sezgisel algoritmalarla oranla yapısal olarak daha basit olmasına karşın optimum değerlere ulaşmada daha kararlı bir yöntemdir. Bu nedenle çalışmada BUAT probleminin çözümünde DG algoritmasından faydalanılmıştır. BUAT problemi, bağ ekleme-çıkarma ve kapasite genişletme problemlerinin birlikte göz önüne alınarak verilen bütçe kısıtları altında ulaşım ağındaki toplam seyahat süresinin en küçüklenmesi olarak tanımlanabilir. Genellikle iki seviyeli programlama yaklaşımı ile modellenen BUAT probleminin konveks olmayan yapısından dolayı çözümü oldukça zordur. Çalışmada ulaşım ağına eklenecek ve kapasite genişletmeye aday bağlar 0-1 ikili değişken sistemi kullanılarak temsil edilmiştir. Problemin çözümü için iki seviyeli programlama yaklaşımı altında DG algoritması tabanlı bir model geliştirilmiştir. Üst seviyede belirlenen yatırım stratejilerine bağlı olarak Deterministik Trafik Atama (DTA) problemi Frank-Wolfe algoritması kullanılarak alt seviyede çözülmüştür. Geliştirilen algoritma, literatürde ulaşım ağ tasarımı problemlerinde oldukça sık olarak kullanılan Sioux-Falls ulaşım ağı üzerinde test edilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar DG algoritmasının BUAT probleminin çözümünde oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Ulaşım ağ tasarımı, Diferansiyel gelişim algoritması, optimizasyon

Giriş

Birleştirilmiş Ulaşım Ağ Tasarımı (BUAT) problemi genel olarak bütçe kısıtları altında ulaşım ağına yapılabilecek en uygun iyileştirmelerin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. BUAT problemi, Ayrık Ulaşım Ağ Tasarımı (AUAT) ve Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı (SUAT) problemlerinin birlikte göz önüne alınması ile ortaya çıkmıştır. Diğer bir deyişle BUAT probleminde ulaşım ağına eklenmesi düşünülen bağlar ve kapasite artırımına aday bağların belirlenmesi problemleri beraber ele alınmaktadır. Yerel idareciler ve ulaşım planlamacılarının en sık karşılaştığı problemlerin başında gelen BUAT problemi literatürde çözümü zor ulaştırma problemlerinin başında gelmektedir. Söz konusu problemde örnek olarak 10 adet farklı yatırım projesi içinden en uygun stratejinin bulunması için 2^{10} adet farklı ulaşım ağının değerlendirilmesi ve

bunların içinden seçilen ve amaç fonksiyonunu en küçükleyen yatırım projesinin belirlenmesi gerekmektedir. Günümüzde ulaşım ağlarında yapılacak yatırımların kısıtlı kaynaklar altında daha etkin ve ekonomik olarak yapılabilmesi için BUAT probleminin etkin olarak çözümünün gerekliliği açıktır. Literatürde AUAT ve SUAT problemlerinin ayrı olarak değerlendirildiği birçok çalışma bulunmasına karşın BUAT probleminin çözümü için yeterli çalışma bulunmamaktadır. Leblanc (1975) örnek bir ulaşım ağında verilen bütçe kısıtı altında en uygun bağ kapasite genişletme stratejisinin belirlenmesini amaçlamıştır. Problemin çözümü için dal-sınır yaklaşımı tabanlı çözüm yöntemi kullanılmış ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Abdulaal ve LeBlanc (1979) SUAT probleminin çözümü için Hooke-Jeeves (HJ) algoritması tabanlı çözüm yöntemini orta ölçekli bir ulaşım ağına uygulamışlar ve başarılı sonuçlar almışlardır. Poorzahedy ve Turnquist (1982) BUAT probleminin çözümü için iki-seviyeli programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada yeni bağ yatırımı ve bağ kapasite genişletmelerine bağlı olarak toplam seyahat süresinin en küçüklenmesi amaçlanmış ve dal-sınır yaklaşımı tabanlı algoritma ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Marcotte (1983) SUAT probleminin çözümünü toplam ağ seyahat süresinin en küçüklenmesi olarak ele almış ve trafik atama süreci değişken eşitsizlik problemi olarak formüle edilmiştir. Suwansirikul ve diğ. (1987) SUAT probleminin çözümü için yeni bir sezgisel metot önermiştir. Sonuçlar, geliştirilen metodun HJ metoduna göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Friesz ve diğ. (1992) SUAT probleminin çözümünde Tavlama Benzetimi (TB) yöntemini kullanmışlardır. TB yöntemi 3 farklı yöntem ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntem SUAT probleminin çözümünde oldukça başarılı bulunmuştur.

Benzer şekilde, Davis (1994) genelleştirilmiş eğim düşümü yöntemi ve ardışık kuadratik programlama yöntemlerini SUAT probleminin çözümünde kullanmıştır. Meng ve diğ. (2001) SUAT probleminin çözümünde kullanılan iki seviyeli programlama modelini tek seviyeye indirgeyerek problemin çözümüne farklı bir yaklaşım getirmişlerdir. Chiou (2005) SUAT probleminin çözümü için 4 farklı yöntem kullanmış ve literatürdeki çözüm yöntemleri ile karşılaştırmıştır. Poorzahedy ve Abulghasemi (2005) BUAT probleminin çözümünde Karınca Sistemi optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Benzer şekilde Gao ve diğ. (2005) AUAT problemini doğrusal ötesi programlama problemine dönüştürmüşlerdir. Bu şekilde problemin çözümü standart kısıtlı optimizasyon yöntemi ile gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Sonuçlar önerilen modelin AUAT probleminin çözümünde kullanılabileceğini göstermiş ancak geliştirilen yöntemin ileri düzeyde sayısal analiz ve programlama bilgisi gerektirmesinin dezavantaj olduğu değerlendirilmiştir. Poorzahedy ve Rouhani (2007) Karınca Sistemi tabanlı 7 farklı hibrit algoritma kullanarak BUAT problemini çözmüşlerdir. Geliştirilen algoritmalar Sioux-Falls ağı üzerinde kalibre edildikten sonra gerçek ulaşım ağında test edilmiştir. Sonuç olarak hibrit algoritmaların Karınca Sistemine oranla daha başarılı olduğu bulunmuştur. Ceylan ve Ceylan (2009) ulaşım ağlarındaki optimum bağ iyileştirme stratejilerinin belirlenmesi amacıyla Armoni Araştırması Tekniğini (AAT) kullanmışlardır. Alt seviye probleminin çözümü için indirgenmiş gradyan yöntemi tabanlı bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar AAT yönteminin ulaşım ağlarının ayrık tasarımında kullanılabileceğini göstermiştir. Ceylan ve diğ. (2009) şehiriçi ulaşım ağlarında trafik sinyal parametrelerinin eniyilenmesi problemini Oyun Teorisi çerçevesinde ele almışlardır. Alt seviyede Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) yaklaşımı altında belirlenen denge bağ trafik hacimleri üst seviyede girdi olarak kullanılmıştır. Önerilen modelde trafik sinyal parametrelerinin eniyilenmesi amacıyla Genetik Algoritma tekniği kullanılmıştır. Önerilen model gerçek ulaşım ağına uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Farvaresh ve Sepehri (2011) çalışmalarında AUAT problemini tek seviyeli karışık tamsayı doğrusal programlama olarak formüle etmişlerdir. Sayısal uygulamalar önerilen metodun optimum sonuçlara ulaşmada başarılı olduğunu göstermiştir. Luathep ve diğ. (2011) BUAT probleminin çözümü için yeni bir optimizasyon algoritması önermişlerdir. Çalışmada üst seviyede bağ kapasite genişletme ve bağ ekleme problemleri birlikte ele alınmış, alt seviye problemi ise Wardrop Kullanıcı Dengesi (KD) prensibi göz önüne alınarak çözülmüştür. BUAT problemi karışık tamsayı doğrusal programlama problemine dönüştürülmüştür. Sayısal uygulamalar önerilen metodun oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Li ve diğ. (2012) SUAT probleminin çözümü için optimizasyon metodu önermişlerdir. Çalışmada SUAT problemi tek seviyeden oluşan konkav problemler dizisine dönüştürülmüştür. Sonuçlar önerilen metodun özellikle büyük ölçekli ulaşım ağlarında global optimumun bulunmasında oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Ceylan ve Ceylan (2013) AUAT probleminin çözümünde AAT metodunu kullanmışlar ve başarılı sonuçlar almışlardır. Wang ve diğ. (2013) AUAT problemi için iki farklı optimizasyon metodunun performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada AUAT problemi aday bağlara eklenecek optimum şerit sayısını belirlemek olarak tanımlanmış ve iki seviyeli programlama tekniği kullanılmıştır. Üst seviye problemi toplam seyahat süresinin en küçüklenmesi olarak ele alınmış, alt seviyede ise Wardrop KD trafik atama tekniği kullanılmıştır. Önerilen iki farklı optimizasyon metodunun performansları örnek ağlar üzerinde test edilmiştir. Başkan (2013) SUAT probleminin çözümünde AAT tekniğini kullanmış ve literatürdeki çözüm yöntemleri ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar AAT'nin SUAT probleminin çözümünde oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Dell'Orco ve diğ. (2013) SUAT problemini optimum trafik sinyal sürelerinin belirlenmesi olarak ele almış ve AAT tekniğinin performansı problemin çözümünde test edilmiştir. Üst seviyede TRANSYT-7F programı performans indeksinin belirlenmesi için kullanılmış, alt seviyede SKD prensibi ile trafik atama problemi çözülmüştür. Önerilen metod örnek ulaşım ağı üzerinde test edilmiş ve sonuçlar AAT tekniğinin problemin çözümünde oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Literatürden görülebileceği gibi AUAT ve SUAT problemleri için birçok çalışma mevcut olmasına karşın BUAT probleminin çözümü için az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca literatürde ulaşım ağ tasarım problemlerinin çözümünde sezgisel metodların oldukça fazla kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmada BUAT probleminin çözümü için son yıllarda karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü amacıyla oldukça sık olarak kullanılan Diferansiyel Gelişim (DG) algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen model Sioux-Falls ulaşım ağı üzerinde test edilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde problem formülasyonu, sonraki bölümde DG algoritmasının çalışma prensibi ve BUAT problemine uygulanma süreci, dördüncü bölümde sayısal uygulamalar ve son bölümde sonuçlar yer almaktadır.

Problem Formülasyonu

BUAT problemi, belirli bütçe kısıtı altında ulaşım ağındaki en uygun bağ ekleme-çıkarma ve bağ kapasite genişletme stratejilerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Düğüm (V) ve bağlardan (A) oluşan bir ulaşım ağı $N(V,A)$ olarak temsil edilirse BUAT problemi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\text{Min}_{\mathbf{y}} Z(\mathbf{y}) = \sum_{(i,j) \in A \cup A_{y1}} x_{ij}^* t_{ij}(x_{ij}^*) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in A_y} M_{ij} y_{ij} &\leq B \\ y_{ij} &= 0/1, (i,j) \in A_y \end{aligned}$$

Burada; x_{ij}^* alt seviye probleminin çözümünden elde edilen (i,j) bağındaki denge akımı, $t_{ij}(x_{ij}^*)$ maliyet fonksiyonu, $\mathbf{y}$ yatırım vektörü, A_y yatırım yapılması planlanan bağlar kümesi, $y_{ij} = 1/0$ aday (i,j) bağıнын yatırıma dahil edilip edilmemesini temsil eden parametre, $A_{y1} = \{(i,j) \in A_y : y_{ij} = 1\}$ yatırım planlanan bağlar içinde kabul edilen projelerin kümesi, M_{ij} yatırıma aday (i,j) bağıнын iyileştirme yada yapım maliyeti ve B toplam yatırım bütçesi olarak verilmiştir. Uygulanması düşünülen herhangi bir yatırım vektörü ($\mathbf{y}$) için Deterministik Trafik Atama (DTA) problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \sum_{(i,j) \in A \cup A_{y1}} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(w) dw \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} f_k^{rs} = D_{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs}$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs}$$

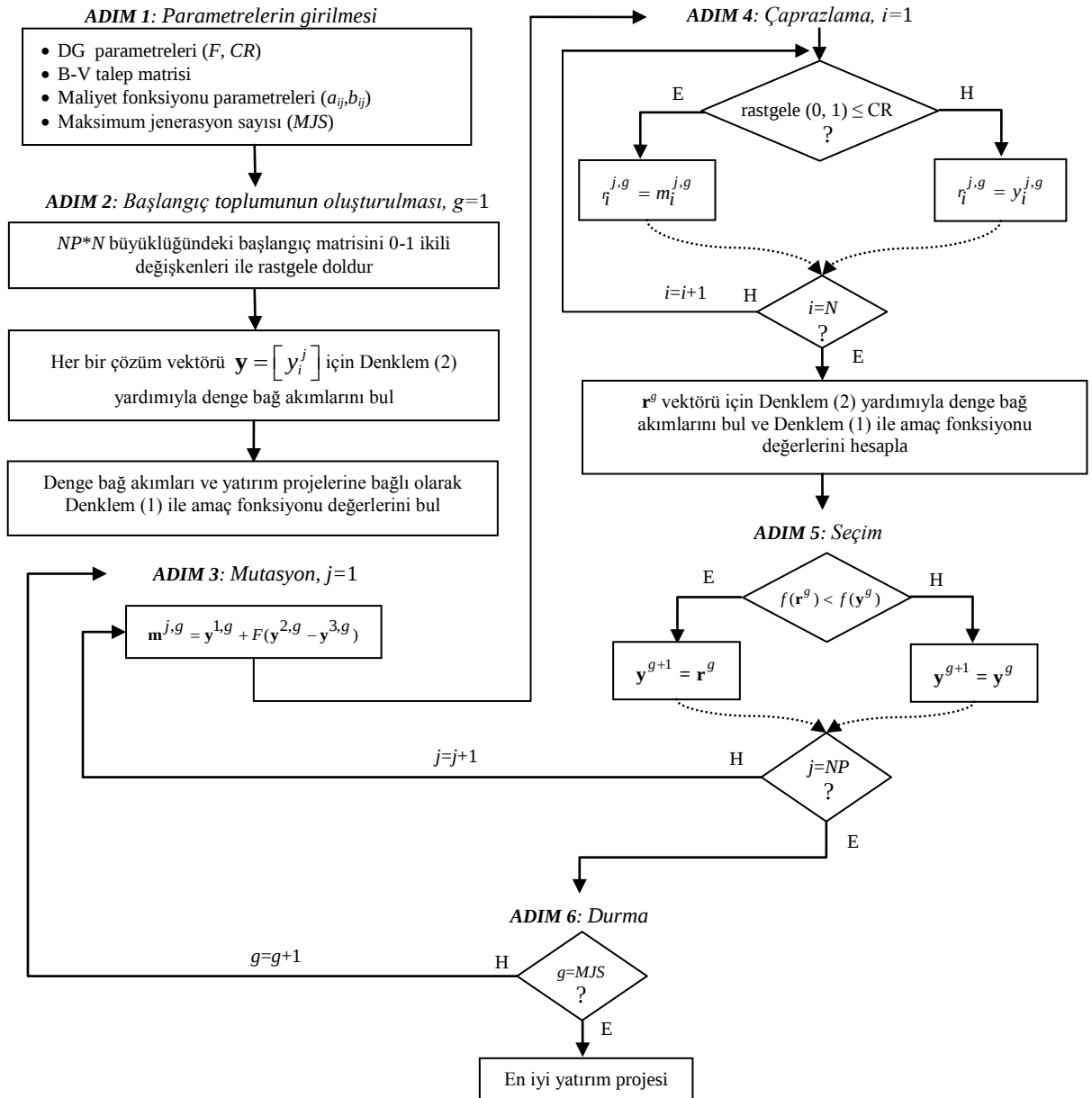
$$x_{ij} = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{ij,k}^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs}, \forall (i,j) \in A \cup A_{y1}$$

Burada; D_{rs} Başlangıç-Varış (B-V) çifti r - s arasındaki seyahat talebi, f_k^{rs} B-V çifti r - s arasındaki k rotasındaki akım ve $\delta_{ij,k}^{rs}$ bağ-rota matrisinin elemanı olup eğer (i,j) bağı k rotası üzerinde ise 1 aksi durumda 0 değerini almaktadır. DTA problemi konveks bir problem olduğu için sayısal olarak birçok farklı metotla çözülebilmektedir. Bu çalışmada denge bağ akımlarının bulunmasında oldukça etkili olan ve literatürde sıkça kullanılan Frank-Wolfe (FW) metodu kullanılmıştır (Frank ve Wolfe, 1956).

Diferansiyel Gelişim Algoritması

DG algoritması optimizasyon problemlerinin çözümü amacıyla Storn ve Price (1995) tarafından geliştirilen toplum tabanlı sezgisel bir metottur. Yapısal olarak oldukça basit olmasına rağmen karmaşık problemlerin çözümünde oldukça etkilidir. DG algoritmasında oluşturulan başlangıç toplumu mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri kullanılarak en iyi değer elde edilmesi amacıyla iterasyonlar boyunca iyileştirilir (Liu ve diğ., 2010). Çözüm sürecini kontrol etmek amacıyla üç adet parametre kullanılır. Bunlardan birincisi tüm toplum tabanlı sezgisel metotlar da kullanıldığı gibi toplum büyüklüğünü temsil eden NP parametresidir. Bu değer verilen bir problem için dikkate alınan çözüm vektörlerinin sayısını göstermektedir. Algoritma içinde kullanılan bir diğer kontrol parametresi F ile temsil edilen mutasyon faktörüdür.

Bu parametre toplum içinden rastgele seçilen ve birbirinden farklı 3 adet çözüm vektöründen yeni bir vektör üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. F parametresi için Storn ve Price (1995) tarafından tavsiye edilen kullanım aralığı $[0.5-1]$ 'dir. DG algoritmasında kullanılan son kontrol parametresi ise çaprazlama oranıdır (CR). Bu parametre mutasyon sonucu elde edilen vektörün dikkate alınma oranı olarak kullanılmaktadır. CR parametresi için $[0.8-1]$ kullanım aralığı tavsiye edilmektedir (Storn ve Price, 1995). Bu çalışmada sayısal uygulamalarda F ve CR parametreleri 0.8 olarak seçilmiştir. Şekil 1'de BUAT probleminin çözümünde kullanılan DG algoritmasının akış şeması verilmiştir.



Şekil 1 DG algoritması akış şeması

DG algoritmasında başlangıç toplumu $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ve $j \in \{1, 2, \dots, NP\}$ olmak üzere $y = [y_i^j]$ çözüm vektörlerinden oluşacak şekilde 0-1 ikili değişkenleri ile rastgele oluşturulur. Burada, N iyileştirme ya da yapımı düşünülen bağların toplam sayısını

temsil etmektedir. Farklı yatırım stratejilerini temsil eden her bir çözüm vektörü için Denklem (2) yardımıyla denge bağ akımları elde edilir. Bulunan denge bağ akımları ve Denklem (1) yardımıyla amaç fonksiyonu değerleri her bir çözüm vektörü için hesaplanır. Sonrasında toplum içinden rastgele seçilen üç adet çözüm vektörü ve mutasyon faktörü yardımıyla Denklem (3)'de verilen operatör kullanılarak yeni bir aday çözüm vektörü, $\mathbf{m}$, oluşturulur. BUAT probleminin çözümünde 0-1 ikili değişkenleri ile çalışıldığı için mutasyon operatöründen sonra elde edilen yeni vektör elemanlarının sınırlar dışına çıkıp çıkmadığı kontrol edilmelidir. 0-1 değerleri arasında kalan değerler en yakın tamsayı değerine yuvarlatılır.

$$m_i^j = y_i^1 + F(y_i^2 - y_i^3) \quad (3)$$

Burada y_i^1 , y_i^2 ve y_i^3 birbirinden farklı olarak $[0, NP]$ aralığında rastgele seçilen karar değişkenlerini temsil etmektedir. Toplum içindeki her bir çözüm vektörü ile buna bağlı olarak oluşturulan $\mathbf{m}$ vektörüne Denklem (4)'de verildiği şekliyle çaprazlama operatörü uygulanır ve $\mathbf{r}$ vektörü oluşturulur.

$$r_i^j = \begin{cases} m_i^j, & \text{eğer rastgele } (0,1) \leq CR \text{ yada } i = i_{\text{rastgele}} \\ y_i^j, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (4)$$

Burada $(0,1)$ arasında rastgele üretilen değer CR parametresinden küçük ya da eşit ise $\mathbf{r}$ vektörünün elemanı $\mathbf{m}$ vektöründen aksi durumda ise $\mathbf{y}$ vektöründen seçilir. $i = i_{\text{rastgele}}$ koşulunun kullanılmasının amacı $\mathbf{r}$ vektörünün en az bir elemanının $\mathbf{m}$ vektöründen seçilmesinin sağlanmasıdır. Bu sayede gelecek jenerasyonlara yeni bireylerin aktarılması sağlanmaktadır.

Son olarak çaprazlama sonucu elde edilen $\mathbf{r}$ vektörü ile $\mathbf{y}$ vektörüne ait amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır. Öncelikle $\mathbf{r}$ vektörünün temsil ettiği yatırım projesine bağlı olarak Denklem (2) yardımıyla denge bağ akımları hesaplanır ve elde edilen bağ akımları ve Denklem (1) ile amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Bu aşamadan sonra Denklem (5)'de verilen koşullu ifade yardımıyla en iyi amaç fonksiyonu veren çözüm vektörü bir sonraki jenerasyona aktarılır.

$$\mathbf{y}^{g+1} = \begin{cases} \mathbf{r}^g, & \text{Eğer } f(\mathbf{r}^g) \leq f(\mathbf{y}^g) \\ \mathbf{y}^g, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (5)$$

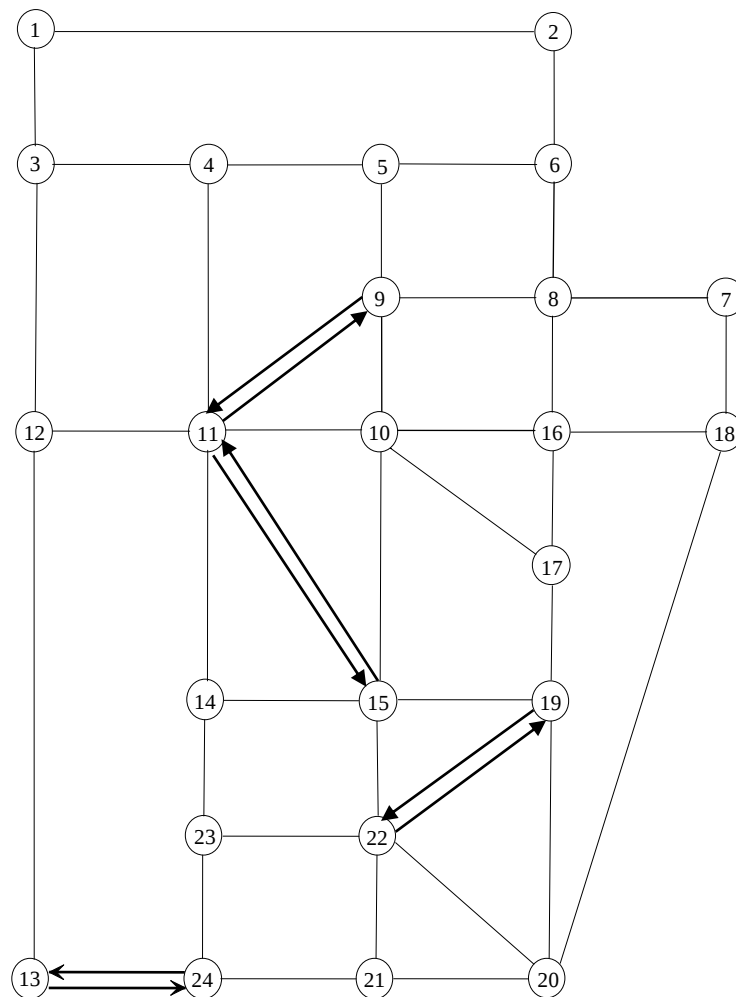
Burada; g jenerasyon sayısını ifade etmektedir. DG algoritması belirlenen durma kriterinin sağlanması ya da maksimum jenerasyon sayısına ulaşılması durumunda sonlandırılır.

Sayısal Uygulama

DG algoritmasının BUAT problemindeki performansının test edilmesi amacıyla Şekil 2'de verilen 24 düğüm ve 76 bağdan oluşan Sioux-Falls ulaşım ağı seçilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi 10 çift bağda yatırım yapılması planlanmaktadır. 5 çift bağ yeni yapılması düşünülen bağlar olup diğerleri ise kapasite genişletmesi yapılması planlanan bağlardır. Bütçe kısıtını amaç fonksiyonuna dahil etmek amacıyla Denklem (1)'e ceza fonksiyonu eklenmiş ve Denklem (6)'da verilmiştir.

DG				KS			
B/M	B	Ortalama DTA sayısı	Z^a	B/M	B	Ortalama DTA sayısı	Z^a
0.20	2700	38.0	65293	0.20	2700	19.2	76297
0.49	6500	33.7	53366	0.49	6500	23.9	65465
0.81	10820	14.0	49845	0.81	10820	18.1	58829

Tablo 1’den görüldüğü gibi amaç fonksiyonu değerlerine göre DG algoritması üç farklı B/M oranı için KS yöntemine göre daha iyi sonuçlar üretmektedir. Ortalama DTA sayıları açısından her iki algoritma arasında kayda değer bir farklılık görünmemektedir. 0.20 ve 0.49 B/M oranları için DG algoritması daha yüksek sayıda DTA gerektirmesine rağmen, en yüksek bütçeli çözümde KS algoritması daha fazla DTA sayısında en iyi çözüme ulaşabilmektedir. Orta bütçeli durumu ifade eden $B/M=0.49$ durumu için elde edilen sonuçlar Şekil 3’de ulaşım ağı üzerinde gösterilmiştir. En iyi yatırım projesi şekilden görüldüğü gibi 13-24 ve 24-13 bağlarında kapasite genişletmesi yapılması, 19-22, 22-19; 11-15, 15-11 ve 9-11, 11-9 bağlarının ise ulaşım ağına eklenmesi durumudur.



8

Ayrıca Tablo 2’de DG algoritması ile elde edilen en iyi yatırım projeleri her B/M oranı için verilmiştir.

Tablo 2 Farklı B/M oranları için en iyi yatırım stratejileri

B/M	Yatırıma aday bağlar									
	9-10 10-9	6-8 8-6	13-24 24-13	7-8 8-7	10-16 16-10	7-16 16-7	19-22 22-19	11-15 15-11	9-11 11-9	13-14 14-13
0.20	1							1		
0.49			1				1	1	1	
0.81		1		1	1	1	1	1		1

Sonuçlar

Bu çalışmada ulaşım ağlarında sıkça karşılaşılan belirli bütçe kısıtları dahilinde en uygun bağ ekleme-çıkarma ve bağ kapasite genişletme yatırım projelerinin belirlenmesi problemi ele alınmış ve çözüm için karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde sıkça kullanım alanı bulan DG algoritması kullanılmıştır. Algoritmada yatırımın gerçekleştirilme durumunu temsil etmek için 0-1 ikili değişkenleri kullanılmıştır. Bütçe kısıtının aşılmaması için amaç fonksiyonuna ceza fonksiyonu eklenerek çözüm yapılmıştır. Önerilen yöntem Sioux-Falls ulaşım ağı üzerinde farklı B/M oranları için test edilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar DG algoritmasının BUAT probleminin çözümünde oldukça başarılı olduğunu ayrıca kullanım kolaylığı açısından gerçek ulaşım ağlarında kullanılabileceğini göstermiştir.

Kaynaklar

Abdulaal, M. and LeBlanc, L. (1979) Continuous equilibrium network design models. Transportation Research Part B, 13, pp. 19-32.

Baskan O. (2013) Harmony search algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. KSCE Journal of Civil Engineering, DOI 10.1007/s12205-013-0122-6.

Ceylan, H. ve Ceylan, H. (2009) Şehiriçi Karayolu Ağlarının Ayrık Tasarımında Sezgisel Armoni Araştırması Yöntemi Uygulaması. 8. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 195-208, ISBN: 978-9944-89-773-0, 30 Eylül 1-2 Ekim, İstanbul.

Ceylan, H., Ceylan, H., Baskan, O. ve Haldenbilen, S. (2009) Birleştirilmiş Oyun Teorisi ve Genetik Algoritma ile Şehiriçi Ulaşım Ağ Tasarımı ve Uygulaması. 8. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 209-220, ISBN: 978-9944-89-773-0, 30 Eylül 1-2 Ekim, İstanbul.

Ceylan, H. ve Ceylan, H., (2013) Şehiriçi Karayolu Ağlarının Sezgisel Armoni Araştırması Optimizasyon Yöntemi ile Ayrık Tasarımı. İMO Teknik Dergi, 24(1), s. 6211-6231.

- Chiou, S. W. (2005) Bilevel programming for the continuous transport network design problem. Transportation Research Part B, 39, pp. 361-383.
- Davis, G. A. (1994) Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment. Transportation Research Part B, 28(1), pp. 61-75.
- Dell'Orco, M., Baskan, O. and Marinelli, M. (2013) A harmony search algorithm approach for optimizing traffic signal timings. Promet Traffic & Transportation, 25(4), pp. 349-358.
- Farvaresh, H. and Sepehri, M. M. (2011) A single-level mixed integer linear formulation for a bi-level discrete network design problem. Transportation Research Part E, 47, 623-640.
- Frank, M. and Wolfe, P. (1956) An algorithm for quadratic programming. Naval Research Logistics Quarterly, 3, pp. 95-110.
- Friesz, T. L., Cho, H. J., Mehta, N. J., Tobin, R. L., and Anandalingam, G. (1992) A simulated annealing approach to the network design problem with variational inequality constraints. Transportation Science, pp. 18-26.
- Gao, Z., Wu, J. and Sun, H. (2005) Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. Transportation Research Part B, 39, pp. 479-495.
- LeBlanc, L. J. (1975) An Algorithm for the Discrete Network Design Problem. Transportation Science, 9(3), pp. 183-199.
- Liu, H., Cai, Z. and Wang, Y. (2010) Hybridizing particle swarm optimization with differential evolution for constrained numerical and engineering optimization. Applied Soft Computing, 10(2), pp. 629-640.
- Li, C., Yang, H., Zhu, D. and Meng, Q. (2012) A global optimization method for continuous network design problems. Transportation Research Part B, 46, pp. 1144-1158.
- Luathap, P., Sumalee, A., Lam, W. H. K., Li, Z. C. and Lo, H. K. (2011) Global optimization method for mixed transportation network design problem: a mixed-integer linear programming approach. Transportation Research Part B, 45(6), pp. 808-827.
- Marcotte, P. (1983) Network optimization with continuous control parameters. Transportation Science, 17, pp. 181-197.
- Meng, Q., Yang, H., and Bell, M. G. H. (2001) An equivalent continuously differentiable model and a locally convergent algorithm for the continuous network design problem. Transportation Research Part B, 35, pp. 83-105.
- Poorzahedy, H. and Abulghasemi, F. (2005) Application of Ant System to network design problem. Transportation, 32, pp. 251 - 273.

Poorzahedy, H. and Rouhani, O. M. (2007) Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. European Journal of Operational Research, 182, pp. 578-596.

Poorzahedy, H. and Turnquist, M. A. (1982) Approximate algorithms for the discrete network design problem. Transportation Research Part B, 16, pp. 45-55.

Storn, R. and Price, K. (1995) Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. ICSI, USA, Tech. Rep. TR-95-012.

Suwansirikul, C., Friesz, T. L. and Tobin, R. L. (1987) Equilibrium decomposed optimisation: a heuristic for the continuous equilibrium network design problem. Transportation Science, 21(4), pp. 254-263.

Wang, S., Meng, Q. and Yang, H. (2013) Global optimization methods for the discrete network design problem. Transportation Research Part B, 50, pp. 42-60.