

Sinyalize Yol Ağlarında Bağ Kapasite Artırımı ve Sinyal Optimizasyonu Problemlerinin Eşzamanlı Çözümü

Özgür BAŞKAN¹, Cenk OZAN²

¹Pamukkale Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Kınıklı, 20070, Denizli
Tel: (258) 2963416

E-Posta: obaskan@pau.edu.tr

²Adnan Menderes Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., 09100, Aydın
Tel: (256) 2137503

E-Posta: cenk_ozan@hotmail.com

Öz

Ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerde kentiçi yol ağlarının etkin işletimi özellikle yerel kaynakların verimli kullanımı noktasında oldukça önemlidir. Yol ağlarının etkin işletimi ise sinyal sürelerinin optimum şekilde düzenlenmesi ve ağ içindeki kapasite artırımına aday olabilecek bağların kapasitesinin belirlenmesi ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, sinyalize yol ağlarında bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin eşzamanlı olarak çözülebilmesi için iki seviyeli programlama tekniğinden faydalanılmıştır. Alt seviye trafik atama problemi olarak temsil edilmiş üst seviyede ise ulaşım ağındaki toplam seyahat süresi ve yatırım fonksiyonundan oluşan amaç fonksiyonunun en küçüklenmesine çalışılmıştır. Çözüm için sezgisel Armoni Araştırması Tekniği'nden (AAT) faydalanılmıştır. Geliştirilen modelde üst seviyede oluşturulan herhangi bir sinyal ve bağ kapasite artırımı planına bağlı olarak alt seviyede trafik atama problemi çözülerek sürücülerin bu plana olan tepkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada Sioux-Falls ulaşım ağı kullanılmıştır. 24 düğüm ve 76 bağdan oluşan ulaşım ağına 7 adet kavşak sinyalize olarak kabul edilmiştir. Sinyalize kavşaklara bağlanan 16 adet bağ ise kapasite artırımına aday bağlar olarak seçilmiştir. Geliştirilen model kullanılarak her bir olası bağ kapasite artırımı ve sinyal planına göre trafik atama problemi çözülerek ağıdaki toplam seyahat süresi ve yatırım fonksiyonu değerini en küçükleyen plan belirlenmiştir. Sayısal uygulama sonucunda, bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin eşzamanlı olarak çözümünün geliştirilen model ile yapılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: Bağ kapasite artırımı; sinyal optimizasyonu; Armoni Araştırması Tekniği.

Giriş

Ulaştırma problemlerinin oldukça karmaşık ve birçok parametreye bağlı olması nedeniyle çözümden problemleri birbirinden bağımsız olarak ele almak literatürde kolaylık açısından çoğu zaman tercih edilmektedir. Ancak bu durum birbiri ile içsel bağımlılığı olan parametrelerin ayrı ayrı değerlendirilmesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin genellikle ayrı ayrı değerlendirilmesi istenilen doğrulukta sonuçların elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Söz konusu problemlerin birbiri ile göz ardı edilemeyecek derecede bağlantılı olduğu oldukça açıktır. Herhangi bir ulaşım ağındaki bağlarda kapasite artırımına gidilmesi diğer ağ parametrelerinin sabit kalması durumunda dahi optimum sinyal sürelerinin değişmesine neden olacaktır. Bu nedenle her iki

problemin eşzamanlı çözümü buna bağlı olarak optimum kapasite artırımı ve sinyal sürelerinin belirlenmesi karar vericiler tarafından yapılan planlamaların başarı şansını artıracaktır. Literatürde kapasite artırımı probleminin çözümü amacıyla yapılan çalışmalar Abdulaal ve LeBlanc (1979) ile başlamıştır. Sonrasında Suwansirikul ve diğ. (1987) bağ kapasite artırımı probleminin çözümü amacıyla yeni bir sezgisel metot önermiş ve farklı ulaşım ağları üzerinde test etmiştir. Chiou (2005) problemin çözümü için eğitim tabanlı metotlar önermiş ve ulaşım ağları üzerinde geliştirilen metotları test etmiştir. Ayrıca Karoonsoontawong ve Waller (2006) çözüm için sezgisel metotlar önermiş ve metotların çözümdeki avantaj ve dezavantajları çalışmada belirtilmiştir. Li ve diğ. (2012) bağ kapasite artırımı problemini tek seviyeli problemler serisi haline dönüştürmüş ve çözümde global optimizasyon metodunu önermiştir. Başkan (2013a) ulaşım ağına eklenecek bağların belirlenmesi ve kapasite artımı problemlerinin eş zamanlı olarak çözümünü gerçekleştirmiş ve gerçek ulaşım ağı üzerinde test etmiştir. Başkan (2013b) ve Başkan (2014) bağ kapasite artırımı probleminin çözümünde Guguk kuşu ve Armoni Araştırması sezgisel algoritmalarının performanslarını farklı ulaşım ağları üzerinde test etmiş ve başarılı sonuçlar elde etmiştir. Diğer taraftan literatürde sinyal optimizasyonu probleminin ayrı olarak değerlendirildiği çalışmalar oldukça fazladır. Bu konudaki ilk çalışmalardan biri Allsop ve Charlesworth (1977) tarafından yapılmış ve sinyal optimizasyonu probleminin çözümü için karşılıklı iteratif yaklaşımı kullanılmıştır. Heydecker ve Khoo (1990) ise sinyal optimizasyonu problemini kısıtlı optimizasyon problemi olarak ele almıştır. Yang ve Yagar (1995) ise problemin çözümünde duyarlılık tabanlı algoritma kullanmış ve ulaşım ağı üzerinde test etmiştir. Teklu ve diğ. (2007) sinyal optimizasyon probleminin çözümünde genetik algoritma tekniğini kullanmış ve geliştirilen algoritmayı gerçek ulaşım ağı üzerinde test etmiştir. Dell'Orco ve diğ. (2013) stokastik kullanıcı dengesi altında optimum sinyal sürelerinin belirlenmesi amacıyla iki seviyeli programlama yaklaşımını önermiş ve Armoni Araştırması sezgisel algoritmasını çözüm için kullanmışlardır. Son zamanlarda Ozan ve diğ. (2015) koordine sinyalizasyon ağlarında sinyal optimizasyonu problemini modifiye pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı altında çözmüş ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Literatürden görülebileceği gibi bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin ayrı olarak değerlendirildiği birçok çalışma olmasına rağmen her iki problemin eşzamanlı çözümünün gerçekleştirildiği çalışma oldukça azdır. Ziyou ve Yifan (2002) optimum sinyal süreleri ve kapasite artırımlarının belirlenmesi için rezerv kapasite kavramını kullanmıştır. Sonuçlar söz konusu problemlerin eşzamanlı çözümünün daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Chiou (2008a) ve Chiou (2008b) yapmış olduğu çalışmalarda sinyalizasyon yollarında kapasite artırımı probleminin çözümünde eşzamanlı olarak sinyal optimizasyonu problemini de ele almış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir. Karoonsoontawong ve Waller (2010) kapasite artırımı, sinyal optimizasyonu ve dinamik trafik atama problemlerinin birlikte çözümünü gerçekleştirebilen bir metot önermiş ve ulaşım ağları üzerinde test etmiştir. Literatürden görülebileceği gibi söz konusu problemlerin eşzamanlı çözümünün yapılabilmesi amacıyla farklı algoritmaların ve modellerin geliştirilmesinin ve performanslarının değerlendirilmesinin gerekliliği açıktır. Bu nedenle çalışmada sinyal optimizasyonu ve optimum bağ kapasite artırımı problemlerinin birlikte çözümünü gerçekleştirebilen yeni bir sezgisel çözüm algoritması geliştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde problem formülasyonu, sonraki bölümde geliştirilen sezgisel çözüm algoritması, dördüncü bölümde sayısal uygulamalar ve son bölümde sonuçlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar verilmiştir.

Problem Formülasyonu

Bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin birçok parametreye bağlı olması ve probleme özgü amaç fonksiyonunun belirlenebilmesi için denge bağ akımlarının bulunması gerekmektedir. Çalışmada problemin çözümü için iki seviyeli programlama tekniğinden faydalanılmıştır. Üst seviyede ağ toplam seyahat süresi ve yatırım fonksiyonundan oluşan amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi amaçlanırken alt seviyede ise kapasite artırımı ve sinyal planlarına bağlı olarak denge bağ akımları trafik atama probleminin çözümü ile belirlenebilmektedir. Üst seviye (ÜS) amaç fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\text{ÜS} \quad \min_y Z(x, y, \psi) = \sum_{a \in A} (t_a(x_a, y_a) x_a + \rho g_a(y_a)) \quad (1)$$

$$0 \leq y_a \leq y_a^{\max}, \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$\phi_m^{\min} \leq \phi_m \leq \phi_m^{\max}, \quad \forall m \in M \quad (3)$$

Burada; y_a^{\max} , $a \forall a \in A$ bağının maksimum kapasite artırımı olarak verilmiştir. Ayrıca Denklem (2)'de verilen kısıt bağ yatırım maliyetlerinin toplam bütçeyi aşmamasını sağlamaktadır. Denklem (3) ise faz yeşil sürelerinin maksimum ve minimum alabileceği değerleri belirtmektedir.

Alt seviyede (AS) ise denge bağ akımları Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) yaklaşımı altında belirlenebilmektedir. Wardrop (1952) birinci ilkesine göre herhangi bir B-V çifti arasındaki tüm kullanılan rotaların seyahat maliyetleri kullanılmayan rotaların seyahat maliyetine eşit yada daha azdır. Bu yaklaşımda tüm sürücülerin rotalar hakkında mükemmel bilgiye sahip olduğu ve en az maliyetli rotaları seçtiği kabulü yapılmaktadır. Her ne kadar söz konusu ifade gerçeği tam olarak yansıtmasa da, bu yaklaşım altında trafik atama probleminin konveks olması nedeniyle literatürde sıkça tercih edilmektedir. DKD trafik ataması Denklem (4)'de verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\text{AS} \quad \min_x z = \sum_{a \in A} \int_{\theta}^{x_a} t_a(w, y_a, \psi_a) dw \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} f_k^{rs} = D_{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs} \quad (5)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, a \in A, k \in K_{rs} \quad (6)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m \phi_i + I_i = \zeta_i \quad \forall i \in L \quad (8)$$

Burada; $t_a(w, y_a, \psi_a)$, $a \forall a \in A$ bağının maliyetini temsil etmekte ve Amerikan Karayolları Bürosu (BPR) tarafından belirlendiği şekliyle Denklem (9)'da verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$t_a(x_a, y_a, \psi_a) = \alpha_a + \beta_a \left(\frac{x_a}{\theta_a + y_a} \right)^4 \quad (9)$$

Alt seviye amaç fonksiyonunun kısıtlarından biri olan Denklem (5) herhangi bir B-V çifti r - s arasında bulunan rotalardaki toplam trafik hacminin talebe eşit olması gerektiğini ifade etmekte; Denklem (6) herhangi bir bağdaki trafik hacminin bu bağ kullanan rotalardaki trafik hacminin toplamına eşit olması durumunu göstermektedir. Ayrıca tüm rota trafik hacimlerinin pozitiflik kısıtı Denklem (7)'de verilmektedir. Denklem (8) ise sinyalize kavşaklardaki faz yeşil süreleri ile yeşillerarası sürelerin toplamının kavşağın devre süresine eşit olması gerektiğini ifade etmektedir.

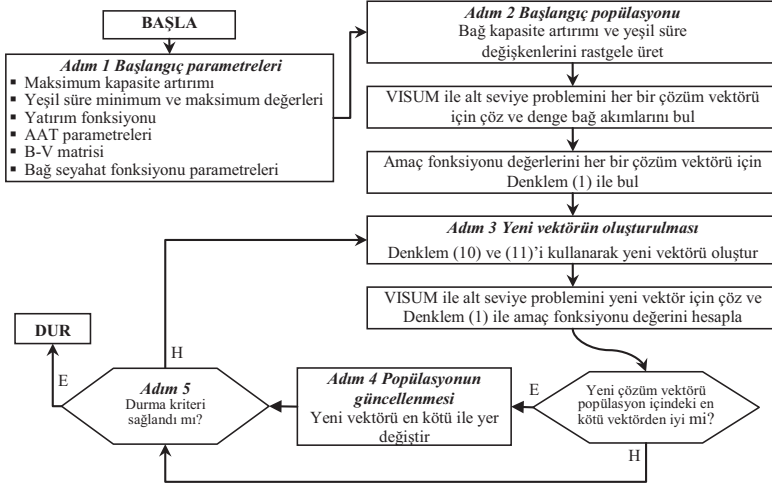
Sezgisel Çözüm Algoritması

Çalışmada bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyon problemlerinin birlikte çözümü amacıyla sezgisel iki seviyeli çözüm algoritması geliştirilmiştir. Visual Basic (VBA) programlama dilinde kodlanan çözüm algoritmasında sinyalize yol ağına ait karar değişkenleri üst seviyede belirlenirken, DKD bağ akımları alt seviyede VISUM (PTV AG, 2014) yazılımı ile belirlenmiştir. Geliştirilen algorithmada sezgisel Armoni Araştırması Tekniği (AAT) kullanılmıştır. Geem ve diğ. (2001) tarafından geliştirilen AAT, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bir orkestrada tüm orkestra elemanlarının birbirleri ile armonik açıdan uyumlu bir şekilde çalmaları ile en estetik melodiye yaklaşıırken, optimizasyon sürecinde en iyi çözüm amaç fonksiyonu değerinin global optimuma giderek yaklaşması sonucu elde edilebilmektedir. AAT sürecinde diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi ilk olarak başlangıç popülasyonu (armoni belleği) rastgele oluşturulur. Çalışmada çözümü yapılan probleme özgü olarak değişkenler dikkate alınarak başlangıç popülasyonu Şekil 1'de verildiği gibi oluşturulmaktadır.

Kapasite artırımı değişkenleri					yeşil süre değişkenleri						
y_{11}	y_{12}	..	..	..	y_{1n}	ϕ_{11}	ϕ_{12}	..	..	..	ϕ_{1m}
y_{21}	y_{22}	..	..	..	y_{2n}	ϕ_{21}	ϕ_{22}	..	..	..	ϕ_{2m}
↓	↓				↓	↓	↓				↓
y_{p1}	y_{p2}	..	..	..	y_{pn}	ϕ_{p1}	ϕ_{p2}	..	..	..	ϕ_{pm}

Şekil 1 Başlangıç popülasyonu

Burada; n ulaşım ağında kapasite artırımına aday bağların sayısını, m sinyalize kavşaklardaki toplam faz sayısını, p ise popülasyon büyüklüğünü ifade etmektedir. Geliştirilen sezgisel algorithmada başlangıç popülasyonunun her bir satırı, kapasite artırımı ve faz yeşil süreleri değişkenlerinin maksimum ve minimum sınırları içerisinde rastgele oluşturulur. Sonrasında popülasyon büyüklüğü kadar oluşturulan karar değişkenleri vektörleri VISUM yazılımına aktarılır ve trafik atama modülü çalıştırılarak denge bağ akımları elde edilir. Elde edilen bağ akımları, bağ seyahat süreleri ve yatırım fonksiyonu kullanılarak Denklem (1) yardımıyla tüm vektörler için amaç fonksiyonu değerleri elde edilir. Geliştirilen algoritmanın adımları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2 Algoritma adımları

Yeni vektörün oluşturulması için karar değişkenleri y'_i ve ϕ'_i , $i=1,2, \dots, h$, belli bir olasılık dahilinde mevcut popülasyon içinden rastgele olarak seçilmekte yada çözüm kümesi içinden seçilmektedir. Bunu sağlayan AAT parametresi, Armoni Belleğini Dikkate Alma Oranı (HMCR) olarak ifade edilir. Seçim işleminin nasıl yapıldığı Denklem (10)'da verilmiştir:

$$y'_i \wedge \phi'_i = \begin{cases} y'_i \wedge \phi'_i \in \{y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}, \dots, y_{pi}\} \wedge \{\phi_{1i}, \phi_{2i}, \phi_{3i}, \dots, \phi_{pi}\} & \text{rnd}(0,1) \leq \text{HMCR} \\ y'_i \wedge \phi'_i \in \{0 \leq y'_i \leq y_i^{\max}\} \wedge \{\phi_i^{\min} \leq \phi'_i \leq \phi_i^{\max}\} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (10)$$

Bu aşamadan sonra, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığının belirlenmesi için her karar değişkeninin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Karar değişkenleri için bu işlem Ton Ayarlama Oranı (PAR) olarak ifade edilen parametre ile aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

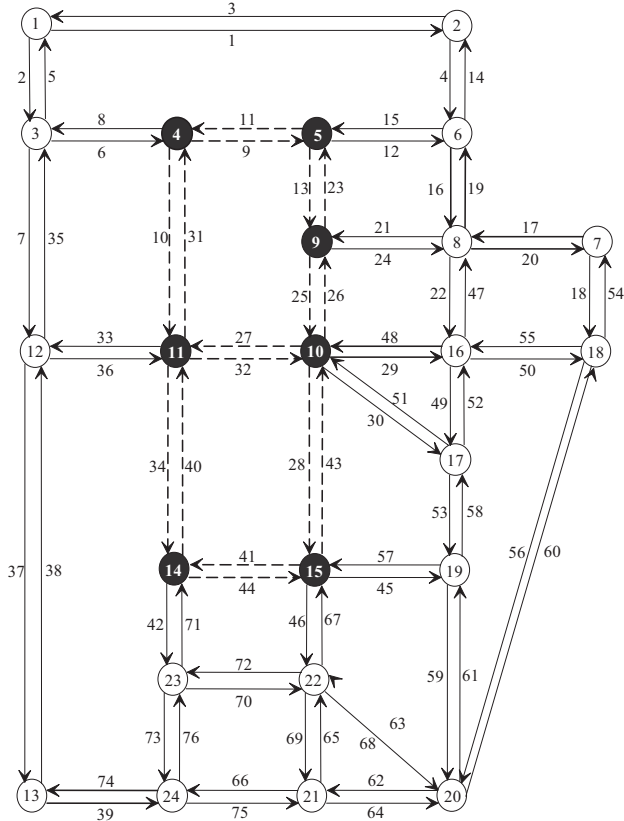
$$y'_i \wedge \phi'_i = \begin{cases} (y'_i \wedge \phi'_i) \pm \text{rnd}(0,1) * b_g & \text{rnd}(0,1) \leq \text{PAR} \\ y'_i \wedge \phi'_i & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (11)$$

Burada; $\text{rnd}(0,1)$ olarak verilen ifade (0-1) arasında üretilen rastgele sayıyı temsil etmekte, b_g ise kullanıcıya özel bant genişliği olarak kullanılmaktadır. Yeni vektör üretildikten sonra amaç fonksiyonu belirlenmekte ve eğer yeni vektör popülasyon içindeki en kötü vektörden daha iyi bir sonuç veriyorsa popülasyona dahil edilmekte ve en kötü vektör popülasyondan çıkarılmaktadır. Son olarak algoritmanın durma koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Koşulun sağlanmaması durumunda, Adım 3 ile 5 arasındaki işlemler istenen koşul sağlanıncaya yada verilen maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar tekrar edilir.

Sayısal Uygulama

Geliştirilen algoritmanın test edilmesi amacıyla 24 düğüm, 76 bağ ve 552 B-V çifti olan Sioux Falls ulaşım ağı seçilmiş ve Şekil 3'de verilmiştir. Bağ parametreleri ve B-V matrisi Başkan (2014)'den alınmıştır. Şekilden görülebileceği gibi kesikli çizgi ile belirtilen bağlar

kapasite artırımına aday bağlar olup bunlar arasındaki koyu olarak belirtilen düğümler sinyalizasyon kavşakları olarak seçilmiştir. 4,5,9 ve 14 nolu kavşaklar 3 fazlı, diğerleri 4 fazlı olarak düzenlenmiştir. Bağ seyahat maliyet fonksiyonu olarak Denklem (9)'da verilen fonksiyon kullanılmıştır.



Şekil 3 Sioux Falls ulaşım ağı

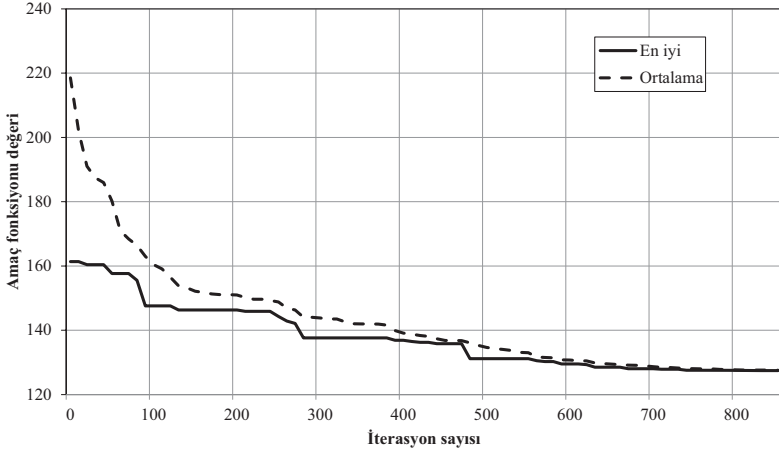
Sioux Falls ulaşım ağı için kullanılan üst seviye amaç fonksiyonu literatürle uyumlu olarak Denklem (12)'de verilmiştir. Faz yeşil süre minimum ve maksimum değerleri 7 ve 40 sn, yeşillerarası süre ise 5 sn olarak seçilmiş ve devre süreleri buna bağlı olarak her bir sinyal çözüm vektörü için belirlenmiştir. Maksimum kapasite artırımını ise 20 olarak seçilmiştir (Başkan, 2014).

$$\min_y Z(x, y, \psi) = \sum_{a \in A} (t_a(x_a, y_a)x_a + 0.001d_a y_a^2) \quad (12)$$

$$0 \leq y_a \leq y_a^{\max}, \quad \forall a \in A \quad (13)$$

$$\phi_m^{\min} \leq \phi_m \leq \phi_m^{\max}, \quad \forall m \in M \quad (14)$$

Alt seviye problemi olarak ifade edilen DKD trafik atama problemi VISUM yazılımı ile çözülmüştür. t . iterasyonda armoni belleği içindeki en iyi amaç fonksiyonu değeri ile ortalama değer arasındaki göreceli hatanın 0.001'den küçük olması durumunda algoritma sonlandırılmıştır. HMCR, PAR ve p parametreleri 0.90, 0.40 ve 10 olarak seçilmiştir. Önerilen algoritmanın Sioux Falls ulaşım ağına uygulanması neticesinde elde edilen amaç fonksiyonu yakınsama grafiği Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4 Sioux Falls ağı yakınsama grafiği

Geliştirilen algoritmanın çalıştırılması neticesinde verilen durma kriteri 850. iterasyonda sağlanmış ve algoritma sonlandırılmıştır. Algoritmanın başlangıç belleğini oluşturmasından sonra elde edilen en iyi ve ortalama değerler yaklaşık 160 ve 220 iken özellikle ilk 400 iterasyon sonunda AAT'nin operatörleri sayesinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. 850 iterasyon sonunda amaç fonksiyonu değeri yaklaşık 127 olarak elde edilmiş ve başlangıç değerine göre yaklaşık % 20 iyileşme elde edilmiştir. Elde edilen optimum bağ kapasite artırımı değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Bağ kapasite artırımları

Bağ No	y_a	Bağ No	y_a
9	8.29	27	3.72
11	0.00	32	7.77
13	1.63	34	10.47
23	0.29	40	8.84
25	11.52	28	1.94
26	6.16	43	1.36
10	0.00	44	2.57
31	4.05	41	2.60

Çözüm sonunda en fazla kapasite artırımının ağın performansı açısından 9 ve 10 nolu kavşaklar arasındaki 25 nolu bağ ile 11 ve 14 nolu kavşaklar arasındaki 34 nolu bağda yapılmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Ayrıca kapasite artışına aday olan bağlar arasındaki sinyalize kavşaklardaki optimum sinyal süreleri belirlenmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen denge bağ akımları ise Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca kapasite artırımına aday bağların denge akımları Tablo 3'de koyu olarak belirtilmiştir.

Tablo 2 Optimum sinyal süreleri

Kavşak No	Devre süresi (sn)	Faz No	Yeşil başlangıç (sn)	Yeşil bitiş (sn)	Kavşak No	Devre süresi (sn)	Faz No	Yeşil başlangıç (sn)	Yeşil bitiş (sn)
4	113	1	0	40	10	75	1	0	13
		2	45	66			2	18	25
		3	71	108			3	30	53
5	94	1	0	17	11	144	4	58	70
		2	22	62			1	0	40
		3	67	89			2	45	61
9	50	1	0	17	15	100	3	66	106
		2	22	29			4	111	139
		3	34	45			1	0	18
14	42	1	0	13	15	100	2	23	44
		2	18	25			3	49	62
		3	30	37			4	67	95

Tablo 3 Denge bağ akımları

Bağ No	Hacim (10^3 tş/sa)	Bağ No	Hacim (10^3 tş/sa)	Bağ No	Hacim (10^3 tş/sa)
1	5.85	27	24.30	53	9.64
2	8.42	28	20.60	54	17.40
3	4.73	29	11.20	55	22.20
4	7.83	30	8.64	56	22.30
5	9.54	31	9.81	57	16.50
6	13.70	32	18.10	58	11.30
7	14.00	33	9.3	59	10.40
8	17.50	34	15.30	60	23.10
9	20.40	35	11.30	61	8.81
10	4.17	36	12.50	62	7.69
11	18.70	37	15.80	63	8.51
12	9.20	38	16.50	64	7.44
13	18.50	39	12.00	65	9.66
14	6.71	40	11.60	66	10.80
15	11.40	41	8.03	67	22.50
16	14.10	42	7.98	68	7.86
17	13.50	43	21.30	69	8.31
18	20.30	44	8.00	70	11.40
19	15.20	45	19.80	71	4.26
20	16.40	46	18.50	72	9.43
21	3.42	47	8.78	73	9.25
22	9.96	48	16.90	74	12.60
23	14.60	49	11.80	75	11.90
24	8.57	50	18.50	76	7.49
25	18.40	51	9.78		
26	19.80	52	12.40		

Tablo 2'den görülebileceği gibi en yüksek devre süreleri 4 ve 11 nolu kavşaklarda elde edilmiştir. Ancak bu değerlerin kavşak faz diyagramlarına bağlı olarak değişebileceği açıktır. Ayrıca bu çalışmada tüm sinyalizasyon kavşakları izole olarak değerlendirilmiştir. Kavşakların koordine olarak düzenlenmiş olması durumunda sonuçların farklı olacağı ve bu durumun göz önüne alınarak sinyalizasyon ağı tasarımının yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Sonuçlar

Bu çalışmada bağ kapasite artırımı ve sinyal optimizasyonu problemlerinin eşzamanlı çözümü amacıyla iki seviyeli sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Üst seviyede toplam ağ seyahat süresi ve yatırım fonksiyonundan oluşan amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi amacıyla AAT'den faydalanılmıştır. DKD trafik ataması alt seviye problemi olarak ifade edilmiş ve çözüm için VISUM yazılımı kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma VBA programlama dilinde kodlanmış ve test edilmesi amacıyla Sioux Falls ulaşım ağına uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar sinyal optimizasyonu ve bağ kapasite artırımı problemlerinin eşzamanlı çözümünde geliştirilen algoritmanın kullanılabilirliğini göstermiştir.

Teşekkür

VISUM 14 yazılımının akademik olarak kullanımını sağlayan Planung Transport Verkehr (PTV) AG'ye teşekkür ederiz.

EK: Notasyon

A	Bağlar kümesi
K_{rs}	B-V çifti $rs \forall r \in R, s \in S$ arasındaki rotalar kümesi
R	Başlangıç kümesi
S	Variş kümesi
M	Faz kümesi, $\forall m \in M$
N	Kapasite artırımına aday bağlar kümesi, $\forall n \in N$
L	Sinyalize kavşaklar kümesi, $\forall l \in L$
$\psi(\phi, \zeta)$	Sinyal değişkenleri
\mathbf{D}	B-V talepleri vektörü, $\mathbf{D} = [D_{rs}] \forall r \in R, s \in S$
\mathbf{f}	Rota akımları vektörü, $\mathbf{f} = [f_k^{rs}] \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs}$
\mathbf{t}	Bağ seyahat süreleri vektörü, $\mathbf{t} = [t_a(x_a, y_a)] \forall a \in A$
\mathbf{x}	Denge bağ akımları vektörü, $\mathbf{x} = [x_a] \forall a \in A$
\mathbf{y}	Bağ kapasite genişletme vektörü, $\mathbf{y} = [y_a] \forall a \in A$
ϕ	Yeşil süre vektörü
d_a	Maliyet katsayısı, $\forall a \in A$
θ_a	Bağ kapasitesi, $\forall a \in A$
Z	Üst seviye amaç fonksiyonu
z	Alt seviye amaç fonksiyonu
I	Yeşillerarası süre
ρ	Yatırım maliyetinden seyahat süresine dönüşüm faktörü
$g_a(y_a)$	Yatırım fonksiyonu, $\forall a \in A$
$\delta_{a,k}^{rs}$	Bağ-rotalı belirleme matrisi değişkeni, $\forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs}, a \in A$
α_a, β_a	Bağ maliyet fonksiyonu parametreleri, $\forall a \in A$
ϕ^{\min}	Minimum yeşil süre
ϕ^{\max}	Maksimum yeşil süre
ζ_l	Devre süresi, $\forall l \in L$
h	Üst seviye karar değişkenlerinin toplam sayısı
p	Popülasyon büyüklüğü (armoni belleği)
u	maksimum iterasyon sayısı

Kaynaklar

- Abdulaal, M. and LeBlanc, L. (1979) Continuous equilibrium network design models. Transportation Research Part B, 13, pp. 19-32.
- Allsop, R. E. and Charlesworth, J. A. (1977) Traffic in a signal-controlled road network: an example of different signal timings including different routings. Traffic Engineering Control, 18(5), pp. 262-264.
- Başkan, Ö. (2013a) Birleştirilmiş Ulaşım Ağ Tasarım Probleminin Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Çözümü, 10. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 301-311, ISBN: 978-605-01-0507-0, 25-27 Eylül, İzmir.
- Baskan, O. (2013b) Determining Optimal Link Capacity Expansions in Road Networks Using Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights. Journal of Applied Mathematics, vol. 2013, Article ID 718015, 11 pages.
- Baskan, O. (2014) Harmony search algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(1), pp. 273-283.
- Chiou, S. W. (2005) Bilevel programming for the continuous transport network design problem. Transportation Research Part B, 39, pp. 361-383.
- Chiou, S. W. (2008a) A hybrid approach for optimal design of signalized road network. Applied Mathematical Modeling, 32, pp. 195-207.
- Chiou, S. W. (2008b) A non-smooth model for signalized road network design problems. Applied Mathematical Modeling, 32, pp. 1179-1190.
- 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.
- Geem, Z. W., Kim, J-H. and Loganathan, G. V. (2001) A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, Simulation, 76(2), pp. 60-68.
- Heydecker, B. G., and Khoo, T. K. (1990) The equilibrium network design problem. Proceedings of AIRO'90 conference on Models and methods for Decision Support, Sorrento, pp. 587-602.
- Karoonsoontawong, A. and Waller, S.T. (2006) Dynamic continuous network design problem-Linear bilevel programming and metaheuristic approaches. Transportation Research Record, 1964(1), pp. 104-117.
- Karoonsoontawong, A. and Waller, S. T. (2010) Integrated Network Capacity Expansion and Traffic Signal Optimization Problem: Robust Bi-level Dynamic Formulation. Networks and Spatial Economics, 10, pp. 525-550.
- 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.

- Ozan, C., Baskan, O., Haldenbilen, S., Ceylan, H. (2015) A modified reinforcement learning algorithm for solving coordinated signalized networks. Transportation Research Part C, 54, pp. 40-55.
- PTV AG. (2014). VISUM 14- User Manual, Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr AG.
- 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.
- Teklu, F., Sumalee, A. and Watling, D. (2007) A genetic algorithm approach for optimizing traffic control signals considering routing. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22, pp. 31-43.
- Wardrop, J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part II, Vol. 1, pp. 325-378.
- Yang, H. and Yagar, S. (1995) Traffic assignment and signal control in saturated road networks. Transportation Research Part A, 29(2), pp. 125-139.
- Ziyou, G. and Yifan, S. (2002) A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice. Transportation Research Part B, 36, pp. 313–323.

