



KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU İLE ULAŞIM AĞ TASARIMI

Özgür BAŞKAN

Ekim, 2009
DENİZLİ

**KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU İLE
ULAŞIM AĞ TASARIMI**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Özgür BAŞKAN

Danışman: Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN

**Ekim, 2009
DENİZLİ**

DOKTORA TEZİ ONAY FORMU

Özgür BAŞKAN tarafından Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN yönetiminde hazırlanan “**Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Ulaşım Ağ Tasarımı**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Serdal TERZİ
Jüri Üyesi

Doç. Dr. Halim CEYLAN
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Hakan ASLAN
Jüri Üyesi

Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN
Jüri Üyesi (Danışman)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Halil KARAHAAN
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza



Öğrenci Adı Soyadı : Özgür BAŞKAN

TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca destek ve görüőlerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak ufkumun gelişmesine yardımcı olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN'e Őükranlarımı sunarım.

Çalışma konusu üzerine olan engin bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak benden yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Halim CEYLAN'a teşekkür ederim. Ayrıca tezin ilerleme sürecindeki önemli katkı ve yorumları için sayın hocam Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmamın başlangıcından tamamlanma aşamasına kadar, her zaman varlığını yanımda hissettiğim sevgili eşim Dr. Meltem BİLİCİ BAŞKAN'a, ayrıca tez çalışmam boyunca bana moral ve destek veren sevgili arkadaşım Mutlu YAŐAR'a, bu günlerimi borçlu olduğum sevgili anneme, babama ve ağabeyime teşekkür ederim.

Sevgili eşim ve yakında dünyaya gelecek oğluma.....

ÖZET

KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU İLE ULAŞIM AĞ TASARIMI

BAŞKAN, Özgür
Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN

Ekim 2009, 140 sayfa

Çalışmada ulaşım ağ tasarımı probleminin çözümü ve en iyi sinyal sürelerinin elde edilmesi için modifiye edilmiş karınca kolonisi optimizasyonu kullanılmıştır. Sinyal süreleri her bir kavşaktaki devre ve faz yeşil süreleri olarak tanımlanmıştır. Ardışık ortalamalar yöntemi kullanılarak stokastik kullanıcı dengesi ataması yapılmış ve sürücü davranışlarının temsil edilmesinde probit rota seçim modeli kullanılmıştır. Seçim olasılıklarının elde edilmesi için Monte Carlo simülasyon yönteminden faydalanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak sistem optimum formülasyonu kullanılmıştır.

Karınca kolonisi optimizasyonu metodunun sinyal kontrol problemine adaptasyonu ile elde edilen KAKOSKA modeli ağ tasarımı probleminin çözümü için önerilmiştir. İki seviyeli programlama metodu ve karşılıklı iteratif yaklaşım ağ tasarımı probleminin çözümü için kullanılmıştır. Bu amaçla KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri önerilmiştir. Önerilen modellerin etkinliğini ve çözüm yeteneğini göstermek için test ulaşım ağı seçilmiştir. Her iki modelle elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlara göre ağ tasarımı probleminin çözümünde her iki modelle elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin oldukça benzer olduğu görülmüştür. KAKOSKA-1 modelinden elde edilen devre süreleri KAKOSKA-2 modeline oranla ortalama %17 daha düşük bulunmuştur. Bu nedenle KAKOSKA-1 modeli örnek ulaşım ağına sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması için seçilmiştir.

Sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Link tabanlı fiyatlandırma ile talep artışı senaryolarına bağlı olarak ağ toplam maliyetinde iyileşmeler gözlemlenmesine rağmen talep artışının %40'ı aşması durumunda marjinal faydaların azalmasından dolayı toplam maliyetlerde iyileşme olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ulaşım ağ tasarımı, karınca kolonisi optimizasyonu, sıkışıklık fiyatlandırması

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
Doç. Dr. Serdal TERZİ
Doç. Dr. Halim CEYLAN
Yrd. Doç. Dr. Hakan ASLAN
Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN

ABSTRACT**NETWORK DESIGN USING ANT COLONY OPTIMIZATION**

BASKAN, Ozgur

Ph. D. Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Soner HALDENBILEN

October 2009, 140 Pages

The modified ant colony optimization approach to solve the network design problem is used to tackle the optimization of signal timings with equilibrium link flows. Signal timing is defined by the cycle time and the green time for each junction and stage, respectively. Stochastic user equilibrium assignment is solved by way of the method of successive averages method. Probit route choice model is used in order to illustrate of driver's behavior. Monte- Carlo simulation method is used to find route choice probabilities of the probit model. The objective function is adopted as the system optimum formulation.

By integrating the ant colony optimization, traffic assignment and traffic control, the proposed KAKOSKA model solves the network design problem. The bi-level programming method and mutually consistent approach are used to solve the network design problem. KAKOSKA-1 and KAKOSKA-2 models are developed for this purpose, respectively. Test road network has been chosen to illustrate the effectiveness and robustness of the proposed models and comparisons of the values of the objective functions have been made. Results from test road network, with and without congestion has shown the effectiveness and efficiency of the proposed ant colony optimization method as values of the objective function were similar to the mutually consistent calculations. However, the cycles times obtained from the KAKOSKA-1 model were about 17% less than the values from the KAKOSKA-2 model. Therefore, KAKOSKA-1 model was chosen to implement congestion pricing to the test road network.

A novel approach is proposed in order to implement the congestion pricing to the test network. The improvements have been observed on the total cost of the network depending on the different demand scenarios according to the base demand using link-based pricing. However, when the demand is increased more than 40% there is no improvement of the total cost since the decrease on the range of marginal cost.

Keywords: Network design problem, ant colony optimization, congestion pricing

Prof. Dr. Mustafa KARASAHIN

Assoc. Prof. Dr. Serdal TERZI

Assoc. Prof. Dr. Halim CEYLAN

Asst. Prof. Dr. Hakan ASLAN

Assoc. Prof. Dr. Soner HALDENBILEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İçindekiler	vii
Şekiller Dizini	ix
Tablolar Dizini	x
Simgeler ve Kısaltmalar Dizini	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Ulaşım Ağ Tasarımı	1
1.2. Problemin Tanımı	4
1.3. Amaç	8
1.4 Tezin Düzenlenmesi	9
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
2.1. Giriş	11
2.2. Ulaşım Ağ Tasarımı	12
2.2.1. İki Seviyeli Programlama	15
2.2.2. Karşılıklı İteratif Yaklaşım	17
2.3. Trafik Atama	19
2.3.1. Link Maliyet Fonksiyonu	21
2.3.2. Deterministik Trafik Ataması	23
2.3.3. Stokastik Trafik Ataması	25
2.4. Rota Seçim Modelleri	26
2.4.1. Rota Seçimi	26
2.4.2. Logit Model	27
2.4.3. C-Logit Model	28
2.4.4. Cross- Nested Logit Model	29
2.4.5. Logit Kernel Model	30
2.4.6. Rota Ölçekli Logit Model	31
2.4.7. Çok Değişkenli Probit Model	32
2.5. Stokastik Kullanıcı Dengesi Modelleri	35
2.5.1. Logit Stokastik Kullanıcı Dengesi Modeli	35
2.5.2. Probit Stokastik Kullanıcı Dengesi Modeli	37
2.6. Sıkışıklık Fiyatlandırması	43
2.7. KAKOSKA Modelinin Genel Çerçevesi	44
2.8. Sonuçlar	46
3. KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU	47
3.1. Giriş	47
3.2. Karınca Kolonisi Optimizasyonu	47
3.3. Modifiye Karınca Kolonisi Optimizasyonu Metodu	52
3.4. KKO Metodunun Sinyal Kontrol Problemine Uyarlanması	58
3.4.1. KAKOSKA Duyarlılık Analizi	67
3.5. Sonuçlar	70

4. PROBLEM FORMÜLASYONU VE MODEL GELİŞİMİ	71
4.1. Giriş	71
4.2. Trafik Atama Modelleri.....	71
4.2.1. Karınca Kolonisi Optimizasyonu Trafik Atama Modeli	71
4.2.2. Sheffi Algoritması.....	76
4.2.3. Ardışık Ortalamalar Yöntemi Trafik Atama Modeli	78
4.2.4. AOYTAM Duyarlılık Analizi.....	80
4.3. UAT Çözüm Algoritmaları	82
4.3.1. UAT Probleminin İki Seviyeli Programlama İle Çözülmesi	82
4.3.2. UAT Probleminin KİY Yaklaşımı İle Çözülmesi.....	86
4.4. Sonuçlar.....	88
5. SAYISAL UYGULAMA	90
5.1. Giriş	90
5.2. KAKOSKA-1 Modeli Sayısal Uygulama	90
5.2.1. Koloni Büyüklüğünün KAKOSKA-1 Modeline Etkisi	100
5.2.2. Sürücü Algılama Hatalarının KAKOSKA-1 Modeline Etkisi.....	102
5.3. KAKOSKA-2 Modeli Sayısal Uygulama	106
5.4. Sıkışıklık Fiyatlandırması Modeli	111
5.5. Sonuçlar.....	120
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	123
6.1. Giriş	123
6.2. Sonuçlar.....	123
6.3. Gelecek Çalışmalar.....	127
KAYNAKLAR	129
EKLER.....	137
Ek-1 Konveks Küme ve Fonksiyon Tanımı.....	138
ÖZGEÇMİŞ	140

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Trafik atama ve sinyal kontrolü arasındaki ilişki	3
Şekil 2.1 Nod numaralandırılması	19
Şekil 2.2 Ulaşım ağı.....	26
Şekil 2.3 KAKOSKA modeli genel çerçevesi	45
Şekil 3.1 Genel karınca algoritması	48
Şekil 3.2 Gerçek karınca davranışları	49
Şekil 3.3 KKO algoritması.....	53
Şekil 3.4 KKO algoritması akış şeması	54
Şekil 3.5 Örnek ulaşım ağı.....	64
Şekil 3.6 Faz diyagramı	64
Şekil 3.7 KAKOSKA modeli yakınsama grafiği	66
Şekil 3.8 KAKOSKA farklı koloni büyüklüğü yakınsama grafiği	67
Şekil 3.9 Farklı koloni büyüklüklerine bağlı faz süreleri değişimi.....	68
Şekil 3.10 En iyi amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi	69
Şekil 4.1 KAKOTAM akış şeması	72
Şekil 4.2 Örnek ulaşım ağı.....	73
Şekil 4.3 KAKOTAM amaç fonksiyonu değişimi.....	75
Şekil 4.4 SA ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi	77
Şekil 4.5 AOYTAM ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi	79
Şekil 4.6 MCSS-CPU süresi ilişkisi	82
Şekil 4.7 KAKOSKA-1 modeli	85
Şekil 4.8 KAKOSKA-2 modeli	88
Şekil 5.1 Ulaşım ağı.....	92
Şekil 5.2 Faz diyagramı	93
Şekil 5.3 KAKOSKA-1 modeli yakınsama grafiği.....	95
Şekil 5.4 Senaryolara göre amaç fonksiyonu değişimi.....	98
Şekil 5.5 $r=30$ değerine göre amaç fonksiyonu değişimi	100
Şekil 5.6 KAKOSKA-2 yakınsama grafiği.....	106
Şekil 5.7 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli amaç fonksiyon değerleri	109
Şekil 5.8 KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri ile elde edilen devre süreleri	109
Şekil 5.9 Sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu marjinal faydaların değişimi	120
Şekil Ek-1.1 Konveks olma durumu	138

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Modifiye edilmiş KKO metodu ile karşılaştırılan algoritmalar	55
Tablo 3.2a İki boyutlu test problemleri	56
Tablo 3.2b Çok boyutlu test problemleri	56
Tablo 3.3a İki boyutlu test problemlerin sonuçları	57
Tablo 3.3b Çok boyutlu test problemlerin sonuçları.....	58
Tablo 3.4 Ulaşım ağı bilgileri.....	65
Tablo 3.5 Sabit link trafik hacimleri	65
Tablo 3.6 Optimum sinyal parametreleri.....	66
Tablo 3.7 KAKOSKA farklı koloni büyüklüğü CPU süreleri	67
Tablo 3.8 Farklı β değerleri	69
Tablo 4.1 Ulaşım ağı bilgileri.....	74
Tablo 4.2 KAKOTAM ile elde edilen denge link trafik hacimleri	75
Tablo 4.3 SA ile elde edilen SKD denge link trafik hacimleri.....	77
Tablo 4.4 AOYTAM ile elde edilen SKD denge link trafik hacimleri	80
Tablo 4.5 Farklı β değerleri için AOYTAM ile elde edilen SKD link trafik hacimleri .	80
Tablo 4.6 Farklı MCSS değerleri için AOYTAM SKD link trafik hacimleri.....	81
Tablo 5.1 B-V talepleri.....	91
Tablo 5.2 Ulaşım ağına ait karakteristik özellikler	91
Tablo 5.3 KAKOSKA-1 karar değişkenleri	94
Tablo 5.4 KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doğunluk dereceleri	96
Tablo 5.5 KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri	96
Tablo 5.6 Senaryolara göre denge link trafik hacimleri ve doğunluk dereceleri	97
Tablo 5.7 Senaryolara göre en iyi sinyal parametreleri.....	99
Tablo 5.8 Farklı koloni büyüklükleri için en iyi amaç fonksiyonu değerleri.....	100
Tablo 5.9 Farklı koloni büyüklüklerine göre elde edilen denge link trafik hacimleri..	101
Tablo 5.10 Farklı koloni büyüklüklerine göre elde edilen en iyi sinyal parametreleri	102
Tablo 5.11 Farklı β değerleri için devre süresi ve en iyi amaç fonksiyon değerleri	103
Tablo 5.12 Farklı β değerleri için denge link trafik hacimleri	103
Tablo 5.13 Farklı β değerleri için link doğunluk dereceleri.....	104
Tablo 5.14 Farklı β değerleri için en iyi sinyal parametreleri	105
Tablo 5.15 KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri	106
Tablo 5.16 KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doğunluk dereceleri	107
Tablo 5.17 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doğunluk dereceleri	108
Tablo 5.18 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri	110
Tablo 5.19 Sıkışıklık fiyatlandırması karar değişkenleri	112
Tablo 5.20 B-V talebinin %10 artması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen denge link trafik hacimleri ve doğunluk dereceleri	114

Tablo 5.21 B-V talebinin %10 artması durumunda en iyi link ücretlendirmeleri.....	115
Tablo 5.22 B-V talebinin %10 artması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi sinyal parametreleri	116
Tablo 5.23a Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen denge link trafik hacimleri	116
Tablo 5.23b Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen link doygunluk dereceleri	117
Tablo 5.24 Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi link fiyatlandırmaları	117
Tablo 5.25 Senaryolara göre sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi sinyal parametreleri	118
Tablo 5.26 Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen gelir	119
Tablo 5.27 Senaryolara bağlı olarak ağ maliyetleri.....	119

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Katsayı matrisi
a	Alternatif özellikleri vektörü
A_k	Rota k üzerindeki linkler kümesi
a_{ij}	A matrisinin i . satır ve j . sütununda bulunan eleman
AOY	Ardışık ortalamalar yöntemi
AOYTAM	Ardışık ortalamalar yöntemi trafik atama modeli
BPR	Amerikan karayolları bürosu
B-V	Başlangıç-varış
B	Alt üçgen matris
b_{ij}	B matrisinin i . satır ve j . sütununda bulunan eleman
c_a	a linkinin kapasitesi
c_s	Link maliyet fonksiyonu
c	Devre süresi vektörü
c_w	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki ölçülebilen rota seyahat maliyet vektörü
c_w^r	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotasındaki gerçek seyahat maliyeti
C_w^r	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotasındaki algılanan seyahat maliyeti
C^{rs}	Herhangi bir $r-s$ B-V çifti arasındaki algılanan seyahat süreleri vektörü
c^{rs}	Herhangi bir $r-s$ B-V çifti arasındaki ölçülebilen seyahat süreleri vektörü
C_k^{rs}	Herhangi bir $r-s$ B-V çifti arasındaki k rotasındaki algılanan seyahat maliyeti
c_k^{rs}	Herhangi bir $r-s$ B-V çifti arasındaki k rotasındaki ölçülebilen seyahat maliyeti
$c_{k,l}^{rs}$	Herhangi bir $r-s$ B-V çifti arasındaki k ve l rotalarının ortak kullandıkları linkler üzerinde ölçülen seyahat maliyetleri
C_{mn}	M adet kümeye ayrılmış n adet seçim alternatifi seti
CF	Benzerlik faktörü
CPU	Merkezi işlem birimi
ÇDL	Çok değişkenli logit
ÇDND	Çok değişkenli normal dağılım
ÇU	Çözüm uzayı
DKD	Deterministik kullanıcı dengesi
F	Faktör matrisi
f_k^*	n .iterasyonda k rotasındaki denge akımı

f_k	n .iterasyonda k rotasındaki akım
f_k^w	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki k rotasındaki akım
f_k^{w*}	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki k rotasındaki denge akımı
G	Toplam gelir
GA	Genetik algoritma
GHK	Geweke-Hajivassiliou-Keane simülâtörü
g	Yeşil süre vektörü
g_w	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki seyahat talebi
h_w^r	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotasındaki akım
h	Rota akımları vektörü
I	Birim matris
İS	İterasyon sayısı
K	Durma kriteri
KAKOSKA	Karınca kolonisi optimizasyonu sinyal kontrol algoritması
KAKOTAM	Karınca kolonisi optimizasyonu trafik atama modeli
KD	Karar değişkeni
KİY	Karşılıklı iteratif yaklaşım
KKO	Karınca kolonisi optimizasyonu
K_{rs}	r - s B-V çiftini bağlayan rotalar kümesi
KS	Karınca sistemi
KUAT	Kesikli ulaşım ağ tasarımı
l_a	Link a 'nın uzunluğu
$L_{kk'}$	k ve k' rotalarının ortak kullandıkları linklerin uzunluğu (maliyeti)
L_k	k rotasının uzunluğu (maliyeti)
$L_{k'}$	k' rotasının uzunluğu (maliyeti)
LK	Logit kernel
MCSS	Monte Carlo simülasyon sayısı
m	Karınca vektörü
M	Karınca çözüm matrisi
N_k	k rotasının kaydedilme sayısı
N	Monte Carlo simülasyon sayısı
p	Doygunluk dereceleri vektörü
PFE	Rota akım tahmin edicisi
PI	Performans indeksi
P_k	k rotasının seçim olasılığı
Pr	Olasılık
PSM	Probit stokastik model
ROL	Rota ölçekli logit
P_w^r	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotasının seçim olasılığı
q_{rs}	Herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki seyahat talebi
R_w	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki rotalar kümesi
R	Üçgen matris
r	Koloni büyüklüğü
s	Doygun akım değeri
S	Rastgele değişken matrisi

s	Rastgele değişken vektörü
S	Linkler kümesi
S_k	Rota k 'nın büyüklüğü
SA	Sheffi algoritması
SKD	Stokastik kullanıcı dengesi
SUAT	Sürekli ulaşım ağ tasarımı
TA	Trafik atama
TB	Tavlama benzetimi
TAR	Tabu arama
T_a	a linkinin algılanan maliyeti
t_a	a linkinin ölçülebilen maliyeti
t_a^*	Fiyatlandırılmış link maliyeti
t_a^0	a linkinin serbest akım süresi
T	Algılanan link seyahat süreleri vektörü
t	Ölçülebilen link seyahat süreleri vektörü
U	Fayda vektörü
U_k	k alternatifinin algılanan faydası
U_l	l alternatifinin algılanan faydası
U_i	i alternatifinin algılanan faydası
UAT	Ulaşım ağ tasarımı
UCTS	Şehir trafik kontrol sistemi
VI	Varyasyonel eşitsizlik
v_a	a linki üzerindeki akım
V_k	k rotasının ölçülebilen faydası
V_i	i alternatifinin ölçülebilen faydası
v_s	s linki üzerindeki akım
v	Logit Kernel model gumbel değişkenleri vektörü
$X_a^{(l)}$	l . uygulamada a linki üzerindeki akım
$x_a^{(l)}$	l . uygulamada a linkinin ortalama akımı
X	Dışsal değişkenler matrisi
x_a	a linki üzerindeki denge link akımı
x	Denge link akımları vektörü
x_t^k	t . iterasyondaki k . karınca
Ω	Olası rotalar kümesi
θ	Dağılım parametresi
δ_w^{sr}	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki link-rota belirleme matrisi elemanı
$\gamma_{a,k}^{rs}$	Herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki link-rota belirleme matrisi elemanı
$\sigma_a^{(l)}$	l . uygulamada a linkinin standart sapması
β	Varyans sabiti
ξ_w^r	Herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotası üzerindeki seyahat maliyetini algılama hatası

γ	C-logit model parametresi
α_{im}	m kümesi için Cross-Nested Logit model parametresi
ξ_{in}	Cross-Nested Logit model bağımsız hata terimi
$\xi_{c_{mn}}$	Cross-Nested Logit model bağımsız hata terimi
μ	Cross-Nested Logit model ölçek parametresi
ξ	Logit Kernel model çok değişkenli dağılmış faktör vektörü
ζ	Rota Ölçekli Logit model tahmin parametresi
Σ	Kovaryans matris
Σ'	Link kovaryans matris
Δ^{rs}	Herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki link-rota belirleme matrisi
μ	Ortalama vektör
ξ	Algılama hataları vektörü
β	Kısıt vektörü
τ_t	t . iterasyondaki feromon miktarı
α	Sıçrama uzunluğu
Ψ	Sinyal parametreleri vektörü
ϕ_a	a linkinin birim ücreti
Φ	Link ücretleri vektörü

1. GİRİŞ

1.1. Ulaşım Ağ Tasarımı

Motorlu araç kullanımındaki artış, ekonomik hareketlilik ve gelişen teknoloji ulaşım talebinin artmasına neden olmaktadır. Talep artışı, ulaşım alt yapılarında hizmet kalitesinde düşüşle başlayan problemleri de beraberinde getirmektedir. Bunlar arasında seyahat süresinin artması, kapasite ve güvenlik düzeyinin azalması gibi ölçülebilen etkilerin yanında enerji kaybı, olumsuz çevresel etkiler ve sürücü psikolojilerinin bozulması gibi ölçülmesi zor etkilerde sayılabilir. Ulaşım ağlarında karar vericiler ve kullanıcılar sürekli etkileşim içindedirler. Karar vericiler ağın performansını artıracak politikalar üretmek yönünde çaba sarf ederken ağ kullanıcıları ise kendi seyahat konforlarını ve sürelerini iyileştirecek şekilde hareket etmek istemektedirler. Bu nedenle Ulaşım Ağ Tasarımı (UAT) için ağ kullanıcıları ve karar vericilerin davranışlarının karşılıklı olarak dikkate alınması oldukça önemlidir.

UAT ağ kullanıcıları ve karar vericilerinin kararlarının karşılıklı olarak etkileşim için de olduğu varsayımı altında ulaşım ağının rasyonel biçimde tasarımı olarak tanımlanabilir. Ağ tasarımı sonucunda optimum tasarım parametrelerinin bulunması ile kullanıcıların seyahatleri sırasında ulaşım ağında en çok zaman kaybettiği kavşaklardaki gecikmeler minimum seviyelere indirgenebilmektedir.

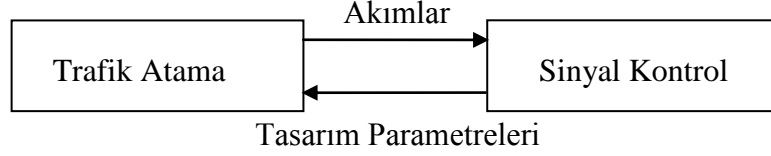
Şehir içi ulaşım ağlarında trafik akımlarının kesiştiği kısımlar olan kavşaklar genel olarak sinyalize ve sinyalize olmayan kavşaklar olarak ikiye ayrılmaktadır. Sinyalize kavşaklar kontrolsüz kavşaklarda kontrolü sağlamak, meydana gelebilecek kazaları önlemek ve kavşaklarda meydana gelen gecikmeleri azaltmak amacı ile

kullanılmaktadır. Sinyalize olarak düzenlenen bir kavşağın kapasitesi genellikle sadece trafik işaretleri ile kontrol edilen aynı geometrideki kontrolsüz kavşağın kapasitesinden daha yüksektir. Sinyalizasyon sistemleri kontrol ettikleri kavşakların durumuna göre izole ve koordine sistemler olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. İzole sinyalizasyon sistemleri yakınındaki diğer kavşaklarda kurulmuş bulunan başka sinyalizasyon sistemleri ile herhangi bir bağlantısı olmayan ve diğer sinyalize tesislerin etkilemediği sistemdir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde şehir içi kontrollü kavşakların birçoğunda izole sinyalizasyon sistemlerinden biri olan sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri kullanılmakta ve gerekli trafik sayımı ve modelleme çalışmaları yapılmadan işletilmektedir. Bu durum özellikle farklı yoğunlukta trafik yüküne sahip kavşaklarda yoğun kavşak kolları ile daha az trafik yükü olan kavşak kolları arasında aynı tasarım parametrelerinin uygulanmasından dolayı gecikmelerin ve buna bağlı olarak trafikteki sıkışıklığın artması sonucunu doğurmaktadır. Bu nedenle şehir içi trafik yönetiminde ulaşım ağının tasarımı, optimum sinyal parametrelerinin belirlenmesi ve sinyalize kavşaklardaki gecikmelerin azaltılması oldukça önemlidir.

UAT probleminin çözümü, konveks olmayan (Bkz. Ek-1) yapısından dolayı oldukça zor ve karmaşıktır. *Atama problemi* sırasında çözümü yapılacak ulaşım ağının özelliklerini en iyi şekilde yansıtan link maliyet fonksiyonlarının seçimi ve UAT probleminin çözümünde kullanılacak olan amaç fonksiyonu için gerekli yakınsamanın sağlanabilmesi oldukça önemlidir. UAT probleminin çözümü için literatürde farklı birçok metot bulunmaktadır. Bunlardan biri olan iki seviyeli programlama son yıllarda literatürde oldukça fazla yer bulan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde sinyal kontrolü ve Trafik Atama (TA) problemlerinin çözümü genellikle birbirinden ayrı olarak gerçekleştirilmektedir. İki problemin çözümü sırasında aslında girdi olarak kullanılan değerler diğer problemin çözümünden elde edilen çıktı değerleridir.

Bu çalışmada UAT çözümü için iki seviyeli programlama tekniği kullanılmış ayrıca karşılaştırma yapılması açısından Karşılıklı İteratif Yaklaşım (KIY) yaklaşımı ile çözüm gerçekleştirilmiştir. İki seviyeli programlama içinde alt seviye TA problemini temsil ederken, üst seviye alt seviyenin çözümü ile elde edilen link akımlarına bağlı olarak ağ tasarım parametrelerinin optimum değerlerinin belirlendiği bölümü temsil etmektedir. Şekil 1.1' de görüldüğü gibi denge link akımları sinyal kontrolünde girdi olarak

kullanılırken tasarım parametreleri ise trafik atama probleminde girdi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Trafik atama ve sinyal kontrolü arasındaki ilişki

Ulaşım ağlarının optimum olarak işletilmesi ağda meydana gelebilecek sıkışıklıkların önlenmesi açısından her zaman yeterli olmayabilir. Bu durumda ulaşım ağından faydalanmak isteyen kullanıcıların oluşturduğu ulaşım talebinin belli şartlar altında yönetilmesi gerekmektedir. Bilindiği gibi gelişmekte olan ülkelerin çoğunda kentsel nüfus artışı öngörülen değerlerin oldukça üzerindedir. Kentsel alanlara olan sürekli göç önlemediğinden, kentin gelişmesi için ayrılan teknik altyapı ihtiyacın çok altında kalmaktadır. Tüm bu yetersizliklerin yanında hızla artan motorlu araç kullanımı da ulaşımda bir kaosa neden olmaktadır. Şehir içi trafik ağlarında seyahat edenlerin gittikçe artarak yarattığı ulaşım talebinin dünyanın hiçbir yerinde belirli kurallara göre yönetilmeden karşılanması mümkün değildir. Talep miktarı yüksek seviyelere çıktıkça gittikçe artan sistematik bir trafik sıkışıklığı ile karşı karşıya kalınmakta ve sıkışıklık şartları trafiğin toplum üzerinde yarattığı sosyal ve çevresel şartların ağırlaşmasına neden olmaktadır. Örnek olarak gecikmelerin, gürültü ve hava kirliliğinin artması ayrıca yaya ve bisiklet kullanıcıları için seyahat şartlarının ağırlaşması sayılabilir. Şehir içlerinde meydana gelen sıkışıklık aynı zamanda insanlar tarafından yapılan günlük aktivitelerin yeniden yapılandırılması, motorlu araçlara bağlılığı artırma ve çevresel etkilerin artması gibi sonuçları da beraberinde getirmektedir. Buna karşılık son yıllarda, artan talebe karşılık arz artırımı yerine talebin yönetilerek kontrol altına alınması hususunda özellikle gelişmiş ülkeler başta olmak üzere tüm dünya ülkeleri görüş birliğine varmıştır.

Talep yönetimi tekniklerinden olan sıkışıklık fiyatlandırmasının tarihine bakıldığı zaman oldukça uzun bir geçmişi olduğu görülebilir. Çok değişik vergilendirme ve fiyatlandırma teknikleri özellikle gelişmiş ülkelerde denenmiş ve günümüzde hala

sürdürülmektedir. Seyahat edenler bilindiği gibi birçok maliyetlerle karşı karşıya kalmaktadır. Bu maliyetlerin içinde araç işletme masrafları, yakıt, park ücretleri vs. sayılabildiği gibi artan trafik sıkışıklığı sonucu meydana gelen kazalar neticesinde ortaya çıkan sosyal giderlerde sayılabilmektedir. Kullanım ücretlendirmesinin diğer bir boyutu ise ulaşım altyapısına olan talepte gün içinde ortaya çıkan değişmelerle sabit olan yol kapasitesi arasındaki dengenin sağlanmasına yönelik çabalardır. Herhangi bir yolu kullanan bir sürücü talebin yoğun olmadığı bir saatte, örneğin gece yarısı ya da sabah erken saatte bu yolu kullandığında ortaya çıkan sorunlar ve maliyetler daha düşüktür. Oysaki zirve saatin oluşmasıyla birlikte yolu kullanmak isteyen her yeni taşıt sürücüsü yolun kapasite kullanımını olumsuz olarak etkilemekte, hem kendi hem de yola daha önce çıkmış taşıt sürücülerinin kullanım maliyetini yükseltmektedir. Yol kullanımının marjinal maliyetlerinde önemli artışlar yaratılmaya başlandığı andan itibaren ortaya çıkan yeni maliyetlerin bunu yaratan yeni kullanıcılara farklı olarak yansıtılması gerekmektedir. Bu tür yaklaşım talep yönetimi tekniklerinden olan *sıkışıklık fiyatlandırması* olarak adlandırılmaktadır.

Sıkışıklık fiyatlandırması hem serbest pazar koşullarında kullanıcılardan adaletli ücretlerin alınmasında hem de ulaşım talebinin yönetiminde etkin bir metot olarak görülmektedir. Mevcut ve geliştirilmekte olan tekniklerle şimdilik sıkışıklık ücretlendirmesinin zirve ve zirve dışı saatlerde kademeli olarak değiştirilmesi söz konusu olmakta bu sınırlı değişiklik toplu taşıma hizmetlerinin ücretlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Sıkışıklık fiyatlandırması, yol kullanım ücretlendirmesinin kısmi bir uygulaması olarak sıkışıklık durumunda talebin yönetimi amacıyla uygulanmaktadır. Ücretlendirme motorlu araçların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirebilmek ve ayrıca enerji verimli araçların daha fazla kullanımını teşvik etmek için yapılmaktadır.

1.2. Problemin Tanımı

UAT için öncelikle Başlangıç-Variş (B-V) noktaları arasındaki talebin ulaşım ağına yüklenmesi ve link akımlarının bulunması gereklidir. TA olarak adlandırılan bu problem çözüldükten sonra ağ tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Trafik atama modelleri ağ üzerindeki sıkışıklık durumunun link maliyet fonksiyonu üzerindeki etkisine ve gerçek link maliyet sürelerinin bulunmasında sürücü davranışlarında meydana gelen hataların göz önüne alınıp alınmaması durumlarına göre çeşitlilik göstermektedir (Sheffi ve Powell 1981).

Literatürde bilinen hep ya da hiç atama metodu sözü edilen her iki durumu da dikkate almamaktadır. Diğer atama modelleri ise yukarıda belirtilen etkileri dikkate alma durumuna göre deterministik veya stokastik atama modelleri olarak adlandırılmaktadırlar. Deterministik atama modelleri konusundaki ilk çalışmalarda (Nguyen 1974, LeBlanc 1975) denge durumunda link akımları Wardrop (1952) prensibine göre bulunmaktadır. Bu durumda rota akımlarının bulunmasında önerilen yöntem, rota üzerinde seyahat eden her bir yol kullanıcısının kendi seyahat maliyetini minimum edecek şekilde davrandığını kabul eden bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım denge durumunda bütün kullanılan rotalardaki seyahat maliyetinin aynı olacağı ve bu maliyetin kullanılmayan rotalardaki seyahat maliyetinden daha az veya eşit olacağı kabulüne dayanır. Bu durum ağ kullanıcı dengesi altındadır şeklinde tanımlanabilir ve hiçbir kullanıcı kendi rotasını değiştirerek seyahat maliyetini değiştiremez (Wardrop 1952). Bu durum Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) durumunu doğurmaktadır. Fakat gerçekte DKD durumundan farklı olarak sürücüler rotalar hakkında tam olarak bilgi sahibi değildirler ve sürücülerin rota seçimleri sırasında algılama hataları olmaktadır. Bu durumda ise stokastik kullanıcı davranışlarının dikkate alınması gerekir ki problem Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) durumuna dönüşmektedir. SKD atamasında rota seçim modelleri kullanılarak B-V talebi rotalara atanır. Ayrıca en düşük maliyetli rotaların denge noktasına kadar en fazla akımı çektiği kabul edilir. Stokastik modellerde, bütün sürücülerin tek bir maliyet tanımlaması yapması yerine her bir sürücünün ayrı ayrı seyahat maliyeti tanımladığı kabulü yapılmakta ve link maliyet fonksiyonlarının elde edilmesinde sürücü davranışlarındaki hatalar göz önüne alınmaktadır. Stokastik atama modeli konusundaki ilk çalışma Dial (1971) tarafından yapılmış ve STOCH algoritması olarak adlandırılmıştır.

Ulaşım ağındaki toplam seyahat talebi, bilindiği gibi bireysel olarak seyahat edenlerin seyahat davranışlarının toplamı olarak ifade edilebilir. A ve B gibi iki nokta arasında seyahat etmek isteyen yol kullanıcısı bu iki noktayı birbirine bağlayan birçok

rota arasında tercih yapmak zorundadır. Rota seçimini etkileyen faktörler arasında rotaların özellikleri ve seyahat eden kişinin sosyo-ekonomik özellikleri sayılabilir. Rota seçim modellerinde temel ilke, yol kullanıcılarının sürekli olarak en düşük maliyetli rotayı seçeceği yönündedir. Stokastik modelde herhangi bir yol kullanıcısı tarafından algılanan maliyet rastgele bir değişken olarak varsayılır ve rota seçimi fayda maksimizasyonu (maliyet minimizasyonu) prensibine dayanılarak her bir kullanıcının algıladığı maliyete göre yapılır. SKD prensibi deterministik kabule oldukça benzerdir fakat stokastik düşünce, herhangi bir yol kullanıcısının denge durumunda tek taraflı olarak rotasını değiştirerek seyahat maliyetini değiştiremeyeceği noktasında deterministik düşünceden ayrılır. Seçim modellerinde her bir yol kullanıcısı rota seçim durumunda her bir rota ile ilişkili fayda özelliklerine bağlı olarak bir seçimle karşı karşıya kalır. Herhangi bir rotanın faydası rota özelliklerinin fonksiyonu olmasının yanında ulaşım ağı karar vericilerinin de karakteristiklerini yansıtır. Karar vericiler en yüksek faydaya sahip rotaların seçileceğini kabul eder. Bunun yanında faydalar direk olarak gözlenemez veya ölçülemez. Ayrıca, seyahat edenlerin faydalarını etkileyen birçok özellik gözlemlenebilir ve rastgele olarak oluşturulabilir. Faydaların rastgele olarak modellenmesinden dolayı seçim modelleri doğrudan seçimi vermek yerine seçim olasılığını verir

Bu çalışmada ağ üzerinde B-V çiftleri arasındaki rotaların ortak kullandıkları linklerin özelliklerini dikkate alan ve bu nedenle literatürde gerçek sürücü davranışlarının modellenmesi açısından daha gerçekçi olarak nitelendirilen (Bell ve Lida 1997) probit model kullanılmıştır. Probit rota seçim olasılıklarının belirlenebilmesi için literatürde ilk kullanılan metot *Clark* metodudur. Rota sayısının çok olması durumunda Clark metodunun yanında analitik yaklaşım sergileyen hiçbir metot pratik ve kolay bir şekilde ulaşım ağına uygulanamaz (Sheffi 1985). Analitik metotlardan olan nümerik integrasyon metodu alternatif sayısı 4 ya da 5 den fazla olduğu durumlarda işlem sıklığı ve zorluğu nedeniyle uygulanması oldukça güçtür. Literatürde rota seçim modellerinin avantajları ve dezavantajlarından sıklıkla bahsedilmekle birlikte probit modelin sürücü davranışlarının yansıtılması açısından daha gerçekçi olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir. Bununla birlikte probit modelin analitik olarak çözümünün özellikle büyük ulaşım ağlarında hesaplama zorluğu ve CPU süresi açısından sorun

yaratmasından dolayı çalışmada Monte-Carlo simülasyon tekniğinin kullanılmasının probit SKD probleminin çözümünde iyi sonuçlar vereceği beklenmektedir.

UAT sürecinde karar vericiler ve kullanıcılar olmak üzere iki grubun etkileşimi söz konusudur. Her iki grubunda kendine özgü amaçları mevcuttur. Ulaşım ağı karar vericileri genellikle sosyal çerçeveli bir amaç olarak ya toplam sistem maliyetinin minimize edilmesi ya da sosyal refahın ve konforun artırılmasını amaçlamaktadır. Herhangi bir ulaşım ağı kullanıcısı ise bütün ağdaki konfor ya da sosyal refahı hiç sayarak sadece kendi seyahat maliyetini minimize edebilme amacıyla olabilmektedir. Bu nedenle ulaşım ağı karar vericilerinin sistem maliyetinin minimum edilmesi ya da sosyal refahın veya konforun artırılmasını sağlayabilmesi için ağ kullanıcılarının davranışlarını dikkate alması gerekmekte diğer taraftan ulaşım ağındaki değişiklikler ise ağı kullananların davranışlarını etkilemektedir. Ulaşım ağı karar vericileri ve ağ kullanıcıları arasındaki karşılıklı ilişki nedeniyle UAT problemi iki seviyedeki karar vericilerin oluşturduğu hiyerarşik bir problem olarak tanımlanmaktadır.

UAT probleminin karmaşık yapısından dolayı optimum ya da optimuma yakın sinyal kontrol parametrelerinin bulunmasının geleneksel matematiksel metotlarla çözümü yerine araştırmacılar son yıllarda farklı yaklaşımlar altında çözümü aramaya başlamışlardır. Ayrıca UAT probleminin çözümünde sistem ve tasarım parametrelerinin çeşitliliği nedeniyle yeni yaklaşımların problemin çözümünde ne gibi sonuçlar verebileceğinin araştırılması gerekmektedir. Literatürde UAT probleminin çözümü için farklı metotlar önerilmekle birlikte son yıllarda Genetik Algoritma (GA), Tavlama Benzetimi (TB), Tabu ARama (TAR) gibi sezgisel metotların kullanımı oldukça artmıştır. Ayrıca, modifiye edilmiş ve performansı artırılmış Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) metodu ile UAT tasarımı literatürde mevcut değildir. UAT probleminin konveks olmayan yapısından ve tasarım parametresi sayısının fazlalığından dolayı çalışmada UAT çözümü için modifiye edilmiş KKO metodu kullanılmıştır.

Ayrıca talep kontrol yöntemlerinden biri olan sıkışıklık fiyatlandırması için yeni metodolojilerin önerilmesinin fiyatlandırma konusundaki literatüre katkısının olacağı düşünülmektedir.

1.3. Amaç

Çalışmanın temel amacı şehiriçi yol ağlarında stokastik sürücü davranışlarını dikkate alarak sürekli ağ tasarımını gerçekleştirebilen ve sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesine olanak sağlayan çözüm algoritmaları geliştirmektir.

Alt seviye olarak programlanabilen TA probleminin çözümü için **Ardışık Ortalamalar Yöntemi Trafik Atama Modeli (AOYTAM)**, **KArınca Kolonisi Optimizasyonu Trafik Atama Modeli (KAKOTAM)** ve **Sheffi Algoritması (SA)** önerilmiştir. AOYTAM'nin probit rota seçim olasılıklarının elde edilmesine izin vermesi ve aynı zamanda CPU süresinin kısa olması nedeniyle alt seviye probleminin çözümü için kullanılmasının probit SKD prensiplerinin atama problemine yansıtılması açısından literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca probit rota seçim olasılıklarının elde edilmesinde Monte-Carlo simülasyon tekniğinin kullanılması ile probit modelin dezavantajlarından olan hesaplama yükünün azaltılması hedeflenmiştir.

Sinyal kontrol parametrelerinin optimum değerlerinin bulunduğu üst seviyede ise literatürde kullanılan KKO algoritmalarından farklı bir KKO algoritmasının kullanılması ile lokal optimum noktalarına takılma riskinin azaltılması amaçlanmıştır. Geliştirilen **KArınca Kolonisi Optimizasyonu Sinyal Kontrol Algoritması'nın (KAKOSKA)** iki seviyeli programlama ve KİY ile çözümünün gerçekleştirilebilmesi için sırasıyla KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri oluşturulmuştur. Sıkışıklık fiyatlandırması konusundaki literatüre metodolojik olarak katkı sağlamak amacıyla fiyatlandırma modeli önerilmiş ve KAKOSKA-1 modeli ile örnek ağ üzerinde uygulaması yapılmıştır. Önerilen sıkışıklık fiyatlandırması modeli ile ağdaki oluşabilecek talep artışlarına karşı ulaşım talebinin yönetilmesi amaçlanmıştır. Özet olarak çalışmanın amaçları aşağıda verilmiştir.

1. Probit rota seçim modelinin uygulanmasına olanak sağlayan AOYTAM modelinin geliştirilmesi.

2. KKO sezgisel metodu kullanılarak geliştirilen KAKOSKA modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması.
3. AOYTAM ve KAKOSKA modellerinin UAT probleminin çözülmesi için birleştirilmesi.
4. İki seviyeli programlama tekniği ile UAT çözümü için KAKOSKA-1 modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması.
5. KİY yaklaşımı altında UAT çözümü için KAKOSKA-2 modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması.
6. KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri ile çözümlenen UAT probleminin sonuçlarının karşılaştırılması.
7. Sıkışıklık fiyatlandırması tekniğinin uygulanabilmesi için formülasyon geliştirilmesi.
8. KAKOSKA-1 modeline sıkışıklık fiyatlandırması modelinin adapte edilmesi ve farklı senaryolar için sonuçların değerlendirilmesi.

Sonuç olarak çalışmada önerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin örnek ulaşım ağına uygulanabilmesi ile ağ üzerindeki tasarım parametrelerinin en iyi değerlerinin bulunabilmesi ve ağın yönetilebilmesi için fiyatlandırma politikalarının nasıl ve hangi düzeyde yapılması gerektiği sorularına cevap bulunulması amaçlanmıştır.

1.4. Tezin Düzenlenmesi

Tezin giriş bölümünde UAT problemi tanımlanmış, problem ve çalışmanın amacından bahsedilmiş ayrıca çalışmanın düzenlenme şekli verilmiştir.

Bölüm 2’de TA problemi açıklanmış, DKD ve SKD problemleri arasındaki farklar ve çözüm prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca literatürde mevcut olan seçim modellerinin avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Çalışmada kullanılan probit model hakkında detaylı bilgi verilmiş, SKD modellerinin matematiksel formülasyonları

ve metodolojik farklarından bahsedilmiştir. Link maliyet fonksiyonlarının genel yapısı verildikten sonra UAT problemi ve çözüm yöntemleri, sıkışıklık fiyatlandırması hakkında literatür çalışması verilmiştir.

Bölüm 3’de UAT probleminin üst seviye kısmını oluşturan sinyal kontrol probleminin çözümünde kullanılacak olan KKO metodu hakkında literatür çalışması verilmiştir. Modifiye edilmiş KKO metodunun ayrıntılı algoritma adımları ve çalışma prensibi verilmiştir. Ayrıca KAKOSKA modelinin çözüm algoritması ve örnek ağ üzerindeki sayısal uygulaması verilmiştir.

Bölüm 4’de literatürde mevcut olan ve çalışmada önerilen TA modellerinin çözüm algoritmaları, örnek ağ üzerindeki uygulamaları ve sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. TA modellerinin duyarlılık analizi yapılmıştır. Ayrıca UAT probleminin çözümü için önerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin çözüm algoritmaları ve akış diyagramları verilmiştir.

Bölüm 5’de KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin sayısal uygulamaları verilmiştir. İlk olarak KAKOSKA-1 modelinin örnek ulaşım ağı üzerindeki sayısal uygulamaları yapılmış ve ağın talep artışlarına karşı gösterdiği tepkiler analiz edilmiştir. KAKOSKA-2 modeli örnek ulaşım ağına uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesi geliştirilen formülasyonun KAKOSKA-1 modeli içine dahil edilmesi için gereken aşamalar ve çözüm algoritması verilmiştir. Sıkışıklık fiyatlandırması sonuçları, talep artışı senaryoları uygulanarak analiz edilmiş ve her bir senaryo için ağın maliyeti, fiyatlandırılmış ağ maliyeti, ağdan elde edilen gelir, net sistem maliyeti ve marjinal faydalar olmak üzere farklı parametreler elde edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Son bölümde ise yapılan çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılmış ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

UAT verilen tasarım amacına uygun olarak optimum performansı sağlayacak şekilde ulaşım ağının işletilmesidir. Genel olarak Kesikli Ulaşım Ağ Tasarımı (KUAT) ve Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı (SUAT) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. İki farklı UAT kategorisi arasındaki temel ayrım bir takım karar değişkenlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır (Zixiao 2004). Herhangi bir ulaşım ağına yeni yol kısımlarının eklenmesi veya yol kapanması durumunda optimum ağ performansının elde edilmesi olarak tanımlanan KUAT problemi LeBlanc (1975), Poorzahedy ve Turnquist (1982) tarafından çalışılmıştır. SUAT problemi ise var olan yol kısımlarının kapasitesinin artırılması durumunda ya da mevcut yol kapasiteleri altında ağ performansının iyileştirilmesi (Abdulaal ve LeBlanc 1979, Davis 1994) olarak tanımlanmaktadır.

Bilindiği gibi literatürde trafik kontrol probleminin çözümü ile ilgili birçok matematiksel model önerilmiştir. Trafik kontrol probleminin çözümünde Robertson (1969) tarafından önerilen TRANSYT modeli koordineli kavşaklarda en çok kullanılan trafik kontrol modellerinden birisidir. 1970'lerin başında Amerikan Karayolları Birliği tarafından geliştirilen Şehir Trafik Kontrol Sistemi (UCTS) ve MAXBAND (Little vd 1981) programları da trafik kontrol modelleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca SCATS (Sims 1979, Lowrie 1982, Luk 1984) ve SCOOT (Hunt vd 1982, Robertson ve Bretherton 1991) trafik kontrol modelleri de farklı yaklaşımlar altında sinyal kontrol parametrelerinin optimizasyonuna olanak sağlamaktadır.

Ayrıca Allsop (1974) ve Gartner (1974) yapmış oldukları çalışmalarda sinyal parametrelerine bağlı olarak trafik kontrolü yapabilmeyi sağlayan teorik yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Seyahat dağılımından ve trafik atama sonucu elde edilen trafik hacimleri trafik kontrol parametrelerinin fonksiyonu olarak nitelendirilmiştir. Optimum trafik sinyal sürelerinin bulunmasında seyahat dağılımı, trafik atama ve trafik sinyal hesaplamaları için hangi metotların uygun olacağı belirlenmiştir. Sayısal bir örnek üzerinde uygulamalar yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

Sinyal kontrol ve TA problemlerinin bir arada çözülmesi gerekliliği neticesinde birleştirilmiş optimizasyon problemi UAT problemi olarak adlandırılmıştır (Allsop 1974, Gartner 1974, Marcotte 1983). Bölüm 2.2’de UAT probleminin matematiksel formülasyonu, çözüm yöntemleri ve literatür çalışması, Bölüm 2.3’de TA, DKD ve SKD problemlerinin matematiksel ifadeleri ve link maliyet fonksiyonlarının temel prensipleri verilmiştir. Sonraki bölümde SKD modelleri detaylandırılmış, logit ve probit SKD modellerinin formülasyonları ve çalışma prensipleri açıklanmıştır. Bölüm 2.5’de rota seçim modellerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiş ve çalışmada kullanılacak olan probit rota seçim modeli hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bölüm 2.6’da sıkışıklık fiyatlandırması hakkında literatür çalışması verilmiştir. KAKOSKA modelinin genel çerçevesi Bölüm 2.7’de verildikten sonra son bölümde sonuçlar yer almaktadır.

2.2. Ulaşım Ağ Tasarımı

UAT sürecinde ulaşım ağı karar vericileri ve ağdan faydalananlar olmak üzere iki grubun etkileşimi söz konusudur. Her iki grubunda kendine özgü amaçları mevcuttur. Ulaşım ağı karar vericileri genellikle sosyal çerçeveli bir amaç olarak ya toplam sistem maliyetinin minimize edilmesi ya da sosyal refahın ve konforun artırılmasını amaçlamaktadır. Toplam sistem maliyetinin minimize edilmesi sabit talep durumuna uygun olmakla birlikte sosyal refahın ya da konforun artırılması elastik talep durumu için daha uygun amaçlar olarak sıralanmaktadır. Herhangi bir ulaşım ağ kullanıcısı bütün ağdaki konfor ya da sosyal refahı hiçe sayarak sadece kendi maliyetini minimize etmek amacıyla olabilmektedir. Bu durum ise DKD ve SKD durumlarını doğurmaktadır. Bu nedenledir ki ulaşım ağı karar vericilerinin sistem maliyetinin

minimum edilmesini ya da sosyal refahın ve konforun artırılmasını sağlayabilmesi için ağ kullanıcılarının davranışlarını dikkate alması gerekmektedir. Diğer taraftan ulaşım ağındaki değişiklikler ağı kullananların davranışlarını etkilemekte ve her iki grubun karşılıklı etkileşim içinde olması sonucunu doğurmaktadır.

Ulaşım ağı karar vericileri ve ağ kullanıcıları arasındaki ilişki nedeniyle iki seviyedeki karar vericilerin oluşturduğu hiyerarşik bir problem olarak tanımlanan UAT probleminde ağ karar vericilerinin kullanıcıların davranışları hakkında önceden bilgi sahibi olduğu varsayımı durumunda UAT oyun teorisindeki lider-takipçi ya da Stackelberg oyunu olarak tanımlanabilir (Fisk 1984). Bu durumda ağ karar vericileri lider kullanıcılar ise takipçi olarak nitelendirilebilmektedir. Bu nedenle UAT süreci iki seviyeli programlama problemi olarak tanımlanmıştır (Oppenheim 1995). Bu bağlamda liderin karar değişkenleri üst seviyede hesaplanırken takipçi davranışları ise alt seviye optimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır.

Davis (1994) SUAT problemini verilen bir ulaşım ağında optimum kapasite genişletmelerinin nasıl uygulanacağına belirlenmesi şeklinde tanımlamıştır. Ayrıca çalışmada linklerdeki trafik hacminin SKD probleminin çözülmesi sonucu elde edilen akımlar olması gerekliliği vurgulanmıştır. SKD probleminin çözümü için azaltılmış eğim metodu ve quadratik programlama olmak üzere iki adet standart algoritma kullanılmıştır. Bu algoritmalar birkaç örnek ağ üzerinde test edilmiştir. Lim vd (2005) yaptıkları çalışmada SUAT problemini konveks olmayan yapısından dolayı çözümü oldukça zor olarak tanımlamışlardır. SUAT probleminin bazı türlerinin iki seviyeli programlama tekniği ile formüle edilebileceği belirtilmiştir. Bu tür programlama da ise Stackelberg ya da Nash kavramlarına göre sınıflandırma yapılabileceği öne sürülmüştür. Çalışmada yol genişletmeleri için yapılan SUAT problemi Stackelberg yaklaşımı dikkate alınarak çözülmüştür. Bu yaklaşımda lider ve takipçiler bulunmakta ve sürücülerin rota seçimleri sırasındaki hataları göz önüne alınmaktadır. Stackelberg yaklaşımı altında SUAT probleminin çözümü için logit rota seçim modeli kullanılmıştır. Geliştirilen model iki farklı test ağına uygulanmış ve Stackelberg ve Nash kavramlarının arasındaki farkların etkisi ortaya konmuştur.

SUAT probleminin konveks olmayan yapısından dolayı çözüm için son yıllarda sezgisel metotların kullanımı oldukça artmıştır. Xu vd (2009) çalışmalarında SUAT

probleminin çözümü için TB ve GA metotlarını örnek bir ağ üzerinde denemişlerdir. Alt seviye problemi kullanıcı denge trafik ataması olarak ifade edilmiş ve Frank-Wolfe metodu çözüm için kullanılmıştır. Talep fazla olduğu zaman TB metodunun GA tekniğinden daha elverişli olduğu bulunmuştur. Ayrıca GA tekniğinde aynı sonuçlara ulaşmak için daha fazla hesaplama süresi gerektiği ifade edilmiştir. Guogiang ve Jian (2007) tarafından yapılan çalışmada SUAT probleminin çözümü için iki seviyeli programlama tekniğinin matematiksel ifadesi verilmiş ve GA tabanlı yeni bir algoritma problemin çözümü için önerilmiştir. SUAT probleminin oldukça kompleks bir problem olduğu ve geleneksel optimizasyon algoritmaları ile çözümünün oldukça zor olduğu vurgusu yapılmıştır. Önerilen GA tabanlı optimizasyon modeli ile SUAT probleminin çözümü için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Poorzahedy ve Abulghasemi (2005) yaptıkları çalışmada Karınca Sistemi (KS) algoritmasını UAT probleminin çözümü için ilk olarak kullanmışlardır. Test ağı üzerinde performansı incelenmiş ve sonuçlar cesaret verici bulunmuştur.

Aynı şekilde Chiou (2005) SUAT problemini ağın performansını optimum yapan link kapasite genişletmelerinin belirlenmesi şeklinde tanımlamıştır. Çalışmada iki seviyeli programlama tekniğinin ağ tasarım probleminin formüle edilebilmesi için kullanılabilmesi belirtilmiştir. Üst seviyede, sistem performans indeksi toplam seyahat sürelerinin toplamı ve link kapasite genişletmeleri için gerekli olan yatırım maliyetlerinden oluşmaktadır. Alt seviyede ise, link akımları Wardrop (1952) kullanıcı dengesi dikkate alınarak belirlenmiş ve eşdeğer minimizasyon problemi olarak ifade edilmiştir. Eğim tabanlı dört farklı algoritma kullanılmış ve üç farklı test ağı üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen metotlar sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağları düşünüldüğünde hesaplama süresi ve sonuçlar anlamında oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Poorzahedy ve Rouhani (2007) GA, TB, TAR ve KS'den oluşan hibrit algoritmaları UAT probleminin çözümü için uygulamışlardır. Algoritmaların test edilmesi için gerçek bir ulaşım ağı seçilmiştir. Sonuç olarak hibrit algoritmaların tek başına temel KS'ne göre ağ tasarım problemini çözmede başarılı olduğu bulunmuştur. Gallo vd (2009) UAT probleminin çözümü için yeni bir optimizasyon modeli ve meta-sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Ağ tasarım problemi var olan yolların ve kavşaklardaki sinyal sürelerinin tasarlanarak yol ağının optimum işletilmesi olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon modeli problemin çözümü için formüle edilmiştir. Ayrıca iki

seviyeli programlama tekniği çözüm metotlarının karmaşıklığını ve hesaplama süresinin azaltılması için uygulanmıştır. Gerçek boyutlu bir ulaşım ağında dağılım arama metodu kullanılmıştır. Sonuçlara göre önerilen yaklaşım ile kabul edilebilir hesaplama sürelerinde optimum sonuçlar elde edilebilmektedir.

Jin vd'nin (2009) yapmış oldukları çalışmada SUAT probleminin çözümünde TB ve iki seviyeli programlama yöntemi optimum parametrelerin bulunması için kullanılmıştır. Üst seviyede amaç fonksiyonu olarak link kapasite artırımları için gerekli olan toplam yatırım maliyeti ve seyahat sürelerinin toplamı kullanılmıştır. Alt seviye ise eğim tahmin algoritması kullanılarak çözümlenen kullanıcı dengesi olarak ifade edilmiştir. Duyarlılık analizi metodu optimum TB parametrelerinin seçimi için ilk defa kullanılmış ve parametrelerin seçimi ile ilgili öneriler verilmiştir. Sonuçlara göre optimum parametre seçimi ile ağ tasarım probleminin etkinliği ve güvenilirliği artırılabilir.

2.2.1. İki Seviyeli Programlama

Geleneksel olarak iki seviyeli programlama bir çift optimizasyon probleminden oluşan programlama tekniği olarak tanımlanmaktadır. Bu tür programlamada üst seviye ve alt seviyelerin parametreleri her iki seviye için girdi ve çıktı olarak kullanılmaktadır. İki seviyeli programlama tekniği genel olarak Denklem (2.1)-(2.4)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$G(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq 0 \quad (2.1)$$

Kısıtına bağlı olarak;

$$\min_x F(\mathbf{x},\mathbf{y}) \quad (2.2)$$

Burada \mathbf{y} aşağıda verilen optimizasyon probleminin herhangi bir \mathbf{x} için çözümüdür.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq 0 \quad (2.3)$$

Kısıtına bağlı olarak;

$$\min_y f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (2.4)$$

İki seviyeli programlama metodunda Denklem (2.1)-(2.2)'de verilen optimizasyon problemi üst seviye, Denklem (2.3)-(2.4)'de verilen problem ise alt seviye olarak adlandırılmaktadır. Gao vd (2004) transit UAT için iki seviyeli programlama tekniğini kullanmışlardır. Çalışmada üst seviye transit ulaşım ağ modelini temsil ederken alt seviye ise transit denge atama modelini temsil edecek şekilde modellenmiştir. Duyarlılık analizi tabanlı sezgisel bir algoritma model çözümü için önerilmiştir. Basit ulaşım ağı üzerinde model ve önerilen algoritmanın uygulaması yapılmıştır. Sonuç olarak duyarlılık analizi tabanlı sezgisel algoritmanın transit sistemler için SUAT problemini çözmeye oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Ceylan ve Bell (2004) SKD link akımlarını kullanarak tasarım parametrelerinin optimizasyonu için GA yaklaşımını önermişlerdir. Tasarım parametreleri; devre süresi, her bir fazın sinyal süresi ve kavşaklar arasındaki ofsetler olarak tanımlanmıştır. Sistem performans indeksi TRANSYT programından elde edilen tüm trafik akımlarının durma sayıları ve gecikmelerin toplamı olarak ifade edilmiştir. SKD atama problemi eşdeğer minimizasyon problemi olarak ifade edilmiş ve rota akım tahmin edicisi (PFE) kullanılarak çözülmüştür. Amaç fonksiyonu ağ performans indeksi (PI) olarak kabul edilmiştir. GA entegrasyonu ile trafik atama ve trafik kontrol problemleri GATRANSPFE yaklaşımı ile çözülmüştür. GATRANSPFE'nin çözüm yeteneği test ağı üzerinde gösterilmiş ve KİY yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre GA yaklaşımı oldukça başarılı ve literatürdeki önceki sezgisel metotlara göre oldukça basittir. Ayrıca sonuçlara göre ağ performans indeksinde KİY çözümüne göre iyileşme sağlanmıştır.

Benzer şekilde Ceylan ve Bell (2005) sundukları çalışmada UAT probleminin çözümü için iki seviyeli programlama tekniğini kullanmışlardır. Sıkışıklık etkisi altındaki sinyalle ulaşım ağlarında üst seviye probleminin çözümü için GA tekniği kullanılmıştır. Üst seviye probleminin çözümünde GA tekniği önceden belirlenen alt ve üst kısıtlarla uygun sinyal sürelerinin bulunmasında kolaylık sağlamıştır. Alt seviye problemi olarak SKD ataması PFE programı ile çözülmüş ve link akımları bulunmuştur. Üst seviyede performans indeksi ve uygunluk indeksinin bulunması için TRANSYT

programını kullanılmıştır. GATRANSPFE modeli sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağına uygulanmıştır. Sonuçlar KİY çözüm metodu ile performans indeksi ve yakınsama kriterleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. GATRANSPFE modeli KİY çözümüne göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Ayrıca Yang vd (2009) birleştirilmiş UAT problemi üzerine çalışmışlardır. Yatırım bütçesi kısıtı göz önüne alınarak oluşturulan iki seviyeli programlama modeli ulaşım ağındaki toplam seyahat süresini minimum etmek için kullanılmıştır. İki seviyeli programlama algoritmasının çözümü için ayrıcalıklı klon tavlama algoritması kullanılmıştır. Uygulanan algoritmanın TB algoritması ile karşılaştırılması ve sayısal örnek üzerinde çözümü yapılmıştır. Ayrıca farklı yatırım bütçesi kısıtları kullanılarak duyarlılık analizi yapılmıştır. Varia ve Dhingra (2004) sıkışıklık etkisi altındaki sinyalize kavşaklardan oluşan ulaşım ağında dinamik sistem optimum trafik atama modeli geliştirmişlerdir. Simülasyon tabanlı yaklaşım birden fazla B-V çifti olması durumu için uygulanmıştır. Sabit sinyal süreli ağdaki seyahat maliyetinin minimum edilmesi ve sinyal sürelerinin optimizasyonu için GA tekniği kullanılmıştır. Önerilen metot test ulaşım ağına uygulanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlara göre GA yaklaşımı geleneksel analitik metotlara göre problemin çözümü için yapılan birçok varsayımın yapılması zorunluluğunu ortadan kaldırmıştır.

2.2.2. Karşılıklı İteratif Yaklaşım

Literatürde UAT probleminin çözümü için önerilen farklı yaklaşımlardan biri olan KİY metodunda sinyal kontrol ve TA problemleri ayrı ayrı çözümlenerek problem çıktıları diğer problemin girdisi olarak kullanılmıştır. Bu iteratif yaklaşım ilk olarak Allsop (1974) ve Gartner (1974) tarafından önerilmiştir. KİY yaklaşımı aşağıdaki adımlar takip edilerek uygulanır (Ceylan 2002):

Adım 0: Başlangıç ataması sonucu elde edilen denge link akımları kullanılarak sinyal kontrol programı ile optimum sinyal sürelerinin bulunması.

Adım 1: Mevcut sinyal süreleri ve link maliyet fonksiyonu kullanılarak yeniden trafik ataması yapılması.

Adım 2: Elde edilen link akımlarına göre yeniden optimum sinyal sürelerinin bulunması.

Adım 3: Tüm adımların sinyal sürelerinde ve akımlarda değişiklik olmayıncaya kadar devam ettirilmesi.

KİY yaklaşımında iterasyondan iterasyona denge akımlarının dalgalanma göstermemesi için denge link akımlarına Ardışık Ortalamalar Yöntemi (AOY) yakınsama prosedürü uygulanmaktadır. Ağ tasarım probleminin çözümü için KİY yaklaşımının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir (Ceylan 2002).

$$\mathbf{q}=\mathbf{q}^*$$

Kısıtına bağlı olarak;

$$\min_{\psi \in \Omega} F(\psi, \mathbf{q}) \quad (2.5)$$

$$\Psi=\Psi^*$$

Kısıtına bağlı olarak;

$$\min_{q \in S} Z(\psi, \mathbf{q}) \quad (2.6)$$

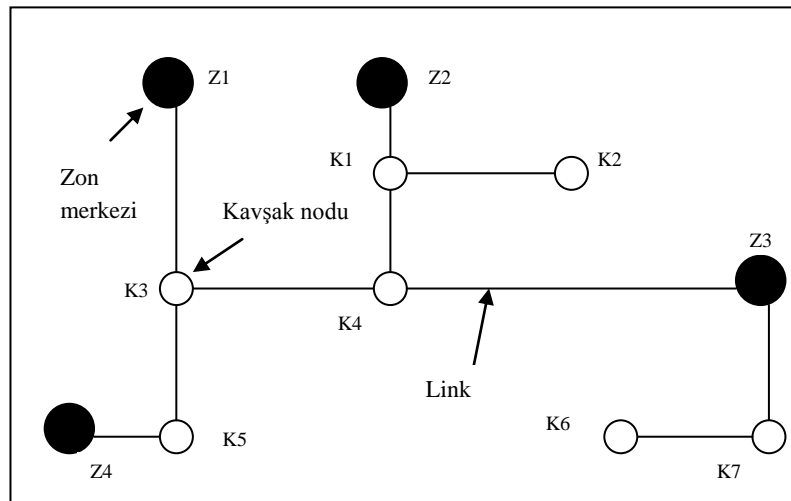
Burada \mathbf{q}^* ve Ψ^* sırasıyla denge link akımları ve sinyal süreleri kümesidir. S ise sinyal süreleri ψ dikkate alındığı durumdaki kullanıcı dengesi akımları kümesidir. Allsop ve Charlesworth (1977) orta ölçekli ulaşım ağları için sinyal kontrol ve TA süreçlerini birleştiren UAT problemini çözmeye KİY yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada TA süreci DKD ataması olarak temsil edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen sinyal süreleri ve denge link akımları Gershwin ve Tan (1979) ve Dickson (1981) çalışmalarında belirtildiği gibi optimumu bulmada yeterli değildir. Ayrıca Suwansirikul vd (1987) yapmış olduğu çalışmada UAT probleminin çözümü için Hooke-Jeeves metodu tabanlı arama metodu kullanmışlardır. Sonuçlar küçük bir test ağı üzerinde KİY yaklaşımı ile kıyaslanmış ve daha başarılı bulunmuştur. Fakat arama metodunun hesaplama zorluğu nedeniyle sadece küçük ağlar için uygun olduğu belirtilmiştir.

2.3. Trafik Atama

TA problemi ulaşım ağına seyahat eden yolcuların oluşturduğu trafiğin yüklenmesidir. Bu atamanın yapılabilmesi için seyahat dağılım matrisinin bilinmesi gerekir. Trafik ataması yapılmasındaki amaçlar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ❖ Ulaşım ağının mevcut durumunu ortaya çıkarmak.
- ❖ Seyahatlerin yol ağına yüklenmesi sonucu ulaşım ağına doğacak etkileri belirlemek.
- ❖ Gelecekteki seyahatleri mevcut yol ağına yükledikten sonra ulaşım ağına yapılması gereken düzenleme ve yapım önceliklerini ortaya koymak.

TA sürecinde zonlar arasındaki en düşük maliyetli rota seçilir ve tahmin edilen gelecekteki trafik miktarı en düşük maliyetli rotaya yüklendiğinde her linkteki trafik hacminin o bölümdeki yol kapasitesine göre taşınıp taşınmayacağı belirlenir. Ulaşım ağı bütün bu işlemlerin yapılabilmesi için link ve nod olmak üzere bölümlere ayrılır. Nod'lar zon merkezi ve bir veya daha çok link'in birleştiği kavşak olmak üzere iki türdür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Nod numaralandırılması.

Yol fiziki yapısı dışında seyahat maliyetini etkileyen diğer faktörler yoldaki trafik hacmi ve kavşaklardaki gecikmeler olduğundan, en düşük maliyetli rota her zaman en kısa mesafedeki yol olmayabilir. Bir rota mesafe olarak kısa olmasına rağmen üzerindeki link ve nod'larda gecikmelerin fazla olmasıyla seyahat maliyeti artabilir. Bu

durumda sürücüler tarafından yeni rotalar aranır ve kısa yola göre daha uzun mesafedeki fakat daha düşük maliyetli rota tercih edilir. TA probleminde amaç mevcut ağ topolojisi, link maliyet fonksiyonu ve B-V seyahat miktarlarına bağlı olarak link akımlarının bulunmasıdır. Problemin çözümü her bir yol kullanıcısının B-V çiftleri arasındaki en düşük maliyetli rota üzerinde seyahat ettiği varsayımına dayanır (Ceylan 2002). Bu varsayımına göre denge durumunda herhangi bir B-V çiftini bağlayan tüm kullanılan rotalardaki seyahat sürelerinin eşit olacağı ve ayrıca bu rotalardaki seyahat sürelerinin herhangi bir kullanılmayan rotadaki seyahat süresine eşit ya da onda daha az olacağı kabulü yapılmıştır. Bu durumda ulaşım ağının kullanıcı dengesi altında hizmet verdiği kabulü yapılır ve hiçbir sürücü tek taraflı olarak rotasını değiştirerek kendi seyahat maliyetini azaltamaz. Bu durum Wardrop (1952) tarafından öne sürülen DKD ataması durumudur. Bu durumda denge şartları altında sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağlarında trafik kendi kendini düzenler ve herhangi bir B-V çifti arasındaki tüm kullanılan rotalar eşit ve minimum maliyete sahip olmakta ve ayrıca kullanılmayan rotaların maliyeti ise kullanılan rotalarınkinden daha fazla veya eşit olmaktadır. Bu durum Wardrop'un (1952) ilk prensibi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu varsayım altında tüm kullanıcıların ağ hakkında aynı derecede mükemmel bilgiye sahip oldukları kabulü yatmaktadır. Fakat ağ kullanıcılarının ağ hakkında mükemmel bilgiye sahip olmadıkları, seçim sırasında hata yapabilecekleri ve ağın karakteristiklerini algılamada hatalarının olabileceği kabulü daha gerçekçi olarak tanımlanmaktadır. Sürücü algılama hatalarının dikkate alınması durumunda ise problem SKD problemine dönüşmektedir. TA modelleri sürücülerin link maliyetlerini algılamadaki farklılıklarına göre sınıflandırılabilir. Literatürde bilinen ve ilk atama modellerinden olan hep veya hiç metodu yukarıda bahsedilen bu durumu göz önüne almaz. Sürücülerin link maliyetlerini algılamadaki farklılıklarına göre atama modelleri deterministik ya da stokastik atama modeli olarak sınıflandırılabilir. Bilindiği gibi literatürde deterministik atama modellerinin çözümü için oldukça etkili algoritmalar mevcuttur (Nguyen 1974, LeBlanc 1975).

Stokastik atama modelleri link seyahat maliyetlerini rastgele değişkenler olarak tanımlayarak sürücü algılama hatalarını göz önüne alırlar. En yaygın olarak bilinen ilk stokastik atama modeli Dial (1971) tarafından önerilen STOCH algoritmasıdır. Bu algoritma logit seyahat dağıtma modeli tabanlıdır. STOCH ve diğer stokastik atama modelleri link akımları üzerindeki seyahat sürelerinin birbiri içlerindeki bağımlılıklarını

göz önüne almaz. Daganzo ve Sheffi (1977) yapmış oldukları çalışmada sıkışıklık etkisi altında olmayan ulaşım ağlarında logit atamanın dezavantajlarından kurtulmak için probit atama kullanmışlardır. Sheffi ve Powell (1981) bu çalışmayı daha sonra sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağlarında uygulamışlardır. Bu durumda problem sıkışıklık derecesine göre uygun atama prosedürünün seçimi olarak tanımlanmaktadır. Van Vliet (1976) sıkışıklık etkisi altında olmayan ağda stokastik atama kullanırken, sıkışıklık etkisi altındaki ağda deterministik atama kullanarak problemi çözmüştür. Modelleme davranışı olarak bakıldığı zaman stokastik atama modelleri deterministik modellerle karşılaştırıldığı zaman daha gerçekçi görünürken hesaplama zorluğu ve süresi açısından oldukça sıkıntılıdır. Ayrıca sıkışıklık arttıkça deterministik ve stokastik atama modelleri arasındaki farklar oldukça azalmaktadır. Fakat sıkışıklık düzeyini temel alarak deterministik yada stokastik atamanın hangisinin tercih edileceği literatürde kesinlik kazanmamıştır. Ayrıca literatürde farklı yaklaşımlar altında çalışan atama modelleri de geliştirilmiştir. Dial (2006) çalışmasında kullanıcı dengesi trafik atama probleminin çözümü için yeni bir algoritma geliştirmiştir. Önerilen algoritma ağ yapısı, boyutu ve sıkışıklık olup olmaması durumlarından bağımsız olarak kabul edilebilir hassasiyet ölçüsünde geleneksel varsayımlar altında kullanıcı dengesi link akımlarının bulunmasını sağlamaktadır. Geliştirilen model Chicago bölgesindeki 40000 linkten oluşan bir ağa uygulanmış, Frank-wolfe ve Bar-Gera algoritması ile karşılaştırılmış oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. D’Acierno vd (2006) yaptıkları çalışmada SKD ataması algoritması geliştirmişlerdir. AOY ile benzer sonuçlar veren ve daha kısa sürede çözümü sağlayan KKO tabanlı AOY kullanılmıştır. Sonuç olarak algoritmanın yakınsama yeteneği teorik olarak gösterilmiştir. Connors vd (2007) yaptıkları çalışmada farklı kullanıcı sınıflarının olması ve değişken talep şartları altında probit SKD modelinin çözümü için formülasyon geliştirmiştir. Çalışmada tasarım değişkenlerine karşılık kullanıcıların probit SKD altında cevap verdiği kabulü yapılmıştır.

2.3.1. Link Maliyet Fonksiyonu

Link trafik hacimleri ve maliyetleri arasındaki ilişki *link maliyet fonksiyonu* adı verilen fonksiyonla tanımlanır. Link trafik hacimleri kavşaklardaki trafik akımlarının birbiriyle ilişkili olmasından dolayı birbiri ile bağlantılıdır. B-V çiftleri arasındaki rotaların seyahat maliyeti ise rota üzerindeki linklerin seyahat maliyetlerinin toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Bilindiği gibi seyahat edenlerin rota seçimlerini etkileyen

birçok faktör mevcuttur. Bunlardan en önemlileri arasında seyahat süresi, mesafe, dolaysız maliyetler (yakıt tüketimi, ücretlendirme giderleri, park ücretleri vs.), emniyet ve konfor sayılabilir. Bu faktörlerden bazıları örneğin; seyahat süresi, emniyet ve konfor trafik hacmi ile ilişkili iken diğer faktörler ilişkili değildir. Bu nedenle ulaşım planlamacıları ve trafik mühendisleri çoğu zaman bu faktörleri genelleştirilmiş maliyet fonksiyonu şeklinde gösterirler. Genel anlamda genelleştirilmiş maliyet fonksiyonunun akımla ilişkili en baskın bileşeni seyahat süresidir. Link maliyet fonksiyonları için basitleştirilmiş formların kullanımı TA problemindeki matematiksel hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından önemlidir.

Link seyahat süreleri bilindiği gibi yol genişliğine de bağlı olmakta diğer bir deyişle her yöndeki şerit sayısına bağlı olmaktadır. Link boyunca hareket eden araçlar diğer linklerdeki araçlar, park eden araçlar, taşıt kompozisyonu, yol kenarındaki yaya hareketleri ve trafik yavaşlatma uygulamaları vs. gibi birtakım yol şartları ile sürekli etkileşim halindedirler. Link trafik hacimleri ve maliyetleri arasındaki ilişki birtakım yollarla saptanabilmektedir. Bu konudaki en iyi yaklaşım olarak doğrudan gözlemler sayılabilmekte fakat pratikte gözlemler sırasında birtakım zorluklar olabilmektedir. Başlıca zorluk, genellikle deneylerle elde edilen durumdan farklı olarak, gözlemler sırasında trafik akım seviyelerinde yeterli değişikliklerin elde edilememesidir. Bununla birlikte doğrudan gözlemleri tanımlayabilmek için trafik akım teorileri kullanılır. Bu durumu tanımlayabilmek için ve sonrasında trafik analizleri için birtakım yollar mevcuttur. Bunlar mikroskobik ve makroskobik gösterimler olarak ifade edilebilir. Mikroskobik gösterimde trafik birtakım basit kurallara sahip bireysel araç hareketleri olarak ifade edilirken örneğin; sabit hızda seyahat, kuyruk oluşumu, öndeki aracı takip etme veya belirli bir yere rastgele varış gibi durumlar göz önüne alınır. Bu ifade türü kavşak yakınındaki veya içindeki trafik tanımlaması için link üzerindeki trafik hareketlerinin tanımlanmasından daha uygundur. Makroskobik gösterimde ise trafik hidrodinamikte olduğu gibi sıkıştırılabilir akışkanlar mantığına uygun olarak ifade edilmeye çalışılır. Başka bir deyişle trafik akım, hız ve yoğunluk olarak tanımlanan üç değişkenle ifade edilir. Literatürde uygun link maliyet fonksiyonlarının belirlenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Branston (1976) maliyet fonksiyonları üzerinde araştırmalar yapmış ve bu fonksiyonların gözlem verileri üzerinde uygulanabilirliği üzerine çalışmalar

gerçekleştirmiştir. Branston link maliyet fonksiyonlarını iki kategoride incelemiştir. Bunlar deneysel ve teorik yaklaşımlardır. Deneysel metot gözlem verileri üzerinden uygun maliyet fonksiyonlarının bulunmasını içermektedir. Teorik yaklaşımda ise maliyet fonksiyonu, akım ve seyahat süresi ve kavşak bekleme zamanlarının toplamından oluşan seyahat süresi arasındaki ilişkinin teorik şartlarından faydalanılarak üretilmiştir. Wardrop (1968) tarafından geliştirilen maliyet fonksiyonu genel ortalama hız ile akım arasındaki ilişkiyi ortaya koyan maliyet fonksiyonudur. Yani link bazında maliyet fonksiyonu oluşturmak yerine genel ulaşım ağı için maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır. İngiltere'nin Londra şehri ulaşım çalışmalarında uygulama alanı bulmuştur. Wardrop metodu sinyalize kavşaklardaki kuyruk maliyeti ve sinyalize kavşaklar arasındaki hareket maliyeti olmak üzere her iki değişkeni de maliyet fonksiyonunun içine dahil etmiştir.

TA ve planlama çalışmalarında maliyet fonksiyonunun özellikleri uygulanan çözüm metotlarının yakınsama özelliklerine büyük ölçüde etki yapmaktadır. Bu nedenle maliyet fonksiyonları seçilirken genelleştirilmiş maliyet fonksiyonlarının yanında yerel maliyet fonksiyonlarının yani bölge özelliklerini de temsil edebilen maliyet fonksiyonlarının kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada literatürde sık kullanım alanı bulan ve uygulama kolaylığından dolayı Amerikan Karayolları Bürosu (BPR) tarafından geliştirilen maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. BPR maliyet fonksiyonu Bölüm 3'de verilmiştir.

2.3.2. Deterministik Trafik Ataması

Deterministik trafik atamasının temelini oluşturan DKD kavramı tüm kullanıcıların ağ üzerindeki trafik şartları hakkında mükemmel bilgiye sahip oldukları kabulüne dayanmaktadır. Her bir kullanıcının diğer kullanıcılar tarafından seçilen rotaları bildiği ve en ucuz maliyetli rotayı seçtiği kabulü yapılmaktadır. DKD yaklaşımı altında aynı B-V çifti için tüm rotaların seyahat maliyetleri eşittir. Ayrıca kullanılan rotalardaki seyahat maliyetleri kullanılmayan rotalardakinden daha fazla değildir.

Herhangi bir ulaşım ağı düşünüldüğünde rota seçim problemi için DKD koşulları varyasyonel eşitsizlik problemine (Smith 1979) eşdeğerdir. h^* ile belirtilen rota akımları Denklem (2.7)'de verilen ifadeyi doğrulamaktadır.

$$\sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} c_w^r(\mathbf{h}^*) \cdot (h_w^r - h_w^{r*}) \geq 0 \quad \forall \mathbf{h} \in \Omega \quad (2.7)$$

Burada h_w^r ve c_w^r sırasıyla herhangi bir w B-V çifti arasındaki r rotasındaki akım ve seyahat maliyetidir. Ayrıca \mathbf{h} rota akımları vektörü, W olarak gösterilen B-V çiftleri kümesi, R_w w B-V çifti arasındaki rotalar kümesi ve Ω olası rotalar kümesidir. DKD yaklaşımında aşağıdaki verilen kısıtların sağlanması gerekmektedir.

$$\sum_{r \in R_w} h_w^r = g_w, \quad w \in W \quad (2.8)$$

$$h_w^r \geq 0, \quad r \in R_w, w \in W \quad (2.9)$$

$$v_s = \sum_w \sum_{r \in R_w} \delta_w^{sr} h_w^r, \quad s \in S \quad (2.10)$$

Burada g_w , w B-V çifti arasındaki seyahat talebi, v_s , s linki üzerindeki akım, δ_w^{sr} link-rota belirleme matrisi elemanı, S linkler kümesidir. Link seyahat maliyet fonksiyonu (c_s) sürekli artan ve pozitif bir fonksiyon olması durumunda DKD yaklaşımı Beckman vd (1956) tarafından önerilen konveks optimizasyon problemi şeklinde yazılabilir.

$$\min_{\mathbf{v}} \sum_{s \in S} \int_0^{v_s} c_s(x) dx \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'de verilen amaç fonksiyonunda \mathbf{v} link akımları vektörü olarak ifade edilmiştir. Verilen amaç fonksiyonu konveks bir fonksiyon olduğu için DKD sonucu elde edilen link akımları tekdir. Fakat rota akımları altında konveks olmadığı için rota akımlarının çözümü DKD koşulları altında tek değildir (Sheffi 1985).

2.3.3. Stokastik Trafik Ataması

DKD yaklaşımda tüm seyahat edenlerin ağdaki seyahat maliyetleri hakkında mükemmel bilgiye sahip oldukları ve rota seçiminde tüm kullanıcıların aynı davrandığı kabulü yapılmasına rağmen SKD yaklaşımda sürücülerin rota seçimlerini yaparken gerçek seyahat maliyetlerine göre değil de algılanan maliyetler üzerinden seçim yaptıkları kabulü yapılmaktadır. Sheffi ve Powell (1981) yaptıkları çalışmada farklı düzeydeki sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağlarında deterministik ve stokastik denge atama modellerinden elde edilen link akımları arasındaki farkları incelemiştir. Denge şartları için Daganzo ve Sheffi'de (1977) verilen probit tabanlı stokastik atama modelini kullanmışlardır.

SKD yaklaşımda sürücülerin rota seçim kararlarını etkileyen ağ hakkındaki bilgi düzeylerini temsil edebilmek için algılanan hata terimi ξ_w^r yaklaşımı kullanılmaktadır.

$$C_w^r = c_w^r + \xi_w^r, \quad r \in R_w, \quad w \in W \quad (2.12)$$

Burada C_w^r ve c_w^r sırasıyla herhangi bir w B-V çiftindeki r rotası üzerindeki algılanan ve gerçek maliyetlerdir. ξ_w^r , w B-V çiftindeki r rotası üzerindeki seyahat maliyetini algılama hatası olarak ifade edilmektedir. Daganzo ve Sheffi (1977) SKD yaklaşımını hiçbir sürücünün algılanan seyahat maliyetini tek taraflı olarak rotasını değiştirerek iyileştiremeyeceği şeklinde tanımlamışlardır. Verilen gerçek rota seyahat maliyetleri vektörüne (\mathbf{c}_w) göre sürücüler tarafından seçilen r rotasının olasılığı Denklem (2.13)'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_w^r = \Pr(C_w^r \leq C_w^{r'}, \forall r \neq r' \in R_w \setminus \mathbf{c}_w) \quad (2.13)$$

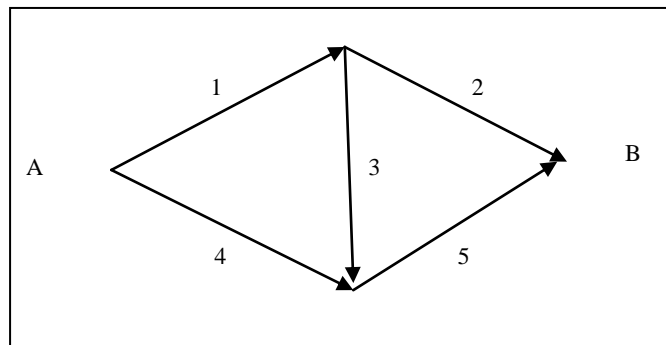
SKD rota akımlarının dağılımı ister istemez rastgele değişken ξ_w^r 'nin olasılık dağılımına bağlı olmaktadır. ξ_w^r 'nin dağılımı konusundaki iki varsayım SKD yaklaşımının iki ana tipini ortaya çıkarmaktadır. Bunlar logit ve probit rota seçim modeli tabanlı SKD modelleridir. Logit model tabanlı birçok rota seçim modeli

literatürde mevcuttur. Bu modeller; C-logit model (Cascetta vd 1996), Nested Logit model (Ben-Akiva 1973), Cross-Nested Logit model (McFadden 1978), Logit Kernel model (Ben-Akiva ve Bolduc 1996) ve Rota Ölçekli Logit model (Ben-Akiva ve Bierlaire 1999) şeklinde sayılabilir. Probit SKD yaklaşımında algılanan rota maliyetlerindeki ξ_w^r hata teriminin Çok Değişkenli Normal Dağılıma (ÇDND) uyduğu varsayımı yapılmaktadır. ÇDND yaklaşımı altında uygulanan probit rota seçim modelinin temel avantajı çakışan rotalardaki korelasyonu göz önüne almasıdır (Sheffi 1985).

2.4. Rota Seçim Modelleri

2.4.1. Rota Seçimi

Rota seçim davranışlarının belirlenmesi talep analizlerinin yapılabilmesinde oldukça önemlidir. Rota seçimini etkileyen faktörler arasında rotaların özellikleri ve seyahat eden kişinin sosyo-ekonomik özellikleri sayılabilir. Rota seçim modellerinde göz önüne alınması gereken durum farklı B-V çiftlerini bağlayan rotaların aynı linkleri kullanması durumudur. Aynı B-V çiftini bağlayan rotaların bazı linkleri ortak kullanma durumu Şekil 2.2’de gösterilmiştir. A ve B noktaları şekilde gösterilen ulaşım ağıyla birbirine bağlanmıştır.



Şekil 2.2 Ulaşım ağı

A ve B noktaları arasında seyahat eden yol kullanıcıları bu iki noktayı birbirine bağlayan ve R1(1-2), R2(1-3-5), R3(4-5) olarak gösterilen alternatif 3 farklı rotadan birini seçeceklerdir. Bu rotalara bakıldığı zaman kolaylıkla görülebilir ki ilk iki rota 1

linkini, ikinci ve üçüncü rotalar ise 5 linkini ortak olarak kullanmaktadır. Bu nedenle bu üç rotanın birbiri ile ilişkili olduğu açıktır. Örneğin 1 linkinde meydana gelen bir değişiklik bu linki kullanan R1 ve R2 rotalarında değişikliğe neden olacaktır. Ayrıca sık ulaşım ağlarında herhangi bir B-V çiftini bağlayan rotalar arasında kullanılan linkler diğer B-V çiftleri arasındaki rotalar tarafından da kullanılabilir. Ağ yapısının bu özelliği rota seçim probleminin çözümü için kullanılacak seçim modellerinin yapısını da etkileyecektir. Rota seçim modellerinin tamamı bu sorunun üstesinden gelecek kapasitede değildir. Literatürde mevcut olan rota seçim modelleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Logit Model
- C-Logit Model
- Cross-Nested logit model
- Logit Kernel model
- Rota Ölçekli Logit Model
- Probit Model

2.4.2. Logit Model

Logit model ilk olarak Luce (1959) tarafından paylaşım formülasyonu olarak geliştirilmiştir. Logit model, rastgele hata terimlerinin birbirlerinden bağımsız olarak Gumbel dağılım sergilediği varsayımı dikkate alınarak fayda maksimizasyonu prensibine dayanır. Gumbel dağılımının varyansı $\pi^2/6$ olup iki gumbel değişkeninin maksimumu yine bir gumbel değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bu dağılım kümülatif dağılım fonksiyonunun analitik integralinin alınmasına olanak sağlar. Seçim olasılığı Denklem (2.14)' deki gibi ifade edilebilir.

$$P_k = \frac{\exp(V_k)}{\sum_{l \in K_{rs}} \exp(V_l)} \quad (2.14)$$

Burada P_k , k rotasının seçim olasılığı; V_k , k rotasının ölçülebilir faydası; K_{rs} , r - s B-V çiftini bağlayan rotalar kümesi olarak tanımlanmaktadır. Çok Değişkenli Logit (ÇDL)

model logit modelin çok değişkenli halidir. ÇDL modelin varyans-kovaryans matrisi eş değişkenli ve köşegen matris olup Denklem (2.15)'de verilmiştir.

$$\Sigma = \frac{\pi^2}{6} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ÇDL model IIA probleminin (Sheffi 1985) özelliğini göstermektedir. IIA problemi alternatif rotalar arasındaki benzerlikleri göz önüne almama problemi olarak tanımlanabilir. Bu problemin matematiksel açıklaması Gumbel dağılımdaki hata terimleri arasındaki bağımsızlıktan kaynaklandığı şeklindedir. Bu nedenle Gumbel dağılımının varyans-kovaryans matrisi eş değişkenli ve köşegen matristir. ÇDL model teorik olarak yetersizliğine rağmen birçok atama modelinde kullanım alanı bulmuştur. Son yıllarda logit model üzerinde birçok çalışma yapılmış ve logit model tabanlı farklı tipte rota seçim modelleri literatüre kazandırılmıştır.

2.4.3. C-Logit Model

C-logit model ÇDL modelin fayda fonksiyonuna ortaklık faktörünün eklenmesi yoluyla geliştirilmiş halidir (Cascetta vd 1996). Ortaklık faktörü, çakışan rotalar arasında paylaşılan linkleri temsil etmekte olup çakışan rotaların faydasını azaltırken, bağımsız rotaların faydasını arttırmaktadır. Burada amaç, çakışan rotaların seçim olasılığını azaltarak, bağımsız bir rotanın seçim olasılığını artırmaktır. Genel olarak, ikiden fazla rotanın olması durumu için k rotasının seçim olasılığı Denklem (2.16)'da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$P_k = \frac{e^{V_k - CF_k}}{\sum_{k'} e^{V_{k'} - CF_{k'}}} \quad (2.16)$$

Burada CF_k (Commuality Factor) k rotasının benzerlik faktörü olup, B-V çifti arasında bulunan diğer rotalarla k rotası arasındaki benzerlik derecesiyle doğru orantılıdır. Cascetta vd (1996) CF terimini aşağıdaki şekilde ifade etmiştir;

$$CF_k = \delta \ln \sum_{n'} \left(\frac{L_{kk'}}{L_k^{1/2} L_{k'}^{1/2}} \right)^\gamma \quad (2.17)$$

Burada; $L_{kk'}$, k ve k' rotaları için ortak kullanılan linklerin uzunluğu (maliyeti), L_k ve $L_{k'}$ k ve k' rotalarının uzunlukları (maliyeti) ve γ pozitif parametredir. C-logit yöntemi literatürde henüz netlik kazanmış değildir. Literatürde, rotalar arasında çakışma durumundan bağımsız olarak da korelasyonlar olabileceği ve C-Logit formülasyonlarının geliştirilerek, bu konuyla ilgili çalışmalarda kullanılabileceği bir çok çalışmada belirtilmiştir (Fowkes ve Toner 1998, Gliebe vd 1999, Ben-Akiva ve Bierlaire 1999).

2.4.4. Cross-Nested Logit model

Cross-Nested logit modelde her bir seçim alternatifi birden fazla komşu alternatif ile ilişkilendirilmiştir. Nested logit modele benzer olarak C_n olarak belirtilen seçim alternatifi seti M adet kümeye ayrılmaktadır (C_{mn}). Ayrıca her bir alternatif i ve küme m için α_{im} ($0 \leq \alpha_{im} \leq 1$) parametresi tanımlanmaktadır. α_{im} her bir alternatifin ait olduğu kümedeki üyelik derecesini ifade etmektedir. i alternatifinin faydası Denklem (2.18)'de verilmiştir.

$$U_{imn} = V_{in} + \xi_{in} + V_{C_{mn}} + \xi_{C_{mn}} + \ln \alpha_{im} \quad (2.18)$$

Burada U_i ve V_i sırasıyla i alternatifinin algılanan ve görünen faydalarını temsil etmektedir. ξ_{in} ve $\xi_{C_{mn}}$ bağımsız hata terimleri olup n kullanıcısının i alternatifini seçme olasılığı Denklem (2.19)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
P(C_{mn} / C_n) &= \frac{e^{\mu V_{C_{mn}}}}{\sum_{l=1}^M e^{\mu V_{C_{ln}}}} \\
P(i / C_{mn}) &= \frac{\alpha_{im} e^{V_{in}}}{\sum_{j \in C_{mn}} \alpha_{jm} e^{V_{jn}}} \\
P(i / C_n) &= \sum_{m=1}^M P(C_{mn} / C_n) P_n(i / C_{mn}) \tag{2.19}
\end{aligned}$$

Burada μ ölçek parametresi, C_n seçim alternatifi seti ve C_{mn} , M adet kümeye ayrılmış seçim alternatifi seti olarak ifade edilmektedir.

2.4.5. Logit Kernel Model

Logit modele Gaussian ve Gumbel hata terimlerinin eklenmesi ile oluşturulan seçim modeli McFadden ve Train (2000) tarafından Karışık Logit (mixed logit) olarak adlandırılırken Ben-Akiva ve Bolduc (1996) Logit Kernel (LK) olarak tanımlamışlardır. Ayrıca literatürdeki birçok yazar tarafından hibrit logit model olarak da tanımlanmıştır (Prashker ve Bekhor 1998). LK modelinin genel formu Denklem (2.20)'de verilmiştir.

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X} + \varepsilon = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X} + \mathbf{F}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{v} \tag{2.20}$$

Burada \mathbf{U} fayda vektörü, $\boldsymbol{\beta}$ bilinmeyen parametre vektörü, \mathbf{X} dışsal değişkenler matrisi, \mathbf{F} faktör matrisi, $\boldsymbol{\xi}$ çok değişkenli dağılmış m adet faktör vektörü, \mathbf{v} gumbel değişkenleri vektörü olarak tanımlanmıştır. LK modelinde rastgele hata terimi ε , iki adet bileşenden oluşmaktadır. Bunlar çok değişkenli probit bileşeni ($\mathbf{F}\boldsymbol{\xi}$) ve Gumbel rastgele değişkeni (\mathbf{v}) olarak ifade edilebilir. Burada $\mathbf{F}\boldsymbol{\xi}$ bileşeni alternatifler arasındaki içsel bağımlılığı temsil etmektedir. LK modelinde olasılık hesaplamalarında simülasyon metotları kullanılarak sonuca gidilmektedir. Ayrıca LK modeli rota tabanlı stokastik trafik atama uygulamalarında kullanılabilir.

2.4.6. Rota Ölçekli Logit Model

ÇDL modelin modifiye edilmiş diğer bir uygulaması Rota Ölçekli Logit (ROL) modeldir (Ben-Akiva ve Bierlaire 1999). ROL modelde rota büyüklüklerinden kaynaklanan düzeltmeler rota faydalarına eklenir. Çakışan linklere sahip olmayan rotalar için fayda vektöründe düzeltmeye ihtiyaç bulunmamaktadır. Rota büyüklükleri rotaların kullandıkları linklerin uzunluklarına ve linki paylaşan rotaların rölatif uzunluklarına göre hesaplanmaktadır. Bu nedenle rota büyüklüklerinin hesaplanması için seçim kümesinin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. ROL modelinin şekli Denklem (2.21)'de verilmiştir.

$$P_k = \frac{\exp(V_k + \ln S_k)}{\sum_{l \in K_{rs}} \exp(V_l + \ln S_l)} \quad (2.21)$$

Burada S_k rota k 'nın büyüklüğüdür. Ben-Akiva ve Bierlaire (1999) rota büyüklüğünü aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$S_k = \sum_{a \in A_k} \frac{l_a}{L_k} \frac{1}{\sum_{j \in K_{rs}} \left(\frac{L_k}{L_j}\right)^\zeta \delta_{aj}} \quad (2.22)$$

ζ ifadesi tahmin parametresi, L_k , k rotasının uzunluğu, l_a , a linkinin uzunluğu, A rota k üzerindeki linkler kümesi, δ parametresi ise link-rota belirleme matrisinin elemanı olarak ifade edilmektedir.

Literatürden görüldüğü gibi rota seçim modelleri genel olarak logit ve probit rota seçim modelleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Ayrıca logit modelin farklı şekillerde modifiye edilmiş türevleri de literatürde kullanım alanı bulmaktadır. Ancak probit rota seçim modelinin diğer rota seçim modellerinden üstünlüğü literatürde birçok yerde belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada rota seçim modeli olarak probit rota seçim modeli kullanılmıştır.

2.4.7. Çok Değişkenli Probit Model

Probit modelde her bir faydanın rastgele bileşeni olan hata teriminin normal dağılım sergilediği kabulü yapılır. Bu hata teriminin eklenik yoğunluk fonksiyonu ise ÇDND fonksiyonudur. ÇDND bilinen normal yoğunluk fonksiyonunun çok değişkenli olarak genişletilmiş halidir ve rastgele vektörün, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_k)$, dağılımını tanımlar. Bu dağılım, ortalama μ ve kovaryans matris Σ , ile tanımlanır ve $\xi \sim \text{ÇDND}(\mu, \Sigma)$ şeklinde ifade edilir. Bu ifade ξ vektörünün, ortalama vektör μ ve kovaryans matris Σ ile çok değişkenli normal dağılım sergilediğini gösterir. Kovaryans matris rastgele vektörün bileşenlerinin varyanslarını içerir ve Denklem (2.23)'de verilmiştir.

$$(\Sigma)_{kk} = \text{var}(\xi_k) \quad \forall k \quad (\Sigma)_{kl} = \text{cov}(\xi_k, \xi_l) \quad \forall k \neq l \quad (2.23)$$

ÇDND eğriliğini lineer dönüşüm altında koruyabilmektedir. Örneğin; 2 adet normal dağılımlı değişkenin toplamı normal dağılımlıdır. Verilen bir kovaryans matrisi ve alternatif özelliklerini belirleyen \mathbf{a} vektörü için fayda vektörünün, $U(\mathbf{a})$, dağılımı ÇDND olarak Denklem (2.24)'deki gibi modellenabilir.

$$U(\mathbf{a}) \sim \text{ÇDND} [V(\mathbf{a}), \Sigma] \quad (2.24)$$

Herhangi bir seçim modelinde alternatifin seçim olasılığı, o alternatifin faydasının seçim alternatifleri içindeki en yüksek faydaya sahip olma olasılığına göre hesaplanır. Probit modelde bu seçim olasılığı kümülatif normal dağılım fonksiyonu kapalı formda düzenlenemediğinden analitik olarak ifade edilemez. İki adet rota seçim alternatifi olma durumunda seçim olasılıkları olasılık dağılım tabloları vasıtasıyla hesaplanabilir. İki den fazla alternatif olduğu zaman probit seçim olasılıklarının hesaplanması oldukça zordur. Bu durumda ya yaklaşık analitik çözüm ya da Monte Carlo simülasyon metodu kullanılır. Literatürde probit seçim olasılıkları hesabı için birçok yaklaşık analitik metot önerilmiştir. Bunlar sayısal integrasyon algoritmaları ve ardışık yaklaşık metotlardır. Sayısal integrasyon metodunda faydaların kümülatif dağılım fonksiyonlarının çoklu integrali durumu ortaya çıkar ve nümerik olarak çözümlenip sonuca ulaşmak mümkündür. Ardışık yaklaşık metot ise iki normal dağılmış değişkenin diğer bir normal dağılmış değişkene göre maksimumunun dağılımının yaklaşık olarak hesaplanmasına dayanır.

Verilen normal dağılımlı faydalar için bu yaklaşım iteratif olarak uygulanabilir. İkili rota seçim durumunda herhangi bir k rotasının seçim olasılığı Denklem (2.25)'de verilmiştir.

$$P_k = \Pr(U_k \geq \max_{\forall l \neq k} \{U_l\}) \quad (2.25)$$

Denklem (2.25) sadece iki rota alternatifinin olduğu durum için söz konusudur ve bu metot literatürde bilinen Clark (1961) metodudur. Rota sayısının çok olması durumunda analitik yaklaşım sergileyen hiçbir metot pratik ve kolay bir şekilde ulaşım ağına uygulanamaz (Sheffi 1985). Sayısal integrasyon metodunun rota sayısı 4 ya da 5 den fazla olduğu durumlarda işlem sıklığı ve zorluğu nedeniyle uygulanması oldukça güçtür (Kanafani 1983). Probit seçim olasılıklarının hesaplanabilmesi için önerilen diğer bir yöntem Monte Carlo simülasyon yöntemidir. Monte Carlo yöntemi, deneysel ve istatistiksel problemlerin çözümüne rastgele sayılarla yaklaşım sergileyen metotlara verilen genel bir isimdir. Bu yöntem, özellikle 1930'lardan sonra hızla gelişmeye başlamış bir tekniktir. Metodun bir probleme uygulanması, problemin rastgele sayıları kullanarak simüle edilip hesap edilmek istenen parametrenin simülasyonların sonuçlarına bakılarak yaklaşık hesaplanması fikrine dayanır. Sonuçları diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, riski daha iyi temsil etmesi nedeniyle mühendislik, eğitimde ölçme ve değerlendirme, askeri savunma teknolojisi, fen ve mühendislik alanında, nükleer teknolojisi ve uzay sisteminde, istatistiksel analiz ve sosyo ekonomi sahalarında sıkça başvurulan bir yöntemdir.

Monte Carlo metodu herhangi bir seçim modelinin seçim fonksiyonunun hesaplanması için uygulanabilir. Mevcut alternatiflere ait fayda fonksiyonları için simülasyon algoritması iteratif olarak şu şekilde gerçekleştirilir; n . iterasyondaki hata terimleri ile ölçülebilen faydaların toplanması ile her bir rota için algılanan faydalar bulunabilir. Bu aşamadan sonra her bir iterasyonda en yüksek faydayı veren rota kaydedilir. Bu süreç N kez tekrar edilir. Buradan k . rotanın seçim olasılığı, P_k , aşağıdaki gibi bulunur;

$$P_k \cong \frac{N_k}{N} \quad (2.26)$$

Burada P_k ; k rotasının seçim olasılığı, N_k ; k rotasının kaydedilme sayısı, N ise Monte Carlo simülasyon sayısıdır (Sheffi 1985).

Maher ve Hughes (1997) yaptıkları çalışmada logit modelden kaynaklanan dezavantajların bulunmadığı ve rota numaralandırılmasının gerek olmadığı Probit Stokastik Model (PSM) önermişlerdir. PSM modeli farklı bir rota bulma metodolojisine sahip olmasına rağmen Burrell'in (1968) modeli ile benzer akımları üretebilmektedir. Stokastik modelde kapasite kısıtlarının birleştirilmesi ile yeni bir SKD modeli geliştirilmiştir. SKD problemi matematiksel programlama modeli olarak ifade edilmiştir. SKD probleminin çözümü için genellikle DKD problemlerinde kullanılan Frank-Wolfe algoritmasına benzer iteratif bir çözüm algoritması kullanılmıştır. Bolduc (1999) çalışmasında Geweke-Hajivassiliou-Keane (GHK) seçim olasılığı simülatörü ile kombine edilmiş maksimum simüle edilmiş olasılık kavramı ve bu pratik tahmin yönteminin hesaplama detayları hakkında bilgi vermiştir. Çalışmada probit formülasyonun büyük çaplı ulaşım ağlarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Sheffi (1982) yapmış olduğu çalışmada çok değişkenli probit modelin fayda maksimizasyonuna dayanan ve beklentilere en çok karşılık veren seçim modeli olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca probit modelin fazla hesaplama süresi gerektirmesine rağmen ortak kullanılan linklerin var olduğu durumlarda açık bir avantajı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada probit modelin çözümü için alternatif çözümlerin karşılaştırılması ve model parametrelerinin tahmini konusunda çözümler yapılmıştır. Seçim fonksiyonunun hesaplanması için 4 farklı tekniğin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiş ve hesaplama zorlukları ve uygulanabilirlikleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan metotlar iki grupta sınıflandırılmıştır. Bunlardan biri az sayıda rota alternatifi olan problemlere uygulanabilen metotlar diğeri ise büyük ulaşım ağlarına uygulanabilen metotlardır. İlk grup oldukça hassas olan sayısal integrasyon, Clark (1961) ve çizelgeleme metotlarıdır. İkinci grup ise simülasyon yaklaşımıdır. Simülasyon yaklaşımındaki uzun hesaplama süresinin bu yöntemin en büyük dezavantajı olduğu vurgulanmıştır.

Horowitz (1991) yapmış olduğu çalışmada gelişen hesaplama metotları ile çok değişkenli probit modellerin uygulanmasındaki zorlukların azaldığını vurgulamıştır.

Çalışmada talep modellenmesinde probit modelin kullanımından doğan faydalar ve oluşan maliyetler incelemiştir. Yai vd (1997) rota alternatifleri arasındaki ortak linklerin varlığını dikkate alan çok değişkenli probit modelin çözümü için farklı bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde öne sürülen varsayımların sıkışıklık etkisi altındaki ulaşım ağları için ÇDL modele göre daha gerçekçi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada çok değişkenli probit modelin rota seçim modelleri içindeki uygulanabilirliğinin artırılabilmesi için üst üste çakışan rotalar arasındaki ilişkiyi temsil eden bir fonksiyon ve bu fonksiyonu kullanan kovaryans matris temsil edilmiştir. Geliştirilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için Tokyo şehrine ait rota seçim verileri kullanılmış ancak önerilen modelin alternatif sayısı fazla olan ulaşım ağları için tüm parametrelerinin belirlenmesi sonraki çalışmalara bırakılmıştır.

Connors ve Sumalee (2009) ulaşım ağındaki rota seyahat sürelerinin rastgele değişkenler olduğu kabulünü yapmışlardır. Yapılan kabule göre sürücüler alternatif rotalardan birini kesin olmayan seyahat sürelerine göre seçmektedirler. Alternatif rotaların seçilebilirliği olası seyahat sürelerine ve algılanan olasılıklarına bağlı olarak değişmektedir. Çalışmada algılanan maliyet ve olasılıklar gerçek maliyet ve olasılıklarından doğrusal olmayan dönüşüm ile elde edilmiştir. Çalışmada kümülatif olasılık teorisi link seyahat sürelerinin rastgele değişkenler olduğu bir ulaşım ağında rota seçim davranışlarının modellenmesi için önerilmiştir.

2.5. Stokastik Kullanıcı Dengesi Modelleri

2.5.1. Logit Stokastik Kullanıcı Dengesi Modeli

Logit SKD modelinde herhangi bir w B-V çiftindeki r rotasının seyahat maliyeti algılama hatasının (ξ_w^r) bağımsız ve eşit (independent identically distributed (i.i.d)) Gumbel dağılımı sergilediği kabulü yapılmaktadır. Denklem (2.27)'de Fisk (1980) tarafından önerilen logit SKD formülasyonu verilmiştir.

$$\sum_{r \in R_w} h_w^r = g_w, \quad w \in W$$

$$h_w^r \geq 0, r \in R_w, w \in W$$

$$v_s = \sum_w \sum_{r \in R_w} \delta_w^{sr} h_w^r, s \in S$$

Kısıtlarına bağlı olarak;

$$\min \sum_{s \in S} \int_0^{v_s} c_s(x) dx + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} h_w^r \ln h_w^r \quad (2.27)$$

Burada θ dağılım parametresi olup rota seçimlerinde seyahat maliyetine olan duyarlılığın belirlenmesinde önemli rol oynar. θ sıfıra yaklaşırken rota seçim olasılıkları aynı olasılıkta yapılırken tersi durumda dağılım parametresi sonsuza giderken verilen rota kümesi içinde en düşük maliyetli rotanın seçilme olasılığı artmaktadır.

Logit SKD modelinin temel avantajı rota akımları analitik denklem vasıtasıyla ifade edilebilmektedir. Logit SKD yaklaşımı ile elde edilen rota akımları Denklem (2.28)'de verilmiştir.

$$h_w^r = \frac{\exp(-\theta c_w^r)}{\sum_{r' \in R_w} \exp(-\theta c_w^{r'})} g_w \quad (2.28)$$

Burada g_w herhangi bir w B-V çiftindeki seyahat talebi, c_w^r herhangi bir w B-V çiftindeki r rotasının maliyeti, R herhangi bir w B-V çiftindeki rotalar kümesi, θ dağılım parametresidir. Logit SKD modelinin konveks yapısından dolayı optimum çözüme ulaşma garantisi vardır. Link trafik hacimleri Powell ve Sheffi (1982) tarafından önerilen AOY ile elde edilebilir.

Logit SKD problemi Denklem (2.29)'da görüldüğü gibi varyasyonel eşitsizlik (VI) problemi olarak yazılabilir. \mathbf{h}^* ile belirtilen rota akımları Denklem (2.29)'da verilen ifadeyi doğrulamaktadır.

$$\sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} (c_w^r(\mathbf{h}^*) + \frac{1}{\theta} \ln h_w^{r*}) \cdot (h_w^r - h_w^{r*}) \geq 0 \quad \forall \mathbf{h} \in \Omega \quad (2.29)$$

Logit modelde uygulanan hata teriminin bağımsız ve eşit olarak dağılım sergileme varsayımı IIA problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum ağdaki çakışan ya da birbiri ile ilişkili rotalar dikkate alındığında gerçek dışı rota seçim dağılımlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Çünkü logit modelde varsayılan yaklaşım altında rotalar arasındaki çakışma derecesine bakılmaksızın seçim olasılıkları hesaplanmaktadır. Sonuç olarak çakışan rotalardaki akımlar olduğundan fazla tahmin edilmektedir (Ortuzar ve Willumsen 2001).

2.5.2. Probit Stokastik Kullanıcı Dengesi Modeli

Probit rota seçim modeli ile algılanan rota seyahat maliyetinin normal dağılımlı olduğu varsayılmaktadır. Bu dağılımın ortalaması gerçek seyahat süresine eşit olup, dağılım link seyahat maliyetlerinin dağılımından türetilebilir. Yol kullanıcıları arasından rastgele seçilen bir sürücünün a linki üzerinde algıladığı seyahat maliyetinin T_a olması durumunda T_a 'nın, ortalaması ölçülen link maliyeti ve varyansı ise ölçülen link seyahat maliyeti ile orantılı olacak şekilde normal dağılım sergilediği kabul edilir ve Denklem (2.30)'daki gibi ifade edilebilir.

$$T_a \sim N(t_a, \beta t_a) \quad (2.30)$$

Burada β oransal bir sabit veya varyans sabiti olarak tanımlanmaktadır. Seyahat süresini algılamadaki farklılıklar ve kesin olmayan durum göz önüne alındığında, seyahat süresi yerine link uzunluklarının da kullanılabilceği söylenebilir. Bu durumda Denklem (2.30)'da belirtilen varyans, βl_a şeklinde yazılabilir. Algılanan rota seyahat maliyetlerinin dağılımı link-rota belirleme matrisi kullanılarak elde edilebilir.

$$C_k^{rs} = \sum_a T_a \gamma_{a,k}^{rs} \quad \forall k, r, s \quad (2.31)$$

Burada C_k^{rs} herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki rota k 'nın algılanan maliyeti, T_a rota k üzerindeki a linkinin algılanan maliyeti, $\gamma_{a,k}^{rs}$ link-rota belirleme matrisini elemanı olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki k rotası üzerindeki algılanan seyahat maliyeti, bu rota üzerindeki algılanan link seyahat maliyetlerinin

toplamıdır ve normal dağılım özelliğinden dolayı algılanan rota seyahat süreleri, c_k^{rs} (ölçülebilir rota maliyeti) olarak tanımlanan ortalamayla normal dağılır. Ayrıca rotanın varyansı Denklem (2.32)'deki gibi gösterilebilir.

$$\text{var}(C_k^{rs}) = \sum_a \beta t_a \gamma_{a,k}^{rs} = \beta c_k^{rs} \quad (2.32)$$

c_k^{rs} herhangi bir r - s B-V çifti arasındaki rota k 'nın ölçülebilir maliyeti ve t_a , rota k üzerindeki a linkinin ölçülebilir maliyeti olarak tanımlanmaktadır. Rota seyahat maliyetleri bununla birlikte birbirlerinden bağımsız değildir. Eğer k ve l gibi iki rota bazı linkleri ortak kullanıyorlarsa ilgili rotaların algılanan seyahat maliyetleri birbiri ile ilişkilidir. Bu iki rota arasındaki algılanan seyahat maliyetleri arasındaki kovaryans ortak kullandıkları link oranı ile ilişkilidir ve Denklem (2.33)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\text{cov}(C_k^{rs}, C_l^{rs}) = \sum_a \beta t_a \gamma_{a,k}^{rs} \gamma_{a,l}^{rs} = \beta c_{k,l}^{rs} \quad (2.33)$$

Burada $c_{k,l}^{rs}$, r - s B-V çifti arasındaki k ve l rotalarının ortak kullandıkları linkler üzerinde ölçülen seyahat süreleridir. Algılanan rota seyahat sürelerinin dağılımı, matris notasyonu kullanılarak çok değişkenli normal dağılım özelliklerinden üretilebilir. $\mathbf{T} = (\dots, T_a, \dots)$ vektörünün algılanan link seyahat süre vektörünü temsil ettiği ve normal dağılımlı olduğu kabul edilirse Denklem (2.34)'de verilen ifade yazılabilir.

$$\mathbf{T} \sim \text{MVN}(\mathbf{t}, \mathbf{\Sigma}') \quad (2.34)$$

Burada $\mathbf{t} = (\dots, t_a, \dots)$ gerçek link maliyetleri vektörü, $\mathbf{\Sigma}' = [\beta \cdot \mathbf{t} \cdot \mathbf{I}]$ kovaryans matrisi ve \mathbf{I} ise birim matristir. Denklem (2.34)'de verilen link kovaryans matrisi köşegen matristir. Köşegen üzerinde βt_a ile belirtilen varyans değerleri bulunmakta ve bütün kovaryans terimleri sıfır değerini almaktadır. r - s B-V çifti arasındaki link rota belirleme matrisi $\mathbf{\Delta}^{rs}$ olarak ve bu matrisin elemanları ise γ^{rs} olarak gösterildiği zaman, r - s B-V çifti arasındaki rotalar için algılanan seyahat süreleri vektörü

($\mathbf{C}^{rs} = (\dots, C_k^{rs}, \dots)$) $\mathbf{C}^{rs} = \mathbf{T}\Delta^{rs}$ olarak belirtilebilir. Bu vektörün eklenik olasılık fonksiyonu Denklem (2.35)'deki gibidir.

$$\mathbf{C}^{rs} \sim \text{MVN}(\mathbf{c}^{rs}, \Sigma^{rs}) \quad \forall r, s \quad (2.35a)$$

$$\mathbf{c}^{rs} = \mathbf{t}\Delta^{rs} \quad \forall r, s \quad (2.35b)$$

$$\Sigma^{rs} = \Delta^{rsT} [\beta \mathbf{t} \mathbf{I}] \Delta^{rs} \quad \forall r, s \quad (2.35c)$$

Σ^{rs} matrisinin köşegen terimleri varyansları, köşegen olmayan terimleri ise kovaryans değerlerini vermekte ve T ise transpozeyi ifade etmektedir.

Probit model kullanılarak rota seçimlerinin elde edilmesi sırasında Monte Carlo metodunun uygulanmasındaki tek zorluk, kovaryans matrisi ile normal dağılmış rastgele vektör üretmektir. Bu zor sürecin üstesinden gelebilmek için kovaryans matrisin faktörizasyon işlemine tabi tutulması gerekir. Bu süreç *Cholesky Faktörizasyonu* olarak isimlendirilir. Cholesky faktörizasyonu simetrik kare matrisin, üçgen matrislere ayrılması işlemidir. \mathbf{A} matrisinin simetrik olması halinde \mathbf{A} katsayı matrisi $\mathbf{A} = \mathbf{LDU}$ şeklinde çarpanlara ayrılabilir. Bu denklem;

$$\mathbf{A} = (\mathbf{LD}^{1/2}) (\mathbf{D}^{1/2}\mathbf{U}) \quad (2.36)$$

şeklinde yazılabilir. $\mathbf{D}^{1/2}$ matrisi elemanları \mathbf{D} matrisinin elemanlarının kareköküne eşit olan bir köşegen matristir. \mathbf{A} matrisi simetrik olduğundan;

$$\mathbf{LD}^{1/2} = (\mathbf{D}^{1/2}\mathbf{U})^T \quad (2.37a)$$

veya

$$\mathbf{D}^{1/2}\mathbf{U} = (\mathbf{LD}^{1/2})^T \quad (2.37b)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada yeni bir \mathbf{B} alt üçgen matrisi;

$$\mathbf{LD}^{1/2} = \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & & & \\ b_{21} & b_{22} & & \\ \cdot & \cdot & \dots & \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

şeklinde tarif edildiği zaman bu matrisin elemanları;

$$b_{ij} = (a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{ik}b_{jk}) / b_{jj} \quad (j = 1, 2, \dots, i-1) \quad (2.39a)$$

$$b_{ii} = (a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik}^2)^{1/2} \quad (2.39b)$$

denklemleri ile bulunabilir. Cholesky faktörizasyonu yardımıyla kovaryans matrisinden elde edilen \mathbf{R} üçgen matrisi ile aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\mathbf{R.R}^T = \Sigma \quad (2.40)$$

Bu durumda standart normal rastgele değişken vektörü \mathbf{X} ' den \mathbf{x} değerlerini elde edebilmek için \mathbf{X} vektörünün, ortalaması $\boldsymbol{\mu}$ ve kovaryans matrisinin Σ olduğunu farz edelim;

$$\mathbf{X} \sim \text{MVN}(\boldsymbol{\mu}, \Sigma) \quad (2.41)$$

Rastgele değişkenin (\mathbf{S}) dağılımı ise denklem(2.42)'deki gibidir.

$$\mathbf{S} \sim \text{MVN}(0, \mathbf{I}) \quad (2.42)$$

Burada \mathbf{I} birim matristir. Lineer dönüşüm tekniği uygulanarak;

$$\mathbf{X} = \mathbf{R.S} + \boldsymbol{\mu} \quad (2.43)$$

eşitliği elde edilir. \mathbf{X} vektörünün dağılımı, \mathbf{S} vektörünün dağılımından elde edilebilir. Denklem (2.44a) ve (2.44b)'de görüldüğü gibi denklem (2.43) eşitliğinin beklenen değeri $\boldsymbol{\mu}$ ve kovaryansı Σ olmaktadır.

$$E[\mathbf{X}] = \mathbf{R} \cdot \mathbf{0} + \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu} \quad (2.44a)$$

$$\text{cov}[\mathbf{X}] = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{R} = \boldsymbol{\Sigma} \quad (2.44b)$$

Bu dönüşüm sonucu \mathbf{x} değerleri denklem (2.45)'de gösterildiği gibi bulunabilir.

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\mu} \quad (2.45)$$

Probit tabanlı stokastik atama algoritması kısmen basit olmakla birlikte birtakım zorluklar içermektedir. İterasyonlar boyunca her bir linkin algılanan seyahat süresi örneklenir. Bunun sonucunda hep veya hiç metodunda kullanılacak algılanan link seyahat süreleri bulunur. Elde edilen algılanan link seyahat sürelerine bağlı olarak, talep B-V noktalarını bağlayan en kısa seyahat süresine ait rotaya atanır. Bu süreç yani örnekleme ve atama iterasyonlar boyunca devam eder. Her bir iterasyonda elde edilen link akımlarının her bir link için ortalamaları alınarak sonuç akımları belirlenen yakınsama kriteri sağlanınca elde edilir (Sheffi 1985).

Her bir iterasyondaki ortalama link akımlarının varyansı dikkate alınarak örnekleme ve iterasyon sayısına karar verilebilir. l . uygulamadaki a linki üzerindeki akım $X_a^{(l)}$ olarak verildiği zaman link akımı, $x_a^{(l)}$, Denklem (2.46a)'daki gibi yazılabilir.

$$x_a^{(l)} = \frac{1}{l} \sum_{m=1}^l X_a^{(m)} \quad (2.46a)$$

Her bir link a için standart sapma Denklem (2.46b)'deki gibi yazılabilir;

$$\sigma_a^{(l)} = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{m=1}^l (X_a^{(m)} - x_a^{(l)})^2} \quad (2.46b)$$

Ayrıca $x_a^{(l)}$ 'nin standart sapması şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_a^{(l)} = \sqrt{\frac{1}{l(l-1)} \sum_{m=1}^l (X_a^{(m)} - x_a^{(l)})^2} \quad \forall a \quad (2.47)$$

Standart sapma aynı zamanda probit SKD modelinin durma kriterinin oluşturulmasında da kullanılabilir.

$$\max_a \left\{ \sigma_a^{(l)} \right\} < K \quad (2.48a)$$

Aynı şekilde yine varyans kriteri kullanılarak algoritmada durma kriteri geliştirilebilir.

$$\frac{\sum_a \sigma_a^{(l)}}{\sum_a x_a^{(l)}} \leq K' \quad \text{veya} \quad \max_a \left\{ \frac{\sigma_a^{(l)}}{x_a^{(l)}} \right\} \leq K'' \quad (2.48b)$$

Probit SKD modelinin algoritması aşağıdaki gibi yazılabilir (Sheffi 1985);

Adım 0: Başlangıç. $l=1$

Adım 1: Örneklem. Her bir link a için $T_a^{(l)}$, $T_a \sim N(t_a, \beta t_a)$ kullanılarak elde edilir.

Adım 2: Hep veya hiç ataması. B-V noktaları arasındaki q_{rs} talebini en kısa seyahat süreli rotaya yükle. $X_a^{(l)}$ akımlarını bul.

Adım 3: Ortalama akımları hesapla. $x_a^{(l)} = [(l-1)x_a^{(l-1)} + X_a^{(l)}] / l \quad \forall a$

Adım 4: $\sigma_a^{(l)} = \sqrt{\frac{1}{l(l-1)} \sum_{m=1}^l (X_a^{(m)} - x_a^{(l)})^2} \quad \forall a$ olarak verilen durma kriterini hesapla.

Adım 5: $\max_a \left\{ \frac{\sigma_a^{(l)}}{x_a^{(l)}} \right\} \leq K''$ sağlandıysa $x_a^{(l)}$ aranan çözümdür. Aksi halde $l=l+1$ ve Adım 1'e git.

Probit SKD modeli, logit SKD modelinde karşı karşıya kalınan IIA probleminin dezavantajlarını ortadan kaldırdığı için gerçeğe yakın SKD akımlarının bulunmasında oldukça avantajlıdır. Bu nedenle çalışmada probit SKD yaklaşımı altında TA problemi çözülmüştür. Bölüm 4'de literatürde mevcut ve çalışmada geliştirilen probit SKD modellerinin çözüm algoritmaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.6. Sıkışıklık Fiyatlandırması

İlk olarak sıkışıklık fiyatlandırması sistemi 1975 yılında Singapur'da uygulanmıştır. Bu sistem sıkışıklık fiyatlandırma sisteminin en basit hali olup kullanıcılar seçilen bölgeye girişlerinde sabit bir ücret ödemek zorundadırlar. Araçlar paralı bölgeyi terk etmedikçe veya tekrar giriş çıkış yapmadıkça yeni ücret ödemek zorunda kalmamaktadırlar. Bu sistem daha sonra yerini elektronik yol ücretlendirmesi sistemine bırakmıştır. Sıkışıklık fiyatlandırması sisteminin uygulanması ve işletilmesi oldukça masraflıdır. Londra merkezi için ilk yatırım maliyeti okuma-yazma tekniği ile 85 milyon pound iken, smart kartların kullanımı ile bu oran 140 milyon pounda çıkmaktadır. Bu maliyetler son zamanlarda kurulu elektronik nakit ödeme kartları ile bir miktar aşağıya çekilmiştir. Yıllık işletme masrafları ise her iki sistem içinde 55 milyon pound civarında tahmin edilmiştir. Bununla birlikte sermayenin geri dönüş süresi 4 yıldan daha azdır.

Fiyatlandırma uygulamalarının teorik boyutuna bakıldığı zaman literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Etkin ve uygulama kolaylığı sağlayan birçok sıkışıklık fiyatlandırması modeli geliştirilmiştir. Chiou (2008) değişken talepli bir ulaşım ağında sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesi için yeni bir optimizasyon algoritması tasarlamıştır. Değişken talepli kullanıcı dengesinin varyasyonel eşitsizlik formülasyonu olarak ifade edildiği modelde ulaşım ağı denge kısıtlarının göz önüne alındığı matematiksel programlama olarak formüle edilmiştir. Sıkışıklık fiyatlandırması yapılan değişken talepli ulaşım ağının çözümü için genelleştirilmiş eğim tahmin metodu kullanılmıştır. Küçük ölçekli bir ulaşım ağında sayısal hesaplamalar yapılmış ve cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir. Hamdouch vd (2007) yapmış oldukları çalışmada çok modlu ulaşım ağında (yürüme, otomobil, otobüsle, tren, metro) sıkışıklık fiyatlandırması modeli önermişlerdir. Geçiş ücretlerinin belirlenmesi için kullanıcı dengesi ve sistem optimum modelleri kurulmuştur. Her iki modelde de her bir B-V çifti arasında yapılan seyahatlerde kullanıcıların belli stratejiler benimsediği ve talebin sabit olduğu varsayımı yapılmıştır. Otomobil ve toplu taşıma modları arasındaki seçim iki terimli logit fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak sayısal uygulama sonucunda modelin etkinliği gösterilmiştir. Eliasson ve Mattsson (2006) tarafından yapılan çalışmada sıkışıklık fiyatlandırması tekniğinin şehir içi ulaşım ağlarındaki çevresel ve trafikten kaynaklı problemlerin çözümünde etkin yöntemlerden biri olduğu

belirtilmesine rağmen sıkışıklık fiyatlandırması uygulamalarının politik ve kullanıcılardan gelen yansımalar doğrultusunda oldukça yavaş uygulama alanı bulduğu bildirilmiştir. Çalışmada yol ücretlendirmesinin etkilerinin değerlendirildiği bir model geliştirilmiş ve büyük ölçekli gerçek bir ulaşım ağına uygulaması yapılmıştır. Önerilen metot eş zamanlı olarak hem seyahat davranışlarını hem de araç sahipliği, toplu taşıma, servis düzeyi gibi ulaşım imkanlarını göz önüne almaktadır.

Ho vd (2005) şerit tabanlı sıkışıklık fiyatlandırması için sürekli trafik denge modelini önermişlerdir. Çalışmada kullanılan trafik denge modelinde ulaşım ağındaki seyahatlerin dağılımına rağmen ev-iş seyahatleri sürekli seyahatler olarak nitelendirilmiştir. Özellikle sabah pik saatlerde tüm seyahat edenlerin rotalar arasındaki en kısa yolu kullanarak merkezi iş alanına seyahat ettikleri varsayımı yapılmıştır. Seyahat edenlerin ücretli ya da ücretsiz seyahat davranışları matematiksel olarak formüle edilmiş ve sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Önerilen model ile trafik planlamacıları kolayca bir ya da daha fazla ücretlendirilmiş şeritler seçip şerit bazlı ücretlendirmenin kullanıcı faydaları ve sosyal refah anlamındaki etkilerini kolayca değerlendirebilmektedirler. Aynı şekilde Palma vd (2005) dinamik ağ simülatörü kullanarak sıkışıklık fiyatlandırması modelleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada 6 farklı ücretlendirme modeli kullanılmış ve sonuç olarak önerilen ücretlendirme tekniklerinin ağ performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

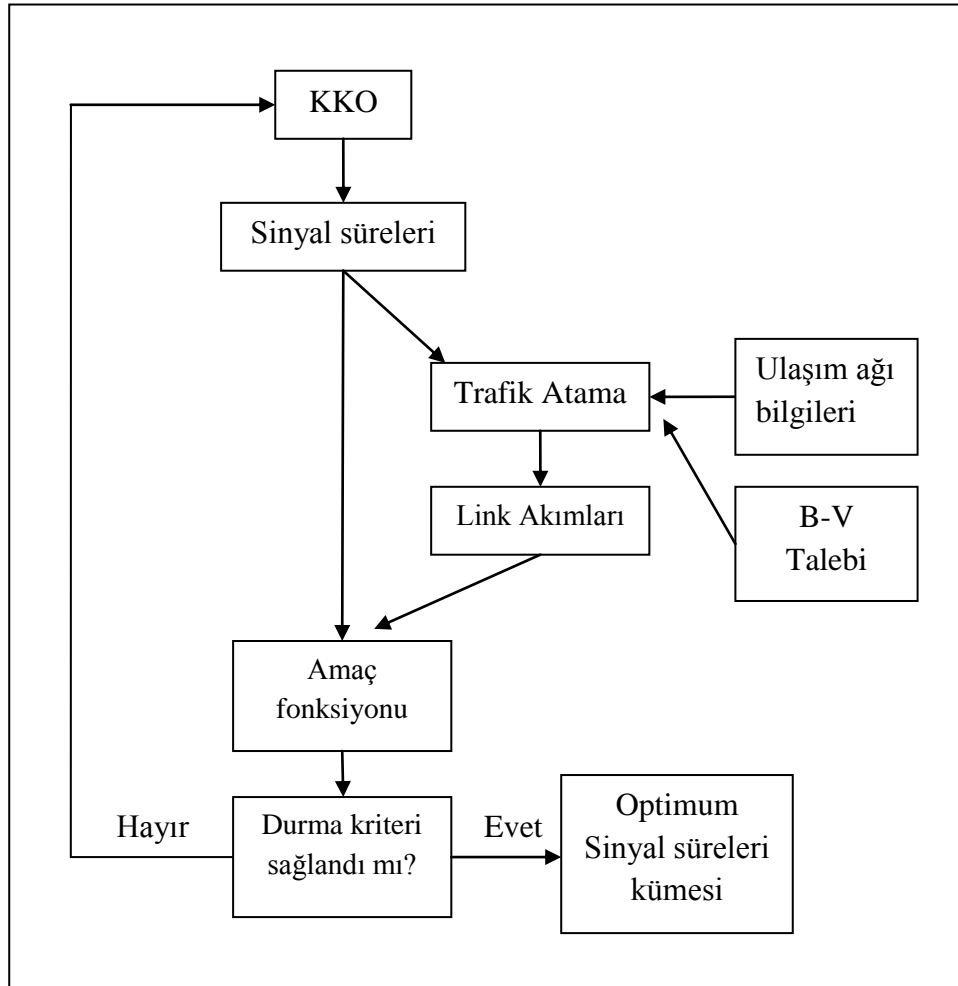
Bu çalışmada önerilen sıkışıklık fiyatlandırması modeli ile optimum sinyal parametreleri ve link ücretlerinin artan talep senaryolarına bağlı olarak değişimi KAKOSKA-1 modeli kullanılarak örnek ulaşım ağında incelenmiş ve Bölüm 5’de verilmiştir. Ayrıca geliştirilen model ile sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu ağdan elde edilebilecek gelirler ve marjinal faydaların belirlenmesi amaçlanmıştır.

2.7. KAKOSKA Modelinin Genel Çerçevesi

Trafik mühendisleri ve planlamacıları sinyal kontrol probleminin çözümü için uzun yıllardır efektif ve etkili metotlar üzerine araştırmalar yapmaktadırlar. Problemin çözümü için göz önüne alınması gereken kontrol parametresi sayısının fazlalığı çözümün karmaşıklığını artırmaktadır. Ayrıca çözüm için probleme yeni kontrol

parametrelerinin eklenmesi problemin konveks olmayan yapısından dolayı çözümü daha da zorlaştırmaktadır.

UAT probleminin çözümü için çalışmada önerilen KAKOSKA modelinin genel çerçevesi Şekil 2.3’ de verilmiştir. KAKOSKA modelinde KKO metodu ile hem TA sürecinde hem de amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılmak üzere sinyal süreleri kümesi oluşturulmaktadır. TA kısmında ulaşım ağı bilgileri ve B-V talebi modele verildikten sonra link akımları elde edilmektedir. TA süreci sonunda elde edilen link akımları ve KKO ile oluşturulan sinyal süreleri kümesinin kullanılması ile amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır. KAKOSKA modelinde amaç fonksiyonu değeri önceden verilen yakınsama kriterini sağladığı anda optimum sinyal süreleri kümesi elde edilmektedir. KAKOSKA modeli ile ilgili detaylı açıklamalar Bölüm 3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 KAKOSKA modeli genel çerçevesi

2.8. Sonuçlar

Bu b3l3mde TA, DKD ve SKD problemlerinin ana prensipleri, matematiksel form3lasyonları ve literat3r çalışması verilmiştir. Literat3rden g3r3ld3đ3 gibi DKD yaklaşımı altında 3z3lmeye başlanan TA probleminin daha sonraları SKD yaklaşımı altında 3z3lmesinin gerçek s3r3c3 davranışlarının modellenmesi açısından daha uygun olacağı kanısında ortak bir g3r3ř vardır. SKD yaklaşımı altında 3z3m için kullanılacak olan rota seçim modelleri konusunda ki gelişmeler, g3n3m3zde yoğun bir şekilde devam etmektedir. Hangi rota seçim modelinin tam olarak gerçek kullanıcı davranışlarını temsil ettiği konusunda literat3rde net bir g3r3ř yoktur. Fakat her bir seçim modelinin avantaj ve dezavantajları olduğu belirtilmiştir.

Probit modelin logit modele oranla daha gerçekçi olduğu ve ulaşım ağlarında sıklıca karşılaşılan bir durum olan IIA problemini ortadan kaldırdığı literat3rde birçok çalışmada belirtilmiştir. Bu alışmada SKD atamasında probit rota seçim modeli kullanılmıştır. Ayrıca probit seçim modelinin uygulanması açısından da literat3rde oldukça farklı çalışmalar mevcuttur. Çok değişkenli probit modelin kapalı fonksiyon 3z3m3n3n olmamasından dolayı seçim olasılıklarının bulunması ve bulunan değerlerin TA problemine adaptasyonu konusunda birçok çalışma mevcuttur. Çalışmada probit rota seçim olasılıklarının bulunması için Monte Carlo sim3lasyon tekniğinden faydalanılmıştır.

Ayrıca B3l3m 2.2’de verildiği gibi UAT problemi hakkında literat3rde birçok çalışma mevcut olup birbirinden farklı birçok 3z3m y3ntemi sunulmuştur. Ancak son yıllarda yapılan çalışmaların çoğunda sezgisel metotların kullanımı oldukça artmıştır. Sezgisel metotların gelişimine baktığımız zaman KKO tekniğinin UAT 3z3m3nde kullanımını literat3re son zamanlarda girmeye başlamıştır. Ancak modifiye edilmiş ve performansı artırılmış KKO metodu ile UAT tasarımı literat3rde uygulanmamıştır. Bu nedenle çalışmada KKO yaklaşımı altında UAT problemi 3z3lm3řt3r. UAT probleminin 3z3m3 için iki seviyeli programlama tekniği kullanılmıştır. Ayrıca sonuçlar KİY yaklaşımı altında yapılan UAT ile de karşılaştırılmıştır. 3. B3l3m KKO metodu ile ilgilidir.

3. KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU

3.1. Giriş

Bu bölümde UAT probleminin üst seviyesi olarak belirtilen sinyal kontrol probleminin çözümü için kullanılacak olan KKO metodu hakkında literatür çalışması verilmiştir. Bölüm 3.2’de KKO metodunun genel prensipleri, sonraki bölümde çalışmada kullanılan modifiye edilmiş KKO metodunun detaylı algoritma adımları ve son bölümde önerilen KAKOSKA modelinin örnek ulaşım ağına uygulaması verilmiştir.

3.2. Karınca Kolonisi Optimizasyonu

Optimizasyon teknikleri deterministik ve stokastik olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Deterministik metotlar fonksiyonun sürekli olmasını ve türevinin alınabilir olmasını gerektirmektedir. Herhangi bir $f(x)$ fonksiyonu sürekli ve türevlenebilir ise fonksiyonun minimum noktası türevinin sıfır olduğu noktada bulunabilir. Fakat $f(x)$ fonksiyonu türevlenebilir fonksiyon değil ise bu durumda stokastik metotlara gereksinim duyulmaktadır. Stokastik metotlara örnek olarak GA, Armoni araştırması tekniği, Pekiştirilmiş öğrenme algoritmaları, TAR, TB, KKO vs. verilebilir. Stokastik metotların sık kullanılmasının ana sebepleri olarak karmaşık problemleri çözmedeki başarısı ve global minimumun bulunmasındaki etkinliği sayılabilir. Birçok stokastik (sezgisel) metot global minimumun bulunması için literatürde verilmiştir. Bunlar arasında MACO (Toksarı 2007a), adaptif rastgele arama tekniği (Hamzaçebi ve Kutay 2006), sezgisel rastgele optimizasyon tekniği (Li ve

Rhinehart 1998), rastgele arama tekniği ile birleştirilmiş GA (Hamzaçebi 2008), dinamik rastgele arama tekniği (Hamzaçebi 2007) ve ardışık GA (Kwon vd 2003) sayılabilir.

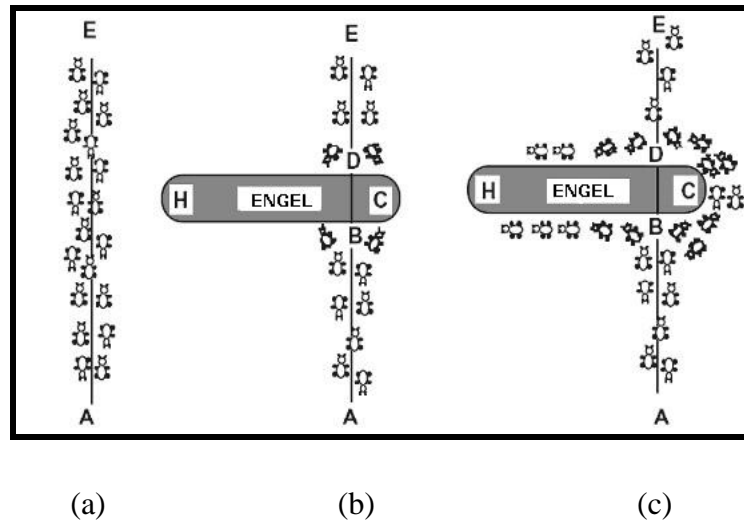
KKO son zamanlarda çözümü zor optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan meta sezgisel bir yaklaşımdır (Dorigo ve Di Caro 1999). İlk olarak KKO algoritması KS olarak önerilmiş ve gezgin satıcı problemi üzerine uygulanmıştır (Dorigo vd 1996). KKO algoritmaları, optimizasyon problemlerinin çözümü için gerçek karıncaların yiyecek bulma davranışlarının gözlemlenmesi (Deneuborg vd 1983) ile ortaya çıkmıştır. Yapay zeka araştırmacıları tarafından karınca algoritmaları sürü zekası (*swarm intelligence*) kategorisi içine dahil edilmiştir (Bonabeau vd 1999). Sürü zekası kategorisi gerçek yaşamdaki böcek sürülerinin davranışlarını temel almakta ve herhangi bir problemin çözümünde araç olarak kullanılabilen birtakım uygulamaları içermektedir. Bu kategoriye dahil edilebilecek diğer algoritmalar olarak yabanarısı ve arı sürülerinin davranışlarından ortaya çıkan algoritmalar sayılabilir (Mullen vd 2009). Karınca algoritmalarının ortaya çıkmasının arkasında gerçek karınca davranışlarının ve karıncaların yiyecek bulma stratejilerinin gözlemlenmesi bulunmaktadır. KKO popülasyon tabanlı sezgisel bir metod olarak son yıllarda birçok optimizasyon probleminin çözümünde kullanım alanı bulmuştur. Bunlar arasında araç rotalama (Bell ve Mullen 2004, Donati vd 2008), kvadratik atama (Talbi vd 2001, Demirel ve Toksarı 2006), dinamik sürekli optimizasyon (Dreo ve Siarry 2006), araç izelgeleme (Wang ve Shen 2007) ve gezgin satıcı problemi (Cheng ve Mao 2007) sayılabilir.

Genel KKO algoritması Şekil 3.1’de verilmiştir. İlk adım çoğunlukla *feromon* izinin başlangıç değerlerinin belirlenmesi şeklinde tanımlanmaktadır.

Adım 1:	Başlangıç
	Feromon izi
Adım 2:	İterasyon
	Her bir karınca için tekrarla
	Feromon izi kullanılarak çözüm oluşturma
	Feromon izinin güncellenmesi
	Durma kriteri

Şekil 3.1 Genel karınca algoritması (Talbi vd 2001)

Başlangıçta her bir karınca olasılıklar çerçevesinde belirlenen geçiş kuralına göre verilen problem için çözüm üretmekte ve genel olarak çözüm feromon miktarına bağlı olmaktadır. Bütün karıncalar verilen problem için çözüm ürettikten sonra feromon güncelleme kuralı iki evrede gerçekleştirilir. Buharlaştırma evresinde feromon izinin bir kısmı buharlaştırılır ikinci evrede ise karıncalar buldukları çözüme uygun olarak feromon depolarlar. Bu süreç durma kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi gerçek karıncalar yiyeceğe giden yolları üzerine bir engel koyulduğu zaman iki yoldan bir tanesini tercih edeceklerdir. Şekil 3.2a'da AE yolu üzerindeki karınca kolonisi yolu üzerine Şekil 3.2b'deki gibi bir engel koyulduğu zaman karıncalar engel etrafından dönebilmek için HB ve BC yollarından bir tanesini tercih edeceklerdir.



Şekil 3.2 Gerçek karınca davranışları

Kullanılan tekniğin en temel unsurlarından biri haberleşme aracı olarak kullanılan ve problemlerde çözümün kalitesini gösteren gerçek karıncaların geçtikleri yollara bıraktıkları feromon kimyasalıdır. Feromon kimyasalı karıncalara hedef noktalarına varabilmeleri için rehberlik etmekte kullanılmaktadır. Feromon miktarı karıncalar tarafından güncellenmekte ve bir bilgiyi temsil etmektedirler. Bir yolda feromon izinin yoğun olması o yolun tercih edilme olasılığını artırır. Karınca kolonisi ilk olarak deterministik düşünceye göre eşit olasılıkta seçim yapacak -stokastik düşünceye göre mutlaka bir yol diğerinden daha tercih edilebilir durumdadır- ve kısa olan yolu tercih eden karıncalar yiyeceğe ulaşip daha kısa zamanda yuvalarına geri döneceklerdir. Bu

süreç sırasında karıncalar geçtikleri yerlere feromon denen kimyasal maddeyi bırakacaklar ve kısa olan yolda az bir zaman sonra daha fazla feromon birikmeye başlayacaktır (Şekil 3.2c). Karıncalar bir sonraki turlarında artık feromonun fazla olduğu kısa olan yolu tercih etmeye başlayacaklar ve bir süre sonra karınca kolonisinin tamamı yiyeceğe ulaşmak için kısa olan yolu tercih edecektir. Karıncaların bu davranış kalıplarının incelenmesi ile bu sistemin özellikle en kısa yol problemleri olmak üzere pek çok optimizasyon problemlerinde kullanılabileceği ortaya atılmıştır.

Kuan vd (2006) ileri beslemeli otobüs ağ tasarım problemi için GA ve KKO tekniklerinden faydalanmıştır. Özellikle KKO tekniği bu çalışmada otobüs ağ tasarımı için ilk kez kullanılmış ve son derece iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Toksarı (2007a) global optimumun bulunmasında modifiye edilmiş KKO algoritmasını kullanmıştır. Kullanılan algoritma bazı standart test fonksiyonları üzerinde denenmiş ayrıca diğer algoritmalar ile karşılaştırılmış ve oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Baskan vd (2009a) KKO algoritmasının performansının iyileştirilmesi için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma global optimumun bulunmasında 14 adet test fonksiyonu üzerinde denenmiş ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen KKO algoritmasının oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Toksarı (2007b) enerji talebinin modellenmesi için literatürde ilk defa KKO metodunu önermiştir. Bu çalışmada nüfus, gayri safi milli hasıla, ithalat ve ihracat değişkenlerine bağlı olarak enerji talebi KKO algoritması kullanarak modellenmiştir. Ayrıca Baskan vd (2009b) ulaştırma sektöründeki enerji talebinin modellenmesi için modifiye edilmiş KKO metodunu kullanmışlardır. Yapılan çalışmada 2025 yılına kadar sosyo-ekonomik parametrelere bağlı üç farklı matematiksel model kullanılarak ulaştırma sektörünün enerji talebi tahmin edilmiştir. Bell ve McMullen (2004) KKO metodunu araç rotalama probleminin çözümünde kullanmışlardır. Metodun optimum sonuçların bulunmasında oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Guntsch ve Middendorf (2002) popülasyon tabanlı KKO algoritmasını dinamik optimizasyon problemlerine uygulamışlardır. Geliştirilen algoritmada çoğu KKO algoritmasında olduğu gibi feromon transferi yerine çözüm kümeleri ilk iterasyondan itibaren diğer adımlara aktararak çözüme gidilmiştir. Gelecek iterasyonlardaki karıncalara ait feromon

bilgilerini belirlemek için aktarılan çözüm kümeleri kullanılmıştır. Algoritma dinamik gezgin satıcı problemi ve quadratik atama problemi üzerinde test edilmiştir.

Poorzahedy ve Abulghsami (2005) UAT probleminin doğası ve amaç fonksiyonunun konveks olmayan yapısından dolayı çözümü oldukça zor problemlerden biri olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada KS algoritması UAT problemi için önerilmiş ve örnek ulaşım ağı üzerinde test edilmiştir. Literatürdeki diğer çözüm algoritmalarıyla yapılan karşılaştırmalardan sonra sonuçların oldukça cesaret verici olduğu vurgulanmıştır. Poorzahedy ve Rouhani (2006) UAT problemi için KS ile diğer sezgisel metotları (GA, TB, TAR vb.) birleştirerek melez algoritmalar oluşturmuştur. Bu algoritmalar 1298 nod, 1726 link ve 26 kavşaktan oluşan gerçek bir ulaşım ağı üzerinde denenmiş ve melez algoritmaların temel KKO algoritmasından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Fakat bu çalışmada kullanılan gerçek ulaşım ağının oldukça kompleks olmasından dolayı melez algoritmaların daha başarılı olduğu belirtilmektedir. Çalışmanın sonucunda ise daha basit bir ulaşım ağı tasarımında ise temel KKO tekniğinin kendi başına yeterli olduğu vurgulanmıştır.

Zhao vd (2007) paralel sistem problemlerinin optimizasyonu konusunda çok amaçlı KS algoritmasını önermişlerdir. Önerilen karınca algoritmasının problemin çözümünde diğer optimizasyon algoritmalarına göre oldukça avantajları olduğu belirtilmiştir. D'Acierno vd (2006) SKD probleminin çözümü için KKO tabanlı yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Sonuç olarak Blum teoremi yardımı ile KKO tabanlı algoritmanın yakınsama sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar geliştirilen algoritmanın ağ tasarımı için, SKD ataması probleminde kullanılabileceğini göstermiştir. Yu ve Yang (2005) otobüs ağ tasarımı için optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Modelde hat uzunluğu kısıtına bağlı olarak hat başına minimum transfer ve maksimum yolcu adedi sağlanması amaçlanmıştır. Problemi çözmek için paralel KKO tekniği kullanılmıştır. Örnek ulaşım ağında geliştirilen model test edilmiş, hesaplama kalitesi ve hızında gözle görülür bir artış sağlanmıştır.

Literatürden görüldüğü gibi KKO algoritması herhangi bir optimizasyon probleminin çözümünde ya da verilen herhangi bir fonksiyon için global minimumun bulunmasında oldukça etkin olmasına rağmen geliştirilmeye açık bir metottur. Çalışmada Baskan vd

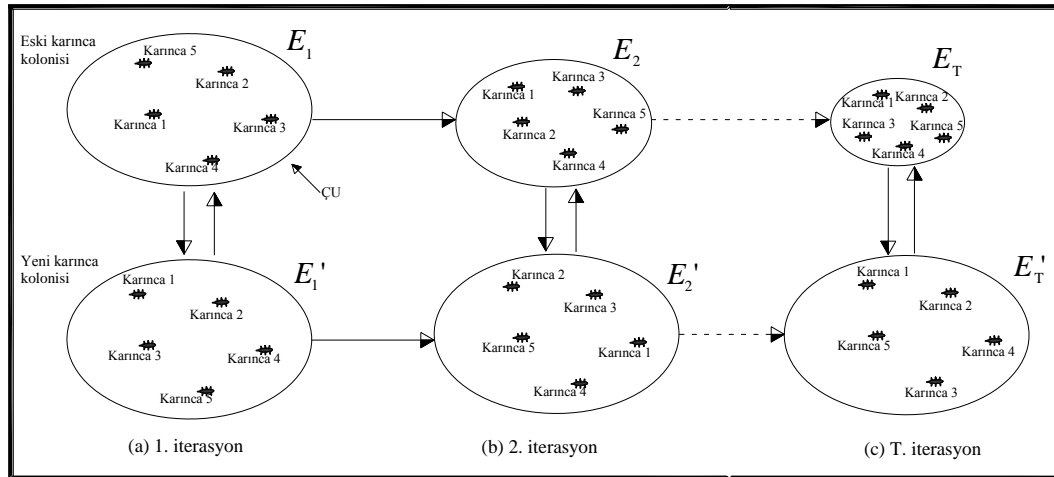
(2009a) tarafından geliştirilen modifiye edilmiş KKO algoritması UAT tasarımının üst seviye olarak nitelendirilen sinyal kontrol parametrelerinin optimizasyonu kısmında kullanılmıştır. Kullanılacak olan KKO algoritması literatürdeki diğer KKO algoritmalarından farklı olup Çözüm Uzayı (ÇU) elde edilen en iyi çözüm değeri ve önceden verilen kısıt vektörüne bağlı olarak iterasyonlar boyunca sınırlandırılmaktadır. Sınırlı ÇU tekniği sayesinde KKO algoritmasının performansı belirgin şekilde artmaktadır. UAT probleminin çözümünde kullanılan KKO algoritmasının algoritma adımları ve çalışma prensipleri Bölüm 3.3’de verilmiştir.

3.3 Modifiye Karınca Kolonisi Optimizasyonu Metodu

Modifiye KKO yaklaşımında her bir karınca, bir önceki iterasyondaki en iyi karıncaya ve β vektörüne, $\beta=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$, bağlı olarak, aramaya iterasyonlar boyunca devam etmektedir. KKO algoritması, başlangıç, feromon güncellemesi ve çözüm evresi olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Kullanılan KKO yaklaşımının ana şekli Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 5 adet karıncanın ÇU içinde optimum çözümü bulmak için arama yapmaya başladığı farz edilirse ilk iterasyonun başlangıcında bütün karıncalar ÇU içinde en iyi çözümü rastgele aramaya başlarlar ve başlangıç evresi denilen bu evrede *eski karınca kolonisi* oluşturulur. Daha sonra feromon güncellenmesi gerçekleştirilir. Çözüm evresinde Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak eski karınca kolonisinden elde edilen en iyi çözüm değerine göre *yeni karınca kolonisi* elde edilir. Elde edilen iki farklı karınca kolonisinin en iyi değerleri karşılaştırılır ($E_1 \leftrightarrow E'_1, E_2 \leftrightarrow E'_2, \dots, E_T \leftrightarrow E'_T$). İlk iterasyonun sonunda iki koloninin karşılaştırılması ile elde edilen en iyi değer ve β vektörü kullanılarak ÇU sınırlandırılır. β vektörü problem kısıtlarına göre uygun olarak seçilmelidir.

Kullanılan KKO yaklaşımında m adet karınca \mathbf{m} vektörü olarak nitelendirilmiştir (x^k ($k=1,2,\dots,m$)). Her bir karıncanın çözüm vektörü Denklem (3.1) ile güncellenir.

$$x_t^{k(\text{yeni})} = x_t^{k(\text{eski})} \pm \alpha \quad (t=1,2,\dots,T) \quad (3.1)$$



Şekil 3.3 KKO algoritması (Baskan vd 2009a)

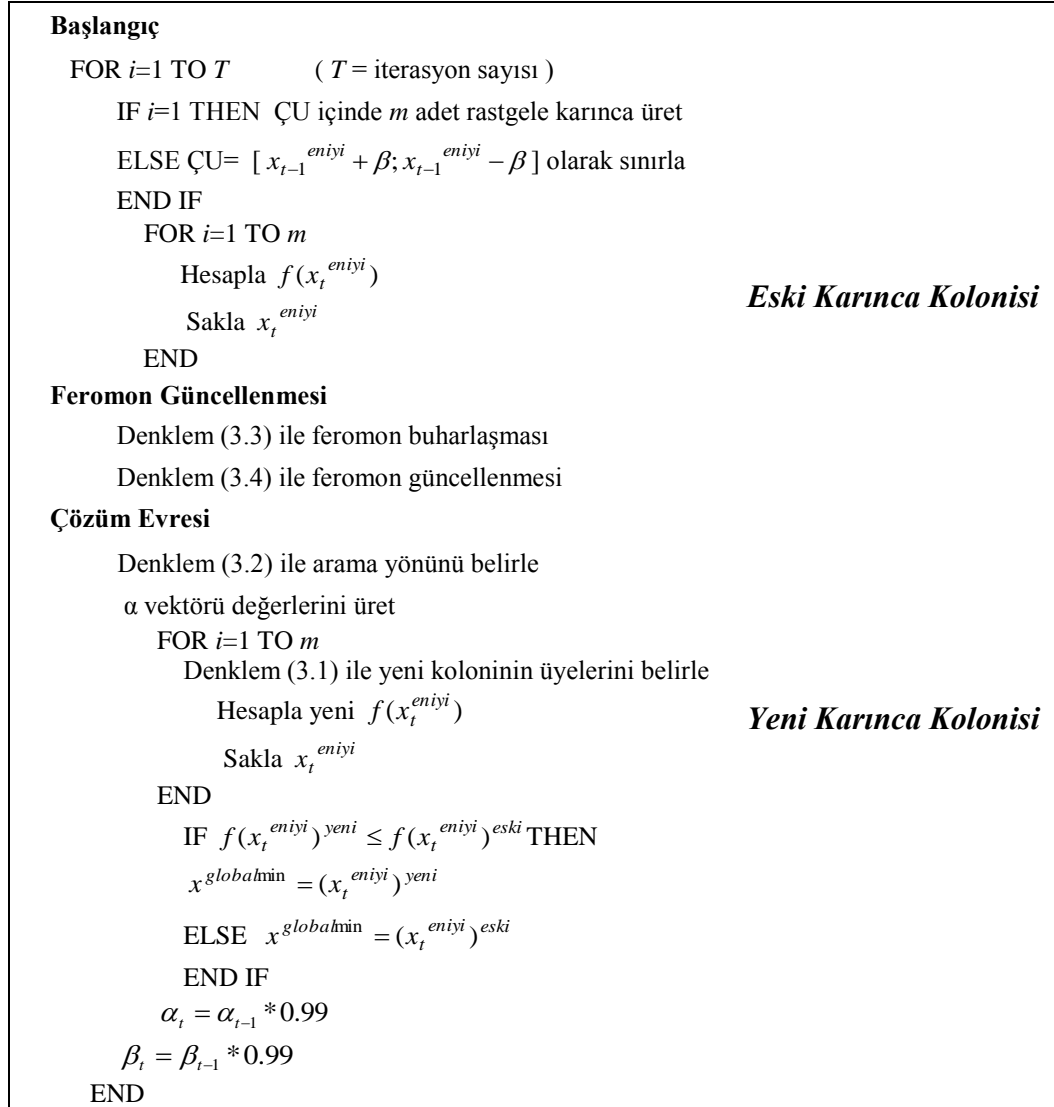
Burada $x_t^{k(yeni)}$ t . iterasyonda yeni elde edilen k . karınca, $x_t^{k(eski)}$ t . iterasyonda başlangıç evresinde üretilen k . karınca ve α sıçrama uzunluğunu hesaplamak için rastgele üretilen vektör olarak temsil edilmiştir. $x_t^{k(yeni)}$ t . iterasyonda Denklem (3.1) yardımıyla başlangıç evresinde elde edilen aynı karınca vektörüne sıçrama uzunluğunun eklenmesi veya çıkartılması ile bulunur. Her bir iterasyonun son adımında iterasyonun başında üretilen koloni büyüklüğü kadar yeni bir karınca kolonisi oluşturulur. Denklem (3.1)'de artı veya eksi işaretinin hangisinin kullanılacağı x_t^k 'nin x koordinat ekseninde optimum değer sağında veya solunda olmasına göre belirlenmektedir. Eğer x_t^k , x koordinat ekseninde optimum değer solunda ise pozitif tersi durumda ise negatif değeri kullanılır. Hareket yönü Denklem (3.2) ile aşağıdaki gibi belirlenir;

$$\bar{x}_t^{eniyi} = x_t^{eniyi} + (x_t^{eniyi} * 0.01) \quad (3.2)$$

Eğer $f(\bar{x}_t^{eniyi}) \leq f(x_t^{eniyi})$ ise Denklem (3.1)'de (+) işareti kullanılır aksi durumda ise (-) işareti kullanılır. (\pm) işareti optimum değere ulaşmak için arama yönünü belirler. Feromon miktarı (τ_t) sadece en iyi amaç fonksiyonu etrafında yoğunlaştırılır. τ_t Denklem (3.3) kullanılarak ilk olarak gerçek karınca kolonilerini temsil edecek şekilde buharlaştırılır daha sonra Denklem (3.4) yardımıyla feromon miktarı güncelleştirilir. Bu süreç verilen problemin çözümü için gerekli olan durma kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Bu çalışmada başlangıç feromon miktarı 100 olarak alınmıştır. Modifiye edilmiş KKO yaklaşımının ana adımları Şekil 3.4'de verilmiştir.

$$\tau_t = 0.1 * \tau_{t-1} \quad (3.3)$$

$$\tau_t = \tau_{t-1} + 0.01 * f(x_{t-1}^{eniyi}) \quad (3.4)$$



Şekil 3.4 KKO algoritması akış şeması

Modifiye edilmiş KKO algoritması literatürde mevcut olan optimizasyon algoritmalarıyla test problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Tablo 3.1’de karşılaştırma için kullanılan metotlar verilmiştir. Geliştirilen KKO algoritmasının etkinliğini ve performansını gösterebilmek için literatürde mevcut olan 14 adet test problemi seçilmiş ve Tablo 3.2a ve 3.2b’de verilmiştir. Karşılaştırma için kullanılan 14 problemin 9 tanesi iki boyutlu olup 5 tanesi ise 3 ve 4 boyutlu problemlerdir. Problem 5 dışındaki iki boyutlu test problemleri Toksarı’dan (2007a) alınmıştır. Problem 5 Schwefel’dan (1981) alınmıştır. Geri kalan çok boyutlu problemler Shelokar vd’den (2007) alınmıştır.

Tablo 3.1 Modifiye edilmiş KKO metodu ile karşılaştırılan algoritmalar

Algoritma	Kaynak	Test problemleri
ACO	Toksarı (2006)	[1]-[2]-[3]-[7]-[9]
MACO	Toksarı (2007a)	Problem 5 dışındaki tüm iki boyutlu problemler
ARSET	Hamzaçebi ve Kutay (2006)	[1]-[2]-[3]-[9]
DRASET	Hamzaçebi (2007)	[8]
SZGA	Kwon vd (2003)	[4]
IGARSET	Hamzaçebi (2008)	Problem 5 dışındaki tüm iki boyutlu problemler
ACO	Toksarı (2009)	[12]
PSACO	Shelokar vd (2007)	[12]-[13]-[14]
ECTS	Chelouah ve Siarry (2000)	[10]-[11]
KKO	Bu çalışma	Tüm problemler

KKO algoritmasında karıncaların başlangıç değerleri her bir problem için rastgele olarak seçilmiştir. Tablo 3.3a ve 3.3b'de elde edilen en iyi fonksiyon değerleri, iterasyon sayıları (İS), CPU süreleri ve diğer algoritmalarla karşılaştırmalar verilmiştir.

Sonuçlara göre modifiye edilmiş KKO algoritması diğer metotlarla karşılaştırıldığı zaman birçok problemde daha az iterasyon sayısı ve benzer CPU sürelerinde global optimum değerlerine ulaşabilmektedir. Tüm problemler için KKO algoritmasında koloni büyüklüğü 20 ve α başlangıç değerleri 1/rastgele(10) olarak seçilmiştir (Bkz. Baskan vd 2009a). Modifiye KKO algoritması Visual Basic programlama dilinde kodlanmış ve Intel Pentium Core2 2.00Ghz bilgisayarda çalıştırılmıştır. KKO algoritması verilen test problemleri için yerel optimumlara takılmadan oldukça iyi performans göstermektedir. CPU sürelerine göre modifiye KKO algoritması kabul edilebilir sürelerde hem iki boyutlu hem de çok boyutlu fonksiyonlarda oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Tablo 3.2a İki boyutlu test problemleri

Pr. No	Fonksiyon	Optimum fonksiyon değeri
1	$f(x, y) = (100 * (x - y^2)^2) + (1 - x)^2$	$x = 1 \quad y = 1 \quad f(x, y) = 0$
2	$f(x, y) = \frac{x}{1 + y }$	$x = -10 \quad y = 0 \quad f(x, y) = -10$ [-10 10] aralığında
3	$f(x) = \left[x * \sin\left(\frac{1}{x}\right) \right]^4 + \left[x * \cos\left(\frac{1}{x}\right) \right]^4$	$x = 0 \quad f(x) = 0$
4	$f(x, y) = x^2 + 2y^2 - 0.3\cos(3\pi x) - 0.4\cos(4\pi y) + 0.7$	$x = 0 \quad y = 0 \quad f(x, y) = 0$
5	$f(x) = \sum_{i=1}^n -x_i * \sin\sqrt{ x_i }$	$x_i = 420.9687$ $f(x) = -n * 418.9829$ [-500 500] aralığında, $n=2$
6	$f(x, y) = x^2 + y^2 - \cos(18x) - \cos(18y)$	$x = 0 \quad y = 0 \quad f(x, y) = -2$
7	$f(x, y) = \frac{(x-3)^8}{1+(x-3)^8} + \frac{(y-3)^4}{1+(y-3)^4}$	$x = 3 \quad y = 3 \quad f(x, y) = 0$
8	$f(x, y) = \exp\left(\frac{1}{2}(x^2 + y^2 - 25)^2\right) + \sin^4(4x - 3y) + \frac{1}{2}(2x + y - 10)^2$	$x = 3 \quad y = 4 \quad f(x, y) = 1$
9	$f(x) = \begin{cases} x^2 & \text{if } x \leq 1, \\ (x-3)^2 - 3 & \text{if } x > 1 \end{cases}$	$x = 3 \quad f(x) = -3$

Tablo 3.2b Çok boyutlu test problemleri

Pr. No	Fonksiyon	Optimum fonksiyon değeri
10	$f(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$	$x = (0.0, 0.0, \dots, 0.0) ; f(x) = 0.0$ $-5.12 \leq x_i \leq 5.12, \quad i = 1, 2, \dots, n$
11	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^n 0.5i x_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n 0.5i x_i\right)^4$	$x = (0, \dots, 0); f(x) = 0$ $-5 \leq x_i \leq 10, \quad i = 1, 2, \dots, n$
12	$f(x)^* = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left[-\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (x_j - p_{ij})^2\right]$	$x = (0.11, 0.555, 0.855); f(x) = -3.86278$ $0 \leq x_j \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$
13	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 / 4000 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$x = (0, \dots, 0); f(x) = 0$ $-300 \leq x_i \leq 600, \quad i = 1, 2, \dots, n$
14	$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2]$	$x = (1, \dots, 1); f(x) = 0$ $-5 \leq x_i \leq 10, \quad i = 1, 2, \dots, n$

* α_{ij} ve p_{ij} değerleri Shelokar vd'den (2007) alınabilir.

Tablo 3.3a İki boyutlu test problemlerin sonuçları

Pr. No	β	Metot	En iyi fonksiyon değeri	İS	CPU süresi (sn)
1	$\beta=[2,2]$	ACO	0	5000	MD*
		MACO	0	3600	0.0620
		ARSET	4.02E-16	50000	MD
		IGARSET	0	2174	0.0568
		KKO	0	3402	0.0590
2	$\beta=[5,5]$	ACO	-10	5000	MD
		MACO	-10	3750	0.0440
		ARSET	-10	30000	MD
		IGARSET	-10	1205	0.1043
		KKO	-10	2167	0.0620
3	$\beta=[2,2]$	ACO	1.40E-45	5000	MD
		MACO	5.60E-45	5000	0.032
		ARSET	2.21E-43	50000	MD
		IGARSET	1.01E-74	1789	0.0669
		KKO	4.58E-83	4101	0.0550
4	$\beta=[4,4]$	MACO	0	3750	0.0080
		SZGA	2.98E-8	4000	MD
		IGARSET	0	1004	0.0485
		KKO	0	1832	0.0520
5	$\beta=[250,250]$	KKO	-837.9658	1176	0.0690
6	$\beta=[2,2]$	MACO	-2	235	0.0120
		IGARSET	-2	2400	0.0614
		KKO	-2	1610	0.0445
7	$\beta=[3,3]$	ACO	0	5000	MD
		MACO	0	3750	0.0180
		IGARSET	2.08E-27	1821	0.0666
		KKO	4.06E-52	3624	0.0830
8	$\beta=[5,5]$	MACO	1	36000	0.0210
		DRASET	1	29663	14.468
		IGARSET	1	1849	0.0537
		KKO	1	1576	0.0630
9	$\beta=[3,3]$	ACO	-3	500	MD
		MACO	-3	500	0.0090
		ARSET	-3	1000	MD
		IGARSET	-3	465	0.0420
		KKO	-3	500	0.0480

*MD: Mevcut değil

Tablo 3.3b Çok boyutlu test problemlerin sonuçları

Pr. No	β	Metot	En iyi fonksiyon değeri	İS	CPU süresi (sn)
10	$\beta=[10,10,10]$	ECTS	3E-08	338	MD*
		KKO	0	4850	0.0780
11	$\beta=[15,15,15]$	ECTS	4E-6	2254	MD
		KKO	0	5530	0.0620
12	$\beta=[1,1,1]$	PSACO	-3.8627	592	MD
		ACO	-3.86	528	0.7400
		KKO	-3.8626	428	0.0560
13	$\beta=[800,800,800,800]$	PSACO	6.23E-22	1081	MD
		KKO	3.49E-35	4062	0.0520
14	$\beta=[15,15,15,15]$	PSACO	1.85e-04	517	MD
		KKO	1.78e-04	948	0.0635

*MD: Mevcut değil

Modifiye edilmiş KKO algoritmasının 14 farklı test problemi üzerinde uygulaması yapılmış ve oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. KKO algoritması literatürde mevcut olan farklı algoritmalarla (ACO, MACO, ARSET, DRASET, SZGA, IGARSET, PSACO ve ECTS) karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak β vektörü ile gerçekleştirilen kısıtlandırılmış ÇU tekniği ve her bir iterasyonda üretilen yeni karınca kolonisi sayesinde KKO algoritması ile kabul edilebilir sürelerde verilen test fonksiyonları için oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır.

3.4. KKO Metodunun Sinyal Kontrol Problemine Uyarlanması

UAT probleminin çözümünde sinyal parametrelerinin optimizasyonu KAKOSKA modeli ile gerçekleştirilecektir. Bunun için link akımlarının (\mathbf{x}) ve sinyal parametrelerinin ($\boldsymbol{\psi}=(\mathbf{c},\mathbf{g})$) kullanıldığı maliyet fonksiyonlarının oluşturduğu amaç fonksiyonunun minimizasyonu yapılır. Burada \mathbf{c} , devre süresi vektörü; \mathbf{g} ise faz yeşil süre vektörü olarak verilmiştir. Denklem (3.5)'de üst seviye probleminin çözümü için

kullanılacak olan amaç fonksiyonu ve sinyal parametrelerine ait kısıtlar verilmiştir (Sheffi 1985).

$$f_k^w \geq 0, k \in K_w, w \in \mathbf{W}$$

$$\sum_{k \in K_w} f_k^w = q_w, w \in \mathbf{W}$$

$$g_{\min} < g < g_{\max}, g \in \mathbf{G}$$

$$c_{\min} < c < c_{\max}, c \in \mathbf{C}$$

Kısıtlarına bağlı olarak;

$$\min z(x) = \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (3.5)$$

Burada x_a , a linki üzerindeki denge link akımı (taşıtl/sa); t_a , a linkinin maliyeti (sn); f_k^w , herhangi bir w B-V çiftindeki k rotasındaki akım (taşıtl/sa), q_w , w B-V akımı (taşıtl/sa), g faz yeşil süresi (sn) ve c ise devre süresi (sn) olarak verilmiştir. Alt seviye probleminin çözümü sonucunda elde edilen denge link akımları (\mathbf{x}), üst seviye probleminin çözümünde girdi olarak kullanılacak ve üst seviyede ise Denklem (3.5)'de verilen minimizasyon problemi çözülerek sistem optimumu sağlanacaktır.

KKO algoritmasının sinyal kontrol problemine dahil edilmesi ile oluşturulan KAKOSKA modeli ile optimum değerleri bulunulmak istenen sinyal kontrol parametreleri, $\boldsymbol{\psi}=(\mathbf{c},\mathbf{g})$, KKO algoritması içinde karınca vektörü, \mathbf{m} , olarak nitelendirilmiştir. \mathbf{M} olarak gösterilen çözüm matrisi içinde KKO algoritması rastgele üretme yöntemi ile arama yapmakta ve optimum sinyal parametrelerini bulabilmektedir. r koloni büyüklüğü ve \mathbf{m} ile ifade edilen karınca vektöründen oluşan \mathbf{M} çözüm matrisi Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{r1} & x_{r2} & x_{r3} & \dots & x_{rm} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f(x_r) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Burada x ve $f(x)$ değerleri sırasıyla sinyal parametrelerini ve amaç fonksiyon değerlerini temsil eden karınca değerleridir. KKO algoritmasının sinyal kontrol problemine uygulanması için gereken adımlar aşağıda verilmiştir:

Adım 0: Başlangıç $t=1$. Kullanıcıya özel KKO parametrelerini (r , β , α) gir. ψ sinyal parametrelerini \mathbf{m} karınca vektörü olarak tanımla.

Adım 1: $t=1$ ise \mathbf{M} olarak gösterilen çözüm matrisini verilen maksimum ve minimum sınırlar içinde rastgele doldur, $t > 1$ ise Adım 9'da elde edilen en iyi ψ sinyal parametreleri ve β vektörüne bağlı olarak çözüm kümesini kısıtla ve kısıtlı çözüm kümesini kullanarak \mathbf{M} çözüm matrisini rastgele doldur.

Adım 2: Denge link akımlarını gir. $a \in \mathbf{A}$

Adım 3: Denge link akımlarını ve Adım 1'de bulunan sinyal parametrelerini kullanarak her bir \mathbf{m} karınca vektörü için Denklem (3.5) kullanılarak amaç fonksiyonu değerini hesapla ve eski karınca kolonisi çözüm matrisini (\mathbf{M}_{eski}) oluştur.

Adım 4: Denklem (3.3) ile feromon miktarının buharlaştırılması işlemini gerçekleştir.

Adım 5: Denklem (3.4) ile en iyi amaç fonksiyonu etrafında feromon güncellenmesi yap.

Adım 6: Denklem (3.2) ile arama yönünü belirle ve α sıçrama uzunluğu matrisini Denklem (3.7)'de görüldüğü gibi rastgele üret.

$$\mathbf{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{r1} & \alpha_{r2} & \alpha_{r3} & \dots & \alpha_{rm} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Adım 7: Denklem (3.1) ile yeni ψ sinyal parametrelerini hesapla ve yeni karınca kolonisi matrisini (\mathbf{M}_{yeni}) oluştur.

Adım 8: Denklem (3.5), yeni karınca kolonisi matrisi ve denge link akımlarını kullanarak yeni amaç fonksiyonu değerlerini hesapla.

Adım 9: Adım 3 ve 8’de elde edilen eski ve yeni karınca kolonisine ait en iyi amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştır ve en iyi amaç fonksiyonu değerini veren ψ sinyal parametrelerini belirle.

Adım 10: Durma kriterinin kontrolü. Eğer sağlanmışsa optimum ψ sinyal parametreleri elde edilir aksi takdirde Adım 1’e git ve $t=t+1$ yap.

Algoritmada Adım 0’da kullanıcı tarafından tanımlanan KKO parametrelerinin girişi yapılmalıdır. Burada r koloni büyüklüğü değişken sayısına bağlı olarak uygun olarak seçilmelidir. Koloni büyüklüğünün uygun olarak seçimi CPU süresinin kısaltılmasında etkili olmaktadır. Ayrıca β olarak gösterilen ÇU uzayı kısıtlama vektörünün uygun değerleri alacak şekilde seçimi algoritma performansında oldukça önemlidir. β vektörü sinyal kontrol probleminde ψ sinyal parametrelerine uygun olarak $\beta = (g_{max}, c_{max})$ olacak şekilde seçilmiştir (Baskan vd 2009a). Bölüm 3.3’de verildiği gibi α sıçrama uzunluğu $1/rastgele(10)$ olarak seçilmiştir.

Adım 1’de $t=1$ ise ψ sinyal parametreleri belirlenen maksimum ve minimum sınırlar içinde rastgele üretilerek bu adımda \mathbf{M} çözüm matrisi diğer bir ifadeyle eski karınca kolonisi oluşturulur. $t > 1$ ise \mathbf{M} çözüm matrisi Adım 9’da elde edilen en iyi ψ sinyal parametrelerine ve Adım 0’da girilen β vektörüne bağlı olarak kısıtlandırılan ÇU’na göre yeniden rastgele doldurulur ve eski karınca kolonisi oluşturulur. Adım 1’de önceki

iterasyonda elde edilen en iyi ψ sinyal parametreleri de \mathbf{M} çözüm matrisi içine dahil edilir. Algoritmanın bu adımı KKO performansının artırılması için oldukça önemli bir adımdır. Kısıtlandırılmış ÇU tekniği sayesinde algoritma sürekli yeni yönlerde yeni çözüm matrisleri aramayı sürdürmekte ve yerel minimumlara takılma tehlikesi oldukça azalmaktadır.

Adım 2’de TA probleminin çözümü ile elde edilen denge link trafik hacimlerinin girilmesi gerekmektedir. Elde edilen denge link trafik hacimleri Denklem (3.5)’de verilen amaç fonksiyonunun ana bileşenini oluşturmaktadır. Denge link trafik hacimlerinin gerçeğe en uygun olarak tahmin edilmesi sinyal kontrol probleminin optimum çözümünün bulunmasında oldukça önemlidir. Bu nedenle bu aşamada kullanılacak olan TA modelinin başarısı oldukça önemlidir.

Adım 3’de denge link akımları ve adım 1’de elde edilen sinyal parametreleri kullanılarak Denklem (3.5) yardımıyla her bir karınca vektörü için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Denklem (3.8)’de ψ sinyal parametrelerinin \mathbf{M} çözüm matrisi içindeki gösterimi verilmiştir.

$$\mathbf{M}_{eski} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & \dots & g_{1n} & c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1k} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & \dots & g_{2n} & c_{21} & c_{22} & c_{23} & \dots & c_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{r1} & g_{r2} & g_{r3} & \dots & g_{rn} & c_{r1} & c_{r2} & c_{r3} & \dots & c_{rk} \end{bmatrix}^{eski} \Rightarrow \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \dots \\ \dots \\ f(x_r) \end{bmatrix}^{eski} \quad (3.8)$$

Burada n faz sayısı k ise kavşak sayısı olarak verilmiştir.

Adım 4’de Denklem (3.3) yardımıyla gerçek karıncaların geçtikleri yollara bıraktıkları feromon kimyasalının buharlaşmasını temsil etmekte kullanılan buharlaşması süreci gerçekleştirilir. Başlangıç feromon miktarı 100 olarak alınmıştır.

Adım 5’de Denklem (3.4) kullanılarak en iyi amaç fonksiyonu değeri etrafında feromon güncellenmesi gerçekleştirilir.

Adım 6’da eski karınca kolonisinin arama yönünün belirlenmesi için Denklem (3.2) kullanılır. Arama yönü belirlendikten sonra α sıçrama uzunluğu matrisi rastgele üretilir.

Adım 7’de Denklem (3.1)’de (+) ya da (-) işaretlerinden hangisinin kullanılacağı Denklem (3.2) ile belirlendikten sonra yeni karınca kolonisi çözüm matrisi eski karınca kolonisine α matrisinin eklenmesi veya çıkartılması ile oluşturulur. Denklem (3.9)’da yeni karınca kolonisi çözüm matrisi gösterilmiştir.

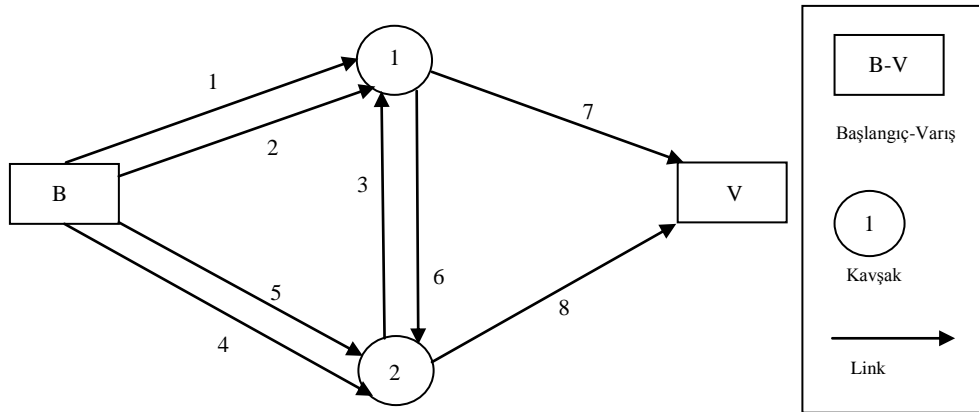
$$M_{yeni} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & \dots & g_{1n} & c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1k} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & \dots & g_{2n} & c_{21} & c_{22} & c_{23} & \dots & c_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{r1} & g_{r2} & g_{r3} & \dots & g_{rn} & c_{r1} & c_{r2} & c_{r3} & \dots & c_{rk} \end{bmatrix}^{yeni} \Rightarrow \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \dots \\ \dots \\ f(x_r) \end{bmatrix}^{yeni} \quad (3.9)$$

Adım 8’de adım 7’de elde edilen ψ sinyal parametreleri ve denge link akımlarına bağlı olarak Denklem (3.5) yardımıyla yeni amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 9’da adım 3 ve 8’de elde edilen eski ve yeni karınca kolonilerine ait en iyi amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır ve en iyi amaç fonksiyonu değerini veren m karınca vektörüne karşılık gelen ψ sinyal parametreleri t . iterasyondaki en iyi sinyal parametreleri olarak kaydedilir.

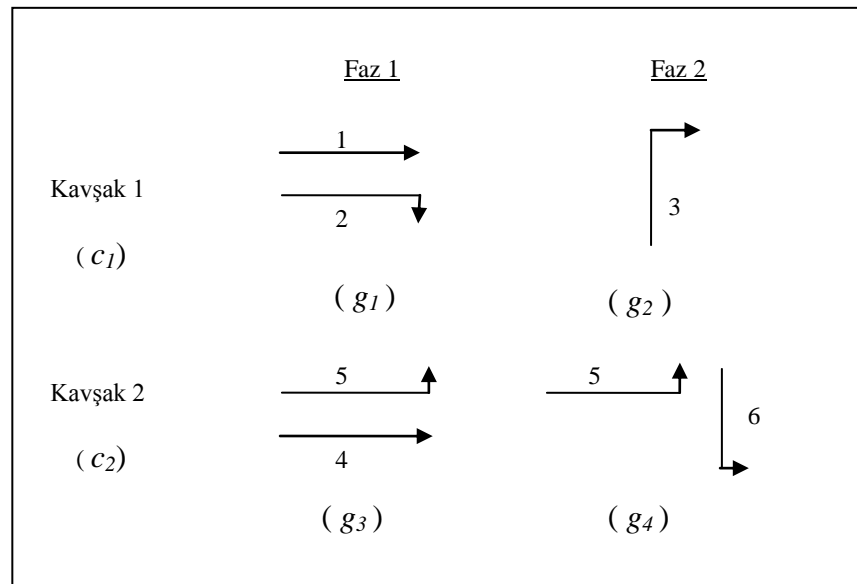
Adım 10’da durma kriteri kontrolü yapılır. Eğer durma kriteri sağlanmışsa elde edilen ψ sinyal parametreleri optimum sinyal parametreleridir aksi durumda $t=t+1$ yapılır ve Adım 1’e gidilir. Elde edilen ψ_t ve ψ_{t+1} değerleri arasında fark %1’den az olduğu durumda algoritma sonlandırılır. Aksi durumda iterasyon sayısı artırılarak iterasyonlara devam edilir.

Yukarıda algoritma adımları verilen KAKOSKA modelinin uygulamasının yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.5’de görülen örnek ulaşım ağı kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi ulaşım ağında 1 adet B-V çifti, 2 adet kavşak ve 8 adet link mevcuttur.



Şekil 3.5 Örnek ulaşım ağı (Ceylan 2002)

KAKOSKA modelinin uygulanması için kullanılacak olan örnek ulaşım ağına ait faz diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekilden görülebileceği her iki kavşakta 2 fazlı olarak çalıştırılmaktadır. 1 nolu kavşakta faz 1'de 1 ve 2 nolu linkler geçiş hakkı alırken 2 nolu fazda sadece 3 nolu link geçiş hakkı alabilmektedir. 2 nolu kavşakta ise 5 linki her iki fazda da geçiş hakkı alırken 4 nolu link faz 1'de 6 nolu link ise sadece 2 nolu fazda geçiş hakkı alabilmektedir. Ayrıca şekil üzerinde görüldüğü gibi faz yeşil süreleri g (sn), kavşak devre süreleri c (sn) ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Faz diyagramı (Ceylan 2002)

Test ulaşım ağına ait bilgiler Tablo 3.4’de verilmiştir. Bütün linkler için doymun akım değeri 1800 taşıt/sa, serbest akım seyahat süreleri ise 20 sn olarak verilmiştir.

Tablo 3.4 Ulaşım ağı bilgileri (Ceylan 2002)

Kavşak	Link	t_a^0	s	Kavşak	Link	t_a^0	s
1	1	20	1800	2	4	20	1800
	2	20	1800		5	20	1800
	3	20	1800		6	20	1800

t_a^0 serbest akım seyahat süresi (sn), s ise doymun akım (taşıt/sa) değeridir

Tablo 3.5’de KAKOSKA modelinde amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılacak olan denge link trafik hacimleri verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi 615 taşıt/sa’lik trafik hacim değerleri ile en fazla akım taşıyan linkler 1 ve 4 nolu linklerdir. 2 ve 6 nolu linkler ise 45 taşıt/sa’lik hacim değerleri ile ulaşım ağı içinde en aza trafik yüküne maruz kalan linklerdir.

Tablo 3.5 Sabit link trafik hacimleri (Ceylan 2002)

Link Trafik Hacmi (ta/sa)					
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
615.0	45.0	225.0	615.0	225.0	45.0

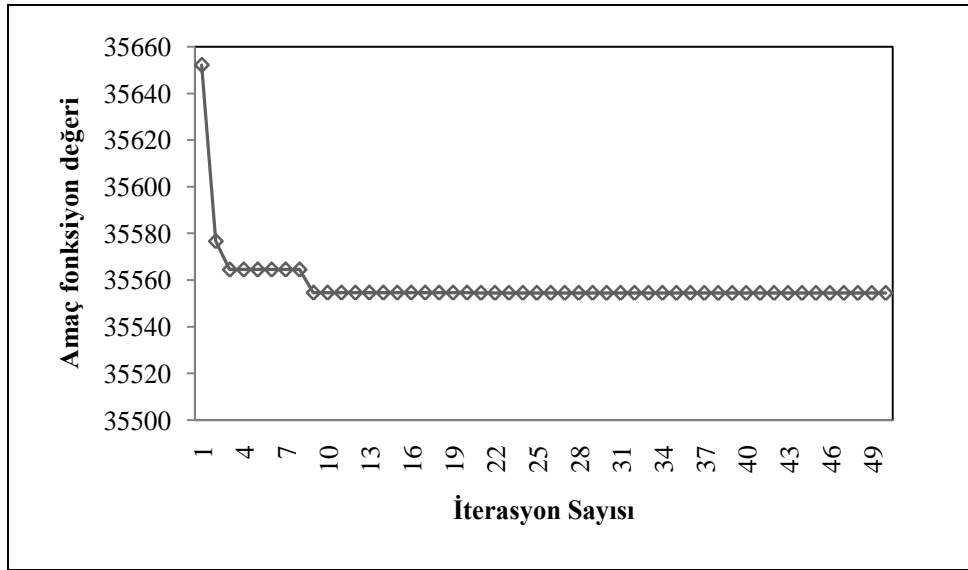
Ağın çözümünde kullanılacak olan ψ sinyal parametrelerinin maksimum ve minimum değerleri Denklem (3.10)’da verilmiştir.

$$7 \leq g \leq 45$$

$$46 \leq c \leq 90 \quad (3.10)$$

KKO algoritmasının sinyal kontrolü probleminde uyarlanması için Şekil 3.6’da verilen faz diyagramı dikkate alındığında KAKOSKA modelinde her bir kavşak için fazlardan biri rastgele üretim yöntemiyle \mathbf{M} çözüm matrisi içine dahil edilmekte ve o kavşağa ait devre süresini temsil eden karınca rastgele üretildikten sonra diğer faza ait yeşil süre analitik olarak elde edilmektedir. Sinyal parametrelerinin bu şekilde elde

edilmesi faz tabanlı yaklaşım olarak değerlendirilmekte ve devre süresi ise kısıt olarak kullanılmaktadır. Denklem (3.10)'da verilen maksimum ve minimum sınırlar çerçevesinde yukarıda verilen KAKOSKA modelinin adımları takip edilerek Denklem (3.5)'de verilen amaç fonksiyonunun minimum değeri elde edilmiştir. Şekil 3.7'de KAKOSKA modelinin yakınsama grafiği verilmiştir. 50 iterasyon sonunda 35554 değeri minimum amaç fonksiyon değeri olarak elde edilmiştir. KAKOSKA modelinde koloni büyüklüğü $r=20$ olarak, kısıtlama vektörü β ise (45,45,90,90) olarak seçilmiştir.



Şekil 3.7 KAKOSKA modeli yakınsama grafiği

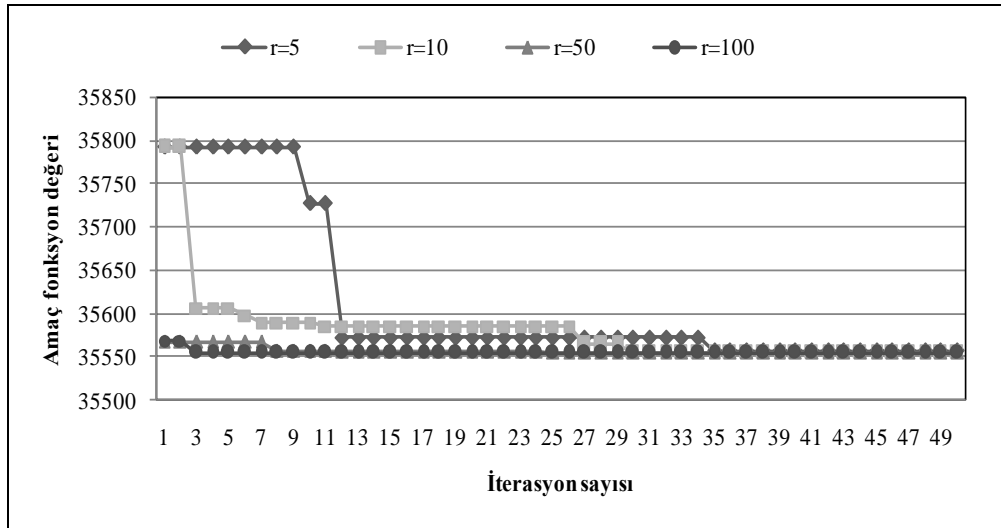
50 iterasyon sonunda minimum amaç fonksiyonu değerini veren optimum sinyal parametreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Optimum sinyal parametreleri

		g (sn)	c (sn)
Kavşak 1	Faz 1	33	46
	Faz 2	13	
Kavşak 2	Faz 1	7	89
	Faz 2	82	

3.4.1. KAKOSKA Duyarlılık Analizi

KAKOSKA modelinin r koloni büyüklüğü ve β vektörüne karşı hassasiyetinin belirlenmesi için duyarlılık analizi yapılmıştır. Şekil 3.8’de farklı r büyüklükleri için KAKOSKA modelinin yakınsama özellikleri gösterilmiştir. Farklı koloni büyüklükleri için yapılan analizlerde KAKOSKA modelinin sonuç performansının değişmediği ancak koloni büyüklüğü değeri arttıkça CPU süresinin arttığı görülmektedir. Tablo 3.7’de farklı koloni büyüklükleri için elde edilen CPU süreleri verilmiştir. KAKOSKA modeli Visual Basic programlama dilinde kodlanmış ve Intel Pentium Core2 2Ghz bilgisayarda çalıştırılmıştır.



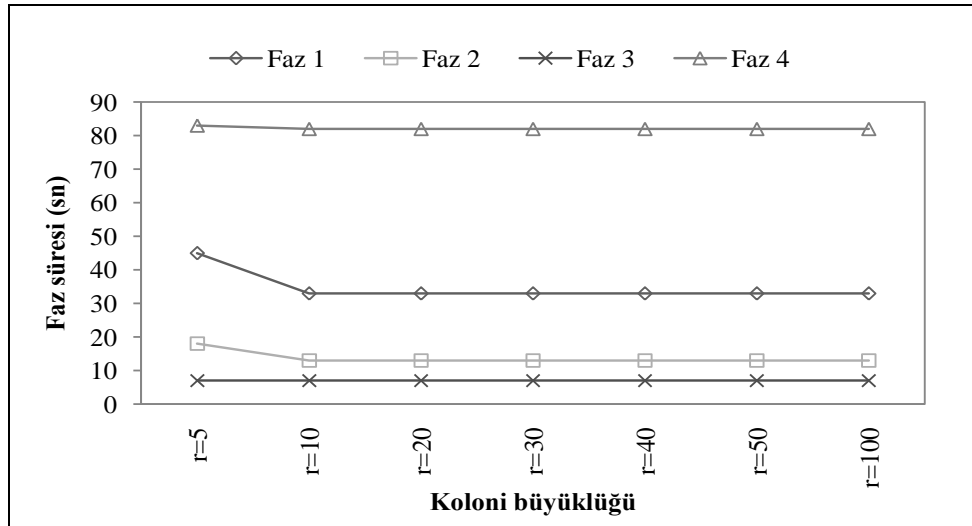
Şekil 3.8 KAKOSKA farklı koloni büyüklüğü yakınsama grafiği

Tablo 3.7 KAKOSKA farklı koloni büyüklüğü CPU süreleri

Koloni büyüklüğü (r)	CPU süresi (sn)
5	0.005
10	0.015
50	0.059
100	0.125

Şekil 3.9’da farklı koloni büyüklüğü değerleri için elde edilen faz süreleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi koloni büyüklüğü değeri 10’dan sonra faz sürelerinde değişiklik olmamaktadır. Değişken sayısına bağlı olarak koloni büyüklüğünün seçimi

KAKOSKA modelinin sonuç performansını etkilememekle birlikte CPU süresinin azaltılması için önem arz etmektedir. Şekil 3.5’de verilen örnek ulaşım ağının çözümünde değişken sayısı 4 olarak seçildiği için koloni büyüklüğü değerinin $r=10$ olarak alınması optimum çözümün en kısa sürede elde edilmesini sağlamaktadır.

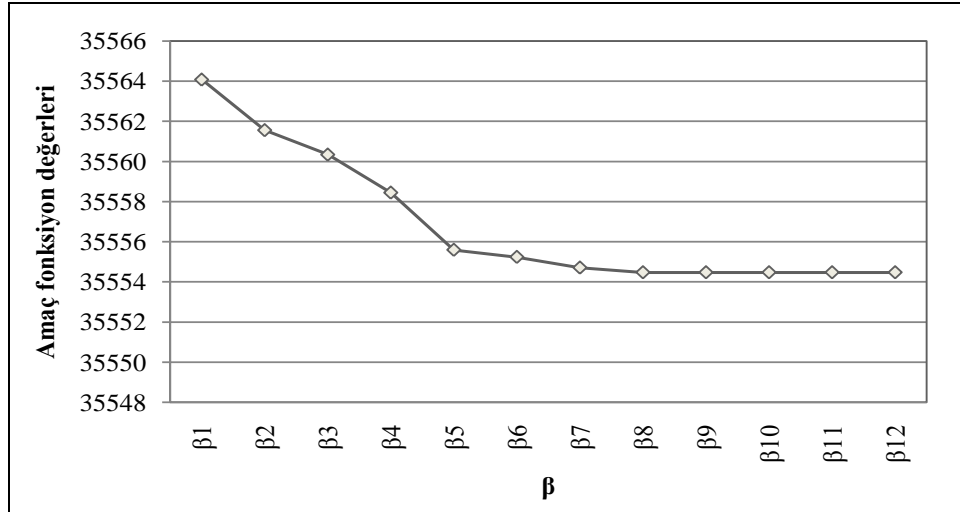


Şekil 3.9 Farklı koloni büyüklüklerine bağlı faz süreleri değişimi

KAKOSKA modelinin β vektörüne karşı hassasiyetinin belirlenmesi için farklı β değerleri için analizler yapılmıştır. β vektörünün uygun olarak seçimi yerel optimum noktalarına takılma riskinin azaltılması açısından oldukça önemlidir. KAKOSKA modelinin uygulanması sırasında β vektörünün Denklem (3.11)’de verildiği gibi alınması önerilmektedir.

$$\beta = (g_{\max}, g_{\max}, c_{\max}, c_{\max}) \quad (3.11)$$

Şekil 3.10’da farklı β değerleri için en iyi amaç fonksiyon değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi β_8 değerine karşılık gelen vektörün kullanılması durumunda en iyi amaç fonksiyonu değeri elde edilmiş olmaktadır. β_8 vektöründen daha büyük değerlerin kullanılması durumunda en iyi amaç fonksiyon değerinde iyileşme olmamaktadır.



Şekil 3.10 En iyi amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi

Tablo 3.8’de KAKOSKA modelinin performansının değişiminin görülmesi için kullanılan 12 adet farklı β vektörü ve elde edilen amaç fonksiyonu değerleri görülmektedir.

Tablo 3.8 Farklı β değerleri

	β (1)	β (2)	β (3)	β (4)	Amaç fonksiyon değeri (sn)
β_1	3	3	5	5	35564
β_2	5	5	8	8	35562
β_3	7	7	10	10	35560
β_4	10	10	12	12	35558
β_5	12	12	15	15	35556
β_6	15	15	20	20	35555
β_7	30	30	40	40	35555
β_8	40	40	50	50	35554
β_9	45	45	60	60	35554
β_{10}	45	45	70	70	35554
β_{11}	45	45	80	80	35554
β_{12}	45	45	90	90	35554

3.5. Sonuçlar

Bu b6l6mde literat6rde son yıllarda farklı alanlarda uygulama alanı bulan KKO metodu hakkında literat6r çalışması verilmiştir. Modifiye edilmiş KKO algoritmasının algoritma adımları açıklanmış ve test fonksiyonları 6zerinde elde edilen sonuçlar literat6rdeki mevcut algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

KKO algoritmaları birçok alanda uygulama alanı bulmasına rağmen UAT probleminin 6z6m6 için kullanılması literat6rde yaygın değildir. Ayrıca modifiye edilmiş ve performansı artırılmış KKO metodu ile UAT 6z6m6 literat6rde g6r6lmemektedir. Bu nedenle KKO algoritması UAT probleminin 6st seviye kısmını oluşturan sinyal kontrol tasarımı için kullanılmış ve KAKOSKA modeli oluşturulmuştur. Sinyal kontrol form6lasyonu verilmiş ve KAKOSKA modeli 6rnek ulaşım ağına uygulanmıştır. Duyarlılık analizi yapılmış ve modelde kullanılan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Gelecek b6l6mde TA modelleri ve UAT probleminin 6z6m6 için 6nerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin 6z6m algoritmaları verilmiştir.

4. PROBLEM FORMÜLASYONU VE MODEL GELİŞİMİ

4.1. Giriş

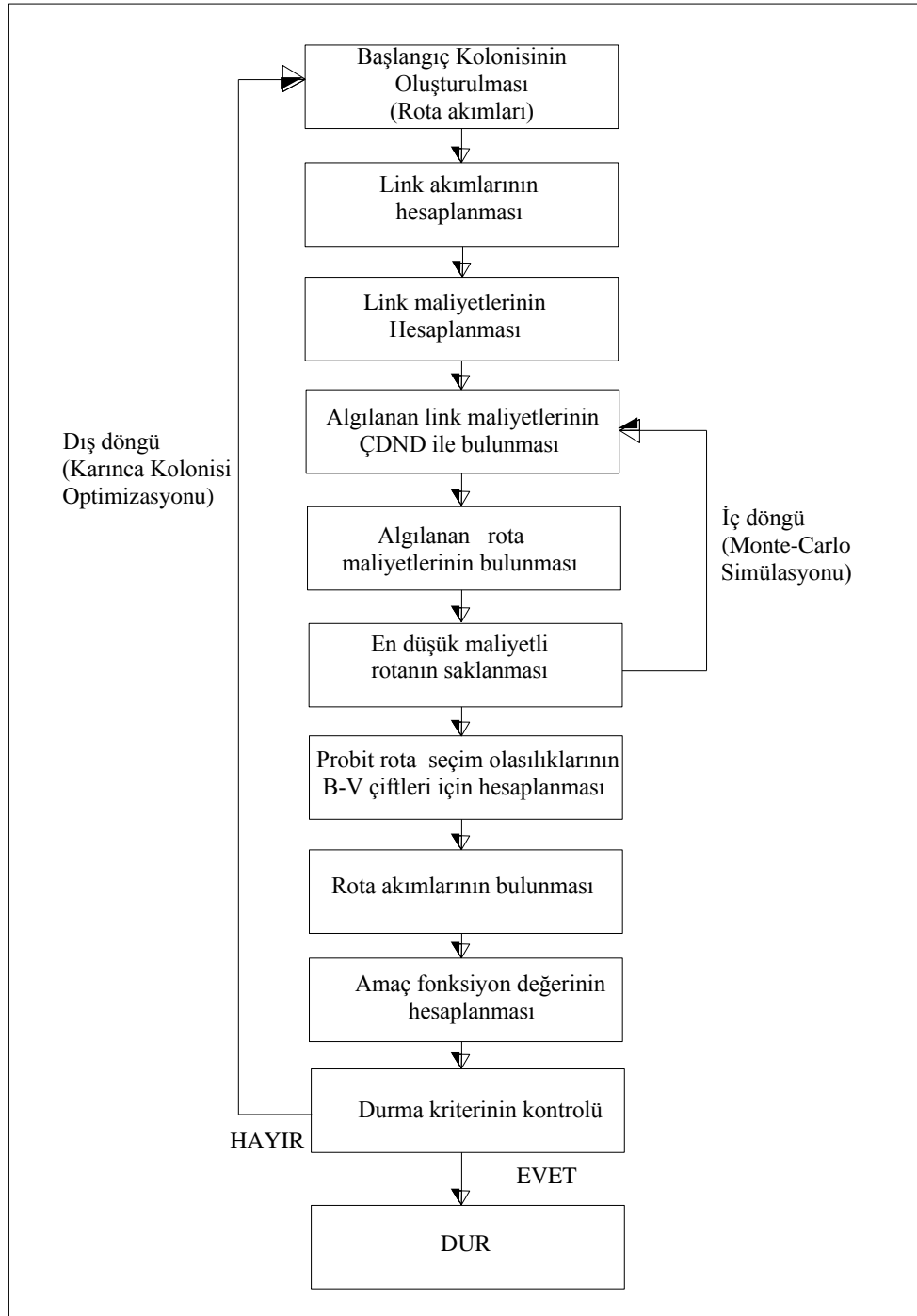
Bu bölümde UAT probleminin alt seviyesini oluşturan TA probleminin çözümü için geliştirilen çözüm algoritmaları verilmiş ve örnek ağ üzerinde sayısal uygulamaları yapılmıştır. Geliştirilen atama modellerinin SA'sı ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Çalışmada UAT probleminin için önerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin çözüm algoritmaları Bölüm 4.3'de verilmiştir.

4.2. Trafik Atama Modelleri

UAT probleminin çözümünde kullanılan iki seviyeli programlama tekniğinin ve KİY yaklaşımının alt seviye olarak nitelendirilen TA kısmının çözümü için 3 farklı atama modeli örnek ulaşım ağında test edilmiştir. Geliştirilen TA modellerinde rota seçim modeli olarak probit model kullanılmıştır. Probit rota seçim olasılıklarının hesaplanabilmesi için Monte-Carlo simülasyon tekniğinden faydalanılmıştır.

4.2.1. Karınca Kolonisi Optimizasyonu Trafik Atama Modeli

Çalışma kapsamında geliştirilen KAKOTAM'nin oluşturulması için ilk olarak KKO metodunun TA modeli içine adaptasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. KAKOTAM'nde rota akımları çözüm vektörü karınca kolonisi içindeki her bir karınca vektörü ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi KAKOTAM ilk olarak başlangıç kolonisinin oluşturulması ile çözüme başlamaktadır.

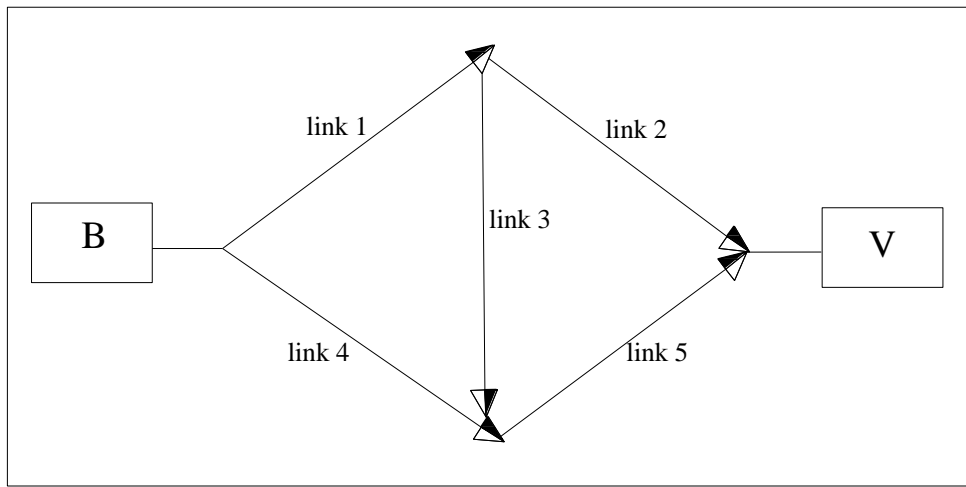


Şekil 4.1 KAKOTAM akış şeması

KAKOTAM, ÇU içinden rastgele seçilen rota alternatifleri ile çözüme başlamaktadır. Her bir tamamlanan döngü sonunda en iyi rota alternatif vektörü ve $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ vektörüne bağlı olarak arama yapılan ÇU kısıtlandırılmaktadır. Aslında algoritma her bir döngü sonunda ÇU içinden bir önceki iterasyondan elde edilen en iyi

karınca vektörü ve β vektörüne bağlı olarak tekrar rastgele arama yapmaktadır. Bu nedenle algoritmanın yerel optimuma takılma riski oldukça azalmaktadır.

KAKOTAM’nde probit rota seçim olasılıkları Şekil 4.1’de görüldüğü gibi Monte-Carlo simülasyonu ile elde edilmiştir. KAKOTAM rota seçim olasılıklarını kullanarak talebi rotalara dağıttığı için rota numaralandırmasına gerek duymaktadır. KAKOTAM’nin uygulanacağı ulaşım ağı 5 link ve 3 rotadan oluşmaktadır. B-V talebi 400 taşıt/sa olarak alınmıştır. β vektörü problemde verilen B-V talebine uygun olarak $\beta=(400, 400, 400)$ olarak seçilmiştir. Ulaşım ağı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Örnek ulaşım ağı (Baskan ve Haldenbilen 2009c)

Şekil 4.2’de verilen ulaşım ağında rota 1 ve 2 tarafından link 1, rota 2 ve 3 tarafından ise link 5 ortak kullanılmaktadır (*Rota 1*: 1-2, *Rota 2*: 1-3-5, *Rota 3*: 4-5). Denklem (4.1)’de ağın çözümünde kullanılacak olan BPR link maliyet fonksiyonu verilmiştir.

$$t_a = t_a^0 * (1 + 0.15 \left(\frac{v_a}{c_a}\right)^4) \quad \forall a \in A \quad (4.1)$$

Burada t_a^0 , serbest akım seyahat süresi (sn); v_a , a linki üzerindeki akım (taşıt/sa); c_a , a linkinin kapasitesi (taşıt/sa); t_a , a linkinin ölçülebilir maliyeti (sn) ve A linkler kümesidir. Tablo 4.1’de ulaşım ağına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 4.1 Ulaşım ağı bilgileri

Link No	Link kapasitesi (taşıt/sa)	Serbest akım seyahat süresi (sn)
1	300	23
2	200	34
3	400	12
4	350	45
5	400	23

SKD ataması problemi Denklem (4.2)'de görülen amaç fonksiyonunun minimum edilmesiyle çözülebilir.

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_k^w \delta_{ak}^w, \quad a \in A$$

$$\sum_{k \in K_w} f_k^w = q_w, \quad w \in W$$

$$f_k^w \geq 0, \quad k \in K_w, \quad w \in W$$

Kısıtlarına bağlı olarak;

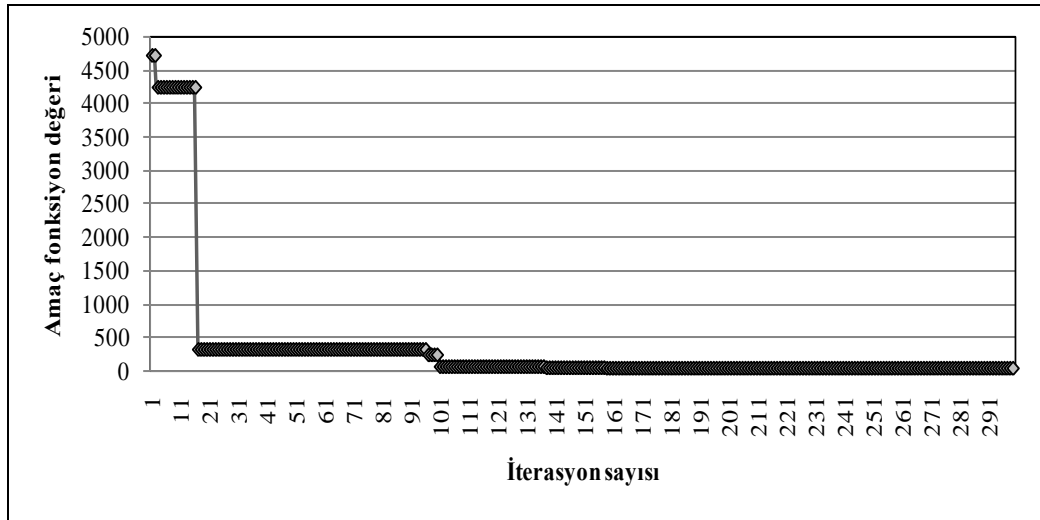
$$\min(f_1^1, \dots, f_k^w; f_1^{1*}, \dots, f_k^{w*}) = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} (f_k^w - f_k^{w*})^2 \quad (4.2)$$

Burada A yol ağındaki linkler kümesi, W (B-V) kümesi, K_w $w \in W$ B-V çiftindeki rotalar kümesi, q_w $w \in W$ B-V seyahat talebi, f_k^w $k \in K_w$ rotasındaki akım, f_k^{w*} $k \in K_w$ rotasındaki denge akımı, v_a , a linkindeki akım olup, δ_{ak}^w ise link/rota belirleme matrisinin elemanıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\delta_{ak}^w = 1, \quad w \in W \text{ B-V çiftindeki } k \text{ rotası } a \text{ linkini kullanıyorsa}$$

$$\delta_{ak}^w = 0, \quad \text{aksi durumda}$$

KAKOTAM ile yapılan atama sonucunda Denklem (4.2)'de verilen amaç fonksiyonunun değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 KAKOTAM amaç fonksiyonu değışımi

Şekil 4.3'den görüldüğü gibi KAKOTAM ilk iterasyonda problemde verilen B-V talebine uygun olarak seçilen ÇU içinden rastgele arama yapmakta ve Şekil 4.1'de verilen algoritma adımları takip edilerek amaç fonksiyonun minimum değerini bulmaktadır. İlk iterasyon sonunda yaklaşık amaç fonksiyonu değeri 4750'dir. KAKOTAM'nde ikinci iterasyonda bir önceki iterasyonda elde edilen en iyi rota akım değerleri ve seçilen β değerlerine göre algoritma tekrar ÇU içinden arama yapmaya devam etmiştir. KAKOTAM bu şekilde iterasyonlar boyunca devam ederek 300 iterasyon sonunda amaç fonksiyonu değerinin minimum değerine ulaşmıştır. KAKOTAM ile TA işleminin gerçekleştirilmesi 40.5 CPU süresi (sn) sürmektedir. KAKOTAM ile verilen ulaşım ağı için elde edilen SKD link trafik hacimleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 KAKOTAM ile elde edilen denge link trafik hacimleri

Link No	Akım (taşıt/sa)	Kapasite kullanma oranı (%)
1	320	107
2	160	80
3	160	40
4	80	23
5	240	60

Tablo 4.2'de görüldüğü gibi link 1 denge durumunda kapasite üstü çalışmaktadır. Bunun sebebi rota 3'ün maliyetinin oldukça fazla olması ve ağ kullanıcılarının büyük bir oranının 1 ve 2 nolu rotaları seçmesidir.

4.2.2. Sheffi Algoritması

Çalışmada geliştirilen probit SKD modellerinin karşılaştırmasının yapılabilmesi için kullanılan SA'ında algılanan link maliyetlerinin örneklenmesi yaklaşımı altında çözüm yapılmaktadır (Sheffi 1985). Bu yöntemde verilen ulaşım ağında her bir link için algılanan maliyetler hesaplanmakta ve rota maliyet vektörü elde edilmektedir. Elde edilen rota maliyet vektörüne göre en düşük maliyetli rotaya q_{rs} ile belirtilen B-V talebi atanmakta ve $x_a^{(l)}$ ile belirtilen ortalama akımlar her bir iterasyonda hesaplanmaktadır. Algoritma her bir iterasyonda elde edilen standart sapma değerinden elde edilen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmekte ve kriter sağlandığı anda denge link trafik hacimleri elde edilmektedir. SA'nın adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 0: Başlangıç. $l=1$

Adım 1: Örnekleme. Her bir link a için $T_a^{(l)}, T_a \sim N(t_a, \beta t_a)$ kullanılarak elde edilir.

Adım 1.1: Link kovaryans matrisini oluştur.

Adım 1.2: Cholesky faktörizasyonu ile \mathbf{R} üçgen matrisi hesapla

Adım 1.3: $\mathbf{S} \sim \text{MVN}(0, \mathbf{I})$ üret.

Adım 1.4: $\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\mu}$ denklemi ile algılanan link maliyet vektörünü bul.

Adım 1.5: Algılanan rota maliyet vektörünü bul.

Adım 2: Hep veya hiç ataması. Başlangıç ve varış noktaları arasındaki q_{rs} talebini en kısa seyahat süreli rotaya yükle. $X_a^{(l)}$ akımlarını bul.

Adım 3: Ortalama akımlar. $x_a^{(l)} = [(l-1)x_a^{(l-1)} + X_a^{(l)}]/l \quad \forall a$

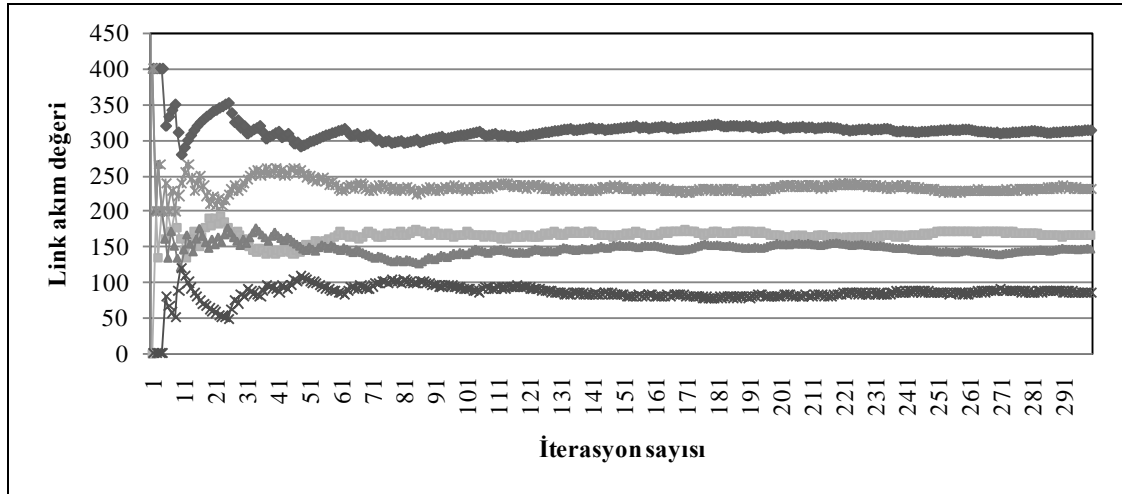
Adım 4: Durma kriteri.

$$(a) \sigma_a^{(l)} = \sqrt{\frac{1}{l(l-1)} \sum_{m=1}^l (X_a^{(m)} - x_a^{(l)})^2} \quad \forall a$$

(b) Eğer $\max_a \left\{ \frac{\sigma_a^{(l)}}{x_a^{(l)}} \right\} \leq K$ ise dur. $x_a^{(l)}$ aranan çözümdür. Aksi halde $l=l+1$ ve

Adım 1'e git.

SA her bir iterasyonda örnekleme sonucu elde edilen algılanan link maliyetlerine bağlı olarak en düşük maliyetli rotaya talebin yüklenmesi prensibine dayandığı için rota numaralandırmasına gerek duymamaktadır. Fakat probit seçim olasılıklarının hesaplanmamasından dolayı oluşturulabilecek herhangi bir amaç fonksiyonu altında çözümü imkansız kılmaktadır. Ayrıca SA algılanan link maliyetleri üzerinden DKD yaklaşımının uygulanması şeklinde gerçekleştirildiği için SKD koşullarını sağlamakta tam olarak etkin değildir. Herhangi bir seçim olasılığı hesaplanmadığı için SKD atamasının esas çerçevesini oluşturan rotaların B-V talebini belli oranlarda paylaşacağı kabulü burada uygulanmamaktadır. SA ile Şekil 4.2’de verilen ulaşım ağının çözülmesi ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi Şekil 4.4’de görülmektedir. SA ile TA işleminin gerçekleştirilmesi 1.2 CPU süresi (sn) sürmektedir.



Şekil 4.4 SA ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi

SA ile elde edilen SKD link trafik hacimleri KAKOTAM ile oldukça yakındır. Tablo 4.3’de SA ile elde edilen hacimler görülmektedir.

Tablo 4.3 SA ile elde edilen SKD denge link trafik hacimleri

Link No	Trafik Hacmi (taşıt/sa)	Kapasite kullanma oranı (%)
1	321	107
2	158	79
3	163	41
4	78	22
5	241	60

4.2.3. Ardışık Ortalamalar Yöntemi Trafik Atama Modeli

AOYTAM algılanan link maliyetlerine bağlı olarak algılanan rota maliyetlerinin bulunması ve Monte-Carlo simülasyonu yardımıyla rota seçim olasılıklarının elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde verilen ulaşım ağında her bir link için algılanan maliyetler hesaplanmakta ve buna bağlı olarak algılanan rota maliyet vektörü elde edilmektedir. Monte-Carlo simülasyonu sonucu rota seçim olasılıkları elde edildikten sonra AOY yardımıyla rota akımları bulunmaktadır. Algoritma önceden verilen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmekte ve kriter sağlandığı anda rota akımları ve link-rota belirleme matrisi yardımıyla SKD denge link trafik hacimleri elde edilmektedir. AOY yöntemi Denklem (4.3)'de verilmiştir.

$$f_k^* = \left(1 - \frac{1}{n}\right) f_k^{n-1} + \frac{1}{n} f_k \quad (4.3)$$

Burada f_k^* , n .iterasyonda k rotasındaki denge akımı, f_k^{n-1} k rotasındaki bir önceki iterasyondaki akım ve f_k , n .iterasyonda k rotasındaki akım olarak ifade edilmektedir. AOYTAM'nin adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 0: Başlangıç. $n=1$

Adım 1: Her bir link a için $T_a^{(l)}$, $T_a \sim N(t_a, \beta t_a)$ kullanılarak elde edilir.

Adım 1.1: Link kovaryans matrisini oluştur.

Adım 1.2: Cholesky faktörizasyonu ile \mathbf{R} üçgen matrisi hesapla

Adım 1.3: $\mathbf{S} \sim \text{MVN}(0, \mathbf{I})$ üret.

Adım 1.4: $\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\mu}$ denklemi ile algılanan link maliyet vektörünü bul.

Adım 2: Algılanan rota maliyet vektörünü bul.

Adım 3: En düşük maliyetli rotayı kaydet

Adım 4: Adım 1 ve 3 arasında Monte-Carlo simülasyonu yap.

Adım 5: Monte-Carlo simülasyonu sonuçlarına göre rota seçim olasılıklarını Denklem

$$(2.26)'da \text{ verilen } P_k \cong \frac{N_k}{N} \text{ formülasyonu ile hesapla.}$$

Adım 6: Rota seçim olasılıklarını ve B-V talebini kullanarak rota akımlarını bul

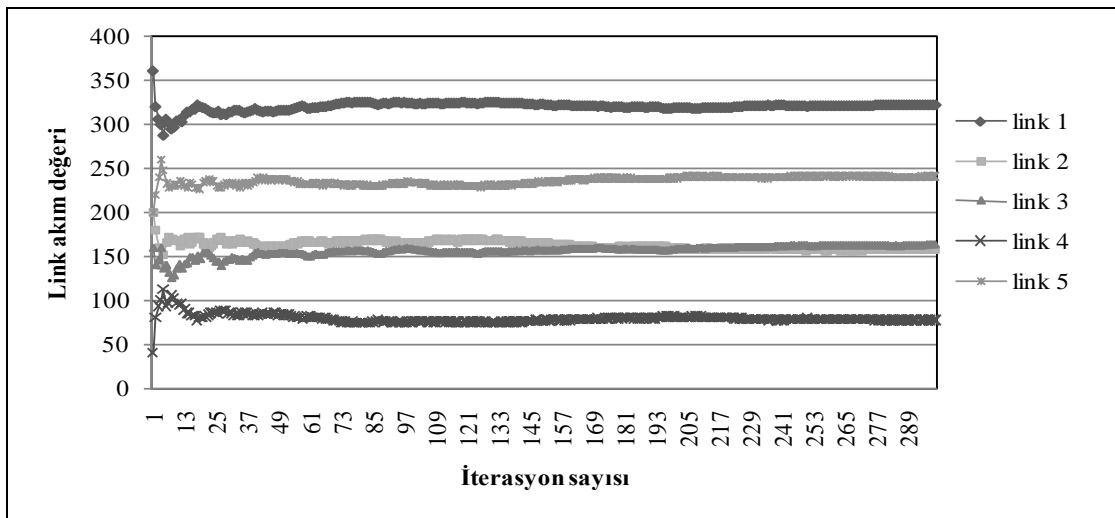
Adım 7: Denklem (4.3) ile denge rota akımlarını bul

Adım 8: Link-rota belirleme matrisi yardımı ile denge link akımlarını bul.

Adım 9: Durma kriterinin kontrolü. $\sum_{k \in K} (f_k^{*(t)} - f_k^{*(t-1)})^2 \leq 0.01$ ise dur aksi takdirde

$n=n+1$ ve Adım 1'e git. $f_k^{*(t)}$ ve $f_k^{*(t-1)}$ sırasıyla ardışık iterasyonlarda elde edilen k rotasındaki denge akımlarıdır.

AOYTAM modeli KAKOTAM'nde olduğu gibi rota seçim olasılıklarını kullandığı için rota numaralandırmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum büyük ölçekli ulaşım ağlarında dezavantaj olarak görülmesine karşın geliştirilen AOYTAM'nin SA'na göre talebin rotalar arasında dağıtılmasından dolayı stokastik düşüncenin doğasına daha uygun olduğu ve sürücülerin algılama hatalarının modele daha iyi yansıtılmasını sağladığı söylenebilir. AOYTAM ile Şekil 4.2'de verilen ulaşım ağının çözülmesi ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi Şekil 4.5'de görülmektedir. AOYTAM ile TA işleminin gerçekleştirilmesi 4.2 CPU süresi (sn) sürmektedir.



Şekil 4.5 AOYTAM ile elde edilen link trafik hacimlerinin değişimi

Tablo 4.4'de AOYTAM ile elde edilen SKD link trafik hacimleri verilmiştir. AOYTAM ile elde edilen akımlar KAKOTAM ve SA'ndan elde edilen akımlar ile oldukça benzerdir. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi AOYTAM'nde rota seçim olasılıklarının kullanılmasından dolayı ağın dengeye gelmesi daha kolay olmakta ve salınımlar oldukça azalmaktadır. SA'nda ise link trafik hacimlerinin salınımları daha fazla olmakla

birlikte 300 iterasyon sonunda hala link trafik hacimlerinde salınımlar görülmektedir (Bkz. Şekil 4.4).

Tablo 4.4 AOYTAM ile elde edilen SKD denge link trafik hacimleri

Link No	Akım (taşıt/sa)	Kapasite kullanma oranı (%)
1	319	106
2	160	80
3	158	40
4	81	23
5	239	60

Sonuç olarak bu bölümde verilen KAKOTAM, SA ve AOYTAM modellerinin üçünün de avantaj ve dezavantajlarının mevcut olduğu söylenebilir. Çalışmada geliştirilen modellerden biri olan AOYTAM literatürde mevcut SA'na göre hem rota seçim olasılıklarının elde edilerek TA yapılmasına olanak vermesi hem de CPU süresi açısından geliştirilen KAKOTAM'nden oldukça iyi olması nedeniyle alt seviye probleminin çözümünde kullanılmıştır.

4.2.4. AOYTAM Duyarlılık Analizi

AOYTAM'nde algılanan link maliyetlerinin bulunması için kullanılan yaklaşım da β varyans sabitinin farklı değerleri için duyarlılık analizi yapılmıştır. β sabitinin farklı değerleri için elde edilen SKD link trafik hacimleri Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Farklı β değerleri için AOYTAM ile elde edilen SKD link trafik hacimleri

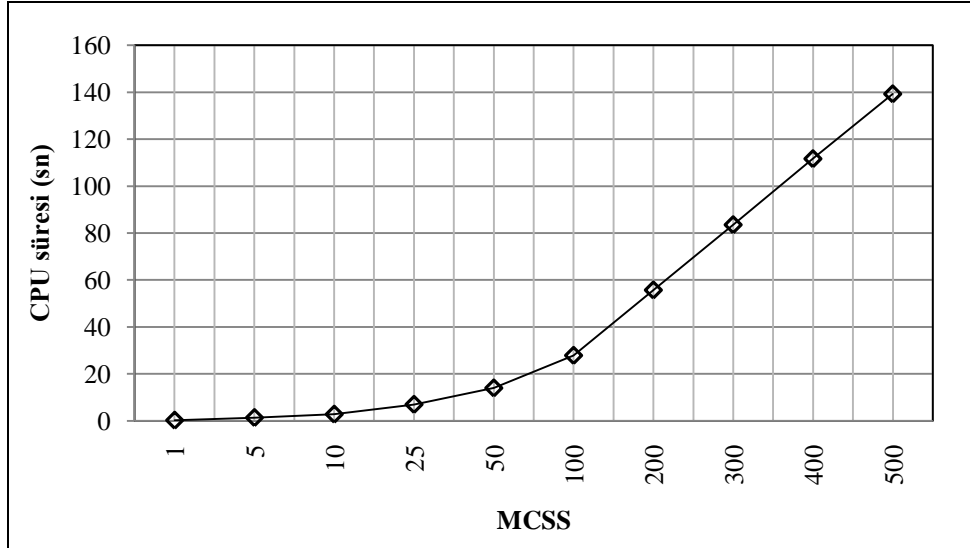
Link No	β sabiti											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1	2	5	10
1	281	291	297	301	304	307	311	313	319	331	346	356
2	157	158	159	159	159	159	160	160	160	158	157	157
3	124	132	137	141	144	147	150	153	158	172	188	199
4	118	108	102	98	95	92	88	86	81	68	53	43
5	242	241	240	240	239	239	239	239	239	241	242	243

Tablo 4.5’den görüldüğü farklı varyans sabiti değerleri için farklı SKD link trafik hacimleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Varyans sabiti kullanıcıların algılama hatalarını temsil ettiği için düşük varyans sabiti değerlerinde kullanıcıların algılama hataları daha fazla olmakta ve rota seçimi sırasında hatalar yapabilmektedirler. Fakat varyans sabiti değeri arttıkça kullanıcıların algılama hataları azalmakta ve seçimler deterministik hale gelmektedir. Tablo 4.5 incelendiğinde varyans sabiti değeri arttıkça özellikle “1” değerinden sonra 4 nolu linkteki trafik hacmi oldukça azalmakta ve deterministik kabule uygun sonuçlar ortaya çıkmaya başlamaktadır. Bu nedenle SKD prensiplerini yansıtmaması açısından çalışmada AOYTAM’nin çözümünde varyans sabiti değeri olarak Sumalee vd (2006) tarafından da önerilen değer olan “1” değeri kullanılmıştır.

AOYTAM’nde probit rota seçim olasılıklarının hesaplanması için kullanılan Monte-Carlo Simülasyon Sayısı (MCSS) parametresinin etkisinin araştırılması için duyarlılık analizi yapılmıştır. Farklı MCSS değerleri için AOYTAM ile elde edilen SKD link trafik hacimleri Tablo 4.6’da verilmiştir. MCSS değeri 10’a kadar SKD link trafik hacimlerinde dalgalanma olmakta birlikte bu değerden sonra önemli bir değişiklik olmamaktadır. Şekil 4.6’da MCSS değerinin değişimi ile CPU süresi arasındaki ilişki görülmektedir.

Tablo 4.6 Farklı MCSS değerleri için AOYTAM SKD link trafik hacimleri

Link No	MCSS değeri									
	1	5	10	25	50	100	200	300	400	500
1	319	324	319	321	321	321	321	322	322	321
2	166	165	160	160	160	160	160	161	160	160
3	153	159	158	160	160	160	160	161	161	161
4	80	75	81	78	78	78	78	77	77	78
5	233	234	239	239	239	239	239	238	239	239
CPU süresi (sn)	0.29	1.41	2.85	7.03	14.02	27.89	55.72	83.5	111.6	139.2



Şekil 4.6 MCSS-CPU süresi ilişkisi

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi MCSS değeri artarken CPU süresi üssel bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle AOYTAM’nde efektif olarak kullanılacak MCSS değerinin 10 olarak alınmasına karar verilmiştir.

4.3. UAT Çözüm Algoritmaları

4.3.1 UAT Probleminin İki Seviyeli Programlama İle Çözülmesi

İki seviyeli programlama metodu bir çift optimizasyon probleminden oluşan programlama tekniği olarak tanımlanmaktadır. Bu tür programlamada üst seviye ve alt seviyelerin parametreleri her iki seviye için girdi ve çıktı olarak kullanılmaktadır. Aşağıda iki seviyeli programlama algoritmasının UAT problemine uygulanması için geliştirilen KAKOSKA-1 modelinin adımları detaylı olarak verilmiştir.

Adım 0: Üst seviye probleminin çözümü ($t=1$). Kullanıcıya özel KKO parametrelerini (r, β, α) gir. ψ sinyal parametrelerini \mathbf{m} karar vektörü olarak kodla.

Adım 1: $t=1$ ise \mathbf{M} olarak gösterilen çözüm matrisini verilen maksimum ve minimum sınırlar içinde rastgele doldur, $t > 1$ ise Adım 9’da elde edilen en iyi ψ sinyal

parametreleri ve β vektörüne bağlı olarak çözüm kümesini kısıtla ve kısıtlı çözüm kümesini kullanarak \mathbf{M} çözüm matrisini rastgele doldur.

Adım 2: *Alt seviye probleminin AOYTAM ile çözümü*

Adım 2.1: Başlangıç. $n=1$

Adım 2.2: Her bir link a için $T_a^{(l)}$, $T_a \sim N(t_a, \beta t_a)$ kullanılarak elde edilir.

Adım 2.3: Link kovaryans matrisini oluştur.

Adım 2.4: Cholesky faktörizasyonu ile \mathbf{R} üçgen matrisi hesapla

Adım 2.5: $\mathbf{S} \sim \text{MVN}(0, \mathbf{I})$ üret.

Adım 2.6: $\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\mu}$ denklemi ile algılanan link maliyet vektörünü bul.

Adım 2.7: Algılanan rota maliyet vektörünü bul.

Adım 2.8: En düşük maliyetli rotayı kaydet

Adım 2.9: Adım 2.2 ve 2.8 arasında Monte-Carlo simülasyonu yap.

Adım 2.10: Monte-Carlo simülasyonu sonuçlarına göre rota seçim olasılıklarını

$P_k \cong \frac{N_k}{N}$ formülasyonunu kullanarak hesapla.

Adım 2.11: Rota seçim olasılıkları ve B-V talebini kullanarak rota akımlarını bul

Adım 2.12: AOY ile denge rota akımlarını ve link-rota belirleme matrisi yardımıyla denge link akımlarını (\mathbf{x}) bul

Adım 2.13: Durma kriteri sağlandıysa Adım 3'e git aksi takdirde $n=n+1$ ve Adım 2.2'e git

Adım 3: Alt seviye probleminin çözümünden elde edilen denge link akımlarını ve adım 1'de elde edilen sinyal parametrelerini kullanarak her bir \mathbf{m} karınca vektörü için Denklem (3.5) yardımıyla amaç fonksiyonu değerini hesapla ve eski karınca kolonisi çözüm matrisini (\mathbf{M}_{eski}) oluştur.

Adım 4: Denklem (3.3) ile feromon miktarının buharlaştırılması işlemini gerçekleştir.

Adım 5: Denklem (3.4) ile en iyi amaç fonksiyonu etrafında feromon güncellenmesi yap.

Adım 6: Denklem (3.2) ile arama yönünü belirle ve α sıçrama uzunluğu matrisini rastgele üret.

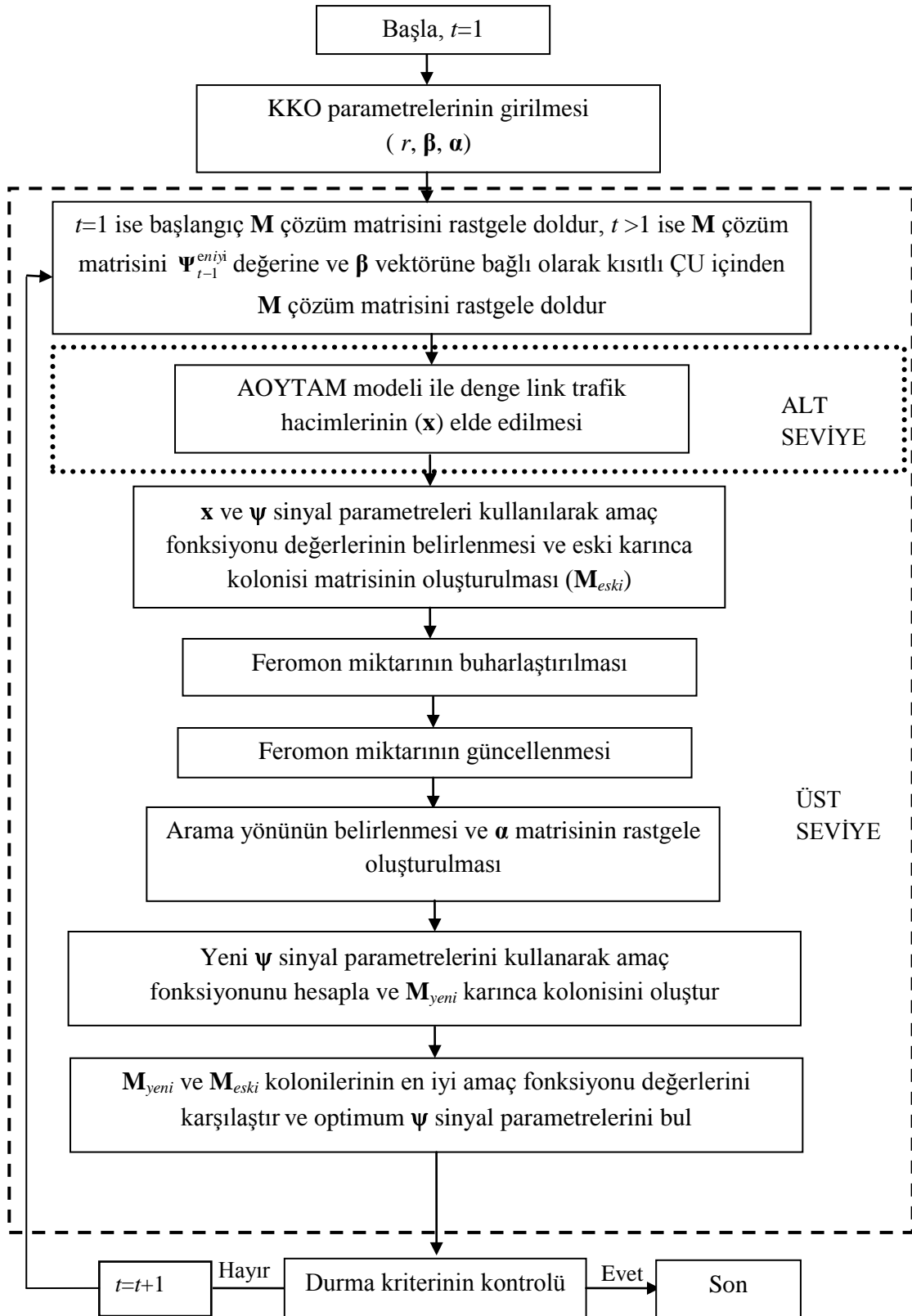
Adım 7: Denklem (3.1) ile yeni ψ sinyal parametrelerini hesapla ve yeni karınca kolonisi matrisini (M_{yeni}) oluştur.

Adım 8: Denklem (3.5), yeni karınca kolonisi matrisi ve Adım 2’de elde edilen denge link akımlarını kullanarak yeni amaç fonksiyonu değerlerini hesapla.

Adım 9: Adım 3 ve 8’de elde edilen eski ve yeni karınca kolonisine ait en iyi amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştır ve en iyi amaç fonksiyonu değerini veren ψ sinyal parametrelerini belirle.

Adım 10: Durma kriterinin kontrolü. Elde edilen ψ_t ve ψ_{t+1} değerleri arasında fark %1’den az olduğu durumda algoritma sonlandırılır. Eğer durma kriteri sağlanmışsa optimum ψ sinyal parametreleri elde edilir aksi takdirde Adım 1’e git ve $t=t+1$ yap.

Şekil 4.7’de geliştirilen KAKOSKA-1 modeli şematik olarak gösterilmiştir. Algoritma adımlarından görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modelinde alt seviyede geliştirilen AOYTAM ile TA problemi çözülmüştür. AOYTAM’nden elde edilen denge link trafik hacimleri KAKOSKA-1 modelinin girdi verilerini oluştururken KAKOSKA-1 modelinin çözümü ile elde edilen ψ sinyal parametreleri ise AOYTAM’nde girdi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.7 KAKOSKA-1 modeli

4.3.2. UAT Probleminin KİY Yaklaşımı İle Çözülmesi

Literatürde UAT probleminin çözümü için önerilen farklı yaklaşımlardan biri olan KİY metodunda sinyal kontrol ve TA problemleri ayrı ayrı çözümlenerek problem çıktıları diğer problemin girdisi olarak kullanılmıştır. Bu iteratif yaklaşım ilk olarak Allsop (1974) ve Gartner (1974) tarafından önerilmiştir. KİY yaklaşımında iterasyondan iterasyona denge akımlarının dalgalanma göstermemesi için denge link akımlarına AOY yakınsama prosedürü uygulanmaktadır (Ceylan 2002). Ağ tasarım probleminin çözümü için geliştirilen KAKOSKA-2 modeli aşağıdaki adımlar takip edilerek uygulanır.

Adım 0: Başlangıç, $t=0$. Başlangıç sinyal parametrelerine Ψ_t bağlı olarak, AOYTAM ile denge link trafik hacimlerini hesapla, $\mathbf{x}^*(\Psi_t)$.

Adım 1: KAKOSKA-2 modeli yardımıyla Adım 0'da elde edilen $\mathbf{x}^*(\Psi_t)$ denge link trafik hacimlerini kullanarak optimum sinyal parametrelerini, Ψ_{t+1} , hesapla.

Adım 2: Link maliyet fonksiyonunu optimum sinyal parametrelerine Ψ_{t+1} bağlı olarak güncelle.

Adım 3: AOYTAM ile denge link trafik hacimlerini $\mathbf{x}^*(\Psi_{t+1})$ hesapla.

Adım 4: Adım 3'de elde edilen $\mathbf{x}^*(\Psi_{t+1})$ denge link trafik hacimlerini kullanarak KAKOSKA-2 modelinin çalıştırılması ile Ψ_{t+2} optimum sinyal parametrelerini hesapla.

Adım 5: Ψ_{t+2} ve Ψ_{t+1} optimum sinyal parametrelerini karşılaştır. Ψ_{t+1} ve Ψ_{t+2} arasındaki değişiklik %1'den az ise Adım 6'ya git. Aksi takdirde $t=t+1$ ve Adım 2'ye git.

Adım 6: Dur. Optimum sinyal parametreleri ve denge link trafik hacimleri sırasıyla Ψ_{t+1} ve $\mathbf{x}^*(\Psi_{t+1})$ şeklinde elde edilir.

KAKOSKA-2 modeli ile UAT çözüm sürecinde Adım 0'da verilen başlangıç sinyal parametrelerine bağlı olarak AOYTAM ile denge link trafik hacimleri hesaplanır. Elde edilen denge link trafik hacimleri KAKOSKA-2 modeline girdi olarak verilir. KAKOSKA-2 modeline girdi olarak verilmeden önce elde edilen denge link trafik hacimlerine $x^*(\psi_t)$, AOY yakınsama modeli uygulanır. Bu modelin uygulanmasının sebebi denge link trafik hacimlerinin iterasyondan iterasyona dalgalanmalarını önlemektir. AOY yakınsama modeli Denklem (4.4)'de verilmiştir.

$$x_a^{(t+1)} = \left(1 - \frac{1}{t}\right)x_a^{(t-1)} + \frac{1}{t}x_a^{(t)} \quad (4.4)$$

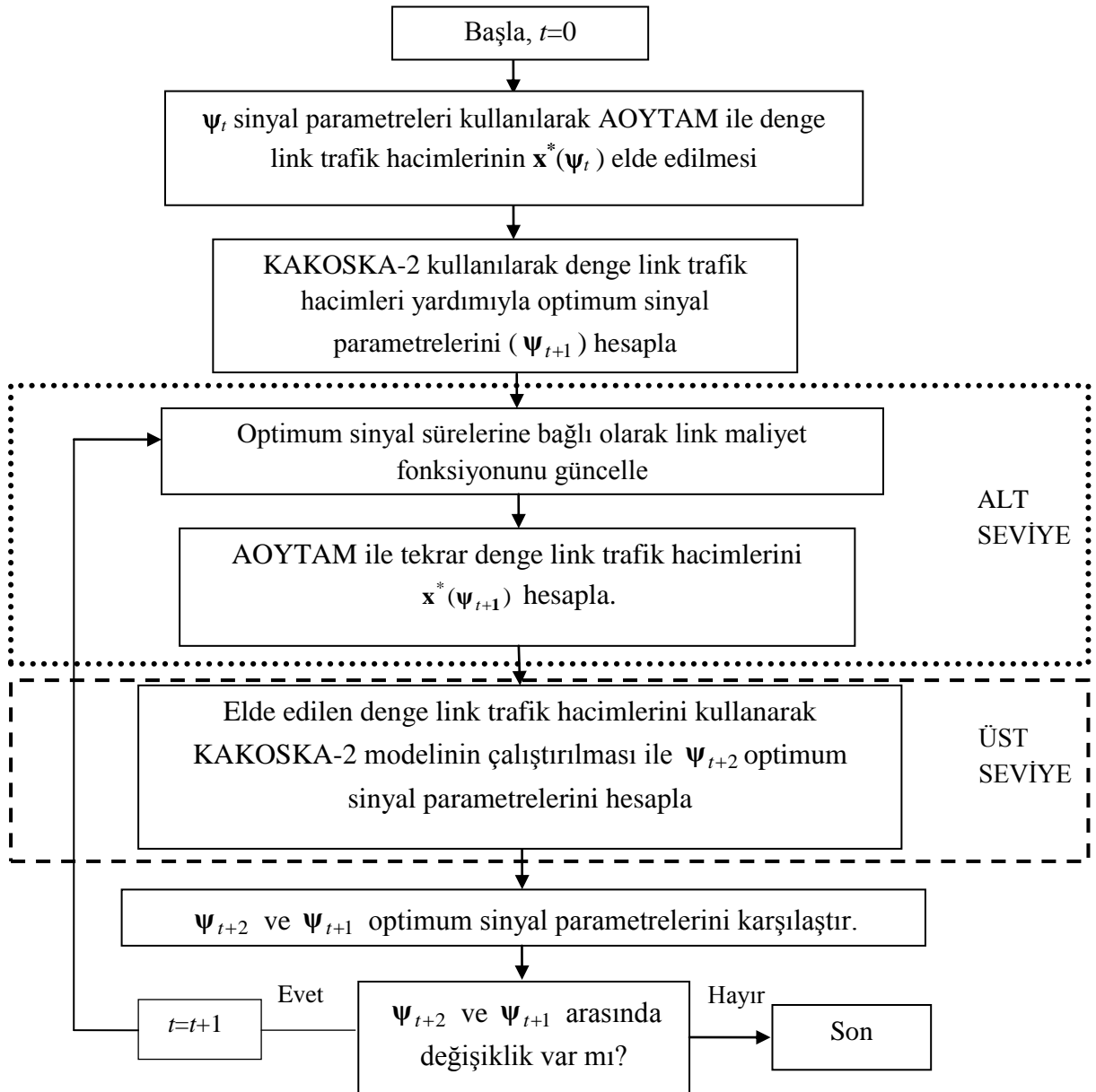
Burada t iterasyon sayısıdır.

Adım 1'de AOY yakınsama prosedürünün uygulanmasından sonra elde edilen denge link trafik hacimleri KAKOSKA-2 modeline girdi olarak verilir ve optimum sinyal parametreleri elde edilir.

Adım 2'de KAKOSKA-2 ile elde edilen optimum sinyal parametrelerine göre link maliyet fonksiyonu güncellenir. Adım 3'de denge link trafik hacimlerinin elde edilmesi için AOYTAM tekrar çalıştırılır.

Adım 4'de AOYTAM ile elde edilen denge link trafik hacimleri KAKOSKA-2 modeline girdi olarak verilir ve tekrar KAKOSKA-2 modelinin çalıştırılması ile optimum sinyal parametreleri elde edilir. Sonrasında durma kriteri sağlanıncaya kadar algoritma çalıştırılmaya devam edilir. Durma kriteri sağlandığı anda elde edilen model çıktıları KAKOSKA-2 modeli ile UAT probleminin çözümünden elde edilen denge link trafik hacimleri ve optimum sinyal parametreleridir. KAKOSKA-2 modeli KAKOSKA-1 modelinden farklı olarak birbirinden bağımsız biçimde alt seviye ve üst seviye problemlerinin iteratif olarak sırasıyla çözülmesi olarak tanımlanabilir. UAT probleminin çözümünde TA sonucu elde edilen denge link trafik hacimlerini kullanarak sinyal kontrol probleminin çözülmesi ile elde edilen optimum sinyal sürelerinin kullanılması ile tekrar TA probleminin çözülmesi ve verilen durma kriteri sağlanıncaya kadar bu işleme devam edilmesi KİY yaklaşımını oluşturmaktadır.

Şekil 4.8’de UAT probleminin çözümü için geliştirilen KAKOSKA-2 modelinin akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.8 KAKOSKA-2 modeli

4.4. Sonuçlar

Bu bölümde literatürde mevcut olan ve bu çalışmada geliştirilen TA modellerinin çözüm algoritmaları, örnek ağ üzerindeki uygulamaları ve sonuçların karşılaştırılması

verilmiştir. Geliştirilen KAKOTAM'nde KKO algoritması TA problemine uyarlanmış ve probit tabanlı atama probleminin çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. KAKOTAM'nde probit rota seçim olasılıklarının bulunması için Monte-Carlo simülasyon tekniğinden faydalanılmıştır.

Sheffi (1985) tarafından önerilen SA'sı algılanan link maliyetleri üzerinden bulunan en düşük maliyetli rotaya hep ve ya hiç ataması yapılması prensibine dayanmaktadır. SA'nda en düşük maliyetli rotaya talep yüklenmesi yapıldığı için rota numaralandırmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. KAKOTAM ise rota seçim olasılıklarını kullandığı için rota numaralandırmasına gereksinim duymaktadır. Geliştirilen atama modellerinden biri olan AOYTAM ise KAKOTAM'ne benzemekte fakat AOY yönteminin probit atama problemine adaptasyonunun sağlanmasından dolayı KAKOTAM'ne göre oldukça farklı bir yaklaşımdır. Sonuç olarak geliştirilen atama modellerinden AOYTAM hem CPU süresi hem de probit seçim olasılıklarının hesaplanmasına olanak sağlamasından dolayı TA probleminin çözümünde kullanılmıştır. AOYTAM'nin duyarlılık analizi yapılmış, Monte-Carlo simülasyon sayısı ve varyans sabiti parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir.

UAT probleminin çözümü için geliştirilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin adımları ve çalışma şekilleri açıklanmıştır. Gelecek bölümde KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin örnek ulaşım ağı üzerindeki sayısal uygulamaları verilmiştir. Ayrıca sıkışıklık fiyatlandırması için geliştirilen model verilmiş ve sayısal uygulaması yapılmıştır.

5. SAYISAL UYGULAMA

5.1. Giriş

Bu bölümde KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin örnek ulaşım ağı üzerinde sayısal uygulamaları yapılmıştır. Geliştirilen modeller ile UAT çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesi için geliştirilen formülasyon ve UAT probleminin içine dahil edilme prensipleri açıklanmıştır. Ulaşım ağındaki talep artışlarından dolayı ağda meydana gelebilecek değişimler incelenmiş, sıkışıklık fiyatlandırmasının ağ üzerindeki etkileri yorumlanmış ve öneriler getirilmiştir.

5.2 KAKOSKA-1 Modeli Sayısal Uygulama

KAKOSKA-1 modelinin sayısal uygulaması Allsop ve Charlesworth (1977) ve Ceylan (2002) tarafından kullanılan ulaşım ağı üzerinde yapılmıştır. Ağın topolojisi ve faz diyagramları Şekil 5.1 ve 5.2’de verilmiştir. Ulaşım ağı 20 adet B-V çifti, 6 adet sinyalize kavşak, 23 adet link ve 56 adet rotadan oluşmaktadır. Her bir B-V çifti arasındaki seyahat talepleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.2’de her bir kavşağa bağlanan link numaraları, linklere ait serbest akım seyahat süreleri ve doymuş akım miktarları verilmiştir. Tablo 5.1’de görüldüğü gibi en çok seyahat üretilen zon C ile belirtilen zondur. Buradan diğer zonlara üretilen toplam seyahat talebi 1290’dır. En çok seyahat çeken ise A zonedir ve yine aynı şekilde toplam çekilen seyahat talebi 1290 olarak verilmiştir. Test ulaşım ağında toplam çekilen ve üretilen seyahat talebi 5000 olarak verilmiştir.

Tablo 5.1 B-V talepleri (Charlesworth 1977)

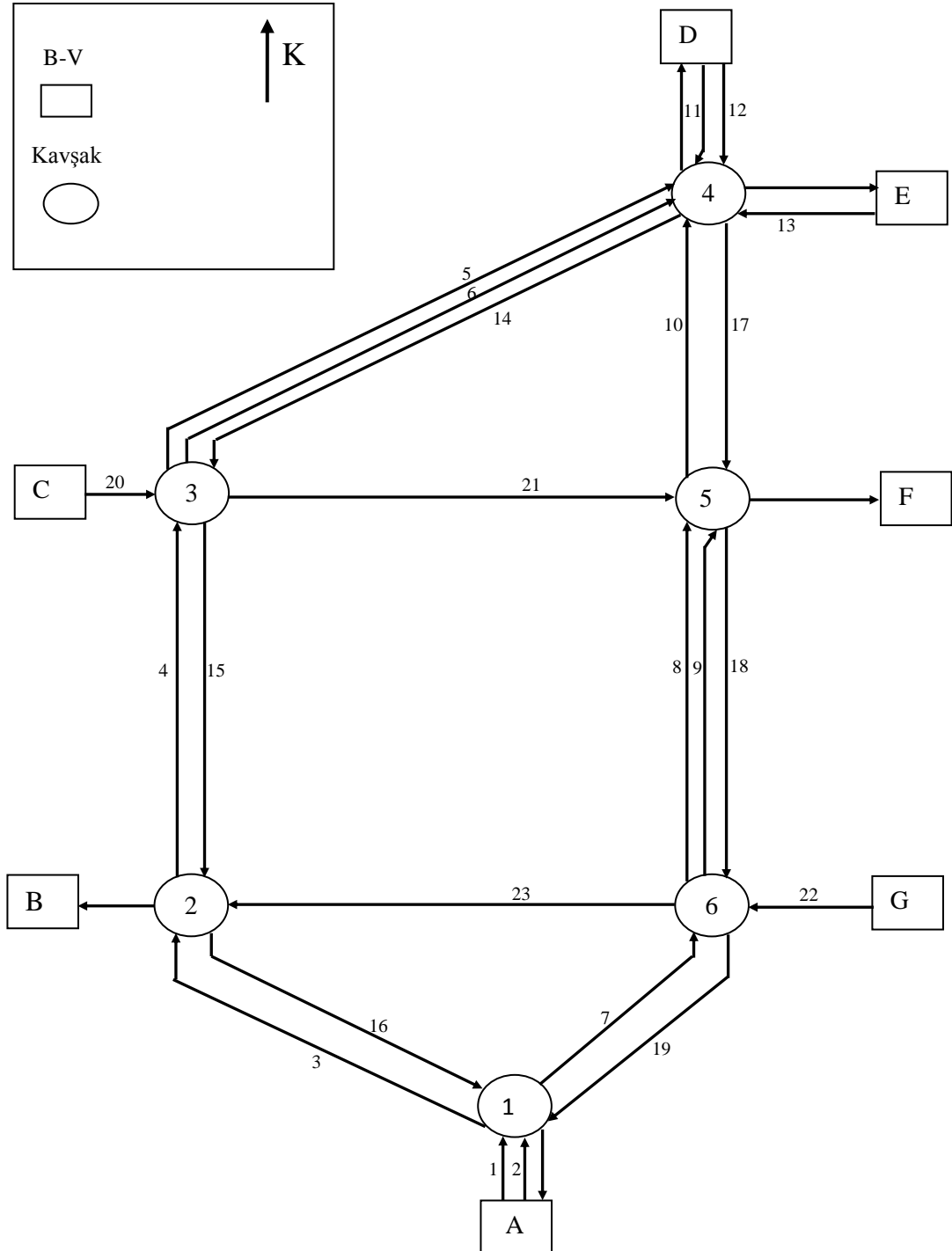
B-V	A	B	D	E	F	Toplam
A	0	250	700	30	200	1180
C	40	20	200	130	900	1290
D	400	250	0	50*	100	800
E	300	130	30*	0	20	480
G	550	450	170	60	20	1250
Toplam	1290	1100	1100	270	1240	5000

*D ve E olarak belirtilen B-V çiftleri arasındaki ulaşım talebi sayısal uygulama içine dahil edilmemiştir.

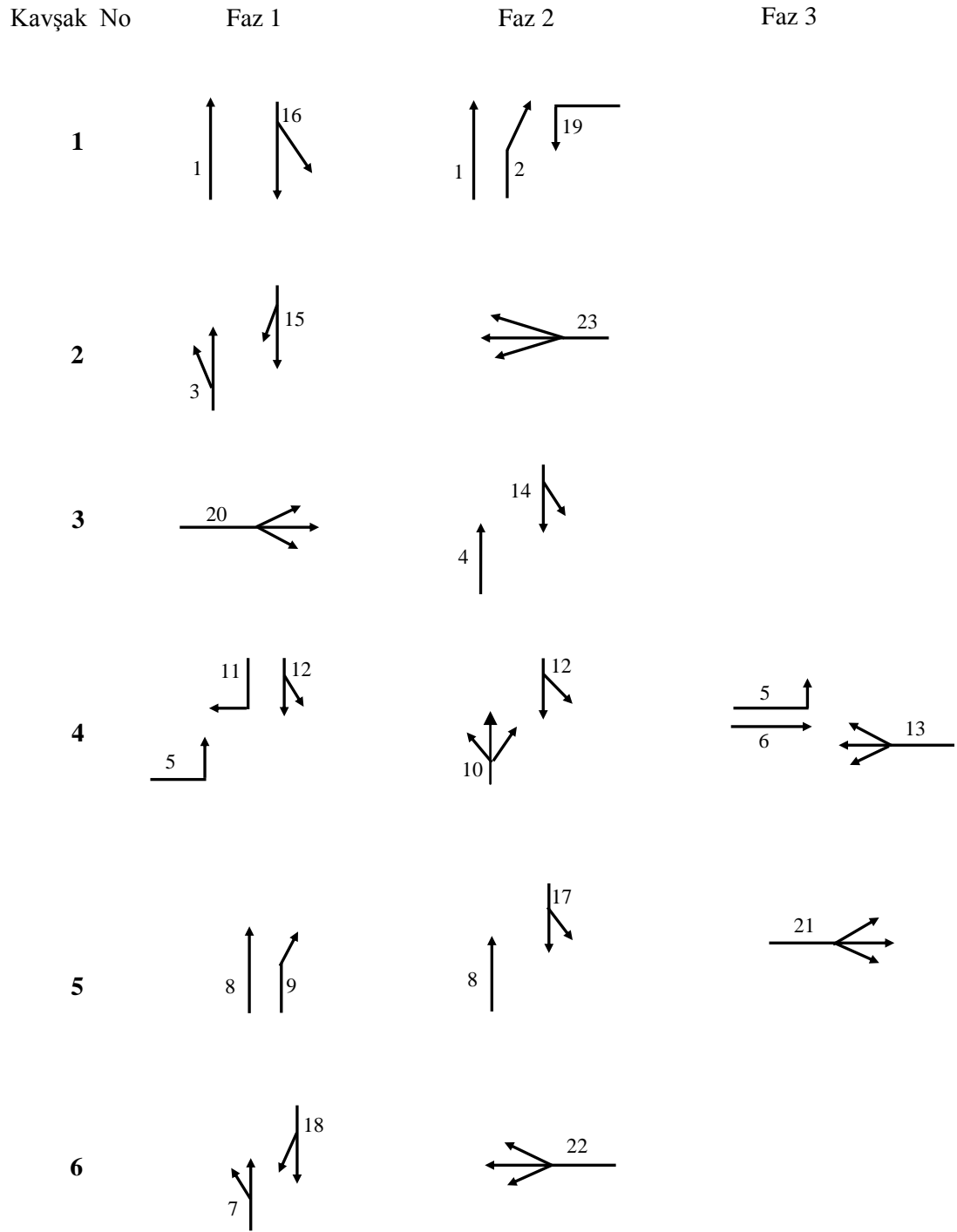
Tablo 5.2 Ulaşım ağına ait karakteristik özellikler (Charlesworth 1977)

Kavşak	Link	t_a^0	s	Kavşak	Link	t_a^0	s
1	1	1	2000	4	5	20	1800
	2	1	1600		6	20	1850
	16	10	2900		10	10	2200
	19	10	1500		11	1	2000
					12	1	1800
2	3	10	3200	5	8	15	1850
	15	15	2600		9	15	1700
	23	15	3200		17	10	1700
					21	15	3200
3	4	15	3200	6	7	10	1800
	14	20	3200		18	15	1700
	20	1	2800		22	1	3600

Burada t_a^0 serbest akım seyahat süresi (sn) ve s ise doymun akım (taşıt/sa) değeridir.



Şekil 5.1 Ulaşım ağı (Ceylan 2002)



Şekil 5.2 Faz diyagramı (Ceylan 2002)

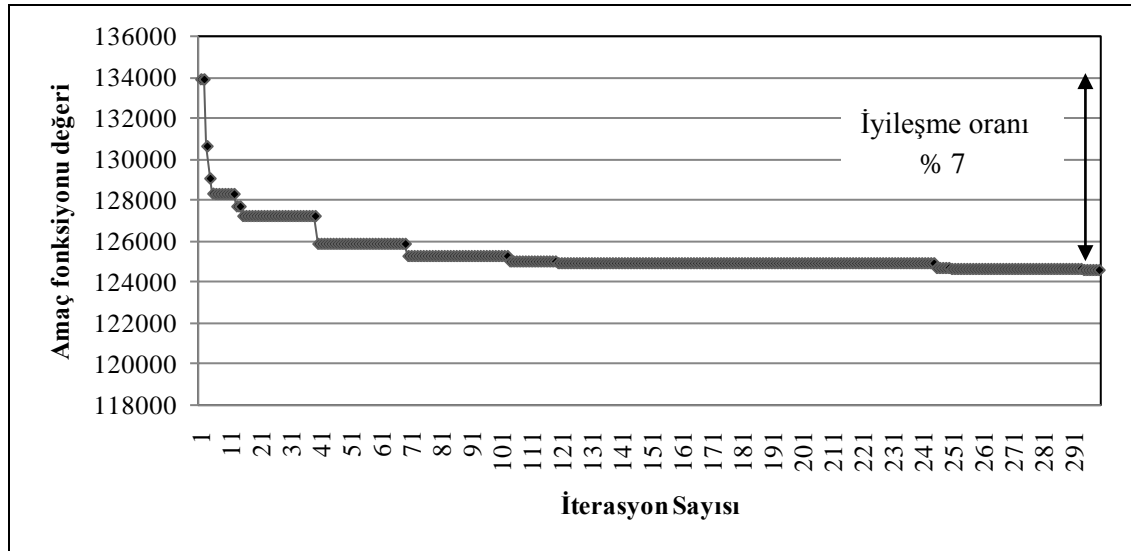
KAKOSKA-1 modelinde kullanılan KKO algoritması kısıtlı ÇU yaklaşımını kullandığı için global optimumun bulunmasında oldukça etkin bir algoritmadır. KAKOSKA-1 modeli oldukça geniş bir ÇU içinden rastgele arama yapmakta ve başlangıç değerlerine bağlı olarak çözüme devam etmemekte ve sürekli yeni yönlerde arama yapmaya devam etmektedir. KAKOSKA-1 modelinde kullanılan bu özellik yerel optimumlara takılma riskini oldukça azaltmaktadır. KAKOSKA-1 modelinin sayısal uygulamasının yapılabilmesi için kullanılan Karar Değişkenleri (KD) Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 KAKOSKA-1 karar değişkenleri

	Devre süresi (sn) $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_k)$	Faz yeşil süreleri (sn) $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_n)$	Toplam KD
ÇU	60-100	7-60	
β	$\beta = [100, 100, \dots, 100]$	$\beta = [60, 60, \dots, 60]$	
KD	6	8	14

6 kontrollü kavşak ve 14 fazlı olarak çalışan örnek ulaşım ağında Tablo 5.3’de görüldüğü gibi faz yeşil sürelerinin karar değişkenleri örnek ağın boyutu ve B-V talepleri göz önüne alınarak 7-60 arasında seçilirken devre süresi kısıtını sağlamak için devre süresi karar değişkenleri de 60-100 arasında seçilmiştir. Faz yeşil süreleri 8 adet karar değişkeni olarak kodlanmış ve kalan 6 adet faz yeşil süresi devre sürelerini temsil eden karar değişkenlerinden analitik olarak elde edilmiştir. β kısıt vektörü yerel optimum noktalarına takılma riskini azaltmak için sinyal kısıtları göz önüne alınarak seçilmiştir. Koloni büyüklüğü değeri karar değişkenleri sayısına uygun olarak $r = 30$ olarak seçilmiştir.

14 adet KD’nin 6 adedi devre süresini temsil eden karar değişkenleri olup diğer 8 tanesi ise faz yeşil sürelerini gösteren karar değişkenleridir. Faz sürelerinin karar değişkeni olarak seçilmesinin nedeni sinyal kontrol probleminde faz sürelerinin değişimi tabanlı farklı bir yaklaşım getirmektir. Bunun yapılabilmesi için devre süresi karar değişkenleri ise kısıtlayıcı rol oynamaktadır. Şekil 5.3’de KAKOSKA-1 modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması sonucu elde edilen amaç fonksiyonu yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 5.3 KAKOSKA-1 modeli yakınsama grafiği

Şekilden görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modeli ile 297 iterasyon sonunda amaç fonksiyonunun minimum değeri elde edilmiştir. KAKOSKA-1 modeli verilen sinyal kısıtlarına bağlı olarak ÇU içinden rastgele aramaya başlamış ve ilk iterasyonda amaç fonksiyonunun minimum değeri 133854 sn olarak bulunmuştur. İterasyonlar boyunca KAKOSKA-1 modeli farklı yönlerde ve kısıtlandırılmış ÇU içinde aramaya devam etmiş ve son olarak amaç fonksiyonunun minimum değeri 124587 sn olarak bulunmuştur. Şekilden görüldüğü gibi geliştirilen model iterasyonlar boyunca daha iyi bir çözüm buluncaya kadar en iyi çözümü saklı tutmaktadır. Başlangıç amaç fonksiyonu değerine göre iyileşme oranı yaklaşık % 7 değerindedir. Amaç fonksiyonu değerindeki iyileşmenin yaklaşık %90'ı 100 iterasyonda sağlanmıştır. KAKOSKA-1 modeli test ağının çözümünde oldukça kararlı bir yakınsama eğilimi göstermiştir. 200 iterasyon sonunda toplam iyileşmenin %95 sağlanmış ve 297 iterasyon sonunda ise amaç fonksiyonunun başlangıç değerine göre %7 iyileşme sağlanmıştır.

KAKOSKA-1 modelinin Allsop&Charlesworth ağına uygulanması sonucunda elde edilen denge link akımları (**x**) ve linklere ait doyumluk dereceleri (**p**) Tablo 5.4'de verilmiştir. Tablo 5.5'de elde edilen optimum sinyal süreleri verilmiştir.

Tablo 5.4 KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doyunluk dereceleri

Denge link trafik hacimleri (x)											
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
605	574	605	365	530	145	574	601	212	613	268	481
Doygunluk derecesi* (p)											
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
30	39	45	25	57	23	51	52	84	58	76	40
Denge link trafik hacimleri (x)											
x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
450	359	418	174	747	721	1115	1290	920	1250	616	
Doygunluk derecesi* (p)											
p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}	p_{19}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	
60	25	38	74	93	68	81	84	76	93	33	

*% cinsinden verilmiştir.

Tablo 5.5 KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Amaç fonksiyon değeri (sn)	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
124587	1	86	7	79	-
	2	76	32	44	-
	3	69	38	31	-
	4	62	11	30	21
	5	74	11	35	28
	6	80	50	30	-

Tablo 5.4'de görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modeli ile ağıın çözümü sonucunda elde edilen linklere ait doyunluk dereceleri %100'ün altındadır. Bu durumda elde edilen sinyal parametrelerine ve denge link trafik hacimlerine bağılı olarak işletilen ağıın sıklık etkisi altında olmadan hizmet verdiği söylenebilir.

Tablo 5.1'de verilen B-V taleplerinin artması durumunda ağıın performansının değışiminin incelenmesi için analizler yapılmıştır. B-V taleplerinin %10,%20,%30,%40 ve %50 artması senaryoları için ağıın KAKOSKA-1 modeli ile çözümleri

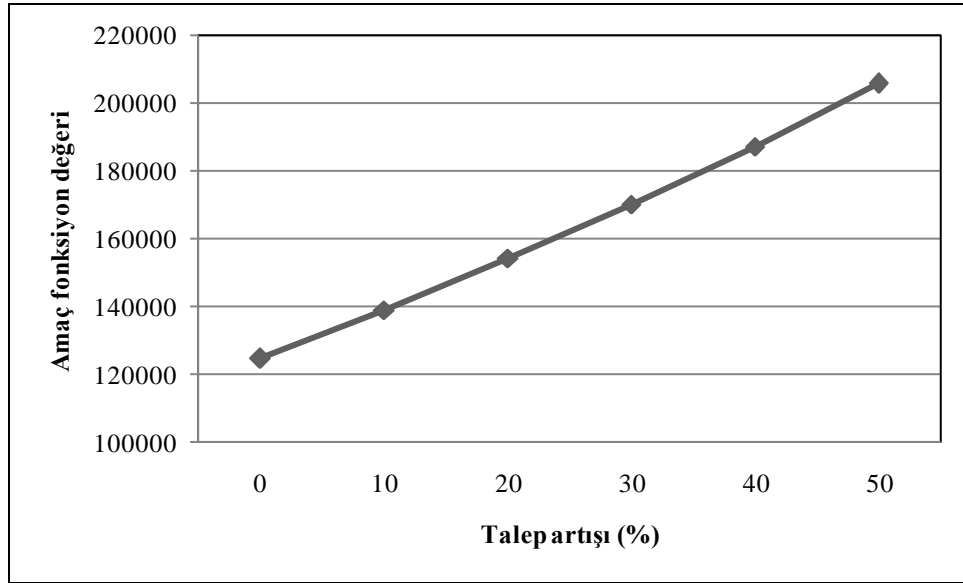
gerçekleştirilmiş ve denge link trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri elde edilmiştir. Her bir senaryo için elde edilen denge link trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6 Senaryolara göre denge link trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri

Link No	Talep artışı									
	%10		%20		%30		%40		%50	
	<i>x</i> (taşıt/sa)	<i>p</i> (%)	<i>x</i> (taşıt/sa)	<i>p</i> (%)	<i>x</i> (taşıt/sa)	<i>p</i> (%)	<i>x</i> (taşıt/sa)	<i>p</i> (%)	<i>x</i> (taşıt/sa)	<i>p</i> (%)
1	703	35	689	34	846	42	854	43	820	41
2	594	42	726	51	687	49	797	57	949	70
3	703	36	689	51	846	53	854	50	820	52
4	446	41	402	33	545	46	522	47	454	35
5	626	62	600	68	758	75	749	76	702	69
6	163	23	171	35	196	29	205	36	212	49
7	594	50	726	62	687	60	797	70	949	97
8	620	55	761	68	714	62	839	76	1003	88
9	231	94	252	96	274	102	290	116	312	110
10	628	65	776	71	721	75	850	85	1020	107
11	308	90	351	77	397	103	447	93	516	77
12	516	47	548	42	577	51	602	48	608	44
13	495	58	540	92	585	72	630	94	675	131
14	418	39	479	39	548	47	620	56	731	57
15	483	30	550	50	625	48	703	50	821	65
16	211	67	251	83	297	88	339	100	424	94
17	801	100	850	110	895	114	935	122	939	122
18	770	69	817	74	856	80	892	83	888	97
19	1207	90	1296	98	1379	104	1466	113	1510	119
20	1419	76	1548	90	1677	95	1806	98	1935	115
21	1010	82	1107	91	1190	97	1289	101	1384	114
22	1375	112	1500	119	1625	123	1750	132	1875	114
23	681	56	733	40	801	50	844	57	886	54

Tablodan görüldüğü gibi örnek ağda bazı linklerin trafik hacimleri B-V taleplerinin artması ile doğru orantılı olarak artmakta iken bazı linklerdeki trafik hacmi değerlerinin dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Bu durum B-V talebinin senaryolara bağlı olarak doğrusal olarak artırılması sonucunda bazı linklerdeki trafik hacminin oldukça artması ve doyumluk derecelerinin %100’ün üstüne çıkması neticesinde ağda sıkışıklığın

başlaması ve kullanıcıların rota tercihlerini değiştirmesi şeklinde açıklanabilir. Rota tercihlerinin değişmesi neticesinde birtakım linklerin trafik hacimleri B-V talebinin artırılmasına rağmen düşmektedir. Şekil 5.4’de senaryolara bağlı olarak amaç fonksiyonu değerinin değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modeli ile senaryolara bağlı olarak B-V taleplerinin doğrusal olarak artırılması neticesinde amaç fonksiyonu değeri de artmaktadır. B-V talebinin %50 artması durumunda amaç fonksiyonu değeri yaklaşık olarak %65 artış göstermektedir.



Şekil 5.4 Senaryolara göre amaç fonksiyonu değişimi

Tablo 5.1’ de verilen B-V taleplerine göre KAKOSKA-1 modeli ile çözülen ağda doyumluk derecesi %100’ün üzerinde olan link bulunmamasına karşın B-V talebinin %10 artması durumunda 17 ve 22 nolu linklerde doyumluk derecesi %100’ün üstüne çıkmaktadır. Senaryolar doğrultusunda talebin artırılmasına devam edilmesi durumunda doyumluk derecesi %100’ün üstüne çıkan link sayısı artmakta ve ağda sıkışıklık artmaktadır. Tablo 5.7’de senaryolara göre ağın çözümünden elde edilen optimum sinyal parametreleri verilmiştir. Talebin artması neticesinde optimum devre sürelerinde de beklendiği gibi artış olmaktadır. Talebin %50 artması durumunda %10 artması durumuna göre elde edilen optimum devre sürelerinde yaklaşık ortalama %28’lik bir artış görülmektedir. Devre sürelerindeki artış kavşaklarda meydana gelen gecikmelerin artmasına neden olmaktadır.

Tablo 5.7 Senaryolara göre en iyi sinyal parametreleri

Talep Artışı	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
%10	1	64	7	57	-
	2	60	37	23	-
	3	80	53	27	-
	4	64	11	28	25
	5	83	12	39	32
	6	76	50	26	-
%20	1	76	8	68	-
	2	74	32	42	-
	3	81	50	31	-
	4	78	18	39	21
	5	97	15	44	38
	6	60	39	21	-
%30	1	60	7	53	-
	2	92	46	46	-
	3	79	50	29	-
	4	62	12	27	23
	5	76	12	35	29
	6	60	38	22	-
%40	1	60	7	53	-
	2	78	42	36	-
	3	87	57	30	-
	4	79	19	36	24
	5	95	14	43	38
	6	95	60	35	-
%50	1	84	13	71	-
	2	94	46	48	-
	3	100	60	40	-
	4	90	30	39	21
	5	84	14	38	32
	6	85	46	39	-

KAKOSKA-1 modeli içinde üst seviye probleminin çözümünde kullanılan KKO algoritmasının koloni büyüklüğünün ve alt seviye probleminin çözümünde kullanılan AOYTAM'nde sürücü algılama hatalarını temsil eden varyans sabitinin algoritma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

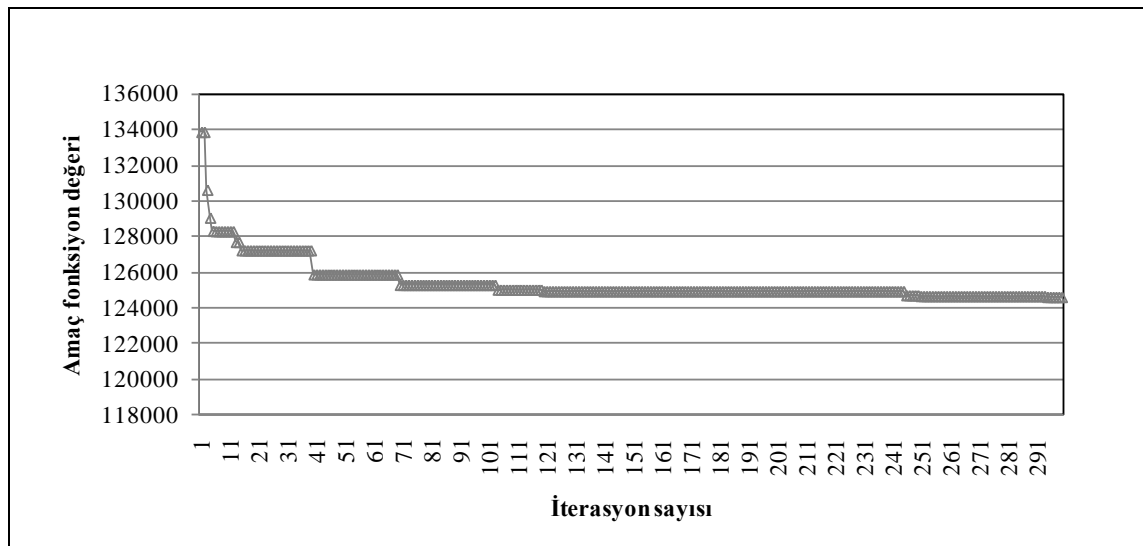
5.2.1 Koloni Büyüklüğünün KAKOSKA-1 Modeline Etkisi

Koloni büyüklüğünün (r), KAKOSKA-1 modeli üzerindeki etkisinin görülebilmesi için farklı koloni büyüklükleri için analizler yapılmıştır. Tablo 5.8’de farklı koloni büyüklükleri için elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir.

Tablo 5.8 Farklı koloni büyüklükleri için en iyi amaç fonksiyonu değerleri

Koloni büyüklüğü (r)	En iyi amaç fonksiyon değeri (sn)
10	124837
20	124653
30	124587
50	124528
100	124357

Tablo 5.8’de görüldüğü gibi koloni büyüklüğünün artması ile en iyi amaç fonksiyonu değerlerinde önemli ölçüde iyileşme olmamaktadır. Bu nedenle Allsop&Charlesworth ağının çözümünde kullanılan 14 adet karar değişkeni dikkate alındığında koloni büyüklüğü değeri olarak $r=30$ seçilmesi hem CPU süresinin kısa tutulması hem de yerel optimumlara takılma riskini azaltması açısından uygun görülmektedir (Bkz. Bölüm 3.4.1). Şekil 5.5’de KAKOSKA-1 modelinin koloni büyüklüğü $r=30$ değerine göre amaç fonksiyonu yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 5.5 $r=30$ değerine göre amaç fonksiyonu değişimi

Koloni büyüklüğünün değişmesi bulunan en iyi amaç fonksiyonu değerlerini önemli ölçüde etkilememektedir. Bu nedenle KAKOSKA-1 modelindeki karar değişkenlerinin

sayısına bağı olarak ve CPU süresini de dikkate alarak koloni büyüklüğünün seçilmesi uygun olabilmektedir. Farklı koloni büyüklüklerine bağı olarak elde edilen denge link trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri Tablo 5.9’da verilmiştir. Farklı koloni büyüklükleri kullanılarak yapılan analiz sonuçlarına göre link doyumluk dereceleri incelendiği zaman $r=10$ ve $r=20$ olması durumlarında 22 nolu linkte doyumluk derecesi %100’ün üstüne çıkmakta ve link sıkışıklık etkisi altında hizmet vermektedir. $r \geq 30$ olması durumunda ise ağıdaki tüm linklerde doyumluk derecesi %100’ün altına düşmekte ve ulaşım ağı sıkışıklık etkisi altında olmadan çalışmaktadır. Bu nedenle $r=30$ değeri KAKOSKA-1 modeli için en uygun değer olarak göze çarpmaktadır.

Tablo 5.9 Farklı koloni büyüklüklerine göre elde edilen denge link trafik hacimleri

Link No	Koloni büyüklüğü									
	$r=10$		$r=20$		$r=30$		$r=50$		$r=100$	
	x (taşı/sa)	p (%)	x (taşı/sa)	p (%)	x (taşı/sa)	p (%)	x (taşı/sa)	p (%)	x (taşı/sa)	p (%)
1	581	29	509	25	605	30	539	27	493	25
2	598	41	670	46	574	39	640	44	686	47
3	581	34	509	34	605	45	539	34	493	35
4	341	29	265	26	365	25	297	25	248	19
5	512	55	430	48	530	57	463	49	413	51
6	141	23	135	28	145	23	137	24	132	33
7	598	50	670	55	574	51	640	55	686	57
8	624	53	703	61	601	52	671	58	719	63
9	213	79	210	83	212	84	210	85	211	83
10	636	60	724	65	613	58	688	66	744	61
11	261	69	265	57	268	76	263	62	269	62
12	488	41	484	36	481	40	486	39	480	35
13	450	61	450	78	450	60	450	66	450	94
14	352	30	360	36	359	25	354	30	362	28
15	411	30	419	35	418	38	413	32	421	37
16	171	75	178	67	174	74	172	72	174	72
17	755	92	748	92	747	93	752	92	745	93
18	728	65	720	63	721	68	726	66	718	63
19	1118	81	1111	82	1115	81	1117	81	1115	82
20	1290	73	1290	67	1290	84	1290	76	1290	79
21	918	80	930	78	920	76	927	80	934	79
22	1250	103	1250	107	1250	93	1250	95	1250	95
23	619	42	614	36	616	33	617	39	607	34

Tablo 5.10’da farklı koloni büyüklüklerine göre elde edilen optimum sinyal parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.10 Farklı koloni büyüklüklerine göre elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Koloni büyüklüğü (r)	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
$r=10$	1	89	7	82	-
	2	99	53	46	-
	3	71	45	26	-
	4	69	13	33	23
	5	95	15	46	34
	6	62	41	21	-
$r=20$	1	98	9	89	-
	2	60	28	32	-
	3	83	57	26	-
	4	99	23	50	26
	5	67	10	32	25
	6	77	52	25	-
$r=30$	1	86	7	79	-
	2	76	32	44	-
	3	69	38	31	-
	4	62	11	30	21
	5	74	11	35	28
	6	80	50	30	-
$r=50$	1	85	7	78	-
	2	83	41	42	-
	3	64	39	25	-
	4	61	13	29	19
	5	83	12	40	31
	6	60	39	21	-
$r=100$	1	84	7	76	-
	2	82	36	46	-
	3	60	35	25	-
	4	60	13	34	13
	5	87	13	42	32
	6	72	48	24	-

5.2.2 Sürücü Algılama Hatalarının KAKOSKA-1 Modeline Etkisi

Bu bölümde KAKOSKA-1 modelinin alt seviyesinin oluşturan AOYTAM’nde sürücü algılama hatalarının karakterize edildiği varyans sabitinin algoritma performansı üzerindeki etkisinin araştırılması için analizler yapılmıştır. Farklı varyans sabiti

çözümleri sırasında koloni büyüklüğü değeri $r=30$ olarak alınmıştır. Tablo 5.11’de farklı varyans sabiti değerleri için elde edilen optimum devre süreleri ve en iyi amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir. En iyi amaç fonksiyonu değeri varyans sabitinin artması ile birlikte düşmeye başlamış ve $\beta=1$ değerinden sonra fonksiyon değerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Tablo 5.12’de elde edilen denge link trafik hacimleri verilmiştir.

Tablo 5.11 Farklı β değerleri için devre süresi ve en iyi amaç fonksiyon değerleri

β	Devre süresi (sn)						En iyi amaç fonksiyon değeri (sn)
	Kavşak No						
	1	2	3	4	5	6	
0.01	92	98	70	60	94	67	152892
0.1	87	75	60	96	66	73	136749
1	86	76	69	62	74	80	124587
10	100	91	71	60	97	85	122437
25	87	60	64	60	82	60	122431
50	90	60	60	80	95	66	122279

Tablo 5.12 Farklı β değerleri için denge link trafik hacimleri

β	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
0.01	534	645	534	737	456	107	645	334	108	726	405	344
0.1	588	591	588	537	476	120	591	490	151	692	321	428
1.0	605	574	605	365	530	145	574	601	212	613	268	481
10.0	523	656	523	273	460	142	656	686	220	686	251	498
25.0	566	613	566	316	501	144	613	643	220	643	250	500
50.0	713	466	713	464	642	151	466	495	220	495	250	500
β	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
0.01	450	646	412	656	496	727	633	1290	1697	1250	1546	
0.1	450	495	482	476	629	657	813	1290	1243	1250	1042	
1.0	450	359	418	174	747	721	1115	1290	920	1250	616	
10.0	450	259	319	45	816	820	1244	1290	900	1250	575	
25.0	450	250	310	40	820	829	1250	1290	900	1250	579	
50.0	450	250	310	40	820	830	1250	1290	900	1250	581	

Tablo 5.12’de görüldüğü gibi varyans sabitinin artması rota seçim davranışlarının stokastik prensiplerden uzaklaşıp deterministik seçime doğru gitmesi sonucunu doğurmaktadır. Ağdaki bazı linklerin trafik hacminin varyans sabitini artması ile büyük ölçüde azalması bu eğilimin bir göstergesidir. Tablo 5.13’de farklı varyans sabiti değerleri için link doyunluk dereceleri verilmiştir.

Tablo 5.13 Farklı β değerleri için link doyunluk dereceleri*

β	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
0.01	27	61	65	45	52	25	55	48	85	64	81	25
0.1	29	49	49	40	53	23	51	53	84	63	73	33
1.0	30	39	45	25	57	23	51	52	84	58	76	40
10.0	26	44	30	36	53	27	53	58	90	60	63	39
25.0	28	42	34	29	52	25	50	54	88	63	58	41
50.0	36	32	41	38	55	16	38	41	88	64	91	57
β	p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}	p_{19}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	
0.01	88	39	62	67	98	65	64	95	84	97	65	
0.1	73	37	50	68	94	60	71	79	78	97	52	
1.0	60	25	38	74	93	68	81	84	76	93	33	
10.0	72	34	23	22	97	71	89	61	78	98	39	
25.0	65	23	23	17	96	71	91	70	80	99	37	
50.0	40	20	22	18	95	72	90	75	81	95	40	

*Doyunluk dereceleri % cinsinden verilmiştir.

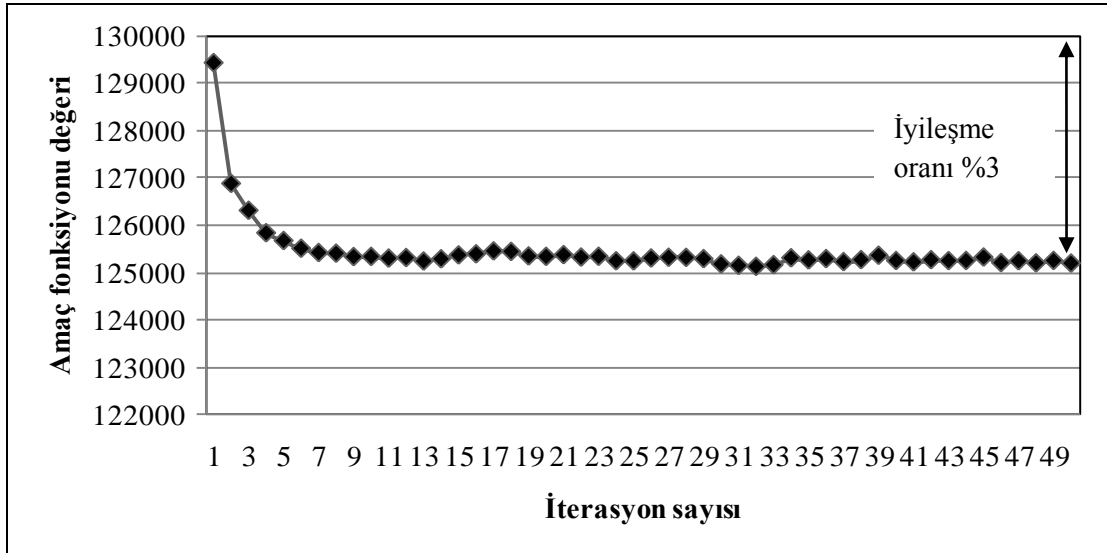
Varyans sabitinin artması ile birlikte sürücülerin rota seçim davranışlarının değişmesinden dolayı Tablo 5.13’de görüldüğü gibi linklerin doyunluk derecelerinde değişiklikler olmaktadır. Sonuç olarak varyans sabiti değerinin artması sürücülerin seçim davranışlarını değiştirmekte fakat tüm farklı β değerleri için ulaşım ağı dengeye gelmekte ve sıkışıklık etkisine maruz kalmadan hizmet verebilmektedir. Tablodan görüldüğü farklı β değerleri için ulaşım ağındaki tüm linklerin doyunluk dereceleri %100’ün altındadır. Tablo 5.14’de farklı β değerleri için elde edilen optimum sinyal parametreleri değerleri verilmiştir.

Tablo 5.14 Farklı β değerleri için en iyi sinyal parametreleri

β	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
0.01	1	92	31	61	-
	2	98	25	73	-
	3	70	34	36	-
	4	60	15	31	14
	5	94	7	28	59
	6	67	44	23	-
0.1	1	87	21	66	-
	2	75	28	47	-
	3	60	35	25	-
	4	96	21	48	27
	5	66	7	26	33
	6	73	47	26	-
1	1	86	7	79	-
	2	76	32	44	-
	3	69	38	31	-
	4	62	11	30	21
	5	74	11	35	28
	6	80	50	30	-
10	1	100	7	93	-
	2	91	49	42	-
	3	71	54	17	-
	4	60	12	31	17
	5	97	14	48	35
	6	85	58	27	-
25	1	87	7	80	-
	2	60	31	29	-
	3	64	42	22	-
	4	60	13	28	19
	5	82	12	41	29
	6	60	41	19	-
50	1	90	7	83	-
	2	60	33	27	-
	3	60	37	23	-
	4	80	11	28	41
	5	95	14	48	33
	6	66	45	21	-

5.3. KAKOSKA-2 Modeli Sayısal Uygulama

KAKOSKA-2 modeli ile Allsop&Charlesworth ulaşım ağının çözümü sonucu elde edilen amaç fonksiyonu yakınsama grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 KAKOSKA-2 yakınsama grafiği

UAT probleminin çözümü için KAKOSKA-2 modelinin çalıştırılması neticesinde 50 iterasyon sonunda en iyi amaç fonksiyonu değeri 125216 olarak bulunmuştur. Başlangıç amaç fonksiyonu değerine göre %3'lük bir iyileşme sağlanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi 40 iterasyondan sonra KİY yaklaşımı altında sistem dengeye gelmekte ve sistem optimumu sağlanmaktadır. KAKOSKA-2 modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması sonucunda elde edilen optimum sinyal süreleri Tablo 5.15'de verilmiştir. Denge link akımları ve linklere ait doyumluk dereceleri Tablo 5.16'da verilmiştir

Tablo 5.15 KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Amaç fonksiyon değeri (sn)	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
125216	1	89	8	81	-
	2	100	50	50	-
	3	74	47	27	-
	4	81	17	41	23
	5	100	14	50	36
	6	91	58	33	-

Tablo 5.16 KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doygunluk dereceleri

Denge link trafik hacimleri (\mathbf{x})											
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
560	619	560	321	483	139	619	648	210	667	272	477
Doygunluk derecesi* (\mathbf{p})											
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
28	43	35	27	54	26	54	56	95	60	65	37
Denge link trafik hacimleri (\mathbf{x})											
x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
450	370	430	183	737	709	1106	1290	929	1250	614	
Doygunluk derecesi (\mathbf{p})											
p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}	p_{19}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	
72	32	33	70	87	65	81	73	81	96	39	

*% cinsinden verilmiştir

Tablo 5.15’de görüldüğü gibi KAKOSKA-2 modeli ile yapılan UAT çözümünde KAKOSKA-1 modeline göre optimum devre sürelerinde artış söz konusu olmaktadır. Her iki yöntem kullanılarak elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değerleri arasında önemli bir fark gözlemlenmemesine karşılık KAKOSKA-2 modeli ile yapılan çözümde ağdaki devre sürelerinde ortalama %17’lik bir artış olmaktadır. Devre sürelerindeki artış ağdaki taşıt gecikmelerinin artmasına neden olabilmektedir. Tablo 5.16’ya bakıldığında zaman KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen doygunluk derecelerinin %100’ün altında olduğu ve ağın sıkışıklık etkisi altında olmadan hizmet verdiği görülebilir.

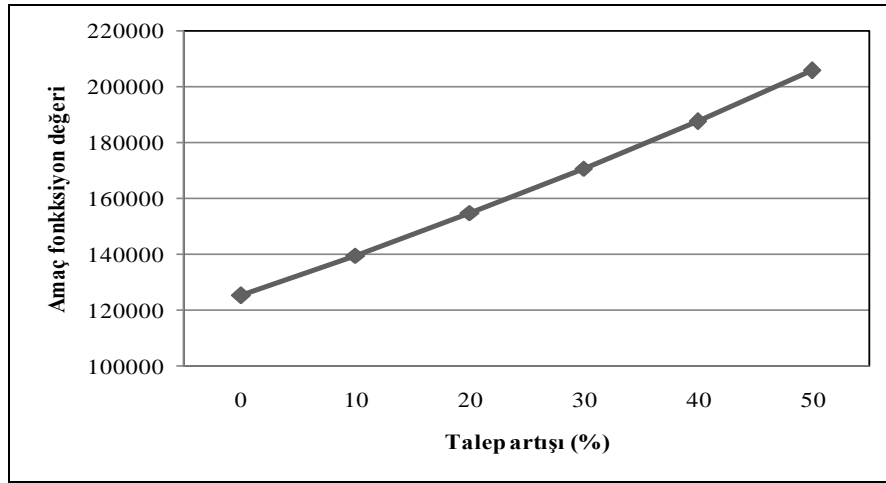
Allsop&Charlesworth ulaşım ağındaki B-V taleplerinin artması durumunda ağın performansının değişiminin incelenmesi için KAKOSKA-2 modeli ile analizler yapılmıştır. B-V taleplerinin %10,%20,%30,%40 ve %50 artması senaryoları için ağın KAKOSKA-2 modeli ile çözümleri gerçekleştirilmiş ve denge link trafik hacimleri ve doygunluk dereceleri elde edilmiştir. Her bir senaryo için elde edilen denge link trafik hacimleri ve doygunluk dereceleri Tablo 5.17’de verilmiştir.

Tablo 5.17 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen denge link trafik hacimleri ve doaygunluk dereceleri

Link No	Talep artışı (%)									
	10		20		30		40		50	
	x (taşıt/sa)	p (%)	x (taşıt/sa)	p (%)	x (taşıt/sa)	p (%)	x (taşıt/sa)	p (%)	x (taşıt/sa)	p (%)
1	622	31	698	35	791	40	866	43	951	48
2	675	47	717	51	742	53	785	57	818	61
3	622	35	698	42	791	45	866	53	951	59
4	358	27	412	33	485	51	537	52	601	40
5	536	54	605	75	691	68	756	77	830	78
6	154	26	171	39	190	39	206	39	224	40
7	675	58	717	61	742	64	785	73	818	76
8	708	63	752	69	778	69	826	76	862	82
9	230	99	250	113	270	93	287	101	306	138
10	728	73	771	63	795	83	843	84	879	98
11	316	70	365	87	418	70	473	91	538	93
12	508	42	534	39	556	42	576	45	586	47
13	495	69	540	103	585	100	630	100	675	101
14	434	32	507	40	587	61	670	65	770	52
15	499	35	578	43	664	46	753	57	859	66
16	222	77	268	79	324	96	382	107	460	95
17	786	98	826	106	857	115	887	123	898	121
18	754	69	789	71	817	74	842	83	850	83
19	1196	89	1279	97	1352	102	1423	110	1474	118
20	1419	87	1548	93	1677	86	1806	95	1935	129
21	1021	81	1112	87	1203	96	1297	103	1391	103
22	1375	107	1500	122	1625	127	1750	122	1875	130
23	669	46	724	47	783	54	839	54	900	57

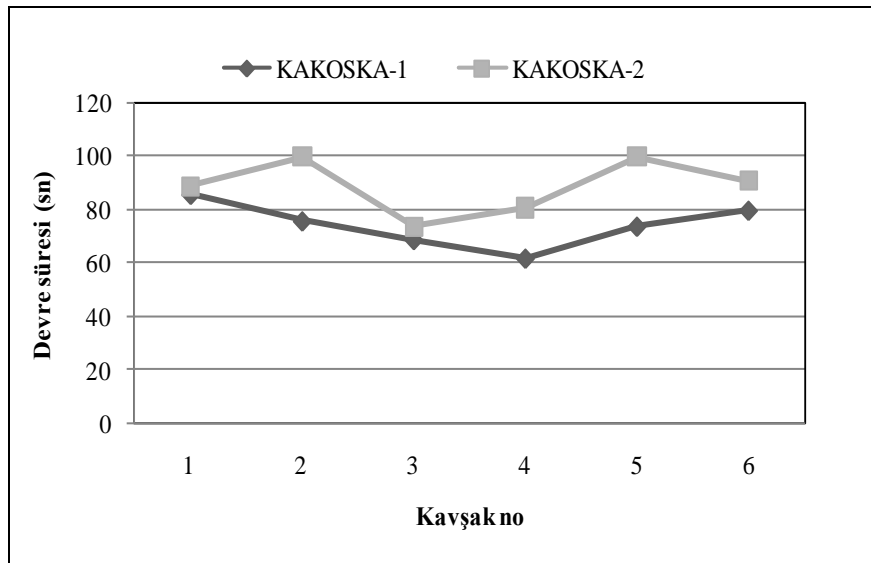
Tablodan görüldüğü gibi örnek ulaşım ağındaki tüm linklerin trafik hacimleri KAKOSKA-1 modeli çözümlerinden farklı olarak B-V taleplerinin artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. KAKOSKA-2 modeli ile UAT tasarımında alt seviye ve üst seviye problemlerinin çözümleri birbirinden ayrı ve iteratif olarak yapıldığı için alt seviye probleminin çözümü ile elde edilen ağıdaki tüm denge link trafik hacimlerinde senaryolara bağlı olarak talep artışı nedeniyle sürekli bir artış söz konusu olmaktadır. KAKOSKA-1 modeli ile UAT çözümünde ise alt seviye problemi üst seviye probleminin içinde çözülmekte ve talep artışına rağmen bazı linklerin denge trafik hacimlerinde dalgalanmalar görülebilmektedir.

Tablo 5.1’ de verilen B-V taleplerine göre KAKOSKA-2 modeli ile çözülen ağda doyguluk derecesi %100’ün üzerinde olan link bulunmamasına karşın B-V talebinin %10 artması durumunda 22 nolu linkte, %20 artması durumunda ise 9,13,17 ve 22 nolu linklerde doyguluk derecesi %100’ün üstüne çıkmaktadır. Senaryolar doğrultusunda talebin artırılmasına devam edilmesi durumunda doyguluk derecesi %100’ün üstüne çıkan link sayısı artmakta ve ağda sıkışıklık artmaktadır. Şekil 5.7’de KAKOSKA-2 modeli ile senaryolara bağlı olarak elde edilen en iyi amaç fonksiyon değerleri verilmiştir.



Şekil 5.7 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli amaç fonksiyon değerleri

KAKOSKA-2 modeli ile yapılan UAT çözümünde de KAKOSKA-1 modelinde olduğu gibi talep artışı ile birlikte amaç fonksiyonu değeri artmaktadır. Şekil 5.8’de her iki model ile UAT çözümünden elde edilen devre süreleri görülmektedir.



Şekil 5.8 KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri ile elde edilen devre süreleri

KAKOSKA-2 modeli ile yapılan çözümde KAKOSKA-1 modeli çözümüne göre optimum devre sürelerinde %17'lik bir artış söz konusu olmaktadır. Tablo 5.18'de senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen optimum sinyal parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.18 Senaryolara göre KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Talep Artışı	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
%10	1	70	7	63	-
	2	71	39	32	-
	3	100	58	42	-
	4	71	16	32	23
	5	66	9	31	26
	6	81	52	29	-
%20	1	60	7	53	-
	2	60	31	29	-
	3	84	50	34	-
	4	67	14	37	16
	5	100	14	46	40
	6	73	48	25	-
%30	1	60	7	53	-
	2	60	33	27	-
	3	60	42	18	-
	4	60	18	26	16
	5	100	17	44	39
	6	79	51	28	-
%40	1	73	10	63	-
	2	88	45	43	-
	3	75	51	24	-
	4	77	20	35	22
	5	66	11	29	26
	6	100	60	40	-
%50	1	60	10	50	-
	2	100	51	49	-
	3	73	39	34	-
	4	76	22	31	23
	5	92	12	41	39
	6	100	60	40	-

KAKOSKA-2 modeli ile en iyi amaç fonksiyonu değeri 125216 sn olarak bulunurken KAKOSKA-1 modeli ile bu değer 124587 sn olarak bulunmuştur. Her iki çözüm sonucu elde edilen en iyi amaç fonksiyonları değerleri arasında önemli bir fark

gözlemlenmemesine rağmen KAKOSKA-1 modeli ile yapılan çözümde optimum devre sürelerinde azalma sağlanması nedeniyle sıkışıklık fiyatlandırması modelinin uygulanabilmesi için KAKOSKA-1 modeli seçilmiştir.

5.4 Sıkışıklık Fiyatlandırması Modeli

Sıkışıklık fiyatlandırmasının modellenebilmesi için bu çalışmada farklı bir metot önerilmiştir. Link maliyet fonksiyonuna linklere ait sıkışıklık fiyatlarının adapte edilebilmesi için Denklem (5.1)'de verilen formülasyon geliştirilmiştir.

$$t_a^* = t_a \left(1 + \frac{\phi_a}{\phi_{\max}}\right) \quad (5.1)$$

Burada t_a^* , fiyatlandırma yapılması durumunda a linkinin fiyatlandırılmış maliyeti (sn); t_a , a linkinin maliyeti (sn); ϕ_a , a linkinin birim ücreti ve ϕ_{\max} ulaşım ağında uygulanan maksimum birim ücrettir. Denklem (5.1)'de görüldüğü gibi ulaşım ağındaki herhangi bir linkin maliyeti linkin fiyatlandırılma derecesine bağlı olarak ölçülebilen maliyetinin en fazla 2 katı kadar olabilmektedir. Denklem (5.1)'in kullanılması ile sıkışıklık fiyatlandırması uygulanan linklerdeki maliyetler fiyatlandırmaya bağlı olarak belli oranlarda artırılmakta ve ulaşım ağını kullanan sürücülerin link maliyetlerindeki artış sebebiyle daha düşük maliyetli rotaları seçme yönünde seçim davranışlarını değiştirmesi amaçlanmaktadır. Denklem (5.1)'de verilen sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonunun KAKOSKA-1 modeline adapte edilebilmesi için linklere ait fiyatlandırmalar karar değişkenleri olarak KKO algoritmasının içine dahil edilmiştir.

Bu durumda sinyal kontrol parametreleri, $\psi=(\mathbf{c},\mathbf{g})$, ve link ücretleri vektörü, Φ , KKO algoritması içinde karınca vektörü \mathbf{m} olarak nitelendirilmiştir. r koloni büyüklüğü ve \mathbf{m} ile ifade edilen karınca vektöründen oluşan \mathbf{M} çözüm matrisi başlangıçta verilen kısıtlar çerçevesinde rastgele doldurulur. Tablo 5.19'da KAKOSKA-1 modelinde sinyal

parametreleri ve link ücretlerinin karar değişkenleri olarak kodlanması ve ÇU aralıkları verilmiştir.

Tablo 5.19 Sıkışıklık fiyatlandırması karar değişkenleri

	Devre süresi (sn) $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_k)$	Faz yeşil süreleri (sn) $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_n)$	Link ücretleri* $\mathbf{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_f)$	Toplam KD
ÇU	60-100	7-60	0-10	
β	$\beta = [100, 100, \dots, 100]$	$\beta = [60, 60, \dots, 60]$	$\beta = [10, 10, \dots, 10]$	
KD	6	8	23	37

*Burada f link sayısıdır.

Tablodan görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modeli ile sıkışıklık fiyatlandırması yapılacak olan Allsop&Charlesworth örnek ulaşım ağında maksimum link birim ücreti 10 olarak seçilmiştir. Geliştirilen sıkışıklık fiyatlandırması modeline göre ulaşım ağında tüm linklerin ya da linklerden bazılarının fiyatlandırılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Verilen maksimum ve minimum link ücretleri dikkate alınarak Denklem (5.2)'de verilen amaç fonksiyonunun en küçük değerinin bulunması sağlanarak sıkışıklık fiyatlandırması yapılması durumunda sistem optimumun sağlanması amaçlanmaktadır.

$$f_k^w \geq 0, k \in K_w, w \in \mathbf{W}$$

$$\sum_{k \in K_w} f_k^w = q_w, w \in \mathbf{W}$$

$$g_{\min} < g < g_{\max}, g \in \mathbf{G}$$

$$c_{\min} < c < c_{\max}, c \in \mathbf{C}$$

$$\phi_{\min} < \phi < \phi_{\max}, \phi \in \mathbf{\Phi}$$

Kısıtlarına bağlı olarak;

$$\min z(x) = \sum_a x_a t_a^*(x_a) \quad (5.2)$$

Burada x_a , a linki üzerindeki denge link akımı (taşıtl/sa); t_a^* , a linkinin fiyatlandırılmış link maliyeti (sn); f_k^w , w B-V çiftindeki k rotasındaki akım (taşıtl/sa), q_w , w B-V akımı (taşıtl/sa), g faz yeşil süresi (sn), c ise devre süresi (sn) ve ϕ link sıkışıklık birim fiyatı olarak verilmiştir. Sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonunun adapte edildiği KAKOSKA-1 modelinin adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 0: Başlangıç $t=1$. Kullanıcıya özel KKO parametrelerini (r , β , α) gir. ψ sinyal parametrelerini ve Φ link ücretlerini \mathbf{m} karınca vektörü olarak kodla.

Adım 1: $t=1$ ise \mathbf{M} olarak gösterilen çözüm matrisini verilen maksimum ve minimum sınırlar içinde rastgele doldur. $t > 1$ ise Adım 9'da elde edilen en iyi ψ sinyal parametreleri, Φ link ücretleri ve β vektörüne bağlı olarak çözüm kümesini kısıtla ve kısıtlı çözüm kümesini kullanarak \mathbf{M} çözüm matrisini rastgele doldur.

Adım 2: Denklem (5.1) kullanılarak t_a^* fiyatlandırılmış link maliyetlerini ve AOYTAM ile denge link trafik hacimlerini hesapla.

Adım 3: Denge link akımlarını ve Adım 1'de bulunan sinyal parametreleri ve link ücretlerini kullanarak her bir \mathbf{m} karınca vektörü için amaç fonksiyonu değerini hesapla ve eski karınca kolonisi çözüm matrisini (\mathbf{M}_{eski}) oluştur.

Adım 4: Feromon miktarının buharlaştırılması işlemini gerçekleştir.

Adım 5: En iyi amaç fonksiyonu etrafında feromon güncellenmesi yap.

Adım 6: Arama yönünü belirle ve α sıçrama uzunluğu matrisini rastgele üret.

Adım 7: Yeni ψ sinyal parametrelerini ve Φ link ücretlerini hesapla ve yeni karınca kolonisi matrisini (\mathbf{M}_{yeni}) oluştur.

Adım 8: Yeni karınca kolonisi matrisi ve denge link akımlarını kullanarak yeni amaç fonksiyonu değerlerini hesapla.

Adım 9: Adım 3 ve 8’de elde edilen eski ve yeni karınca kolonisine ait en iyi amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştır ve en iyi amaç fonksiyonu değerini veren ψ sinyal parametrelerini ve Φ link ücretlerini belirle.

Adım 10: Durma kriterinin kontrolü. Eğer sağlanmışsa optimum ψ sinyal parametreleri ve Φ link ücretleri elde edilir aksi takdirde Adım 1’e git ve $t=t+1$ yap.

Algoritma adımlarından görüldüğü gibi KAKOSKA-1 modeli eş zamanlı olarak sinyal parametreleri ve link ücretlerinin en iyi değerlerini Tablo 5.19’da verilen karar değişkenlerini kullanarak hesaplayabilmektedir. Sıkışıklık fiyatlandırması modelinin örnek ulaşım ağındaki etkilerinin ve elde edilen sonuçların incelenebilmesi için talep artışı senaryoları uygulanmıştır. B-V taleplerinin %10 artması durumu için KAKOSKA-1 modelinin sonuçları Tablo 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.20 B-V talebinin %10 artması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen denge link trafik hacimleri ve doygunluk dereceleri

Denge link trafik hacimleri (\mathbf{x})											
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
759	538	759	490	662	95	538	583	223	660	464	360
Doygunluk derecesi* (\mathbf{p})											
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
38	43	42	38	68	19	50	56	69	65	84	27
Denge link trafik hacimleri (\mathbf{x})											
x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
495	692	758	443	542	495	975	1419	1085	1375	626	
Doygunluk derecesi* (\mathbf{p})											
p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}	p_{19}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	
85	54	52	69	84	49	83	84	78	94	44	

*% cinsinden verilmiştir.

B-V talebinin %10 artması senaryosu göz önüne alındığında sıkışıklık fiyatlandırması yapılması halinde link doyumluk derecelerinin tamamı %100'ün altında bulunmuştur. Sıkışıklık fiyatlandırması yapılmadan %10'luk talep artışı senaryosuna bakıldığı zaman 17 ve 22 nolu linklerde doyumluk derecesi %100'ün üstüne çıkmakta ve sıkışıklık başlamaktadır. Tablo 5.20'de görüldüğü gibi sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması durumunda 17 ve 22 nolu linklerde doyumluk derecesi %100'ün altına düşmektedir. Bu nedenle sıkışıklık fiyatlandırması modelinin %10'luk talep artışında ağı yönetmede ve link fiyatlandırmaları sayesinde sürücülerin rota seçim davranışlarını etkilemede başarılı olduğu söylenebilir. Tablo 5.21'de %10 talep artışı senaryosu için sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen link ücretlendirmeleri verilmiştir.

Tablo 5.21 B-V talebinin %10 artması durumunda en iyi link ücretlendirmeleri

Optimum link ücretlendirmeleri (Φ)											
ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9	ϕ_{10}	ϕ_{11}	ϕ_{12}
2.6	2.1	6.6	0	3.4	8.9	5.8	4.6	2.8	9.5	10	2.8
ϕ_{13}	ϕ_{14}	ϕ_{15}	ϕ_{16}	ϕ_{17}	ϕ_{18}	ϕ_{19}	ϕ_{20}	ϕ_{21}	ϕ_{22}	ϕ_{23}	
4.2	7.6	0.7	0	7.2	7.6	6.8	7.8	0.6	7.7	5.1	

Tablodan görüldüğü gibi 4 ve 16 nolu linklerde sıkışıklık fiyatlandırması yapılmasına ihtiyaç olmamaktadır. Buna karşılık 11 no'lu linkte maksimum fiyatlandırma olan 10 değeri optimum sıkışıklık birim ücreti olarak bulunmuştur. B-V talebinin %10 artması durumunda yapılan sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen optimum sinyal parametreleri Tablo 5.22'de verilmiştir. Denklem (5.2)'de verilen amaç fonksiyonu değeri KAKOSKA-1 modeli ile yapılan çözümde 201748 sn olarak bulunmuştur. Ayrıca 1 ve 3 nolu kavşaklarda maksimum devre süresi olarak verilen 100 sn değeri optimum devre süresi olarak elde edilmiştir. Tablo 5.23a ve 5.23b'de senaryolara bağlı olarak sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen denge link trafik hacimleri ve linklere ait doyumluk dereceleri verilmiştir.

Tablo 5.22 B-V talebinin %10 artması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Amaç fonksiyon değeri (sn)	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
201748	1	100	22	78	-
	2	86	48	38	-
	3	100	60	40	-
	4	72	20	33	19
	5	74	14	28	32
	6	74	44	30	-

Tablo 5.23a Sıkışıklık fiyatlandırması ile elde edilen denge link trafik hacimleri

Talep artışı (%)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
10	759	538	759	490	662	95	538	583	223	660	464	360
20	708	707	708	422	643	144	707	736	257	759	378	521
30	618	915	618	295	519	171	915	969	269	985	578	396
40	946	705	946	602	830	217	705	755	293	757	460	589
50	1030	739	1030	686	891	259	739	767	315	784	690	434

Talep artışı (%)	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}
10	495	692	758	443	542	495	975	1419	1085	1375	626
20	539	537	609	258	815	758	1289	1548	1109	1500	682
30	584	919	997	515	605	484	1161	1677	1203	1625	625
40	630	630	714	357	910	881	1448	1806	1276	1750	838
50	675	1021	1111	764	630	598	1170	1935	1381	1875	959

Tablo 5.23b'de görüldüğü gibi sıkışıklık fiyatlandırması yapılması halinde senaryolara bağlı olarak talep arttıkça ağdaki bazı linklerde sıkışıklık fiyatlandırması uygulamasına rağmen doygunluk derecesinin %100'ün üzerinde çıktığı ve ağın sıkışıklık etkisi altında hizmet verdiği söylenebilir. Bu durum ağın kapasitesinin oldukça üstünde yükleme yapılması ve sonuç olarak bazı linklerin kapasite üstü çalışması olarak açıklanabilir.

Tablo 5.23b Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen link doygunluk dereceleri (%)

Talep artışı (%)	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
10	38	43	42	38	68	19	50	56	69	65	84	27
20	35	50	43	37	69	33	62	63	87	71	67	38
30	31	71	31	19	62	46	83	91	91	85	110	28
40	47	49	56	47	79	32	62	66	105	83	104	52
50	52	62	54	42	83	40	68	79	103	89	139	37

Talep artışı (%)	p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}	p_{19}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{23}
10	85	54	52	69	84	49	83	84	78	94	44
20	105	47	46	81	106	70	96	86	93	114	44
30	131	60	62	90	89	47	96	114	91	119	52
40	78	49	52	113	119	82	108	108	104	133	55
50	88	63	71	110	107	58	104	144	94	132	75

Tablo 5.24’de senaryolara bağlı olarak sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen optimum link fiyatlandırmaları verilmiştir.

Tablo 5.24 Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi link fiyatlandırmaları

Talep artışı (%)	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9	ϕ_{10}	ϕ_{11}	ϕ_{12}
10	2.6	2.1	6.6	0	3.4	8.9	5.8	4.6	2.8	9.5	10	2.8
20	3.9	7.1	10	3.8	4.8	10	5	10	9.9	8.1	7.7	2.8
30	7.6	9.4	10	1.8	7	7.7	4.1	5.4	9.6	1.1	9.7	0.9
40	6.2	4.3	8.2	10	7.8	4.7	9.6	10	9.4	10	9.5	7.1
50	9.5	2.1	5.7	5.1	8.1	2.0	1	10	7.2	6.5	4.1	0

Talep artışı (%)	ϕ_{13}	ϕ_{14}	ϕ_{15}	ϕ_{16}	ϕ_{17}	ϕ_{18}	ϕ_{19}	ϕ_{20}	ϕ_{21}	ϕ_{22}	ϕ_{23}
10	4.2	7.6	0.7	0	7.2	7.6	6.8	7.8	0.6	7.7	5.1
20	1.5	7.7	1.6	9.7	2.5	8.7	10	8.4	6.4	3.3	5.2
30	0.7	6.6	1.5	9.6	10	9.7	10	1.8	6.2	7.0	10
40	6.8	8.8	9.4	0.5	6.8	8.1	9.6	7.7	3.9	3.2	10
50	10	4.4	4.4	2.5	9	6.7	10	4.9	7.6	6.2	2.5

Tablo 5.25’de senaryolara bağı olarak sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu elde edilen optimum sinyal parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.25 Senaryolara göre sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen en iyi sinyal parametreleri

Talep Artışı	Kavşak Numarası	Devre Süresi c (sn)	Faz 1 (sn)	Faz 2 (sn)	Faz 3 (sn)
%10	1	100	22	78	-
	2	86	48	38	-
	3	100	60	40	-
	4	72	20	33	19
	5	74	14	28	32
	6	74	44	30	-
%20	1	64	7	57	-
	2	72	37	35	-
	3	89	57	32	-
	4	60	17	29	14
	5	86	15	39	32
	6	82	52	30	-
%30	1	76	15	61	-
	2	74	46	28	-
	3	82	43	39	-
	4	99	26	53	20
	5	75	13	31	31
	6	95	58	37	-
%40	1	92	10	82	-
	2	78	41	37	-
	3	75	45	30	-
	4	63	14	26	23
	5	91	15	41	35
	6	74	47	27	-
%50	1	100	25	75	-
	2	100	60	40	-
	3	96	47	49	-
	4	97	24	39	34
	5	72	13	26	33
	6	99	60	39	-

Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen optimum link ücretlendirmeleri ve denge link trafik hacimlerine bağı olarak ağ kullanıcılarının elde ettiği gelir Denklem (5.3)’de verilen formülasyon ile bulunmuştur.

$$G = \sum_a \phi_a * x_a \quad \forall a \in A \quad (5.3)$$

Burada ϕ_a , a linkine ait birim ücretlendirme, x_a , a linkinin denge trafik hacmi (taşıt/sa), G ise sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu ağda elde edilen toplam gelir olarak ifade edilmiştir. Denklem (5.3) ile elde edilen gelir senaryolara bağlı olarak Tablo 5.26'da verilmiştir.

Tablo 5.26 Sıkışıklık fiyatlandırması sonucu elde edilen gelir

Talep artışı (%)	G
10	77101
20	103482
30	106939
40	140193
50	127262

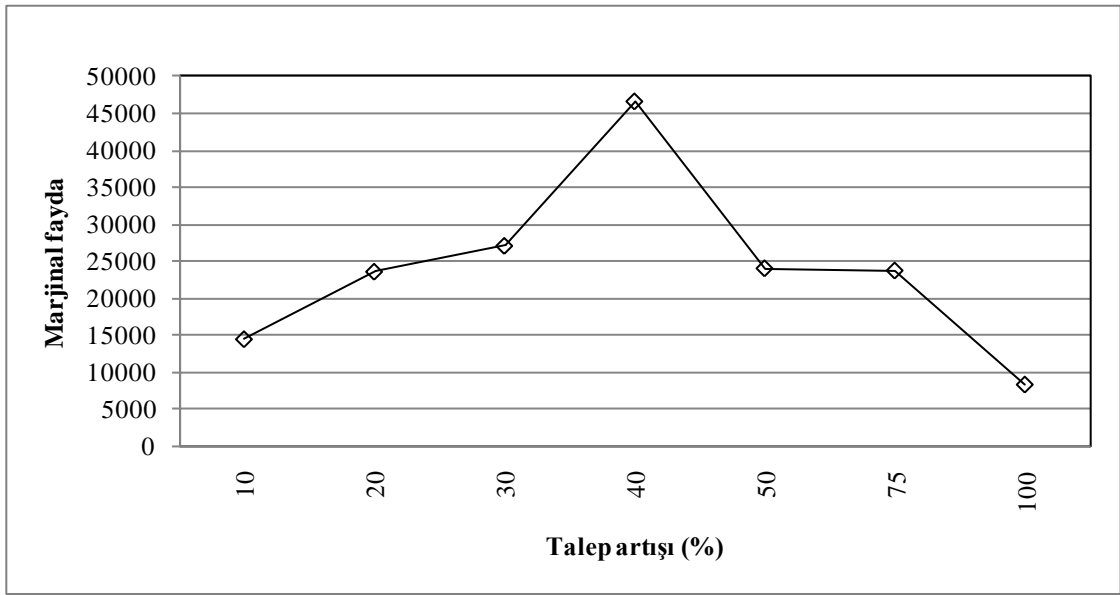
Tablo 5.26'da görüldüğü gibi talep artışı senaryolarına bağlı olarak sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu ağdan elde edilen toplam gelir artmakta fakat talep artışı %50 olması durumunda ağdaki toplam gelir bir miktar düşmektedir. Mevcut talebin en fazla %100 artması ve ağda sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması yapılması ve yapılmaması durumlarına göre elde edilen maliyetler Tablo 5.27'de verilmiştir.

Tablo 5.27 Senaryolara bağlı olarak ağ maliyetleri

Talep artışı (%)	Sistem maliyeti (sm)	Fiyatlandırılmış sistem maliyeti (fsm)	Gelir (G)	Net fiyatlandırılmış maliyet (fsm-G)	Marjinal fayda mf=(sm-fsm+G)
10	139085	201748	77101	124647	14438
20	154151	234053	103482	130571	23580
30	170218	250076	106939	143137	27081
40	187133	280668	140193	140475	46658
50	205713	308932	127262	181670	24043
75	256639	383719	150824	232895	23744
100	320863	486810	174242	312568	8295

Şekil 5.9'da senaryolara bağlı olarak marjinal faydaların değişimi verilmiştir. %40'luk talep artışı senaryosuna kadar artan taleple birlikte marjinal faydalar artmakta iken %50 talep artışı senaryosuna göre ise marjinal faydalarda düşüş görülmektedir. %40'luk talep artışından sonra Tablo 5.26'da görüldüğü gibi ağdan elde edilen gelirden

düşme olmaktadır. Ağ kullanıcıları yüksek fiyatlı linkleri tercih etmemeye başlamakta ve sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu seçim tercihlerini daha düşük fiyatlı linklere yöneltmektedirler. Ağdan elde edilen gelirin düşmesiyle Tablo 5.27’de verilen net fiyatlandırılmış maliyet artmakta ve marjinal faydalarda düşme olmaktadır. Sonuç olarak %40 dan fazla talep artışı durumunda sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması ağdan elde edilen gelirin düşmesi ve buna bağlı olarak marjinal faydaların azalması sonucu etkili olamamaktadır.



Şekil 5.9 Sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu marjinal faydaların değişimi

5.5. Sonuçlar

Bu bölümde önerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin sayısal uygulamaları verilmiştir. İlk olarak KAKOSKA-1 modeli ile literatürde sıkça kullanılan Allsop&Charlesworth ulaşım ağı üzerinde sayısal uygulamalar yapılmıştır. KAKOSKA-1 modelinin örnek ulaşım ağına uygulanması sonucunda en iyi amaç fonksiyonu değeri 124587 sn olarak elde edilmiştir. Denge link trafik hacimleri, link doygunluk dereceleri ve optimum sinyal parametreleri elde edilmiştir. Örnek ulaşım ağının talep artışlarına karşı gösterdiği tepkiler incelenmiş ve analiz edilmiştir. Verilen B-V taleplerine göre KAKOSKA-1 modeli ile çözülen ağda doygunluk derecesi %100’ün üzerinde olan link bulunmamasına karşın B-V talebinin %10 artması durumunda 17 ve 22 nolu linklerde doygunluk derecesi %100’ün üstüne çıkmaktadır.

Senaryolar doğrultusunda talebin artırılmasına devam edilmesi durumunda doyunluk derecesi %100'ün üstüne çıkan link sayısı artmakta ve ağda sıkışıklık artmaktadır.

KAKOSKA-1 modelinde kullanılan KKO algoritmasının koloni büyüklüğünün değişimine karşı gösterdiği tepkiler analiz edilmiştir. Koloni büyüklüğünün artması ile en iyi amaç fonksiyonu değerlerinde önemli ölçüde iyileşme olmamaktadır. Bu nedenle örnek ulaşım ağının çözümünde kullanılan 14 adet karar değişkeni dikkate alındığında koloni büyüklüğü değeri olarak $r=30$ seçilmesi hem CPU süresi açısından hem de yerel optimumlara takılma riskinin azaltılması açısından uygun görülmektedir. AOYTAM'nde kullanılan sürücü algılama hatalarını temsil eden varyans sabitinin değişimine karşı algoritmanın tepkisi araştırılmış ve değişken varyans sabiti değerlerine göre elde edilen denge link trafik hacimleri, link doyunluk dereceleri ve optimum sinyal parametreleri karşılaştırılmıştır. En iyi amaç fonksiyonu değeri varyans sabitinin artması ile birlikte düşmeye başlamış ve $\beta=1$ değerinden sonra fonksiyon değerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Varyans sabitinin artması rota seçim davranışlarının stokastik prensiplerden uzaklaşıp deterministik seçime doğru gitmesi sonucunu doğurmaktadır. Ağdaki bazı linklerin trafik hacminin varyans sabitini artması ile büyük ölçüde azalması bu eğilimin bir göstergesidir.

Ayrıca önerilen KAKOSKA-2 modeli örnek ulaşım ağına uygulanmış en iyi amaç fonksiyonu değeri 125216 sn olarak bulunmuştur. Denge link trafik hacimleri, doyunluk dereceleri ve optimum sinyal parametreleri elde edilmiştir. KAKOSKA-2 modeli uygulanırken iterasyondan iterasyona link trafik hacimlerinin dalgalanmasını önlemek için AOY yakınsama prosedürü uygulanmıştır. Talep atışı senaryolarının KAKOSKA-2 modeli üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin karşılaştırmaları yapılmış ve KAKOSKA-1 modeli ile yapılan çözümlerde optimum devre sürelerinde azalma sağlanması nedeniyle sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonunun KAKOSKA-1 modeline adapte edilmesine karar verilmiştir.

Sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesi literatürden farklı bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen formülasyonun KAKOSKA-1 modeline dahil edilmesi için gereken aşamalar ve algoritma adımları verilmiştir. Sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması talep artışı senaryoları ile analiz edilmiş ve her bir senaryo için ağın maliyeti, fiyatlandırılmış ağ

maliyeti, ağdan elde edilen gelir, net sistem maliyeti ve marjinal faydalar olmak üzere farklı parametreler bulunarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda %40'dan fazla talep artışı olması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması uygulamasının ağdan elde edilen gelirin düşmesi ve buna bağlı olarak marjinal faydaların azalması sonucu etkili olamadığı sonucuna varılmıştır. Gelecek bölümde tez çalışması boyunca elde edilen sonuçlar ve öneriler yer alacaktır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Giriş

Bu bölümde çalışmanın ana sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 6.2’de çalışmanın sonuçları, gelecek çalışmalarda yapılması planlananlar ise Bölüm 6.3’de verilmiştir.

6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada TA, DKD ve SKD problemlerinin ana prensipleri, matematiksel formülasyonları ve literatür çalışması verilmiştir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi UAT problemi hakkında literatürde birçok çalışma mevcut olup birbirinden farklı birçok çözüm yöntemi sunulmuştur. Ancak son yıllarda yapılan çalışmaların çoğunda UAT probleminin çözümünde sezgisel metotların kullanımı oldukça artmıştır. Çalışmada UAT probleminin çözümü için modifiye edilmiş KKO metodu kullanılmıştır. UAT probleminin çözümü için KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modelleri önerilmiştir.

Ayrıca çalışmada talep yönetimi tekniklerinden olan sıkışıklık fiyatlandırması için yeni bir metot önerilmiştir. Önerilen metot örnek ulaşım ağına uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Literatürde mevcut olan ve çalışmada önerilen TA modellerinin algoritma prensipleri, örnek ağ üzerindeki uygulamaları ve sonuçların karşılaştırılmaları verilmiştir. Geliştirilen KAKOTAM’nde KKO algoritması TA problemine uyarlanmış ve probit tabanlı atama probleminin çözümü için yeni bir algoritma önerilmiştir. KAKOTAM’nde probit rota seçim olasılıklarının bulunması için Monte-Carlo simülasyon tekniğinden faydalanılmıştır.

Sheffi (1985) tarafından önerilen SA'sı algılanan link maliyetleri üzerinden bulunan en düşük maliyetli rotaya hep ve ya hiç ataması yapılması prensibine dayanmaktadır. SA'nda en düşük maliyetli rotaya talep yüklenmesi yapıldığı için rota numaralandırmasına ihtiyaç duymamaktadır. KAKOTAM ise rota seçim olasılıklarını kullandığı için rota numaralandırmasına gereksinim duymaktadır. Bu çalışmada geliştirilen atama modellerinden biri olan AOYTAM, KAKOTAM'ne benzemekte fakat AOY yönteminin probit atama problemine adaptasyonunun sağlanmasından dolayı KAKOTAM'ne göre oldukça farklı bir metot olduğu bulunmuştur. Geliştirilen TA modelleri örnek ağ üzerinde uygulanmış ve elde edilen denge link trafik hacimleri oldukça benzer sonuçlar vermiştir.

Geliştirilen atama modellerinden olan AOYTAM hem CPU açısından hem de probit rota seçim olasılıklarının hesaplanmasından dolayı belirgin avantajlara sahip olmasından dolayı TA probleminin çözümünde kullanılmıştır. AOYTAM'nin duyarlılık analizi sonucunda Monte-Carlo simülasyon sayısı olarak 10, varyans sabiti değerinin ise 1 alınması durumunda optimum performansı gösterdiği bulunmuştur.

Sinyal kontrol formülasyonu, link maliyet fonksiyonlarının yapısı ve çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. Literatürde oldukça sık kullanım alanı bulan ve uygulama kolaylığından dolayı BPR link maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. KKO algoritmasının sinyal kontrol problemine uyarlanması için geliştirilen algoritma adımları verilmiş ve çalışma prensipleri açıklanmıştır. Geliştirilen KAKOSKA'nın örnek ulaşım ağı üzerinde uygulaması yapılmış ve algoritmanın duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Koloni büyüklüğü ve β kısıt vektörünün algoritma performansını ne ölçüde etkilediği bulunmuştur.

UAT çözüm metotları üzerine literatür çalışması verildikten sonra önerilen KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin formülasyonu ve çözüm algoritmaları verilmiş, literatürde sıkça kullanılan Allsop&Charlesworth ulaşım ağı üzerinde sayısal uygulamaları yapılmıştır. UAT probleminin konveks olmayan yapısından dolayı yerel optimumlara takılma riskinin KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin kullanılması ile azaltılacağı sonucuna varılmıştır. Önerilen modeller oldukça geniş bir ÇU içinden rastgele arama yapmakta ve başlangıç değerlerine bağlı olarak çözüme devam

etmemekte ve sürekli yeni yönlerde arama yapmaya devam etmektedir. Bu özelliğin önerilen modellerin yerel optimumlara takılma riskini oldukça azalttığı bulunmuştur.

KAKOSKA-1 modeli uygulaması sonucunda denge link trafik hacimleri, link doygunluk dereceleri ve optimum sinyal parametreleri elde edilerek sonuçları verilmiştir. Amaç fonksiyonu iyileşme oranı yaklaşık % 7 değerinde olup linklere ait doygunluk dereceleri %100'ün altında bulunmuştur.

B-V taleplerinin artması durumunda ağın performansının değişiminin incelenmesi için KAKOSKA-1 modeli ile çözümler gerçekleştirilmiş ve denge link trafik hacimleri ve doygunluk dereceleri elde edilmiştir. Test ağındaki bazı linklerin trafik hacimleri B-V taleplerinin artması ile doğru orantılı olarak artmakta iken bazı linklerdeki trafik hacminin dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Bu durum B-V talebinin senaryolara bağlı olarak doğrusal olarak artırılması sonucunda bazı linklerdeki trafik hacminin oldukça artması ve doygunluk derecelerinin %100'ün üstüne çıkması neticesinde ağda sıkışıklığın başlaması ve kullanıcıların rota tercihlerini değiştirmesi şeklinde açıklanabilir. Rota tercihlerinin değişmesi neticesinde birtakım linklerin trafik hacimleri B-V talebinin artırılmasına rağmen düşmektedir.

KAKOSKA-1 modelinin farklı koloni büyüklükleri kullanılarak örnek ulaşım ağına uygulanması durumunda birbirine oldukça benzer yakınsama eğilimleri gösterdiği bulunmuştur. Koloni büyüklüğünün değişmesi bulunan en iyi amaç fonksiyonu değerlerini önemli ölçüde etkilememektedir. Bu nedenle KAKOSKA-1 modelinde karar değişkenleri sayısına bağlı olarak ve CPU süresini de dikkate alarak koloni büyüklüğünün seçilmesi uygun olmaktadır. Ayrıca alt seviye probleminin çözümünde kullanılan AOYTAM'de kullanılan sürücü algılama hatalarını temsil eden varyans sabitinin değişime karşı algoritmanın tepkisi araştırılmış ve değişken varyans sabiti değerlerine göre elde edilen denge link trafik hacimleri, link doygunluk dereceleri ve optimum sinyal parametreleri karşılaştırılmıştır. Varyans sabitinin artması ile rota seçim davranışlarının stokastik prensiplerden uzaklaşp deterministik seçime doğru gittiği bulunmuştur. Ağdaki bazı linklerin trafik hacminin varyans sabitini artması ile büyük ölçüde azalması bu eğilimin bir göstergesidir. Varyans sabitinin artması ile birlikte sürücülerin rota seçim davranışlarının değişmesinden dolayı linklerin doygunluk derecelerinde değişiklikler olmaktadır. Sonuç olarak varyans sabiti değerinin artması

sürücülerin seçim davranışlarını değiştirmekte fakat tüm farklı β değerleri için ulaşım ağı dengeye gelmekte ve sıkışıklık etkisine maruz kalmadan hizmet verebilmektedir. Farklı β değerleri için ulaşım ağındaki tüm linklerin doyumluk dereceleri %100'ün altındadır.

KAKOSKA-2 modelinin adımları ve çalışma prensibi detaylı bir şekilde açıklanarak örnek ulaşım ağına uygulanmış ve başlangıç amaç fonksiyonu değerinde %3'lük bir iyileşme sağlanmıştır. KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen en iyi devre sürelerinde KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen devre sürelerine göre belirli bir artış söz konusu olmaktadır. Her iki yöntem kullanılarak elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değerleri arasında önemli bir fark gözlemlenmemesine karşılık KAKOSKA-2 modeli ile yapılan çözümde ağdaki devre sürelerinde ortalama %17'lik bir artış olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca ağdaki tüm linklerde doyumluk derecesi %100'ün altında olup ulaşım ağının sıkışıklık etkisi altında olmadan hizmet verdiği söylenebilir.

B-V taleplerindeki artışlara bağlı olarak örnek ulaşım ağının KAKOSKA-2 modeli ile çözümleri gerçekleştirilmiş ve denge link trafik hacimleri ve doyumluk dereceleri elde edilmiştir. Ağdaki tüm linklerin trafik hacimlerinin KAKOSKA-1 modeli sonuçlarından farklı olarak B-V taleplerinin artması ile doğru orantılı olarak arttığı bulunmuştur. KAKOSKA-2 modeli ile UAT tasarımında alt seviye ve üst seviye problemlerinin çözümleri birbirinden ayrı ve iteratif olarak yapıldığı için alt seviye probleminin çözümü ile elde edilen ağdaki tüm denge link trafik hacimlerinde senaryolara bağlı olarak talep artışı nedeniyle sürekli bir artış söz konusu olmaktadır. KAKOSKA-1 modeli ile UAT çözümünde ise alt seviye problemi üst seviye probleminin içinde çözülmekte ve talep artışına rağmen bazı linklerin denge trafik hacimlerinde dalgalanmalar görülebilmektedir.

KAKOSKA-2 modeli ile elde edilen devre sürelerinin KAKOSKA-1 modeli ile elde edilen sürelerden ortalama %17 fazla olmasından dolayı daha kısa devre süreleri üretebilen KAKOSKA-1 modeli sıkışıklık fiyatlandırması için seçilmiştir.

Çalışmada sıkışıklık fiyatlandırması yapılabilmesi için literatürden farklı bir yaklaşım geliştirilmiş ve önerilen formülasyonun KAKOSKA-1 modeline dahil edilmesi için gereken aşamalar ve algoritma adımları verilmiştir. Önerilen yaklaşıma

göre ulaşım ağındaki herhangi bir linkin maliyeti linkin fiyatlandırılma derecesine bağlı olarak ölçülebilen maliyetinin en fazla 2 katı kadar olabilmektedir. Sıkışıklık fiyatlandırması uygulanan linklerdeki maliyetler fiyatlandırmaya bağlı olarak belli oranlarda artırılmakta ve ulaşım ağını kullanan sürücülerin link maliyetlerindeki artış sebebiyle daha düşük maliyetli rotaları seçme yönünde seçim davranışlarını değiştirmesi amaçlanmaktadır. Önerilen sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonunda ulaşım ağında tüm linklerin ya da linklerden bazılarının fiyatlandırılabilmesine olanak sağlanmaktadır. B-V talebinin %10 artması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması yapılması durumunda link doygunluk derecelerinin tamamı %100'ün altında bulunmuştur. Bu nedenle sıkışıklık fiyatlandırması modelinin %10'luk talep artışında ağı yönetmede ve link fiyatlandırmaları sayesinde sürücülerin rota seçim davranışlarını etkilemede başarılı olduğu söylenebilir. Sıkışıklık fiyatlandırması sonuçları talep artışı senaryoları uygulanarak analiz edilmiş ve her bir senaryo için ağın maliyeti, fiyatlandırılmış ağı maliyeti, ağdan elde edilen gelir, net sistem maliyet ve marjinal faydalar olmak üzere farklı parametreler elde edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Talep artışı senaryolarına bağlı olarak sıkışıklık fiyatlandırması uygulaması sonucu ağdan elde edilen toplam gelir artmakta fakat talep artışı %50 olması durumunda elde edilen gelir %40 talep artışı olması durumuna göre %10 düşmektedir. Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda %40' dan fazla talep artışı olması durumunda sıkışıklık fiyatlandırması uygulamasının ağdan elde edilen gelirin düşmesi ve buna bağlı olarak marjinal faydaların azalması sonucu etkili olamadığı sonucuna varılmıştır.

6.3. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda UAT probleminin çözümü için yapılması planlananlar aşağıda verilmiştir.

1. TA probleminin çözümünde gerçeğe en yakın link akımlarının elde edilmesi akımların sinyal kontrol probleminde girdi olarak kullanılmasından dolayı oldukça önemlidir. Bu nedenle TA sürecinde farklı rota seçim modellerinin kullanılmasının sinyal kontrol algoritmasının performansını ne ölçüde etkilediği belirlenmelidir. Çalışmanın kapsamı dışında olmasından dolayı AOYTAM'nde farklı rota seçim

modelleri kullanılması durumunda KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin performansının ne ölçüde etkileneceğinin belirlenmesi gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

2. Çalışmada önerilen AOYTAM orta ölçekli ulaşım ağında UAT çözümünde kullanılmıştır. Link sayısının ve B-V taleplerinin artmasının getireceği muhtemel problemlerin ortaya konulabilmesi için daha büyük ulaşım ağlarında AOYTAM'nin sonuçları analiz edilmeli ve muhtemel farklılıklar ortaya konmalıdır.

3. AOYTAM'nin sinyal kontrol paket programları (TRANSYT, vb.) ile adaptasyonunun sağlanarak UAT probleminin çözülmesi sonucu elde edilecek sonuçların KAKOSKA-1 ve KAKOSKA-2 modellerinin sonuçları ile karşılaştırılması neticesinde oluşabilecek muhtemel farklılıklar belirlenmelidir.

4. UAT probleminin konveks olmayan yapısından dolayı çözümünde kullanılacak olan sezgisel metot oldukça önemlidir. En iyi çözümlere ulaşmak için yerel optimumlara takılma riskinin azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle farklı sezgisel metotlar kullanılarak (Tavlama benzetimi, pekiştirilmiş öğrenme, sürü optimizasyonu, vb.) UAT probleminin çözülmesi ve sonuçların karşılaştırılması uygun olacaktır. Farklı sezgisel metotların kullanılmasının UAT çözümüne etkisinin belirlenmesi çalışma kapsamı dışında olmasından dolayı gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

5. Geliştirilen sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonu KAKOSKA-1 modeline dahil edilmiş ve orta ölçekli ulaşım ağında geliştirilen formülasyonun sonuçları verilmiştir. Sıkışıklık fiyatlandırması formülasyonunun daha büyük ağlardaki performansının incelenmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması sonraki çalışmalarda gerçekleştirilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdulaal, M., and LeBlanc, L. J. (1979) Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B*, 13: 19-32.
- Allsop, R. E. (1974) Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice, *Transportation Traffic Theory (Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory)*, Amsterdam, s. 345-374.
- 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) 262-264.
- Baskan, O., Haldenbilen, S., Ceylan, H., and Ceylan, H. (2009a) A new solution algorithm for improving performance of ant colony optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 211: (1) 75-84.
- Baskan, O., Haldenbilen, S., Ceylan, H., and Ceylan, H. (2009b) Estimating transport energy demand using ant colony optimization. *Energy Sources Part B*, (baskıda)
- Baskan, O., ve Haldenbilen, S. (2009c) Logit ve Probit Tabanlı Stokastik Denge Atamasının İki Farklı Sezgisel Metot Kullanılarak Çözülmesi, *8. Ulaştırma Kongresi*, 30 Eylül/1-2 Ekim, İstanbul.
- Bell, M. G. H., and Lida, Y. (1997) Transportation Network Analysis, *John Wiley & Sons Inc.*, New York, 215s.
- Bell, J. E., and McMullen, P. R. (2004) Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*, 18: 41-48.
- Ben-Akiva, M. (1973) Structure of Passenger Travel Demand Models, Ph.D. Thesis, *MIT*, Cambridge, Massachusetts.
- Ben-Akiva, M., and Bierlaire, M. (1999) Discrete choice methods and their applications to short-term travel decisions, Handbook of Transportation Science, *Kluwer Academic Publishers*, s. 5-34.
- Ben-Akiva, M., and Bolduc, D. (1996) Multinomial Probit with a Logit Kernel and a General Parametric Specification of the Covariance Structure, *Working Paper*, Massachusetts Institute of Technology.
- Bolduc, D. (1999) A practical technique to estimate multinomial probit models in transportation. *Transportation Research Part B*, 33: 63-79.

- Bonabeau, B., Dorigo, M., and Theraulaz, G. (1999) *Swarm intelligence: From natural to artificial systems*, **Oxford University Press**, New York.
- Branston, D (1976) Link Capacity Functions: A Review. *Transportation Research*, 10: 223-236.
- Burrell, J. E. (1968) Multiple route assignment and its application to capacity restraint, *Proceedings of the 4th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of Karlsruhe, Germany.
- Cascetta, E., Nuzzola, A., Russo, F., and Vitetta, A. (1996) Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks, *In Transportation and Traffic Theory: Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Lyon, France.
- Ceylan, H. (2002) A Genetic Algorithm Approach to the Equilibrium Network Design Problem, PhD Thesis, *University of Newcastle Upon Tyne*, England, 189s
- Ceylan, H., and Bell, M. G. H. (2005) Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion. *Transportation Research Part B*, 39: 169-185.
- Ceylan, H., and Bell, M. G. H. (2004) Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach, including drivers' routing. *Transportation Research Part B*, 38: 329-342.
- Charlesworth, J. A. (1977) The calculation of mutually consistent signal settings and traffic assignment for a signal-controlled road network, *Proceedings of the 7th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Kyoto, s. 545-569.
- Cheng, C. B., and Mao, C. P. (2007) A modified ant colony system for solving the travelling salesman problem with time windows. *Mathematical and Computer Modelling*, 46: 1225-1235.
- Chelouah, R., and Siarry, P. (2000) Tabu Search applied to global optimization. *European Journal of Operational Research*, 123: 256-270.
- Chiou, S. W. (1998) Optimization of area traffic control for equilibrium network flows, PhD Thesis, *University College London*, England.
- Chiou, S. W. (2005) Bi-level programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research Part B*, 39: 361-383.
- Chiou, S. W. (2008) Optimization of congestion pricing road network with variable demands. *Applied Mathematics and Computation*, 195: 382-391.
- Clark, C. E. (1961) The greatest of a finite set of random variables. *Operations Research*, 9: 145-162.

- Connors, R. D., and Sumalee, A. (2009) A network equilibrium model with travellers' perception of stochastic travel times. *Transportation Research Part B*, 43: 614-624.
- Connors, R. D., Sumalee, A., and Watling, D. P. (2007) Sensitivity analysis of the variable demand probit stochastic user equilibrium with multiple user-classes. *Transportation Research Part B*, 41: 593-615.
- Daganzo, C., and Sheffi Y. (1977) On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, 11: 253-274.
- D'Acierno, L., Montella, B., and De Lucia, F. (2006) A stochastic traffic assignment algorithm based on ant colony optimisation, *ANTS, LNCS 4150*, s. 25-36.
- Davis, G. A. (1994) Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment. *Transportation Research Part B*, 28: 61-75.
- Demirel, N. C., and Toksarı, M. D. (2006) Optimization of the quadratic assignment problem using an ant colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 183: 427-435.
- Denebourg, J. L., Pasteels, J. M., and Verhaeghe, J. C. (1983) Probabilistic Behavior in Ants: a Strategy of errors?. *Journal of Theoretical Biology*, 10: 259-271.
- Dial, R. B. (1971) A probalistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration. *Transportation Research*, 5: (2) 81-111.
- Dial, R. B. (2006) A path-based user equilibrium traffic assignment algorithm that obviates path storage and enumeration. *Transportation Research Part B*, 40: 917-936.
- Dickson, T. J. (1981) A note on traffic assignment and signal timings in a signal-controlled road network. *Transportation Research*, 15B: (4) 267-271.
- Donati, A. V., Montemanni, R., Casagrande, N., Rizzoli, A. E., and Gambardella, L. M. (2008) Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. *European Journal of Operational Research*, 185: (3) 1174-1191.
- Dorigo, M. (1992) Optimisation, learning and natural algorithms, PhD Thesis, *Politecnico di Milano*, Italy.
- Dorigo, M., and Di Caro, G. (1999) Ant colony optimisation: A new meta-heuristic, *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (2)*, Washington, s. 1470-1477.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. (1996) Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26: 29-41.

- Dreo, J., and Siarry, P. (2006) An ant colony algorithm aimed at dynamic continuous optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 181: 457-467.
- Eliasson, J., and Mattsson, L. G. (2006) Equity effects of congestion pricing Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A*, 40: 602-620.
- Fisk, C. (1980) Some developments in equilibrium traffic assignment. *Transportation Research Part B*, 14: 243-255.
- Fisk, C. S. (1984) Game theory and transportation systems modelling. *Transportation Research Part B*, 18: (4-5) 301-313.
- Fowkes, A. S., and Toner, J. P. (1998) Freight mode/route choice modeling with limited data, *Proceedings of Seminar E., Transportation Planning Methods, European Transport Conference*, PTRC, London, s. 147-164.
- Gallo, M., D'Acerno, L., and Montella, B. (2009) A meta-heuristic approach for solving the urban network design problem. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2009.02.026
- Gao, Z., Sun, H., and Shan, L. L. (2004) A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems. *Transportation Research Part B*, 38: 235-250.
- Gartner, N. H. (1974) Area traffic control and network equilibrium methods, *Traffic Equilibrium Methods: Proceedings of the International Symposium*, Montreal, s. 274-297.
- Gershwin, S. B. and Tan, H. N. (1979) Hybrid optimization: optimal static traffic control constrained by drivers' route choice behaviour, *Laboratory for Information and Decision System Report LIDS*, Massachusetts Institute of Technology, 870s.
- Gliebe, J. P., Koppelman, F. S., and Ziliaskopoulos, A. (1999) Route choice using a paired combinatorial logit model, *78th meeting of the Transportation Research Board*, Washington, USA.
- Guntsch, M., and Middendorf, M. (2002) Applying Population Based ACO to Dynamic Optimization Problems, *ANTS 2002, LNCS 2463*, s. 111-122.
- Guogiang, Z., and Jian, L. (2007) Genetic algorithm for continuous network design problem. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 7: (1) 101-105.
- Hamdouch, Y., Florian, M, Hearn, D. W., and Lawphongpanich, S. (2007) Congestion pricing for multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part B*, 41: 275-291.
- Hamzacebi, C. (2007) Continuous functions minimization by dynamic random search technique. *Applied Mathematical Modeling*, 31: 2189-2198.

- Hamzacebi, C. (2008) Improving genetic algorithms' performance by local search for continuous function optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 196: 309-317.
- Hamzacebi, C., and Kutay, F. (2006) A heuristic approach for finding the global minimum: adaptive random search technique. *Applied Mathematics and Computation*, 173: (2) 1323-1333.
- Horowitz, J. L. (1991) Reconsidering the multinomial probit model. *Transportation Research Part B*, 25: 433-438.
- Ho, H. W., Wong, S. C., Yang, H., and Loo, B. P. Y. (2005) Cordon-based congestion pricing in a continuum traffic equilibrium system. *Transportation Research Part A*, 39: 813-834.
- Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., and Royle, M. C. (1982) The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique. *Traffic Engineering and Control*, 23: 190-192.
- Jin, Y., Meng, X., and Ziyou, G. (2009) Sensitivity analysis of simulated annealing for continuous network design problems. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 9: (3) 64-70.
- Kanafani, A. (1983) Transportation demand analysis, *McGraw-Hill, Inc.*, New York, 319s.
- Kuan, S. N., Ong, H. L., and Ng, K. M. (2006) Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimisation. *Advances in Engineering Software*, 37: 351-359
- Kwon, Y. D., Kwon, S. B., and Kim, J. (2003) Convergence enhanced genetic algorithm with successive zooming method for solving continuous optimization problems. *Computers and structures*, 81: 1715-1725.
- Leblanc, L. J. (1975) An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science*, 9: 183-199.
- Li, J., and Rhinehart, R. R. (1998) Heuristic random optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 22: (3) 427-444.
- Lim, Y., Heydecker, B. G., and Lee, S. (2005) A continuous network design model in stochastic user equilibrium based on sensitivity analysis. *Journal of Advanced Transportation*, 39: (1) 63-79.
- Little, J., Kelson, M., ve Gartner, N. (1981) MAXBAND: a program for setting signals on arteries and triangular networks (Transportation Research Record 795), *National Research Council*, Washington DC, s. 40-46.

- Lowrie, P. R. (1982) SCATS principles, methodology, algorithm, *IEE conference on road traffic signaling*, London, s. 67-70.
- Luce, D. (1959) Individual choice behavior, *Wiley*, New York, USA, 153s.
- Luk, J. (1984) Two traffic-responsive area traffic control methods: SCATS and SCOOT. *Traffic Engineering and Control*, 25: (1) 17-18.
- Maher, M. J., and Hughes, P. C. (1997) A probit based stochastic user equilibrium assignment model. *Transportation Research Part B*, 31: (4) 341-355.
- McFadden, D. (1978) Modeling The Route Choice of Residential Location. *Transportation Research Record*, 673: 72-77.
- McFadden, D., and Train, K. (2000) Mixed MNL Models for Discrete Choice Response. *Journal of Applied Econometrics*, 15: (5) 447-470.
- Marcotte, P. (1983) Network optimisation with continuous control parameters, *Transportation Science*, 17: (2) 181-197.
- Mullen, R. J., Monekosso, D., Barman, S., and Remagnio, P. (2009) A review of ant algorithms. *Expert Systems with Applications*, 36: 9608-9617.
- Nash, S. G., and Sofer, A. (1996) Linear and Nonlinear Programming, *McGraw-Hill*, New York, USA.
- Nguyen, S. (1974) An algorithm for the traffic assignment problem. *Transportation Science*, 8: 203-216.
- Oppenheim, N. (1995) Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 480s.
- Ortuzar, J. D., and Willumsen, L. G. (2001) Modelling Transport, *J. Wiley*, Third Edition, Chichester, 433s.
- Palma, A., Kilani, M., and Lindsey, R. (2005) Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. *Transportation Research Part A*, 39: 588-611.
- Poorzahedy, H., and Abulghasemi, F. (2005) Application of Ant system to network design problem. *Transportation*, 32: 251-273.
- Poorzahedy, H., and Rouhani, O.M. (2006) Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research*, 182: (2) 578-596.
- Poorzahedy, P., and Turnquist, M. A. (1982) Approximate algorithms for the discrete network design problem. *Transportation Research Part B*, 16: 45-56.

- Powell, W. B., and Sheffi, Y. (1982) The convergence of equilibrium algorithms with predetermined step sizes. *Transportation Science*, 16: 45-55.
- Prashker, J. N., and Bekhor, S. (1998) Investigation of Stochastic Network Loading Procedures. *Transportation Research Record*, 1645: 94-102.
- Robertson, D. I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool, *RRL Report*, LR 253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Robertson, D. I., and Bretherton, R. D. (1991) Optimizing networks of traffic signals in real-time: the SCOOT method. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 40: (1) 11-15.
- Schwefel, H. P. (1981) Numerical Optimization of Computer Models, *John Wiley & Sons Inc.*, Chichester.
- Sheffi, Y., and Powell, W. (1981) A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks. *Transportation Research Part B*, 15B: 53-64.
- Sheffi, Y. (1982) On the estimation of the multinomial probit model. *Transportation Research Part A*, 16A: 447-456.
- Sheffi, Y. (1985) Urban Transport Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, USA, 399s.
- Shelokar, P. S., Siarry, P., Jayaraman, V. K., and Kulkarni, B. D. (2007) Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization. *Applied Mathematics and Computation*. 188: 129-142.
- Sims, A. (1979) The Sydney coordinated adaptive traffic system, *Proceedings of the ASCE engineering foundation conference on research priorities in computer control of urban traffic systems*, s. 12-27.
- Smith, M.J. (1979) The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria. *Transportation Research Part B*, 13: (4) 295-304
- Sumalee, A., Connors, R. D., and Watling, D. P. (2006) An optimal toll design problem with improved behavioral equilibrium model: the case of the Probit model, *Mathematical and Computational Models for Congestion Charging, published by Springer, Berlin*, s. 219-240.
- Suwansirikul, C., Friesz, T. L., and Tobin, R. L. (1987) Equilibrium decomposed optimization: a heuristic for the continuous network design problem. *Transportation Science*, 21: (4) 254-263.
- Talbi, E. G., Roux, O., Fonlupt, C., and Robillard, D. (2001) Parallel Ant Colonies for the quadratic assignment problem. *Future Generation Computer Systems*, 17: 441-449.

- Toksari, M. D. (2006) Ant colony optimization for finding the global minimum. *Applied Mathematics and Computation*, 176: 308-316.
- Toksari, M. D. (2007a) A heuristic approach to find the global optimum of function. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 209: 160-166.
- Toksari, M. D. (2007b) Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey. *Energy Policy*, 35: 3984-3990.
- Toksari, M. D. (2009) Minimizing the multimodal functions with Ant Colony Optimization approach. *Expert Systems and Applications*, 36: (3) 6030-6035.
- Van Vliet, D. (1976) Road Assignment-I, II. *Transportation Research*, 10: (3) 137-149.
- Varia, H. R., and Dhingra, S. L. (2004) Dynamic optimal traffic assignment and signal time optimization using genetic algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19: 260-273.
- Wang, H., and Shen, J. (2007) Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints. *Applied Mathematics and Computation*, 190: 1237-1249.
- Wardrop, J. (1952) Some theoretical aspect of road traffic research, *Proceedings Institute Civil Engineers Part II*, s. 325-378.
- Wardrop, J. G. (1968) Journey speed and flow in central London. *Traffic engineering control*, 9: 528-532.
- Xu, T., Wei, H., and Hu, G. (2009) Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm. *Expert Systems and Applications*, 36: 1322-1328.
- Yai, T., Iwakura, S., and Morichi, S. (1997) Multinomial probit with structured covariance for route choice behaviour. *Transportation Research Part B*, 31: 195-207.
- Yang, S., Rui, S., Shiwei, H., Qiang, C. (2009) Mixed transportation network design based on immune clone annealing algorithm. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 9: (3) 103-108.
- Yu, B., and Yang, Z. (2005) Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, s. 374-389.
- Zhao, J. H., Liu, Z., and Dao, M. (2007) Reliability optimization using multi objective ant colony system approaches. *Reliability Engineering and System Safety*, 92: 109-120.
- Zixiao, W. (2004) Motorized and non-motorized transport systems: Modeling and Optimisation, PhD Thesis, *The Hong Kong Polytechnic University*, Hong Kong.

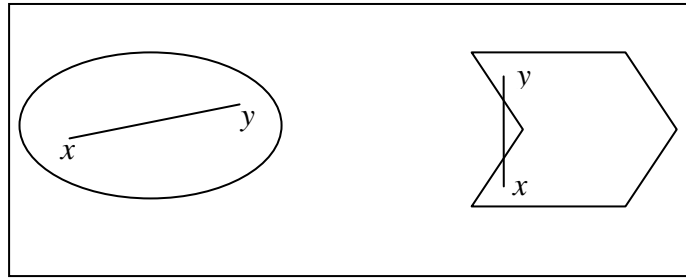
EKLER

Ek-1 Konveks Küme ve Fonksiyon Tanımı

Herhangi bir S kümesi aşağıdaki şartı sağlıyorsa konveks küme olarak değerlendirilmektedir.

$$0 \leq \alpha \leq 1 \text{ olmak üzere } \forall x, y \in S \quad \alpha x + (1 - \alpha)y \in S \quad (\text{E1.1})$$

Başka bir deyişle, eğer x ve y S 'nin içinde iseler x ve y noktalarını birleştiren doğru parçası da S 'nin içindedir. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil Ek-1.1 Konveks olma durumu

Eğer bir $f(x)$ fonksiyonu aşağıdaki şartı sağlıyorsa S konveks kümesinde konveks'tir denir.

$0 \leq \alpha \leq 1$ olmak üzere;

$$\forall x, y \in S \quad f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) \quad (\text{E1.2})$$

Bu tanıma göre $(x, f(x))$ ve $(y, f(y))$ noktalarını birleştiren doğru parçası fonksiyonun grafiğinin üstünde kalıyorsa konvektir. Benzer şekilde $f(x)$ fonksiyonu aşağıdaki şartı sağlıyorsa, S kümesinde konkav'dır denir.

$0 \leq \alpha \leq 1$ olmak üzere;

$$\forall x, y \in S \quad f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \geq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) \quad (\text{E1.3})$$

Lineer fonksiyonlar hem konveks hem konkav'dırlar. Eğer bir fonksiyon aşağıdaki şartı sağlıyorsa kesin-konveks'tir:

$0 \leq \alpha \leq 1, \forall x, y \in S, x \neq y$ olmak üzere;

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) < \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) \quad (\text{E1.4})$$

Eğer bir-boyutlu bir fonksiyon olan f 'nin ikinci dereceden türevleri mevcutsa, konvekslik için alternatif bir tanım verilebilir. Böyle bir fonksiyon ancak ve ancak;

$$f''(x) \geq 0, \forall x \in S \quad (\text{E1.5})$$

ise konvektir. Çok-boyutlu durumda ise ikinci türevlerden oluşan Hessian matrisinin pozitif-yarı-tanımlı olması gerekir. Diğer bir deyişle,

$$\forall x \in S \text{ için } y^T \nabla^2 f(x) y \geq 0 \quad (\text{E1.6})$$

şartı tüm y 'ler için sağlanmalıdır (Nash ve Sofer 1996).

ÖZGEÇMİŞ

Özgür BAŞKAN, 27 Haziran 1976 yılında Bursa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Ankara ve Malatya'da, lise öğrenimini ise İzmir'de tamamladı. 1998 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1999-2001 yılları arasında dil eğitimi için Almanya'nın Berlin şehrinde bulundu. 2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nın Ulaştırma bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2004 yılında yüksek mühendis unvanını aldı. 2005 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nın Ulaştırma bilim dalında doktora eğitimine başladı. 2002 yılından itibaren aynı üniversitede İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.