

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BESLEYİCİ OTOBÜS GÜZERGÂHLARI TASARIM
PROBLEMİ**

İnşaat Mühendisi Dinçer GEÇER

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Giriş	4
2.2 Problemin Ortaya Çıkışı ve İlk Çalışmalar	4
2.3 Problemin Kapsamının Genişlemesi	7
2.4 Probleminin Çözümüne Getirilen Yenilikler	15
3. BESLEYİCİ OTOBÜS GÜZERGÂHI TASARIM PROBLEMİ	22
3.1 Giriş	22
3.2 Önerilen Yöntemler	23
3.2.1 Talep Dağılımı	24
3.2.2 Analizin Zaman Çerçevesi	24
3.2.3 Karar Elemanları	24
3.3 Analitik Yaklaşım	25
3.4 Çoktan Bire Talep Durumu İçin Ağ Yaklaşımı	41
3.5 Çoktan Çoğa Talep Durumu İçin Ağ Yaklaşımı	49
3.6 BOGTP İçin Uygulama Dönemi	55
4. BESLEYİCİ OTOBÜS GÜZERGÂHI TASARIM PROBLEMİ ALGORİTMASI	56
4.1 Giriş	56
4.2 BOGTP için Sezgisel Algoritma	57
4.2.1 BOGTP için Öncül Algoritma	57
4.2.2 Geliştirme Prosedürleri	71
4.2.2.1 Tek Güzergâh Takas Prosedürü	71
4.2.2.2 İki Güzergâh Takas Prosedürü	77
4.2.2.3 Durak Devir Prosedürü	84
4.2.3 BOGTP'nin Uzun Dönem Çözümü	89
5. ALGORİTMANIN ANALİZİ	91

5.1	Temel Durum Çalışması	92
5.2	Duyarlılık Analizleri	102
5.2.1	Değişken Talep Test Durumu	102
5.2.2	Otobüs Kapasitesi Test Durumu	105
5.2.3	Güzergâh Uzunluğu Kısıdı Test Durumu	108
5.2.4	Yeni Bir Metrobüs İstasyonunun Eklenmesi Test Durumu.....	110
5.2.5	Bir Metrobüs İstasyonunun Kapatılması Test Durumu	112
6.	SONUÇLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....		119

SİMGE LİSTESİ

$p(x,y)$	birim zaman için (x,y) noktasındaki ulaşım talep yoğunluğu (saatte kilometrekaredeki yolcu sayısı).
l_y	hizmet alanın y yönündeki uzunluğu (km).
l_x	hizmet alanın x yönündeki uzunluğu (km).
V_a	yürüme hızı (km/saat).
δ	her otobüs durağı için kaybedilen yolculuk süresi (otobüsün durması, hızlanması ve yavaşlaması sürelerini içerir, saat).
λ_o	otobüs işletme maliyeti (\$/araç-km).
λ_a	erişim süresinin bedeli (yürüme erişimi, \$/yolcu-saat).
λ_r	yolcunun araçtaki seyir süresi bedeli (\$/yolcu-saat).
λ_w	yolcunun bekleme süresi bedeli (\$/yolcu-saat).
$h(x)$	x noktasında konumlu bir güzergâhın izleme süresi (saat).
$t(x)$	güzergâh yoğunluğu (Demiryolu hattının bir kilometresi boyunca besleyeci güzergâh sayısı, güzergâh sayısı/km).
$w(x,y)$	otobüs durak aralığı (km).
i, m	otobüs durakları indisi.
j	demiryolu istasyonları indisi.
k	otobüs güzergâhları indisi.
h	düğüm, otobüs durakları ve demiryolu istasyonları indisi.
N	tüm düğüm noktaları dizisi.
M	tüm düğümlerin dizisi (alt-düğüm ve demiryolu istasyonları)
W	M 'nin tüm demiryolu istasyonları kümesini içeren herhangi uygun altkümeleri
R	$[j/I + 1 \leq j \leq I + J]$ tüm demiryolu istasyonlarının kümesi
d	hedef nokta indisi.
i^d	i düğümünün d hedefine varan alt-düğümü.
p	demiryolu istasyonları ve alt-düğümleri de içeren düğüm indisi.
H	tüm demiryolu istasyonlarını içeren N dizisinin bir alt kümesi.
ASH	mümkün olan en yüksek koltuk-saat.
c	otobüs kapasitesi (yolcu/otobüs).
C^{js}	j demiryolu istasyonundan s hedefine raylı sistemdeki yolcu maliyeti, (\$/yolcu).
D^k	k güzergâhının en büyük uzunluğu, (km).

$L^{i,h}$	i düğümü ile h düğümü arasındaki uzaklık, (km).
Q^i	i otobüs durağındaki saat başına ortalama ulaşım talebi, (yolcu/saat).
β	besleyici otobüsün sabit yıpranma payı maliyeti, (\$/koltuk-saat).
U	ortalama otobüs işletme hızı, (km/saat).
ρ	ortalama otobüs doluluk çarpanı.
C^{jd}	j demiryolu istasyonundan d hedefine yolcu başına demiryolu maliyeti.
$L^{i_d p}$	i^d alt-düğümü ile p noktası arasındaki uzaklık.
Q^{i_d}	i^d alt-düğümünden d hedefine saat başı ortalama ulaşım talebi.
$SAV_i(p, q)$	p ve q düğümlerine i düğümünün eklenmesiyle uzaklıktaki birikim.
l_i^j	j düğümü ile i düğümü arasındaki uzaklık.
l_{pi}, l_{pq}, l_{iq}	p ve i düğümleri, p ve q düğümleri, i ve q düğümleri arasındaki uzaklıklar.
$STR_i(p, q)$	düğüm p ile q arasına i düğümünün eklenmesiyle oluşan "gerilme".
TC_i^j	i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna bir güzergâhın doğrudan erişme maliyeti.
$INCOST_i(p, q)$	p ve q duraklarının arasına i otobüs durağını eklemenin maliyeti.
BC_i^j	i den j ye doğrudan bir güzergâhın otobüs maliyeti (\$/saat),
q_i	i otobüs durağındaki ortalama saatlik talep (yolcu/saat),
c_{sj}	j istasyonundan s hedefine demiryolu maliyeti (\$/km).
f_{ij}	i den j ye doğrudan bir güzergâhın otobüs frekansı (dakika/sefer).
RTC_k	güzergâh için ulaşım maliyeti (\$/saat),
L_k	güzergâh parçasının toplam uzunluğu (km),
Q_k	güzergâh parçasının toplam talebi (yolcu/saat),
F_k	güzergâh parçasının frekansı (dakika/sefer).
MNK	öncül algoritma ile oluşturulan otobüs güzergâhlarının toplam sayısı.
NNK	otobüs güzergâhlarının toplam sayısı.

KISALTMA LİSTESİ

AGP	Araç Güzergâhlama Problemi
BOATP	Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi
BOGTP	Besleyici Otobüs Güzergâhı Tasarım Problemi
ÇGTGP	Çok Garajlı Taşıt Güzergâhlama Problemi
DDP	Durak Devir Prosedürü
GSP	Gezgin Satıcı Problemi
MİA	Merkezi İş Alanı
SREP	Tek Güzergâh Takas Prosedürü
TREP	İki Güzergâh Takas Prosedürü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Analitik yöntem için hizmet alanı yapısı (Kuah, 1986)	5
Şekil 2.2 Ağ yöntemi için hizmet alanı yapısı (Kuah, 1986)	6
Şekil 2.3 Sistem birleşimi (Chien, 1995).....	9
Şekil 2.4 Kentiçi ulaşım ağının düzeni (Chien, 1995).....	10
Şekil 2.6 Basitleştirilmiş ağ düzeni (Chien ve Yang, 1999).....	13
Şekil 2.7 Ağ düzeni (Chien, 2005)	14
Şekil 2.8 Küçük bir ağ üzerinde uygulanan güzergâh tercihleri (Ceder ve Yim, 2003)	17
Şekil 2.9 Toplu taşıma güzergâh tasarımı için bir çözüm yöntemi (Jerby ve Ceder, 2005)	19
Şekil 2.10 Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi (Kuan vd., 2005)	20
Şekil 3.1 Talep yoğunluk fonksiyonları	36
Şekil 3.2. Başlangıca uzaklığın $t^*(x)$, $w^*(x)$ ve $h^*(x)$ değerlerine etkisi (2. uygulama için)...	40
Şekil 3.3. Başlangıca uzaklığın $t^*(x)$, $w^*(x)$ ve $h^*(x)$ değerlerine etkisi (3. uygulama için)...	40
Şekil 3.4 Çoktan-bire talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sistemi	42
Şekil 3.5 Çoktan-bire talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sisteminin genişleyen ağaç gövdesi gösterimi.....	43
Şekil 3.6 Gerçek Otobüs Seyir Süre Maliyetinin Gösterimi	47
Şekil 3.7 Yaklaşık Otobüs Seyir Süre Maliyeti	48
Şekil 3.8 Çoktan-çoğa talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sistemi.....	50
Şekil 3.9 Çoktan-çoğa talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sisteminin genişleyen ağaç gövdesi gösterimi.....	50
Şekil 3.10 Çoktan-çoğa talep durumu için otobüs ve raylı ulaşım sisteminin dönüştürülmüş genişleyen ağaç ağı gösterimi	51
Şekil 4.1 Bir güzergâh parçasına bir otobüs durağı eklemenin iki yolu.....	61
Şekil 4.2 Öncül algoritma akış şeması	70
Şekil 4.3 Tek güzergâh takas prosedürü	72
Şekil 4.4 Tek güzergâh takas prosedürü akış şeması.....	76
Şekil 4.5 k Güzergâhındaki i otobüs durağının, k' güzergâhındaki i' otobüs durağı ile takası. 77	
Şekil 4.6 İki güzergâh takas prosedürü akış şeması	83
Şekil 4.7 k Güzergâhındaki i Otobüs Durağının k' güzergâhındaki p' ve q' otobüs durakları arasına devred N ilmesi.....	84
Şekil 4.8 Durak Devir Prosedürü Akış Şeması.....	88
Şekil 5.1 Güzergâh programı kullanıcı arayüzü	92
Şekil 5.2 İETT otobüs toplu taşıma ağının bir bölümü	93

Şekil 5.3 Çalışma alanı	94
Şekil 5.4 Çalışma alanında otobüs duraklarının konumu	95
Şekil 5.5 Temel durum için başlangıç algoritması çözümü.....	97
Şekil 5.6 Temel durum için 1. Geliştirme algoritması çözümü.....	98
Şekil 5.7 Temel durum için 2. Geliştirme algoritması çözümü.....	99
Şekil 5.8 Temel durum için 3. Geliştirme algoritması (sonuç) çözümü.....	100
Şekil 5.9 Değişken talep durumu için algoritma çözümü.....	104
Şekil 5.10 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma çözümü.....	107
Şekil 5.11 Otobüs kapasitesi, güzergâh sayısı ilişkisi	108
Şekil 5.12 Güzergâh uzunluğu kısıdı ve güzergâh sayısı ilişkisi	109
Şekil 5.13 Güzergâh uzunluğu kısıdı ve toplam güzergâh uzunluğu ilişkisi.....	109
Şekil 5.14 Yeni istasyon durumu için algoritma çözümü.....	111
Şekil 5.15 İstasyon kapatılma durumu için algoritma çözümü	113

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Mevcut ve önerilen güzergâh ağının karşılaştırılması (Shrivastava ve Mahony, 2007)	21
Çizelge 3.1 Model parametreleri ve karar değişkenleri.....	26
Çizelge 3.2 Sayısal örnek için değişken değerleri.....	37
Çizelge 3.3 Güzergâh yoğunluğu ve izleme süresi.....	37
Çizelge 3.4 Demiryolu hattının başlangıcına uzaklığının, en uygun güzergâh yoğunluğu, izleme süresi ve durak aralığına etkisi	37
Çizelge 3.5 Sınırlandırılmamış durumda, demiryolu hattının başlangıcına uzaklığın, en uygun durak aralığına etkisi - Uygulama 2.....	38
Çizelge 3.6 Sınırlandırılmamış durumda, demiryolu hattının başlangıcına uzaklığın, en uygun durak aralığına etkisi - Uygulama 3	38
Çizelge 5.1 Otobüs duraklarının konum ve talepleri.....	95
Çizelge 5.2 Metrobüs istasyonlarının konumları.....	96
Çizelge 5.3 Temel durum için parametre değerleri	96
Çizelge 5.4 Temel durum için geliştirme oranları.....	101
Çizelge 5.5 Temel durum için güzergâh bilgileri	101
Çizelge 5.6 Değişken talep durum için güzergâh bilgileri	102
Çizelge 5.7 Değişken talep algoritma sonuçları-1	103
Çizelge 5.8 Değişken talep algoritma sonuçları-2	105
Çizelge 5.9 Otobüs kapasitesi test durumu için parametre değerleri	106
Çizelge 5.10 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma sonuçları-1	106
Çizelge 5.11 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma sonuçları-2	108
Çizelge 5.12 Metrobüs istasyonlarının konumları.....	110
Çizelge 5.13 Yeni metrobüs istasyonu durumu için algoritma sonuçları-1	110
Çizelge 5.14 Yeni metrobüs istasyonu durumu için algoritma sonuçları-2	112
Çizelge 5.15 Metrobüs istasyonlarının konumları.....	112
Çizelge 5.16 İstasyon kapatılma durumu için algoritma sonuçları-1	112
Çizelge 5.17 İstasyon kapatılma durumu için algoritma sonuçları-2	114

ÖNSÖZ

Bu konuda çalışmaya başladığımda, ülke genelinde yapılan raylı sistem yatırımlarına karşın, besleyici otobüs ve raylı ulaştırma ağlarının bütünleşmesi probleminin kapsamlı bir çalışması yapılmamıştı, çalışmalarım süresince de bu konuda yapılmış teorik bir çalışmaya rastlamadım. Problemin ortaya çıkışından, son zamanlarda gelmiş olduğu konuma kadar 20 yıllık bir literatür taraması yapmaya çalıştım. Kuah'ın 1986 yılında yaptığı çalışmanın günümüzdeki araştırmalarda hala ana referans olarak kullanıldığını fark ettim. Bunun üzerine, Kuah'ın gösterdiği yoldan giderek bu çalışmayı hazırladım. Lisans öğrenimimde Ulaştırma Anabilim Dalı'ndan aldığım ilk dersten bu zamana kadar benden hiçbir konuda desteğini esirgemeyen başta danışmam hocam Sayın Doç. Dr. İsmail Şahin olmak üzere, özellikle programlama konusundaki büyük yardımları ve ortaya koyduğu yeni fikirleriyle Mustafa Ümit Akçay'a, kısa zamanda sağladıkları veriler için IETT Planlama Bürosu'nun çalışanlarına, heyecanıma ortak olan iş arkadaşlarıma, aileme ve beni "demiryolcu" kültürüyle tanıştıran Prof. Dr. Aydın Erel'e teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Besleyici Otobüs Güzergâhı Tasarım Problemi(BOGTP), işletmeci ve kullanıcı maliyetleri arasında en uygun dengeyi bulma problemi olarak tanımlanmıştır. Öncelikle besleme hatları üzerine yapılmış çalışmaların kısa bir özeti sunulmuştur. Bütünleşik bir besleyici otobüs/raylı ulaştırma ağı tasarım probleminin çeşitli bileşenleri, tasarım elemanları ve aralarındaki ilişki tanımlanmıştır. Problemin çözümünde iki yöntem sunulmuştur; analitik yaklaşım ve ağ yaklaşımı. Sunulan analitik modelin sistem parametrelerindeki değişimlere yanıt vermedeki kullanışlılığı, her biri farklı bir talep dağılımını temsil eden üç örnek probleme uygulanmasıyla gösterilmiştir. Sunulan ağ modelleri, besleyici otobüs güzergâhlarının tasarımı, bu güzergâhlardaki izleme sürelerini ve besleyici otobüs güzergâhlarının demiryolu istasyonlarına erişimini eşzamanlı olarak eniyilemiştir. BOGTP için önerilen çözüm yöntemi, bir başlangıç algoritması ve üç geliştirme süreci içeren iki aşamalı bir sezgiselden oluşmuştur. Bu çalışma kapsamında geliştirilen üçüncü geliştirme prosedürü ile otobüs duraklarının güzergahlar arasında nakli mümkün olmuştur. Geliştirme prosedürlerinin toplam ulaştırma maliyetinde neden oldukları iyileştirme oranları dikkat çekicidir. Duyarlılık analizinin sonuçları, önerilen modelin sistem birleşenlerindeki değişikliklere uygun ve mantıklı karşılıklar verebileceğini gösterir.

Anahtar Kelimeler: Besleyici hatlar, besleyici otobüs, bütünleşik ulaştırma sistemi, kentiçi toplu taşıma, kentiçi raylı sistem

Juri:

Kabul Tarihi: 26.02.2008

1. Prof. Dr. Ergun Gedizlioğlu

Sayfa Sayısı: 129

2. Doç. Dr. İsmail Şahin

3. Doç. Dr. K. Selçuk Öğüt

ABSTRACT

Feeder Bus Route Design Problem (FBRDP) is defined as finding the optimal balance between the user and the operator costs. First of all, a detailed summary of the past studies are submitted. Design components and relations, decision elements of an integrated feeder bus/rail transportation problem are defined. Two methods are presented to solve the problem. The availability of the proposed analytic model to give response to the changes in the system parameters is shown in three different problems reflecting different demand allocations. Proposed network models are optimized simultaneously the design of feeder bus routes, the assignment of operating frequencies to these routes and the connection of feeder bus routes to the rail stations. To solve many to many demand case, a heuristic algorithm which is a generalization of the sequential savings approach is presented. The proposed solution method for the FBRDP constitutes a two-phase heuristic which includes an initial algorithm and three improvement procedures. Reductions in the total transportation cost by the improvement procedures are remarkable. The results of the sensitivity analysis indicate that the proposed model can provide consistent and reasonable responses to various changes.

Keywords: Feeder lines, feeder bus, integrated transportation system, urban public transit, urban rail transit

Jury:

Date: 26.02.2008

1. Prof. Dr. Ergun Gedizlioğlu
2. Doç. Dr. İsmail Şahin
3. Doç. Dr. K. Selçuk Öğüt

Page: 129

1. GİRİŞ

Bir ulaştırma sisteminin hizmet bölgesinde verimli olabilmesi için, çeşitli ulaşım tırlerini, her birinin kendine özgü üstünlüklerini ortaya çıkaracak şekilde bütünleştirmelidir. Bütünleşme, bütünün parçalarından bir bütün oluşturulmasıdır. şehir içi bir bütünleşik toplu taşıma sistemi bağlamında esas tırler, otobüs ve raylı ulaştırma sistemleridir. Otobüs, mevcut sokaklara dağılabildiğı için esnek olma üstünlüğüne sahiptir. Ayrıca birbiriyle bağlantılı ve çakışık güzergâhlarda işletilebilme özelliğine ve bundan dolayı hizmet alanının genişletilebilmesi potansiyeline sahiptir. Raylı ulaştırma sistemi sabit kılavuzlanmış bir yolla kısıtlandığı için esnekliğı azdır. Sunduğı yüksek kapasite nedeniyle, raylı sistemler, yüksek yolcu talebi bulunan koridorlar için başlıca seçenektir.

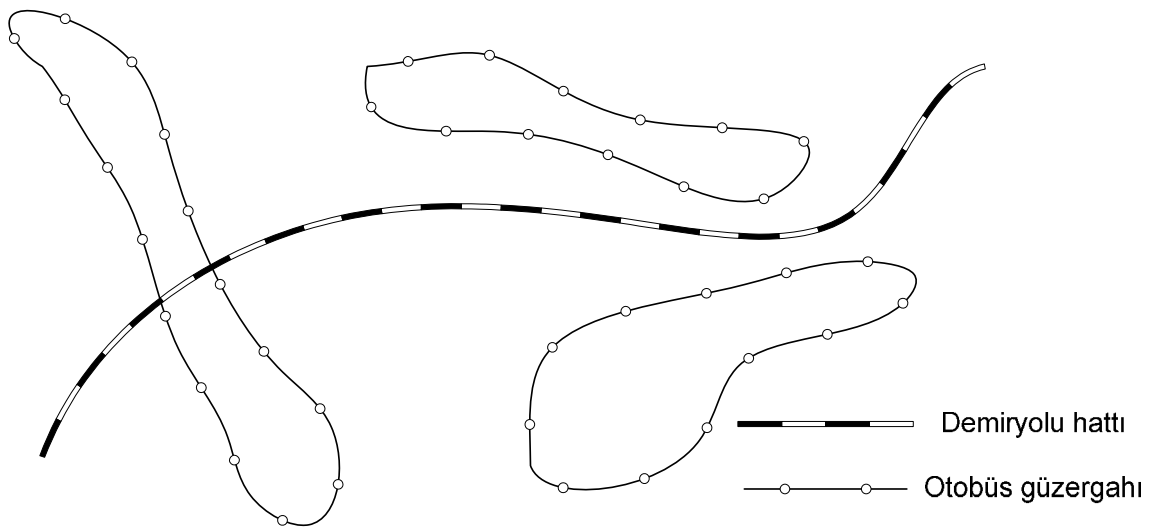
Otobüs ve raylı sistem hizmetleri, eşgüdümlü güzergâh yapıları, ücret yapıları ve zaman çizelgeleri ile bir kapsamlı ulaştırma sisteminin birleşenleri olarak işletildiğinde tamamen bütünleşmiş olurlar. Bütünleşik bir ulaşım sisteminde, tırler arasında veya aynı tırün güzergâhları arasında geçiş yapıldığında aktarma ücreti ya çok az olmalı ya da hiç olmamalıdır ve paralel hizmetler bulunmamalıdır. Genel olarak, iyi bir bütünleşik besleyici otobüs / raylı ulaştırma sistemi, sunulan hizmetin maliyetini azaltır. Maliyetteki bu azalma, hem her bir tırün içsel üstünlüğünün kullanılması, hem de paralel hizmetlerin ortadan kaldırılmasıyla sağlanabilir. İyi bir bütünleşik ulaşım sistemi, ayrıca kapsama alanını geliştirerek ve aktarma sayılarını azaltarak hizmet düzeyini iyileştirebilir.

Paralel hizmetlerde olduğı gibi çeşitli ulaştırma tırlerinin elverişsiz kullanımları da bütünleşik olmayan bir sistemindeki gereksiz maliyetlere yol açar. Bununla birlikte, ulaştırma sistemi içindeki tırlerin bütünleşme eksikliğı, kullanıcılara sağlanan hizmetin kalitesini zayıflatarak, kullanıcı olmayanları da etkileyen olumsuzluklarla sonuçlanır. Zayıf bir bütünleşik otobüs/raylı ulaşım sistemi kentsel alanın kapsanmasında başarısız olarak, yolcu erişim maliyetlerinde artışa neden olacaktır. Bu yetersizlik ayrıca aktarma sayılarında yüksek artışlara neden olacaktır. Bununla birlikte, otobüs ve raylı sistemlerin güzergâh yapıları ve zaman çizelgelerindeki zayıf bütünleşme, yolcular için iyi bir bütünleşik sistemde karşılaşacaklarından daha uzun yolculuk sürelerine neden olacaktır.

Kullanıcıların zayıf bir bütünleşik ulaşım sistemini kullanırken karşılaştıkları yüksek maliyeti karşılamak için yaptıkları ek maliyete, bir de hizmetin zayıf bütünleşme nedeniyle azalan kalitesinin neden olduğı daha geniş sosyal ve çevresel maliyetler de eklenir. Bir zayıf bütünleşik ulaştırma sistemi yolcuların günlük yolculukları için otomobil tırünü seçmelerine

neden olur. Bu durum da doğrudan karayolu tesisleri için ek ihtiyaçlara ve ulaştırma enerjisinin tüketiminde artışa neden olur. Bunun dışında, öncelikle şehir merkezlerinde gürültü ve hava kirliliğini artırır.

Otobüs ve raylı ulaştırma sistemindeki bütünleşmenin özel bir çeşidi, otobüslerin esas olarak raylı sistem ağına erişim için kullanılmasıdır. Bu tür bir işletme tercihinde, otobüs sistemi raylı ulaşım sistemine bir besleyici olarak kullanılır. Besleyici hatlar, belirli (yerel) bölgelerden gelen yolcuların, şehrin bütününe veya belirli bir bölgesine hizmet eden daha ağır ulaştırma türlerine (örneğin, metro) erişimini sağlayan hatlardır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Besleyici otobüsler (Grava, 2002)

Otobüs ve raylı ulaşırmadaki bu bütünleşme bazı özel ek üstünlükler sağlar. İlk olarak iyi bir bütünleşik besleyici otobüs/raylı ulaştırma sistemi, çoğu özel araç sürücüsünün otomobilleri yerine otobüs ile raylı sisteme erişmeyi tercih etmesine neden olacaktır. Bu durum, demiryolu istasyonlarında park için gerekli alanda azalmaya ve böylece raylı sistem sermaye yatırımında azalmaya neden olacaktır. İkinci olarak, bir iyi bütünleşik besleyici otobüs/raylı ulaştırma sistemi, aslında otomobille yapılan yolculukları (esas olarak iş yolculuklarını) etkileyebilir ve böylece özel olarak da raylı sistemin ve bir bütün olarak da ulaştırma sisteminin finansal gücünü artırır.

Çalışmanın 2. Bölümünde bütünleşik ulaşım ağ tasarımı üzerine yapılmış çalışmalar yer almıştır. Bunun ardından 3. Bölümde, Besleyici Otobüs Ağ Tasarım Problemi (BOATP) tanımlanmış ve analitik model sunulmuş; burada BOATP için ağ modellerinin matematiksel programlama formülasyonları ortaya konulmuştur. Öncelikle tekil hedefli bir talep olması

durumunda formülasyon sunulmuş, bu formül daha sonra çoklu hedefler durumu için genişletilmiştir. 4. Bölümde ise ağ modelleri için çözüm algoritmaları sunulmuştur. Önerilen model tarafından sağlanan çözümlerin geçerliliği 5. Bölümde incelenmiştir: Modelin bir bütünleşik besleyici otobüs/raylı ulaşım ağı tasarımı için bir stratejik planlama aracı olarak geçerliliğinin değerlendirilmesi için geniş bir analiz gerçekleştirildi. 6. Bölümde ise sonuçlar ve çalışmanın bulguları özetlenmiş; önerilen modellerin sınırları belirtilmiş, araştırmanın katkıları ortaya konularak ve sonraki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

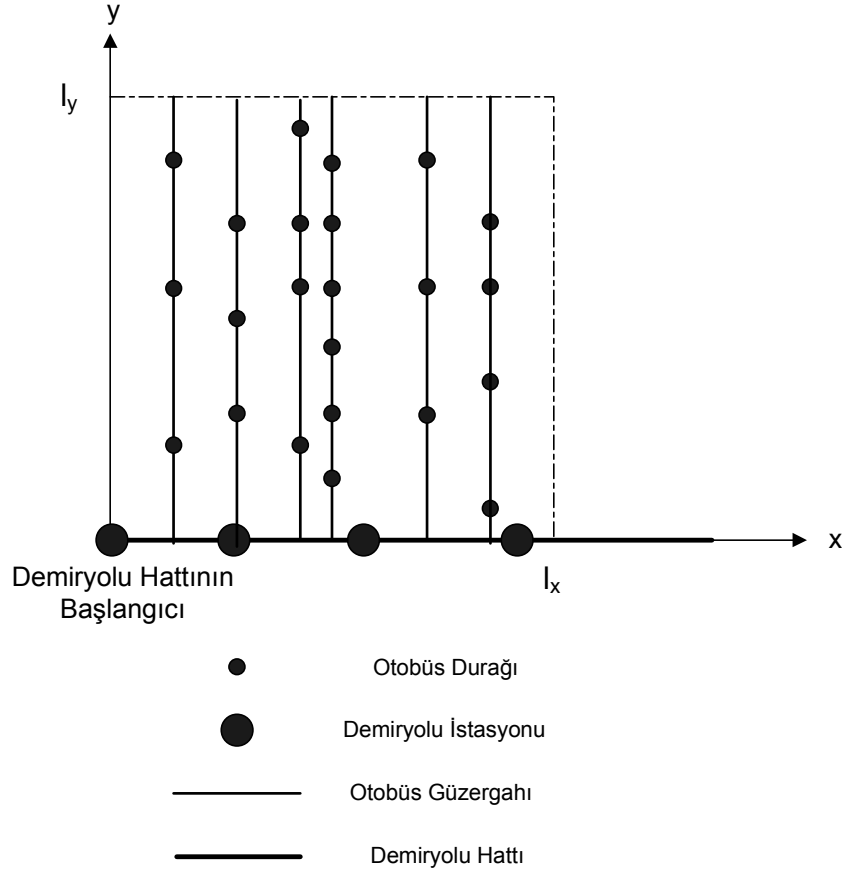
Bu bölümde, Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi (BOATP) üzerine şimdiye kadar yapılmış çalışmaların geniş bir değerlendirmesi sunulmaktadır. BOATP üzerine yapılan ilk çalışmalar arasında bulunan Kuah (1986), bu çalışma ile kendinden sonrakilere ışık tutmuş, problemin çözümünde daha sonraları genetik algoritmalar ve karınca kolonisi gibi modern yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatür araştırması bölümünde bu çalışmalara değinilmiştir.

2.2 Problemin Ortaya Çıkışı ve İlk Çalışmalar

Kuah (1986), çalışmasının giriş kısmında kendisini bu tarz bir çalışmaya yönlendiren nedenleri belirtmiştir;

"Ulaştırma endüstrisi, işletme maliyetlerindeki artış ve kaynaklardaki azalma nedeniyle son zamanlarda ciddi bir finansal bunalım içindedir. Ulaştırma hizmetindeki zararları azaltmak için önerilen yöntemler arasında, daha iyi bütünlüklü ulaştırma sistemlerinin geliştirilmesi bulunmaktadır; böylece, maliyetler azaltılırken aynı anda da gelirler arttırılabilmektedir. İlave özel üstünlükler içeren bütünlükle türlerinden biri, otobüs taşımacılığının hızlı raylı ulaştırma sistemine bir erişim türü olarak kullanılmasıdır. Bu tarz bir bütünlüklü otobüs/raylı ulaştırma sistemi tasarımının, sistemde yaşanan finansal bunalımı azaltma yönündeki potansiyeli literatürde yaygın bir şekilde tartışılmıştır. Buna karşın, bir bütünlüklü otobüs/raylı ulaştırma sistemi tasarımı için hala kullanılabilir sistematik bir yöntem yoktur. Bu araştırmanın amacı böyle bir yöntem geliştirmektir" (Kuah, 1986).

Kuah'ın bu amacına ulaşmak için bahsettiği sistematik yöntem, mevcut bir raylı sisteme erişim için bir besleyici otobüs ağının tasarımının analitik ve ağ modellerinin birbirlerini bütünler bir tarzda kullanılarak, eniyileme esaslı bir çözümün geliştirilmesidir. Sonraki bölümde üzerinde duracağımız analitik modelin (Şekil 2.1) amacı, göreceli olarak küçük bir hesaplama çabası ile probleme yaklaşık çözümler sağlamak, bundan daha önemlisi de tasarım değişkenleri ve sistemin çeşitli parametreleri arasındaki ilişkinin kavranmasını sağlamaktır. Daha sonra üzerinde duracağımız ağ modeli ise, gerçekçi durumlarda daha doğru çözümler sunarken, oldukça zahmetli hesaplar yapmayı gerektirmektedir.

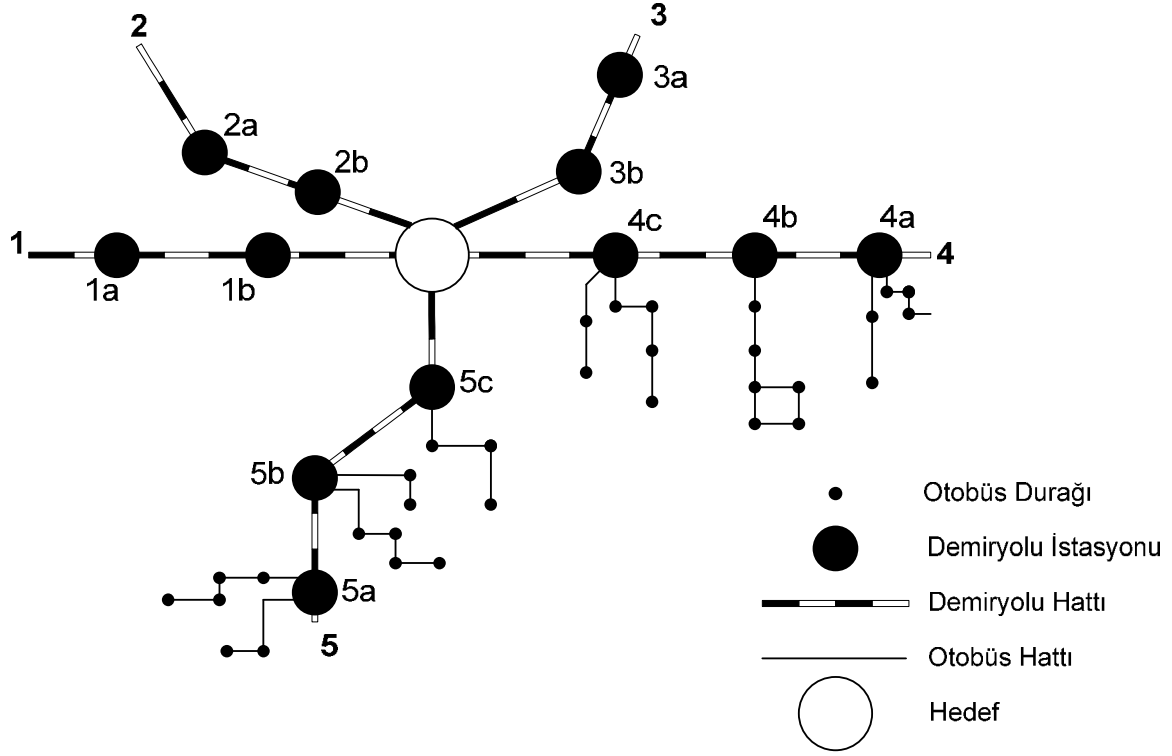


Şekil 2.1 Analitik yöntem için hizmet alanı yapısı (Kuah, 1986)

Otobüs sisteminin hizmet özelliklerinin belirlenmesi olarak tanımlanan Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi'nde, otobüs duraklarının ve otobüs güzergâhlarının mevcut bir raylı ulaşım sistemine erişim için konumlandırılması yapılırken, raylı ulaştırma sistemi önceden verilmiş demiryolu istasyonları ve demiryolu hatları ile tanımlanır. Bir besleyici otobüs sisteminin amacı, mevcut bir raylı ulaşım sistemine erişimin, işletmeci ve kullanıcı maliyetleri arasında en iyi dengeye ulaşılarak verimli bir şekilde sağlanmasıdır. Dolayısıyla bu amaç, işletmeci ve kullanıcı maliyetlerinin enküçüklenmesi olarak da tanımlanabilir. İşletme maliyetleri; personel, yakıt ve bakım maliyetlerini içerdiğinden, kat edilen uzaklık ile ilişkili (orantılı) olarak tanımlanabilir. Kullanıcı maliyeti olarak da erişim, bekleme ve seyir sürelerinin maliyeti dikkate alınabilir; ulaşım ücreti, kullanıcılardan işletmeye transfer niteliğinde düşünüldüğünden, enküçüklenmek istenen toplam maliyet fonksiyonunun bir bileşeni olarak dikkate alınmamıştır.

Besleyici otobüs sisteminin tasarımında ele alınan karar bileşenleri; otobüs güzergâhlarının konumları, otobüs duraklarının konumları ve her bir güzergâhtaki hizmetin sıklığıdır. Karar değişkenlerinin tanımları, benimsenen tasarım yaklaşımına göre farklılık gösterebilir. Diğer

bir önemli fark da, analitik yaklaşımda otobüs duraklarının konumları model tarafından belirlenirken, ağ yaklaşımında otobüs duraklarının konumları önceden tanımlı olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Ağ yöntemi için hizmet alanı yapısı (Kuah, 1986)

Mevcut eniyileme yöntemleri ile kesin olarak çözülemeyen BOATP için bir sezgisel çözüm sunulmuştur. Sezgisel yaklaşımının temelini, aralarındaki benzerlikler dikkate alınarak Çok Garajlı Taşıt Güzergâhlama Problemi (ÇGTGP) oluşturmaktadır. Test problemi kapsamında yapılan duyarlılık analizinin sonuçları, önerilen modelin sistem parametrelerindeki değişikliklere uygun ve mantıklı karşılıklar verdiğini göstermiştir.

Özet olarak Kuah (1986), amacı dikkate alındığında bir ilk olarak nitelenebilecek kapsamlı çalışmada, bütünlük bir besleyici otobüs ve raylı ulaşım sistemi tasarım probleminin bileşenlerini, bu bileşenler arasındaki ilişkileri ve bütünlük bir ağ tasarımına uygun tasarım amacını tanımlamıştır.

BOATP üzerinde sürdürülen çalışmalarda Kuah ve Perl (1988), problemin çözümünde, önceki çalışmalarda olduğu gibi otobüs güzergâhlarının konumlarını, otobüs duraklarının konumlarını ve her bir güzergâhtaki hizmetin sıklığından oluşan karar bileşenlerini ayrı ayrı değil, aynı çözüm içinde optimize edilmesini amaçlamıştır.

Analitik yöntem kullanılan bu çalışmada, otobüs durak aralığı ile ilgili olarak değişik işletme tutumlarını yansıtan üç değişik durum dikkate alınmıştır. İlk durumda otobüs durak aralıklarının tüm hizmet alanı içinde sabit bir değerde olduğu kabul edilmiştir. İkinci durumda ise problem biraz daha genişletilerek, otobüs durak aralıklarının her bir otobüs güzergâhı boyunca sabit olduğu dikkate alınmıştır. Problemin gerçek duruma biraz daha yaklaştığı üçüncü durumda ise, otobüs durak aralıklarının güzergâhlar arasında veya güzergâh boyunca değişken olabileceği üzerinde durulmuştur.

Karar birleşenlerinden biri olan otobüs durak aralığı, bu çalışmanın öncesine kadar otobüs ağı tasarım problemlerinin dışında tutulmuştur. Kuah ve Perl (1988) ise bu çalışmalarında temel karar birleşenleri olarak otobüs güzergâhlarının konumlarını, otobüs duraklarının konumlarını ve her bir güzergâhtaki hizmetin sıklığını ele almışlardır.

Burada tasarımın amacı otobüs kullanıcılarının ve hizmet sağlayıcıların karşılaştığı toplam maliyeti enküçüklemektir. Otobüs durak aralığı, yolcuların yürüme uzaklığına, dolayısıyla da yürüme süresi ve yolcuların araç içindeki süresine etki etmektedir. Bu nedenle de otobüs durak aralığı, otobüs ağı tasarım probleminin ayrılmaz bir parçası olarak tanımlanmıştır.

BOATP'nin çözümünde, hizmet alanındaki değişik talep dağılımlarını dikkate alan üç sayısal örnek sunulmuştur. Durak aralığının tüm ulaşım sisteminde veya her bir güzergâhta sabit olması durumunda, ortaya konulan en iyi durak aralığının, yürüme hızı, sürüş süresi ve bir otobüs durağındaki ortalama zaman kaybının artmasıyla ile artış gösterdiği, yürüme süresinin değerinin azalması ile azaldığı belirlenmiştir.

Çalışmanın sonuçları Kuah (1986) ile örtüşmektedir. Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi'nde, analitik modelin küçük hesaplamalarla temel tasarım bileşenleri için en iyiye yakın değerler verdiği gösterilmiştir.

2.3 Problemin Kapsamının Genişlemesi

BOATP'nin ortaya konulmasının ardından ilerleyen zaman ile birlikte, konumlandırma probleminin ulaştırma sistemlerinde tahmin edilenden daha geniş bir alana yayıldığı anlaşılmıştır:

"Benzer bir problem, küçük uçakların değişik küçük bölgelerde dağılmış yolcuları toplayarak bu yolcuları daha büyük havayolu şirketlerinin alanlarındaki daha büyük uçaklara ulaştırması zorunluluğu ile ortaya çıkmaktadır. Diğer sorunlar da iletişim ve elektrik güç dağıtım ağı gibi çeşitli alanlarda ortaya çıkmaktadır" (Martins ve Pato, 1996).

Martins ve Pato'nun (1996), besleyici otobüs ağı tasarım probleminde araştırma yöntemleri üzerine yaptıkları çalışmanın ilk cümlelerini yukarıdaki paragraf oluşturmaktadır. BOATP'ni yönlendiren etmen artık yalnızca finansal bunalımların doğurduğu zorunluluklar değil, endüstriyel bir ihtiyaç olmasıdır.

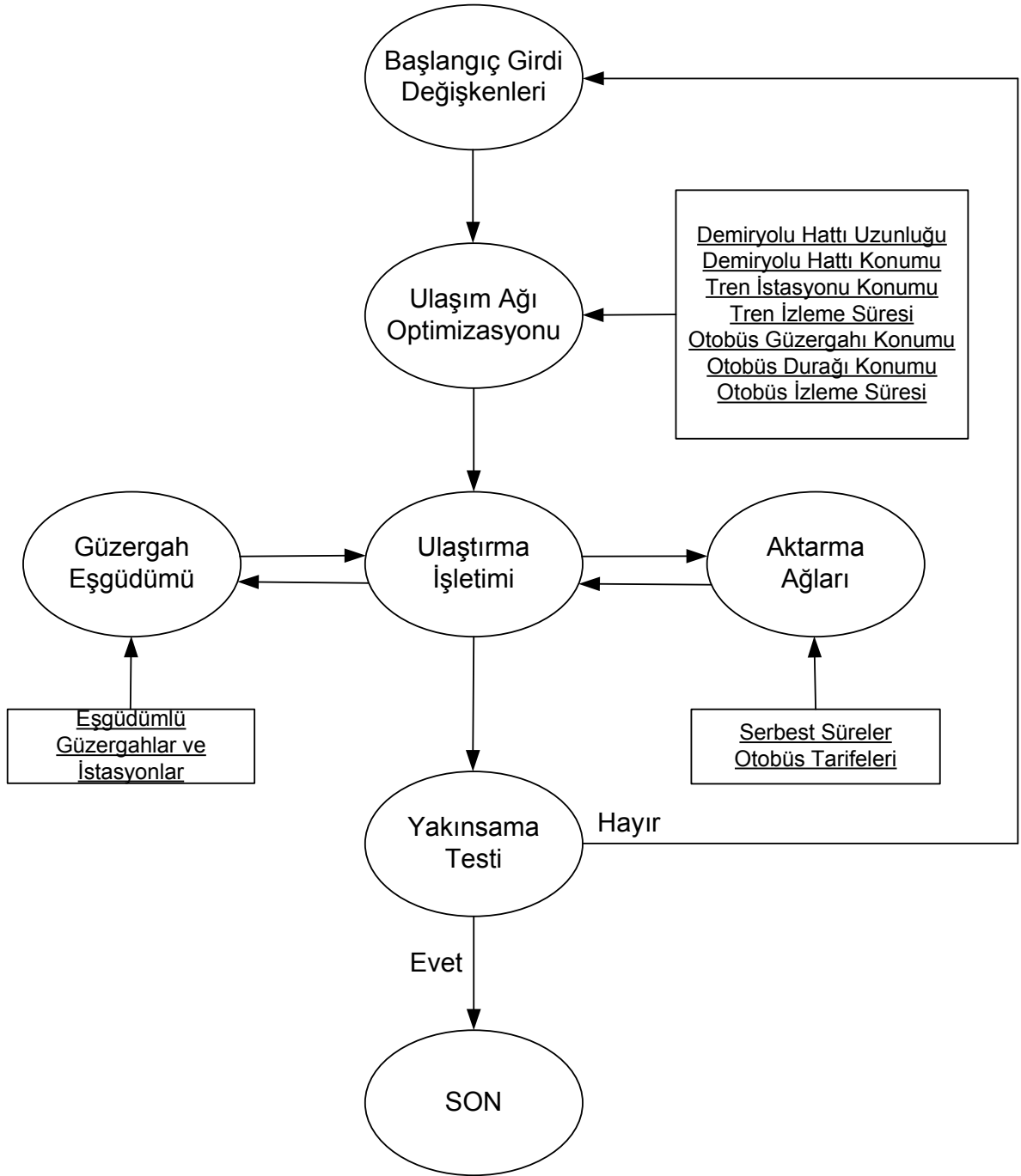
Problemin gelişmesiyle birlikte geliştirilen çözüm yöntemleri gittikçe daha gerçekçi sonuçlara doğru yol alınmasını sağlamıştır. Karmaşık problemlerin çözümü için geliştirilen ana sezgisellerden tabu araştırması problemin çözümünün bir parçası olarak kullanılmıştır. Gerçek yaşam koşullarının daha yoğun yansıtıldığı sayısal örnekler, sezgisel yöntemlerin BOATP için uygun sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Gelişen teknoloji, günlük koşuşturmalar içinde harcanan zamanın gün içindeki değerinin giderek artması, farklı kavramların da bu bütünleşme probleminin bir parçası olmasını gerektirmiştir. Chien (1995) çalışmasının amacını açıklarken, çok türlü iyi bir ulaştırma sistemi tanımında, kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinde hedeflenen denge ve verimlilikten bahsetmiştir. Talep, zaman ve mekân içinde kimi zaman olağandışı, düzensiz, önceden tahmin edilemez ve ulaştırma güzergâhının karşılıklı yönlerinde değişken olma özelliğini sürdürdükçe, sistemlerin bütünleşmesinde hedeflenen *verimlilik* niteliğini etkilemeyi sürdürecektir.

Problemin yeni hedefine ulaşması için aynı zamanda kapsamının da genişlemesi gerekmekte, otobüs ve raylı sistem hizmetlerinde hedeflenen bütünleşme artık problemin parçalarından olmaktadır. Chien (1995), karmaşık ulaştırma ağlarının, değişken ve önceden tahmin edilemeyen trafik koşullarının, özellikle aktarma istasyonlarında sıkıntısı çekilen verimli bir eşgüdümüne ulaşabilmek için aşağıdakilerin belirlenmesindeki önemi vurgulamıştır:

- 1) Toplu taşıma sistemlerinin güzergâhlarının ve istasyonlarının konumları,
- 2) İzleme süreleri,
- 3) Koordine edilecek tüm toplu taşıma güzergâhları için yolculuk süresi,
- 4) Demiryolunun kent merkezinden dışarıya doğru ne kadar uzatılabileceği ve
- 5) Raylı sistemin besleyici otobüs sistemi ile tarife eşgüdümünün üstünlükleri.

Çalışmada sunulan sistemin genel çerçevesi Şekil2.3'te gösterilmektedir,



Şekil 2.3 Sistem birleşimi (Chien, 1995)

Toplu taşıma ağlarının tasarımında güzergâhların ve istasyonların konumlarının belirlenmesi, karşılaşılan esas problemlerden biridir. Burada dikkate alınması gereken nokta hizmet sıklığının bu araştırmadaki yeridir; çünkü güzergâhlardaki izleme süreleri hizmet verilen yolcu sayısı ile ilişkilidir.

Mevcut çok türlü ulaştırma sistemlerinin tümünde izleme süreleri dengesizlik (farklılık)

Şekil 2.4 Kentiçi ulaşım ağının düzeni (Chien, 1995)

Geçmişteki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, problemi çözebilmek için kullanılan basitleştirici kabullerin birçoğu ortadan kaldırılmış veya esnetilmiştir (hafifletilmiştir):

- 1) Hizmet bölgesi düzenli bir şekilde değil, düzensiz de olabilir.
- 2) Talep hizmet bölgesinde gelişigüzel dağılmış, çoktan-bire veya birden-çoğa değil, çoktan-çoğa olabilir.
- 3) Hizmet bölgesindeki arazi kullanımı ve diğer coğrafi özellikler tüm bölgede farklılıklar gösterebilir.
- 4) Otobüs varış düzeni deterministik değil rasgele (stokastik) olabilir.
- 5) Taşıtların bekleme süreleri sabit bir değer değil, yolcuların duraklardaki giriş ve çıkışlarına (taşıta biniş ve inişlerine) bağlı bir fonksiyon olabilir.
- 6) Ulaştırma sisteminin birimleri olan istasyonlar, duraklar ve güzergâhlar hem hizmet bölgesinde hem de güzergâhlar boyunca gelişigüzel konumlanmış olabilir.

Chien (1995), bu kabulleri ortadan kaldırarak problemi daha gerçekçi bir zemine oturtmayı başarmıştır. Bunun dışında, düzensiz biçimli bir hizmet bölgesinde çok türlü ulaştırma ağı optimizasyon problemini çözmüş, çoklu aktarma istasyonları ve çoklu toplu ulaştırma güzergâhlarındaki eşgüdüm problemini ortaya koymuş, çok türlü toplu ulaştırma ağı tasarımı ve eşgüdümü problemlerini birlikte optimize etmiş ve bu problemlerin çözümlerinde değişkenler ve parametreler arasında matematiksel bağlantılar kurarak analiz ve optimizasyon işlemleri sırasında bilgisayarlardan yararlanmıştır.

Özet olarak, talep ve arz değerleri sürekli değişken özelliğe sahip bir hizmet bölgesinde, bir demiryolu sistemi ve ilgili besleyici otobüs sisteminin özelliklerini birlikte optimize etmek için, çok türlü toplu taşıma ağı optimizasyonu ile güzergâh eşgüdümünden oluşan iki alt modelden oluşan bir model geliştirilmiştir. Kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin enküçüklendiği ağ özellikleri ve işletme sıklıkları, kapasite kısıtları dikkate alınarak ve alınmadan belirlenmiştir. Karar değişkenlerinin (istasyon aralığı, otobüs güzergâh aralığı, durak aralığı, raylı sistem ve otobüs izleme süreleri gibi) en iyi değerleri analitik olarak belirlenirken, en uygun raylı sistem uzunluğu ve konumu sayısal olarak belirlenmiştir.

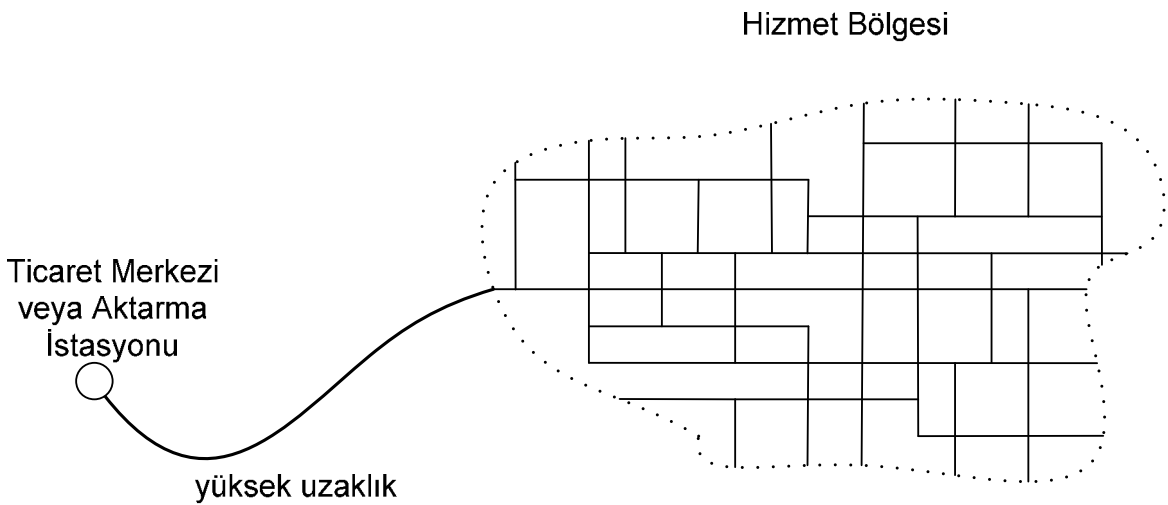
Problemin her adımında daha da gerçek duruma yaklaşılmasını hedef olarak benimseyen Chien, sonraki çalışmalarında da (Chien ve Yang, 1999) bu yönelimini sürdürmüştür. Otobüs güzergâhının en iyi konumunun ve işletme sıklığının belirlenmesinin hedef alındığı çalışmada

da, yine, düzensiz bir hizmet bölgesi dikkate alınmıştır. Talep dağılımının düzensiz ve süreksiz durumu ile aktarma istasyonlarındaki gecikmeler önerilen modele yansıtılmıştır.

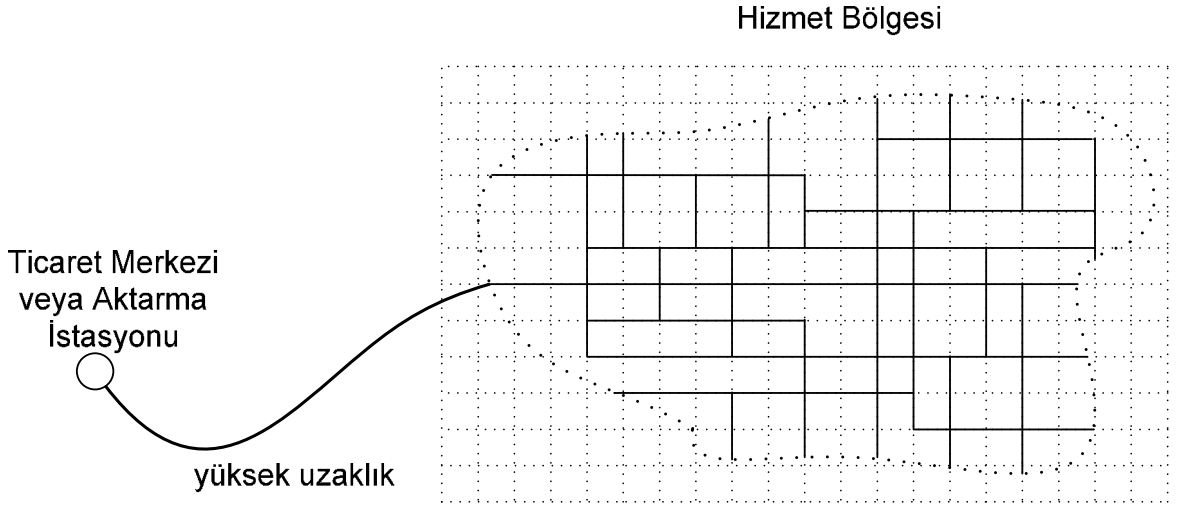
Üzerinde durulan ana konulardan biri de güzergâh ağının tasarımıdır:

"Toplu taşıma sisteminin planlanmasındaki en önemli unsurlardan biri de güzergâh ağının tasarımıdır. Otobüs güzergâhları için genellikle doğrusal ana caddeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çoğu hizmet bölgesindeki düzensiz talep dağılımı dikkate alındığında, bu tarz ana caddelerdeki güzergâh konumlandırmaları maliyet etkin olmayabilir. Bu nedenle, otobüs güzergâhlarının tekrar konumlandırılması ve ilgili izleme sürelerinin belirlenmesi, işletme maliyetlerini azalttığı gibi, toplu taşıma sisteminin erişebilirliğini de iyileştirebilir. Toplu taşıma işletmecileri işletme maliyetlerini, yolcular da taşıt içinde geçen süreyi azaltmak için kısa ve hızlı güzergâhları tercih ederler. Buna ek olarak, yolcular ayrıca yolculuklarının başlangıç veya bitiş noktalarından kolaylıkla erişebilecekleri otobüs güzergâhlarını tercih ederler. Bu nedenle, erişimin zorluğunu azaltmak için, taşıt içinde geçen süreyi ve işletme maliyetlerini arttıracak olmasına karşın, dolambaçlı güzergâhlar da dikkate alınmalıdır. Toplu taşıma işletmecileri bir hizmet bölgesinde yeni bir otobüs güzergâhı planlarken veya mevcut bir otobüs güzergâhını uzatırken, bu durumu dikkate almalıdır" (Chien ve Yang, 1999).

Bu hedeflerin gerçekleştirilmesi için kaçınılmaz olarak problemi basitleştirici kabuller de yapılmıştır. Örneğin düzensiz bir ızgara ağı yapısına sahip olan hizmet bölgesi (Şekil 2.5) daha küçük birçok dörtgen parçaya ayrılmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.5 Hizmet bölgesi ve düzeni (Chien ve Yang, 1999)



Şekil 2.6 Basitleştirilmiş ağ düzeni (Chien ve Yang, 1999)

Hizmet bölgesinde güzergâhı sabit yalnızca bir otobüs güzergâhı dikkate alındığı için bölgenin talep dağılımı, sabah zirve saatlerde çoktan bire, akşam zirve saatlerinde birden çoğa olacaktır. Talebin hizmet kalitesinden bağımsız olduğu ve hizmet bölgesinin her bir parçasının içinde düzenli dağıldığı, ama parçalar arasında değişebileceği dikkate alınmıştır. Bu kabullerden en önemlilerinden biri de otobüslerin güzergâhları boyunca herhangi bir noktada yolcu isteklerine göre duruş yapabileceğidir (bu durum otobüsten inmek isteyen veya otobüse binmek isteyen yolcular için geçerlidir). Bununla birlikte otobüslerin kapasitesinin daima yeterli olduğu kabul edilmiş, çalışmada otobüs kapasiteleri dikkate alınmamıştır.

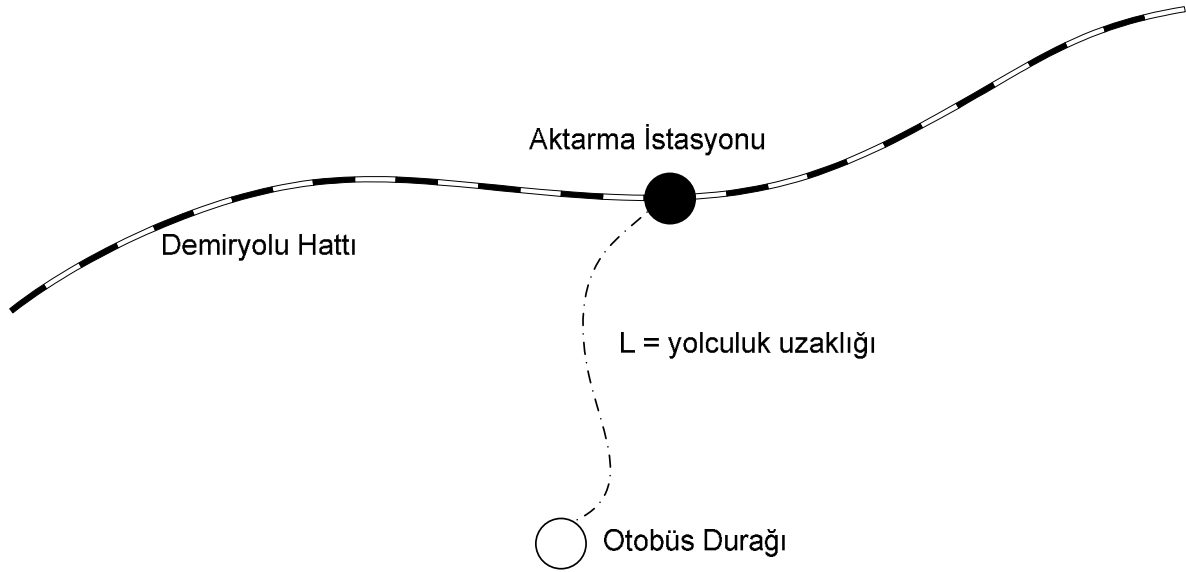
Amaç olarak, kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin enküçüklenmesine dayanan model üzerinde uygulanan duyarlılık analizleri de, modelin zamanla değişen talep dağılımları dikkate alınarak besleyici otobüs sistemlerinin güzergâhlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Gerçekçi koşulları hesaba katmanın birçok üstünlüğünün olmasının yanında, dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de önerilen modelin yalnızca bir otobüs güzergâhı için uygulanabileceğidir.

Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi'nin etki alanı dünyanın değişen çevresel koşullarından da etkilenmiş, araştırmacılar bu koşulları da dikkate almak zorunda kalmıştır. Araştırmacıların, kendilerini besleyici otobüs sistemleri üzerinde çalışmaya iten nedenleri açıkladıkları bölümlerde maliyet ile birlikte çevresel koşullar da yer bulmaya başlamıştır.

"Verimli bir toplu taşımacılık, hava kirliliğinin önlenmesi, enerji tüketiminin azalması, hareketliliğin artması ve trafik karmaşasının azaltılmasının potansiyel yollarından biri olarak benimsenmiştir" (Chien, 2005).

Kentiçi toplu taşımacılık sistemlerindeki verimsizlik, taşınan yolcu sayısını iyileştirememiş, adeta insanları kaçırmıştır. Yeni binyılın başlarında insanların çoğu günlük yolculuklarında özel araçlarını kullanmaktadır. Özel araç kullanımı arttıkça da trafik ve çevresel koşulların olumsuzlukları gittikçe artmaktadır.

Toplumsal ve çevresel koşulların BOATP'deki önemine de değinen Chien (2005), araç tarifeleri, otobüslerin erişebilirliği, sağlanan hizmetin kapasitesi ve bütçe kısıtlarını dikkate alarak, bir trafik çekim merkezi ile ana bir toplu taşıma durağı (otobüs durağı, tren istasyonu vb.) arasındaki taşımacılık hizmetinin, kullanıcı ve işletmeci maliyetleri doğrultusunda toplam maliyetini enküçüklenemeyi hedeflemiştir. Çalışmanın odak noktası, Şekil 2.7'de gösterilen raylı sistem ile besleyici sistemi, toplam maliyeti (kullanıcı ve işletmeci maliyetleri) talep, yolculuk süresi, otobüs izleme süresi, araç kapasitesi ve güzergâh uzunluğu etmenlerini dikkate alarak birleştiren bir aktarma istasyonudur.



Şekil 2.7 Ağ düzeni (Chien, 2005)

Amaç fonksiyonun oluşturulmasında aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

- Besleyici hizmet için gösterilen talep güzergâhın iki ucunda yoğunlaşmıştır.
- Araçlarını aktarma istasyonu yakınına park ettiği düşünülen yerel kullanıcıların ve ziyaretçilerin aktarma istasyonundaki ortalama bekleme süresi otobüs izleme süresinin yarısıdır.
- Trenler aktarma istasyonlarına belirlenmiş tarifeleri doğrultusunda varırlar. Bu nedenle besleyici hizmeti kullanacak olan tren yolcularının bekleme süreleri bu iki hizmet arasındaki eşgüdümünün düzeyine bağlıdır.

Toplam maliyetin enküçüklenmesiyle, karar değişkeni olarak atanan otobüs izleme süresinin,

araç kapasitesinin ve güzergâh seçiminin en uygun değerleri belirlenmiştir. Hem analitik hem de sayısal yöntemler çözüm sürecinde kullanılmıştır. Önerilen çözüm, ayrıca, bir örnek olay üzerine uygulanmış, verimli ve maliyet etkin bir besleyici hizmetin olabilirliği ortaya konulmuştur.

2.4 Probleminin Çözümüne Getirilen Yenilikler

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki insanların yaşam şartlarındaki iyileşme (daha fazla boş zaman, net gelirlerindeki artış) ve arazi kullanım modellerindeki değişim (sosyal etkinliklerin daha geniş bir çevreye yayılması, düşük yoğunluklu çevresel gelişmeler), otomobilleri, esneklikleri ve kullanım kolaylığı nedeniyle, ulaştırma sisteminin evrensel bir türü haline getirmiştir.

"Problemi uygun bir şekilde tanımlamak, problemin çözümü yolunda atılmış önemli bir adımdır" (Ceder ve Yim, 2003). Çalışmalarına bu tespit ile başlayan araştırmacılar genel olarak bir yerleşim bölgesi için toplu taşımanın hedeflerini şöyle sıralamaktadır;

- 1) Trafik karmaşasını hafifletmek için uygun bir maliyet yaklaşımının bulunması,
- 2) Park problemlerinin ortadan kaldırılması,
- 3) Kazaların azaltılması,
- 4) Hava kirliliği seviyesinin iyileştirilmesi.

Tanımlanan hedeflerden de anlaşılmaktadır ki ulaşım sisteminin amacı gelişen yaşam koşullarına bağlı olarak gelişmektedir. Bu gelişme Avrupa Komisyonu'nun 1999 yılındaki OECD çalışmasında şu şekilde belirtilmiştir: *"Ulaşımın ana hedefi 70'li yıllara kadar toplumun zengin bireylerinin şahsi ihtiyaçlarını karşılamak iken, bunun yerine tıkanıklığın azalması ve çevresel iyileştirmeler için yapılan, toplu taşımaya yönelik politik söylevler giderek değişmektedir. Bu durum açıkça toplu ulaşım sisteminin amacındaki önemli değişimi ortaya koyar; toplu taşımaya biçilen rol, artık onu kullananların bireysel ihtiyaçlarını karşılamaktan çok, ortak refah tatmininin sağlanmasıdır"*.

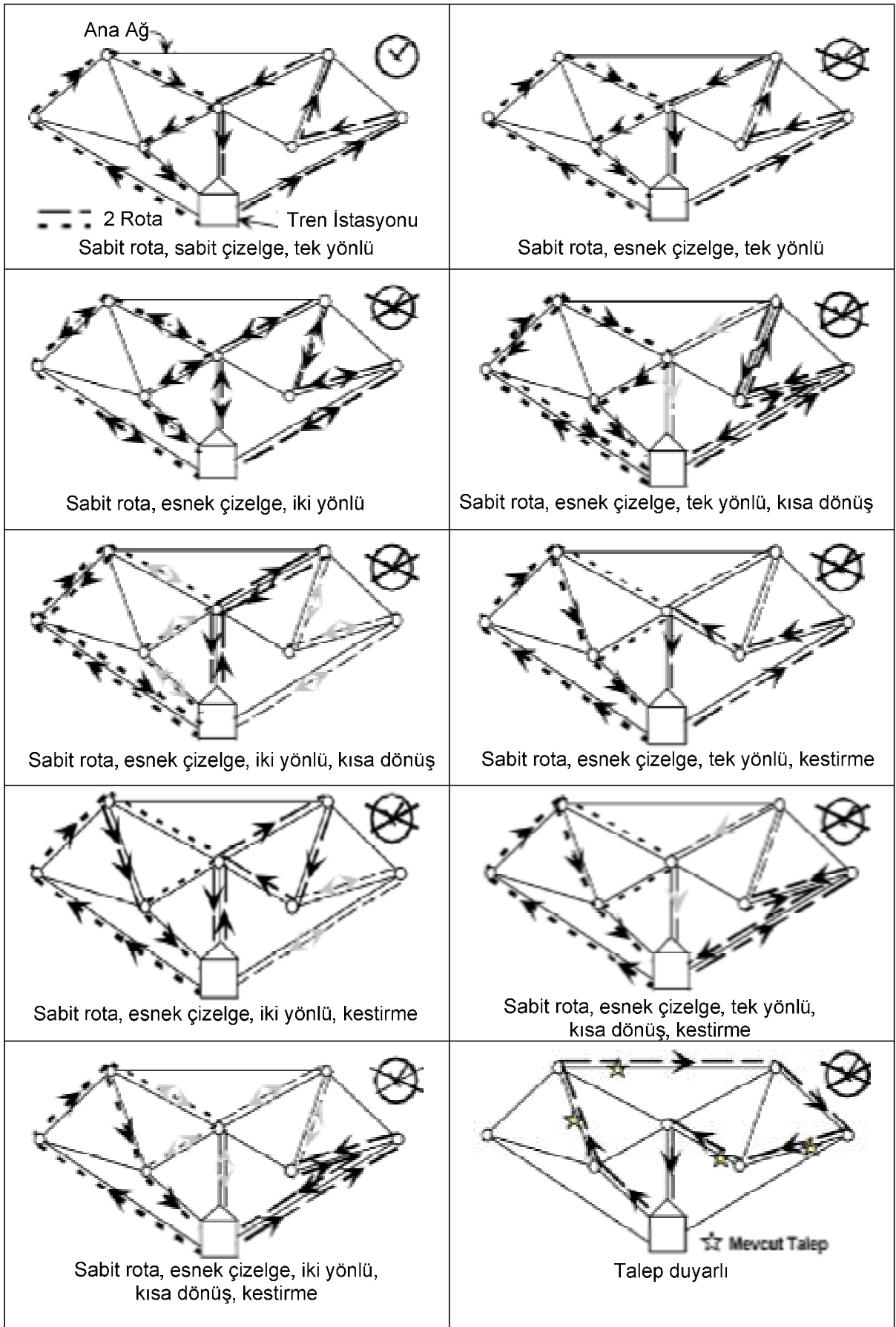
Ceder ve Yim (2003) ulaşım sisteminin hedefinin gelişmiş ülkelerde geçirdiği evrimi dikkate alarak bütünleşik akıllı besleyici/mekik otobüs hizmetinin tasarımı için yeni bir fikir oluşturmaya çalışmıştır. Besleyici otobüs hizmetinin önüne getirilen "akıllı" tanımı ile, yolculara kapıdan kapıya akıcı ve eşzamanlı aktarmalar ile hizmet edilen, güvenilir ve görece daha hızlı olan üst düzeyde ve cazip bir besleyici/mekik otobüs hizmeti hedeflenmiştir. Bu

doğrultuda çalışmalarının amacı olarak da son kullanıcıların ihtiyaçlarını ve beklentilerini karşılayan, akıllı ulaştırma teknolojilerini kullanan ve işletim verimliliğini arttıran yenilikçi bir besleyici/mekik sistemin tasarımı tanımlanmıştır (Şekil 2.8).

Hedeflenen yenilikçi besleyici/mekik sisteminin tasarımı için, yeni bütünleşme ve güzergâh stratejileri, on farklı güzergâh stratejisi üzerinde tanımlanmıştır.

Bu stratejilerin değerlendirilmesinde çalışma kapsamında geliştirilen ve oluşturulan bir simülasyon modeli kullanılmıştır. Bu simülasyon aracı ile kullanıcı ve işletmeci açısından çeşitli işletme stratejileri, değişik güzergâh modelleri ve senaryoları ve kullanıcı, işletmeci ve kontrol merkezi arasındaki değişik gerçek zamanlı iletişim olanaklarının incelenmesi mümkün olmuştur. Çalışmada ayrıca California eyaletinin Castro Valley bölgesi kapsamında veri toplanması ve simülasyonun uygulanması yapılmıştır.

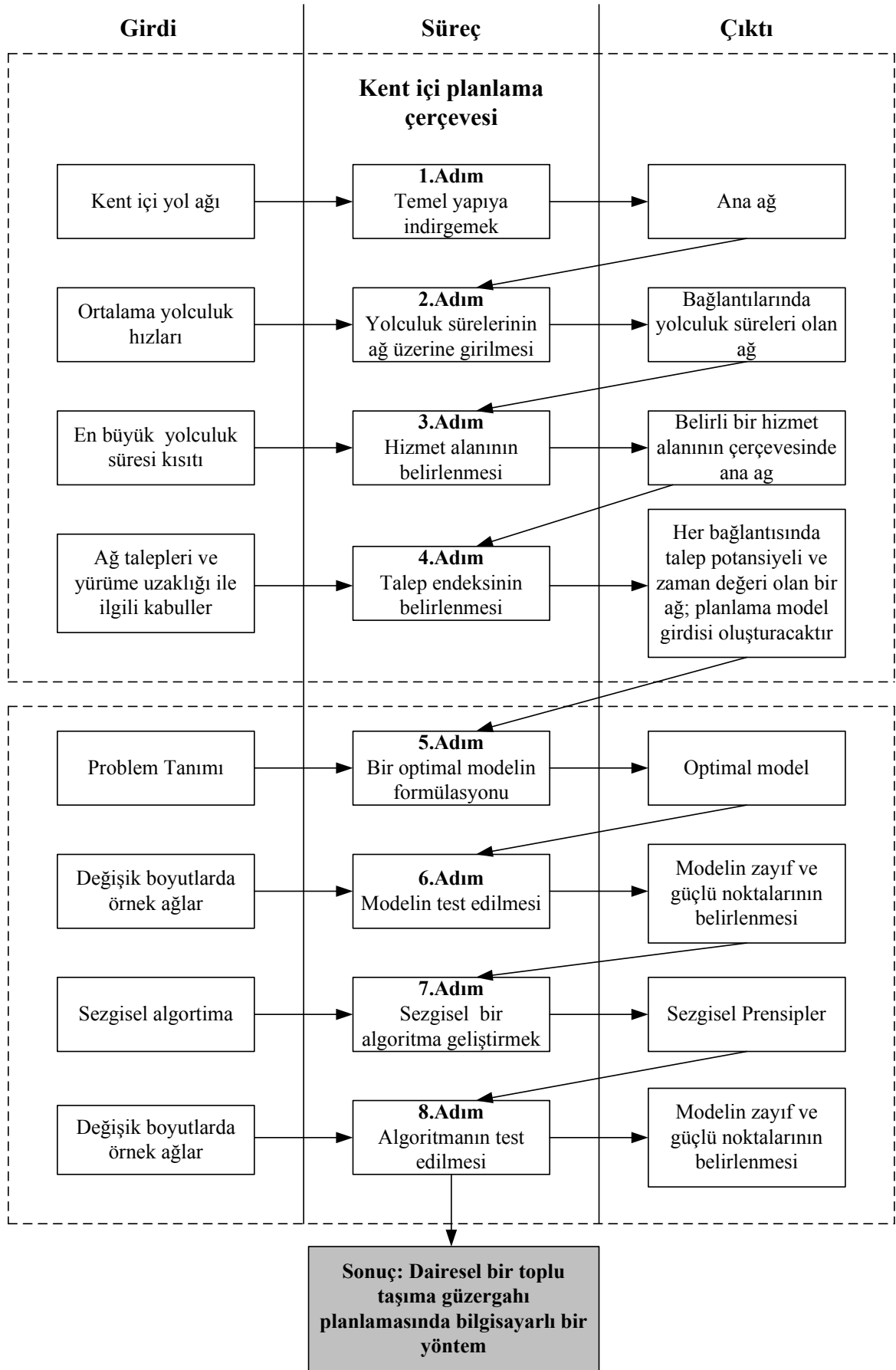
1970 ve 1980'li yıllarda özellikle ABD'de yüksek uzaklıklı ekspres toplu taşıma sistemleri hizmet vermeye başlayınca, istasyon çevrelerinde sürücülerin de özel araçlarını park edip, tren yolculuğu yapabileceği park alanları oluşturulmuştur. "Park et ve bin" sistemi, kullanıcılar tarafından oldukça benimsenmiş, yolcuların büyük çoğunluğu işe gidiş-geliş saatlerindeki trafikten uzaklaşmak ve oldukça yüksek park ücretleriyle karşılaşmamak için ekspres otobüs veya treni tercih etmişlerdir. Bölgesel ekonominin gelişmesi şehirlerin de giderek genişlemesiyle sonuçlanmış, iş olanaklarının artmasıyla kullanıcıların ekspres otobüs ve raylı sisteme talepleri giderek artmıştır. Fakat otobüs güzergâhları ile raylı sistem arasındaki planlama ve işletme sırasındaki eşgüdüm yoksunluğu kullanıcıları özel araç kullanımına yönlendirmiş, bu da istasyonların çevresindeki park alanlarının yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte trafiğe çıkan daha çok özel taşıt giderek artan trafik karmaşasının ve çevresel kirliliğinin önemli bir parçası olmuştur.



Şekil 2.8 Küçük bir ağ üzerinde uygulanan güzergâh tercihleri (Ceder ve Yim, 2003)

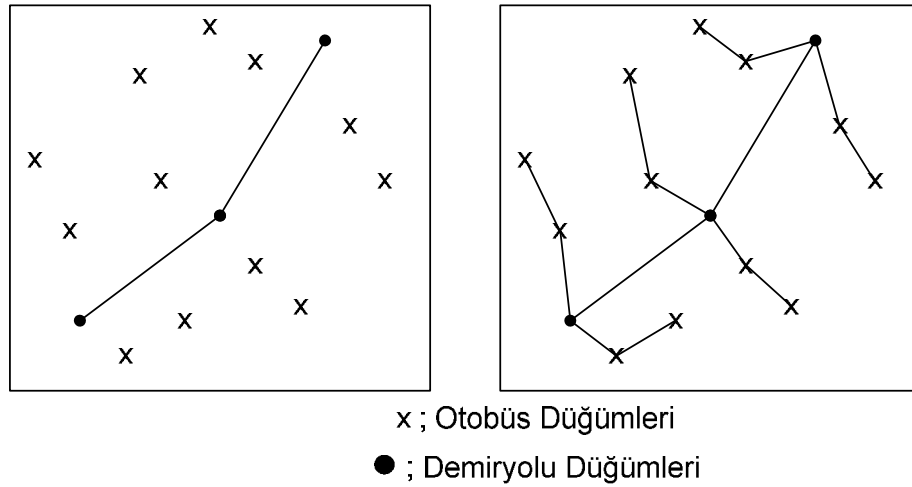
Jerby ve Ceder (2005) toplu taşıma sisteminde giderek artan bu olumsuzluğun önüne geçmek için mekik, besleyici otobüs güzergâhının tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Bu güzergâhın amacı kentiçi ulaşım ağının değişik noktalarından yolcuları toplamak, demiryolu istasyonu gibi önceden tanımlanmış merkezi bir noktaya getirmek ve yolcuları bu noktadan çeşitli hedeflere dağıtmaktır. Yolculuk süresini önceden tanımlanmış bir zaman kısıdı doğrultusunda hesaplayarak hizmet seviyesi kontrol altına alınmıştır. Çalışmada, talebe en yüksek karşılık verilerek, karar vericilerin kısa yürüme uzaklıkları ile yolcuların ve en uzun güzergâh uzunluğunu sınırlandırması ve işletmecilerin tatmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda problem, belirlenmiş bir kentiçi ulaşım ağında, çeşitli talep merkezlerindeki yolcuların en fazla sayıda kapsanıp bir toplu ulaşım merkezine ulaştıracak ve yolculuk süresinin tüm güzergâh boyunca belirli bir sınır değeri geçmediği bir dönel güzergâhın tasarımıdır. Bu problemin karmaşıklığını azaltmak için, problem çeşitli alt-problemlerden oluşan zincirsel bir yapıya çevrilmiş, yöntem olarak modüler yaklaşım benimsenmiştir (Şekil 2.9).

Araştırmanın sonuçlarını üç basamakta incelemek mümkündür; a) dairesel (mekik, besleyici) bir otobüs güzergâhı için potansiyel yolcu talebinin tahmini, b) en uygun güzergâh tasarımı için yöneylem araştırması ve c) herhangi bir boyuttaki yol ağı için uygulanabilecek sezgisel bir algoritma. Çalışmanın kapsamında en uygun model ve alternatifi olan sezgisel model küçük bir gerçek yaşam yol ağı kapsamında değişik senaryolarla uygulanmıştır. Sezgisel algoritma daha sonra rastgele oluşturulan küçük ölçekli ve büyük ağlar üzerinde de uygulanmış, kabul edilebilir hesaplama süreleri içinde uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir.



Şekil 2.9 Toplu taşıma güzergâh tasarımı için bir çözüm yöntemi (Jerby ve Ceder, 2005)

Kuan vd. (2005), Besleyici Otobüs Güzergâhı Tasarım Problemi üzerine yapılmış olan çalışmaları, analitik yaklaşımlar ve ağ yaklaşımları olarak iki ana başlık altında tanımlamışlardır. Bu araştırmalarında Kuah ve Perl (1988) ve Martins ve Pato (1996) tarafından tanımlanmış BOGTP (Şekil 2.10) çözümünde matematiksel programlama modelleri oluşturmuşlardır. Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Genetik Algoritma kullanarak önceki yöntemlerle karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmanın ana hedefi, BOGTP için daha az bir hesap çabası ile daha kısa sürede çözümler ortaya koyacak daha iyi algoritmaların geliştirilmesi olmuştur.



Şekil 2.10 Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi (Kuan vd., 2005)

Genetik Algoritma (GA) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), BOGTP için geliştirilmiş ve uygulanmıştır, sonuçlar literatürdeki c z m yöntemleri ile kar ıla tırılmı tır. Sezgisel yaklaşımların başarımlarını kıyaslamak için, rastgele seçilen 20 örnek problem üzerinde hesapsal verimlilikleri ve c z m kaliteleri ortaya konulmuştur. Sonuçlar dikkate alınan örnek probleme göre farklılıklar göstermektedir. Bu  alı ma karınca kolonisi optimizasyonunun BOGTP üzerinde ilk kez kullanılması ve sezgisellerin ilk kez bu kadar geniş bir şekilde kıyaslanması nedeniyle bu alanda iki büyük katkı yapmıştır.

Shrivastava ve Mahony (2007),  nceki dönemlerinde güzergâh oluşturma problemi üzerine yapmış oldukları çalışmaların, olumlu sonuç aldıkları yönlerini bütünleştirerek c z m yöntemlerinin olası yetersizliklerini ortadan kaldırmaya  alı mı lardır. Araştırmalarının kapsamında en uygun besleyici güzergâhlar ilk önce genetik algoritma yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu aşama sonucunda çalışma alanında herhangi bir talebin karşılanamaması durumunda, bir onarıcı algoritma görevli özel bir sezgisel yaklaşım kullanarak ilgili talep olası en iyi güzergâha atanmıştır. Çalışmada  rnek çalışma olarak  rlanda'da Dublin otobüs

taşımacılığı ile DART (Dublin Area Rapid Transit) ele alınmıştır. Çizelge 2.1'de yöntemin sonuçlarının mevcut durumla karşılaştırılması gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Mevcut ve önerilen güzergâh ağının karşılaştırılması (Shrivastava ve Mahony, 2007)

Karşılaştırmanın Türü	Çalışma Alanı Mevcut Güzergâh Ağı	Çalışma Alanı için Önerilen Güzergâh Ağı
Güzergâh ağının yapısı	Besleyici bir güzergâh ağı değil	Besleyici güzergâh ağı
Güzergâhlardaki ortalama doluluk katsayısı	0,3 değerinin altında	Genel 0,58 değerinde ve tüm güzergâhlarda 0,3 değerinin üzerinde
Bekleme süresi / talebin karşılanma yüzdesi	Ortalama bekleme süresi 20 dakikanın üzerinde	Talebin %42'si 5 dakika içinde, %71'i 10 dakika, %100'ü 20 dakika içinde karşılanmıştır.

3. BESLEYİCİ OTOBÜS GÜZERGÂHI TASARIM PROBLEMİ

3.1 Giriş

Önceki bölümde üzerinde durulan çalışmalardan da anlaşılabileceği gibi, bütünleşik bir besleyici otobüs/raylı ulaşım sistemlerinin tasarım bileşenleri, bu sistemlerin ağ yapılarının ve hizmet seviyelerinin özelliklerinden oluşmaktadır. Bu araştırma kapsamında, çeşitli talep dağılımlarının bulunduğu bir hizmet bölgesinde, mevcut bir raylı sisteme erişim için besleyici bir otobüs sisteminin tasarımı ele alınmaktadır. Dikkate alınan talep dağılımları hem tekil, hem de çoğul hedeflidir. Tekil hedefli dağılım, trafiğin zirve saati boyunca hedef bölgenin tipik olarak Ticaret Merkezi olduğu iş yolculuklarıdır. Zirve saatinin dışındaki yolculuklar genellikle çoğul hedefli olarak tanımlanırlar.

Bu çalışmada ele alınan Besleyici Otobüs Güzergâhı Tasarım Problemi (BOGTP) kapsamında otobüs duraklarının ve otobüs güzergâhlarının konumlandırılmalarının yanında, otobüs sisteminin "izleme süresi" gibi hizmet özelliklerinin de belirlenmesi bulunmaktadır. Raylı ulaşım sisteminin hattının ve istasyonlarının konumlandırılması ile ilgili temel kararlar, nüfus ve istihdam yoğunluğuna, planlanan arazi kullanım dağılımına bağlı olduklarından (Kuah, 1986), besleyici otobüs sistemi ile ilgili temel kararlarda dikkate alınmamışlardır. Bu nedenle bu çalışmadaki besleyici otobüs güzergâhı sisteminin tasarımında da raylı ulaşım ağının belirlenmiş olduğu kabul edilmiştir. Raylı sistem, demiryolu hatlarının ve demiryolu istasyonunun verilmiş konumları ile tanımlanmaktadır.

BOGTP, işletmeci ve kullanıcı maliyetleri arasında mali açıdan en iyi dengeyi bulma problemi olarak da gösterilebilir. Ulaştırma işletmecisinin karşılaştığı maliyet; işçilik maliyeti, yakıt maliyeti, araç yıpranma payının maliyeti ve diğer idari maliyetlerden oluşurken, kullanıcının ulaşım ağı üzerinde karşılaştığı maliyet; ulaşım istasyonlarına erişim süresinin maliyeti, istasyonlarda bekleme süresinin maliyeti ve ulaşım araçlarında seyir maliyetinden oluşur.

Bir besleyici otobüs sisteminin amacı, mevcut bir raylı ulaşım sistemine erişimin verimli bir şekilde sağlanmasıdır. Besleyici otobüs sisteminin maliyet etkinliği, sermaye ve işletme maliyetlerinin toplamı ile ölçülebilir. Sermaye maliyeti öncelikle filo boyutu ile ilgilidir. İşletme maliyeti; işçilik, yakıt ve bakım maliyetini içerir ve kat edilen uzaklık ile orantılı olarak tanımlanabilir. Bir besleyici otobüs sistemi tarafından sağlanan hizmetin kalitesi, kullanıcılara maliyeti ile ölçülebilir. Bu; erişim, bekleme ve seyir maliyetlerini içerir. Bir

besleyici otobüs sistemi tasarımının amacı, işletmeci ve kullanıcı maliyetleri arasında en iyi dengeye ulaşılmasıdır. Bu amaç, işletmeci ve kullanıcı maliyetlerinin toplamının enküçüklenmesi olarak da tanımlanabilir. Ulaşım ücreti, kullanıcılardan işletmecilere ödemelerin aktarımı olarak düşünüldüğü için toplam maliyet fonksiyonunun bir bileşeni olarak dikkate alınmamıştır.

3.2 Önerilen Yöntemler

BOGTP için iki temel yaklaşım önerilmiştir, analitik yaklaşım ve ağ yaklaşımı. Analitik yaklaşımda, besleyici otobüs sisteminin tasarım amacı, otobüs hizmet sıklığı, otobüs güzergâh yoğunluğu ve otobüs durak aralığını içeren bir takım tasarım değişkenlerine dayanarak ortaya konulmuştur. Tasarım değişkenlerinin sahip olabileceği en iyi değerler, amaç fonksiyonun birinci derece koşullarının analitik çözümü ile belirlenmiştir. Ağ yaklaşımında, hizmet bölgesi her biri çeşitli sayıda istasyonlar (duraklar) içeren bölümlere ayrılmaktadır. Ağdaki noktalar demiryolu istasyonları veya otobüs duraklarını temsil ederken, aralarındaki bağlantılar da ulaşım ağının güzergâhlarını temsil etmektedir.

Analitik ve ağ yaklaşımlarının her ikisi de BOGTP'ni modellemede benimsenmiştir, çünkü her ikisinin de güçlü ve zayıf yönleri vardır. Önceki çalışmalar ortaya çıkarmıştır ki, analitik modeller çeşitli ulaştırma problemlerinde makul yaklaşık çözümler sağlayabilirler. Belirtmekte yarar var ki, analitik yaklaşımın temel üstünlüklerinden biri göreceli olarak daha az hesaplama çabası istemesidir. Burada dikkate alınması gereken belki daha da önemli üstünlüğü, sistemin tasarım değişkenleri ile çeşitli parametreleri arasındaki ilişkilerde önemli bağlantılar sağlamadaki becerisidir. Buna karşın, analitik yaklaşımın bazı içsel sınırlandırmaları vardır. Öncelikle, ulaştırma hizmetinin işletme özellikleri ve ulaşım ağının fiziksel yapısı ile ilgili bazı basitleştirici kabuller kullanılmaktadır. İkinci olarak genellikle, tasarım değişkenlerinin ve talebin sürekli fonksiyonlar olarak tanımlanabileceğini kabul eder.

Ağ yaklaşımının bağlamdan bağımsız olması nedeniyle, idealize edilmiş cadde gösteriminin önceden belirtilmesini gerektirmemektedir. Bundan dolayı, etki alanı belirli uygulamalar ile sınırlandırılmamıştır ve tasarlanan otobüs güzergâhlarının şekli tanımlı cadde düzenleri ile kısıtlı kalmamıştır. Ağ yaklaşımı, analitik yaklaşımın tersine talep ve tasarım değişkenlerinin sürekli fonksiyon olarak tanımlanmasını gerektirmediği için, bu bileşenlerin daha gerçekçi bir gösterimini sağlar. Ağ yaklaşımı ile hem tekil hem de çoğul hedefli durumlar için eniyileme-temelli modeller geliştirilebilmektedir. Bu iki durum çoktan-bire (M-to-1) ve çoktan-çoğa (M-to-M) talep dağılımı olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın bu kısmının kalanında, BOGTP için bir model geliştirilmesiyle ilgili temel sorunların ortaya konulacaktır.

3.2.1 Talep Dağılımı

Ulaşım esaslı talep, çalışma kapsamında mekânsal dağılımına göre ikiye ayrılmıştır; çoktan-bire ve çoktan-çoğa. Çoktan-bire dağılım, çok başlangıçlı ve bir genel hedefli talep dağılımını temsil eder. Ticaret merkezlerine sabah yolculukları bu dağılımı temsil etmektedirler. Çoktan-çoğa talep dağılımı, çok başlangıçlı ve çok hedefli dağılımı temsil eder. Alışveriş yolculukları gibi iş dışı yolculukların çoğu bu dağılıma uygundur. Bir bütünleşik ulaşım sisteminin her iki yolculuk türüne hizmet etmesinin gerekli olduğu düşünülerek, bu çalışmada iki talep dağılımı da dikkate alınmıştır.

3.2.2 Analizin Zaman Çerçevesi

Ulaşım talebi ayrıca, analizin zaman çerçevesinin seçimini etkileyebilecek zaman değişkenliğini de belirtir. Doğal bir zaman çerçevesi, günlük bir ulaşım işletmesinin bütün döngüsünü temsil eden bir işletme günü olacaktır. Verilen her gün içinde talepte değişim olduğundan, ulaştırma ağı tasarımının amacında, ortalama talebe sahip, bir günün özel bir zaman dilimi, analizin zaman çerçevesi olarak seçilir. Çoktan bire taleplere hizmet veren ulaştırma ağının tasarımında, analizin zaman çerçevesi olarak zirve saati kullanmak, çoktan-çoğa talep dağılımı için zirve dışı zaman dilimini kullanmak da yararlı olacaktır.

3.2.3 Karar Elemanları

Bir besleyici otobüs sisteminin tasarımı ile ilgili karar elemanları otobüs güzergâhlarının konumları, otobüs duraklarının konumları ve her güzergâhtaki hizmet sıklığıdır. Karar değişkenlerinin tam tanımları analitik ve ağ yaklaşımları arasında farklı olur. İki yaklaşım arasındaki bir farklılık da, ağ yaklaşımında otobüs duraklarının konumları önceden tanımlı olarak kabul edilirken, analitik yaklaşımda otobüs duraklarının konumları model tarafından belirlenir. Bir besleyici otobüs isteminin tasarımı bağlamında, bir kısa dönem ve uzun dönem problemi ayrımı da yapılabilir. Örneğin, kısa dönem planlamada, filo boyutunun verilmiş olarak düşünülmesi uygun olurken, uzun dönem planlamada filo bir karar elemanı olarak ele alınabilir.

3.3 Analitik Yaklaşım

Çalışmanın bu kısmında BOGTP için analitik bir model sunulacaktır. Analitik yaklaşım yalnızca çoktan bire durumu için uygulanmıştır, çünkü bu yaklaşımın çoktan çoğa durumuna (eğer mümkünse) genellenmesi, analitik yaklaşımın temel amacıyla bağdaşmayan karmaşık, çözümü zor bir model ile sonuçlanacaktır. Bu bölümde Kuah(1986)'ın çalışması esas alınmıştır.

Analitik yaklaşımda bir besleyici otobüs sisteminin tasarımı için dikkate alınan temel değişkenler; otobüs sisteminin güzergâh yoğunluğu, otobüs izleme süresi ve otobüs durak aralığıdır. Otobüs ağı tasarım problemlerinde, genellikle, yalnızca güzergâh yoğunluğu ve izleme süresi probleminin bir parçası olarak dikkate alınmıştır. Buna karşın, durak aralığı yürüme süresini etkilediği gibi, bir otobüs güzergâhı boyunca araçtaki seyir süresini de etkilediği için, BOGTP'nin amacının birleşenlerinden olan kullanıcı maliyetini de oldukça etkiler. Bu nedenle, otobüs durak aralığı, otobüs ağı tasarım probleminin ayrılmaz parçası olarak dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, bir demiryolu hattına erişimde bir besleyici otobüs sisteminin tasarımı için, bu üç ana tasarım değişkenini açıkça tanımlayan ve aynı zamanda eniyileyen bir analitik model sunulmuştur.

Hizmet alanının geometrik yapısı Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Başlangıç noktaları bir dikdörtgen hizmet alanında olan yolcular, bir tekil raylı ulaştırma hattına ulaşmak için, bu hatta dik olan besleyici otobüs güzergâhlarını kullanırlar. Yolcuların en yakın otobüs durağına yürüdüğü kabul edilir. Güzergâhlar arası uzaklıklar ile otobüs durakları arasındaki uzaklıkların, hizmet alanının boyutlarından(l_x , l_y) çok fazla etkilenmediği kabul edilir. Demiryolu istasyon aralıklarının da alanın dikey boyutuna (l_y) az bağlı olduğu kabul edilir. Sonuç olarak, besleyici otobüslerin raylı ulaşım hattı boyunca aldıkları uzaklıklar, toplam güzergâh uzunluğundan çok fazla etkilenmemektedir. Bu bölümün geri kalanında, BOGTP için analitik modelin formülasyonu ve çözümleri üzerine durulmuştur.

Analitik yaklaşımın içinde, besleyici otobüs ağı tasarımı problemi ile ortaya konulan, belirli bir raylı ulaşım ağına erişim için tasarlanmış bir besleyici otobüsün en uygun güzergâh yoğunluğunun (veya güzergâh aralığı), otobüs izleme süresinin ve otobüs durak aralığının belirlenerek kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin enküçüklenmesidir. Kullanıcı maliyeti; yürüme erişim maliyeti, otobüs duraklarındaki bekleme maliyeti ve seyir halinde otobüs duraklarındaki kayıp zaman maliyetinden oluşur. Şekil 2.1'de gösterilen sistem için seyir halindeki zaman maliyeti sabittir. Raylı ulaşım izleme süresi önceden belirlendiğinden, besleyici otobüsler ile demiryolu aracı arasındaki aktarma maliyeti de bir sabittir. Besleyici

otobüs hizmeti için talep, hizmet alanı içindeki talebin büyüklüğünü ve dağılımını tanımlayan bir $p(x,y)$ iki boyutlu sürekli fonksiyon ile tanımlanmıştır. Otobüs güzergâh yoğunluğu $t(x)$ ve izleme süresi $h(x)$, demiryolu hattının başlangıcından x uzaklığının sürekli fonksiyonları olarak gösterilirken, $w(x,y)$ otobüs durak aralığı, güzergâhın konumu (x) ve otobüs güzergâhı boyunca demiryolu hattından uzaklığın (y) sürekli fonksiyonudur. Bu nedenle, güzergâh yoğunluğu hizmet alanının farklı kısımlarında farklı olabilir; izleme süresi bir güzergâhtan diğerine farklı değer alabilir. Bununla birlikte, otobüs durak aralığının güzergâhlar arasında ve güzergâhlar boyunca farklı değer almasına izin verilmiştir. Tablo 3.1 önerilen analitik modelin formülasyonunda kullanılan değişkenlerin ve parametrelerin listesini gösterir.

Çizelge 3.1 Model parametreleri ve karar değişkenleri

Sembol	Birim	Açıklamalar
$P(x,y)$	saat başına kilometrekaredeki yolcu sayısı	birim zaman için (x,y) noktasındaki ulaşım talep yoğunluğu
L_y	kilometre	hizmet alanının y yönündeki uzunluğu
L_x	kilometre	hizmet alanının x yönündeki uzunluğu
V_a	kilometre/saat	yürüme hızı
δ	saat	her otobüs durağı için kaybedilen yolculuk süresi (otobüsün durması, hızlanması ve yavaşlaması sürelerini içerir)
λ_o	\$/araç-km	otobüs işletme maliyeti
λ_a	\$/yolcu-saat	erişim süresinin bedeli (yürüme erişimi)
λ_r	\$/yolcu-saat	yolcunun araçtaki seyir süresi bedeli
λ_w	\$/yolcu-saat	yolcunun bekleme süresi bedeli

Karar Değişkenleri		
$H(x)$	saat	x noktasında konumlu bir güzergâhtaki izleme süresi
$t(x)$	güzergâh sayısı/km	güzergâh yoğunluğu
$W(x,y)$	kilometre	otobüs durak aralığı

Otobüs durak ve otobüs güzergâh aralıkları hizmet alanının boyutlarından çok fazla etkilenmezler. Bu nedenle bitişik iki otobüs durağı veya bitişik güzergâhlar arasındaki ulaşım talebinin nerdeyse eşit olduğu kabulü yapılabilir. Bununla birlikte, yolcuların besleyici otobüs sistemine ulaşmak için en yakın güzergâha yürüdüğü kabul edilir. Bundan dolayı, bir otobüs güzergâhına ortalama erişim uzaklığı, güzergâh aralığının yaklaşık dörtte biri olarak kabul edilebilir. Buna göre, tüm yolcular için otobüs güzergâhlarına erişim maliyeti (3.1) ile

verilmiştir,

$$\frac{\lambda_a}{V_a} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \frac{1}{4 \cdot t(x)} p(x, y) dx dy \quad (3.1)$$

Benzer şekilde (3.2) güzergâh boyunca otobüs duraklarına erişimin maliyetini belirtmektedir,

$$\frac{\lambda_a}{V_a} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \frac{1}{4} w(x, y) p(x, y) dx dy \quad (3.2)$$

İzleme süresi görece küçük olduğunda, yolcular otobüs duraklarına rastgele ulaşırlar. Duraklardaki ortalama bekleme süresi yaklaşık olarak izleme süresinin yarısıdır. Böylece, tüm yolcular için otobüs duraklarındaki bekleme maliyeti (3.3)'deki gibi hesaplanabilir,

$$\lambda_w \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \frac{1}{2} h(x) p(x, y) dx dy \quad (3.3)$$

Demiryolu hattı boyunca, x noktasında bulunan bir güzergâhtaki y uzunluğu boyunca mevcut otobüs duraklarının toplam sayısı (3.4) ile verilmiştir. (3.5) yolculuğa başlanılan durakları çıkartarak(-1 ile işaretlenmiştir), besleyici otobüs sistemindeki toplam otobüs duraklarını belirtir,

$$\int_0^y \frac{1}{w(x, y)} dy \quad (3.4)$$

$$\int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \left(\int_0^y \frac{1}{w(x, y)} dy - 1 \right) p(x, y) dx dy \quad (3.5)$$

Her durak için kayıp zaman δ otobüs duraklarında aracın hızlanması, yavaşlaması ve beklemede kaybedilen sürelerin toplamıdır ve sabit kabul edilir. (3.6) ifadesi seyirdeki tüm yolcular için araç hızlanmasına, yavaşlamasına ve duraklardaki beklemelere bağlı olarak toplam zaman kaybını ifade eder,

$$\lambda_r \cdot \delta \cdot \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \left(\int_0^y \frac{1}{w(x, y)} dy - 1 \right) p(x, y) dx dy \quad (3.6)$$

(3.7) ifadesi birim zamanda kilometre başına işletmeci maliyetini belirtir,

$$\lambda_0 \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \left(\frac{t(x)}{h(x)} \right) dx dy \quad (3.7)$$

Besleyici otobüs sisteminin toplam maliyeti (3.8) eşitliği ile ortaya konulmuştur,

$$Z[h(x), t(x), w(x, y)] = \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} I(x, y) dx dy \quad (3.8)$$

Buradaki $I(x, y)$ integrali (3.9) ile verilmiştir,

$$I(x, y) = \left\{ K_1 \left[\frac{1}{t(x)} + w(x, y) \right] + \frac{1}{2} \lambda_w h(x) + K_2 \left[\int_0^y \frac{1}{w(x, y)} dy - 1 \right] \right\} p(x, y) + \lambda_0 \frac{t(x)}{h(x)} \quad (3.9)$$

Burada K_1 ve K_2 , sırasıyla $\lambda_a / 4V_a$ ve $\lambda_r \delta$ değerlerine eşittir. Daha önce belirtildiği gibi, ulaşım ücreti kullanıcılardan işletmecilere aktarılan ödemeler olduğu için sistemde bir maliyet olarak dikkate alınmamıştır.

(3.9) eşitliğindeki $I(x, y)$ integrali ve (3.8) ile verilen toplam maliyet fonksiyonu Z sürekli ve türevi alınabilir fonksiyonlardır, çünkü onlar $h(x)$, $t(x)$ ve $w(x, y)$ tekil sürekli ve türevi alınabilir fonksiyonlardan oluşan birleşik fonksiyonlardır. $h(x)$ ve $t(x)$ bağımsız olarak her x için optimize edilebildiklerinden, amaç fonksiyon Z , (3.10) ile verilmiş $Z(x)$ fonksiyonu $h(x)$ ve $t(x)$ 'e göre enküçüklendiğinde, elde edilmiş olur,

$$\begin{aligned} Z(x) &= \int_0^{l_y} I(x, y) dy = K_1 \frac{1}{t(x)} p(x) + K_1 \int_0^{l_y} w(x, y) p(x, y) dy + \frac{\lambda_w h(x)}{2} p(x) \\ &+ K_2 \int_0^{l_y} \left[\int_0^y \frac{1}{w(x, y)} dy - 1 \right] p(x, y) dy + t(x) \frac{\lambda_0}{h(x)} l_y \end{aligned} \quad (3.10)$$

burada, $p(x) = \int_0^{l_y} p(x, y) dy$.

En uygun güzergâh yoğunluğu $t^*(x)$ ve en uygun izleme süresi $h^*(x)$ değerlerine ulaşmak için, (3.11) ve (3.12) ile verilmiş olan $Z(x)$ fonksiyonunun ilk durum koşulları çözülür,

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial t(x)} = -\frac{1}{t^2(x)} K_1 p(x) + l_y \frac{\lambda_0}{h(x)} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial h(x)} = \frac{\lambda_w}{2} p(x) - l_y \frac{t(x) \lambda_0 l_y}{h^2(x)} = 0 \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12) denklemlerinin çözümü ile (3.11) ve (3.12) ile verilen en uygun güzergâh yoğunluğu ve izleme süresine ulaşılır,

$$t^*(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda_a^2}{V_a^2 \lambda_w \lambda_0} p(x, \bar{y}) \right]^{1/3} \quad (3.13)$$

$$h^*(x) = \left(\frac{\lambda_a \lambda_0}{V_a \lambda_w^2 p(x, \bar{y})} \right)^{1/3} \quad (3.14)$$

burada, $p(x, \bar{y}) = \frac{1}{l_y} \int_0^{l_y} p(x, y) dy$ eşitliği dikkate alınmalıdır.

(3.13) ve (3.14) denklemleri göstermektedir ki, en uygun güzergâh yoğunluğu ve izleme süresi, çeşitli parametrelerin küp kök fonksiyonları kullanılarak elde edilir. En uygun otobüs güzergâh yoğunluğu $t^*(x)$, λ_a yürüme süresinin karesinin ve talep yoğunluğu $p(x, y)$ 'nin küp kökü ile doğru orantılıyken, yürüme hızının karesinin, λ_w bekleme süresinin ve birim işletme maliyeti λ_0 'nun küp kökü ile ters orantılıdır. Küp kökün varlığı, en uygun değerlerin model parametrelerine bağlı olmasına karşın, bu parametrelerdeki değişimlere çok hassas olmadıklarını ortaya koymaktadır.

En uygun otobüs durak aralığı ile ilgili olarak, üç değişik planlama ve işletme tercihinin ortaya koyan üç durum incelenmiştir. Durum 1 ve durum 2 otobüs durak aralığında sınırlamalar içerirken, durum 3 sınırlandırılmamış sistemi tanımlar.

Durum 1: $w(x, y) = w$

Bu durumda, otobüs durak aralığı tüm hizmet alanı boyunca eşit olarak belirlenmiştir. Bu durum, talebin nerdeyse sabit bir yoğunlukta düzenli dağıldığı durumda ve hizmet alanının görece eşit blok boyutlu bir ızgara sokak dağılımına sahip olduğunda ortaya çıkan, otobüs durak aralığı ile ilgili bir politik veya işletimsel kararı yansıtır. $I(x, y)$ integrali sürekli ve türevi alınabilir ve $w(x, y)$ sabit olduğundan, $w(x, y)$ ye bağlı Z 'nin ilk düzen koşulları, türevi ve integrali birbirleri ile değiştirilerek basitleştirilebilir:

$$\frac{\partial Z}{\partial w} = \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \left[K_1 + K_2 \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{1}{w} \int_0^y dy - 1 \right) \right] \cdot p(x, y) dx dy \quad (3.15)$$

Yukarıdaki integrali iki bileşenine ayırınca, (3.15)'in çözümü, (3.16) ile verilen en uygun durak aralığı w^* değerini bulmak için kullanılabilir,

$$w^* = \left(\frac{4V_a \lambda_r \delta}{\lambda_a} \cdot \bar{y} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

burada $\bar{y}$, (3.17) ile verilmiş olan, hizmet alanındaki tüm yolcuların ortalama yolculuk uzunluğudur,

$$\bar{y} = \frac{\int_0^{l_y} \int_0^{l_x} y \cdot p(x, y) dx dy}{\int_0^{l_y} \int_0^{l_x} p(x, y) dx dy} \quad (3.17)$$

Durum 2: $w(x, y) = w(x)$

Bu durumda, durak aralığının herhangi bir güzergâh boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir. Durum 1 deki yöntemi takiben, $w^*(x)$ en uygun uzaklık değeri, $Z(x)$ denkleminin ilk düzen koşullarından bulunur,

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial w(x)} = \int_0^{l_y} K_1 p(x, y) dy + K_2 \int_0^{l_y} \frac{\partial}{\partial w(x)} \left(\int_0^y \frac{1}{w(x)} dy - 1 \right) p(x, y) dy = 0 \quad (3.18)$$

En uygun otobüs durak aralığının değeri (3.19) ile verilmiştir,

$$w^*(x) = \left(\frac{4V_a \lambda_r \delta}{\lambda_a} \cdot \bar{y}_x \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

Burada $\bar{y}_x$, (3.20) ile verilmiş olan, hizmet alanındaki tüm yolcuların ortalama yolculuk uzunluğudur,

$$\bar{y}_x = \frac{\int_0^{l_y} y \cdot p(x, y) dy}{\int_0^{l_y} p(x, y) dy} \quad (3.20)$$

En uygun otobüs durak aralığının, (3.16) ve (3.19) denklemlerinde görüldüğü gibi, ortalama yolculuk uzunluğu, yürüme hızı, seyir süresinin bedeli ve her otobüs durağı için kaybedilen yolculuk süresine bağı olduğu belirlenmiştir. Yürüme süresi ile ters orantılıdır. $\lambda_r \delta \bar{y}$ değeri, otobüs duraklarındaki gecikmelerden doğan kullanıcı maliyetinin değerlendirilmesini sağlar. Burada dikkate alınması gereken bir diğer nokta da, durum 1 ve 2 için en uygun otobüs durak aralığının, parametrelerdeki değişikliklere karşı güzergâh yoğunluğu ve izleme süresinden daha hassas olduğudur. Buna karşın (3.16) ve (3.19) eşitliklerindeki karekök, en uygun durak aralığıyla ilgili sonuçların yine de görece olarak güçlü (duyarsız) olduğunu, örneğin sistem parametrelerindeki değişimlere çok fazla duyarlı olmadığını gösterir.

Durum 3: Sınırlandırılmamış $w(x,y)$

Bu durumda, otobüs durak aralığı güzergâhlar arasında veya güzergâhlar boyunca farklı değerler alabilir. Durum 1'de belirtilen aynı kabuller altında, $w(x,y)$ ile ilgili amaç fonksiyonun enküçüklenmesi, $I(x,y)$ integralinin enküçüklenmesi ile sağlanır.

(3.9)'un ilk durum koşullarından (3.21) elde edilir,

$$\frac{\partial}{\partial w(x,y)} \int_0^y \frac{1}{w(x,y)} dy = -K \quad (3.21)$$

$$\text{burada, } K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\lambda_a}{4V_a \lambda_r \delta}$$

(3.21) denkleminin sol tarafı Leibnitz kuralı kullanılarak dönüştürülebilir,

$$\frac{1}{w(x,y)} \cdot \frac{\partial y}{\partial w(x,y)} + \int_0^y \frac{\partial}{\partial w(x,y)} \left(\frac{1}{w(x,y)} \right) dy = -K \quad (3.22)$$

(3.22) eşitliğinin terimleri düzeltildiğinde (3.23) elde edilir,

$$\int_0^y \frac{1}{w^2(x,y)} dy = K + \frac{1}{w(x,y)} \cdot \frac{\partial y}{\partial w(x,y)} \quad (3.23)$$

(3.23)'ün iki tarafının y 'ye göre türevi alınırsa (3.24) elde edilir,

$$\begin{aligned}
\frac{1}{w^2(x,y)} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(K + \frac{1}{w(x,y)} \cdot \frac{\partial y}{\partial w(x,y)} \right) \\
&= -\frac{1}{w^2(x,y)} + \frac{1}{w(x,y)} - \left[\frac{1}{\left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.24}$$

(3.24) eşitliğinin iki tarafının $w(x,y)$ ile çarpılmasıyla (3.25) elde edilir,

$$\frac{2}{w(x,y)} = -\frac{1}{\left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \Rightarrow w(x,y) = -2 \left[\frac{\left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)^2}{\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2}} \right] \tag{3.25}$$

$\frac{\partial w(x,y)}{\partial y} = w'$ ve $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = w''$ olarak gösterilmesiyle, (3.25) diferansiyel eşitliği bir ikinci-koşul diferansiyel denklemi olarak yeniden yazılabilir,

$$w \cdot w'' + 2(w')^2 = 0 \tag{3.26}$$

(3.26) diferansiyel denkleminin çözümü için $w' = v$, $w'' = \frac{\partial v}{\partial y} = v \frac{\partial v}{\partial w}$ değişimi yapılarak

(3.27) denklemi elde edilir,

$$w \cdot v \frac{\partial v}{\partial w} + 2v^2 = 0 \text{ veya } w \frac{\partial v}{\partial w} + 2v = 0 \tag{3.27}$$

(3.27) diferansiyel denkleminin doğrudan integrali alınarak çözülebilir,

$$-\frac{1}{2} \ln v = \ln w + c \tag{3.28}$$

$$v = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{c'}{w^2} \tag{3.29}$$

(3.29) denklemi çözülerek, (3.30) ile gösterilen en uygun otobüs durak aralığı belirlenmiş olur.

$$w^*(x, y) = \sqrt[3]{c_1 y + c_2} \quad (3.30)$$

(3.30) eşitliğindeki c_1 ve c_2 sabitleri $y=0$ ve $y=1$ 'deki başlangıç koşullarından bulunabilir,

$$c_2 = w^3(x, 0) \quad (3.31)$$

$$c_1 = w^3(x, 1) - w^3(x, 0) \quad (3.32)$$

(3.30) eşitliğinin (3.26) denkleminde yerine konulmasıyla, en uygun otobüs durak aralığı için (3.33) eşitliğine ulaşılır,

$$w^*(x, y) = \sqrt[3]{\left[w^3(x, 0) - w^3(x, 0)\right] \cdot y + w^3(x, 0)} \quad (3.33)$$

Sınırlandırılmamış durumda, en uygun otobüs durak aralığı için kapalı form çözümü elde edilememiştir. Bu durumun çözümü başlangıç koşullarına bağlıdır. Sınırlandırılmamış durum, çözümü parametreler tarafından "tamamen sınırlandırılmamış" iki boyutlu bir problem olduğu için bu sonuçla karşılaşmıştır. Bu bölümde daha sonra tartışılacağı gibi, $w(x, 1)$ ve $w(x, 0)$ parametrelerin bir fonksiyonu ve minimum (veya maksimum) izin verilen durak aralığı olarak belirlenebilir. Bu nedenle, (3.33) eşitliğindeki sınırlandırılmamış durum için en uygun durak aralığı parametrelerin ve y raylı ulaşım hattından uzaklığın küp köküne bağlıdır. En uygun güzergâh aralığı ve izleme süresindeki gibi, en uygun durak aralığı da parametrelerdeki değişimlerden doğrudan etkilenmektedir.

(3.33) eşitliği, $y = 0$ ve $y = 1$ değerleri için sonuçlanır. (3.32)'deki gibi c_1 sabiti, bir otobüs güzergâhı boyunca $w^*(x, y)$ değerinin değişiminin başlangıç derecesini gösterir. c_1 değerine bağlı olarak, en iyi otobüs durak aralığıyla ilgili aşağıdaki üç değişik durum dikkate alınabilir.

- Durum (i): $c_1 = 0$

Bu durumda, hiçbir güzergâh boyunca başlangıç uzaklığında değişim yoktur. (3.32) eşitliğiyle, $w^*(x, y) = w(x, 0)$ olur; örneğin herhangi bir güzergâh boyunca otobüs durak uzaklığı sabittir. Bu durum bu yüzden daha önce üzerinde durulan özel durum $w(x, y) = w(x)$ ile özdeştir.

- Durum (ii): $c_1 < 0$

Bu durum bir otobüs güzergâhı boyunca otobüs durak aralığının, raylı ulaşım sisteminden uzaklığı arttıkça azaldığı durumu ele alır.

Bu durum için en uygun otobüs durak aralığının uygulanabilirliğinden emin olmak için, izin

verilen durak aralığında bir alt sınır $\underline{w}$ belirlenmesi gereklidir. (3.33) eşitliğine dayanarak, $w(x,1)$ ve $w(x,0)$ arasında aşağıdaki ilişkiyi tanımlayabiliriz,

$$w^3(x,1) \geq \frac{l_y - 1}{l_y} w^3(x,0) + \frac{1}{l_y} (\underline{w})^3 \quad (3.34)$$

- Durum (iii): $c_1 > 0$

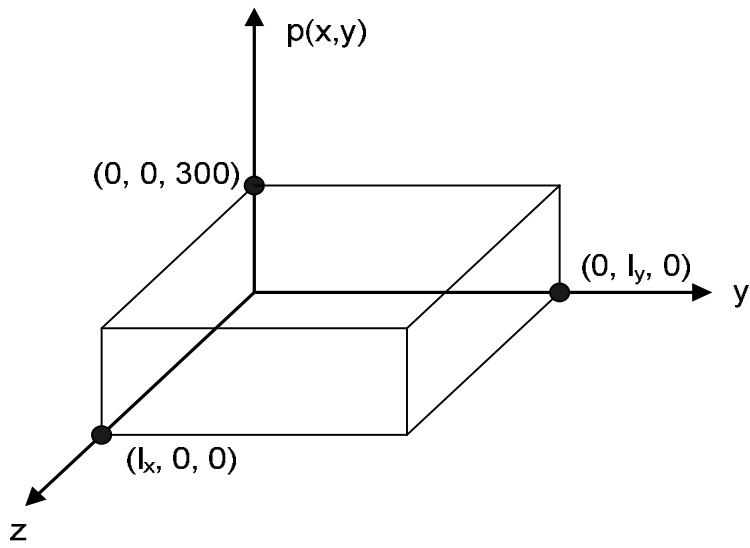
Bu durum bir otobüs güzergâhı boyunca otobüs durak aralığının, raylı ulaşım sisteminden uzaklığı arttıkça arttığı durumu ele almaktadır. Bu durumda, en uygun aralığın uygulanabilir olmasını sağlamak için, izin verilen durak aralığında bir üst sınır $\overline{w}$ tanımlanması gereklidir. (3.33) eşitliğine dayanarak, $w(x,1)$ ve $w(x,0)$ arasında aşağıda (3.35) eşitliği ile belirtilen ilişkiyi tanımlayabiliriz,

$$w^3(x,1) \leq \frac{l_y - 1}{l_y} w^3(x,0) + \frac{1}{l_y} (\overline{w})^3 \quad (3.35)$$

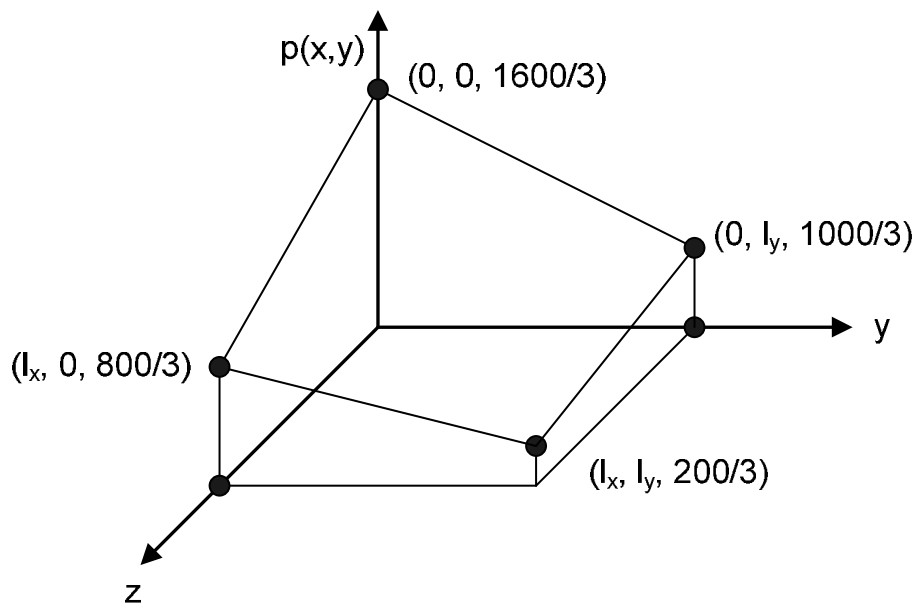
(3.34) ve (3.35) eşitlikleri, ya $w(x,1)$ ya da $w(x,0)$ için kısıtlar sağlamaktadır. $w(x,0)$ ve $w(x,1)$ için aldıkları değerler, uygulanabilir derecelerdeki duyarlılık analizlerine bağlı olarak belirlenebilir. Planlamacılar, uygulanabilir durak aralığında uygun sınır değerleri tecrübelerine, yerel sokak koşullarına, talep yoğunluğuna, maksimum mümkün yürüme uzaklığı vb. dayanarak seçebilirler (Kuah, 1986). $w(x,0)$ veya $w(x,1)$ için başlangıç hesapları, her güzergâh boyunca eşit aralık durumu olan $w^*(x)$ çözümünden de belirlenebilmektedir.

Bu bölümün geriye kalan kısmında, yukarıda geliştirilen analitik modelin kullanımını anlatmak için sayısal örnekler sunulmaktadır. Modelin uygulanmasını göstermek ve bu bölümde türetilen çözümlerin geçerliliğini değerlendirmek için üç sayısal örnek sunulmaktadır. Bu örneklerin odak noktası, farklı talep dağılımlarına sahip hizmet alanlarıyla çalışmaktır. Üç değişik talep yoğunluk fonksiyonu geometrik şekilleriyle birlikte Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Örnek 1, düzenli ulaşım talebi durumunu gösterir. Örnek 2 ve 3'te, ulaşım hizmeti için talep raylı hattın sonuna doğru artar. Bu örnekler için raylı hattın sonunun Ticaret Merkezini temsil ettiğini düşünebiliriz. Bu nedenle Örnek 2 ve 3, Ticaret Merkezi'nden uzaklık ile birlikte ulaşım talep yoğunluğunun azaldığı genel bir durumu ortaya koyar. Talep dağılımının etkisine odaklanabilmek için, talep yoğunluk fonksiyonlarının katsayıları, alandaki toplam talep üç durumda da aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Geriye kalan model parametrelerinin değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

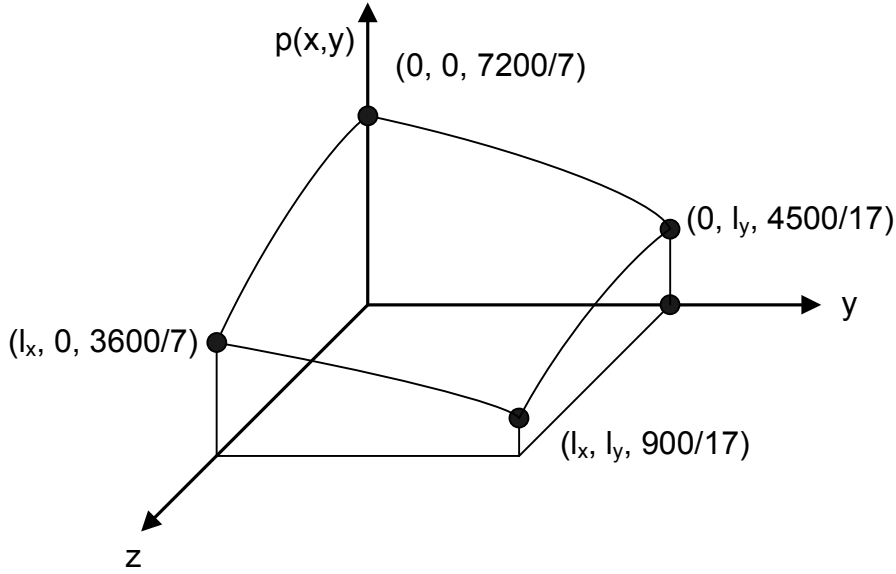
1. $p(x,y) = 300$



2. $p(x,y) = \frac{1600}{3} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x}{l_x} - \frac{3}{8} \frac{y}{l_y} \right)$



$$3. p(x, y) = \frac{7200}{17} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l_x} \right)^2 - \frac{3}{8} \left(\frac{y}{l_y} \right)^2 \right)$$



Şekil 3.1 Talep yoğunluk fonksiyonları

Ortaya konulan üç örnek için en uygun güzergâh yoğunluğu, izleme süresi ve durak aralığı değerleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Çizelge 3.4. raylı hattın başlangıcından uzaklığın (x), otobüs güzergâhları boyunca durak aralığının sabit olması durumunda, en uygun güzergâh yoğunluğuna, izleme süresine ve otobüs durak aralığına etkilerini ortaya koymaktadır. Beklendiği gibi, en uygun güzergâh aralığı ve izleme süresi raylı hattın başlangıcından uzaklık ile birlikte artar. Buna karşın, otobüs durak uzaklığı, raylı hattın başlangıcından uzaklıkla birlikte yavaşça azalır. Bu durum, raylı hattın sonundan uzaklık arttıkça, otobüs duraklarındaki gecikmeler nedeniyle oluşan kullanıcı maliyetini artırır.

Çizelge 3.5, sınırlandırılmamış durum için, raylı hattın başlangıcına olan uzaklığın en uygun otobüs durak aralığına etkisini gösterir. Çizelge 3.4'ün sonuçlarını takiben, durak uzaklığının, raylı hattın sonundan uzaklıkla arttığı durumu dikkate almıştır ($c_1 < 0$). Analizin bu bölümünde, Çizelge 3.4'ün en uygun otobüs durak aralığı, $w(x, 0)$ başlangıç durak aralığı olarak kullanılmıştır. İzin verilen aralığın (w) alt sınırı 1/4 kilometre olarak belirlenmiştir ve $y=1$ 'deki uzaklık $w(x, 1)$, (3.34) ile verilmiş alt sınırı ile belirlenmiştir.

Çizelge 3.5'in sonuçları, değişik güzergâhların raylı hattın başlangıcına olan uzaklıkları arttıkça, üzerlerindeki ortalama otobüs durağı aralığının azaldığını gösterir. Benzer şekilde,

raylı hattın başlangıcından uzaklığın artması, otobüslerdeki gecikmeler nedeniyle oluşan kullanıcı maliyetinin görece azalmasıyla sonuçlanır. Çizelge 3.5 ve 3.6 ayrıca raylı hattın uzaklaştıkça, otobüs güzergâhlarında en uygun otobüs durak aralığında azalmayı ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.2 Sayısal örnek için değişken değerleri

Değişken	Açıklama	Değer
l_x	hizmet alanının x yönündeki uzunluğu	16 km
l_y	hizmet alanının y yönündeki uzunluğu	16 km
λ_a	erişim süresinin bedeli (yürüme erişimi)	6\$/yolcu-saat
λ_r	yolcunun araçtaki seyir süresi bedeli	4\$/yolcu-saat
λ_w	yolcunun bekleme süresi bedeli	6\$/yolcu-saat
V_a	yürüme hızı	4 km/sa
λ_o	araç işletme bedeli	1\$/araç-km
δ	her otobüs durağı için kaybedilen yolculuk süresi	0,01 saat/durak

Çizelge 3.3 Güzergâh yoğunluğu ve izleme süresi

Örnek Numarası	$t^*(x)$ (güzergâh/km)	$h^*(x)$ (dakika)	Otobüs Durak Aralığı	
			w^* (kilometre)	$w^*(x)$ (kilometre)
1	0,53	3,16	0,89	0,89
2	$\left(\frac{21}{8(26-x)}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{21}{8000(26-x)}\right)^{1/3} \cdot 60$	0,84	$\left(\frac{192-8x}{260-10x}\right)^{1/2}$
3	$\left(\frac{476}{9(448-x^2)}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{119}{2250(448-x^2)}\right)^{1/3} \cdot 60$	0,85	$\left(\frac{1664-4x^2}{2240-5x^2}\right)^{1/2}$

Çizelge 3.4 Demiryolu hattının başlangıcına uzaklığının, en uygun güzergâh yoğunluğu, izleme süresi ve durak aralığına etkisi

$x(km)$	Uygulama 2			Uygulama 3		
	$t^*(x)$ (km)	$w^*(x)$ (km)	$h^*(x)$ (dk)	$t^*(x)$ (km)	$w^*(x)$ (km)	$h^*(x)$ (dk)
1	0,47	0,86	2,83	0,49	0,86	2,95
2	0,48	0,86	2,87	0,49	0,86	2,95
3	0,49	0,85	2,91	0,49	0,86	2,96
4	0,49	0,85	2,95	0,50	0,86	2,98
5	0,50	0,85	3,00	0,50	0,86	3,00
6	0,51	0,85	3,05	0,50	0,86	3,03
7	0,52	0,85	3,10	0,51	0,86	3,06
8	0,53	0,84	3,16	0,52	0,86	3,10

9	0,54	0,84	3,22	0,52	0,85	3,15
10	0,55	0,84	3,28	0,53	0,85	3,20
11	0,56	0,83	3,36	0,55	0,85	3,33
12	0,57	0,83	3,36	0,55	0,85	3,33
13	0,59	0,82	3,52	0,57	0,84	3,45
14	0,60	0,82	3,62	0,59	0,84	3,57
15	0,62	0,81	3,72	0,62	0,83	3,71
16	0,64	0,80	3,84	0,65	0,82	3,90

Çizelge 3.5 Sınırlandırılmamış durumda, demiryolu hattının başlangıcına uzaklığın, en uygun durak aralığına etkisi - Uygulama 2

Uygulama 2 - $w^*(x,y)$ (km)								
(km)	x=1	x=3	x=5	x=7	x=9	x=11	x=13	x=15
y=1	1,75	1,75	1,75	1,75	1,74	1,74	1,74	1,73
y=3	1,63	1,63	1,63	1,63	1,62	1,62	1,62	1,62
y=5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,49	1,49	1,49
y=7	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,35	1,35	1,35
y=9	1,21	1,21	1,20	1,20	1,20	1,20	1,19	1,19
y=11	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00
y=13	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,78
y=15	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46

Çizelge 3.6 Sınırlandırılmamış durumda, demiryolu hattının başlangıcına uzaklığın, en uygun durak aralığına etkisi - Uygulama 3

Uygulama 3 - $w^*(x,y)$ (km)								
(km)	x=1	x=3	x=5	x=7	x=9	x=11	x=13	x=15
y=1	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,74	1,74
y=3	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,62
y=5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,49
y=7	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,35
y=9	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,20	1,20	1,19
y=11	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01
y=13	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,79
y=15	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,48

Önerilen analitik modelin sonuçları incelendiğinde, bu modelin ayrıca otobüs güzergâhlarının ve bu güzergâhlardaki otobüs duraklarının konumlarının belirlenmesinde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. İlgili kaynaklar [orijinal kaynakta, Hurdle (1973) ve Hurdle ve Wirasinghe (1980)] tarafından önerilen yöntem takip edildiğinde, x_i noktasında konumlanmış güzergâhlar aşağıdaki gibi elde edilir (Kuah, 1987):

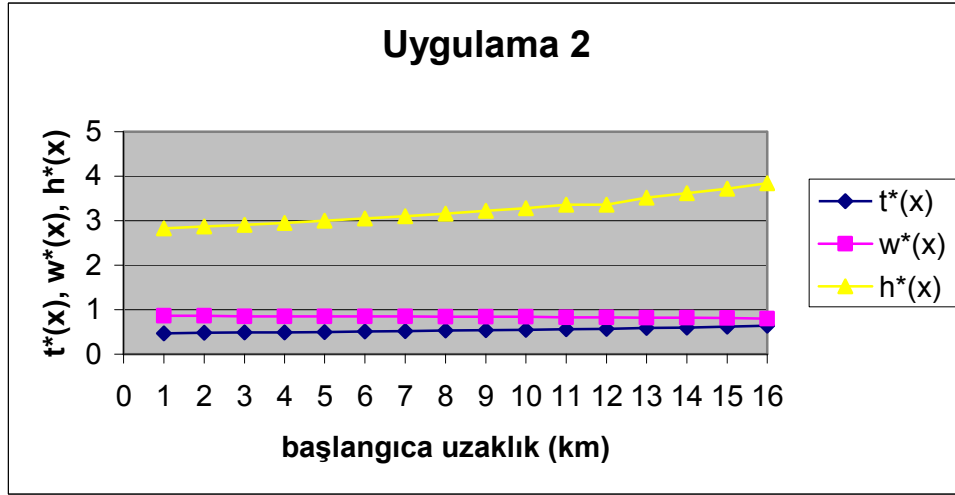
$$\int_0^{x_i} t^*(x) dx = i \quad ; i = 1, 2, \dots, K \quad ; K = [l_x] \quad (3.36)$$

Benzer şekilde, x_i noktasında bulunan herhangi bir güzergâh boyunca otobüs duraklarının konumları y_j (3.37) ile belirlenebilir.

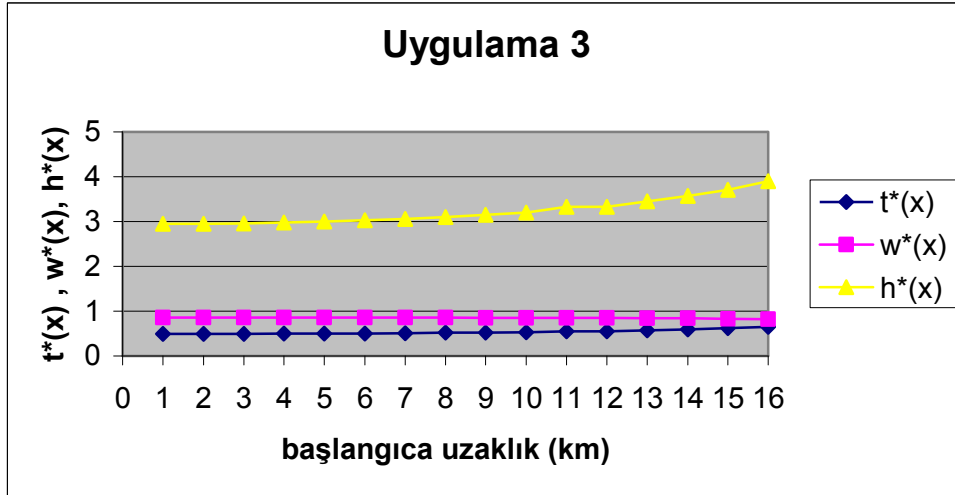
$$\int_0^{y_j} \frac{1}{w^*(x_i, y_i)} dy = j \quad ; j = 1, 2, \dots, L \quad ; K = [l_y] \quad (3.37)$$

Özet olarak, bu bölüm bir besleyici otobüs ağı tasarımı için, üç temel tasarım değişkenini; otobüs güzergâh yoğunluğu, izleme süresi ve otobüs durak aralığını aynı analitik çerçeve içinde gösteren bir analitik model ortaya koymuştur. Dikkate alınan hizmet bölgesinde talep fonksiyonu olarak iki-boyutlu bir sürekli fonksiyon uygulanmıştır. En uygun güzergâh yoğunluğu ve izleme süresi çeşitli parametrelerin küp-kök fonksiyonları olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, en uygun güzergâh aralığının ve izleme süresinin, talepteki ve diğer sistem parametrelerindeki değişimlerden çok fazla etkilenmediğini göstermektedir.

En uygun otobüs durak aralığı ile ilgili olarak, farklı işletme tercihlerini yansıtan üç farklı durum tanımlanmıştır. Durak aralığının ulaştırma sisteminde sabit olması ve her güzergâhta sabit olması durumlarında, en uygun durak aralıkları, ortalama yolculuk uzunluğu, yürüme süresi, seyir süresinin maliyeti ve durak başına kaybedilen ortalama süreyle beraber artan ve yürüme süresinin değeri ile azalan karekök fonksiyonlarıdır. Üçüncü durum (sınırlandırılmamış) için çözüm, durak uzaklığının raylı sistem hattından uzaklaştıkça artmasını veya azalmasını belirten başlangıç koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. Her bir başlangıç çözümü için elde edilen sonuçlar çalışmada verilmiştir.



Şekil 3.2. Başlangıca uzaklığın $t^*(x)$, $w^*(x)$ ve $h^*(x)$ değerlerine etkisi (2. uygulama için)



Şekil 3.3. Başlangıca uzaklığın $t^*(x)$, $w^*(x)$ ve $h^*(x)$ değerlerine etkisi (3. uygulama için)

Her biri farklı bir talep dağılımını gösteren üç sayısal örnek sunulmuştur. Beklenildiği gibi, modelin verdiği en uygun güzergâh uzaklığı ve izleme süresi raylı hattan uzaklığın artmasıyla artmıştır. Buna karşın, en uygun otobüs durak aralığının talep yoğunluğuyla arttığı gösterilmiştir. Bunun nedeni talep yoğunluğu arttıkça, otobüs duraklarındaki gecikmelerin, kullanıcı maliyetlerinin içindeki görece artışıdır.

Bu analizin sonucu, mevcut bir raylı sisteme hizmet eden bir besleyici otobüs sisteminin tasarımında, güzergâh uzaklığı, izleme süresi ve durak aralığı için yaklaşık değerler bulunmasında kullanılabilir. Sonuç, ulaşım işletmecilerine, sistem parametreleri ile tanımlanan değişik bölgesel koşullar altında, tasarım değişkenlerinin önemleri ile ilgili bir

kılavuz sağlamada kullanılabilir. Talep yoğunluğu ve diğer sistem parametrelerindeki değişimlerin etkilerini değerlendirmeye ek olarak, bu sonuçlar değişik durak aralığı tercihlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir.

Sonraki bölümde, çoktan-bire ve çoktan-çoğa talep durumlarında BOGTP için ağ modelleri oluşturulacaktır.

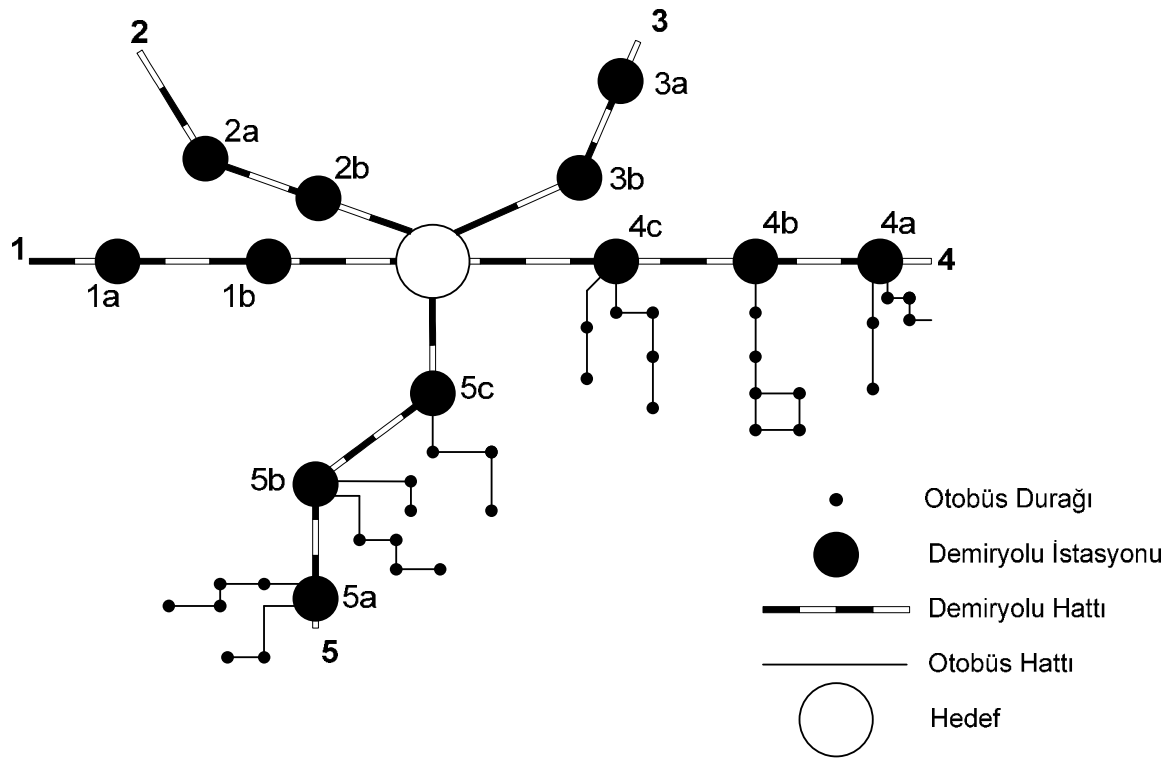
3.4 Çoktan Bire Talep Durumu İçin Ağ Yaklaşımı

Çoktan-bire BOGTP şu şekilde dikkate alınabilir; demiryolu istasyonlarının konumları, her bir istasyondan hedef istasyona yolculuk başına maliyet ve toplam yolculuk süreleri belirlidir. Ayrıca, mevcut veriler arasında otobüs duraklarının konumları, her otobüs durağından hedef istasyona olan talep, her otobüs durağından diğer bir durağa veya demiryolu istasyonuna olan yolculuk maliyeti bulunur. Problem, raylı sisteme ulaşmak için bir dizi besleyici otobüs güzergâhının tasarımı gerçekleştirmek ve her güzergâhtaki izleme sürelerini bularak, toplam işletmeci ve kullanıcı maliyetlerini enküçükmektir.

Çoktan-bire BOGTP'nin geliştirilmesi aşamasında şu kabuller göz önüne alınmıştır:

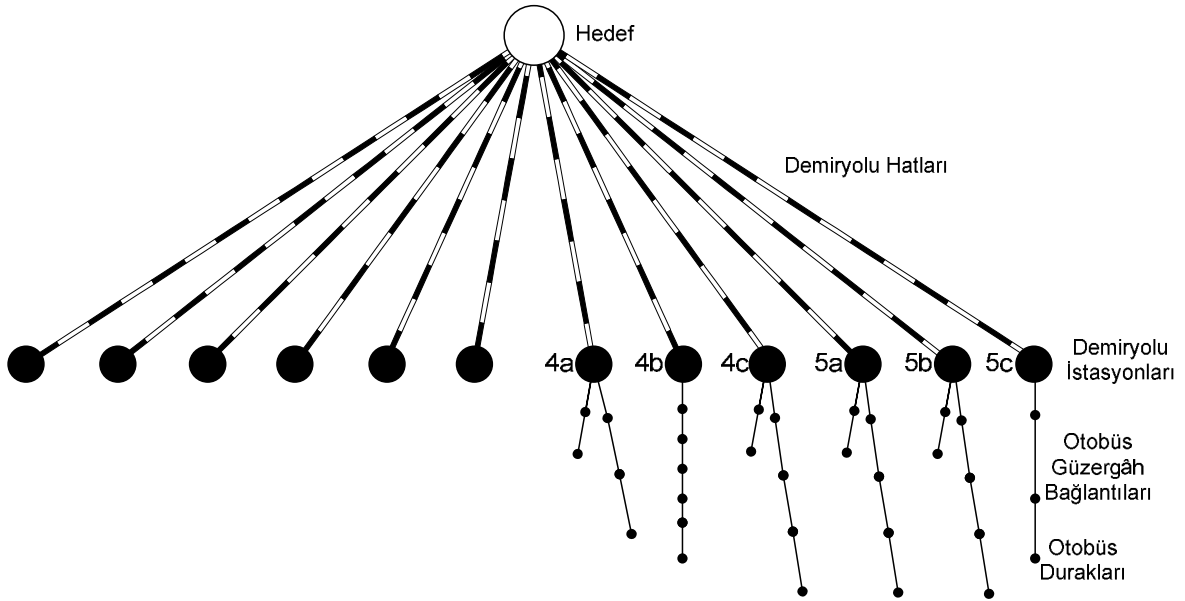
- 1) Her otobüs durağına yalnızca bir otobüs güzergâhı hizmet eder.
- 2) Her otobüs güzergâhı yalnızca bir demiryolu istasyonuna bağlanır.
- 3) Otobüslerin kapasiteleri ve işletme hızları standarttır.
- 4) Yolcular demiryolu hizmetine, yalnızca besleyici otobüs sistemini kullanarak erişebilirler.

İlk kabul kısıtlayıcı gibi görünebilir; ancak bir çoktan-bire talepli ulaşım sistemi için mantıklı bir kabuldür. Çoktan bire durumunda, tüm yolcuların hedefi aynıdır; böylece, aynı otobüs durağına çoklu otobüs güzergâhlarının hizmet vermesi gereksizdir. Çoktan çoğa talep dağılımı durumunda bu kabul geçerli olmayacaktır. İkinci kabul, otobüslerin demiryolu hatları boyunca yolculuğuna izin verilmeyeceğini belirtir ki bu da, "eş/paralel hizmetlerin kaldırılması" anlamına gelir. Üçüncü kabul ile, sabit güzergâhlarda hizmet veren otobüs ulaşım işletmecilerinin genellikle boyutları belirli araçlarla hizmet verdikleri belirtilmiştir. Bu madde ayrıca güzergâhlama problemlerinde hesap yükünü azaltmak için yapılan genel bir kabuldür. Son kabul modeli basitleştirmek için yapılmıştır. Modelin amacı raylı sistemi değil, besleyici otobüs sistemini tasarlamak olduğundan, bu kabule ihtiyaç duyulmuştur. Diğer ulaşım türleri ile raylı sisteme ulaşan yolcular, besleyici otobüs sisteminin tasarımını değil, demiryolu ağının tasarımını etkilerler.



Şekil 3.4 Çoktan-bire talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sistemi

Şekil 3.4, çoktan-bire talep dağılımı durumunda bütünleşik bir besleyici otobüs/raylı ulaşım sistemini göstermektedir. Sistem tekil bir hedefe yönelmiş beş demiryolu hattından oluşur. Ayrıca şekil üzerinde 4 ve 5 numaralı demiryolu hatlarına hizmet veren besleyici otobüs güzergâhları tanımlanmıştır. Çoktan-bire talep durumuna hizmet eden bir besleyici otobüs/raylı ulaşım sistemi, Şekil 3.5'deki gibi bir genişleyen ağaç gövdesi şeklinde de gösterilebilir. Bu genişleyen ağaçta, hedef ağacın kökü olarak belirtilmişken, demiryolu istasyonları birinci derece düğümler ve otobüs durakları ikinci derecede değişik düğüm seviyelerindeki düğümler olarak (her güzergâhtaki otobüs durak sayısına bağlı olarak) tanımlanmıştır.



Şekil 3.5 Çoktan-bire talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sisteminin genişleyen ağaç gövdesi gösterimi

Hedef ve demiryolu istasyonlarını birbirine bağlayan ilk derece bağlar demiryolu hat kesimlerini ifade eder. İkinci seviye bağlantılar ise, otobüs güzergâhının bölümlerini tanımlar. Demiryolu istasyonlarıyla ilgili maliyetler yolcu bekleme ve aktarma ücretlerinden oluşurken, demiryolu bağlarıyla ilgili maliyetler demiryolu işletme maliyeti ve yolcu seyir süre maliyetlerinden oluşur. Bu nedenle, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, bir tekil hedefe hizmet veren besleyici otobüs sisteminin tasarım problemi, bir dizi otobüs güzergâhının tasarımı ve bu güzergâhların demiryolu istasyonlarına atanması (Şekil 3.5'te genişleyen ağaç yapılı ağda gösterildiği gibi) ve her otobüs güzergâhındaki işletme sıklıklarının belirlenmesi problemi olarak tanımlanabilir. Hedef noktası bir dağıtım noktası, demiryolu istasyonları dağıtım merkezleri ve otobüs durakları müşteriler olarak tanımlandığında, Şekil 3.5'teki genişleyen ağaç ağ gösterimi, iki seviyeli bir dağıtım sisteminin ağ gösterimi ile benzer olduğu dikkat edilmelidir.

Çoktan-bire BOGTP hem tamsayı, hem de tamsayı olmayan değişkenlerle doğrusal olmayan (non-linear) bir programlama modeli olarak formüle edilmiştir (Kuah, 1986).

Çoktan-bire BOGTP modeli için kullanılan indisler, diziler, parametreler ve değişkenler şunlardır:

1) Alt indisler:

i, m : otobüs durakları indisi; $i, m = 1, \dots, I$

- j: demiryolu istasyonları indisi; $j = I+1, \dots, I+J$
- k: otobüs güzergâhları indisi; $k = 1, \dots, K$
- h: düğümler, otobüs durakları ve demiryolu istasyonları indisi; $h = 1, \dots, I+J$

2) Diziler:

- N: $[h/1 \leq h \leq I+J]$ tüm düğüm noktaları dizisi
- H: tüm demiryolu istasyonlarını içeren N dizisinin bir alt kümesi

3) Parametreler:

- ASH: mümkün olan en yüksek koltuk-saat
- c: otobüs kapasitesi
- C_{js} : j demiryolu istasyonundan s hedefine raylı sistemdeki yolcu maliyeti, (\$/yolcu)
- D_k : k güzergâhının en büyük uzunluğu, (km)
- $L_{i,h}$: i düğümü ile h düğümü arasındaki uzaklık, (km)
- Q_i : i otobüs durağındaki saat başına ortalama ulaşım talebi, (yolcu/saat)
- β : besleyici otobüsün sabit yıpranma payı maliyeti, (\$/koltuk-saat)
- U: ortalama otobüs işletme hızı, (km/saat)
- ρ : ortalama otobüs doluluk çarpanı
- λ_o : otobüs birim işletme maliyeti, (\$/araç-saat)
- λ_r : yolcu seyir süresinin maliyeti, (\$/yolcu-saat)
- λ_w : yolcu bekleme süresinin maliyeti, (\$/yolcu-saat)

4) Değişkenler:

- X_{ihk} : 1, eğer i düğümü k otobüs güzergâhında h düğümünden önceyse
0, değilse

Y_{ij} : 1, eğer i otobüs durağı j demiryolu istasyonuna atanırsa

0, değilse

F_k : k otobüs güzergâhındaki hizmet sıklığı

$$\begin{aligned} \text{MINZ}(X, Y, F) = & \sum_{j=I+1}^{I+J} C_{js} \sum_{i=1}^I Q_i Y_{ij} + 2\lambda_0 \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} X_{ihk} \right) F_k \\ & + \frac{\lambda_r}{2U} \sum_{k=1}^K \left[\left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} X_{ihk} \right) \left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} Q_i X_{ihk} \right) \right] + \lambda_w \sum_{k=1}^K \frac{1}{2F_k} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} Q_i X_{ihk} \right) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Aşağıdaki kısıtlar altında:

$$(i) \quad \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{I+J} X_{ihk} = 1 \quad ; i = 1, \dots, I$$

$$(ii) \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+J} X_{ijk} \leq 1 \quad ; k = 1, \dots, K$$

$$(iii) \quad \sum_{h=1}^{I+J} X_{ihk} - \sum_{m=1}^I X_{mik} \geq 0 \quad ; i = 1, \dots, I$$

$$k = 1, \dots, K$$

$$(iv) \quad \sum_{i \notin H} \sum_{h \in H} \sum_{k=1}^K X_{ihk} \geq 1 \quad ; H$$

$$(v) \quad \sum_{h=1}^{I+J} X_{ihk} + \sum_{i=1}^I X_{ijk} - Y_{ij} \leq 1 \quad ; i = 1, \dots, I$$

$$; j = I+1, \dots, I+J$$

$$; k = 1, \dots, K$$

$$(vi) \quad \sum_{i=1}^I Q_i \sum_{h=1}^{I+J} X_{ihk} \leq cF_k \quad ; k = 1, \dots, K$$

$$(vii) \quad \frac{2c}{\rho U} \sum_{k=1}^K F_k \left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} X_{ihk} \right) \leq ASH$$

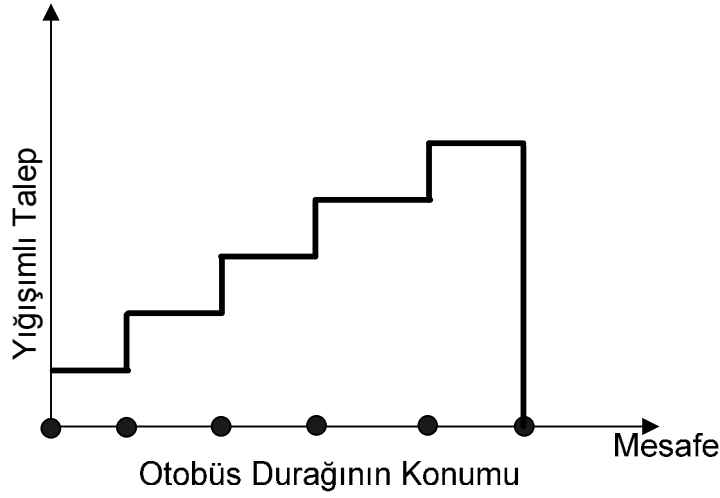
$$\begin{aligned}
\text{(viii)} \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} X_{ihk} \leq D_k & ; k = 1, \dots, K \\
\text{(ix)} \quad & X_{ihk} = (0,1) & ; i = 1, \dots, I \\
& & ; j = I+1, \dots, I+J \\
& & ; k = 1, \dots, K \\
& Y_{ij} = (0,1) & ; i = 1, \dots, I \\
& & ; j = I+1, \dots, I+J \\
& F_k \geq 0 & ; k = 1, \dots, K
\end{aligned}$$

Modelin amaç fonksiyonu, kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin toplamıdır. Toplu taşıma işletmecileri, genellikle, yolculuğun toplam araç-km değerinin en küçük olduğu bir besleyici otobüs ağını tercih ederler. Yolculuğun toplam araç-km değeri, güzergâh uzunluğunun ve güzergâhta otobüs işletme sıklığının sonucu olduğu için, bu bileşenlerden birinde veya ikisinde yapılacak bir küçültme ile düşük işletme maliyetlerine ulaşılabilir. Belirli herhangi bir güzergâhta, güzergâh yoğunluğunu karşılayacak gerekli minimum kapasitenin belirlediği bir alt sınır vardır. İşletmeciler hedeflerine ulaşmak için zamanı (genel maliyet) enküçüklemek isteyeceklerdir. İşletmeciler gibi, kullanıcılar da toplam güzergâh uzunluğu düşük bir otobüs ağını tercih edeceklerdir. Ancak, işletmecilerin aksine, kullanıcılar/yolcular otobüs duraklarındaki bekleme süresini enküçüklemeyi tercih edecek, yani işletme sıklığı yüksek bir otobüs ağı isteyeceklerdir.

Amaç fonksiyonun (3.38) ilk terimi tüm yolcular için demiryolu maliyetidir. j (demiryolu) istasyonu için demiryolu maliyetini, j 'den hedef s 'ye her yolculuğun demiryolu maliyeti ve j demiryolu istasyonuna atanan toplam talep belirler. Raylı sistem verildiğinden, demiryolu ulaşımı ile oluşan birim demiryolu işletme maliyeti ve birim demiryolu kullanıcı maliyetini temsil eden tek bir parametre birim demiryolu maliyeti olarak kullanılabilir. Amaç fonksiyonun ikinci terimi toplam otobüs işletme maliyetini temsil eder. Belirli bir k güzergâhı için otobüs işletme maliyeti, güzergâh uzunluğunun, güzergâh sıklığının ve her araç-km için işletme maliyetinin etkisiyle oluşturulur.

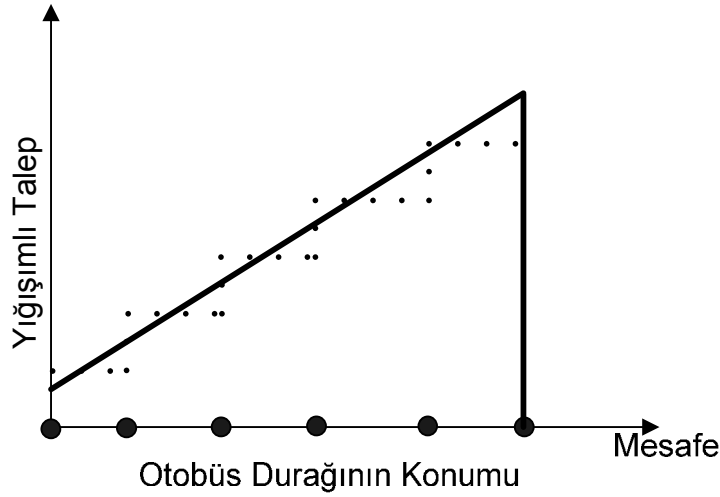
Amaç fonksiyonun üçüncü terimi, besleyici otobüs sistemindeki yolcuların seyir süresinin maliyetini temsil eder. Bu maliyet, her otobüs durağındaki talebin ve duraktan hedefe toplam

uzunluğun sonucu olarak ortaya çıkar. Bu sonuç Şekil 3.6'da gösterilen basamak fonksiyonunun altındaki alan ile verilmiştir.



Şekil 3.6 Gerçek Otobüs Seyir Süre Maliyetinin Gösterimi

Bu alanın hesaplanabilmesi için, her otobüs durağı ve demiryolu istasyonu arasındaki güzergâh bölümünün uzunluğunun bilinmesi gereklidir. Bu durumda, bir ağ modeli formülasyonunda, her güzergâhtaki otobüs durakları sırasının modelde açık bir şekilde belirtilmesi gerekecektir. Bu, modelde ihtiyaç duyulan tamsayı değişkenlerinin sayısal karmaşıklığını büyük oranda arttıracaktır. Bu nedenle, bu terim bir yaklaşım ile gösterilebilir. Bu yaklaşımın geometrik çevirimi, Şekil 3.6'deki basamak fonksiyonunu, Şekil 3.7'de gösterilen bir doğrusal fonksiyona dönüştürmektir. Amaç fonksiyonun dördüncü terimi, tüm yolcuların otobüs duraklarındaki bekleme sürelerinin maliyetidir. Bu eşitliklerde, ortalama bekleme süresinin işletme aralıklarının yarısı olduğunu kabul edilebilir. Bu, işletme aralıklarının görece küçük olduğu ve yolcuların otobüs duraklarına tarifeyi dikkate almadan rastgele geldikleri yaklaşımı ile yapılan genel bir kabuldür. Besleyici otobüslerden raylı sisteme aktarmaların ve otobüs duraklarına erişimin maliyeti, tüm sistem için sabit değerler olduklarından amaç fonksiyona dâhil edilmemiştir. Benzer şekilde, tasarım değişkenleri üzerinde de etkileri yoktur.



Şekil 3.7 Yaklaşık Otobüs Seyir Süre Maliyeti

(i) kısıt dizisi her otobüs durağının yalnızca bir güzergâhta yer aldığını belirtir. Kısıt dizisi (ii), her otobüs güzergâhının birden fazla demiryolu istasyonuna bağlanmasını engeller. Demiryolu istasyonlarının otobüs güzergâhlarının sonlandırıcısı olduğunu ve demiryolu hatlarına paralel otobüs hizmetlerine izin verilmediğini ortaya koyar. Kısıt dizisi (iii), otobüs güzergâhları için, güzergâhın sürekliliğini oluşturur. Bir durağa uğrayan güzergâh, o duraktan ayrılmalıdır. Kısıt dizisi (iv), "içdolaşım" engelleme kısıdını oluşturur. Her otobüs güzergâhının bir demiryolu istasyonuna bağlanmasını sağlar ve yalnızca otobüs güzergâhlarını bağlayan "içdolaşım"ları engeller. Kısıt dizisi (v), modelin iki bileşenini birbirine bağlar, güzergâhlar oluşturmak için otobüs duraklarının birbirine bağlanması ve otobüs duraklarının demiryolu istasyonlarına atanması. Bir otobüs durağının bir demiryolu istasyonuna yalnızca güzergâh durak üzerinden geçiyorsa ve o demiryolu istasyonuna bağlıysa atanabileceğini gösterir.

Kısıt dizisi (vi) otobüs güzergâhı kapasite kısıtlarını ortaya koyar. Güzergâh kapasitesi, güzergâhın işletme sıklığı ve araç kapasitesinin dikkate alınmasıyla ortaya konulabilir. Kısıt (vii), filo boyutundaki kısıttır. Ağda talep edilen toplam koltuk-saat, mevcut toplam koltuk-saat'i geçemeyeceğini belirtir. Kısıt dizisi (viii), güzergâh uzunluğundaki kısıdı ortaya koyar. Besleyici otobüs güzergâhlarına görece eşit iş yükü sağlar. Kısıt dizisi (ix), X_{ihk} otobüs güzergâhı tasarım değişkenleri ve Y_{ij} otobüs durağı-demiryolu istasyonu ataması değişkenlerinin ikili değişkenler olduğunu ve F_k otobüs güzergâhı işletme sıklığı değişkeninin negatif olamayacağını belirtir.

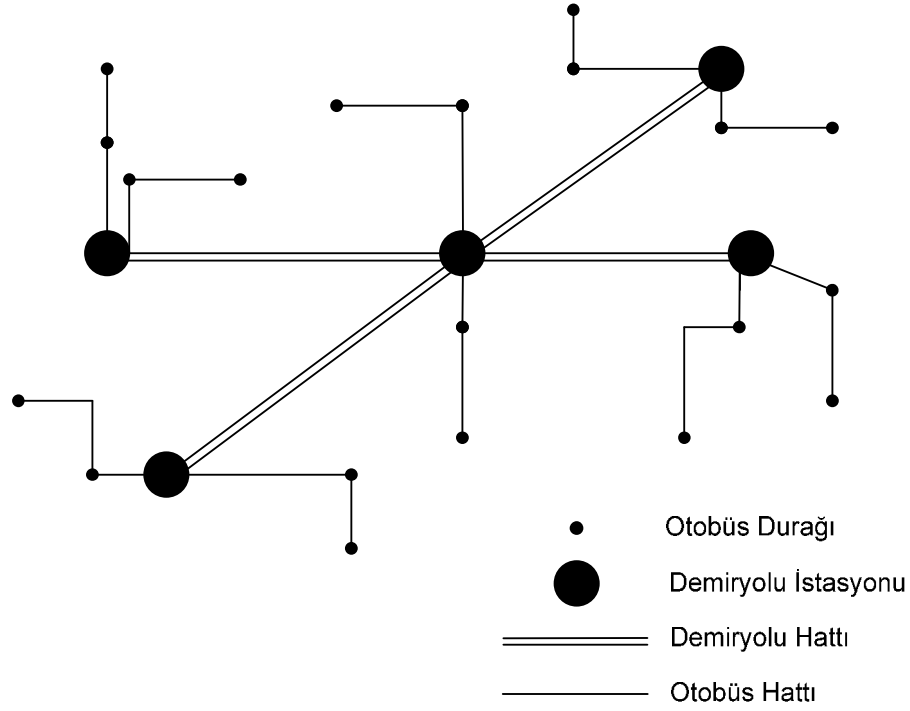
Çoktan-bire BOGTP için eniyileme modeli büyüktür ve çözümü oldukça zordur. Bu zorluğa neden olan iki esas unsur vardır. Öncelikle, tamsayı karar değişkenleri içeren bir doğrusal olmayan model oluşudur. Doğrusal amaç fonksiyonları olan benzer eniyileme modelleri, yalnızca çok küçük test problemleri için çözülebilir. Doğrusal olmayan bir amaç fonksiyonunun oluşu BOGTP'ni, AGP'nin çözümünden daha zor bir hale getirir. İkinci olarak, BOGTP güzergâh sıklığı gibi bir ek boyutu olan bir güzergâhlama problemidir. Gezgin Satıcı Problemi (GSP) ile özdeşleştirilmiş güzergâhlama problemlerinin çözümlerinin güçlüğü literatürde geniş bir şekilde tartışılmıştır. Sonuç olarak, gerçek boyutlu güzergâhlama problemlerinin sezgisel olarak çözümleri gereklidir. Çoktan-bire BOGTP için önerilen modelin boyutunda örnek olarak 5 demiryolu istasyonu, 50 otobüs durağı ve 6 otobüs güzergâhı olan görece küçük bir ulaşım sistemini dikkate alabiliriz. Bu sistem için eniyileme modeli 1756 değişken ve 10^{15} ten fazla kısıt içerecektir.

3.5 Çoktan Çoğa Talep Durumu İçin Ağ Yaklaşımı

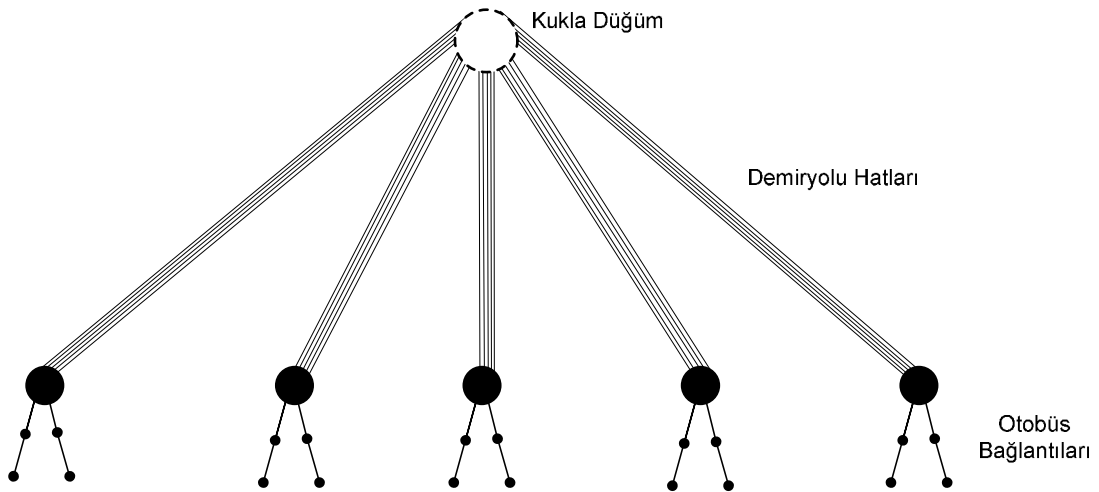
Bu bölümde bir önceki 3.4 bölümündeki çoktan-bire BOGTP, çoktan çoğa talep dağılımı durumuna uyarlanmıştır. Çoktan çoğa BOGTP'ndeki hedef kümesi, demiryolu istasyonlarının kümesidir ve her otobüs durağındaki talep artık bir sayı ile gösterilemez. Bunun yerine, her bir bileşeni özel bir hedef için talebi gösteren bir vektör olarak tanımlanmalıdır. Çoktan çoğa BOGTP tanımı şu şekilde de yapılabilir: Demiryolu ağının yapısı ve her iki demiryolu istasyonu arasındaki yolculuk başına yolculuk süreleri ve yolculuk maliyeti verilmiştir. Ayrıca, otobüs duraklarının konumları ve her otobüs durağından her bir hedefe olan talep verilmiştir. Her iki otobüs durağı arasındaki ve her bir otobüs durağından her bir demiryolu istasyonu arasındaki yolculuk süreleri ve yolculuk maliyetleri verilmiştir. Problem, demiryolu istasyonlarına ulaşan bir dizi besleyici otobüs güzergâhının tasarımı ve her güzergâhtaki işletme sıklığının belirlenerek, işletmeci ve kullanıcı maliyetlerinin toplamının enküçüklenmesidir. Çoktan çoğa talep durumu için BOGTP, çoktan bire durumundan oldukça zor gözükmektedir. Öncelikle, besleyici otobüs güzergâhlarının tasarımı, çoklu demiryolu hatlarını ve böylece besleyici otobüs güzergâhlarının demiryolu hatlarına alternatif bağlantılarını dikkate almalıdır. Hangi güzergâhın bağlantı için hangi demiryolu hattını seçeceğine bağlı olarak, bazı yolcuların hedefe ulaşması için demiryolu hatları arasında aktarma yapmaları gerekebilir.

Çoktan-bire BOGTP için geliştirilen genişleyen ağaç tasarımı kavramsal gösterimi, küçük değişiklikler ile çoktan çoğa BOGTP durumu için de uygulanabilir. Şekil 3.8 çoktan çoğa

talep durumu için bir tekil bütünleşik besleyici otobüs/demiryolu ulaşım sistemini gösterir. Bu durumda sistemde beş hedef vardır. Şekil 3.9 çoktan çoğa talep durumu için bütünleşik besleyici otobüs ulaşım sisteminin genişleyen ağaç ağı gösterimini sunar. Çoktan çoğa ve çoktan-bire durumları için genişleyen ağaç ağı gösterimlerindeki temel fark, ilkinin her hedef için çoklu (beş) demiryolu bağlantısı içermesidir. Demiryolu bağlantılarıyla ilişkili maliyet, bir demiryolu istasyonundan tüm hedeflere raylı sistemdeki yolculuğun maliyetidir.



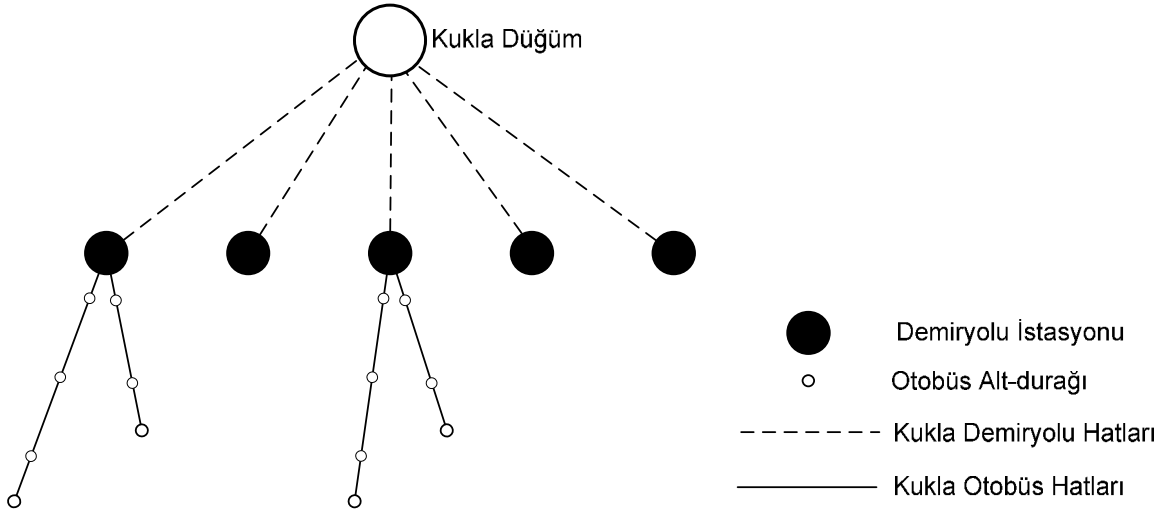
Şekil 3.8 Çoktan-çoğa talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sistemi



Şekil 3.9 Çoktan-çoğa talep durumu için bütünleşik otobüs ve raylı ulaşım sisteminin genişleyen ağaç gövdesi gösterimi

Şekil 3.9'daki genişleyen ağaç ağı gösteriminin, çoktan-bire talep durumu için Şekil 3.5'te gösterilen genişleyen ağaç ağı gösterimi ile benzer bir yapıya dönüştürülebilmektedir. Daha sonra da gösterileceği gibi bu kolaylık çoktan-bire durumu için eniyileme modelinin formülasyonunun doğrudan çoktan-çoğa durumuna genellenmesine izin verecektir.

Çoktan-bire BOGTP'nin genişleyen ağaç ağı gösterimini çoktan çoğa BOGTP durumuna dönüştürmek için, her "gerçek" otobüs durağını "alt-duraklar" (kukla duraklar) takımı ile gösteririz. Her alt-duraktaki talep, ortak "gerçek" duraktaki tekil hedefe olan talebi temsil eder. Daha sonra, beş demiryolu bağlantı dizisi her bir hedef için tekil kukla raylı bağlantılara ayrılır ve demiryolu bağlantılarının maliyeti bir vektör ile gösterilir. Çoktan çoğa talep durumu için bütünleşik besleyici otobüs/raylı ulaşım sistemi Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bir genişleyen ağaç ağı ile tanımlanabilir.



Şekil 3.10 Çoktan-çoğa talep durumu için otobüs ve raylı ulaşım sisteminin dönüştürülmüş genişleyen ağaç ağı gösterimi

Bu gösterim, çoktan-bire talep durumundaki genişleyen ağaç ağı ile aynı yapıya sahiptir. Şekil 3.10'daki genişleyen ağaç ağı gösterimi, Şekil 3.5'ten şu açılardan ayrılır:

- 1) Şekil 3.5'teki "gerçek" otobüs durakları "kukla" alt-duraklarla yer değiştirmiştir.
- 2) Şekil 3.5'teki "gerçek" otobüs bağları, ayrı alt-durakları bağlayan "kukla" otobüs bağları ile yer değiştirmiştir. Bir kukla otobüs bağı, bir "gerçek" otobüs bağlantısını temsil eder veya etmez. Yalnızca, farklı "gerçek" otobüs duraklarını birleştirdiği iki alt-durağı bağladığı zaman bir "gerçek" otobüs bağına temsil eder.
- 3) Şekil 3.5'teki demiryolu bağları, Şekil 3.10'daki kukla demiryolu bağlarıyla yer

değiştirmiştir ki, kukla demiryolu hatlarının maliyeti her yön için bir maliyet bileşeninin vektörüdür.

Şekil 3.10'daki genişleyen ağaç ağı gösterimi, çoktan-bire BOGTP için kullanılan model ile aynı yapıda olan çoktan çoğa BOGTP için matematiksel programlama modelinin formülasyonuna izin verir. Dahası, bu tarz bir gösterim, çoktan çoğa BOGTP için her durağın yalnızca bir güzergâha bağlanabileceği kısıdını ortadan kaldırmaya izin verir.

Çoktan çoğa BOGTP için eniyileme modelinin formülasyonu aşağıdaki ek değerlerin tanımlanmasını gerektirir. Bu değerlerde ve takip eden açıklamalarda, "alt-düğüm" terimi bir "alt-durağı" ve "ana düğüm" terimi bir "gerçek" otobüs durağını temsil eder.

1) Alt indisler:

d : hedef nokta indisi; $d = 1, \dots, J$

i_d : i düğümünün d hedefine varan alt-düğümü

p : demiryolu istasyonları ve alt-düğümleri de içeren düğüm indisi

2) Diziler:

M : tüm düğümlerin dizisi (alt-düğümler ve demiryolu istasyonları)

W : M 'nin tüm demiryolu istasyonları kümesini içeren herhangi uygun altkümeleri

R : $[j/I + 1 \leq j \leq I + J]$ tüm demiryolu istasyonlarının kümesi

3) Parametreler:

C_{jd} : j demiryolu istasyonundan d hedefine yolcu başına demiryolu maliyeti

L_{i_dp} : i_d alt-düğümü ile p noktası arasındaki uzaklık

Q_{i_d} : i_d alt-düğümünden d hedefine saat başı ortalama ulaşım talebi

4) Değişkenler:

$X_{i_dp k}$: 1, eğer alt-düğüm i_d , k otobüs güzergâhında p düğümünden önceyse

0, değilse

$Y_{i_d j}$: 1, eğer alt-düğüm i_d , j demiryolu istasyonuna atanmışsa

0, değilse

Ana i düğüm noktasının herhangi iki alt-düğümü i_d ile i_d arasındaki uzaklık sıfırdır; örneğin, $L_{i_d i_d} = 0$.

$$\begin{aligned}
 \text{MINZ}(X, Y, F) = & \sum_{j=I+1}^{I+J} \left[\sum_{d=1}^J C_{jd} \left(\sum_{i=1}^I Q_{i_d} Y_{i_d j} \right) \right] + 2\lambda_0 \sum_{k=1}^K \left(\sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p \in M} L_{i_d p} X_{i_d p k} \right) \\
 & + \frac{\lambda_r}{2U} \sum_{k=1}^K \left[\left(\sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p \in M} L_{i_d p} X_{i_d p k} \right) \left(\sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p \in M} Q_{i_d} X_{i_d p k} \right) \right] \\
 & + \lambda_w \sum_{k=1}^K \frac{1}{2F_k} \left(\sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{i_d} \sum_{p \in M} X_{i_d p k} \right) \tag{3.39}
 \end{aligned}$$

Aşağıdaki kısıtlar altında:

- (i) $\sum_{k=1}^K \sum_{p \in M} X_{i_d p k} = 1$; $i = 1, \dots, I$
- (ii) $\sum_{j=I+1}^{I+J} \sum_{d=1}^J \sum_{x=1}^I X_{i_d j k} \leq 1$; $k = 1, \dots, K$
- (iii) $\sum_{p \in M} X_{i_d p k} - \sum_{p \in M-R} X_{p i_d k} \geq 0$; $i = 1, \dots, I$
 $k = 1, \dots, K$
 $d = 1, \dots, J$
- (iv) $\sum_{i_d \notin W} \sum_{p \in W} \sum_{k=1}^K X_{i_d p k} \geq 1$; W
- (v) $\sum_{p \in M} X_{i_d p k} + \sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I X_{i_d j k} - Y_{i_d j} \leq 1$; $i = 1, \dots, I$
 $k = 1, \dots, K$

$$\begin{aligned}
& d = 1, \dots, J \\
& j = I+1, \dots, I+J \\
(vi) \quad & \sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{i_d} \sum_{p \in M} X_{i_d p k} \leq c F_k \quad ; k = 1, \dots, K \\
(vii) \quad & \frac{2c}{\rho U} \sum_{k=1}^K F_k \left(\sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p \in M} X_{i_d p k} L_{i_d p} \right) \leq ASH \\
(viii) \quad & \sum_{d=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p \in M} L_{i_d p} X_{i_d p k} \leq D_k \quad ; k = 1, \dots, K \\
(ix) \quad & X_{i_d p k} = (0,1) \quad ; i = 1, \dots, I \\
& k = 1, \dots, K \\
& d = 1, \dots, J \\
& p \in M \\
& Y_{i_d j} = (0,1) \quad ; i = 1, \dots, I \\
& d = 1, \dots, J \\
& j = I+1, \dots, I+J \\
& F_k \geq 0 \quad ; k = 1, \dots, K
\end{aligned}$$

BOGTP modelinin çoktan çoğa formülasyonu (3.39) ile çoktan-bire formülasyonu (3.38) şu iki fark dışında benzerdir:

1) (3.38) formülasyonundaki otobüs düğümleri, (3.39) formülasyonunda alt-düğümlerle yer değiştirmiştir.

2) (3.39)'un formülasyonunda, her demiryolu istasyonundaki hedeflere göre talep dağılımını hesaba katmak için, her demiryolu istasyonundaki birim demiryolu maliyeti bir vektör ile tanımlanmıştır. Bundan dolayı, çoktan çoğa BOGTP için eniyileme modeli, çoktan bire BOGTP'nden önemli ölçüde büyüktür. Daha önceki 5 demiryolu istasyonu, 50 otobüs durağı ve 6 otobüs güzergâhı olan aynı küçük örnek için, (3.39) formülasyonu 380.000'den fazla

değişken ve 10^{75} ten fazla kısıt içerecektir.

3.6 BOGTP İçin Uygulama Dönemi

Bu çalışma kapsamında, buraya kadar BOGTP modelleri yalnızca kısa-dönem planlama kapsamında formüle edilmiştir. Kısa-dönemde filonun boyutu görece olarak küçüktür. Bundan dolayı, kısa-dönem BOGTP için model bir filo boyutu kısıdı içerir. Uzun-dönemde, araç devralma (veya satma) ile filo boyutu değişebilir. Bu nedenle, filo boyutu, uzun-dönem BOGTP için bir eniyileme modelinde bir kısıt olarak temsil edilemez. Kısa-dönem formülasyonu küçük bir değişiklik ile uzun-dönem için uygulanabilir hale getirilebilir. Uzun-dönem BOGTP için bir modelde, filo boyutu konusu, amaç fonksiyonuna bir filo boyutu maliyeti bileşeni eklenerek çözümlenebilir. Bu ek maliyet bileşeni, hizmet için bir ek araç kullanıldığında karşılaşılan yıpranma maliyetini temsil eder. Her kullanılan otobüs-saat için sabit bir birim yıpranma maliyeti kabul edilerek, filo boyutu maliyet bileşeni (3.40) ile verilmiştir.

$$\frac{2c\beta}{\rho U} \sum_{k=1}^K F_k \left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} X_{ihk} \right) \quad (3.40)$$

Burada β , koltuk-saat başına maliyettir. Böylece uzun-dönem BOGTP için model, (3.38) veya (3.39) formülasyonlarından filo boyutu kısıdının çıkarılarak (3.40)'ın amaç fonksiyonuna dahil edilmesiyle elde edilir.

4. BESLEYİCİ OTOBÜS GÜZERGAHI TASARIM PROBLEMİ ALGORİTMASI

4.1 Giriş

Bu bölümde, BOGTP için çözüm algoritması sunulmaktadır. Önceki bölümde belirtildiği gibi, BOGTP, diğer güzergâhlama problemleri ile kıyaslandığında, işletme sıklığı gibi ek bir boyutu olan, büyük ve karmaşık bir güzergâhlama problemidir. Bu nedenle mevcut eniyileme teknikleriyle tam olarak çözülemediği için sezgisel olarak çözülmesi gereklidir(Kuah, 1986).

3. Bölüm'de üzerinde durulduğu gibi, BOGTP'ni bir açıklık ağacı ağı gibi gösterebiliriz (Şekil 3.4. ve 3.8). Şekil 3.4'teki açıklık ağacı ağı, tek seviyeli fiziksel dağıtım sistemi ağı ile benzerdir. Bu benzerliğe dayanarak, BOGTP ile Çok Depolu Araç Güzergâhlama Problemi (MDVRP) arasındaki benzerlikleri ortaya koyabiliriz (Kuah, 1986). ÇDAGP, kat edilen toplam uzaklığı azaltmak için, depolardan bir küme müşteriye, bir dizi teslimat güzergâhının tasarımı problemidir. BOGTP ile ÇDAGP arasında yalnızca tanımsal değil, birkaç temel bileşen farklılığı vardır.

ÇDAGP'de amaç, filo boyutu ile ilgili yatırım maliyeti ve teslimat güzergâhlarının işletiminden kaynaklanan değişken maliyetlerin toplamından oluşan işletmeci maliyetini (teslimat maliyeti) enküçükmektir. BOGTP'de amaç yalnızca işletmeci maliyetlerini değil, kullanıcı maliyetlerini de içerir; BOGTP'de amaç işletmeci ve kullanıcı maliyetlerinin toplamını enküçükmektir.

ÇDAGP'de, teslimat aracının işletme sıklığı önceden belirlenmişken, BOGTP'de işletme sıklığı temel tasarım unsurlarından biridir. Bununla birlikte, ÇDARP'de güzergâh kapasitesi yalnızca araç kapasitesi ile belirlenirken, BOGTP'de güzergâh kapasitesi, otobüs kapasitesi ve işletme sıklığı ile belirlenir. Bu nedenle, BOGTP'de güzergâh kapasitesi bir girdi parametresi değil, ama eniyileme probleminin bir çıktısıdır. BOGTP ve ÇDARP arasındaki farklar gösterir ki, ÇDARP için kullanılan sezgisel yöntemlerle, BOGTP doğrudan çözülemez. Buna karşın, BOGTP'nin bir açıklık ağacı ağı şeklinde gösterimi ve ÇDARP ile benzerlikleri, BOGTP için bir çözüm yöntemi geliştirirken, ÇDARP'nin mevcut sezgisel yöntemlerinin bazı basit kavramlarının yararlı olabileceğini düşünülmektedir.

BOGTP için geliştirilecek sezgisel modelde, BOGTP'nin (3.38) ve (3.39) ile gösterilen amacını uygun bir şekilde yansıtan bir fonksiyon bulunmalıdır. Ayrıca önceki bölümlerde tartışılan eniyileme modellerinde gösterilen, problemin tüm temel elemanlarını ve iç-işliklerini uygun şekilde ifade etmelidir. BOGTP için geliştirilen sezgisel yöntem, tercihen

besleyici otobüs güzergâhlarının tasarımı, bu güzergâhların demiryolu istasyonlarına bağlanması ve otobüs işletme sıklıklarının belirlenmesini eşzamanlı olarak içermelidir. Güzergâhların tasarımı ve bunların demiryolu istasyonlarına bağlanmasını eşzamanlı değil de ardışık olarak ele almak, niteliksel olarak alt-optimum (sub-optimal) sonuç verir. Ayrıca, önerilen algoritmanın yalnızca küçük problemlerin çözümünüyle sınırlı olmaması tercih edilir.

4.2 BOGTP için Sezgisel Algoritma

BOGTP için önerilen sezgisel algorithmada birleşik yaklaşım kullanılmıştır. Birleşik yaklaşım bir Öncül Algoritma ve iki iyileştirme prosedürü içermektedir. Öncül Algoritmanın amacı bir dizi öncül uygulanabilir otobüs güzergâhı oluşturmak ve her bir güzergâhın sıklığını belirlemektir. BOGTP için öncül uygulanabilir bir güzergâh yapısı oluşturulduktan sonra, iki iyileştirme prosedürü ile bu çözüm geliştirilir.

4.2.1 BOGTP için Öncül Algoritma

BOGTP için Öncül Algoritma ardışık birikimler yaklaşımını kullanır. BOGTP için ardışık birikimler yaklaşımıyla iki üstünlük yakalanabilir. İlk olarak, bu yaklaşımla, amaç fonksiyonu ve BOGTP'nin diğer temel elemanları uygun bir şekilde tanımlanabilir. İkinci olarak, kendine özgü hesaplama verimliliği sayesinde, BOGTP'nin karmaşıklığıyla makul hesaplama çabası ile başa çıkmamızı sağlar.

Öncül Algoritmanın öncül çözümünün başlangıcında, her otobüs durağına, güzergâhın otobüs maliyetinin en düşük olacağı bir demiryolu istasyonundan bir güzergâh doğrudan hizmet eder. Yöntem daha sonra otobüs durak çiftlerini bağlayarak veya kısmen oluşturulmuş bir güzergâh bölümüne bir otobüs durağı ekleyerek, otobüs güzergâhlarını sırayla oluşturur. Otobüs duraklarının bağlanması maksimum birikimler ölçütüne dayanır. Birikimler ölçümü, her ikisi de güzergâh frekansının fonksiyonları olan kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin toplamındaki azalmayı temsil eder (Kuah, 1986).

Mevcut bir güzergâha bir otobüs durağının dâhil edilmesi, yalnızca güzergâh uzunluk kısıdını veya güzergâh kapasite kısıdını veya her ikisini ihlal etmediği durumlarda mümkündür. Eğer, herhangi bir mevcut güzergâhın uzatılması yukarıdaki kısıtları ihlal ediyorsa veya herhangi bir atanmamış otobüs durağının mevcut güzergâhlardan birine eklenmesi, önceden tanımlanmış minimumu geçemeyen toplam birikimler ile sonuçlanıyorsa, yeni bir güzergâha başlanır. Algoritma, her güzergâh için en iyi frekansın yanında, hizmet için gerekli toplam koltuk-saati de belirleyecektir. Kullanılabilir araç filosuna göre çözümün uygulanabilirliğini

korumak için, maksimum kullanılabilir koltuk-saate uygun bir kısıt dâhil eder ve çözümün oluşturduğu toplam gerekli saatlik koltuk-saati sınırlandırır.

Bir araç güzergâhlama probleminde, düğümler p ile q arasına i düğümünün eklenmesiyle uzaklıktaki birikim (4.1) ile verilmiştir.

$$SAV_i(p, q) = l_i^j - (l_{pi} + l_{iq} - l_{pq}) = l_i^j - STR_i(p, q) \quad (4.1)$$

Burada,

$SAV_i(p, q)$; p ve q düğümlerine i düğümünün eklenmesiyle uzaklıktaki birikim,

l_i^j ; j düğümü ile i düğümü arasındaki uzaklık,

l_{pi}, l_{pq}, l_{iq} ; p ve i düğümleri, p ve q düğümleri, i ve q düğümleri arasındaki uzaklıklar,

$STR_i(p, q)$; düğüm p ile q arasına i düğümünün eklenmesiyle oluşan "gerilme"(buradaki "gerilme", i düğümünün eklenmesiyle p ile q düğümleri arasındaki bağlantının uzunluğundaki artışı ifade eder).

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, BOGTP'nde ulaştırma maliyeti, hem işletmeci hem de kullanıcı maliyetlerini içerir. Dahası, bu iki maliyet bileşeni, işletme sıklığına bağlıdır. BOGTP için birikimler hesabı bu elemanları temsil etmelidir. i düğümünü (otobüs durağı), p ve q düğümleri arasına eklemenin birikimi şu şekilde yazılabilir (4.2),

$$SAVTC_i(p, q) = TC_i^j - INCOST_i(p, q) \quad (4.2)$$

Burada,

TC_i^j ; i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna bir güzergâhın doğrudan erişme maliyeti,

$INCOST_i(p, q)$; p ve q duraklarının arasına i otobüs durağını eklemenin maliyeti.

Doğrudan bir güzergâhın ulaştırma maliyeti TC_i^j ; BOGTP'nin demiryolu maliyeti, otobüs işletme maliyeti, otobüs yolcu seyir maliyeti ve yolcunun bekleme maliyetlerini içeren amaç fonksiyonun tüm bileşenlerini temsil etmektedir. i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna doğrudan bir otobüs güzergâhı için ulaştırma maliyetinin gösterimi (4.3) ile verilmiştir.

$$TC_i^j = c_{sj} q_i + BC_i^j \quad (4.3)$$

Burada,

TC_i^j ; i den j ye doğrudan bir güzergâhın ulaştırma maliyeti (\$/saat),

BC_i^j ; i den j ye doğrudan bir güzergâhın otobüs maliyeti (\$/saat, 4.3a),

q_i ; i otobüs durağındaki ortalama saatlik talep (yolcu/saat),

c_{sj} ; j istasyonundan s hedefine demiryolu maliyeti (\$/km).

$$BC_i^j = 2\lambda_0 f_{ij} l_{ij} + \frac{\lambda_r}{U} l_{ij} q_i + \frac{\lambda_w}{2f_{ij}} q_i \quad (4.4)$$

f_{ij} ; i den j ye doğrudan bir güzergâhın otobüs frekansı (dakika/sefer)

$\lambda_0, \lambda_r, \lambda_w, U$; 3. Bölüm'de açıklanmıştır.

(4.3) teki maliyet bileşenlerinin yapısı, BOGTP'nin (3.1) ile gösterilen amaç fonksiyonuna benzerdir. Aralarındaki tek fark, (4.3) tek bir dolaysız güzergâh için ulaşım maliyetini gösterirken, (3.1) sistem maliyetini gösterir.

(4.3)'ün dolaysız güzergâh maliyeti sabit değildir ama işletme sıklığı f_{ij} 'nin bir fonksiyonudur. Doğrudan güzergâhtaki en iyi işletme sıklığını belirlemek için, (4.3)'ün ilk durum koşulları (4.5)'deki gibi çözülür. En iyi işletme sıklığı f_{ij}^* (4.6) ile verilmiştir.

$$\frac{\partial TC_i^j}{\partial f_{ij}} = 0 \quad (4.5)$$

$$f_{ij}^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w q_i}{\lambda_0 l_{ij}}} \quad (4.6)$$

(4.5)'in ilk durum koşullarından (4.7) eşitliğine ulaşılabilir,

$$\frac{\lambda_w}{2f_{ij}^*} q_i = 2\lambda_0 f_{ij}^* l_{ij} \quad (4.7)$$

Bu durumda, en uygun işletme sıklığında sahip dolaysız bir otobüs güzergâhı için, yolcu bekleme süresi maliyetleri ve otobüs işletme maliyetleri eşittir.

(4.7) nin (4.3)'te yerine konulmasıyla, i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna en iyi güzergâh sıklığında işletilen doğrudan bir hattın maliyeti, (4.8) elde edilir.

$$TC_{ij}^j = C_{sj}q_i + 2\sqrt{\lambda_0\lambda_w l_{ij}q_i} + \frac{\lambda_r}{U} l_{ij}q_i \quad (4.8)$$

(4.2)'deki ekleme maliyetini (INCOST) elde etmek için, öncelikle birden fazla otobüs durağı içeren bir güzergâhın ulaşım maliyeti tanımlanır. (4.9) eşitliği, birçok otobüs durağı içeren ve j demiryolu istasyonunda sonlanan k güzergâh parçasının maliyetini verir. Bir güzergâh parçasının maliyeti, doğrudan bir güzergâhın (4.3) ile verilmiş maliyetiyle, güzergâh parçasındaki ortalama yolculuk uzaklığına etki eden kullanıcı yolculuk süresinin maliyeti dışında, birbirleriyle benzerdir.

$$RTC_K = C_{sj}Q_k + 2\lambda_0 F_k L_k + \frac{\lambda_r}{2U} L_k Q_k + \frac{\lambda_w}{2F_k} Q_k \quad (4.9)$$

RTC_k ; güzergâh için ulaşım maliyeti (\$/saat),

L_k ; güzergâh parçasının toplam uzunluğu (km),

Q_k ; güzergâh parçasının toplam talebi (yolcu/saat),

F_k ; güzergâh parçasının frekansı (dakika/sefer).

k güzergâh parçasının en iyi frekansını belirlemek için, (4.9) ilk durum koşulu çözüldüğünde (4.10) ile verilen F_k^* en iyi frekansı elde edilir. Burada, en iyi frekans durumunda, güzergâh parçası için yolcu bekleme maliyetinin otobüs işletme maliyetine eşit olduğu (4.11) eşitliği ile tekrar verilmiştir.

$$F_k^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{\lambda_0 L_k}} \quad (4.10)$$

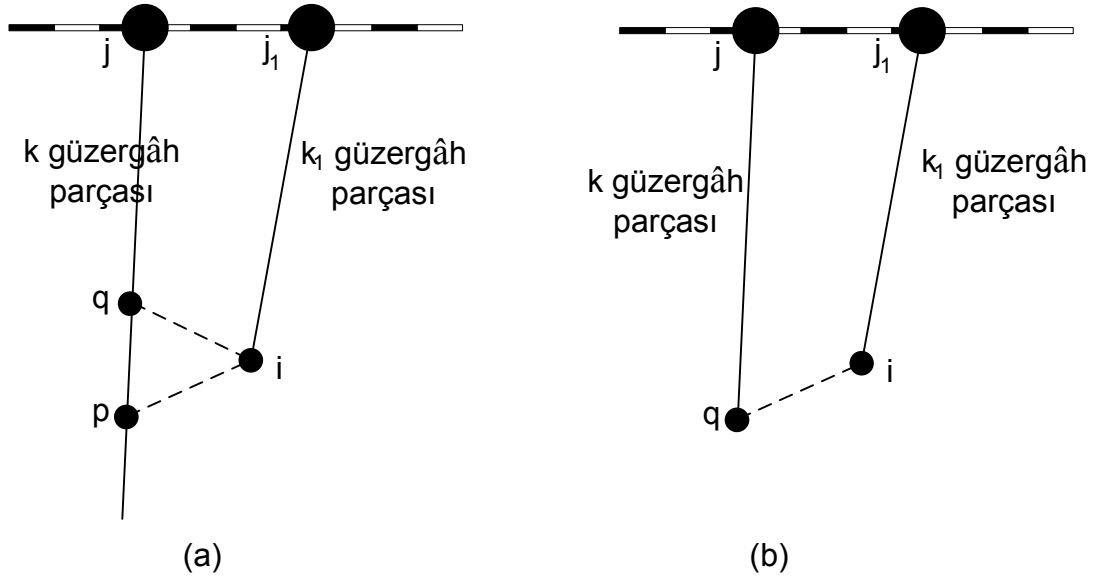
$$\lambda_0 F_k^* L_k = \frac{1}{2} \frac{\lambda_w}{F_k^*} Q_k \quad (4.11)$$

(4.8)'in (4.7)'de yerine konulmasıyla, RTC_k , en iyi izleme süresine sahip k güzergâh

parçasının ulaştırma maliyeti (4.12) elde edilir.

$$RTC_k = C_{sj} Q_k + 2\sqrt{\lambda_0 \lambda_w L_k Q_k} + \frac{\lambda_r}{2U} L_k Q_k \quad (4.12)$$

Şekil 4.1a k güzergâh parçasının p ve q durakları arasında i otobüs durağının eklenmesini göstermektedir. j demiryolu istasyonunda sonlanan k güzergâh parçasına i durağı eklendikten sonraki RTC_k^a ulaşım maliyeti denklemi (4.13) ile verilmiştir.



Şekil 4.1 Bir güzergâh parçasına bir otobüs durağı eklemenin iki yolu

(a) i otobüs durağının, k güzergâh parçasının p ve q otobüs durakları arasında eklenmesi ve (b) i otobüs durağının, k güzergâh parçasındaki q otobüs durağına bağlanması.

$$RTC_k^a = C_{sj} Q_k^a + 2\sqrt{\lambda_0 \lambda_w L_k^a Q_k^a} + \frac{\lambda_r}{2U} L_k^a Q_k^a \quad (4.13)$$

Burada,

$$L_k^a = L_k + l_{pi} + l_{iq} - l_{pq}$$

$$Q_k^a = Q_k + q_i$$

k güzergâhı için en iyi frekans (4.14) ile verilmiştir,

$$F_k^a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k^a}{\lambda_0 L_k^a}} \quad (4.14)$$

Eğer i otobüs durağı, k güzergâh parçasının üzerine Şekil 4.1b deki gibi bağlanırsa, eklemenden sonraki güzergâhın uzunluğu L_k^a (4.15) ile verilmiştir.

$$L_k^a = L_k + l_{iq} \quad (4.15)$$

j demiryolu istasyonunda sonlanan k güzergâhındaki p ve q düğümlerinin arasına i otobüs durağının eklenmesiyle oluşacak maliyet aşağıdaki gibidir,

$$\begin{aligned} \text{INCOST}_i(p, q) &= \text{RTC}_k^a - \text{RTC}_k \\ &= C_{sj} q_i + 2\sqrt{\lambda_0 \lambda_w} \left(\sqrt{L_k^a Q_k^a} - \sqrt{L_k Q_k} \right) + \frac{\lambda_r}{2U} (L_k^a Q_k^a - L_k Q_k) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Şimdiye kadar, (4.2) ile verilen ulaştırma maliyetindeki birikimler, (4.8b) ve (4.16) eşitlikleri kullanılarak tanımlanmıştır. Fakat (4.2) eşitliği sistemde yalnızca tek bir demiryolu istasyonu olması durumunda uygulanabilir; çoklu demiryolu istasyonları için bu eşitliğin düzenlenmesi gereklidir. (4.2) eşitliği, bir durağın j demiryolu istasyonuna atanmış bir otobüs güzergâh parçasına bağlanmasının alternatifi olarak, dolaysız bir güzergâh ile j istasyonuna bağlanması kesin kabulünü ortaya koyar. "Düzenlenmiş uzaklık" tasarımı kullanılarak, i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna dolaysız bir güzergâhın maliyeti (4.17) ile gösterilmiştir,

$$\text{MTC}_i^j = \text{Minimum}_{j' \in R} \text{TC}_i^{j'} - \left(\text{TC}_i^j - \text{Minimum}_{j' \in R} \text{TC}_i^{j'} \right) = 2 \text{Minimum}_{j' \in R} \text{TC}_i^{j'} - \text{TC}_i^j \quad (4.17)$$

Burada,

MTC_i^j ; i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna dolaysız güzergâhın düzenlenmiş ulaştırma maliyeti,

R ; tüm demiryolu istasyonlarını içeren küme.

Burada, eğer j demiryolu istasyonu i otobüs durağına en yakın istasyon ise (minimum güzergâh maliyeti anlamında), düzenlenmiş ulaştırma maliyeti MTC_i^j , i durağından j demiryolu istasyonuna dolaysız bir güzergâhın maliyetine TC_i^j eşittir. (4.17) eşitliği (4.2)'de yerine konulduğunda, j demiryolu istasyonunda sona eren k güzergâhının p ve q duraklarının

arasına i durağını eklemenin ulaştırma maliyetinin düzenlenmiş birikimleri (4.18) ile elde edilir.

$$MSTC_i(p, q) = MTC_i^j - INCOST_i(p, q) \quad (4.18)$$

$$= \left(2 \text{Minimum}_{j \in R} TC_i^j - TC_i^j \right) - INCOST_i(p, q)$$

Daha önce de üzerinde durulduğu gibi, Öncül Algoritma, otobüs duraklarından demiryolu istasyonlarına bir dizi dolaysız güzergâh ile başlar; güzergâhların her biri minimum otobüs maliyetine sahiptir. Daha sonra, gelişen otobüs güzergâhlarının içine sırasıyla otobüs durakları ekleyerek besleyici otobüs güzergâhları oluşturur. Eğer mevcut güzergâh, güzergâh kapasitesi veya maksimum uygulanabilir güzergâh uzunluğundaki kısıtlarını ihlal etmeden uzatılamıyorsa, yeni bir güzergâh başlatılır. Bu durumda, yeni bir güzergâh (4.19)'da tanımlandığı gibi, i_0 otobüs durağının ona en yakın j_0 demiryolu istasyonuna bağlanmasıyla başlatılır.

$$(i_0, j_0) = \text{Arg} \left\{ \text{Minimum} (BC_i^j) \right\}; \quad i \in V, j \in R \quad (4.19)$$

Burada,

V ; atanmamış (güzergâhsız) tüm otobüs duraklarının kümesi,

BC_i^j ; i otobüs durağından j demiryolu istasyonuna dolaysız bir güzergâh için (4.8) ile verilen toplam otobüs ulaştırma maliyeti.

İkinci durumda, algoritma yeni bir güzergâhı, eğer en iyi MSTC değeri, önceden tanımlanmış bir minimum $\min MSTC$ değerinden küçük ise başlatır. Bu ölçüt, ardışık birikimler yönteminin önemli bir elemanıdır. Bu durumda, yeni bir güzergâha minimum MSTC değerini verecek olan otobüs durağı ile başlanır. İkinci durumda yeni bir güzergâha başlamanın amacı, yeni ekleme fırsatları açmaktır. MSTC'nin az olması, birleştirilmiş otobüs durağının, mevcut uzatılabilir güzergâhlardan "uzak" ve ona en yakın demiryolu istasyonuna "yakın" olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, minimum MSTC değeri, yeni bir güzergâhın başlangıcında yeni bir otobüs durağının seçiminde yol göstericidir.

Öncül Algoritma besleyici otobüs güzergâhlarının sayısının önceden tanımlanmasını gerektirmez. Bunun yerine, verilmiş bir talebe hizmet vermek için gerekli otobüs güzergâhlarının sayısını belirler. Bir otobüs güzergâhı kümesinin algoritma tarafından

oluşturulmasının ardından, bunun uygulanabilirliği mevcut filo boyutuna bağlantısıyla denetlenir. Bu nedenle, çözümün toplam gerekli koltuk-saatleri, mevcut filoya göre belirlenmiş maksimum mümkün koltuk-saat (maksASH)'ten fazla olamaz. RSH değeri (4.20) ile verilmiştir,

$$RSH = \sum_k \frac{2c}{\rho U} F_k \cdot L_k \quad (4.20)$$

P ; ortalama otobüs doluluk katsayısı,

U ; ortalama otobüs işletme hızı (km/sa),

C ; otobüs kapasitesi (yolcu/otobüs).

maksASH değeri, mümkün koltuk-saatin (LBASH) alt sınırından fazla olmalıdır. Alt sınır, algoritmanın çözümünde amaç fonksiyonu olarak yalnızca işletmeci maliyetlerinin ve her güzergâhta minimum frekansın kullanılmasıyla elde edilir. LBASH'ı elde etmek için, TC_i^j ve $INCOST_i(p,q)$ elemanları (4.3c) ve (4.7b) ile değiştirilerek, (4.14) ile verilmiş düzenlenmiş birikimler formülünün aynısı kullanılır,

$$TC_i^j = C_{sj}^o q_i + 2\lambda_0 f_{ij} l_{ij} \quad (4.21)$$

Burada,

$$f_{ij} = \frac{q_i}{c} \quad ; \text{minimum frekans.}$$

$$INCOST_i(p,q) = C_{sj}^o q_i + 2\lambda_o (F_k^a L_k^a - F_k L_k) \quad (4.22)$$

Burada,

$$F_k = \frac{Q_k}{c} \quad ; \text{durak eklenmeden önce güzergâhın minimum frekansı (dakika/sefer),}$$

$$F_k^a = \frac{Q_k^a}{c} \quad ; \text{durak eklendikten sonra güzergâhın minimum frekansı (dakika/sefer),}$$

$$C_{sj}^o \quad ; \text{raylı sistem işletmeci maliyeti (\$/km).}$$

Öncül Algoritma, maksimum mümkün koltuk-saat (maksASH) değerini aşan bir çözüm ile sonlanabilir. Bu durumda λ_r , λ_w parametreleri ve raylı sistem maliyetinin kullanıcı bileşeni

C_{sj}^u küçültülerek, algoritma bu parametrelerin yeni değerleri ile tekrar çalıştırılır. Bu uygulama, kullanıcı maliyetinin görece büyüklüğünü azaltır ve algoritmanın daha az koltuk-saat ile sonuçlanan çözümler üretmesini sağlar.

Öncül Algoritma, aşağıdaki altsimgeleri, dizileri ve parametreleri kullanır.

i ; otobüs durakları indisi ($1 \leq i \leq I$),

j ; demiryolu istasyonları indisi ($I+1 \leq j \leq I+J$),

k ; otobüs güzergâhları indisi,

B ; $\{i/ 1 \leq i \leq I\}$, tüm otobüs durakları kümesi,

R ; $\{j/ 1 \leq j \leq J\}$, tüm demiryolu istasyonları kümesi,

V ; atanmamış tüm durakların kümesi,

M_k ; k güzergâhını temsil eden düğümlerin kümesi,

I_k ; k güzergâhı için uygulanabilir eklemeler kümesi (güzergâh kapasitesi veya güzergâh uzunluğu kısıtlarını ihlâl etmeyen eklemeler),

MNK ; Öncül Algoritma ile oluşturulan otobüs güzergâhlarının toplam sayısı.

Öncül algoritma:

Adım 1 (Başlangıç Durumuna Getirmek)

$V=B$ ve $k=0$

tüm k için, $L_k = 0$, $Q_k = 0$, $F_k = 0$

$MSTC_i^k=0$, $R=0$ ve $I_k=0$.

Adım 1, algoritmayı tüm otobüs duraklarını atanmamış düğümler kümesine alarak başlatır.

Adım 2 (Ulaştırma Maliyetini Hesapla)

Her $i \in V$ ve $j \in R$ için, BC_i^j ve TC_i^j değerlerini (4.8) ve (4.4) eşitliklerinden hesapla

Adım 2, her bir otobüs durağından demiryolu istasyonlarına dolaysız güzergâhların ulaştırma maliyetlerini hesaplar.

Adım 3 (Yeni Güzergâh Oluştur, A Durumu)

Her $i \in V$ için, öyle i_0 otobüs durağı ve j_0 demiryolu istasyonunu seç ki, i_0 'dan j_0 'a doğrudan bir güzergâhın maliyeti, diğer tüm doğrudan güzergâhlar arasında otobüs maliyeti BC_i^j en küçük olsun. i_0 durağını j_0 demiryolu istasyonuna bağla.

$$k=k+1$$

Adım 3, tüm dolaysız güzergâhlar içinde en düşük toplam otobüs maliyetine sahip doğrudan güzergâhı seçer ve A durumunda yeni bir güzergâh başlatır. B durumunda bir güzergâha başlamak için otobüs durağının seçilmesi Adım 8'de açıklanmıştır.

Adım 4 (Küme ve Güzergâhı Güncelle)

$$V=V-1,$$

$$M_k = M_k + j_0 + i_0$$

$$L_k = l_{ij}$$

$$Q_k = q_i$$

$$F_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{\lambda_0 L_k}}$$

Bir güzergâha başlandığında, Adım 4 güzergâhla ulaşılan parametreleri güncelleştirir ve seçilen otobüs durağını atanmamış otobüs durakları kümesinden çıkarır.

Adım 5 (Sonlandırma Ölçütü)

Eğer $V=\emptyset$ ise, Adım 11'e git.

Adım 5, atanmamış otobüs durakları kümesinin boş olup olmadığını belirler, sonuca göre, algoritmayı Adım 11'e veya Adım 6'ya taşır.

Adım 6 (Uygulanabilir Ekleme Kümesini Hesapla)

Her $i \in V$ için, $L_k \geq D_k$ veya $Q_k \geq c^* F_k$ ise Adım 3'e git;

Değilse, I_k 'yı hesapla.

Adım 6, güzergâh uzunluğu veya güzergâh kapasitesi kısıtlarının ihlal edilmesini kontrol eder. Eğer öyleyse mevcut güzergâh uzatılmayacaktır. Eğer değilse, Adım 6 güzergâh için uygulanabilir eklemeler kümesini oluşturacaktır.

Adım 7 (En Büyük MSTC'yi Hesapla)

Her $i \in I_k$ için (4.23) ile $MSTC_i^k$ hesapla;

$$MSTC_i^k = \text{Maksimum}_{(p,q) \in N_k} MSTC_i(p, q) \quad (4.23)$$

k güzergâhı için (4.24) ile en iyi MSTC değerini hesapla;

$$MSTC_{i^*}^k = \text{Maksimum}_{i \in I_k} MSTC_i^k \quad (4.24)$$

$MSTC_{i^*}^k$ ile ulaşılan i^* otobüs durağını ve bitişik durak çiftini (p^*, q^*) sakla.

Adım 7, uzayan güzergâha seçilmiş bir otobüs durağının eklenmesiyle ulaştırma maliyetinin minimum düzeltilmiş birikimlerini hesaplar.

Adım 8 (Minimum MSAVTC'deki Kısıdı Kontrol Et)

Eğer $MSTC_{i^*}^k \leq \text{MINMSTC}$ ise Adım 10'a git.

Eğer minimum düzenlenmiş birikimler, önceden belirlenmiş bir minimum değerden küçük değilse (Adım 8), Adım 9 mevcut güzergâhı, seçilmiş otobüs durağını genişleyen güzergâhın içine ekleyerek uzatır.

Adım 9 (Mevcut Güzergâhı Uzat ve Güncelle)

i^* otobüs durağını p^* ve q^* durakları arasına ekle,

$$V = V - i^*$$

$$M_k = M_k + i^*$$

$$L_k = L_k + l_{p^*i^*} + l_{i^*q^*} - l_{p^*q^*}$$

$$Q_k = Q_k + q_{i^*}$$

$$F_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{\lambda_0 L_k}}$$

Adım 5'e git.

Adım 10 (Yeni Güzergâh Oluştur, B Durumu)

Her $i \in V$ için (4.25) ile $MSTC_{i_0}$ hesapla,

$$MSTC_{i_0} = \underset{i \in V}{\text{Minimum}} \left(\underset{k/i \in I_k}{\text{Maksimum } MSTC_i^k} \right) \quad (4.25)$$

Burada, $MSTC_i^k$ (4.23) ile hesaplanır.

i_0 otobüs durağını en yakın j_0 demiryolu istasyonuna bağla,

$k=k+1$

Adım 4'e git.

Eğer minimum düzeltilmiş birikimler önceden belirlenmiş değerden küçükse, Adım 10, B durumunda yeni bir güzergâh oluşturmak için bir düğüm seçecektir.

Adım 11 (RSH, Gerekli Koltuk-Saat'i Hesapla)

Tüm güzergâhlar için (4.20) ile verilen RSH değerini hesapla.

Adım 11 gerekli koltuk-saatleri hesaplar.

Adım 12 (Maksimum Mümkün Koltuk-Saat'teki Kısıdı Kontrol Et)

Eğer $RSH < MAXASH$ ise, dur.

Adım 12, çözümün filo boyutu kısıdını ihlalini kontrol eder.

Adım 13 (Kullanıcı Maliyet Parametrelerini Değiştir)

Eğer kullanıcı maliyet parametreleri $>$ bu parametrelerdeki alt sınır ise,

$$C_{sj}^u = C_{sj}^u - \Delta C_{sj}^u$$

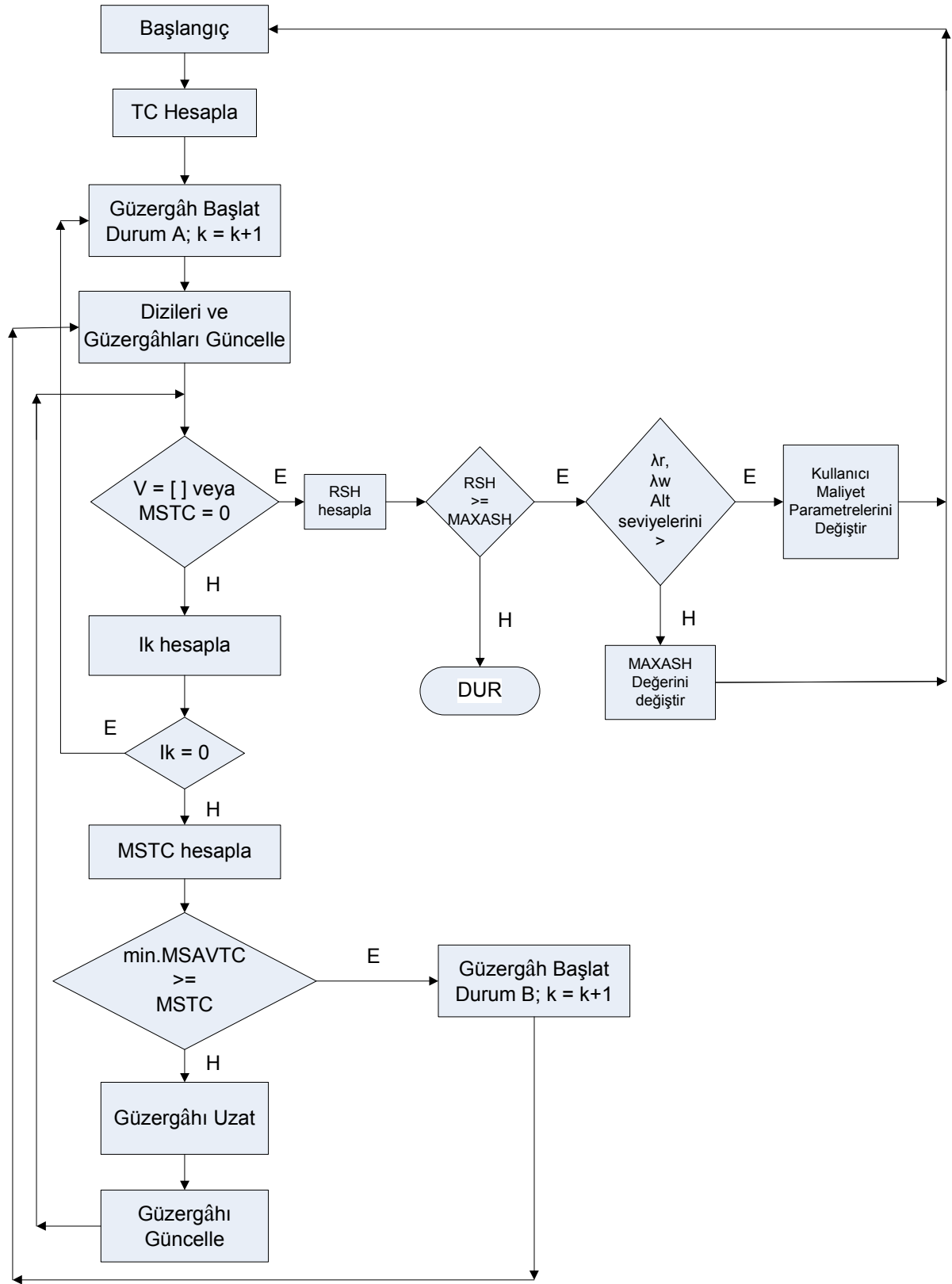
$$\lambda_w = \lambda_w - \Delta \lambda_w$$

$$\lambda_r = \lambda_r - \Delta \lambda_r$$

Burada ΔC_{sj}^u , $\Delta \lambda_w$ ve $\Delta \lambda_r$ bu parametrelerdeki küçük değişimlerdir.

Adım 1 e git.

Adım 13, bu kısıt sağlanamadığında amaç fonksiyonun kullanıcı maliyet bileşeniyle ilgili parametrelerin değerlerini azaltır ve süreç tekrarlanır.



Şekil 4.2 Öncül algoritma akış şeması

4.2.2 Geliştirme Prosedürleri

Daha önce üzerinde durulduğu gibi, Öncül Algoritma BOGTP için uygulanabilir bir çözüm bulur ve bu çözüm de ikinci basamakta geliştirme prosedürleri ile geliştirilir. İki geliştirme prosedürü oluşturulmuştur: 1) Tek Güzergâh Takas Prosedürü (SREP) 2) İki Güzergâh Takas Prosedürü (TREP) (Kuah, 1986).

Geliştirme prosedürlerinin uygulanmasındaki amaç, öncül algoritmanın çözüm aşamasında uygulanan iki sınırlamanın ortadan kaldırılmasıdır. Bu sınırlamalardan ilki, güzergâhları sırasıyla oluşturmasıdır; bir otobüs güzergâhında bulunan otobüs duraklarının sırası toplam güzergâh maliyetini enküçükleyecek şekilde oluşturulmamış olabilir. Bu nedenle, mevcut herhangi bir güzergâhta otobüs durakları yeniden sıralanarak güzergâh maliyetinde ek bir azalma sağlanabilir. SREP bu problemi çözmek için oluşturulmuştur. SREP, performans ölçütü olarak uzaklık yerine toplam güzergâh ulaştırma maliyetini kullanır.

Öncül algoritmanın diğer kısıdı, bir otobüs durağı belli bir aşamada gelişen bir güzergâha atandığında, bu durak tekrar atanamaz. Güzergâh yapısı değişince, daha önceki aşamalarda bir güzergâha atanan bir otobüs durağı, ulaştırma maliyetinde net bir azalma sağlayacak şekilde başka bir güzergâha tekrar atanabilir. TREP'in amacı bu problemi çözmektir. Bu prosedür iki güzergâhtan iki otobüs durağını yer değiştirerek, bu takasın güzergâh maliyetinde bir azalmayla sonuçlanıp sonuçlanmayacağını saptar.

4.2.2.1 Tek Güzergâh Takas Prosedürü

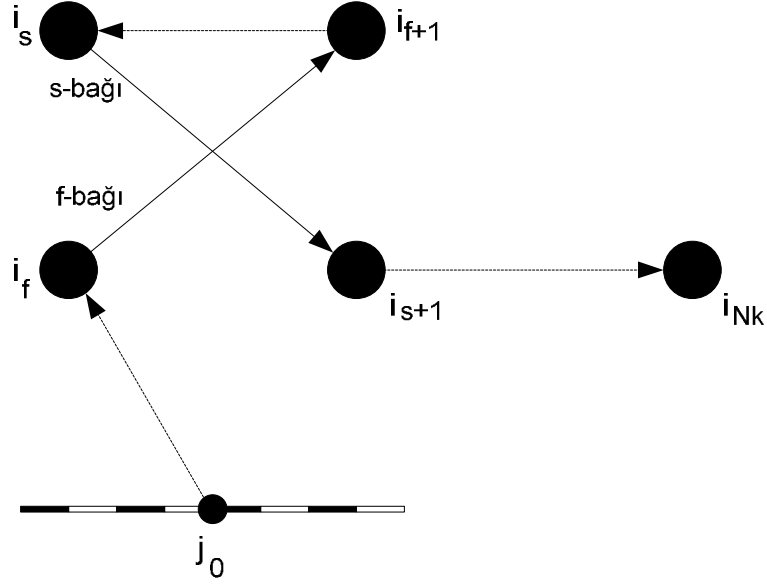
Tek Güzergâh Takas Prosedürü (SREP), verilmiş bir güzergâhta iki otobüs durağının birbiriyle bağlantısını aynı güzergâhtaki başka bir bağlantı ile yer değiştirerek, bu takasın toplam güzergâh maliyetine etkisini inceler. Bu durumda güzergâh maliyetindeki azalmanın, yolculuk uzaklığı ile orantılı olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.3, (i_f, i_{f+1}) ve (i_s, i_{s+1}) iki otobüs durağı bağının, aynı güzergâhın iki farklı (i_f, i_s) ve (i_{f+1}, i_{s+1}) bağlantıları ile değişimini gösterir. Takastan önceki güzergâh maliyeti RTC_k (4.12) ile verilmiştir. Takastan sonraki RTC_k^s , takastan önceki ile benzerdir, yalnızca RTC_k^s hesap edilirken, (4.12)'deki L_k güzergâh uzunluğunu, takastan sonraki L_k^s (4.26) ile değiştiririz.

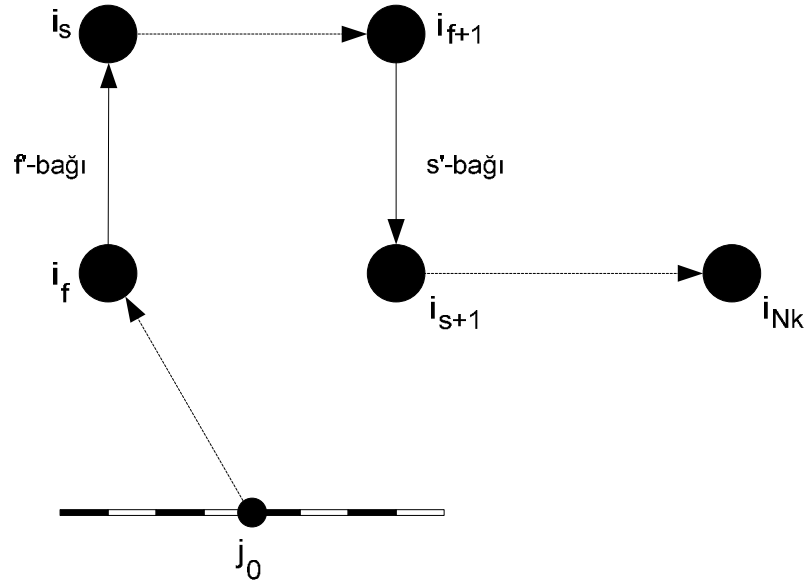
$$L_k^s = L_k + l_{f,f+1} + l_{s,s+1} - (l_{f,s} + l_{f+1,s+1}) \quad (4.26)$$

Takasın ardından $SAVS_k(f,s)$ ulaşım maliyetindeki birikimler, RTC_k ve RTC_k^s arasındaki farktır ve (4.21) ile verilmiştir.

$$SAVS_k(f,s) = RTC_k - RTC_k^s = 2\sqrt{\lambda_o\lambda_w}Q_k\left(\sqrt{L_k} - \sqrt{L_k^s}\right) + \frac{\lambda_r}{2U}Q_k\left(L_k - L_k^s\right) \quad (4.27)$$



a) Takas Öncesi



a) Takas Sonrası

Şekil 4.3 Tek güzergâh takas prosedürü

(4.26) denkleminde anlaşılmaktadır ki, $SAVS_k > 0$ olması için $L_k > L_k^s$ olmalıdır. Bu nedenle eğer takas uzunluğu daha kısa bir güzergâhla sonuçlanırsa, güzergâh maliyeti takasın uygulanmasıyla azalır.

Güzergâh uzunluğundaki değişimin bir sonucu olarak, (4.27)'de gösterilen en iyi sıklık değeri değişir. Denklem (4.27) göstermektedir ki, takasın ardından güzergâhın en iyi frekansı artar. Bu artışa karşın, (4.28) göstermektedir ki, bu değişim nedeniyle toplam gerekli koltuk-saat (RSH) değerindeki değişim negatif değildir,

$$F_k^s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{\lambda_o}} \sqrt{\frac{1}{L_k^s}} \quad (4.27)$$

$$\Delta RSH = \frac{2c}{\rho U} (F_k L_k - F_k^s L_k^s) \lambda_w = \frac{c}{\rho U} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{\lambda_o}} (\sqrt{L_k} - \sqrt{L_k^s}) \quad (4.28)$$

SREP'te kullanılan k güzergâhı (4.29) ifadesindeki gibi, tanımlanmış bir dizi nokta ile gösterilebilir,

$$M_k \equiv (i_1^k, i_2^k, \dots, i_{N_k}^k) \quad (4.29)$$

Burada, N_k , k güzergâhındaki otobüs duraklarının sayısı ve $i_1^k, i_2^k, \dots, i_{N_k}^k$ k güzergâhındaki otobüs duraklarıdır. SREP güzergâhın ardışık olmayan "f-bağı" ve "s-bağı" iki otobüs durağı bağlantısını, eğer takas güzergâhın uzunluğunu kısaltacaksa, aynı güzergâhın "f-bağı" ve "s'-bağı" bağlantıları ile değiştirir (Şekil 4.3). Unutulmamalı ki, "f-bağı" ve "s-bağı" seçildiğinde, "f-bağı" ve "s'-bağı" eşzamanlı olarak belirlenir. Prosedürün yenilenmesi ilk olarak "f-bağı" ve "s-bağı"nın seçilmesiyle başlar. Yeni bir iterasyon, "f-bağı", "s-bağı" çifti ile "f-bağı", "s'-bağı" çifti arasındaki olabilir tüm takaslar dikkate alındıktan sonra başlar. Prosedür, her bir iterasyon için, verilmiş bir k güzergâhının uzunluğundaki maksimum azalmayı ($\text{Maks } \Delta L_k$) belirler. Eğer $\text{Maks } \Delta L_k$ pozitif ise, ilgili takas gerçekleştirilir ve aynı güzergâh için yeni bir iterasyona başlanır. Verilmiş k güzergâhı için $\text{Maks } \Delta L_k$ sifıra eşitse, iterasyon güzergâh uzunluğunda bir iyileştirmeye sonuçlanamaz ve yeni bir güzergâh seçilir. Prosedür tüm güzergâhların üzerinde çalışılmasıyla tamamlanır.

SREP çalışmasında kullanılan ek gösterimler şunlardır;

f, s ; görece "birinci-bağ" ve "ikinci-bağ",

N_k ; k güzergâhındaki toplam otobüs durağı sayısı,

i_f^k, i_{f+1}^k ; k güzergâhındaki f bağıının otobüs durakları,

M_k' ; k güzergâhının takastan sonraki düzeni.

Tek güzergâh takas prosedürü için algoritma:

Adım 0 (Başlangıç)

$k=0$

Adım 1 (Yeni Bir Güzergâh Başlat)

$k=k+1$

Eğer $k > NNK$ ise, Dur.

Adım 1, üzerinde durulacak güzergâhı başlangıç durumuna getirir.

Adım 2 (Yeni Bir İterasyona Başla)

$f=0$ ve Maks $\Delta L_k = 0$

Adım 2, işlenecek yeni bir güzergâhın seçiminin veya son iterasyondaki bir takasın ardından sonra, yeni bir iterasyon başlatır.

Adım 3 (Yeni Bir "birinci-bağ" Belirle)

$f=f+1$. Eğer $f > N_k - 3$ ise Adım 6'ya git; değilse,

$s=f+2$.

Adım 3, yeni bir "birinci-bağ" belirler ve "birinci-bağ"ın son bağlantısının yanında olduğunu kontrol eder.

Adım 4 (Güzergâh Uzunluğunun Azalmasını Hesapla)

Eğer $s > N_k - 1$ ise Adım 3 e git.

güzergâh uzunluğundaki azalmayı (ΔL_k) (4.30) ile bul.

$$\Delta L_k = l_{i_f, i_{f+1}} + l_{i_s, i_{s+1}} - \left(l_{i_f, i_s} + l_{i_{f+1}, i_{s+1}} \right) \quad (4.30)$$

Adım 4, takas ile güzergâh uzunluğunda elde edilen azalmayı hesaplar ve mevcut "s-bağı"nın güzergâhının son bağlantısı olup olmadığını kontrol eder.

Adım 5 (Maksimum ΔL_k Değerini Bul)

Maks $\Delta L_k < \Delta L_k$ ise $\Delta L_k = \Delta L_k$ ve f^* ve s^* bağlarını kaydet;

Değilse, $s=s+1$ ve Adım 4'e git.

Adım 5, mevcut iterasyonla güzergâh uzunluğunda elde edilen en büyük azalmayı belirler ve ilgili f^* ve s^* bağlantılarını kaydeder.

Adım 6 (Takası Gerçekleştir ve Güzergâh Bilgisini Yenile)

Eğer Maks $\Delta L_k = 0$ ise Adım 1'e git; değilse

$(i_{f^*}, i_{f^*+1}), (i_{s^*}, i_{s^*+1})$ çifti ile $(i_{f^*}, i_{s^*}), (i_{f^*+1}, i_{s^*+1})$ çiftini değiştir.

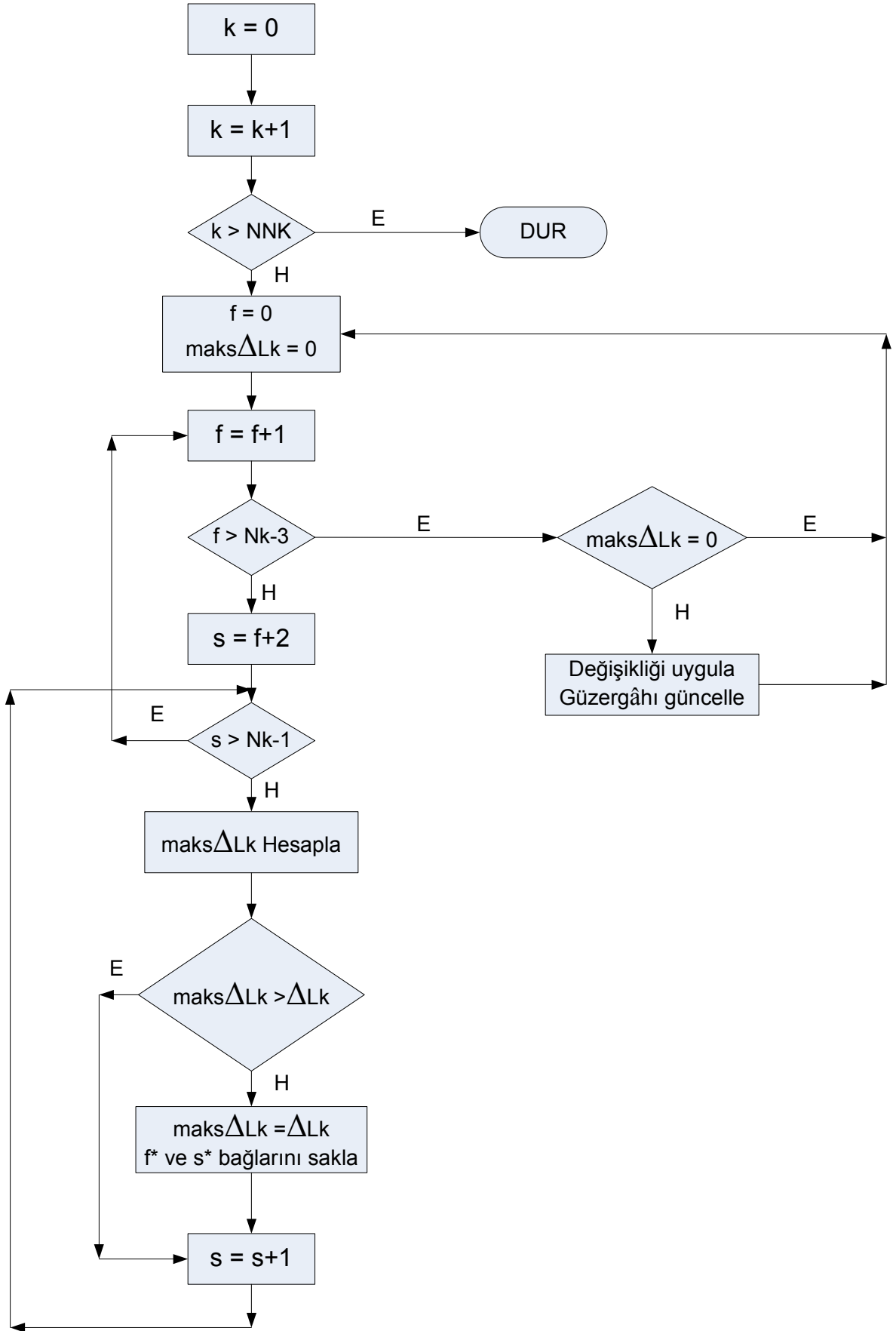
Takasın ardından, güzergâhın $i_{f^*+1}^k$ düğümü ve $i_{s^*}^k$ düğümü arasındaki kısmı ters çevrilmelidir (Şekil 4.3). Takasın ardından düğümlerin düzenlenmiş sırası (4.31) ile verilmiştir.

$$M'_k \equiv \left(i_1^k, \dots, i_{f^*}^k, i_{s^*}^k, \dots, i_{f^*+1}^k, i_{s^*+1}^k, \dots, i_{N_k}^k \right) \quad (4.31)$$

Adım 2'ye git.

Adım 6, bir takasın yapılıp yapılmayacağını belirler. Eğer yapılacaksa, takası gerçekleştirir, güzergâh uzunluğunu ve güzergâh yapısını günceller ve aynı güzergâhta yeni bir iterasyon başlatılır, aksi durumda, sonraki güzergâh seçilir.

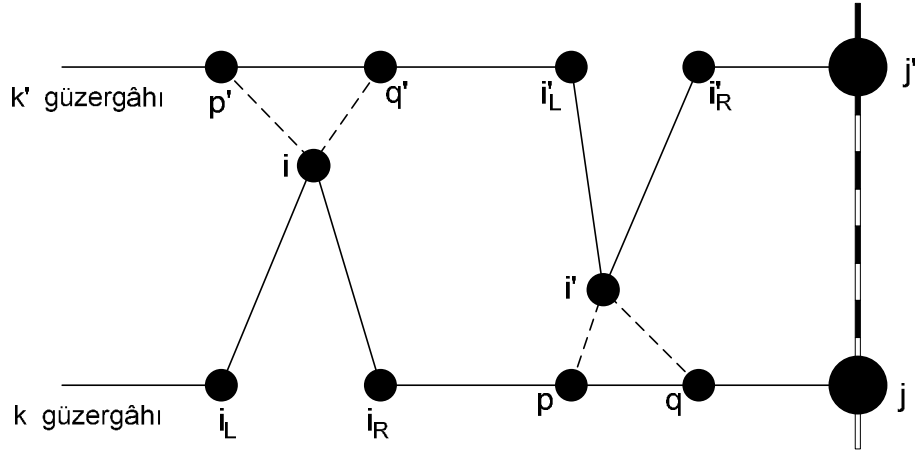
Şekil 4.4. SREP için akış şemasını göstermektedir.



Şekil 4.4 Tek güzergâh takas prosedürü akış şeması

4.2.2.2 İki Güzergâh Takas Prosedürü

Daha önceki kısımlarda üzerinde durulduğu gibi, bir ardışık alitmada, bir otobüs durağının bir güzergâha atanması ve güzergâhtaki konumu, geliştirilen güzergâhın mevcut yapısına bağlıdır. Güzergâhın yapısı değiştikçe, otobüs duraklarının diğer güzergâhlara tekrar atanması daha iyi bir çözümle sonuçlanabilir. İki Güzergâh Takas Prosedürü (TREP), iki otobüs güzergâhındaki iki otobüs durağını, daha gelişmiş bir çözümle sonuçlanması durumunda takas eder. Şekil 4.5 k güzergâhındaki i otobüs durağının, k' güzergâhındaki i' otobüs durağı ile takasını göstermektedir.



Şekil 4.5 k Güzergâhındaki i otobüs durağının, k' güzergâhındaki i' otobüs durağı ile takası

Bu tarz bir takasla güzergâh maliyetindeki birikimler $SAVT_{i,i'}(k,k')$ (4.32) ile verilmiştir.

$$SAVT_{i,i'}(k,k') = REDTC_i(i_L, i_R) + REDTC_{i'}(i'_L, i'_R) - INCTC_i^{(N_k, -i)} - INCTC_{i'}^{(N_{k'}, -i')} \quad (4.32)$$

Burada,

$REDTC_i(i_L, i_R)$; i otobüs durağının i_L ve i_R arasındaki mevcut konumundan kaldırılmasıyla k güzergâhının maliyetindeki azalma,

$INCTC_i^{(N_k, -i)}$; i' durağı kaldırıldıktan sonra i durağının eklenmesiyle k' güzergâhının maliyetindeki artış.

i otobüs durağının kaldırılmasıyla k güzergâhının maliyetindeki azalma, i güzergâhının kaldırılmasından önceki ve sonraki güzergâh maliyetlerinin arasındaki farktır (4.33),

$$REDTC_i(i_L, i_R) = RTC_k - RTC_k' \quad (4.33)$$

Burada RTC_k ve RTC_k^r i durağının kaldırılmasından önceki ve sonraki (4.12) ile verilen güzergâh maliyetleridir. RTC_k^r hesaplanırken kullanılan güzergâh talebi Q_k^r ve güzergâh uzunluğu L_k^r (4.34) ve (4.35) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$Q_k^r = Q_k - q_i \quad (4.34)$$

$$L_k^r = L_k - STR_i(i_L, i_R) \quad (4.35)$$

Burada, $STR_i(i_L, i_R)$ (4.1) eşitliğinde kullanılmıştı.

k' güzergâhı için p' ve q' düğümlerinin arasına i durağının (k güzergâhından) eklenmesiyle maliyetteki artış $INCTC_i(p', q')$, i durağının eklenmesinden önceki ve sonraki maliyet farkına eşittir,

$$INCTC_i(p', q') = RTC_{k'}^a - RTC_{k'} \quad (4.36)$$

Burada,

$RTC_{k'}$; k' güzergâhının mevcut maliyeti,

$RTC_{k'}^a$; k' güzergâhının i durağının eklenmesinin ardından oluşan maliyeti.

Güzergâh maliyeti $RTC_{k'}^a$, (4.37) ve (4.38) ile tanımlanan $Q_{k'}^a$ güzergâh talebi ve $L_{k'}^a$ güzergâh uzunluğundan elde edilir.

$$Q_{k'}^a = Q_{k'} + q_i \quad (4.37)$$

$$L_{k'}^a = L_{k'} + STR_i(p', q') \quad (4.38)$$

k' güzergâhından i' durağının çıkarılıp i durağının eklenmesiyle maliyetteki artış (4.39) ile verilmiştir.

$$INCTC_i^{(N_{k'} - i')} = \underset{(p', q') \in (N_{k'} - i')}{\text{Minimum}} INCTC_i(p', q') = INCTC_i(p^*, q^*) \quad (4.39)$$

Burada $INCTC_i(p', q')$ (4.36) ile verilmiştir.

TREP, tamamen bir sıralamaya dayanmasa da, "uygun takaslar"ın belirlenmesinde bir ölçüt

içerir. Bir "uygun takas" gelişmiş bir çözümle sonuçlanan bir takas demektir. "uygun takaslar"ın belirlenmesine ölçüt geliştirmek için, Şekil 4.5'te gösterilen takasın ardından maliyetteki değişim (4.40) ile tanımlanmıştır,

$$SAVT_{i,i'}(k,k') = RTC_k + RTC_{k'} - RTC_k^t - RTC_{k'}^t, \quad (4.40)$$

Burada, RTC_k^t ve $RTC_{k'}^t$, takas sonrası k ve k' güzergâhları için maliyettir. Bu değerleri hesaplarken takastan önceki (4.7a) Q_k ve L_k parametrelerini, takastan sonraki Q_k^t ve L_k^t değeri ile yer değiştirilir. Takastan sonraki güzergâh talebi Q_k^t ve güzergâh uzunluğu L_k^t (4.41) ve (4.42) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$Q_k^t = Q_k + q_{i'} + q_i \quad (4.41)$$

$$L_k^t = L_k + MSTR_{i'}^{(N_k-i)} - STR_{i'}^{i_L, i_R} \quad (4.42)$$

Burada, $MSTR_{i'}^{(N_k-i)} = \underset{(p,q) \in (N_k-i)}{\text{Minimum}} STR_{i'}(p,q)$ olur.

k (veya k') güzergâhı için takasın ardından F_k^t en iyi frekans (4.43) ile verilmiştir,

$$F_k^t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k^t}{\lambda_o L_k^t}} \quad (4.43)$$

k ve k' güzergâhları için RTC_k ve RTC_k^t değerleri (4.40) ta yerine konulup, ifadesi sadeleştirilirse, (4.44) ile verilen maliyetteki değişim eşitliğini elde ederiz.

$$\begin{aligned} SAVT_{i,i'}(k,k') = & \left(Q_k C_{sj} + Q_{k'} C_{sj'} - Q_k^t C_{sj} - Q_{k'}^t C_{sj'} \right) \\ & + 2\sqrt{\lambda_o \lambda_w} \left(\sqrt{Q_k L_k} + \sqrt{Q_{k'} L_{k'}} - \sqrt{Q_k^t L_k^t} - \sqrt{Q_{k'}^t L_{k'}^t} \right) \\ & + \frac{\lambda_r}{2U} \left(Q_k L_k + Q_{k'} L_{k'} - Q_k^t L_k^t - Q_{k'}^t L_{k'}^t \right) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Burada,

$SAVT_{i,i'}(k,k')$; k güzergâhındaki i otobüs durağı ile k' güzergâhındaki i' durağının takas yapılmasıyla ulaşım maliyetindeki birikimler.

$C_{sj}, C_{sj'}$; j ve j' demiryolu istasyonlarından s hedefine birim demiryolu ulaşımı maliyeti.

(4.44) denklemi (4.27) denklemine benzer olmasına karşın (4.44) iki otobüs güzergâhını hesaba katarken, (4.27) yalnızca tek bir güzergâhı dikkate alır. SREP içinde güzergâhtaki talep takasın ardından değişmezken, TREP içinde güzergâh talebi çoğu durumda değişecektir.

(4.44) denkleminde negatif olmayan SAVT durumları (4.45), (4.46) ve (4.47) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$\left(Q_k C_{sj} + Q_{k'} C_{sj'} \geq Q_k^t C_{sj} - Q_{k'}^t C_{sj'} \right) \quad (4.45)$$

$$\left(\sqrt{Q_k L_k} + \sqrt{Q_{k'} L_{k'}} \geq \sqrt{Q_k^t L_k^t} - \sqrt{Q_{k'}^t L_{k'}^t} \right) \quad (4.46)$$

$$\left(Q_k L_k + Q_{k'} L_{k'} \geq Q_k^t L_k^t - Q_{k'}^t L_{k'}^t \right) \quad (4.47)$$

$Q_k C_{sj}$ ve $Q_k L_k$ değerleri k güzergâhı için toplam demiryolu maliyetini ve yolculuğun toplam yolcu-km değerlerini ortaya koyar. İki otobüs durağının takasıyla demiryolu maliyetinde oluşacak maliyet, otobüs işletmeci ve kullanıcı maliyetlerine çok fazla bağlı olmadığından, "uygun takaslar" tanımı için ölçüt belirleyebiliriz. Bir takas (4.46) ve (4.47) denklemlerini sağladığı durumda uygundur. Böyle bir ölçüt kullanmadaki bir üstünlük de, güzergâh maliyetindeki değişimin temel bileşenlerinin tanımı dikkate alındığında, (4.46) denklemi takastan sonra gerekli koltuk-saat değişiminin ((4.48) denklemi ile verilen) negatif olmadığını gösterdiğinde, çözümün uygulanabilirliğinin filo boyutundaki sınıra (koltuk-saat) bağlı olduğunu ortaya koymuş olur.

$$\Delta RSH = \frac{2c}{\rho U} \sqrt{\frac{\lambda_w}{\lambda_o}} \left(\sum_k \left(\sqrt{Q_k L_k} - \sqrt{Q_k^t L_k^t} \right) \right) \quad (4.48)$$

Verilmiş bir çift (k, k') güzergâhı için, bir dizi "uygulanabilir uygun takaslar" (FFE)

belirlenmesi ile TREP başlar. Bir "uygulanabilir uygun takas", takasın ardından hem güzergâh uzunluğu, hem de güzergâh kapasitesi kısıtlarını sağlayan bir "uygun takas"tır. Eğer k ve k' güzergâhları için "uygulanabilir uygun takas" kümesi boş değilse, algoritma iki güzergâh arasında bir takas ile (MAXSAVT) maksimum birikimleri belirler.

$$\text{MAKSAVT} = \text{MaksimumSAVT}_{(i,i') \in \text{FFE}}(k, k') \quad (4.49)$$

Eğer MAXSAVT pozitif ise, algoritma ilgili takası gerçekleştirir, iki güzergâhı da günceller ve bu güzergâhlar için yeni bir "uygulanabilir uygun takas" kümesi oluşturur. Eğer MAXSAVT pozitif değil ve işlenen güzergâh çifti için "uygulanabilir uygun takaslar" tanımlanamıyorsa, yeni bir çift güzergâh seçilir. Aşağıda algoritmanın adım adım tanımı yapılmıştır.

İki güzergâh takas prosedürü için algoritma:

Adım 0 (Prosedürü Başlat)

$k=0$ ve $k' = 0$, burada k ve k' birbirlerine göre "birinci güzergâh" ve "ikinci güzergâh" indisleridir.

$\text{FFE} = 0$.

Adım 1 (Yeni bir "Birinci Güzergâh" Seç)

$k = k+1$, eğer $k > \text{NNK}-1$ ise, dur.

Adım 2 (Yeni bir "İkinci Güzergâh" Seç)

$k' = k+1$, eğer $k' > \text{NNK}$ ise, Adım 1'e git.

1 ve 2 Adımları işlenecek güzergâh çiftini seçer.

Adım 3 ("Uygulanabilir Uygun Takas" Kümesini Belirle)

$i \in N_k$ ve $i' \in N_{k'}$ olmak üzere her (i, i') otobüs durak çifti için, (i, i') takasının (4.41) ve (4.42) eşitlikleri kullanılarak güzergâh kapasitesi ve güzergâh uzunluğu kısıtlarına göre uygulanabilirliğini kontrol et. Eğer olumluysa, (4.46) ve (4.47) eşitliklerini kullanarak "uygun takas" olup olmadığını belirle. Eğer uygunsa, $\text{FFE} = \text{FFE} + (i, i')$.

Adım 3 güzergâh uzunluğu ve güzergâh kapasitesi kısıtlarına göre bir takasın uygulanabilirliğini kontrol eder. Daha sonra, uygulanabilir takasın ayrıca "uygun

takas" olup olmadığını kontrol eder. Eğer öyleyse, k ve k' güzergâh çifti için "uygulanabilir uygun takas" kümesini belirler.

Adım 4 (Maksimum Birikimi Belirle)

Eğer $FFE = \emptyset$ ise, $k' = k'+1$ ve Adım 3'e git; değilse, FFE 'deki her (i,i') için, (4.49)'a göre MAXSAVT değerini ve (4.50)'ye göre k ve k' güzergâhları arası en iyi takası (i^*,i'^*) belirle.

$$(i^*,i'^*) = \underset{(i,i') \in FFE}{\text{MaksimumSAVT}}_{i,i'}(k,k') \quad (4.50)$$

Adım 4'te, k ve k' güzergâhları arasında en geniş maliyet tasarrufuyla sonuçlanan "uygulanabilir uygun takas" belirlenir.

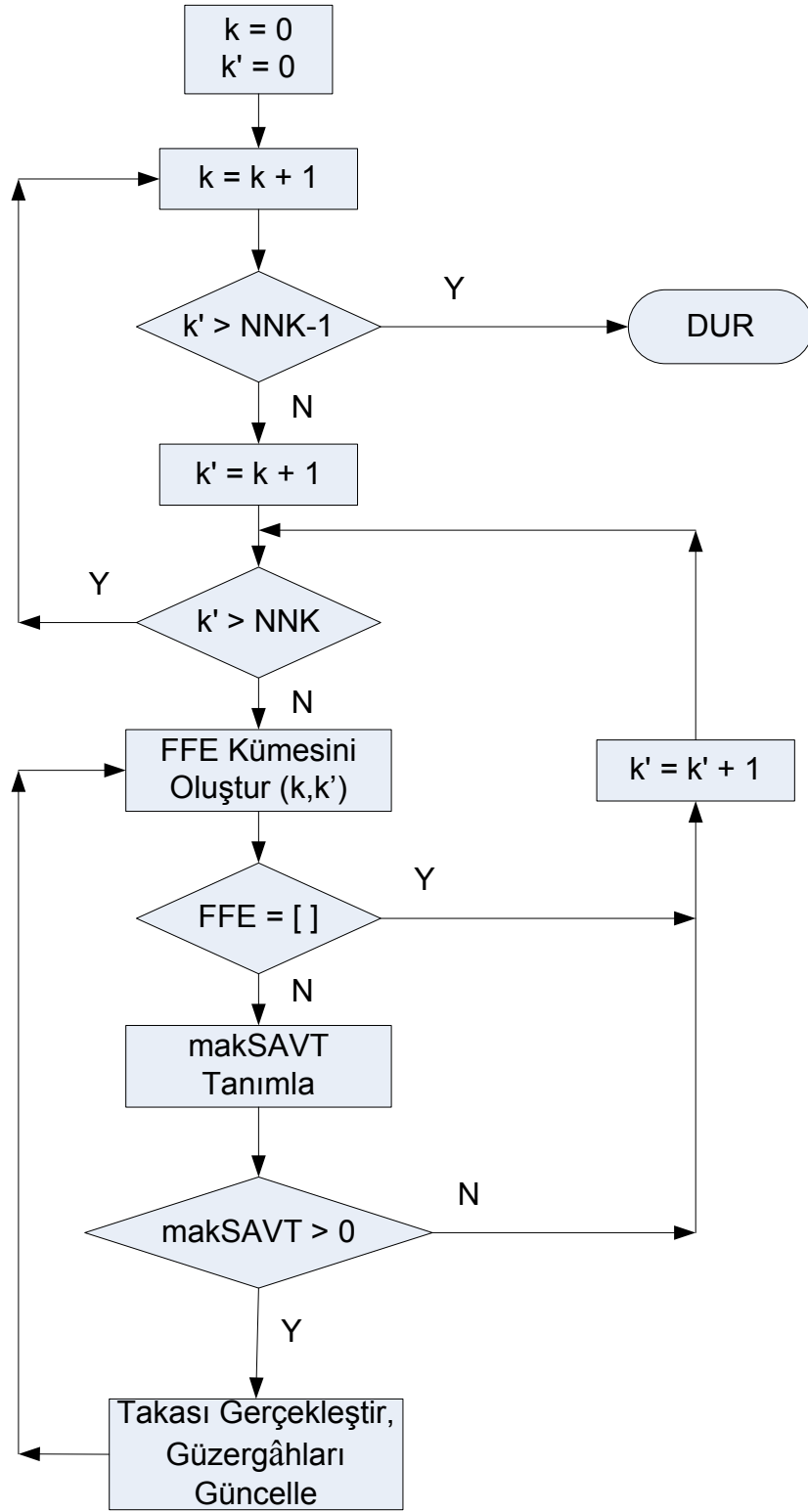
Adım 5 (Takası Gerçekleştir ve Güzergâhları Yenile)

Eğer $\text{MAXSAVT} \leq 0$ ise, $k' = k'+1$ ve Adım 3'e git. Değilse, (4.41), (4.42) ve (4.43) eşitliklerini kullanarak k ve k' güzergâhları için i^* ve i'^* duraklarını takasla ve güzergâh talebini, güzergâh uzunluğunu ve güzergâh frekansını güncelle.

Adım 3'e git.

Takas, gelişmiş bir çözümle sonuçlanıyorsa, Adım 5'te gerçekleştirilir.

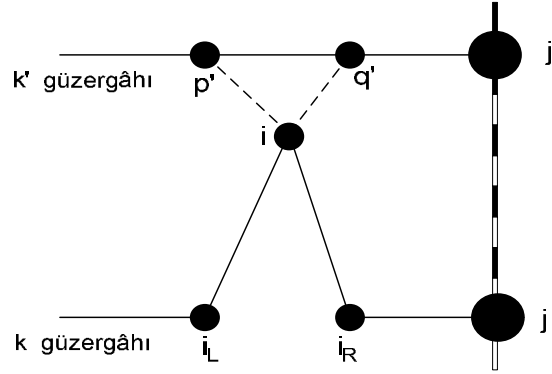
Şekil 4.6 TREP'in bir akış şemasını göstermektedir.



Şekil 4.6 İki güzergâh takas prosedürü akış şeması

4.2.2.3 Durak Devir Prosedürü

Daha önceki kısımlarda üzerinde durulduğu gibi, bir ardışık alırtmada, bir otobüs durağının bir güzergâha atanması ve güzergâhtaki konumu, geliştirilen güzergâhın mevcut yapısına bağılıdır. Güzergâhın yapısı değıştikçe, otobüs duraklarının diğcr güzergâhlara tekrar atanması daha iyi bir çözümle sonuçlanabilir. Durak Devir Prosedürü (DDP), bir otobüs güzergâhındaki bir otobüs durağını, farklı bir güzergâhta daha gelişmiş bir çözümle sonuçlanması durumunda devir eder. Şekil 4.7 k güzergâhındaki i otobüs durağının, k' güzergâhındaki p' ve q' otobüs durakları arasına devredilmesi durumunu göstermektedir.



Şekil 4.7 k Güzergâhındaki i Otobüs Durağının k' güzergâhındaki p' ve q' otobüs durakları arasına devred N ilmesi

Bu tarz bir devirle güzergâh maliyetindeki birikimler $TTCsav_{i,q'}(k,k')$ (4.51) ile verilmiştir.

$$TTCsav_{i,q'}(k,k') = REDTC_i(i_L, i_R) - INCTC_i^{(N_{k'})} \quad (4.51)$$

Burada,

$REDTC_i(i_L, i_R)$: i otobüs durağının i_L ve i_R arasındaki mevcut konumundan kaldırılmasıyla k güzergâhının maliyetindeki azalması,

$INCTC_i^{(N_{k',p',q'})}$: i durağının k' güzergâhındaki p' - q' güzergâh parçası arasına devredilmesi sonucu oluşan maliyet artışı

i otobüs durağının kaldırılmasıyla k güzergâhının maliyetindeki azalma, i otobüs durağının kaldırılmasından önceki ve sonraki güzergâh maliyetlerinin arasındaki farktır (4.52),

$$REDTC_i(i_L, i_R) = RTC_k - RTC_k^t \quad (4.52)$$

Burada,

RTC_k ; k güzergâhının mevcut maliyeti,

RTC_k^t ; k güzergâhından i durağının çıkarılması ardından oluşan maliyet.

Güzergâh maliyeti RTC_k^t , (4.53) ve (4.54) ile tanımlanan Q_k^t güzergâh talebi ve L_k^t güzergâh uzunluğundan elde edilir.

$$Q_k^t = Q_k - q_i \quad (4.53)$$

$$L_k^t = L_k - STR_i(i_L, i_R) \quad (4.54)$$

k' güzergâhı için p' ve q' düğümlerinin arasına i durağının(k güzergâhından) eklenmesiyle maliyetteki artış $INCTC_i(N_{k'}, p', q')$ i durağının eklenmesinden önceki ve sonraki maliyet farkına eşittir,

$$INCTC_i(N_{k'}, p', q') = RTC_{k'} - RTC_{k'}^t \quad (4.55)$$

Burada,

$RTC_{k'}$; k' güzergâhının mevcut maliyeti,

$RTC_{k'}^t$; k' güzergâhının i durağının eklenmesinin ardından oluşan maliyeti.

Güzergâh maliyeti $RTC_{k'}^t$, (4.56) ve (4.57) ile tanımlanan $Q_{k'}^t$ güzergâh talebi ve $L_{k'}^t$ güzergâh uzunluğundan elde edilir.

$$Q_{k'}^t = Q_{k'} + q_i \quad (4.56)$$

$$L_{k'}^t = L_{k'} + STR_i(p', q') \quad (4.57)$$

DDP, tamamen bir sıralamaya dayanmasa da, "uygun devir"lerin belirlenmesinde bir ölçüt içerir. Bir "uygun devir" gelişmiş bir çözümle sonuçlanan bir devir demektir. "uygun devir"lerin belirlenmesine ölçüt geliştirmek için, Şekil 4.5'te gösterilen takasın ardından maliyetteki değişim (4.58) ile tanımlanmıştır,

$$TTCsav_{i,q'}(k,k') = RTC_k + RTC_{k'} - RTC_k^t - RTC_{k'}^t \quad (4.58)$$

Burada, RTC_k^t ve $RTC_{k'}^t$, takas sonrası k ve k' güzergâhları için maliyettir. Bu değerleri hesaplarken takastan önceki Q_k ve L_k parametrelerini, takastan sonraki Q_k^t ve L_k^t değeri ile yer değiştiririz

Burada,

$TTCsav_{i,q'}(k,k')$; k güzergâhındaki i otobüs durağının, k' güzergâhındaki p' ve q'

duraklarının arasına devir yapılmasıyla ulaşım maliyetindeki birikimler.

Olabilecek tüm i durağı olasılıkları için, bir dizi "uygulanabilir durak devir" (UDD) belirlenmesi ile DDP başlar. Bir "uygulanabilir uygun devir", devrin ardından hem güzergâh uzunluğu, hem de güzergâh kapasitesi kısıtlarını sağlayan bir "uygun devir"dir. Eğer i durakları için "uygulanabilir uygun durak devir" kümesi boş değilse, algoritma $TTCsav$ değerlerini belirler.

$$MAXTTCsav = \underset{(k,i,k',q') \in UDD}{\text{Maksimum}} TTCsav_{i,q'}(k,k') \quad (4.59)$$

Tüm duraklar için $TTCsav$ değeri hesaplandıktan sonra algoritma $maksTTCsav$ değerini hesaplar. Eğer $maksTTCsav$ negatif yada sıfıra eşit ise, algoritma sonlandırılır. Eğer $maksTTCsav$ değeri pozitif ise $maksTTCsav$ değerini veren k güzergâhındaki i durağı ve k' güzergâhındaki (p', q') durağı çifti arasına i durağı devrini gerçekleştirir, iki güzergâhı da günceller ve yeni güzergâhları da içeren yeni bir küme "uygulanabilir devir" oluşturur. Bu işlem $maksTTCsav$ değeri negatif yada sıfır çıkana kadar devam eder.

Durak devir prosedürü için algoritma:

Adım 0 (Prosedürü Başlat)

$z=0$ (z iterasyon sayısı)

$UDD = []$

Adım 1 (Yeni bir iterasyon başlangıcı)

$z=z+1, k=0, k'=0$

Adım 2 (Yeni bir k Güzergâhı Seç)

$k = k+1$, eğer $k > \text{NNK}$ ise, maksTTCsav Değerinin hesapla. Eğer maksTTCsav değeri 0'dan büyük ise maksTTCsav değerini veren k güzergâhı üzerindeki i güzergâhını ,k' güzergâhındaki (p', q') durakları arasına durak devrini gerçekleştir ve Adım 1'e git. Eğer maksTTCsav değeri 0'a eşit veya küçük ise algoritmayı sonlandır.

Adım 3 (k güzergâhı için ilk i durağını belirle)

$i=1$ (1. Durak Metrobüs durağı olduğu için ilk atama 0 yerine 1 ile yapılıyor.)

Adım 4 (k güzergâhı için yeni i durağı belirlenmesi)

$i=i+1$, Eğer $i > \text{DS}$ ($\text{DS} = k$ Güzergâhındaki Durak Sayısı) Adım 2'ye git

Adım 5 (Yeni bir k' Güzergâhı Seç)

$k' = k+1$, eğer $k = k'$ ise Adım 5'e git, Eğer $k' > \text{NNK}$ Adım 4'e git

Adım 6 (k' güzergâhı için ilk q' durağını belirle)

$q'=0$ (ilk durak olan metrobüs durağını da dikkate alacağımız için 0'a eşitlendi)

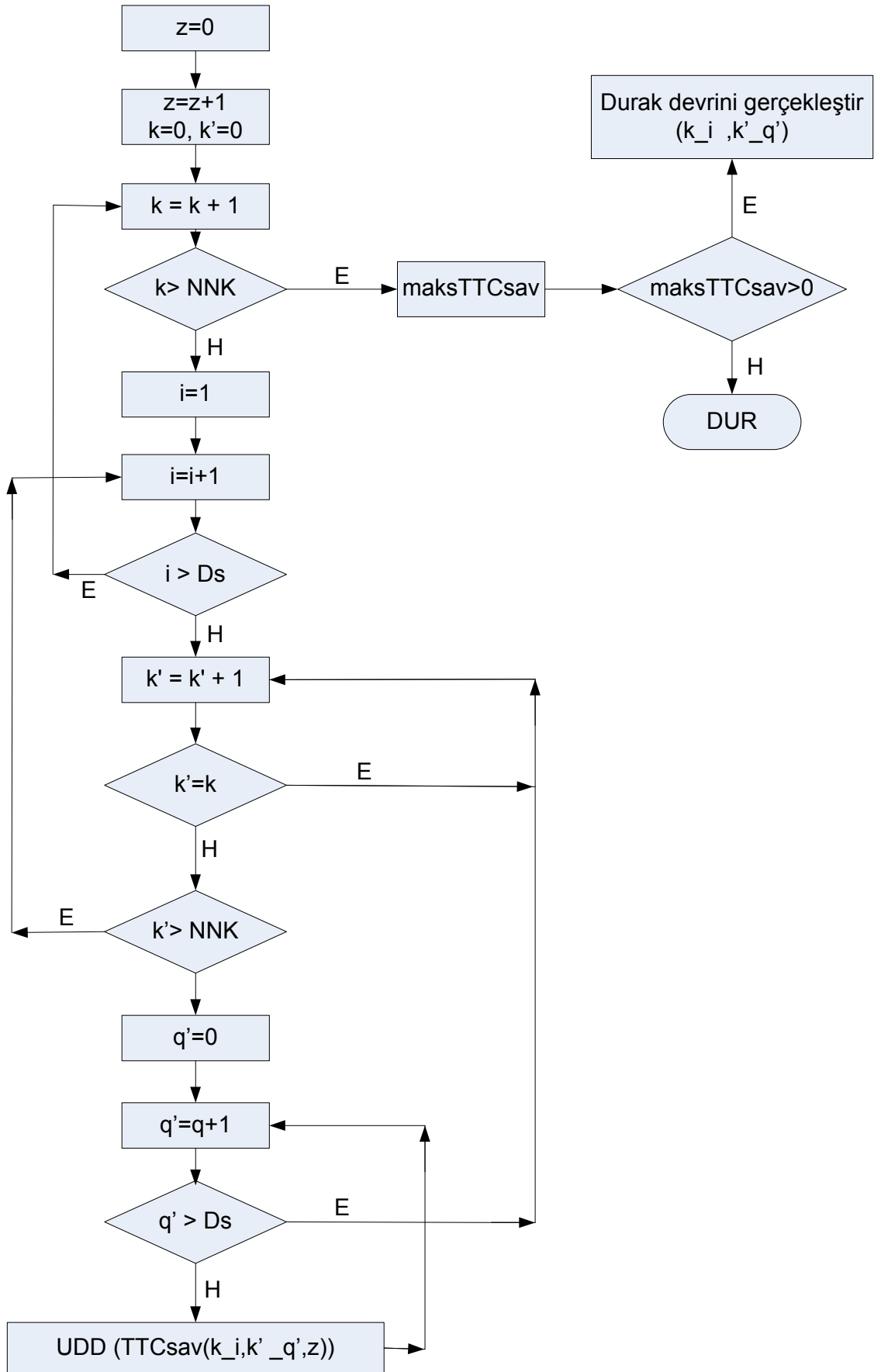
Adım 7 (k' güzergâhı için yeni bir q' durağını belirlenmesi)

$q' = q'+1$, Eğer $q' > \text{DS}'$ ($\text{DS}' = k'$ Güzergâhındaki Durak Sayısı) Adım 5'e git

Adım 8

k güzergâhındaki i durağı için k' güzergâhındaki q' durağının önüne yerleştirilmesi her iki güzergâh içinde hem güzergâh uzunluğu, hem de güzergâh kapasitesi kısıtlarını sağlıyorsa devir sonrası maliyet birikimini hesapla $\text{TTCsav}_{i,q'}(k,k',z)$ ve Adım7'e git

Şekil 4.6 DDP in bir akış şemasını göstermektedir



Şekil 4.8 Durak Devir Prosedürü Akış Şeması

4.2.3 BOGTP'nin Uzun Dönem Çözümü

BOGTP içinde filo boyutu daha önce de üzerinde durulduğu gibi iki şekilde tanımlanabilir. Kısa dönemde, filo boyutu (koltuk-saat) verilmiş bir değer olarak, problemin çözümünde bir kısıt olarak temsil edilebilir. Uzun dönemde, filonun boyutu büyültmeler veya küçültmeler ile değişebilir ve filo boyutu (koltuk-saat) ile oluşan maliyet, amaç fonksiyonun bir bileşeni olarak gösterilebilir.

Şimdiye kadar anlatılan sezgisel algoritmanın tanımında kısa-dönem durumu üzerinde durulmuştur. Uzun-dönem durumunda, (4.35) ile verilen bir doğrudan güzergâhın maliyeti ve k güzergâh parçası için (4.9) ile verilen maliyet değerleri, filo boyutu ile ilgili yıpranma maliyetini probleme eklemek için, (4.60) ve (4.61) denklemlerine dönüştürülür. $c\beta/\rho U$ terimi yolculuğun birim araç-km değeri için filo maliyetini gösterir,

$$LTC_i^j = C_{sj}q_i + 4(\lambda_o + (c\beta)/(\rho U))f_{ij}l_{ij} + \frac{\lambda_r}{U}l_{ij}q_i \quad (4.60)$$

$$LRTC_k = C_{sj}Q_k + 4(\lambda_o + (c\beta)/(\rho U))F_kl_k + \frac{\lambda_r}{2U}L_kQ_k \quad (4.61)$$

Dolaysız bir güzergâhın (4.62) denklemi ile verilen en iyi frekansı ve bir k güzergâh parçası için (4.63) ile verilen en iyi frekans değerleri, (4.60) ve (4.61) denklemlerinin ilk durum koşullarından türetilmiştir,

$$f_{ij} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w q_i}{(\lambda_o + \beta c / \rho U) l_{ij}}} \quad (4.62)$$

$$F_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_w Q_k}{(\lambda_o + \beta c / \rho U) L_k}} \quad (4.63)$$

(4.60) ve (4.61) eşitliklerinin ilk durum koşullarından aşağıdaki eşitlikleri elde edilir,

$$\frac{\lambda_w}{2f_{ij}} q_i = 2\lambda_o f_{ij} l_{ij} + \frac{2\beta c}{\rho U} f_{ij} l_{ij} \quad (4.64)$$

$$\frac{\lambda_w}{2F_k} Q_k = 2\lambda_o F_k L_k + \frac{2\beta c}{\rho U} F_k L_k \quad (4.65)$$

(4.64) ve (4.65) denklemlerindeki eşitlikler şu şekilde yorumlanabilir: Uzun-dönemde, en iyi

frekansında işletilen bir otobüs güzergâhı için toplam yolcu bekleme süresi maliyeti, bu güzergâha atanmış filoyla ilgili güzergâh işletme maliyeti ve yatırım maliyetinin toplamına eşittir. (4.62) ve (4.63), (4.60) ve (4.61)'de yerine konulduğunda, en iyi frekanslarında işletilen doğrudan bir güzergâh ve bir k güzergâh parçası için uzun dönem ulaştırma maliyetlerini elde ederiz ((4.66) ve (4.67)).

$$LTC_i^j = C_{sj}q_i + 2\sqrt{(\lambda_o + (c\beta)/(\rho U))\lambda_w}\sqrt{(q_i l_{ij})} + \frac{\lambda_r}{U} l_{ij}q_i \quad (4.66)$$

$$LRTC_k^j = C_{sj}Q_k + 2\sqrt{(\lambda_o + (c\beta)/(\rho U))\lambda_w}\sqrt{(L_k Q_k)} + \frac{\lambda_r}{2U} L_k Q_k \quad (4.67)$$

(4.66) ve (4.67) denklemlerindeki uzun-dönem ulaştırma maliyetlerinin ikinci terimleri dışında bütün terimler kısa dönem için verilen (4.8) ve (4.12) ulaştırma maliyetindekilere benzerdir. Bu benzerliklere dayanarak, kısa dönem durumu için geliştirilen algoritma uzun-dönem durumunun çözümü için de uygulanabilir. Algoritmanın uyarlanması sırasında;

- 1) En büyük mümkün koltuk-saatteki kısıtları kaldır; bu nedenle Başlangıç Algoritmasındaki Adım 12 ve Adım 13'ü kaldır.
- 2) Başlangıç Algoritması ve geliştirme prosedürlerinde, birim işletme maliyeti λ_o parametresini, birim işletme maliyeti ve birim filo maliyetinin toplamı $\lambda_o + c\beta/\rho U$ ile değiştir.

5. ALGORİTMANIN ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde iki konu hedeflenmiştir; ilki önerilen sezgisel algoritmanın sağladığı çözümlerin sınanması, ikincisi önerilen modelin bir besleyici otobüs sistemin tasarımı bir planlama aracı olarak yeterliliğinin değerlendirilmesidir. Önerilen sezgisel algoritmanın geliştirdiği çözümlerin, besleyici otobüs ağının tasarımı ortaya koyacağı sonuçların incelenmesi için örnek durum çalışması olarak İstanbul'daki Metrobüs hattı ele alınmıştır.

İstanbul'daki hızlı kentleşme, nüfus ve araç sayısının hızla artması beraberinde ciddi trafik ve ulaşım problemlerini getirmektedir. Yaşanan bu problemlerin altında, toplu taşıma sisteminin yetersizliği ile özel araç kullanımının yaygın olması yatmaktadır. Toplam 25.000 km olan İstanbul karayolu ulaşım ağındaki taşıt sayısının %96,3'ünü özel otomobiller oluşturmaktadır. Yolcu sayısının ise yalnızca %27,1'ini otomobil yolcuları oluşturmaktadır. Toplu taşıma taşıtlarının oranı yalnızca %3,7 iken, toplam yolcuların %72,9'u toplu taşıma sistemi ile taşınmaktadır (Gerçek ve Demir, 2004).

İstanbul Metropolitan Planlama'nın yaptığı anket çalışmalarından elde edilen bilgiye göre İstanbul'daki günlük yolculuk sayısı 22 milyondur. Ortalama yolculuk süresi ise 48 dakikadır. Ulaşımda 30 dakikanın altındaki yolculukların tüm yolculuğa oranı %35, bir-iki saat aralığındaki yolculukların oranı %28, iki saat üzerindeki yolculukların oranı ise %5'tir. Toplu taşıma yolculuklarının dağılımına bakıldığında ise lastik tekerlekli sistemlerin %81 ile en yüksek orana sahip olduğu görülmektedir. Raylı istemler %13, denizyolu ise %6'lık bir paya sahiptir. Lastik tekerlekli sistemlerin, özellikle kent merkezinde ve ana arterlerde, işletme hızı zirve saatlerde 8 – 10 km/sa düzeyine kadar düşmekte olup, bu tıkanıklıklar nedeniyle önemli bir yakıt ve zaman kaybı ortaya çıkmakta, işletme maliyetleri artmaktadır (Gerçek ve Demir, 2004).

Önerilen algoritmanın geçerliliği için, nispeten türdeş koşullarda ortaya koyduğu çözümler incelenmiştir. Algoritmanın değerlendirilmesinde, talebin tüm hizmet bölgesinde sabit olduğu bir temel durum kullanılmıştır. Böyle bir inceleme, değişken talep durumunda elde edilecek çözümde karşılaşılabilecek düzensizliklerin önüne geçmeyi amaçlamakta ve sezgisel algoritmanın ortaya koyduğu çözümün değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Modelin bir planlama aracı olarak yeterliliğinin değerlendirilmesi için, modelin değişikliklere karşı ortaya koyduğu çözümler incelenmiştir. Bu değişiklikler incelenen birkaç test durumunda ele alınmıştır.

Besleyici Otobüs Güzergâhı Tasarım Problemi için önceki bölümde ortaya konulan algoritma, Visual Basic programlama dili kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmış; Microsoft Office Excel programına girilen değerler Visual Basic aracılığıyla problemin çözümünde kullanılmıştır. Hazırlanan programın arayüzü Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

The screenshot shows the 'Güzergâh' program interface. It features several data tables and input fields. The 'Değişkenler' table lists variables like 'Değişken', 'Değer', and 'Birim'. The 'Ana Durumlar' table lists states with columns for 'Durumlar', 'a', 'b', and 'c'. The 'Otomatik Durumlar' table lists automatic states with columns for 'Durumlar', 'a', 'b', and 'c'. The 'TC ve DC Değerleri' table lists TC and DC values with columns for 'Durumlar', 'a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f', 'g', 'h', 'i', 'j', 'k', 'l', 'm', 'n', 'o', 'p', 'q', 'r', 's', 't', 'u', 'v', 'w', 'x', 'y', 'z'. The 'Rotalar' table lists routes with columns for 'Rota', 'U', 'Mare TC', 'Otomatik TC', 'TTC', 'RSH', and 'Rota Sayısı'. The bottom section contains input fields for 'RSH', 'TTC', 'Otomatik TC', and 'Metrobüs TC', along with a 'Rota Sayısı' field.

Şekil 5.1 Güzergâh programı kullanıcı arayüzü

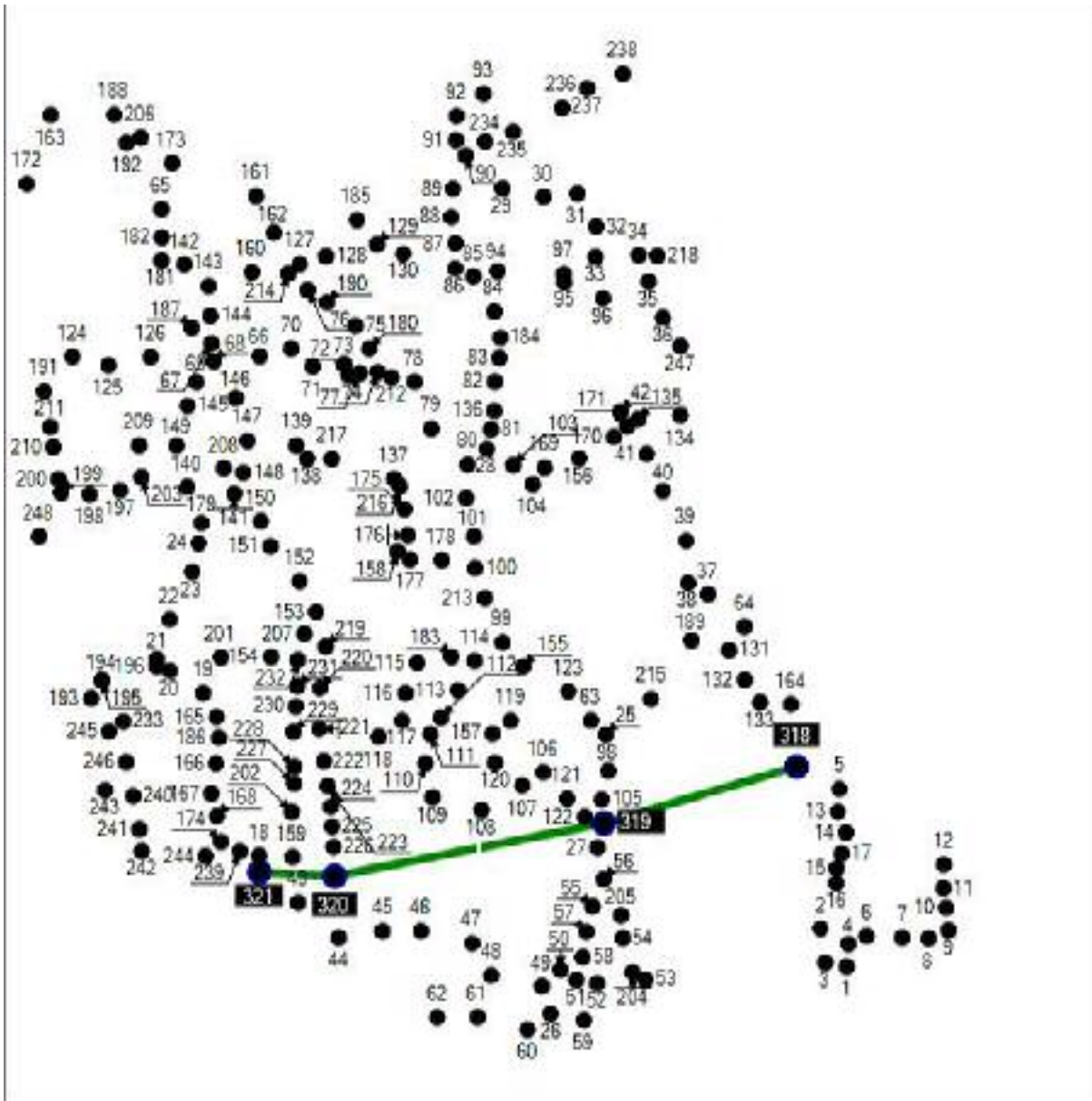
5.1 Temel Durum Çalışması

İETT’den mevcut otobüs hatlarının ve metrobüs hattının verileri temin edilerek, ArcGIS programı aracılığıyla programa görsel bir zemin oluşturulmuştur. Buna göre İstanbul il sınırlarında toplu taşımacılığa hizmet eden özel halk otobüsü işletmecilerinin de dahil olduğu 542 otobüs hattı ve bu hatlara ait 45377 otobüs durağı bulunmaktadır (Şekil 5.2).

Mevcut ağ yalnızca tek bir yöntemle çözülemeyecek kadar karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle de raylı sistem yapısına benzerliklerinden ötürü Metrobüs hattında odaklanılmış, bu hatta bağlantıların yoğun olarak gözlendiği bir alan bu çalışmanın örnek durum problemi olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1 Otobüs duraklarının konum ve talepleri

Otobüs Durak No	Kodu	X Koordinat	Y Koordinat	Talep (yolcu/saat)
1	T0342A	2889,522	4098,273	34
2	T0455A	2889,257	4098,663	34
3	T0456A	2889,301	4098,313	34
4	T0524A	2889,543	4098,505	34
5	T0541A	2889,448	4100,089	34
...	...	...	...	...



Şekil 5.4 Çalışma alanında otobüs duraklarının konumu

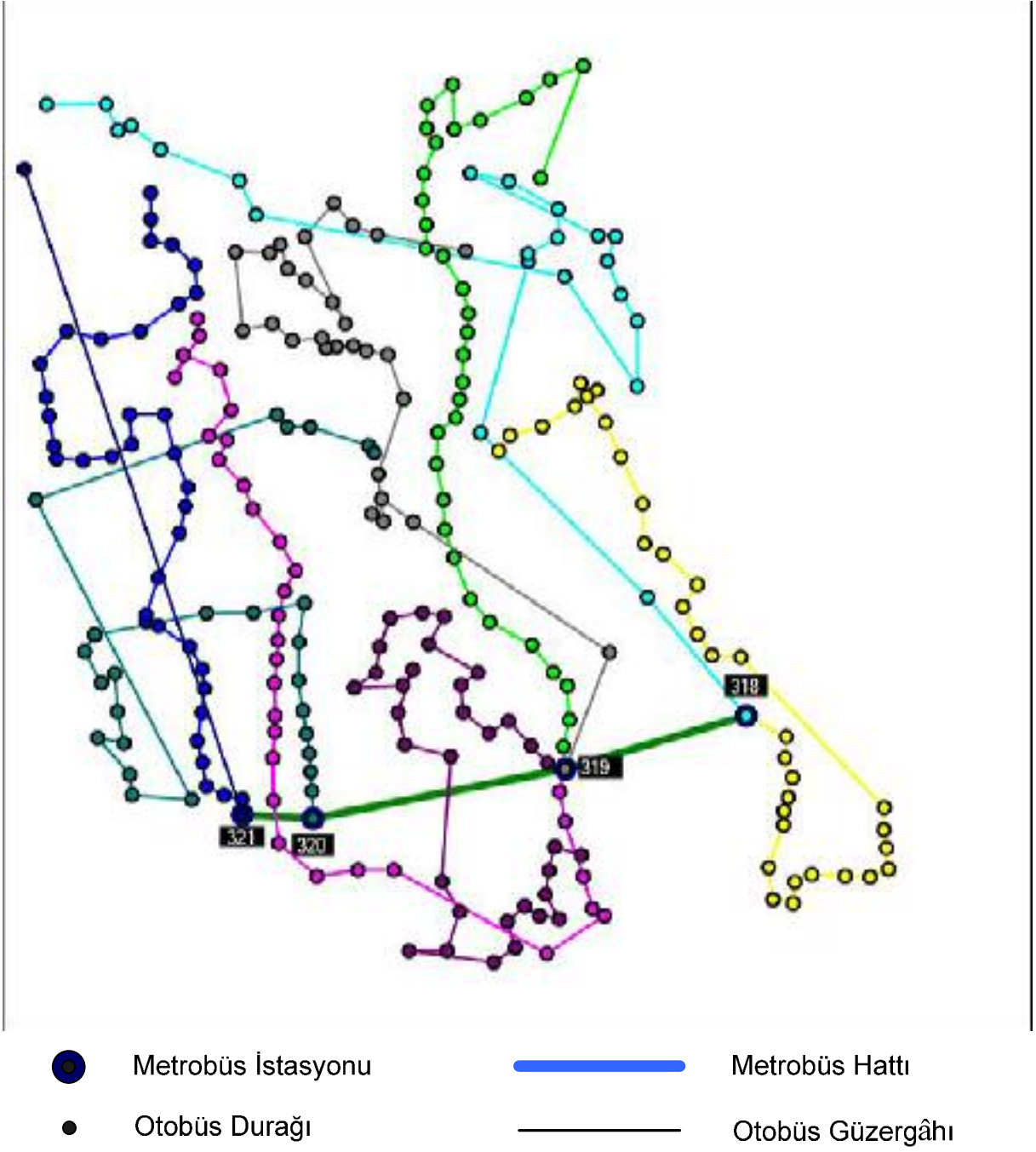
Çizelge 5.2 Metrobüs istasyonlarının konumları

Metrobüs Durak No	Kodu	Adı	X Koordinat	Y Koordinat
318 (MİA)	İ1183A	Zeytinburnu	28,89010811	41,00318146
319	İ1182A	İncirli - Ömür	28,87036133	40,99737549
320	İ1181A	Şirinevler	28,84283829	40,99196625
321	İ1180A	Yenibosna	28,83513260	40,99236679

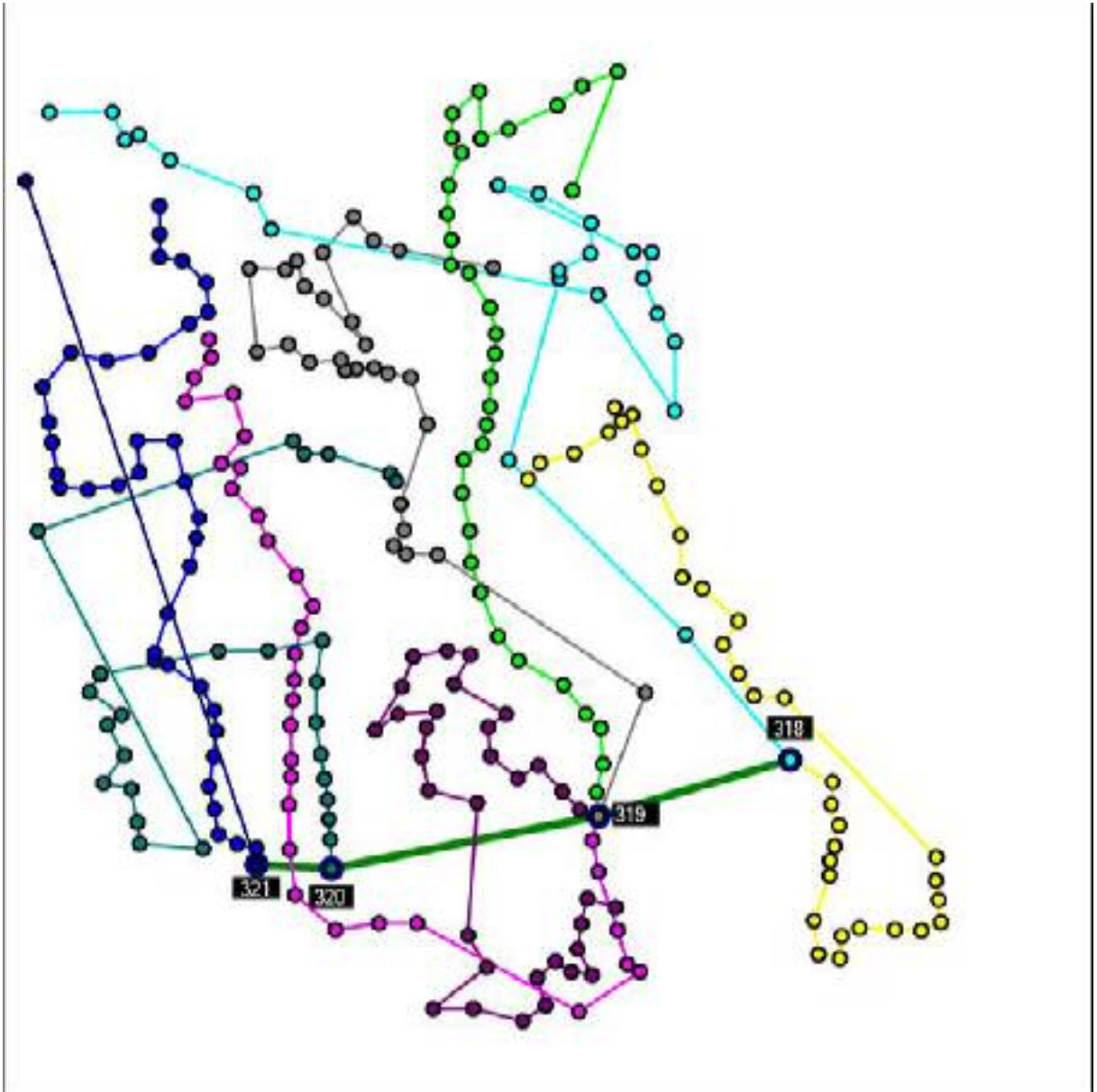
Çizelge 5.3 Temel durum için parametre değerleri

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Otobüs işletme maliyeti	λ_o	\$/araç-km	0,58
Raylı sistem toplam maliyeti	C_{sj} / L_{sj}	\$/yolcu-km	0,27
Yolcu seyir maliyeti	λ_r	\$/yolcu-saat	6,00
Yolcu bekleme maliyeti	λ_w	\$/yolcu-saat	6,00
En büyük güzergâh uzunluğu	D_k	km	20,00
Otobüs kapasitesi	c	yolcu/taşıt	75
Otobüs işletme hızı	U	km/saat	12,00
Otobüs doluluk oranı	ρ	-	0,90
İşletmenin saatlik hizmet kapasitesi	MAXASH	koltuk-saat	50.000

İzleyen sayfalarda, algoritmanın oluşturduğu Başlangıç Çözümü (Şekil 5.5), Birinci (Şekil 5.6), İkinci (Şekil 5.7) ve Üçüncü Geliştirme Algoritması (Şekil 5.8)'nda elde edilen güzergâh (ağ) tasarımları gösterilmektedir.

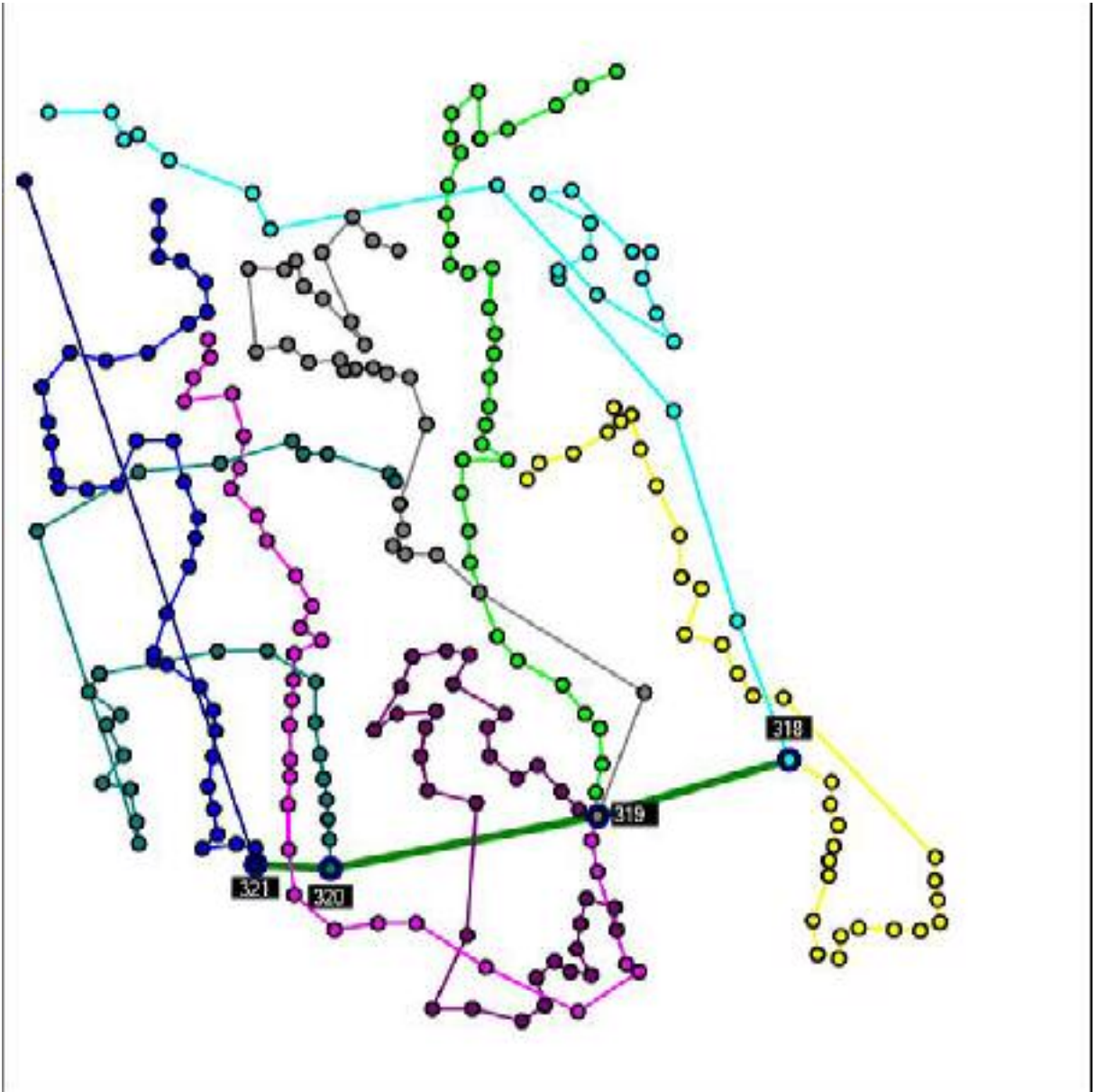


Şekil 5.5 Temel durum için başlangıç algoritması çözümü



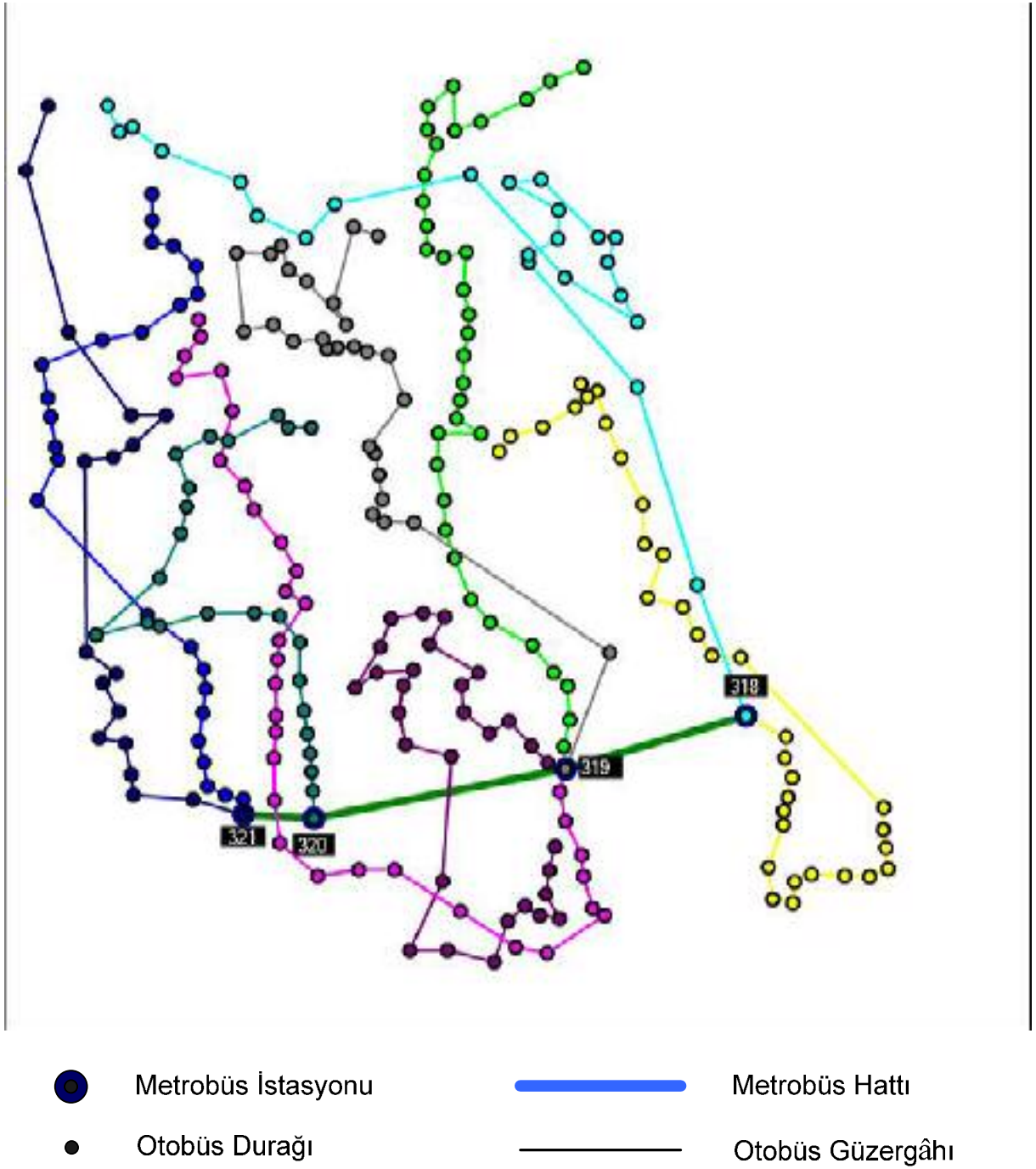
- | | | | |
|---|--------------------|--|------------------|
|  | Metrobüs İstasyonu |  | Metrobüs Hattı |
|  | Otobüs Durağı |  | Otobüs Güzergâhı |

Şekil 5.6 Temel durum için 1. Geliştirme algoritması çözümü



- | | | | |
|---|--------------------|--|------------------|
|  | Metrobüs İstasyonu |  | Metrobüs Hattı |
|  | Otobüs Durağı |  | Otobüs Güzergâhı |

Şekil 5.7 Temel durum için 2. Geliştirme algoritması çözümü



Şekil 5.8 Temel durum için 3. Geliştirme algoritması (sonuç) çözümü

Temel durum için algoritmanın her adımında ortaya koyduğu çözümler Çizelge 5.4’de verilmiştir. Güzergâh sayısı (NR) tüm aşamalarda aynı kalmış olup, gerekli koltuk sayısındaki (RSH) en büyük iyileştirme 2. Geliştirme prosedürü ile sağlanmıştır. Otobüs ulaşımı maliyeti (BC) ve Metrobüs ulaşımı maliyeti (MC) toplamından oluşan toplam ulaştırma maliyetindeki (TTC) en büyük iyileştirme ise 3. Geliştirme prosedürü ile elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 Temel durum için geliştirme oranları

	Başlangıç Çözümü	1. Geliştirme		2. Geliştirme		3. Geliştirme	
	Değer	Değer	Değişim	Değer	Değişim	Değer	Değişim
NR	9	9	0,00%	9	0,00%	9	0,00%
RSH(koltuk/saat)	21413	21313	- 0,47%	20947	- 1,72%	20765	- 0,87%
BC (\$/saat)	31.636,68	31.358,64	- 0,88%	30.352,06	- 3,21%	28.184,40	- 7,14%
MC (\$/saat)	5.558,32	5.558,32	- 0,00%	5.558,32	0,00%	5.592,48	0,61%
TTC (\$/saat)	37.195,00	36.916,96	- 0,75%	35.910,39	- 2,73%	33.776,87	- 5,94%

Burada; NR: Toplam güzergâh sayısı, RSH: Gerekli koltuk sayısı, BC: Otobüs ulaştırma maliyeti, MC: Metrobüs ulaştırma maliyeti, TTC: Toplam ulaştırma maliyeti.

3. Geliştirme algoritması ile elde edilen sonuç model çözümü sonucunda elde edilen güzergâh bilgileri Çizelge 5.5 ile verilmiştir.

Çizelge 5.5 Temel durum için güzergâh bilgileri

Hat No	Durak Sayısı	Hat Talebi (yolcu/saat)	Uzunluk (km)	Frekans (sefer/saat)
1	25	850	9,34	15,34
2	30	1020	11,56	15,10
3	35	1190	11,36	16,46
4	33	1122	12,77	15,07
5	24	816	8,40	15,85
6	34	1156	12,15	15,68
7	27	918	12,07	14,03
8	23	782	16,69	11,01
9	17	578	10,63	11,86

5.2 Duyarlılık Analizleri

Duyarlılık analizindeki test durumları, işletmeci kuruluşun yapabileceği veya çevresel koşulların neden olabileceği değişiklikleri yansıtmaktadır. Önerilen modelin besleyici otobüs güzergâhı tasarımında bir planlama aracı olarak kabiliyetinin sınanabilmesi için her bir test durumunun sonuç çözümleri ile temel durumun sonuç çözümü karşılaştırılmıştır.

5.2.1 Değişken Talep Test Durumu

Otobüs duraklarındaki değişik talep durumları olağan bir durumdur. Bu örneğin amacı, değişken talep durumunun oluşturulan ağ yapısına etkisinin incelenmesidir. İETT Talep değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu çizelgedeki talep değerleri hesaplanırken İETT'nin hazırlamış olduğu 2007 yılına ait hat başına aylık taşınan yolcu sayısından yararlanılmıştır. Buna göre öncelikle her bir duraktan, metrobüs hattına doğru giden hatlar tespit edilmiştir. Her hattın kendi içindeki otobüs duraklarında eşit yolcu talebi varsayılmıştır. Bu talebin zirve saatindeki değeri ise, (Güven, 2008) çalışmasından yararlanılarak günlük toplam talepten hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6 Değişken talep durum için güzergâh bilgileri

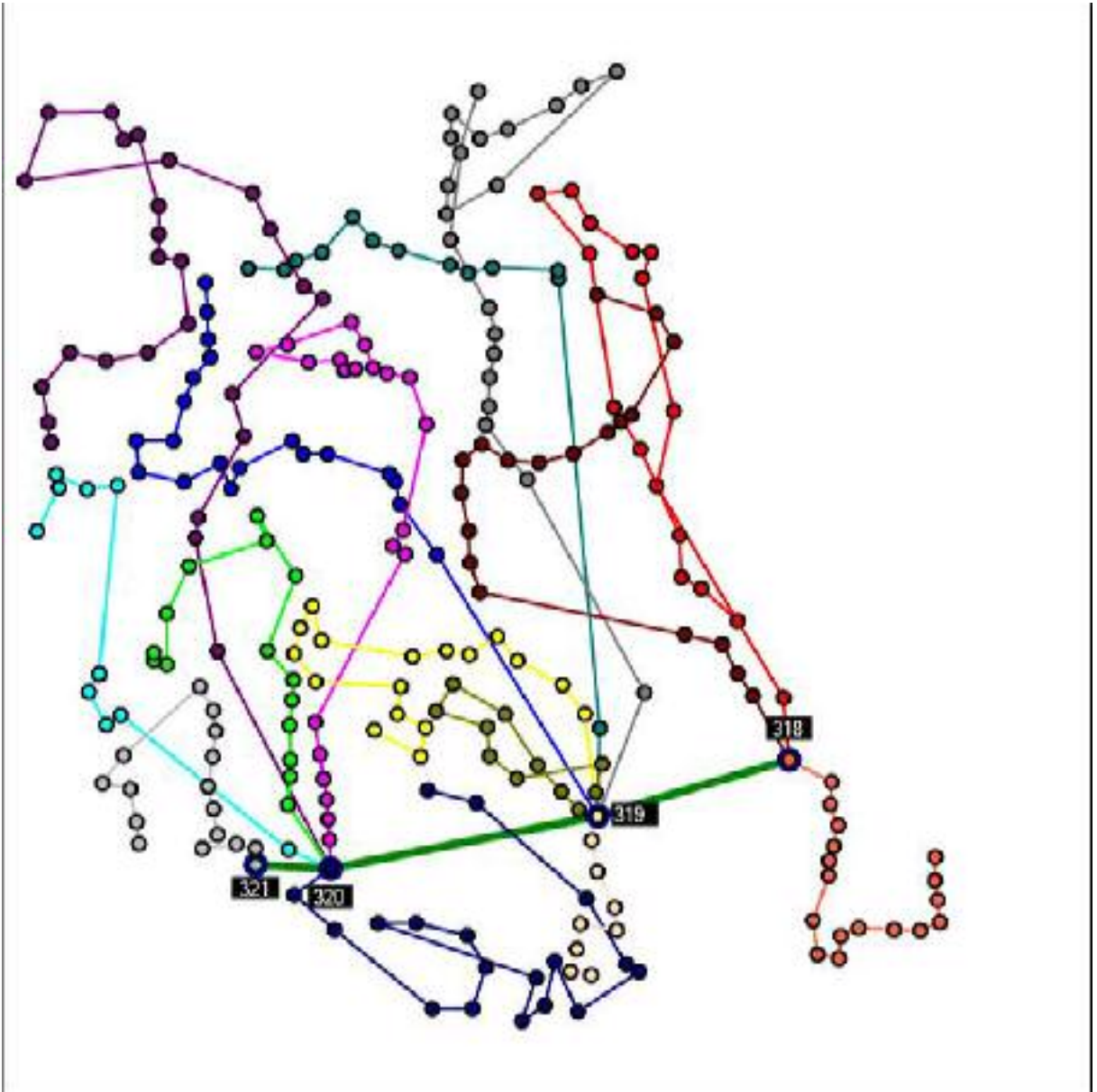
Otobüs Durak No	Talep (yolcu/saat)
1	47
2	47
3	57
4	47
5	32
...	...

Değişken talepli test durumunda, güzergâh uzunluğunda daha büyük farklılıklar olması beklenir. Ayrıca güzergâhların frekansında ve metrobüs istasyonlarına bağlanan güzergâh sayılarında daha büyük farklılıklar gözlemlenebilir. Değişken talepli test durumu için sonuç çözüme ait bilgiler Çizelge 5.7 ile 5.8 ve Şekil 5. 9'da sunulmuştur. Otobüs güzergâhlarının uzunlukları, güzergâh uzunluğu ve güzergâh kapasitesi kısıtları ile sınırlandırılmıştır. Buradaki kısa güzergâhların, genellikle talep miktarı daha yüksek olan birbirine oldukça yakın az sayıdaki otobüs duraklarını birleştirdiği görülebilir. Uzun güzergâhlar ise talep miktarı daha düşük ve birbirine daha uzak otobüs duraklarından oluşmaktadır. Bu durumda,

kısa ve yüksek talepli otobüs güzergâhlarının uzunluğu güzergâh kapasitesi ile sınırlandırılmışken, daha uzun ve düşük kapasiteli otobüs güzergâhlarının uzunluğu, güzergâh uzunluğu kısıdı ile sınırlandırılmıştır. Bu durum da güzergâh uzunluklarında daha değişken değerlerle karşılaşılmasına neden olur. Güzergâh frekanslarındaki değişkenlik, güzergâh uzunluklarındaki değişkenliğin sonucudur. Kısa, yüksek talepli otobüs güzergâhları yüksek hizmet sıklığı gerektirirken, daha uzun ve düşük talepli otobüs güzergâhlarında düşük hizmet sıklığı yeterli olmaktadır.

Çizelge 5.7 Değişken talep algoritma sonuçları-1

	Sonuç Çözüm
NR	15
RSH(koltuk/saat)	21413
BC (\$/saat)	31.636,68
MC (\$/saat)	5.558,32
TTC (\$/saat)	37.195,00



- | | | | |
|---|--------------------|--|------------------|
|  | Metrobüs İstasyonu |  | Metrobüs Hattı |
|  | Otobüs Durağı |  | Otobüs Güzergâhı |

Şekil 5.9 Değişken talep durumu için algoritma çözümü

Çizelge 5.8 Değişken talep algoritma sonuçları-2

Hat No	Durak Sayısı	Hat Talebi (yolcu/saat)	Uzunluk (km)	Frekans (sefer/saat)
1	20	587	9,70	12,51
2	26	211	16,87	5,69
3	15	485	6,44	13,96
4	21	545	8,52	12,86
5	13	484	9,23	11,65
6	17	431	7,78	11,97
7	21	200	13,52	6,18
8	11	503	6,74	13,89
9	18	214	11,70	6,88
10	19	347	9,15	9,90
11	16	144	12,18	5,53
12	11	413	4,85	14,84
13	15	1321	4,81	26,66
14	17	799	4,51	21,39
15	8	1658	2,33	42,89

Değişken talep durumu için oluşturulan güzergâh yapısı ile temel durum için önceki bölümde elde edilen yapı birbirlerinden oldukça farklıdır. Bu test durumunun çözümünde beklenen sonuçlar alınmıştır. Öncelikle Çizelge 5.8'de bulunduğu gibi güzergâh uzunluklarının aldığı değerlerin değişkenliği oldukça artmıştır; uzunluklar 2,33 km ile 16,87 km arasında değişirken, temel durum için güzergâh uzunlukları 8,40 km ile 16,69 km arasında değişmektedir. Bununla birlikte değişken talep durumu için güzergâh frekansları 5,53 ile 42,89 arasında değişirken, temel durumda bu aralık 11,01 ile 16,46 arasında değişmektedir. Son olarak metrobüs istasyonlarına atanan güzergâh sayılarındaki farklılıklar Şekil 5.8'den izlenebilir.

5.2.2 Otobüs Kapasitesi Test Durumu

Bu bölümde besleyici sistemdeki otobüslerin kapasitelerinin değişmesi durumunda, algoritmanın bu etkiye karşılıkları incelenmiştir. Kuah (1986) yaptığı analizde temel durumda 50 yolcu/otobüs olarak aldığı otobüs kapasitesini %90 artışla 95 yolcu/otobüs'e yükseltirken, bu artışın %10 mertebesinde işletme maliyetinde artışa neden olacağını belirtmiştir. Analizin

sonuçlarına göre, araç kapasitesi artmasıyla, daha az sayıda, daha uzun ve düşük işletme sıklıklarına sahip güzergâhların oluşması beklenmektedir.

Çalışmanın bu kısmında yukarıdakine benzer bir analiz ve ardından değişik otobüs kapasitelerinin sonuçlara etkisi grafikler ile sunulmuştur. 75 olan otobüs kapasitesi %40'lık bir artış dikkate alınarak 105 yolcuya yükseltilmiş ve bunun işletme maliyetinde %10 düzeyinde bir artışla sonuçlanacağı dikkate alınmıştır. Bu değişimler dahilinde otobüs kapasitesi test durumu için parametre değerleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

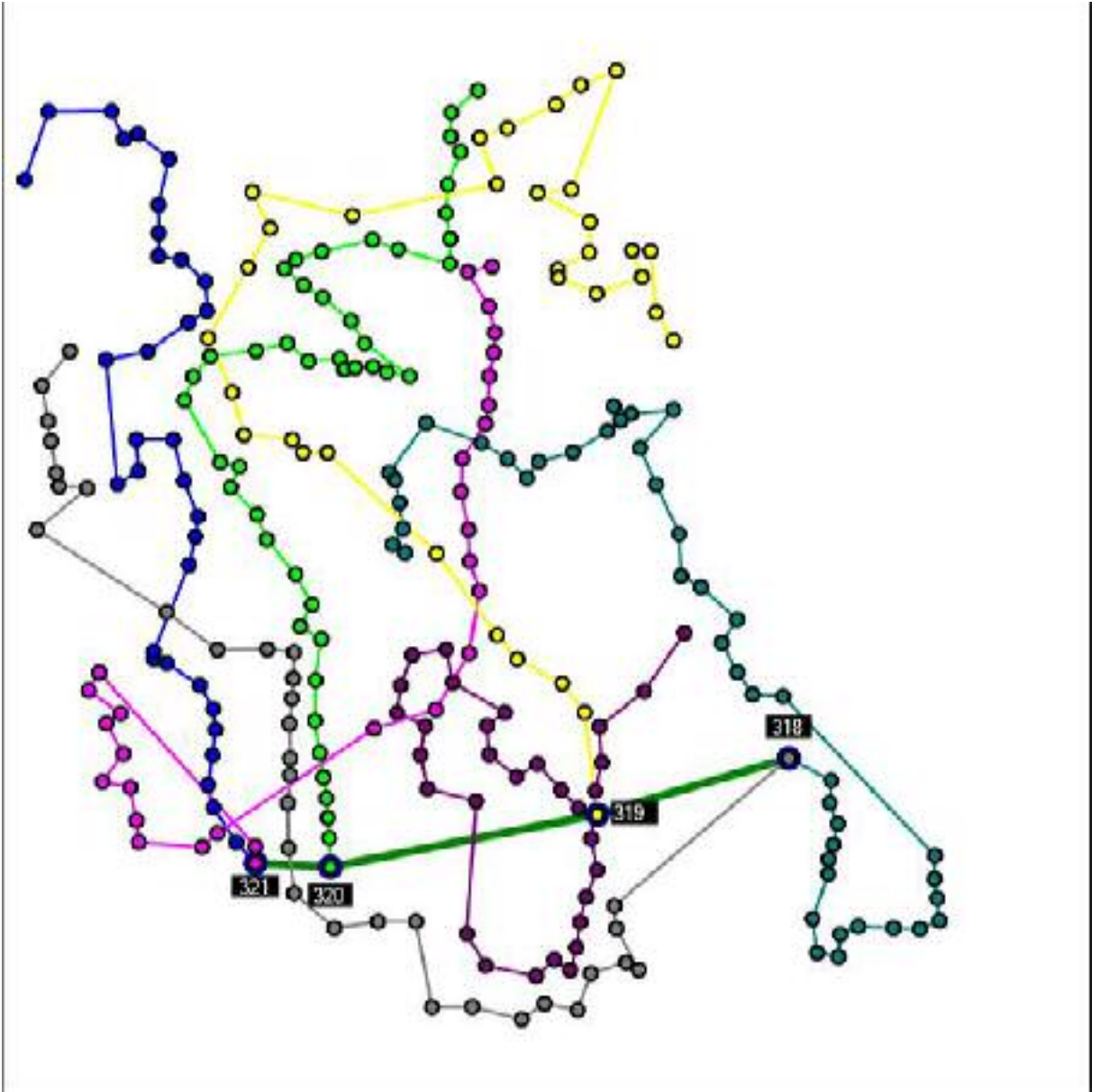
Çizelge 5.9 Otobüs kapasitesi test durumu için parametre değerleri

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Otobüs işletme maliyeti	λ_o	\$/araç-km	0,64
Raylı sistem toplam maliyeti	C_{sj} / L_{sj}	\$/yolcu-km	0,27
Yolcu seyir maliyeti	λ_r	\$/yolcu-saat	6,00
Yolcu bekleme maliyeti	λ_w	\$/yolcu-saat	6,00
En büyük güzergâh uzunluğu	D_k	km	20,00
Otobüs kapasitesi	c	yolcu/taşıt	105
Otobüs işletme hızı	U	km/saat	12,00
Otobüs doluluk oranı	ρ	-	0,90
Saatlik hizmet kapasitesi	maksASH	koltuk-saat	50.000

Güzergâh Programı, parametrelerin yeni değerleri ile çalıştırıldığında karşılaşılan sonuçlar aşağıdadır.

Çizelge 5.10 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma sonuçları-1

Hat No	Durak Sayısı	Hat Talebi (yolcu/saat)	Uzunluk (km)	Frekans (sefer/saat)
1	40	1360	13,36	16,22
2	31	1054	11,91	15,13
3	44	1496	13,56	16,89
4	29	986	14,64	13,20
5	44	1496	15,43	15,84
6	40	1360	18,63	13,74
7	20	680	19,99	9,38



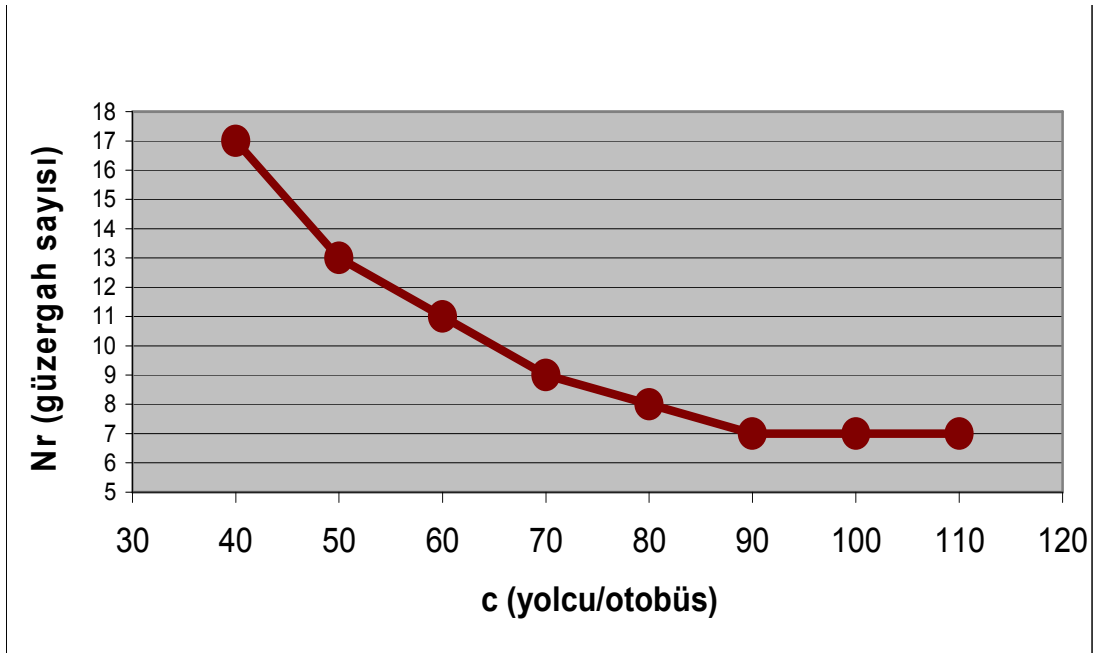
Şekil 5.10 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma çözümü

Çizelge 5.10 ve Şekil 5.10 incelendiğinde Kuah (1986) tarafından yukarıda bahsedilen öngörülerin algoritma sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülebilir. Temel durumda 9 güzergâh oluşturan algoritma, otobüs kapasitesindeki artışa 7 güzergâh ile karşılık vermiştir. Bununla birlikte temel durumun çözümünde güzergâh uzunlukları 8,40 - 16,69 km değerleri arasındayken, bu test durumunda bu değer 11,91 – 19,99 km aralığında bulunmaktadır. Son olarak işletme sıklıkları incelendiğinde, temel durumdaki saatte en düşük 11,06 sefer değeri 9,38 sefer/saat değerine düşmüştür. İki durumun karşılaştırılması ayrıca Çizelge 5.11’de de görülebilir.

Çizelge 5.11 Otobüs kapasitesi test durumu için algoritma sonuçları-2

	c=75	c=105
NR	9	7
RSH(koltuk/saat)	21413	27851
BC (\$/saat)	31.636,68	35.538,67
MC (\$/saat)	5.558,32	6.852,86
TTC (\$/saat)	37.195,00	42.391,53

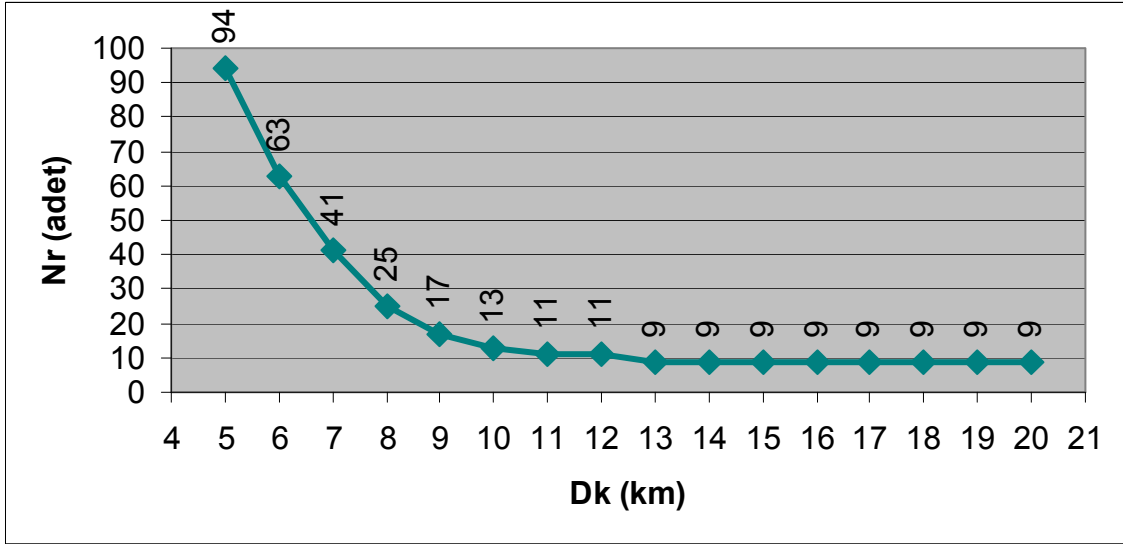
Otobüs kapasitesindeki değişimin algoritmanın ortaya koyduğu sonuçlara etkilerinin daha geniş bir şekilde incelenebilmesi için, sistemin diğer parametreleri temel durum analizindeki değerlerinde sabit tutularak, c otobüs kapasitesi 40 – 110 yolcu/otobüs aralığında 10'luk artışlarla değiştirilmiştir. Otobüs kapasitesindeki değişkenliğin güzergâh sayısına, uzunluğuna ve işletme sıklığına etkileri incelendiğinde, benzer sonuçlarla karşılaşmıştır; örneğin otobüs kapasitesinin artmasıyla algoritmanın oluşturduğu güzergâh sayısındaki azalma Şekil 5.11'da görülebilir.



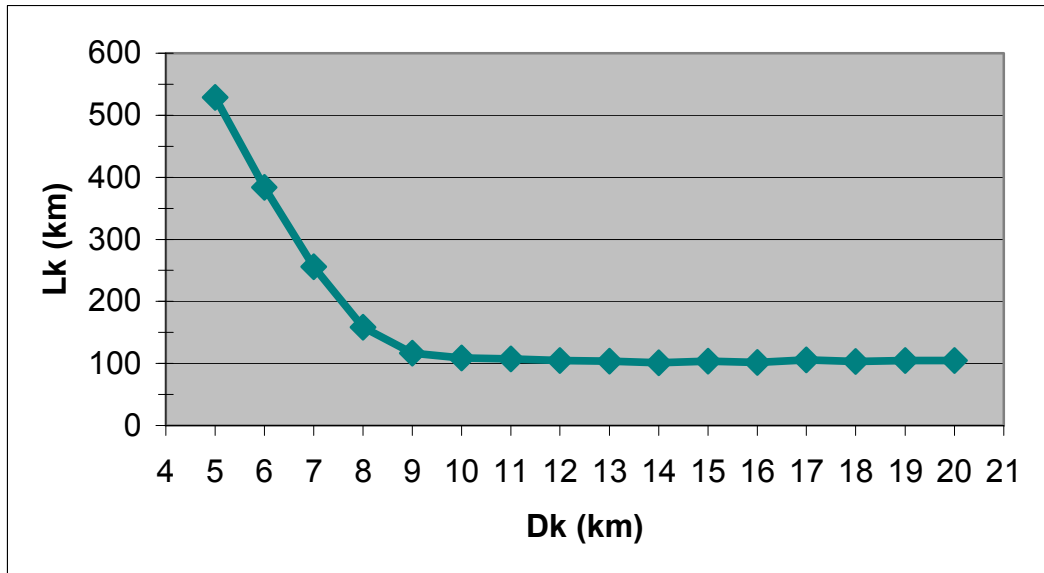
Şekil 5.11 Otobüs kapasitesi, güzergâh sayısı ilişkisi

5.2.3 Güzergâh Uzunluğu Kısıdı Test Durumu

Çalışmanın bu bölümünde algoritmanın güzergâh yapılandırmasında sınırlayıcı etkisi bulunan Dk güzergâh uzunluğu kısıdının değişiminin sonuçlara etkileri ortaya konulmuştur. Dk değerinin azaldıkça güzergâh sayısının ve toplam uzunluklarının arttığı Şekil 5.12 ve 5.13 ile sunulmuştur.



Şekil 5.12 Güzergâh uzunluğu kısıdı ve güzergâh sayısı ilişkisi



Şekil 5.13 Güzergâh uzunluğu kısıdı ve toplam güzergâh uzunluğu ilişkisi

Analizde D_k güzergâh uzunluğu kısıdının 20 – 5 km değerleri arasında her 1 km lik azalışında algoritma sonuçlarına etkileri gözlemlenmiştir. Güzergâh uzunluğunun 20 – 10 km değerleri arasında güzergâh sayılarının neredeyse sabit kaldığı (9 – 11 aralığında), ancak 10 km’den sonra güzergâh sayılarının hızla arttığı görülmüştür. Benzer durum güzergâh uzunlukları toplamı için de geçerlidir. Parametrenin azaldığı ilk 10 adımda çok büyük değişiklikler gözlenmezken, D_k değerinin 10 km’nin altına düştüğü kısımda oldukça büyük toplam uzunluk farklılıkları ortaya çıkmıştır.

5.2.4 Yeni Bir Metrobüs İstasyonunun Eklenmesi Test Durumu

Metrobüs istasyonlarında talebin zamanla artması ve istasyonların talebe karşılık veremeyecek duruma gelmesi durumunda, bu yoğunluğun önüne geçmek için kalabalık istasyonun olduğu bölgeye yeni bir istasyon açılması gündeme gelebilir. Analiz bölümünün bu aşamasında, mevcut sisteme yeni bir istasyon eklenerek algoritmanın karşılıkları incelenecektir. Çizelge 5.12 yeni eklenen İstasyon verilerini içermektedir.

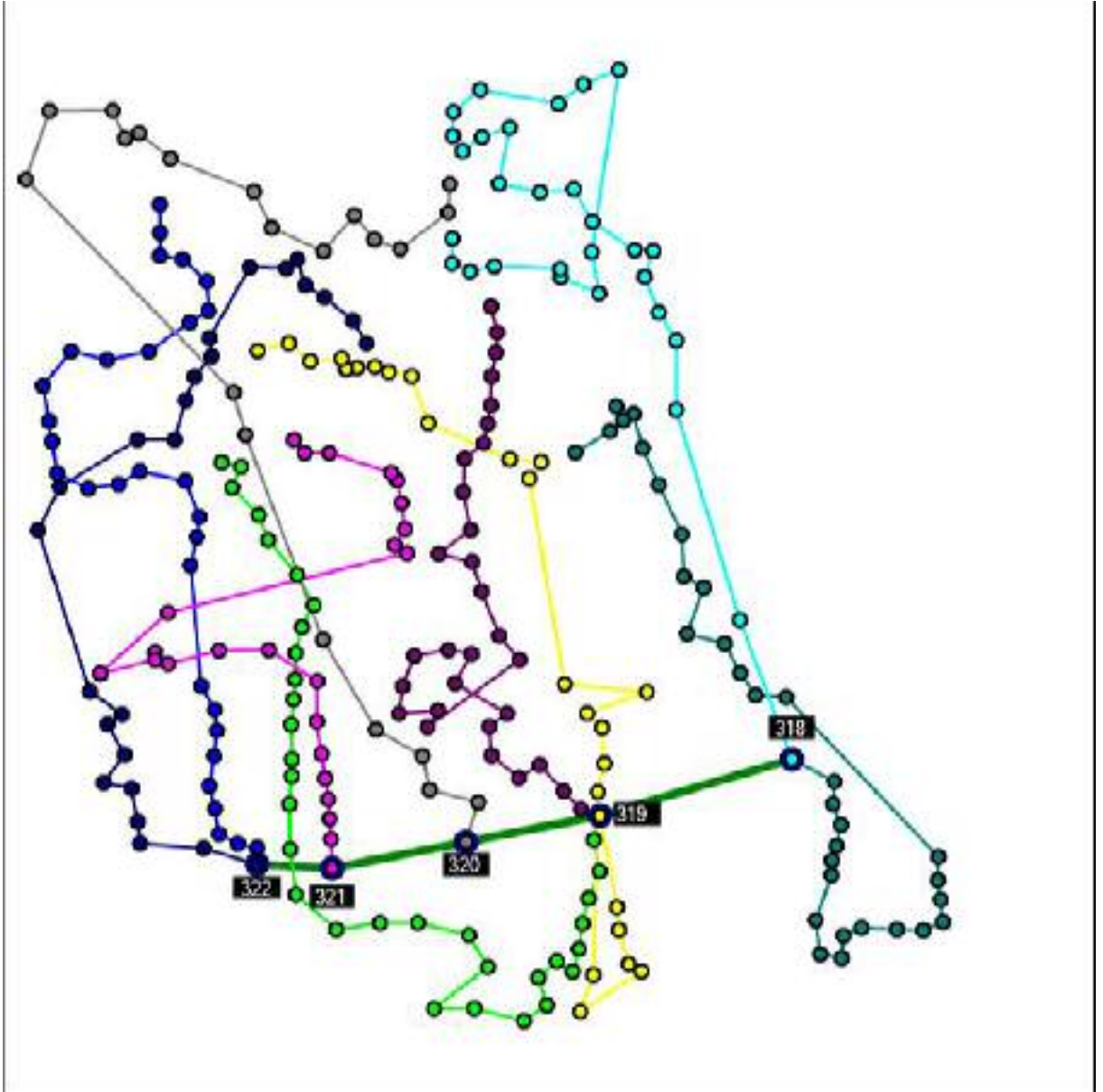
Çizelge 5.12 Metrobüs istasyonlarının konumları

Metrobüs Durak No	Kodu	Adı	X Koordinat	Y Koordinat
318 (MİA)	İ1183A	Zeytinburnu	28,89010811	41,00318146
319	İ1182A	İncirli - Ömür	28,87036133	40,99737549
320 (Yeni)	-	Yeni	28,85660000	40,99467000
321	İ1181A	Şirinevler	28,84283829	40,99196625
322	İ1180A	Yenibosna	28,83513260	40,99236679

Metrobüs hattına yeni bir istasyonun eklenmesi, besleyici otobüs hatlarının metrobüs sistemine ulaşımını kolaylaştıracaktır. Bunun sonucu olarak, hem işletmeci, hem de kullanıcı maliyetinde azalmalar, dolayısıyla da toplam güzergâh uzunluğunda bir azalma beklenebilir. Bununla birlikte yeni bir istasyon, metrobüs hattına erişimini kolaylaştıracağından, metrobüs ulaşımı toplam maliyetinde bir artış ve otobüs ulaşımı toplam maliyetinde bir azalmayla karşılaşılabılır.

Çizelge 5.13 Yeni metrobüs istasyonu durumu için algoritma sonuçları-1

Hat No	Durak Sayısı	Hat Talebi (yolcu/saat)	Uzunluk (km)	Frekans (sefer/saat)
1	30	1020	10,41	15,92
2	30	1020	9,89	16,33
3	34	1156	10,81	16,63
4	24	816	11,69	13,44
5	32	1088	12,22	15,18
6	25	850	11,12	14,06
7	21	714	12,59	12,11
8	28	952	18,80	11,45
9	24	816	9,80	14,68



Şekil 5.14 Yeni istasyon durumu için algoritma çözümü

Algoritmanın ortaya koyduğu çözüm Şekil 5.14'te görsel olarak izlenebilir. 320 numaralı yeni istasyon iki eski istasyonun tam ortasına eklenmiştir. Yeni istasyonun oluşturulan toplam güzergâh uzunluğunda bir azalmaya neden olması beklenirken, mevcut otobüs duraklarının mevcut istasyonlar doğrultusunda bir diziliş izlemeleri bu etkiyi gözlemlemeyi engellemiştir. Temel durumdaki toplam 104,98 km hat uzunluğuna karşın, yeni durumda bu değer yaklaşık %2'lik bir artışla 107,31 km değerine ulaşmıştır. Buna karşın Çizelge 5.14, yeni durumun ulaşım türlerinin maliyetlerini nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir. Buna göre beklendiği gibi metrobüs ulaşım sistemindeki %11,47'lik artışa karşın, otobüs maliyetlerindeki azalma toplam ulaştırma maliyetini %6,96 azaltmıştır.

Çizelge 5.14 Yeni metrobüs istasyonu durumu için algoritma sonuçları-2

	Temel Durum	Yeni İstasyon	
	Değer	Değer	Değişim
NR	9	9	0,00%
RSH	21413	20984	- 2,00%
BC	31.636,68	28.408,68	- 10,20%
MC	5.558,32	6.195,96	11,47%
TTC	37.195,00	34.604,65	- 6,96%

5.2.5 Bir Metrobüs İstasyonunun Kapatılması Test Durumu

Yeni bir metrobüs istasyonunun açılmasını gerektirecek nedenler gibi, yetersiz talep, elverişsiz kullanım gibi nedenlerle tersi bir durumla karşılaşılıp metrobüs istasyonlarından birinin kapatılması da gerekebilir. Bu kısımda, mevcut sistemden bir istasyonun çıkarılmasına algoritmanın verdiği karşılıklar incelenecektir. Çizelge 5.15 metrobüs istasyonlarının bu durum için verilerini içermektedir.

Çizelge 5.15 Metrobüs istasyonlarının konumları

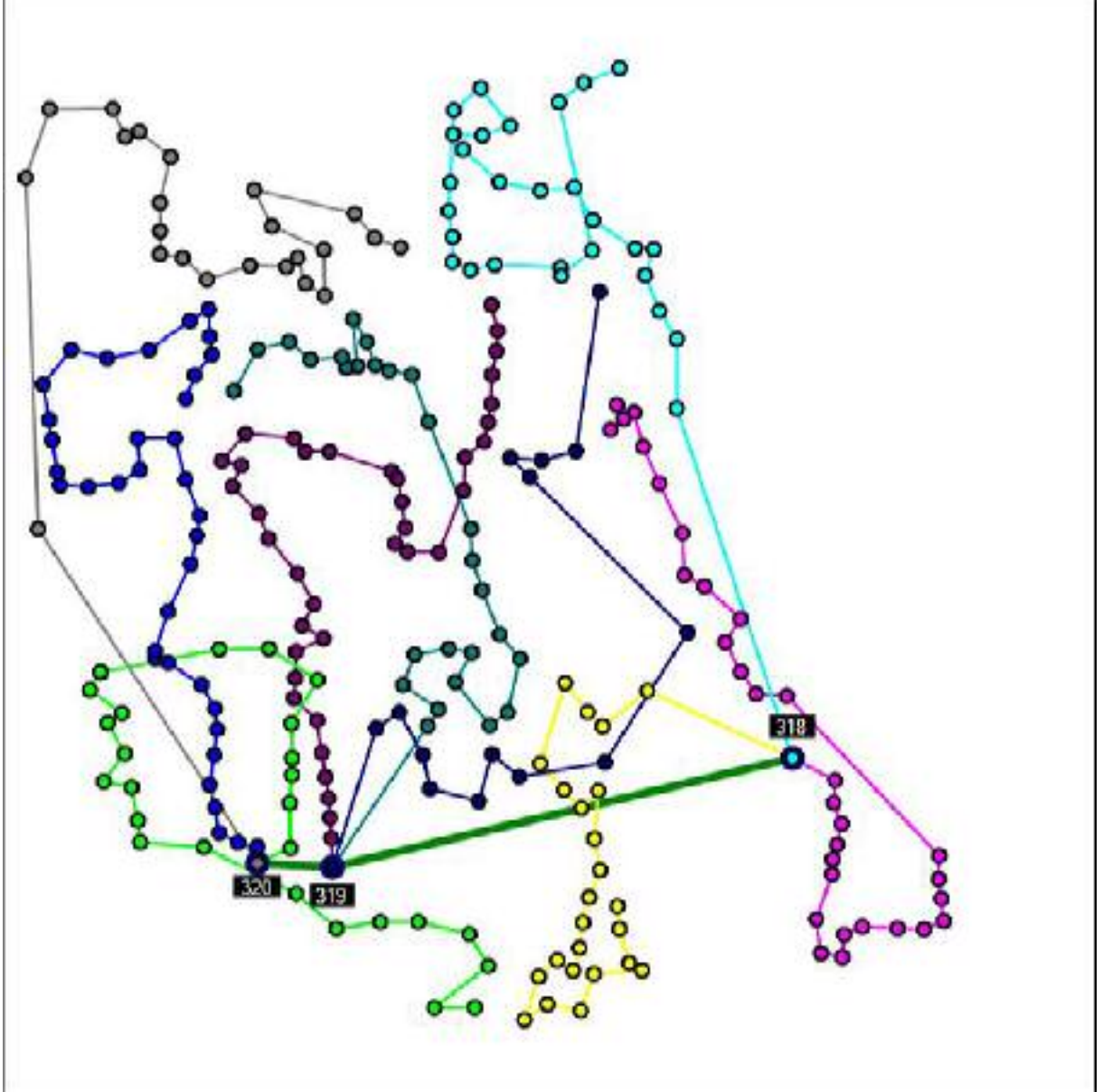
Metrobüs Durak No	Kodu	Adı	X Koordinat	Y Koordinat
318 (MİA)	İ1183A	Zeytinburnu	28,89010811	41,00318146
319	İ1182A	İncirli - Ömür	28,87036133	40,99737549
320 (kapalı)	İ1181A	Şirinevler	-	-
321	İ1180A	Yenibosna	28,83513260	40,99236679

Bir metrobüs istasyonunun kapanmasıyla, temel durumun çözümünde bu istasyona bağlanmış olan güzergâhların diğer istasyonlara yönelmesi gerekecektir.

Çizelge 5.16 İstasyon kapatılma durumu için algoritma sonuçları-1

Hat No	Durak Sayısı	Hat Talebi (yolcu/saat)	Uzunluk (km)	Frekans (sefer/saat)
1	36	1224	10,75	17,16
2	38	1292	11,03	17,40
3	27	918	12,06	14,03
4	31	1054	11,05	15,71
5	27	918	11,27	14,51
6	24	816	9,65	14,79
7	23	782	16,23	11,16

8	28	952	15,01	12,81
9	14	476	11,39	10,40



Şekil 5.15 İstasyon k kapatılma durumu için algoritma çözümü

Metrobüs istasyonunun kapatılması, bu istasyonu kullanan yolcular için metrobüs sisteminde geçirecekleri süreyi arttıracaktır. Bununla beraber Çizelge 5.17’de algoritmanın oluşturduğu çözümün metrobüs sistemi ulaşım maliyetinde %42,97 lik bir artışa neden olurken otobüs sistemi ulaşım maliyetinde %9,22 iyileştirme ile sonuçlandığı görülmektedir.

Çizelge 5.17 İstasyon kapatılma durumu için algoritma sonuçları-2

	Temel Durum	İstasyon Kapatılması	
	Değer	Değer	Değişim
NR	9	9	0,00%
RSH	21413	21002	1,92%
BC	31.636,68	28.718,83	9,22%
MC	5.558,32	7.946,66	-42,97%
TTC	37.195,00	36.665,48	1,42%

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında bütünleşik bir besleyici otobüs ve raylı sistem – metrobüs sistemi ulaştırma ağı tasarım probleminin çeşitli bileşenleri, tasarım elemanları ve aralarındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Sunulan sezgisel yöntem aracılığı ile kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin eniyilenmesi amaçlanarak, otobüs güzergâhları tasarlanmış ve bu güzergâhlardaki izleme süreleri için en uygun değerler araştırılmıştır. Sezgisel algoritma, sistem parametreleri ile güzergâh tasarım bileşenleri arasında anlamlı ilişkiler kurulabildiğini, böylece yöntemin bir kentiçi bütünleşik ulaştırma sisteminde planlama aracı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Dikkate alınan problem dahilinde algoritmanın yeterlilikleri sınanabilir.

Bu araştırmada, mevcut bir raylı ulaştırma veya metrobüs sistemine erişimde besleyici otobüs ağının tasarımı için bir eniyileme esaslı yöntem sunulmuştur. Uygulama İstanbul Metrobüs hattı özelinde, önceden tanımlanmış bir bölge üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, planlanan, yapımı süren veya kullanılan raylı sistem ve metrobüs sistemlerinin, besleyici otobüs güzergâhları bağlamında verimliliğinin hangi koşullara bağlı olarak geliştiği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Sunulan sezgisel algoritmanın özellikleri ve elde edilen bazı sonuçlar ve geliştirme önerileri aşağıda özetlenmiştir:

- Besleyici Otobüs Ağı Tasarım Problemi'nin (BOGTP) kavramsal tasarımı bir genişleyen ağaç ağı olarak belirtmiştir. Bu kavramsal gösterim, bütünleşik besleyici otobüs/raylı ulaştırma sistemi ağ yapısı ile fiziksel bir dağıtım sisteminin ağ yapısı arasındaki benzerliklerin ortaya konulmasına olanak vermiştir.
- Sunulan modelin, ulaştırma işletmecinin kararlarındaki değişikliklere ve işletim çevresindeki değişikliklere mantıklı ve uygun yanıtlar verebildiği gösterilmiştir.
- Önerilen model kullanıldığında, işçilik ve yakıt maliyetindeki değişikliklerin etkisi ile araç boyutları ve demiryolu ağ yapısındaki değişikliklerin etkisi hesap edilebilmektedir. Bu nedenle, önerilen model, ulaştırma kurumları için kullanışlı bir stratejik planlama aracı olarak kullanılabilir.
- Sunulan analitik model, çoktan-bire BOGTP için otobüs güzergâh yapısının, işletme sıklığının ve otobüs durak aralığının belirlenmesine izin vermektedir.
- Çalışma kapsamında çoktan-bire ve çoktan-çoğa BOGTP için iki ağ eniyileme modeli geliştirmiştir. Modeller, besleyici otobüs güzergâhlarının tasarımı, hizmetlerin bu güzergâhlara atanmasını ve besleyici otobüs güzergâhlarının demiryolu istasyonlarına bağlanmasını eşzamanlı olarak eniyilemiştir.

- Çalışma kapsamında sunulan ve otobüs duraklarının güzergâhlar arasında devri esaslı 3. Geliştirme prosedürünün mevcut toplam maliyeti %6 oranında azalttığı görülmüştür.
- Otobüs duraklarındaki taleplerin farklı olması güzergâh yapısında büyük değişikliklere neden olmaktadır; sabit talep durumunda 9 olan güzergâh sayısı değişken talep durumunda -talep değerlerine bağlı olarak- 15'e çıkmıştır.
- Yeni bir metrobüs istasyonun eklenmesi metrobüs ulaştırma sisteminin maliyetinde %11,47'lik artışa neden olurken, otobüs ulaştırma maliyetlerindeki azalma toplam ulaştırma maliyetini %6,96 azaltmıştır.
- Mevcut metrobüs istasyonlarından birinin kapatılması durumunda toplam metrobüs ulaştırma maliyetinde %40'ın üzerinde bir artış gözlenmiştir. Buna karşın otobüs ulaştırma maliyetindeki azalma toplam ulaştırma maliyeti aynı düzeyde tutabilmiştir.
- 75 olan otobüs kapasitesi %40'lık bir artış dikkate alınarak 105 yolcuya yükseltilmiş, bu durum güzergâh sayısında 9'dan 7'ye bir düşüşe neden olmuştur. Bunla beraber güzergâh uzunluklarında artış gözlenmiştir.
- Besleyici otobüs/demiryolu ağı tasarımının önemli bir tasarım bileşeni olan raylı sistem hizmet sıklığı, BOGTP modellerinde temsil edilmemektedir. Bu değişken daha ileri çalışmalarda sistem tasarımına dahil edilebilir.
- Önerilen modelin matematiksel formülasyonu, amaç fonksiyonda yolculuk zaman maliyeti için bir yaklaşım kullanır. Yolculuk zaman maliyetinin hassas biçimde temsil edilmesi, durakların bağlantı sırasının bilinmesini gerektirir. Ancak, böyle bir hassas gösterim, ağ modellerinin karmaşıklığını oldukça arttıracaktır.
- Otobüs durakları arasındaki uzaklıklar için gerçek değerler kullanılması halinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir; ancak, bu durumda, bağlantılara ilişkin hız kısıtlamaları, tek yön uygulamaları vd. özellikler dikkate alınmalıdır.
- Sezgisel algoritmada güzergâhların toplam sayısı bir girdiden çok çıktıdır. Bundan dolayı, tasarımcının, algoritmanın oluşturduğu güzergâhların sayıları üzerinde kontrolü yoktur. Güzergâh sayısı bir kısıt olarak probleme dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

- Anspecher, D., Khattak, A.J. ve Yim, Y., (2005), "The Demand for Rail Feeder Shuttles", *Journal of Public Transportation*, Vol. 8 (No.1)
- Ceder, A. ve Yim, Y., (2003), "Integrated Smart Feeder / Shuttle Bus Service", *California Partners for Advanced Transit and Highways*, 2003-4
- Ceder, A., (2006), "New Public Transit Operations Planning Concepts", *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*, 11-13 Oct. 2006, İstanbul
- Chang, S. K. ve Schonfeld, (1993), "Optimal Dimensions of Bus Service Zones", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 119 (No.4): 567-585
- Chien, I. J., (1995), *Optimization of Coordinated Intermodal Transit Networks*, For the Degree of Doctor of Philosophy, The University of Maryland
- Chien, I. J. ve Schonfeld, P., (1997), "Joint Optimization of a Rail Transit Line and Its Feeder Bus System", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 32 (No.3): 253-284
- Chien, I. J. ve Yang, Z. (1998), "Optimal Feeder Bus Routes on Irregular Street Networks", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 34 (No.2): 213-248
- Chien, I. J., (2005), "Optimization of Headway, Vehicle Size and Route Choice for Minimum Cost Feeder Service", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 28 (No.5): 359-380
- Chowdhury, S. M. ve Chien, I. J., (2002), "Intermodal Transit System Coordination", *Transportation Planning and Technol.*, Vol. 25: 257-287
- Güven, G., (2008), *Metrobüs Sistemlerinin Planlama, Tasarım ve İşletim Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- Grava, S., (2002), *Urban Transportation Systems*, McGraw-Hill Professional, New York
- Jerby, S. ve Ceder, A., (2005), "Optimal Routing Design for Shuttle Bus Service", *Transportation Research Board*, Jul 2005
- Kuah, G. K., (1986), *The Feeder Bus Route Design Problem*, For the Degree of Doctor of Philosophy, University of Maryland
- Kuah, G. K. (1988), "Optimization of Feeder Bus Routes and Bus Stop Spacing", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 114 (No 3): 341-354
- Kuan, S. K., Ong, H. L. ve Ng, K. M., (2005), "Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization", *Advances in Engineering Software*, 37:351-359
- Martins, C. L. Ve Pato, M. V., (1996), "Search strategies for the feeder bus network design problem", *European Journal of Operational Research*, 106:425-440
- Peng, S. ve Fan, H., (2007), "A New Computational Model for the Design of an Urban Intermodal Public Transit Network", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22:499-510
- Shrivastav, P. ve Dhingra, S. L., (2001), "Development of Feeder Routes For Suburban

Railway Stations Using Heuristic Approach”, Journal of Transportation Engineering, Jul-Aug 2001:341-354

Shrivastava, P. ve O'Mahony, M., (2006), “A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules - A genetic algorithms approach”, Transit Policy, 13:413-425

Shrivastava, P. ve O'Mahony, M., (2007), “Design of Feeder Route Network Using Combined Genetic Algorithm and Specialized Repair Heuristic”, Journal of Public Transportation, 10:109-133

Sutcliffe, E. B., (2000), “Urban Rail Systems: A planning framework to increase their success”, (yayınlanmamış)

Verma, A. ve Dhingra, S. L., (2006), “Developing Integrated Schedules for Urban Rail and Feeder Bus Operation”, Journal of Urban Planning and Development, Sep. 2006: 138-146

Wirasinghe, S. C., Hurdle, V. F. ve Newell, G. F. (1977), “Optimal Parameters for a Coordinated Rail and Bus Transit System”, Journal of Public Transportation, Transportation Science, Vol. 11 (No 4): 359-374

Vuchic, V. R. (2005) Urban Transit-Operations, Planning, and Economics. John Wiley&Sons, Inc.

Yim, Y. B. ve Ceder, A., (2006), “Smart Feeder/Shuttle Bus Service: Consumer Research and Design”, Journal of Public Transportation, Vol 9 (No 1): 19-43

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 29.11.1982

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2000 Habire Yahşi Süper Lisesi

Lisans 2000-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

Çalıştığı kurumlar

2006-2007 Mescioğlu Mühendislik Taahhüt ve Ticaret Ltd Şti.
2007-Devam Siemens A.Ş.